



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle  
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **RiskNow - Falling Rocks Excel<sup>®</sup>-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien**

**RiskNow-Falling Rocks  
Outil intégré Excel<sup>®</sup> pour le calcul de  
risques sur les galeries de protection  
contre les chutes de pierres**

**RiskNow-Falling Rocks  
Excel<sup>®</sup>-based tool for the risk analysis  
of rockfall protection galleries**

**Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich  
Institut für Baustatik und Konstruktion – IBK  
Professur für Risiko und Sicherheit**

**M. Schubert, Dr.  
M.H. Faber, Prof. Dr.**

**PRA Ingénieurs Conseils SA  
J. Jacquemoud, Dr.**

**Matrisk GmbH  
D. Straub, Prof. Dr.**

**Forschungsauftrag AGB2008/003 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**



## Vorwort

Die Risikoermittlung dient der Unterstützung der Entscheidungsfindung. Die Risikobewertung hat die Aufgabe, sicherzustellen, dass die getroffenen Entscheidungen auch gesellschaftlich akzeptierbar und Restrisiken somit ausreichend gering sind.

Methoden zur Risikoermittlung wurden in den letzten Jahrzehnten verbessert und an die Bedürfnisse der praktischen Anwendung angepasst. Effiziente und computergestützte Werkzeuge ermöglichen die Risikoberechnung auch in komplexen Systemen. Anwendung finden sie im Entwurf und in der Bemessung von Tragwerken und in der Normenkalibrierung. Risiken aus unterschiedlichen Bereichen zu berechnen, zu aggregieren und zu vergleichen, erfordert eine gemeinsame konsistente und transparente Basis. Dieses Projekt soll diesen Anforderungen genügen und die Entscheidungsfindung unterstützen.

In diesem Forschungsprojekt wurde ein Excel-basiertes Programm zur Ermittlung des Risikos an Steinschlagschutzgalerien infolge Steinschlägen entwickelt. Das Programm ist so gestaltet, dass der Anwender keine vertieften Kenntnisse in der probabilistischen Modellierung benötigt, um Risikoanalysen durchzuführen. Die Ergebnisse ermöglichen es einen Überblick über die Risiken zu erhalten und die Risiken verschiedener Gallerien zu aggregieren. Auch eine erste Abschätzung des Einflusses einiger risikoreduzierender Massnahmen kann unter Verwendung des Programms erfolgen.

Die erfolgreiche Durchführung des Projektes wurde durch die finanzielle Unterstützung des ASTRA ermöglicht. Neben der finanziellen Unterstützung war es insbesondere die Begleitkommission unter der Leitung von Herrn Michel Donzel, der das Projekt immer wieder konstruktiv unterstützt und geleitet hat und somit einen grossen Anteil am Erfolg dieses Projekts hat. Für diese engagierte Zusammenarbeit und Begleitung möchten wir besonders danken, hierunter Armand Fürst, Jean-Christoph Putallaz, Peter Matt, Willi Schuler und Beat Schneeberger.

Bedanken möchten wir uns auch bei den Experten, die nicht direkt am Projekt beteiligt waren, uns jedoch bei spezifischen Fragestellungen stark unterstützt haben. Besonderes danken wir Dr. Kristian Schellenberg für die Diskussionen in Bezug auf das Verletzbarkeitsmodell und Mathias Graf, bei dem wir Unterstützung in Fragen der Programmierung gefunden haben.

Zürich, im Juli 2010

Matthias Schubert, ETH-Zürich  
Michael H. Faber, ETH-Zürich  
Joseph Jacquemoud, Praing  
Daniel Straub, Matrisk GmbH



# INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT .....	3
ZUSAMMENFASSUNG .....	7
RÉSUMÉ .....	8
SUMMARY .....	9
<b>0. EINLEITUNG .....</b>	<b>11</b>
<b>1. TEIL I / HINWEISE ZUR PROGRAMMANWENDUNG .....</b>	<b>13</b>
1.1. ALLGEMEINE HINWEISE .....	13
1.1.1. <i>Hinweise zum Aufbau und zur Struktur</i> .....	14
1.2. SYSTEMDEFINITION .....	16
1.2.1. <i>Projekt</i> .....	17
1.2.2. <i>Galerie</i> .....	17
1.2.3. <i>Verkehr</i> .....	19
1.3. EXPOSITIONSMODELL .....	20
1.4. GENERISCHES TRAJEKTORIENMODELL .....	24
1.5. ERGEBNISSE AUS DEM TRAJEKTORIENMODELL .....	26
1.6. BERECHNUNG DER VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT .....	29
1.7. MODELL DER KONSEQUENZEN .....	32
1.8. DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE .....	34
1.9. EXPORT DER ERGEBNISSE .....	36
1.10. BEURTEILUNG MEHRER ABLÖSEZONEN IM HANG .....	37
<b>2. TEIL II / ANWENDUNGSTEST .....</b>	<b>38</b>
2.1. HINTERGRUND .....	38
2.2. PROBLEMBESCHREIBUNG UND SYSTEMDEFINITION .....	38
2.3. SYSTEMDEFINITION .....	41
2.4. EXPOSITIONSMODELL .....	43
2.5. GENERISCHE TRAJEKTORIENANALYSE .....	44
2.6. VERLETZBARKEITSMODELL / BPN .....	46
2.7. KONSEQUENZMODELL .....	48
2.8. RISIKOANALYSE – RISIKOVERTEILUNGEN .....	49
2.9. SENSIBILITÄTSANALYSE .....	51
2.9.1. <i>Einfluss der bedingten Einschlagwahrscheinlichkeit</i> .....	51
2.9.2. <i>Einfluss der Überschreitungshäufigkeit von Ereignissen</i> .....	52
2.9.3. <i>Einfluss der Einschlaggeschwindigkeiten der Steine</i> .....	52
2.9.4. <i>Einfluss des Widerstands der Galerie</i> .....	52
2.9.5. <i>Einfluss der Eindeckungshöhe</i> .....	53
2.9.6. <i>Weitere Parameter</i> .....	53
2.9.7. <i>Generelle Anmerkungen</i> .....	53
<b>3. TEIL III / HINTERGRUNDINFORMATIONEN ZUR MODELLIERUNG .....</b>	<b>55</b>
3.1. SYSTEMDEFINITION .....	55
3.2. EIGENSCHAFTEN DER STEINSCHLAGGALERIE .....	55
3.3. EIGENSCHAFTEN DES VERKEHRS .....	59

3.4.	MODELLIERUNG DER EXPOSITION .....	65
3.5.	MODELLIERUNG DES FALLPROZESSES .....	74
3.5.1.	<i>Trajektorienmodell</i> .....	75
3.5.2.	<i>Generisches Hangmodell</i> .....	76
3.5.3.	<i>Beschreibung der geologischen Eigenschaften des Hangs</i> .....	78
3.6.	MODELLIERUNG DER VERLETZBARKEITSKURVEN DER STEINSCHLAGSCHUTZGALERIE .....	82
3.7.	BAYES'SCHES NETZ ZUR BERECHNUNG DER VERSAGENSWAHRSCHEINLICHKEIT DER STEINSCHLAGGALERIE.....	90
3.7.1.	<i>Einleitung zu Bayes'schen Netzen</i> .....	90
3.8.	MODELLIERUNG DER TREFFERWAHRSCHEINLICHKEITEN VON FAHRZEUGEN .....	100
3.9.	MODELLIERUNG DER KONSEQUENZEN .....	105
3.10.	RISIKOBERECHNUNGEN .....	107
<b>4.</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b> .....	<b>109</b>
4.1.	SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	109
4.2.	FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARF .....	110
4.3.	UMSETZUNG IN DER PRAXIS .....	111
<b>5.</b>	<b>ARAMIS FORMULAR 3</b> .....	<b>112</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENZEN</b> .....	<b>117</b>

## Zusammenfassung

Die Kenntnis über die Höhe des Risikos infolge von Naturgefahren ermöglicht die strategische Planung von Massnahmen und deren Budgetierung. Die finanzielle Planung und die gesellschaftliche Verantwortung erfordert, die Sicherheit auf den Strassen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln bestmöglich zu gewährleisten und rational zu begründen. Betrachtet man die hohe Anzahl an gefährdeten Streckenabschnitten und die hohen Kosten, die mit dem Bau und dem Unterhalt von Schutzeinrichtungen für Naturgefahren verbunden sind, so ist eine konsistente Risikoermittlung erforderlich. Um diese Aufgaben zu bewältigen ist es notwendig, dass Methoden und Werkzeuge zur Risikoermittlung und Risikobewältigung entwickelt werden.

Die zurzeit angewendeten Methoden für die Risikoermittlung im Bereich von Naturgefahren haben prinzipielle Nachteile. Einige verwendete Methoden sind zu stark vereinfacht, so dass die resultierenden Unsicherheiten in den Aussagen sehr gross werden, was zufolge hat, dass mit diesen einfachen Verfahren lediglich Hinweise auf das Risiko berechnet werden können. Eine strategische Planung sollte nicht auf den Resultaten dieser Verfahren basieren. Bei komplexeren Verfahren ist der Nachteil darin zu sehen, dass sie spezielle Kenntnisse in der probabilistischen Modellierung erfordern, und dadurch relativ aufwendig und nur für spezielle Anwendungen und Fragestellungen sinnvoll und durchführbar sind. Diese Verfahren ermöglichen jedoch die strategische Planung, die für das Management eines grossen Portfolios an Objekten notwendig ist. Detaillierte Einzelstudien sind jedoch aus Ressourcengründen nicht für das gesamte Portfolio durchführbar.

Bei Fragestellungen bezogen auf das Portfolio von Objekten mit ähnlichen Charakteristiken besteht allerdings die Möglichkeit, ein detailliertes Modell für die Risikoanalyse einmal mit einem gewissen Aufwand generisch zu erstellen, welches dann für die Risikoermittlung des ganzen Portfolios angewendet werden kann. Generische Risikoermittlungsmodelle ermöglichen die schnelle und effiziente Risikoermittlung und bieten aufgrund ihrer probabilistischen Basis alle Möglichkeiten der strategischen Planung.

In diesem Projekt wurde ein generisches Modell, welches in eine Microsoft Excel<sup>®</sup> Umgebung eingebettet ist, entwickelt, mit dem das Risiko unter Berücksichtigung der orts- und objektspezifischen Charakteristiken an Steinschlaggalerien berechnet werden kann. Als Ergebnis aus diesem Program erhält der Anwender neben dem Erwartungswert auch die Verteilung des Risikos, sowohl getrennt für unterschiedliche Risiko-Beiträge, als auch in aggregierter Form. Um das Risiko infolge Steinschlags zu ermitteln, ist in der Regel eine Interaktion zwischen Geologen und Ingenieuren notwendig. Diese Interaktion stellt sicher, dass die natürlichen Prozesse und das Gefährdungspotential adäquat beschrieben werden. Die Schnittstellen sind in diesem Programm klar definiert. Der Ablöseprozess des Steins, der Fallprozess, die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie und das Konsequenzmodell werden explizit beschrieben und können getrennt voneinander betrachtet werden.

Der Fokus der Anwendung wird in diesem Projekt sowohl auf die Benutzerfreundlichkeit, als auch auf die Konsistenz, die Homogenität und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei gleichem Detaillierungsgrad gelegt. Die probabilistische Analyse unter Verwendung von Bayes'schen Netzwerken läuft dabei im Hintergrund ab, so dass für den Anwender kein Fachwissen im Gebiet der probabilistischen Modellierung erforderlich ist.

Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist, am Beispiel des Steinschlags zu zeigen, wie generische probabilistische Modelle zukünftig auch für andere Sicherheitsbereiche entwickelt werden können und so die Entscheidungsträger in der Praxis unterstützen können.

## Résumé

La connaissance de l'ampleur du risque lié aux dangers naturels permet la planification stratégique des interventions et constitue un moyen efficace de gestion budgétaire. Une planification financière respectueuse de la responsabilité sociale exige de garantir, avec les moyens mis à disposition, la meilleure sécurité possible sur le réseau des routes. Cette sécurité est à justifier de manière objective. Considérant le grand nombre de tronçons exposés aux dangers naturels ainsi que les coûts élevés de la construction et de l'entretien des ouvrages de protection, une évaluation du risque est nécessaire d'une part pour des motifs sociaux et d'autre part pour des raisons économiques. La gestion de ces tâches requiert le développement de méthodes et d'outils permettant l'évaluation et la maîtrise du risque.

Dans le domaine des dangers naturels, les méthodes actuellement utilisées pour l'évaluation du risque présentent le principal inconvénient d'être trop fortement simplifiées. Les résultats ainsi obtenus sont entachés d'insécurité très élevées, ce qui a pour conséquence que ces procédures simples ne livrent que des valeurs indicatives du risque. Une planification stratégique ne peut et ne devrait pas se baser sur les résultats de ces procédures. Dans le cas où les procédures sont complexes, la difficulté réside alors dans le fait qu'elles nécessitent des connaissances spécifiques de la modélisation statistique. Elles deviennent par conséquent relativement lourdes et ne sont raisonnablement utilisables que pour des applications ou des problématiques spécifiques. Ces procédures permettent cependant l'établissement d'une planification stratégique nécessaire pour la gestion d'un grand parc d'ouvrages. Des études détaillées sont disproportionnées et ne peuvent pas être entreprises pour chacun des objets du parc.

Dans le cas d'une problématique qui concerne un parc d'ouvrages présentant des caractéristiques semblables, la possibilité existe d'établir un modèle générique détaillé pour l'analyse du risque. Ce modèle pourra alors servir à l'analyse du risque de tout le parc d'ouvrages. De tels modèles génériques d'évaluation du risque rendent possible une évaluation rapide et efficiente. Du fait de leur base probabiliste, ils offrent toutes les possibilités pour une planification stratégique.

Dans le cadre du présent projet, un modèle de calcul générique a été développé sur une base Microsoft Excel, qui permet de calculer le risque en prenant en compte les caractéristiques locales et les spécificités de galeries de protection contre les chutes de pierres. En plus du résultat de la valeur attendue du risque, l'utilisateur obtient également sa distribution, soit de manière séparée pour les différents risques traités, soit de manière agrégée. L'interactivité entre géologue et ingénieur est en général nécessaire pour évaluer le risque lié aux chutes de pierres. Elle offre les meilleures garanties d'une saisie correcte des processus naturels et des potentiels de risque. Dans le programme Excel développé, les interfaces sont clairement localisées. Le processus de mobilisation et la trajectographie des blocs ainsi que la probabilité de ruine de la galerie et la caractérisation des conséquences (dommages) possibles sont décrites explicitement et peuvent être traités individuellement.

Les objectifs recherchés par cette application visent à assurer la consistance, l'homogénéité et la possibilité de comparer des résultats pour un degré de détail identique, avec un programme de calcul simple d'utilisation. L'analyse probabiliste, qui utilise le calcul de réseaux de Bayes, s'effectue en arrière-plan, si bien que l'utilisateur n'a pas besoin de disposer de compétences scientifiques dans le domaine de la modélisation probabiliste.

Ce projet a aussi pour but de démontrer, à l'exemple du cas des chutes de pierres, comment pourront être développés de futurs modèles probabilistes génériques dans d'autres domaines de la sécurité; comme aides à la décision dans la pratique.

## Summary

The knowledge of the level of risk associated with natural hazards enables the strategic planning of risk reducing measures and provides an efficient way of budgeting. Financial planning and societal responsibility require that a maximum level of safety on the road network is achieved under consideration of the available resources. Additionally, decisions have to be rational and justifiable. Considering the high number of road sections vulnerable to rockfall and the high costs associated with the construction and maintenance of protection measures, a consistent risk assessment is crucial. In order to fulfill these requirements it is necessary to develop tools for risk assessment and risk management.

The currently used methods for risk assessment in the field of natural hazards have fundamental disadvantages. Some of the methods are greatly simplified, so that the uncertainties in the results are very large (but neither quantified nor considered). Such procedures can only provide a general idea of the total risk. Strategic planning should therefore not be performed based on the results of such procedures. More complex procedures have the disadvantage that they require specialized knowledge in probabilistic modeling and are therefore relatively expensive. Such procedures are reasonable for special applications and problem settings. They also allow for strategic planning and managing of large portfolios.

For problem settings related to a portfolio of assets with similar characteristics, a detailed generic model can be developed even if this requires considerable effort. This generic model can subsequently be used to determine the risk of the entire portfolio, under consideration of the special characteristics of the single assets. Such generic risk models allow for rapid and efficient risk assessment on a probabilistic basis and thus they provide different possibilities for strategic planning.

Within the present research project a generic, probabilistic, Microsoft Excel<sup>®</sup>-based model is developed which allows calculating the risk due to rockfalls on rockfall protection galleries, taking into account the site- and object-specific characteristics of the gallery, the slope, the geology and the road traffic. Using the input of the special characteristics, the risk and the distribution of the risk are calculated – both in an aggregated form and separately for the different types of risks such as property damage or expected fatalities.

In order to determine the risk due to rockfalls, a strong interaction between geologists and engineers is needed. This interaction ensures that the natural processes and the associated potential risks are taken into account in an adequate manner. The corresponding interfaces are clearly defined in the developed procedure. The detachment process of the stone, the falling process, the failure of the gallery and the consequence model are described explicitly and can be considered separately. The present research project focuses on the applicability in practice and its consistency as well as the homogeneity and the comparability of the results by using the same level of detail. The probabilistic analysis using Bayesian networks runs in the background; thus, almost no expertise in the field of probabilistic modeling is required by the user.

Another aim of this project is to illustrate the way how generic probabilistic models can be developed in other safety-relevant fields in order to support decision making.



## 0. Einleitung

Transportwege sind die Lebensadern, die die wirtschaftliche Entwicklung von Regionen fördern und ermöglichen und die wirtschaftliche Prosperität von Gesellschaften bestimmen. Vermeiden lassen sich die Risiken, die von Naturgefahren ausgehen, nicht. Aber es ist möglich, rational zu entscheiden, wie der maximale Schutz mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen erreicht werden kann. Dafür ist es notwendig, dass Modelle existieren, die eine solche Betrachtung ermöglichen. Die Unsicherheiten in der Entscheidungsanalyse, gerade im Bereich der Naturgefahren, verleiteten in der Vergangenheit Experten immer wieder dazu, einen extremen Standpunkt einzunehmen: Die Unsicherheiten seien zu gross und könnten folglich nicht in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden. Dieser Schluss stellt eine Fehlinterpretation der Situation dar; gerade weil die Unsicherheiten gross sind und viele verschiedene natürliche Prozesse und Modelle Beiträge zu den Unsicherheiten leisten, sollten diese berücksichtigt werden. Dies wird durch eine probabilistische Formulierung der Problemstellung ermöglicht.

Die Anwendung und Entwicklung solcher probabilistischer Modelle ist sehr aufwendig, zeit- und damit kostenintensiv. Die Entwicklung generischer hierarchischer Modelle zur Systembeschreibung bietet die Möglichkeit, effizient Risikoanalysen durchzuführen (siehe z.B. Schubert und Faber (2008a)). Diese Modelle haben wesentliche Vorteile gegenüber den klassischen Ereignisbaummethoden, die vielfach heute noch Anwendung finden. Sie ermöglichen nicht nur die konsistente Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Analyse, sie erlauben auch eine physikalische, kausale und phänomenologische Modellierung der Zusammenhänge.

Auf dieser Basis wurde in diesem Projekt ein Excel-basiertes Programm zur Risikoermittlung an Steinschlaggalerien entwickelt. Als Basis und Plattform zum Aufbau des Programms wurden Bayes'sche Probabilistische Netze verwendet. Grundlagen hierzu finden sich z.B. in Jensen und Nielsen (2007). Eine kurze Einführung und Hinweise auf weiterführende Literatur wird auch in Schubert und Faber (2008a) gegeben. Die Umsetzung der gesamten Modellierung in einem Excel-basierten Programm bietet dem Anwender alle Vorteile einer konsistenten probabilistischen Modellierung, erfordert aber keine vertieften Kenntnisse der Probabilistik.

Der **erste Teil** des Dokuments (Kapitel 1) gibt eine einleitende **Einführung zur Verwendung der Software** und wendet sich hauptsächlich an den Erstanwender. Es werden die Eingabemasken erklärt und es wird dargestellt, welche Ergebnisse im Laufe der Risikoermittlung berechnet werden. Es werden keine Hintergründe der Modellierung beschrieben und damit sichergestellt, dass ein Anwender nach kurzer Einarbeitungszeit die Software einsetzen kann.

Im **zweiten Teil** des Dokuments (Kapitel 2) wird eine **Anwendung der Software** für die Berechnung des Risikos einer realen Steinschlaggalerie gezeigt. Dieser Teil dient als Beispiel und soll die generelle Anwendbarkeit zeigen.

Der **dritte Teil** des Dokuments (Kapitel 3) ist als **Hintergrunddokument** zu verstehen und wendet sich an Anwender, die genauere Angaben zu den Berechnungen benötigen. Dieser Teil ist daher eher ein Nachschlagewerk, um die Annahmen und Grundlagen bestimmter Aspekte zu verstehen. Zum einen wird dadurch grösstmögliche Transparenz gewährleistet und dem Anwen-

## 0. Einleitung

der wird es ermöglicht, das Programm nicht als „Black-Box“ zu erfahren. Zum anderen kann jederzeit geprüft werden, ob die verwendeten Modelle noch dem aktuellen Stand der Forschung entsprechen. Durch den modularen Aufbau der Methodik können prinzipiell die einzelnen Bausteine ausgetauscht werden, sobald bessere Methoden zur Verfügung stehen.

Die Verwendung von Softwaretools zur Durchführung von Risikoanalysen sollte nicht dazu verleiten, die generellen Anforderungen an Risikoanalysen zu vergessen. Als Basis für die Anwendung sollten die Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung (Faber et al. (2008)) sowie die Grundlagen des JCSS gesehen werden (Faber (2008)). Sie repräsentieren den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der Risikoanalysen und der gesellschaftlichen Entscheidungsfindung.

Die Grundprinzipien der Risikoanalysen werden als Grundlage betrachtet und als bekannt vorausgesetzt. Dies betrifft insbesondere die folgenden Aspekte:

- Systemdefinition
- Modellierung von Konsequenzen
- Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Risikoermittlung
- Aggregation von Risiken
- Bewertung von Risiken

Zu Beginn jeder Risikoanalyse sind die Fragestellung und der Entscheidungsträger zu identifizieren. Dies ist ein wesentlicher Teil der Analyse, der darüber entscheidet, welche Konsequenzen zu berücksichtigen sind und wer diese Konsequenzen aus den Entscheidungen zu tragen und zu verantworten hat. Das hier entwickelte Werkzeug ermöglicht die Berücksichtigung verschiedener Typen von Konsequenzen. In der verwendeten Methodik wird das berechnete Risiko in verschiedene Risikotypen unterteilt, die je nach Fragestellung und Entscheidungsträger eine unterschiedliche Relevanz haben und je nachdem unterschiedlich aggregiert werden müssen.

Die Ergebnisse, die mit dieser Software produziert werden, entsprechen einem nominellen jährlichen Risiko, d.h. menschliche Fehlhandlungen sowohl im Entwurf der Schutzbauten als auch in der Anwendung des hier entwickelten Programms, der Auswertung und der Interpretation der Ergebnisse werden nicht berücksichtigt. Desweiteren wird die räumliche Verteilung der Steinschlagereignisse nicht berücksichtigt. Daher werden Risiken infolge Steinschlägen, die ausserhalb der Galerie die Strasse treffen, nicht berechnet. Die Galerien, die hier berücksichtigt werden, haben Betondecken und einer Eindeckung aus einer Kies-Sand-Schicht. Leichte Steinschlaggalerien und Galerien mit einem Gewölbe können nicht direkt (oder nur approximativ) beurteilt werden, da sie im Verletzbarkeitsmodell nicht berücksichtigt sind. Die Einwirkung an ihrem Standort kann dennoch ermittelt werden, um unter Verwendung eines adäquaten Verletzbarkeitsmodells auch das Risiko zu berechnen.

Ziel der Risikoanalyse mit dieser Software ist, die Risiken an Galerien infolge Steinschlägen zu ermitteln, einen Überblick über die Risiken in einem Portfolio von Galerien zu gewinnen und zu erkennen, an welchen Galerien es sinnvoll ist, riskoreduzierende Massnahmen durchzuführen.

# 1. Teil I / Hinweise zur Programmanwendung

## 1.1. Allgemeine Hinweise

Das Programm baut auf einer Microsoft Excel 2007 - Umgebung (Microsoft® Office Excel® 2007 (12.0.6331.5000) SP1 MSO (12.0.6320.5000)) auf und ist in Microsoft Visual Basic (VBA Retail 6.5.1024) programmiert (Betriebssystem Windows Vista SP 1). Daraus ergeben sich die folgenden Systemvoraussetzungen für die Anwender der Software:

- Betriebssystem: Windows 7, Windows Vista oder Windows XP
- 32 Bit-System
- mindestens 2 GB Arbeitsspeicher
- mindestens 2.0 GHZ Prozessorleistung
- DVD-Rom Laufwerk
- vollständige Installation von Microsoft® Office Excel® 2007
- Aktivierung der Makros in Microsoft® Office Excel®
- Aktivierung der ActiveX Steuerelemente
- Aktivierung der Einstellung Zugriff auf VBA Projekt zulassen in Microsoft® Office Excel®
- Darstellung optimiert für eine Bildschirmauflösung von 1600 x 1200 Pixel

Die vorliegende Version des Programms (vers. 1.0) kann nur von DVD aus gestartet werden. Die DVD ist mit einer Autostartfunktion ausgestattet. Ist die Autostartfunktion des Computers deaktiviert, so kann das Programm über die Datei *start.exe* im Root-Verzeichnis der DVD gestartet werden.

Die Software erfordert die Registrierung einer ActiveX-Komponente im Betriebssystem. Das Programm *start.exe* prüft zunächst, ob diese Komponente bereits installiert ist. Ist dies nicht der Fall, wird eine Installationsroutine gestartet. Diese registriert die ActiveX-Komponente und speichert die Datei *Falling\_rocks.ocx* lokal auf dem Computer. Anschliessend startet automatisch das Excel-basierte Programm *RisKnow Falling Rocks*. Bei jedem weiteren Gebrauch der Software auf diesem Computer wird die Installationsroutine nicht mehr aufgerufen.

Während der Verwendung des Programms muss die DVD eingelegt sein, da das Programm auf verschiedene Komponenten auf der DVD während der Analyse zugreift.

Das typische Office 2007 Ribbon ist ausgeblendet und die meisten bekannten Excel-Funktionen deaktiviert. Die benötigten Funktionen werden über eigens kreierte Buttons angesteuert. Da diese erste Version nur auf DVD läuft, können die Ergebnisse der Risikoanalyse nicht gespeichert werden. Zur Dokumentation der Risikoanalyse kann eine Exportfunktion verwendet werden, die am Ende der Risikoanalyse über einen Button angewählt werden kann. Die Exportfunktion generiert ein Microsoft® Office Word® Dokument (*.docx* file), welches alle Eingaben des Anwenders und die Resultate der Risikoanalyse enthält.

### 1.1.1. Hinweise zum Aufbau und zur Struktur

Das Programm ist analog zum generellen Vorgehen bei Risikoanalysen gegliedert. Das Programm beinhaltet die folgenden Schritte:

- Systemdefinition
- Beschreibung der Exposition
  - Modellierung des Ablöseprozesses
  - Modellierung des Fallprozesses
- Beschreibung der Verletzbarkeit
  - Modellierung der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie
  - Modellierung der Trefferwahrscheinlichkeiten von Fahrzeugen
  - Modellierung der Todesfallwahrscheinlichkeiten
- Modellierung der Konsequenzen
- Berechnung und Darstellung des Risikos

Der allgemeine Aufbau der Oberfläche ist am Beispiel der Systemdefinition in Abbildung 1 dargestellt.

Im oberen Bereich befindet sich die Navigationsleiste und ist durch eine schwarze Linie von der Eingabemaske abgetrennt. Die Navigationsleiste enthält zu jedem Zeitpunkt der Analyse nur die auswählbaren Schritte. In Abbildung 1 sind dies die grünen abgerundeten rechteckigen Schaltflächen, die mit *Start* und *System definition* bezeichnet sind.

Am linken oberen Rand der Navigationsleiste ① ist die Überschrift des jeweiligen Teils der Risikoanalyse angegeben (Nr. ②).

In der Eingabemaske werden alle notwendigen Eingaben getätigt. Dafür stehen alle weissen Felder zur Verfügung (Nr. ③). In den folgenden Kapiteln wird detailliert beschrieben, welche Eingaben notwendig sind und in welchem Format diese einzugeben sind.

Nach jeder Eingabe muss die Eingabe durch den Anwender bestätigt werden. Die Bestätigung erfolgt jeweils über die abgerundeten quadratischen Schaltflächen (Nr. ④). Die Gültigkeit der Eingabe wird überprüft und die Werte eingelesen. Sind die Angaben konform zu den Anforderungen, so erscheint in der Navigationsleiste der nächste auswählbare Navigationsschritt. Im Fall der Systemdefinition ist dies ein Button mit der Aufschrift *Exposure model*. Die Navigationsleiste baut sich so während der Risikoanalyse systematisch auf. Sind Werte nicht konform, so erscheint eine Warnmeldung. Nichtkonformität bedeutet, dass einige Werte beispielsweise nicht negativ werden können.

Damit ist es möglich, jederzeit die gemachten Eingaben zu überprüfen. Diese Eingaben bleiben während der gesamten Analyse erhalten und gehen erst verloren, wenn das Programm geschlossen wird.

Nicht immer sind alle notwendigen Informationen vorhanden, um eine Analyse durchführen zu können. In diesem Softwaretool werden, wenn Informationen fehlen, a-priori Verteilungen ver-

wendet. Das ermöglicht es, Analysen auch bei fehlender Information durchzuführen. Die Unsicherheiten sind in diesem Fall grösser. Der Anwender kann die Unsicherheiten reduzieren, wenn er weitere Informationen sammelt. Dies ist jedoch meist mit Kosten verbunden und sollte daher mit dem Auftraggeber abgestimmt sein.

**System definition**

Start System definition

1 Navigationsleiste

2 Überschriften

**Gallery**

Name of the gallery	Testgalerie
Name of the road	N0
Geological region	Helvetic Nappes
Year of construction [aaaa]	1980
Thickness of the concrete ceiling [ m ]	0.8
Cushion layer [ m ]	0.7
Length [ m ]	142.5
Length of a section [ m ]	5
Number of lanes per direction [#]	2
Directions [#]	1

**Project**

Name of the author	Mustermann
Project ID	1.234.56
Project name	Mustergalerie
Client	Musteramt
Date	21.01.2009
Version	1.001

3 Eingabebereich

Affirm system definition

4 Bestätigung der Eingabe

**Traffic characteristics**

	$\mu$	$\sigma$	Distribution
AADT per direction [Vehicles per day]	20000	1000	Log-Normal
HGV [% of AADT]	8		
Congestions hours [ $a^{-1}$ ]	120	10	Log-Normal
Signalized speed [km/h]	80		

Abbildung 1: Eingabemaske der Systemdefinition.

## 1.2. Systemdefinition

Die Gesamtheit aller Objekte, Ereignisse, Konsequenzen, Annahmen, Vereinbarungen und Rahmenbedingungen, welche für eine bestimmte Risikobeurteilung notwendig sind, bildet das zu betrachtende System. In der Systemdefinition wird das System abgegrenzt und beschrieben, indem sämtliche relevante Fakten zusammengetragen werden (Informationen, Daten, Expertenwissen, Modelle, etc.). Die Abgrenzung des Systems hängt vom Entscheidungsträger und seiner Fragestellung ab.

Sollen die Ergebnisse unterschiedlicher Risikoermittlungen miteinander verglichen oder zusammengefasst werden, ist es entscheidend, dass die Systemdefinitionen in den wesentlichen Punkten übereinstimmen bzw. kompatibel sind. Die Systemdefinition bildet die Basis für die transparente Dokumentation der Vereinbarungen, der verwendeten Daten und der getroffenen Abgrenzungen und Annahmen. Die folgenden Aspekte sollten bei der Systemdefinition beachtet werden:

- Die Fragestellung sowie der Aufgaben- und Verantwortungsbereich des Entscheidungsträgers ist gemeinsam mit diesem zu klären.
- Die Art der Erhebung von Information über das System ist der Fragestellung anzupassen.
- Die Elemente des Systems, die für die Risikobeurteilung benötigt werden, sind abzugrenzen und zu beschreiben.

Mit der Klärung der Fragestellung wird erreicht, dass die weitere Systemdefinition konsistent mit dem Verantwortungs- und Einflussbereich des Entscheidungsträgers und mit seinen Anforderungen an die Risikobeurteilung erfolgt. Ebenso wird über die Definition der Fragestellung der Umfang und Detaillierungsgrad sowie der zu wählende methodische Ansatz mit gesteuert. Die abschliessende Ausgestaltung der Fragestellung und des dafür erforderlichen Ansatzes erfolgt erst nach der qualitativen Risikoermittlung, wenn die Szenarien ausgearbeitet und diskutiert worden sind, das Verständnis des betrachteten Systems also in qualitativer Hinsicht vervollständigt worden ist. Der Begriff "Szenarien" wird hier nicht im Sinne von Wiederkehrperioden verstanden, sondern ist wesentlich allgemeiner gefasst. Zu den Szenarien gehört beispielsweise die Definition und Beschreibung der potentiellen Ablösestellen von Steinen im Hang.

Die Klärung und das gleiche gemeinsame Verständnis der Fragestellung unter allen Beteiligten sind von zentraler Bedeutung für die Risikoermittlung. Konkret ist zu klären und festzuhalten, für wen die Risikoermittlung durchgeführt wird. Die Fragestellung für die Risikoermittlung ist im Allgemeinen eng gekoppelt mit einer Entscheidungssituation. In vielen Fällen ist es so, dass derjenige, der die Entscheidung zu treffen hat, die Entscheidungen für einen Auftraggeber oder für die Organisation, die ihm die Entscheidungsgewalt übertragen hat, trifft. Es ist wichtig, diese Sachverhalte zu Beginn eines Projekts in der Systemdefinition zu klären und schriftlich festzuhalten.

Eine Softwareanwendung kann nur begrenzt für eine transparente und vollständige Systemdefinition sorgen. Die Fragestellungen, die man mit einer Risikoanalyse einer Steinschlagalerie beantworten möchte, können vielfältig sein. So kann zum Beispiel der Einfluss der Reduktion von Unsicherheiten auf das Gesamtrisiko im Rahmen einer pre-posterior Entscheidungsanalyse unter

Verwendung des Softwaretools untersucht werden (siehe z.B. Raiffa und Schlaifer (2000)). Um Einschränkungen zu vermeiden, sollte die Systemdefinition als Rahmen der gesamten Risikoermittlung gesehen werden. Diese sollte gut dokumentiert werden und zusätzlich zu notwendigen Angaben zur reinen Risikoermittlung erfolgen.

### 1.2.1. Projekt

Alle Eingaben zum Projekt haben rein informativen Charakter. Bis auf das aktuelle Datum (*Date*), welches vom Programm vorgegeben ist, können die Felder beliebig gefüllt werden. Es gibt keine Prüfung der Felder. Sie dienen lediglich der Dokumentation des Projektes. Abbildung 2 zeigt die Eingabemaske für die Projektbeschreibung.

Project	
Name of the author	Mustermann
Project ID	1.234.56
Project name	Mustergalerie
Client	Musteramt
Date	21.01.2009
Version	1.001

Abbildung 2 : Eingabemaske für die Projektbeschreibung.

### 1.2.2. Galerie

Ein Teil der Systemdefinition sind die Informationen, die über die Steinschlaggalerie zur Verfügung stehen. In Abbildung 3 ist die Eingabemaske für die Charakteristiken der Steinschlaggalerie gegeben. Rein informativen Charakter haben der Name der Galerie (*Name of the gallery*) und der Name der Strasse, den sie schützt (*Name of the road*). Diese Angaben werden in der Berechnung nicht verwendet.

Die geologische Region (*Geological region*), in der sich die Galerie befindet, wird als Indikator für das vorliegende Gestein und Hangcharakteristiken verwendet. Der Anwender kann zwischen den folgenden vier verschiedenen Regionen wählen:

- Helvetische Decken (*Helvetic Nappes*)
- Penninische Kappen (*Penninic Nappes*)
- Gotthard- und Aaremassiv (*Gotthardmassiv Central*)
- Andere (*Others*)

Diese Information wird in der Berechnung der Trajektorien der Steinschläge benötigt, um den Energieverlust beim Fallprozess berücksichtigen zu können. Es wurden bewusst tektonische Gebiete zur Beschreibung der Geologie benutzt. Die Überlagerung der geologischen und der tektonischen Karten der Schweiz zeigt, dass sich die Kategorisierung der geologischen Eigenschaften

## 1. Teil I / Hinweise zur Programmanwendung

in den Steinschlaggefährdeten Gebieten in der Schweiz sehr gut mit der Tektonik deckt. Dadurch lassen sich die Hänge für den Anwender einfacher bestimmten Charakterisken zuordnen.

Das Baujahr (*Year of construction*) der Galerie dient als Indikator für das Verletzbarkeitsmodell der Galerie. In den unterschiedlichen Baujahren wurden verschiedene Materialien (z.B. Betone) verwendet. Dies ist insbesondere auf die unterschiedlichen Normen zurückzuführen. Ist das Baujahr der Galerie unbekannt, so kann *N/A* (engl. für *Not Available*) in das Feld eingegeben werden. In diesem Fall wird die Häufigkeitsverteilung der Baujahre der Steinschlaggalerien in der Schweiz berücksichtigt. Kennt der Anwender das exakte Baujahr nicht, so kann er auch das ungefähre Baujahr angeben. Diese Information ist meist besser, als keine Angabe zu machen.

Das Feld *Thickness of the concrete ceiling* berücksichtigt die Dicke der Galeriedecke. Auch hier kann *N/A* eingegeben werden, wenn die Dicke der Galeriedecke nicht bekannt ist.

Gallery	
Name of the gallery	Testgalerie
Name of the road	N0
Geological region	Helvetic Nappes
Year of construction [aaaa]	1980
Thickness of the concrete ceiling [ m ]	0.8
Cushion layer [ m ]	0.7
Length [m]	142,5
Length of a section [m]	5
Number of lanes per direction [#]	2
Directions [#]	1

Abbildung 3: Eingabemaske für die Charakteristiken der Steinschlaggalerie.

Ebenso wie die Dicke der Galerie ist auch die Höhe der Eindeckung entscheidend für den Widerstand und den Versagensmechanismus der Galerie beim Einschlag eines Steins. Im Feld *Cushion layer* kann die Höhe der Eindeckung angegeben werden. Auch hier gibt es die Möglichkeit *N/A* einzugeben, wenn die Eindeckungshöhe unbekannt ist.

Der Indikator *Length*, der die Länge der Galerie berücksichtigt, geht nicht in die Risikoanalyse ein und hat nur informativen Charakter. Zur Berechnung des Risikos ist der Fallprozess zweidimensional modelliert. Die räumliche Ausdehnung wird nicht berücksichtigt.

Hingegen ist die Länge der Bauabschnitte (*Length of a section*) in der Galerie, die in der Regel dem Stützenabstand entsprechen, für die Risikoanalyse notwendig. Nach einem Versagensereignis wird lediglich der Abschnitt ersetzt, der vom Ereignis betroffen ist.

Um die Strasse zu beschreiben, die von der Galerie geschützt wird, werden die Anzahl der Fahrspuren pro Richtung (*Number of lanes per direction*) und die Anzahl an Richtungen (*Directions*) benötigt. Diese Indikatoren dienen der Bestimmung der direkten und indirekten Trefferwahrscheinlichkeiten von Fahrzeugen, wenn die Galerie durch ein Steinschlagereignis versagen sollte.

### 1.2.3. Verkehr

Der Verkehr wird durch vier Indikatoren beschrieben. Die Eingabemaske für die Verkehrscharakteristiken ist in Abbildung 4 dargestellt. Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) auf der Strasse pro Richtung (*Annual average daily traffic (AADT) per direction*) wird als lognormale Wahrscheinlichkeitsverteilung modelliert. Der Anwender kann den Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  des DTV angeben. Sind einer oder beide Parameter der Verteilung unbekannt, so kann hier ebenfalls *N/A* in die Felder eingegeben werden.

Traffic characteristics	$\mu$	$\sigma$	Distribution
	AADT per direction [ <i>Vehicles per day</i> ]	20000	
HGV [% of AADT]	8		
Congestions hours [ $a^{-1}$ ]	120	10	Log-Normal
Signalized speed [ <i>km/h</i> ]	80		

Abbildung 4: Eingabemaske für die Verkehrscharakteristiken

Der Anteil des Schwerlastverkehrs SLV (*Heavy Good Vehicles HGV*) wird prozentual aus dem DTV ermittelt. Auch hier kann der Anwender *N/A* eingeben.

Die Staustunden auf der Strecke (*Congestion hours*) pro Jahr beeinflussen die Trefferwahrscheinlichkeit der Fahrzeuge bei Steinschlagereignissen, die zum Versagen der Galerie führen. Die Unsicherheit in den Staustunden wird berücksichtigt, indem die Staustunden als lognormalverteilte Zufallsvariable modelliert werden.

Die signalisierte Geschwindigkeit (*Signalized speed*) wird als Indikator für die Fahrgeschwindigkeit verwendet und beeinflusst ebenfalls die direkte und insbesondere die indirekte Treffer- und Todesfallwahrscheinlichkeit bei Steinschlagereignissen.

Nachdem alle Eingaben gemacht worden sind, können diese über den Button *Affirm system definition* bestätigt werden. Die Systemdefinition ist damit abgeschlossen und es kann mit der Modellierung der Exposition begonnen werden. Zu diesem Programmmodul wechselt man durch die Betätigung des Buttons *Exposure model*, der jetzt in der Navigationsleiste verfügbar ist.

### 1.3. Expositionsmodell

Das Expositionsmodell beschreibt die Häufigkeiten von Ablöseereignissen an der Ablösestelle. In einem Hang können mehrere Ablösezonen existieren. Nimmt man an, dass die Ereignisse von verschiedenen Ablösezonen in einem Hang stochastisch unabhängig sind, so kann für jede einzelne Zone die Analyse separat durchgeführt werden und die Ergebnisse später addiert werden.

Das Modell berücksichtigt nur Steine mit einem bestimmten Volumen. Es wird angenommen, dass Steine, die kleiner als  $0.1m^3$  sind, die Galerien nicht gefährden. Steinschläge, die Grösser als  $50m^3$  sind, stellen Ereignisse dar, die zu gross sind als das Steinschlaggalerien einen effizienten Schutz bieten könnten. Der hier berücksichtigte Bereich zwischen  $0.1m^3 - 50m^3$  ist in sieben Bereiche unterteilt. Dabei wird der untere Volumenbereich, über den im Allgemeinen mehr Informationen zur Verfügung stehen, feiner diskretisiert als der Volumenbereich, in dem Ereignisse selten eintreten. In Abbildung 5 ist die Diskretisierung des Ablösevolumens in der Spalte mit der Überschrift *Range* angegeben.

Das repräsentative Volumen entspricht dem Mittel zwischen minimalem und maximalem Volumen im jeweiligen Bereich. Für jeden der definierten Volumenbereiche kann der Anwender die Überschreitungshäufigkeit angeben. Die Kenntnis über die Häufigkeit – und damit auch über die Überschreitungshäufigkeit eines Ablöseereignisses mit einem bestimmten Volumen – ist mit Unsicherheiten behaftet. Um diese Unsicherheit in der Berechnung berücksichtigen zu können, werden nicht die Mittelwerte der Überschreitungshäufigkeiten, sondern charakteristische Werte der Verteilung der Überschreitungshäufigkeit zur Berechnung benötigt.

Für die Bestimmung dieser Werte können in situ verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Liegen keine Daten oder Beobachtungen vor, so kann der Experte diese Werte auch aus seiner Erfahrung abschätzen und durch den Quantilwert gleichzeitig die Unsicherheit in seiner Einschätzung angeben.

Es wird angenommen, dass die Überschreitungshäufigkeit in jedem Volumenbereich einer Lognormalverteilung folgt. Als charakteristische Werte werden hier der 2.5% Quantilwert und das 97.5% Quantilwert der Lognormalverteilung definiert (*Quantile* in Abbildung 5). Dies liefert ein Höchstmass an Flexibilität und Risikoanalysen können auch mit wenig Information durchgeführt werden. Abbildung 5 zeigt die Eingabemaske für die Quantilwerte der Überschreitungshäufigkeit.

	Volume $V$ [ $m^3$ ]			Exceedance frequency $H_V(v)$ [ $a^{-1}$ ] expert judgement			
	Range		Representative volume [ $m^3$ ]	Quantile		Moments	
	min $V$	max $V$		2.5%	97.5%	$E[H_V(v)]$	$\sigma_{H_V(v)}$
<input checked="" type="checkbox"/>	0.1	0.3	0.2	1.00E-01	1.00E+00	3.758E-01	2.412E-01
<input checked="" type="checkbox"/>	0.3	1	0.65	5.00E-02	2.00E-01	1.065E-01	3.886E-02
<input checked="" type="checkbox"/>	1	1.5	1.25	5.00E-03	5.00E-02	1.879E-02	1.206E-02
<input type="checkbox"/>	1.5	3	2.25	N/A	N/A	N/A	N/A
<input checked="" type="checkbox"/>	3	5	4	8.00E-04	2.00E-02	5.604E-03	5.498E-03
<input checked="" type="checkbox"/>	5	10	7.5	5.00E-04	8.00E-03	2.568E-03	2.069E-03
<input checked="" type="checkbox"/>	10	50	30	8.00E-06	1.00E-04	3.481E-05	2.497E-05

Abbildung 5: Eingabemaske der Informationen über die Überschreitungshäufigkeit von Ereignissen.

Die Quantilwerte entsprechen somit einem Bereich an Häufigkeiten, der als Bereich angesehen werden kann, den der Experte aus seinem Erfahrungsbereich beurteilen kann. Eine solche Experteneinschätzung kann in der folgenden Form erfolgen. Ein Geologe erwartet an einer bestimmten Ablösestelle, dass Steinschläge mit einem Volumen zwischen  $0.1\text{ m}^3 - 0.3\text{ m}^3$  ein- bis dreimal im Jahr auftreten. Der untere Quantilwert für diesen Volumenbereich ist dann  $Q_{2.5\%} = 1 [a^{-1}]$  und der obere Quantilwert  $Q_{97.5\%} = 3 [a^{-1}]$ . Dieser Bereich kann in seltenen Fällen unter oder überschritten werden. Dieses Vorgehen wird für alle Volumenbereiche wiederholt, in denen der Experte eine qualifizierte Einschätzung machen kann. Da die Überschreitungshäufigkeit angegeben wird, muss der Erwartungswert der Überschreitungshäufigkeit eines Bereiches kleiner oder gleich dem Erwartungswert der Überschreitungshäufigkeit des vorgehenden Bereiches sein. Dies wird bei der Eingabe geprüft, der Anwender erhält eine Warnung, wenn diese Bedingung durch die Eingabe verletzt wurde.

Liegt ein Kataster von Steinschlagereignissen vor, so kann der Mittelwert der Überschreitungshäufigkeit  $E[H_V(v)]$  und die zugehörige Standardabweichung  $\sigma_{H_V(v)}$  für jeden Volumenbereich direkt ermittelt werden. Die Berechnung der Quantilwerte ( $Q_{2.5\%}, Q_{97.5\%}$ ) der Überschreitungshäufigkeit des jeweiligen Volumenbereiches kann dann über die folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$Q_{2.5\%} = \exp \left( \Phi^{-1}(0.025) \cdot \sqrt{\ln \left( \left( \frac{E[H_V(v)]}{\sigma_{H_V(v)}} \right)^2 + 1 \right)} + \ln(E[H_V(v)]) - \frac{\ln \left( \left( \frac{E[H_V(v)]}{\sigma_{H_V(v)}} \right)^2 + 1 \right)}{2} \right) \quad (1.1)$$

$$Q_{97.5\%} = \exp \left( \Phi^{-1}(0.975) \cdot \sqrt{\ln \left( \left( \frac{E[H_V(v)]}{\sigma_{H_V(v)}} \right)^2 + 1 \right)} + \ln(E[H_V(v)]) - \frac{\ln \left( \left( \frac{E[H_V(v)]}{\sigma_{H_V(v)}} \right)^2 + 1 \right)}{2} \right) \quad (1.2)$$

In den Gleichungen ist  $\Phi^{-1}(\cdot)$  die Inverse der Standardnormalverteilung. Für den unteren Quantilwert ergibt sie  $\Phi^{-1}(0.025) \approx -1.96$  und für den oberen Quantilwert  $\Phi^{-1}(0.975) \approx +1.96$ . Liegen keine Daten vor und fällt es dem Experten leichter, einen Mittelwert und eine Standardabweichung der Überschreitungshäufigkeit zu bestimmen, so kann er ebenfalls die Gleichungen (1.1) und (1.2) verwenden, um die zugehörigen Quantilwerte zu berechnen.

Nicht immer hat man Informationen über den gesamten Volumenbereich, der sich an der Ablösestelle lösen kann. Insbesondere das Wissen über sehr grosse Ereignisse kann sehr gering sein. In diesem Fall können Teile des Volumenbereichs über die Kontrollkästchen deaktiviert werden (siehe Abbildung 5). In der Eingabemaske erscheint dann  $N/A$ . In Abbildung 5 ist dies für den Bereich zwischen  $1.5\text{ m}^3$  und  $3\text{ m}^3$  der Fall. Je weniger Informationen zur Verfügung stehen, desto grösser werden die Unsicherheiten im Modell. Es muss jedoch mindestens für drei Bereiche die Überschreitungswahrscheinlichkeit angegeben werden, um die Risikoanalyse durchführen zu können.

## 1. Teil I / Hinweise zur Programmanwendung

Über den Button *Estimate model parameter* werden die Momente der Überschreitungswahrscheinlichkeit aus den Angaben des Experten berechnet. Dies sind der Erwartungswert  $E[H_V(v)]$  der jährlichen Überschreitungshäufigkeit  $H(\cdot) [m^3 a^{-1}]$  des Volumens  $v[m^3]$  sowie die Standardabweichung  $\sigma_{H_V(v)}$ . Zur generischen Beschreibung der Überschreitungshäufigkeit wird ein Potenzgesetz (*power-law-model*) der Form:

$$H_V(v) = a v^{-b} \quad (1.3)$$

verwendet. Die Parameter des Potenzgesetzes  $(a,b)^T$  werden als bivariate Lognormalverteilung modelliert. Die Parameter dieser bivariaten Lognormalverteilung  $\theta = (\mu_a, \mu_b, \sigma_a, \sigma_b, \rho_{ab})^T$  werden aus den Angaben des Anwenders geschätzt und im Programm angegeben (siehe Abbildung 6). Der Mittelwert, die Standardabweichung sowie die korrespondierenden Quantilwerte der Überschreitungshäufigkeit aus diesem Modell werden ebenfalls berechnet und dem Anwender angegeben (siehe Abbildung 6).

Exceedance frequency $H_V(v) [a^{-1}]$ power-law-modell				Modelcharacteristik
Q <sub>2,5%</sub>	Q <sub>97,5%</sub>	$E[H_V(v)]$	$\sigma_{H_V(v)}$	
2.513E-01	1.544E+00	6.264E-01	3.365E-01	$\mu_a = 3.315E-02$
3.277E-02	1.475E-01	7.247E-02	2.975E-02	$\mu_b = 1.842E+00$
1.019E-02	4.238E-02	2.215E-02	8.330E-03	$\sigma_a = 7.694E-03$
3.488E-03	1.461E-02	7.672E-03	2.882E-03	$\sigma_b = 1.482E-01$
1.204E-03	5.406E-03	2.745E-03	1.105E-03	$\rho_{ab} = 2.234E-01$
3.590E-04	1.928E-03	8.991E-04	4.073E-04	
2.336E-05	2.134E-04	7.966E-05	4.965E-05	

Abbildung 6: Ergebnisse der Modellanpassung.

Zusätzlich werden die Angaben des Anwenders und die Anpassung des Potenzgesetzes graphisch dargestellt (Abbildung 7 und Abbildung 8). Das ermöglicht dem Anwender zu prüfen, ob das Potenzgesetz geeignet ist, um den Ablöseprozess zu beschreiben.

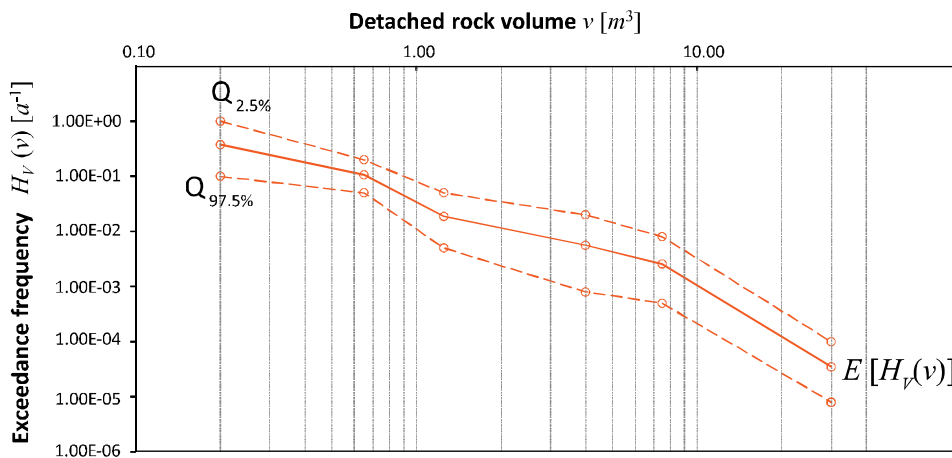


Abbildung 7: Graphische Darstellung der Eingaben des Anwenders.

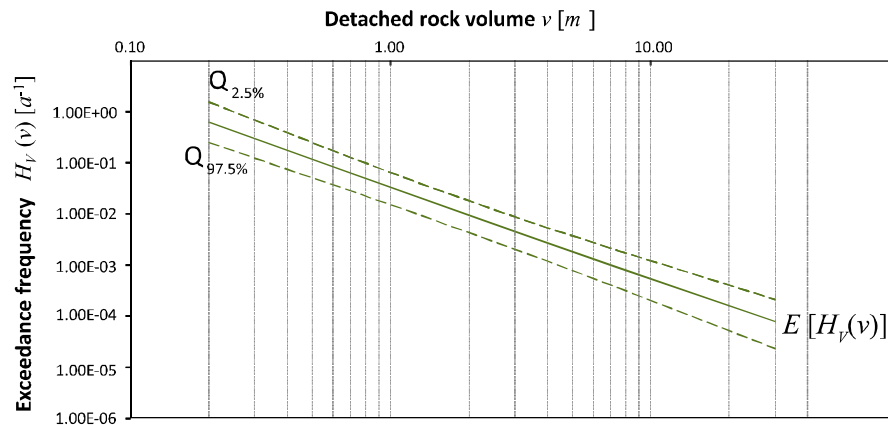


Abbildung 8: Graphische Darstellung der Anpassung der Angaben an das Modell.

Um die Versagenswahrscheinlichkeit der Steinschlaggalerie zu berechnen, ist nicht die Beschreibung der Häufigkeit eines Ereignisses relevant, sondern die Beschreibung des grössten Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum.

Versagensereignisse in der gebauten Umwelt werden typischerweise durch jährliche Risiken ausgedrückt. Die Wahrscheinlichkeiten sollten daher ebenfalls als jährliche Werte angegeben werden (Rackwitz (2000)). Aus der Überschreitungswahrscheinlichkeit wird die Verteilung des jährlichen maximalen abgelösten Volumens berechnet und dargestellt. Diese bildet die Grundlage zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie. Das Ablöseereignis ist somit vollständig beschrieben. In der Navigationsleiste ist der Button *Generic trajectory analysis* verfügbar, über dessen Betätigung man zur Modellierung des Fallprozesses gelangt.

### 1.4. Generisches Trajektorienmodell

Üblicherweise wird der Fallprozess eines Steinschlagereignisses unter Verwendung von Trajektorienmodellen modelliert. Der Fallprozess ist, genau wie der Ablöseprozess, sehr ortsspezifisch und allgemeingültige Lösungen können nicht gegeben werden. Für die Durchführung von Trajektorienanalysen muss die Topographie im besten Fall in Form eines hochauflösenden digitalen Höhenmodells vorliegen. Zusätzlich müssen die Gesteinstypen, die im Hang vorkommen, sowie Art des Bewuchses und die Rauhigkeit der Oberfläche bekannt sein, um den Energieverlust während des Falls zu beschreiben.

Die Durchführung solcher Trajektorienanalysen ist aufwendig und kostenintensiv. Dazu wurde im Rahmen dieses Projekts eine Möglichkeit zur generischen Beschreibung des Hangs entwickelt. Die Ergebnisse der Fallanalysen sind für diese generische Beschreibung vorberechnet worden und in einer Datenbank gespeichert. Diese werden für die spezifischen Fälle dann verwendet, um den Fallprozess zu beschreiben.

Der Anwender unterteilt den Hang in der Höhe in drei Segmente, namentlich in den oberen Teil  $H_1[m]$ , der an der Ablösestelle startet, in einen mittleren Teil  $H_2[m]$ , der eine steile Hangpartie  $H_2[m]$  mit einer Neigung von  $80^\circ$  beschreibt und einen unteren Teil  $H_3[m]$ , der die Auslaufzone der Steinschläge beschreibt. In der Eingabemaske werden die totale Höhe  $H_{total}[m]$ ,  $H_1[m]$  und  $H_2[m]$  eingegeben.  $H_3[m]$  wird aus den angegebenen Höhen berechnet und kann der Kontrolle der richtigen Angaben dienen (siehe Abbildung 9).

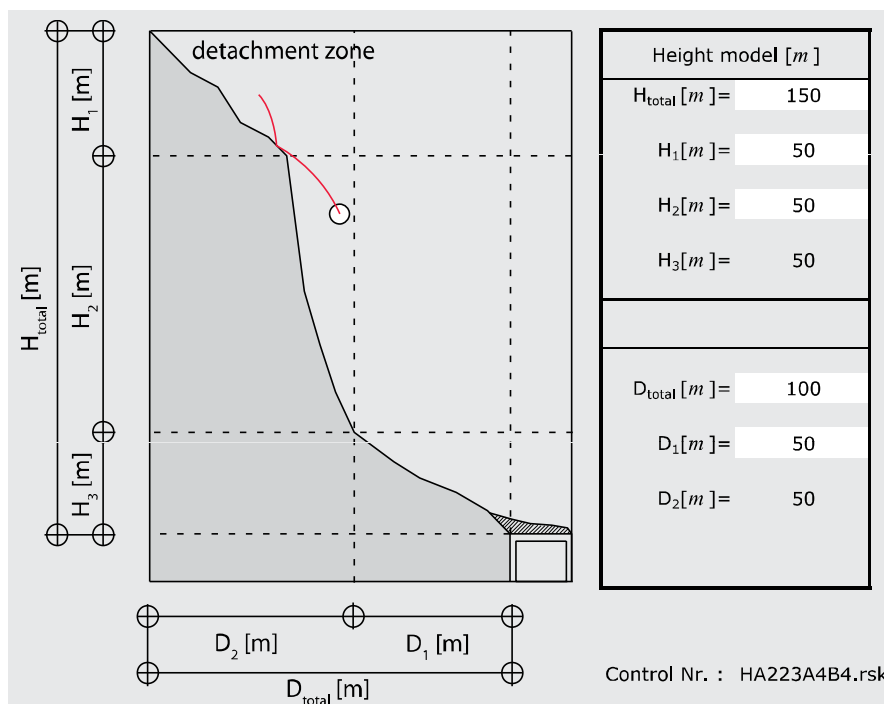


Abbildung 9: Eingabemaske zur Berechnung der Einschlaggeschwindigkeit des Steins auf der Galeriedecke.

In horizontaler Richtung wird die Topographie in zwei Teile unterteilt,  $D_1[m]$  und  $D_2[m]$ . Durch die Angabe der totalen orthogonalen Distanz zwischen dem Galeriedach und der Ablösestelle  $D_{total}[m]$  und der Angabe von  $D_1[m]$  ergibt sich direkt  $D_2[m]$ .

Nach der Eingabe der Hangcharakterisierung kann der Anwender den Button *Perform trajectory analysis* betätigen. Dadurch werden alle Angaben auf ihre Zulässigkeit hin geprüft und die Werte  $H_3[m]$  und  $D_2[m]$  berechnet und angegeben. Zusätzlich wird der Hang graphisch dargestellt und die Eingabe kann nochmal visuell geprüft werden. Im Hintergrund wird die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Einschlaggeschwindigkeit auf dem Galeriedach der Trajektorienanalyse geladen, die dieser Hangcharakterisierung entspricht und die Wahrscheinlichkeit, dass die Galerie von einem Stein getroffen wird, wird berechnet. Die Ergebnisse werden unter Verwendung der kommerziellen Software RocFall (2008) generiert.

Die Ergebnisse der Trajektorienanalyse werden angegeben, wenn der Anwender den Button *Results of the trajectory analysis* in der Navigationsleiste betätigt.

Es wurde die gängige Annahme getroffen, dass sowohl  $H_1[m]$  und  $H_3[m]$  jeweils eine Neigung von mehr als  $30^\circ$  haben müssen, damit der Stein nicht liegen bleibt. Ist die Neigung einer der beiden Teilbereiche kleiner als  $30^\circ$ , so erscheint die Meldung *The probability that the gallery is hit  $P(\text{impact})$  is zero*. In diesem Fall ergibt die Eingabe, dass die Galerie nicht gefährdet ist. Dann sollte zunächst geprüft werden, ob die gewählte Diskretisierung der Topographie die wirklichen Gegebenheiten im Hang hinreichend beschreibt.

Es kann verschiedene Fälle geben, in denen sich die generische Charakterisierung, wie sie hier vorgeschlagen wird, nicht ausreichend ist, um die örtlichen Gegebenheiten zu beschreiben. Die folgenden Aspekte können beispielsweise zu abweichenden Ergebnissen der Trajektorienanalyse führen:

- abweichende Topographie
- abweichende geologische Bedingungen
- bestehende Schutzmassnahmen im Hang (z.B. bestehende Steinschlagschutznetze)
- bestehender Schutzwald

In diesen Fällen kann der Anwender unter Berücksichtigung aller lokalen Gegebenheiten die Fallanalyse mit einem Trajektorienmodell extern durchführen und die Ergebnisse in diese Softwareanwendung eingeben. Hierzu betätigt der Anwender den Button *Skip generic trajectory analysis* und gelangt direkt zur Eingabemaske der Ergebnisse der Trajektorienanalyse. Die Art der Eingabe wird im Kapitel 1.5 beschrieben. Die Durchführung einer solchen detaillierteren Analyse ist meist mit höheren Kosten verbunden und es sollte zunächst geprüft werden, ob eine genauere Analyse gerechtfertigt ist.

## 1.5. Ergebnisse aus dem Trajektorienmodell

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wird in diesem Modell die Verteilung der Einschlaggeschwindigkeit der Steine verwendet. Es ist noch vielfach üblich, die kinetische Einschlagenergie als Indikator der Gefährdung zu verwenden (siehe z.B. Gerber (2006)). Die kinetische Energie  $E_{kin}$  stellt ein aggregiertes Mass dar und ist zur Kommunikation insbesondere deshalb geeignet, weil sie die zwei Komponenten Geschwindigkeit  $v$  und Masse  $m$  in ein eindimensionales Mass überführt:

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad (1.4)$$

Jede Art der Aggregation bedeutet einen Verlust an Information. So gibt es unendlich viele Kombinationen aus Masse und Geschwindigkeit, die zur selben Energie führen.

Die Art des Versagens der Schutzbauten unterscheidet sich jedoch bei den verschiedenen Kombinationen aus Masse und Geschwindigkeit. Bei Galerien führen grosse Steinschläge mit einer geringeren Geschwindigkeit eher zum Biegeversagen der Galeriedecke, kleine Steine mit einer hohen Geschwindigkeit führen eher zu einem Durchstanzversagen. Beide Versagensarten sind physikalisch vollständig unterschiedlich. Daher ist es sinnvoll, anstelle eines aggregierten Masses explizit die Einschlaggeschwindigkeit und die Einschlagmasse des Steins zu modellieren. Man erhält so eine zweidimensionale Verteilung von Masse und Geschwindigkeit.

Aus diesem Grund wird als Ergebnis aus der Trajektorienanalyse die Verteilung der Einschlaggeschwindigkeit der Steinschläge auf dem Galeriedach verwendet. Konnte der Hang, wie in Kapitel 1.4 dargestellt, generisch beschrieben werden, so werden die Ergebnisse der Trajektorienanalyse in einem Histogramm dargestellt. In Abbildung 10 ist das Ergebnis der Trajektorienanalyse für die Eingabewerte, die in Abbildung 9 gegeben sind, dargestellt. Die Klassenbreite der gewählten Intervalle der Einschlaggeschwindigkeit ist mit 1 [m/s] festgelegt worden. In der äusseren Spalte in der Tabelle in Abbildung 10 sind zusätzlich die Werte für das Histogramm mit einer Klassenbreite von 2 [m/s] angegeben.

Neben der Einschlaggeschwindigkeit wird auch die Trefferwahrscheinlichkeit der Galerie (*Conditional impact probability*) angegeben. Dies stellt eine bedingte Wahrscheinlichkeit dar – bedingt auf das Ereignis, dass sich ein Stein gelöst hat. Mit den Charakteristiken, die in Abbildung 9 gegeben sind, beträgt diese bedingte Wahrscheinlichkeit 0.997 (vgl. Abbildung 10). Unter der Einschlagwahrscheinlichkeit ist der Mittelwert der Einschlaggeschwindigkeit  $\mu_{impact\ velocity}$  und die Standardabweichung der Einschlaggeschwindigkeit  $\sigma_{impact\ velocity}$  gegeben. Diese beiden Werte haben rein informativen Charakter.

Konnte der Hang nicht generisch beschrieben werden (vgl. Kapitel 1.4) und wurde dort die Option *Skip generic trajectory analysis* gewählt, so können die Ergebnisse einer extern durchgeführten Trajektorienanalyse berücksichtigt werden. Die Tabelle in Abbildung 10 enthält dann keine Einträge.

Hierfür muss der Anwender seine Ergebnisse zunächst aufbereiten und die relative Häufigkeit der Simulationsergebnisse in den Intervallen mit einer Klassenbreite von 1 [m/s] im Bereich von 0–50 [m/s] berechnen.

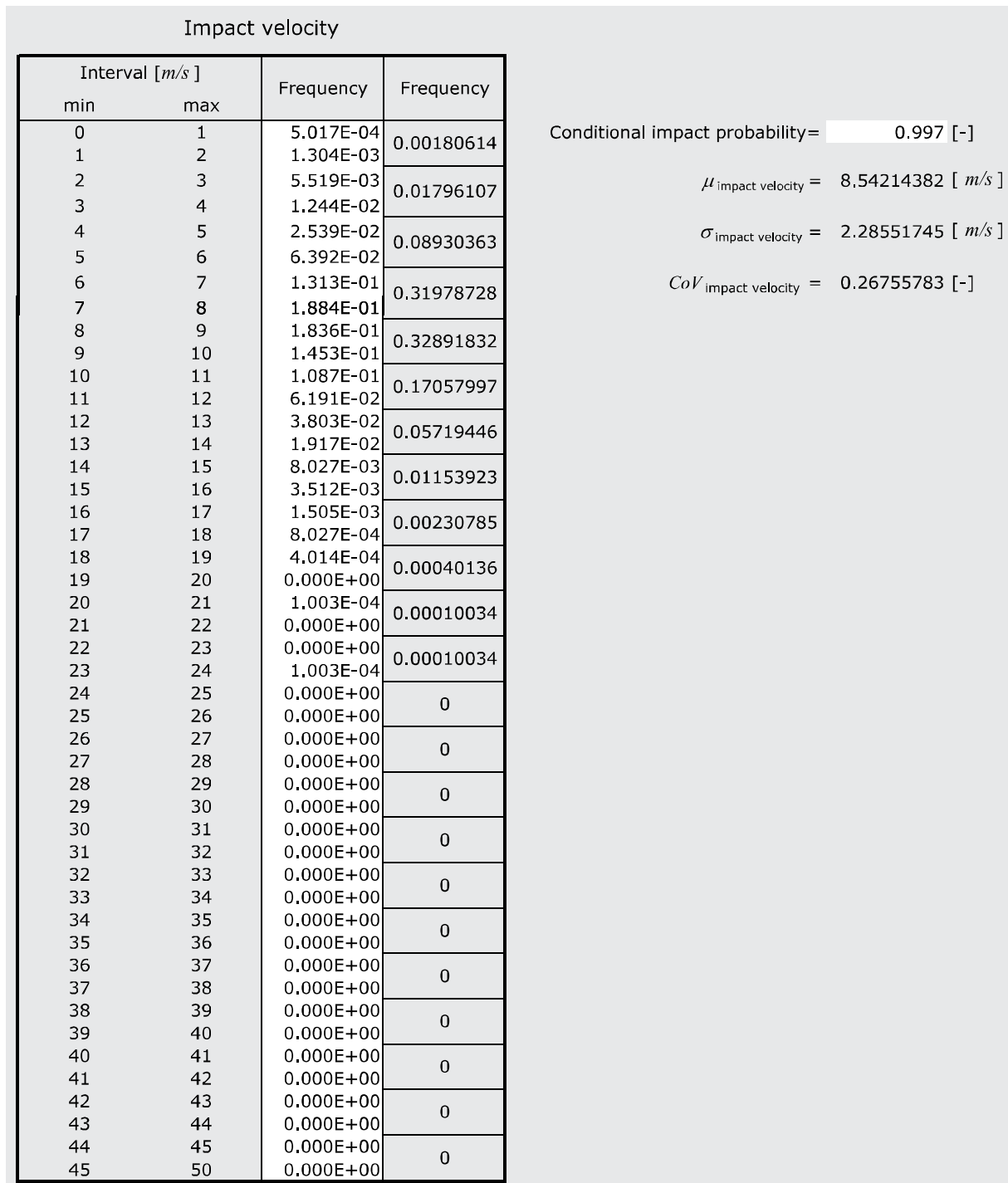


Abbildung 10 : Verteilung der Einschlaggeschwindigkeiten des Steinschläge auf der Galeriedecke.

Alle Beobachtungen, die eine Geschwindigkeit von mehr als 45 [m/s] haben, sind in der letzten Klasse zu berücksichtigen. Allerdings sind solche Resultate zu prüfen, da in der Regel so hohe Geschwindigkeiten nur sehr selten auftreten. Um Geschwindigkeiten von mehr als 50 [m/s] zu erreichen, sind freie Fallhöhen von mehr als 150m notwendig, und der Stein muss dann ungebremst auf die Galerie einschlagen.

## 1. Teil I / Hinweise zur Programmanwendung

Zusätzlich zur Geschwindigkeitsverteilung ist vom Anwender die Trefferwahrscheinlichkeit der Galerie anzugeben (*Conditional impact probability*). Sie kann auch direkt aus der Trajektorienanalyse bestimmt werden.

Sind alle Werte eingegeben, so bestätigt der Anwender die Eingabe mit dem Button *Affirm distribution of the impact velocity*. Sind alle Eingaben zulässig, so erscheint in der Navigationsleiste der Button *Vulnerability model / BPN*. Damit gelangt der Anwender zum Verletzbarkeitsmodell der Risikoanalyse.

## 1.6. Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit

Durch die vorangegangenen Schritte sind alle notwendigen Eingaben gemacht worden, um die Versagenswahrscheinlichkeit der Steinschlaggalerie zu berechnen. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird unter Verwendung Bayes'scher Netze berechnet (siehe z.B. Jensen und Nielsen (2007)). Aufgrund ihrer grossen Effizienz und Flexibilität kommen sie hier zum Einsatz.

Erstellt wurden die Bayes'sche Netze unter Verwendung der *GeNIe* und *Smile* Umgebung, die vom Decision Systems Laboratory der University of Pittsburgh entwickelt wurde (GeNIe&Smile (2006)). In Abbildung 11 ist das hier entwickelte Bayes'sche Netz dargestellt.

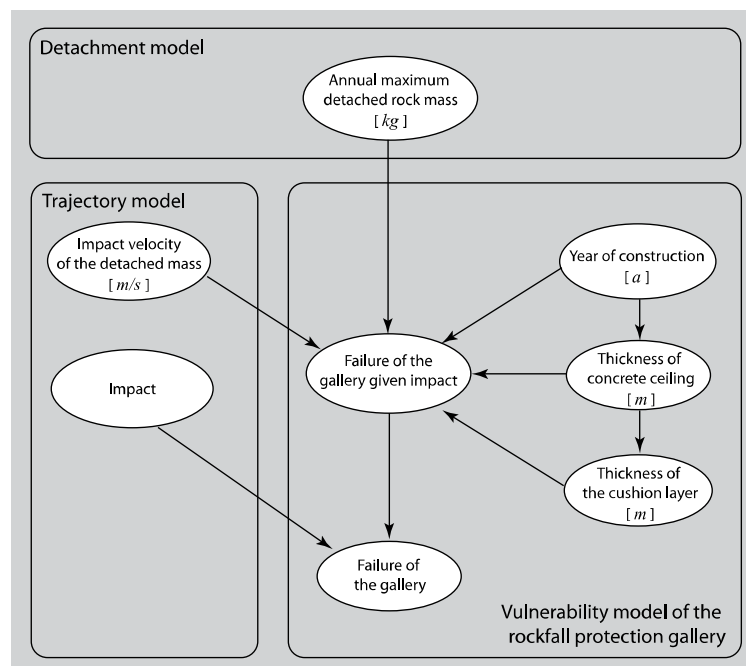


Abbildung 11: Bayes'sches Netz zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Steinschlaggalerie.

Die weissen Elipsen in Abbildung 11, die auch als Knoten bezeichnet werden, entsprechen den Parametern, die in der Berechnung berücksichtigt werden. Die Pfeile zeigen die kausalen Zusammenhänge zwischen den Parametern.

Die verfügbaren Informationen werden in die Knoten transferiert, und die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie wird für diese spezifischen Informationen berechnet.

Im Knoten *Annual maximum detached rock mass* ist die Verteilung des jährlichen maximalen Ablösevolumens der Steinschläge enthalten, die bereits in der Modellierung der Exposition berechnet wurde. Der Knoten *Impact velocity of the detached mass* enthält die Verteilung der Einschlaggeschwindigkeit der Steine an der Galerie, die im Trajektorienmodell berechnet wurde.

Im Knoten *Year of construction* ist das Baujahr der Galerie enthalten, der Knoten *thickness of the cushion layer* enthält die Information über die Dicke der Kies-Sand-Eindeckung der Galerie und der Knoten *Thickness of concrete ceiling* enthält die Information über die Dicke der Betondecke der Steinschlaggalerie.

Bedingt auf diese Indikationen enthält der Knoten *Failure of the gallery given impact* die mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie. Die Wahr-

## 1. Teil I / Hinweise zur Programmanwendung

scheinlichkeit für einen Einschlag auf dem Galeriedach wird im Knoten *Impact* berücksichtigt. Die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie infolge Steinschlags wird im Knoten *Failure of the gallery* berechnet.

Die Berechnung wird gestartet, sobald der Anwender den Button *Calculate failure probability* betätigt. Es wird der Erwartungswert der Wahrscheinlichkeit für das Ereignis „Versagen“  $F$ ,  $E[P(F|impact)]$ , bedingt auf einen Einschlag, berechnet. Die Erwartungsbildung bezieht sich auf die Indikatoren, die im Bayes'schen Netz berücksichtigt worden sind.

Zusammen mit der Wahrscheinlichkeit, dass der Stein die Galerie erreicht  $P(impact|detachment)$ , wird der Erwartungswert der unbedingten Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie berechnet:

$$E[P(F)] = E[P(F|impact) P(impact|detachment) P(detachment)] \quad (1.5)$$

Das Ereignis Versagen ist bedingt auf einen Einschlag eines Steines auf der Galerie, dessen Verteilung wird durch die das jährliche maximale Einschlagvolumen beschrieben.

Die jährliche Ablösewahrscheinlichkeit  $P(detachment)$  berechnet sich aus dem Expositionmodell. Aus der unbedingten Versagenswahrscheinlichkeit wird zusätzlich die Überlebenswahrscheinlichkeit  $E[P(S)] = 1 - E[P(F)]$  berechnet.

Da die Einschätzung und Kommunikation von Versagenswahrscheinlichkeiten häufig schwierig ist, wird auch der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  angegeben. Er berechnet sich aus  $\beta = -\Phi^{-1}(E[P(F)])$ , wobei  $\Phi^{-1}(\cdot)$  die Inverse der Standardnormalverteilung repräsentiert. In Abbildung 12 sind die Ergebnisse aus der Berechnung zusammengestellt.

Geological region	Helvetic Nappes
Year of construction	1998 [a]
Cushion layer	0.70 [m]
Thickness of the concrete ceiling	0.80 [m]
$P(impact detachment) =$	0.997
<hr/>	
$E[P(F impact)] =$	0.002677697 [a <sup>-1</sup> ]
$E[P(F)] =$	0.002668593 [a <sup>-1</sup> ]
$E[P(S)] =$	0.997331407 [a <sup>-1</sup> ]
Reliability index $\beta =$	2.785945413 [a <sup>-1</sup> ]
$Var[P(F impact)] =$	0.000263436 [a <sup>-1</sup> ] <sup>2</sup>
$CoV[P(F impact)] =$	6.061444318 [-]

Abbildung 12: Darstellung der Ergebnisse aus dem Verletzbarkeitsmodell.

Desweiteren wird der Varianz  $Var[P(F|impact)]$  und der Variationskoeffizient  $CoV[P(F|impact)]$  der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie angegeben. Die Verteilung der Versagenswahrscheinlichkeit wird in einem Diagramm angegeben.

Unter Verwendung der Ergebnisse des Verletzbarkeitsmodells kann das Risiko berechnet werden. Dazu muss der Anwender das Konsequenzmodell erstellen. Zum Konsequenzmodell gelangt der Anwender, indem er den Button *Consequence model* in der Navigationsleiste drückt.

## 1.7. Modell der Konsequenzen

Welche Konsequenzen in der Risikoanalyse berücksichtigt werden sollen, ist abhängig von der Fragestellung und vom Entscheidungsträger, der die Entscheidung zu tragen hat. Nicht immer sind alle Typen von Konsequenzen von Bedeutung. Im Rahmen der Entwicklung dieses Programms wurde versucht, alle wesentlichen Konsequenzen zu berücksichtigen. Dem Anwender werden Werte vorgeschlagen, die er jedoch bei jeder Anwendung hinterfragen und gegebenenfalls anpassen sollte. Die Eingabemaske zur Modellierung der Konsequenzen ist in Abbildung 13 gegeben.

<i>Damage Gallery</i>	$\mu$	$\sigma$	Distribution
Property damage gallery [CHF/m]	18000	2700	Normal
Property damage road [CHF/m]	2700	300	Normal
Administration costs [CHF]	25000	7000	Normal
Clean-up costs [CHF/m]	1000	200	Normal
<i>Compensation Costs</i>			
Cost per fatality [CHF]	1.80E+06	3.60E+05	Normal
Cost per HGV [CHF]	100000	20000	Normal
Cost per car [CHF]	20000	4000	Normal
<i>Societal Costs</i>			
Days of closed road	10	2	Log-Normal
Detour Length [km]	20	3	Log-Normal
Detour velocity [km/h]	100	15	Log-Normal
User costs [CHF/(h vehicle)]	35	7	Log-Normal

Abbildung 13: Modellierung der Konsequenzen.

Sind Konsequenzen, die der Anwender berücksichtigen sollte, nicht in der Liste enthalten, so kann er diese zu einem der aufgeführten Konsequenzen addieren. Dafür muss zuerst identifiziert werden, wie das Risiko infolge der Konsequenzen entsteht. Das Risiko infolge Todesfälle beinhaltet beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, dass die Galerie versagt, dass ein Auto direkt oder indirekt getroffen wird und die Wahrscheinlichkeit, dass der Insasse des Fahrzeugs stirbt. In der Berechnung des Schadens an der Galerie ist nur die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, dass die Galerie versagt. Können die zusätzlichen Konsequenzen diesen Ereignissen zugeordnet werden, so steht es dem Anwender frei, diese dort zu berücksichtigen. In der Dokumentation sollte dies jedoch explizit ausgewiesen werden und erwähnt werden, auf welcher Grundlage die verwendeten Werte basieren.

Es gibt bisher wenige publizierte Grundlagen für die Schätzung der Konsequenzen infolge Stein-schlagereignissen. In Tabelle 1 sind Anhaltswerte für die Modellierung der Konsequenzen zu-sammengestellt. Für einige Typen von Konsequenzen findet man Werte in der Literatur; die Ver-teilung und die Standardabweichung sind meist nicht angegeben. Hier werden erste Einschätzun-gen und Anhaltswerte gegeben, die vom Anwender zu prüfen und den lokalen Gegebenheiten anzupassen sind.

Tabelle 1: Zusammenstellung von Anhaltswerten zur Modellierung der Konsequenzen.

Schadensart <sup>1)</sup>		$\mu$	Referenz	$\sigma$	Referenz	Verteilung
Property damage gallery [CHF/m]	Sachschaden an der Galerie [CHF/m]	18.000	VSS (2003)	2.700	[-]	Normal
Property damage road [CHF/m]	Sachschäden Strasse [CHF/m]	2.700	VSS (2003)	300	[-]	Normal
Administration costs [CHF]	Administrative Kosten [CHF]	25.000	[-]	7.000	[-]	Normal
Clean up costs [CHF/m]	Räumungskosten [CHF/m]	1.000	[-]	200	[-]	Normal
Cost per fatality [CHF]	Kosten pro Todesfall [CHF]	1.800.000	VSS SN 640 007 (2006)	360.000	[-]	Normal
Cost per HGV [CHF]	Kosten pro SLV [CHF]	100.000	[-]	20.000	[-]	Normal
Cost per car [CHF]	Kosten pro PW [CHF]	20.000	[-]	4.000	[-]	Normal
User costs [CHF/(Vehicle h)]	Benutzerkosten [CHF/(Fhzg. h)]	35	VSS (2003)	7	[-]	Log-Normal

<sup>1)</sup> Die Kosten sind mit einer mittleren Breite der Galerie, die ersetzt werden muss, von 12m ermittelt worden. Die Länge eines Segmentes in Fahrtrichtung wird vom Anwender angegeben. Die Breite weicht vom statischen Modell ab, da meist einen Überstand auf der hangabgewandten Seite existiert.

Ist das Konsequenzmodell erstellt, so können die Ergebnisse der Risikoanalyse erzeugt werden. Dazu bestätigt der Anwender die Richtigkeit der Angaben über den Button *Affirm consequence model*.

Über den Button *Risk analysis* gelangt der Anwender zu den Ergebnissen der Risikoanalyse.

## 1.8. Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Risikoanalyse werden in zwei unterschiedlichen Formaten angegeben, als Mittelwert und als Verteilung. In der Regel reicht die Kenntnis des Erwartungswertes der Konsequenzen, der als Risiko bezeichnet wird, aus, um Entscheidungen zu treffen (von Neumann und Morgenstern (1944)). Die Streuung des Erwartungswertes beinhaltet Informationen, die insbesondere für Portfolioanalysen und für die Aggregation von Risiken von Bedeutung ist (siehe Schubert und Faber (2008b)) und Budgetplanungen durchgeführt werden sollen (siehe Nishijima und Faber (2006)).

Im ersten Schritt werden dem Anwender die Mittelwerte der verschiedenen Typen und Beiträge zum Risiko  $\mu$  und die zugehörigen Standardabweichungen  $\sigma$  angegeben (siehe Abbildung 14).

<i>Risk</i>	$\mu$	$\sigma$	<i>CoV</i>	<i>Type of risk</i>	
Expected property damage gallery [CHF/a]	398.729	3047.814	7.644	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected property damage road [CHF/a]	158.060	1205.961	7.630	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected administration costs [CHF/a]	16.274	132.435	8.138	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected clean-up costs [CHF/a]	161.126	1257.770	7.806	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected property damage cars [CHF/a]	30.130	297.767	9.883	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected property damage HGV [CHF/a]	50.312	502.835	9.994	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected number fatalities [ $a^{-1}$ ]	8,355E-04	7,374E-03	8,826	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected compensation costs for fatalities [CHF/a]	2616.154	25258.254	9.655	<i>indirect</i>	<i>internal</i>
Expected days of road closure [days/a]	0.032	0.245	7.766	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected user costs [CHF/a]	4824.078	52465.669	10.876	<i>indirect</i>	<i>external</i>
<b>Aggregated Risk</b>	$\mu$	$\sigma$	<i>CoV</i>		
Direct internal risk [CHF/a]	734.189	3513.266	0.209		
Indirect internal risk [CHF/a]	2616.154	25258.254	9.655		
Indirect external risk [CHF/a]	4904.520	52468.923	10.698		
Total internal risk [CHF/a]	3350.343	25501.420	7.612		
Total external risk [CHF/a]	4904.520	52468.923	10.698		

Abbildung 14: Ergebnisse der Risikoanalyse.

Generell werden verschiedene Typen von Risiken unterschieden, direkte, indirekte, interne und externe Risiken sowie Kombinationen hieraus. Die internen Konsequenzen, die zum internen Risiko führen, werden vom Entscheidungsträger selbst getragen, während die externen Konsequenzen von Dritten getragen werden. Direkte Konsequenzen entstehen direkt aus dem Ereignis. Führt das Ereignis zu weiteren Konsequenzen, die über das betrachtete Objekt und die direkten

Konsequenzen hinausgehen, so werden diese als indirekte Konsequenzen bezeichnet. Die Aufteilung der Konsequenzen in direkte und indirekte Konsequenzen erlaubt den bewussten Umgang mit den verschiedenen Konsequenzen und erlaubt auch Robustheitsuntersuchungen (vgl. Baker et al. (2008)).

Neben der detaillierten Aufstellung werden die Risiken auch in aggregierter Form angegeben. Unter der Überschrift *Aggregated Risk* werden die direkten internen Risiken, die indirekten internen und die indirekten externen Risiken aggregiert. Schlussendlich werden in den letzten Zeilen von Abbildung 14 die totalen internen Risiken und die totalen externen Risiken in CHF pro Jahr angegeben.

Für die weitere Aggregation kann die Kenntnis der Verteilung von Risiken von Bedeutung sein. Diese kann der Anwender einsehen, indem er den Button *Risk distribution* in der Navigationsleiste betätigt.

Für die verschiedenen Anteile des Risikos sind die Verteilungsfunktionen des Risikos berechnet und dargestellt. In Abbildung 15 ist beispielhaft die jährliche Verteilungsfunktion des totalen internen Risikos dargestellt. Sehr gut sind die Schiefe und der hohe Variationskoeffizient des Risikos in der semilogarithmischen Darstellung sichtbar. So liegt der Mittelwert der Verteilung nahe beim 90%-Quantilwert der Verteilung.

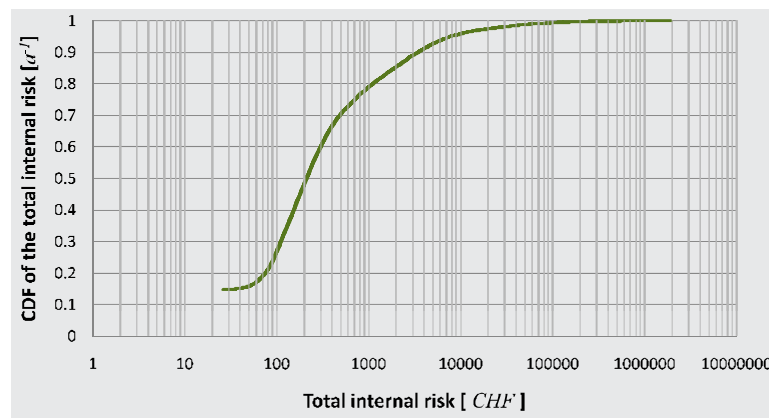


Abbildung 15: Darstellung der Ergebnisse als Verteilungsfunktion.

In den letzten Kapiteln wurde der Fokus auf die reine Anwendung des Programms gelegt. Im Vordergrund standen die Ergebnisse und nicht die Methoden, die zur Berechnung des Risikos verwendet wurden. Wie zuvor schon bemerkt, soll das Werkzeug nicht als „Black-Box“ verstanden werden.

## 1.9. Export der Ergebnisse

Die Software kann nur von DVD aus gestartet werden und eine Möglichkeit der direkten Speicherung der Eingaben besteht daher nicht. Ebenfalls kann das Excel-Workbook nicht an einem anderen Ort gespeichert werden. Der Grund hierfür sind die Verknüpfungen zu anderen Dateien und Programmen, deren Verlinkung erhalten bleiben muss. Wird die Software an einen anderen Ort verschoben, so schliesst sie sich automatisch und ohne Ankündigung. Die Druckoption ist in der Software ebenfalls deaktiviert.

Die Ergebnisse und die Benutzereingaben können jedoch als Microsoft Word Dokument ( *.docx* file) exportiert werden. In der Maske in der die Ergebnisse der Risikoanalyse dargestellt werden (siehe Maske in Abbildung 14), kann der Button *Export results to Microsoft Word* angewählt werden. Über diesen Button wird automatisch ein 9 seitiges Microsoft Word Dokument generiert. Dieses Dokument enthält die folgenden Kapitel:

- A0. Preface
- A1. System Definition
- A3. Rockfall Exposure
- A4. Trajectory Model
- A5. Vulnerability Model
- A6. Consequence Model
- A7. Results of the risk analysis
- A8. Abbreviations
- A9. References

Das Word Dokument enthält alle relevanten Tabellen, Eingabefelder und Diagramme, die in der Software dargestellt werden. Es wird kein zusätzlicher erklärender Text generiert. Im Kapitel *A8. Abbreviations* sind die Abkürzungen, die in den Diagrammen und Tabellen verwendet werden, angegeben. Das Kapitel *A9. References* stellt die relevanten Hintergrundreferenzen zusammen. Das Microsoft Word Dokument kann gespeichert und gedruckt werden und kann als Dokumentation der durchgeführten Risikoanalyse dienen.

## 1.10. Beurteilung mehrer Ablösezonen im Hang

Häufig besteht die gesamte Gefährdung nicht nur aus einer Ablösezone und somit tragen Verschiedene Ablösezonen zum Gesamtrisiko bei. Diese unterschiedlichen Ablösezonen sind meist räumlich getrennt und ihre Steinschlägigkeit kann sehr unterschiedlich sein. Ein solcher Fall ist in Abbildung 16 illustriert.

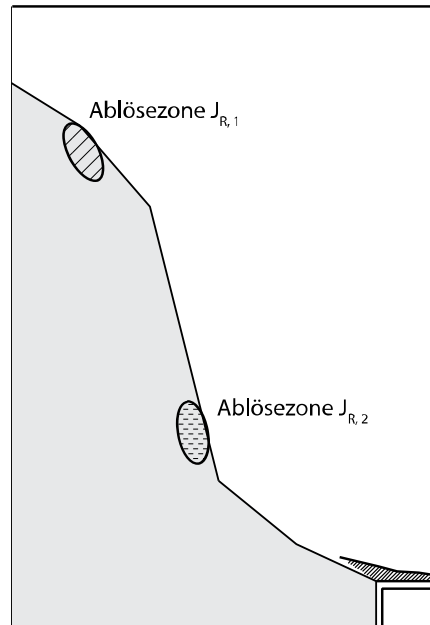


Abbildung 16 : Verschiedene Ablösezonen im Hang.

Die Software ist nicht direkt auf diesen Fall ausgelegt. Das Programm kann jedoch dennoch eingesetzt werden. Dazu trifft man die Annahme, dass die Ablöseprozesse aus unterschiedlichen Zonen stochastisch unabhängig voneinander sind.

Für jede dieser Zonen wird die Analyse getrennt durchgeführt. Damit erhält man zunächst die einzelnen Risikokomponenten aus den unterschiedlichen Ablösezonen. Dies ermöglicht die Erstellung einer ersten Rangordnung und die Prüfung, welche der Quellen zum höchsten Risiko führen.

Ist das gesamte Risiko von Interesse, so kann der Erwartungswert  $E[R_{total}]$  und die Varianz  $Var[R_{total}]$  des gesamten Risikos berechnet werden unter Verwendung von:

$$E[R_{total}] = \sum_{i=1}^n E[R_{J_{R,i}}] \quad (1.6)$$

$$Var[R_{total}] = \sum_{i=1}^n Var[R_{J_{R,i}}] \quad (1.7)$$

Hierin bezeichnet  $R_{J_{R,i}}$  das Risiko, das aus der Ablösezone  $J_{R,i}$  resultiert. Die Gleichungen (1.6) und (1.7) können analog verwendet werden um Teile des Risikos zu aggregieren, z.B. das Todesfallrisiko, das interne oder das externe Risiko.

## 2. Teil II / Anwendungstest

### 2.1. Hintergrund

Das Excel-Tool RiskNow-Falling Rocks eröffnet neue Chancen für Ingenieure und Geologen, welche über die zurzeit bestehende Praxis hinausgehen.

Das Kapitel *Anwendungstest* hat zum Hauptziel,

- den Einsatz des Werkzeuges zu beleuchten,
- den Anwendern einen Hinweis auf die zu verwendenden Informationen und Daten zu geben,
- zu helfen, die erzielten Ergebnisse zu interpretieren
- und den Einsatz in der Praxis zu ermöglichen.

Als Test wird hier eine konkrete und bereits gut dokumentierte Gefährdung einer Steinschlaggalerie gewählt. Der Test bezieht sich insbesondere auf die Einsatzfähigkeit und die Bedienbarkeit des Werkzeuges.

Die Steinschlagexposition der Galerie ist in der ASTRA Dokumentation: *Generelle Überprüfung der bestehenden Steinschlaggalerien* ASTRA (2004) gegeben. Diese Gefährdung wird – auch aus illustrativen Gründen – für den Test abstrahiert, so dass der Test nicht als Überprüfung oder tatsächliche Beurteilung der Galerie gesehen werden kann, sondern nur als Beispiel dient. Aus den erzielten Ergebnissen ergeben sich keine Folgerungen und Forderungen für die untersuchte Galerie.

Die Vorgehensweise des Tests orientiert sich an der Struktur der Software. Nach jedem Schritt wird in Form von Kommentaren ein spezifisches Feedback gegeben.

Eine Art Sensitivitätsanalyse der Software wird anhand einiger wesentlicher Parameter und Indikatoren durchgeführt.

### 2.2. Problembeschreibung und Systemdefinition

Es wird eine bestehende Galerie mit einer Länge von insgesamt 250 m betrachtet. Details und die charakteristischen Merkmale der Galerie sind der Abbildung 17 und der Abbildung 18 zu entnehmen.

Im Hang oberhalb der Galerie befinden sich mehrere Ablösezone, die verschiedene Bereiche der Galerie betreffen, d.h. verschiedene Abschnitte in Längsrichtung der Galerie sind betroffen. Diese Ablösezone werden im Folgenden mit *JH 1\**, *JH 2*, *JH 3\**, *JH 4* und *JH 5* bezeichnet. Ihre räumliche Ausbreitung ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

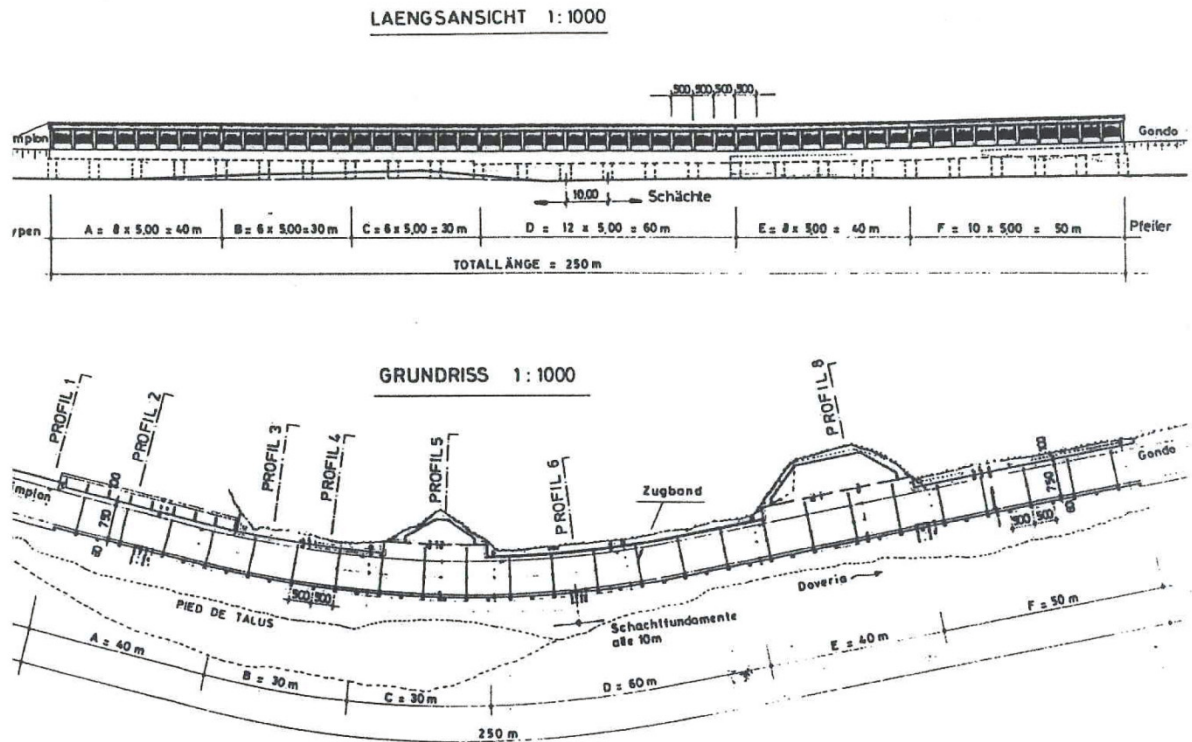


Abbildung 17 : Längsschnitt und Grundriss der betrachteten Galerie.

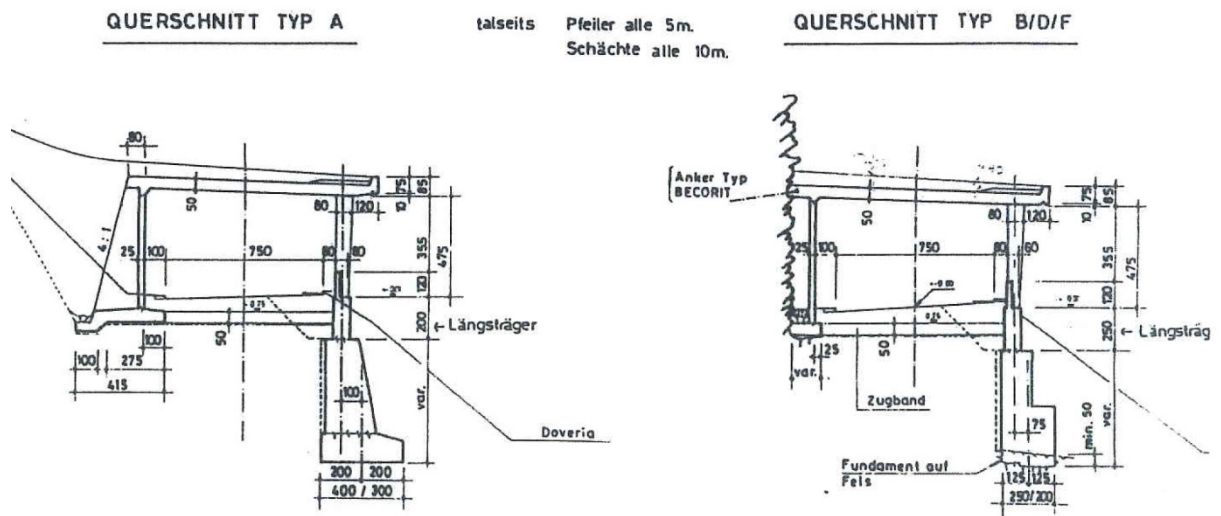


Abbildung 18 : Querschnitt der Galerie.

Die Charakterisierung der verschiedenen Steinschlagexpositionen sind in Tabelle 3 gegeben (Masse und Einschlaggeschwindigkeit auf der Galerie). Zusammen mit der Information über die Eintretenswahrscheinlichkeiten, die in Tabelle 4 gegeben sind, können die Gefahrenpotentiale in einer Intensitätsmatrix eingetragen werden (Abbildung 19). Die Angaben entsprechen den Einschätzungen für die einzelnen Ablösezone, die in ASTRA (2004) veröffentlicht sind.

2. Teil II / Anwendungstest

Tabelle 2: Räumliche Ausbreitung der Gefahrenpotentiale.

Gefahrenpotential	Ausbreitung			
	Km 36.43–36.50	Km 36.50–36.57	Km 36.57–36.64	Km 36.64–36.68
	0 m– 70 m	70 m – 140 m	140 m – 210 m	210 m – 250 m
JH 1*	JH 1*-1		JH 1*-2	
JH 2	JH 2			
JH 3*	JH 3*			
JH 4	JH 4			
JH 5	JH 5			

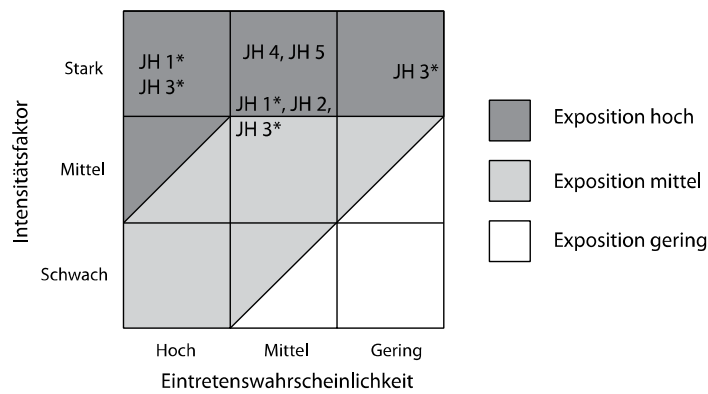


Abbildung 19 : Darstellung der Gefahrenpotentiale in einer Intensitätsmatrix.

Tabelle 3: Charakteristiken der verschiedenen Gefahrenpotentiale.

Gefahrenpotential	Dimensio- nierungs- block [m3]	Masse m [t]	Total Fall höhe h [m]	Fels- wand- höhe [m]	Sturz faktor [-]	Ein- schlags winkel [°]	Mittlerer radius R [m]	Intensität		
								Energie [kJ]	Vertikale Geschwin- digkeit [m/s]	Intensi- täts faktor [kg/s]
JH 1*-1	2	5.4	280	70	0.3	70	0.78	4450	38	264
	1	2.7	280	70	0.3	70	0.62	2225	38	166
JH 1*-2	2	5.4	100	30	0.3	70	0.78	1589	23	158
	1	2.7	100	30	0.3	70	0.62	795	23	99
JH 2	3	8.1	100	20	0.3	70	0.89	2384	23	206
JH 3*	10	27	200	20	0.3	70	1.34	15892	32	651
	2	5.4	200	20	0.3	70	0.78	3178	32	223
	1	2.7	200	20	0.3	70	0.62	1589	32	140
JH 4	100	270	100	20	0.3	70	2.88	79461	23	2138
JH 5	5	13.5	220	20	0.3	70	1.06	8741	34	430

Tabelle 4: Zusammenstellung und Bewertung der Gefahrenpotentiale.

Gefahrenpotential	Dimensionierungsblock [m3]	Gefährlichkeit	Trefferwahrscheinlichkeit	Eintretenswahrscheinlichkeit	Intensitätsfaktor	Gefahrenklasse
JH 1*-1	2 1	Mittel Hoch	Hoch	Mittel Hoch	Stark	B A
JH 1*-2	2 1	Mittel Hoch	Hoch	Mittel Hoch	Stark	B A
JH 2	3	Mittel	Hoch	Mittel	Stark	B
JH 3*	10 2 1	Gering Mittel Hoch	Hoch	Gering Mittel Hoch	Stark	C B A
JH 4	100	Mittel	Hoch	Mittel	Stark	B
JH 5	5	Mittel	Hoch	Mittel	Stark	B

Die Problemstellung, die wie einleitend bereits erläutert, fiktiv ist, ist wie folgt definiert:

- Ermittlung und Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie.
- Ermittlung des Risikos in Bezug auf die Sachschäden an der Galerie und (zum Teil) die zu erwartenden Todesfälle pro Jahr.
- Ermittlung des Einflusses der Erhöhung der Dämpfungsschicht auf das Risiko.
- Ermittlung des Einflusses von Verstärkungsmassnahmen auf das Risiko.
- Einfluss der Vermeidung von Gefährdungen an bestimmten Ablösezeiten (z.B. durch Vernagelungen oder kontrollierte Sprengungen) auf das Risiko.

### 2.3. Systemdefinition

#### Dateneingabe

Die benötigten Informationen und Daten werden in die Maske, die in Abbildung 20 gegeben ist, eingegeben. Die Bestimmung der notwendigen Werte stellt keine Schwierigkeiten dar und entspricht den Angaben, die für eine Beurteilung ohnehin notwendig sind.

## 2. Teil II / Anwendungstest

Gallery		Project	
Name of the gallery	JH	Name of the author	JJ
Name of the road	NS-A9	Project ID	PRA-0834
Geological region	Penninic Nappes	Project name	Application Test
Year of construction [aaaa]	1984	Client	OFROU
Thickness of the concrete ceiling [m]	0.5	Date	11.08.2009
Cushion layer [m]	0.4	Version	A1
Length [m]	250	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #90EE90; display: inline-block;">                     Affirm system definition                 </div>	
Length of a section [m]	5		
Number of lanes per direction [#]	1		
Directions [#]	2		
Traffic characteristics			
	$\mu$	$\sigma$	Distribution
AADT per direction [Vehicles per day]	1210	655	Log-Normal
HGV [% of AADT]	16		
Congestions hours [ $a^{-1}$ ]	50	20	Log-Normal
Signalized speed [km/h]	80		

Abbildung 20 : Eingabe der Systemspezifikationen.

## Kommentare

- Die Auswahlmöglichkeit *geological region* hat nur einen Einfluss auf die Analyse, wenn in der Analyse die Option einer generischen Trajektorienanalyse gewählt wird (vgl. Kapitel 1.4). In diesem Beispiel wird die Trajektorienanalyse mit einem externen Programm durchgeführt und die Ergebnisse dieser berücksichtigt. Daher hat diese Auswahl hier keinen Einfluss.
- Die Rubriken *year of construction*, *thickness of the concrete ceiling* und *cushion layer* sind Indikatoren die ausschließlich den Widerstand der Galerie beschreiben. Die anderen Indikatoren, das sind *number of lanes per direction*, *directions* und insbesondere der Indikator *length of a section* haben keinen Einfluss auf den Widerstand.
- Die Struktur der Galerie wird als eine freiaufgelagerte Platte mit einer Spannweite von 9 m in Quer- und 10 m Längsrichtung (siehe auch Abbildung 37 auf Seite 86). Die Bewehrungsmenge wurde so angenommen, dass sich in der Betonplatte ein vollplastischer Spannungszustand ausbilden kann. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit wird durch Durchstanzen und Biegeversagen in Plattenmitte beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass der Stein in Plattenmitte einschlägt.  
In diesem Aspekt ist das Werkzeug restriktiv. Hier gibt es eine Vielzahl von Erweiterungsmöglichkeiten. Eine wäre, eine *gleichwertige* Plattendicke zu definieren, deren Festigkeit den tatsächlichen örtlichen Gegebenheiten entspricht. Dieses könnte jedoch ein Bias verursachen, da das Modell von Schellenberg die Steifigkeit des Dachs als zusätzlichen Parameter berücksichtigt. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, zusätzliche Module für die Software zu entwickeln.

- Die Rubrik *length* (Länge der Galerie) ist informativ und hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Da die Trajektorienanalysen die räumliche Ausdehnung nicht berücksichtigen, wird auch die Wahrscheinlichkeit, dass der Schutz für die Strasse in Bezug auf die Länge der Galerie nicht ausreicht, nicht berücksichtigt.

## 2.4. Expositionsmodell

### Dateneingabe

Die verwendeten Eingabewerte für die Quantilwerte der Überschreitungshäufigkeit der einzelnen Volumenbereiche sind in Abbildung 21 gegeben. Sie repräsentieren die Gefährdung  $JH I^*$ , die in Abbildung 19, Tabelle 3 und in Tabelle 4 definiert ist.

Für die Bestimmung der Parameter des Potenzgesetzes akzeptiert das Programm die Eingabe von lediglich zwei Volumenbereichen. Es können jedoch – in Abhängigkeit davon, wie viele Informationen zur Verfügung stehen – bis zu sieben Bereiche eingegeben werden.

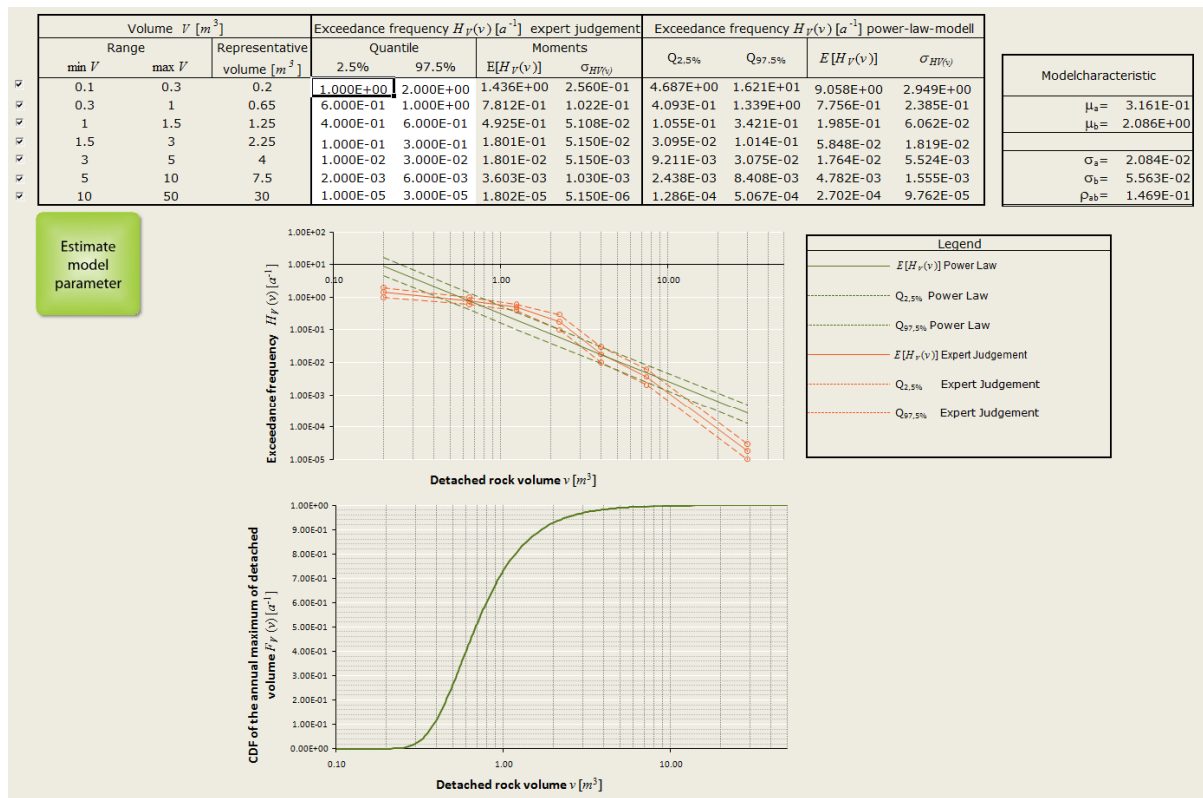


Abbildung 21 : Beschreibung der Exposition.

Die Eingabe wird nur für eine Ablösezone durchgeführt. In Anbetracht der unterschiedlichen Charakteristiken der verschiedenen Ablösezonen (Verteilung der Volumen, Eintretenshäufigkeiten, Fallhöhen und Fallgeschwindigkeiten) erscheint es sinnvoll, die Analyse für die verschiedene Zonen getrennt durchzuführen und das Gesamtrisiko anschliessend durch Aggregation zu erhalten.

Die Eingaben in die Tabelle in Abbildung 21 beziehen sich in diesem Test auf die Einschlagstelle und nicht auf die Ablösehäufigkeiten. Dies ist in diesem Test eine Besonderheit, auf die später noch Bezug genommen und die erläutert wird.

### Zwischenresultate

Das Programm verwendet ein Potenzgesetz zur Beschreibung der Überschreitungshäufigkeit. Die Parameter des Potenzgesetzes werden unter Verwendung der Experteneinschätzung geschätzt und in der Eingabemaske mit grünen Linien dargestellt (siehe Abbildung 21). Die roten Linien in Abbildung 21 entsprechen den Einschätzungen des Experten.

Für die Experten (Geologen und Ingenieure) kann die Darstellung des Potenzgesetzes und der Einschätzung von Vorteil sein, da sie ihre Einschätzung gegebenenfalls nochmal anpassen können, um die Repräsentativität der Eingabe besser abzustimmen.

### Kommentare

- Die Berücksichtigung der Information über die Exposition in dem Programm ist von zentraler Bedeutung und entscheidend für das Ergebnis.
- Die Daten, die in der ASTRA-Dokumentation zur Beschreibung der Exposition gefordert und formalisiert sind, sind nicht direkt übertragbar. Auch ist das Format nicht dasselbe. Eine neue Interpretation der Gefährdung des Geologen (und möglicherweise auch eine neue Datenerfassung in diesem Gebiet) wird notwendig. Für einen ersten Schritt in diese Richtung erscheint die Eingabe in diesem Programm für dieses Beispiel jedoch zufriedenstellend.
- Das hier gewählte Format der Beschreibung der Gefährdung ist eine Möglichkeit (gemäss der Ansicht eines erfahrenen Geologen).
- Das Programm ist stark auf allgemeine (generische) Beurteilungen zugeschnitten. Die Modellierung beginnt an der Ablösestelle, über die oft wenig Wissen vorhanden ist. Für eine konkrete Situation – analysiert durch einen Experten – scheint es angebrachter zu sein, vorhandene Daten direkt mit der Frequenz von Schäden an der Galerie zu verknüpfen. Dies basiert auf Beobachtungen (Ereigniskataster) und berücksichtigt auch die betroffene Fläche und damit auch die Länge der Galerie. Basierend darauf werden dann die Trajektorienanalysen durchgeführt.

## 2.5. Generische Trajektorienanalyse

### Vorwort

Das Programm erlaubt es hier zwei Optionen zu wählen. Die erste *Perform trajectory analysis* ermöglicht es, Fallanalysen unter Verwendung einer Verallgemeinerung der Geometrie des Hangs durchzuführen.

Die zweite Option *Skip generic trajectory analysis* ermöglicht die Verallgemeinerung zu umgehen und die Ergebnisse einer extern durchgeführten Trajektorienanalyse zu berücksichtigen. Diese kann

dann die tatsächliche Ist-Situation berücksichtigen. So können spezifische Charakteristiken des Hangs berücksichtigt werden und die Erfahrung des Experten im Umgang mit diesen Werkzeugen genutzt werden.

In diesem Beispiel wurde diese zweite Option gewählt. Die Ergebnisse – das sind die Fallgeschwindigkeit auf dem Galeriedach – werden direkt in die Eingabemaske *result of the trajectory analysis* eingegeben (siehe Abbildung 22)

## Dateneingabe

Die Werte aus der externen Trajektorienanalyse sind in Abbildung 22 zusammengestellt. Sie wurden aus den bestehenden Daten für die konkrete Galerie gewonnen. Man erkennt zwei Populationen der Einschlaggeschwindigkeiten. Das Histogramm ist bimodal mit einem ersten Modus bei einer Fallgeschwindigkeit von  $30 \text{ m/s}$  und einem zweiten Modus bei einer Fallgeschwindigkeit von  $18 \text{ m/s}$ .

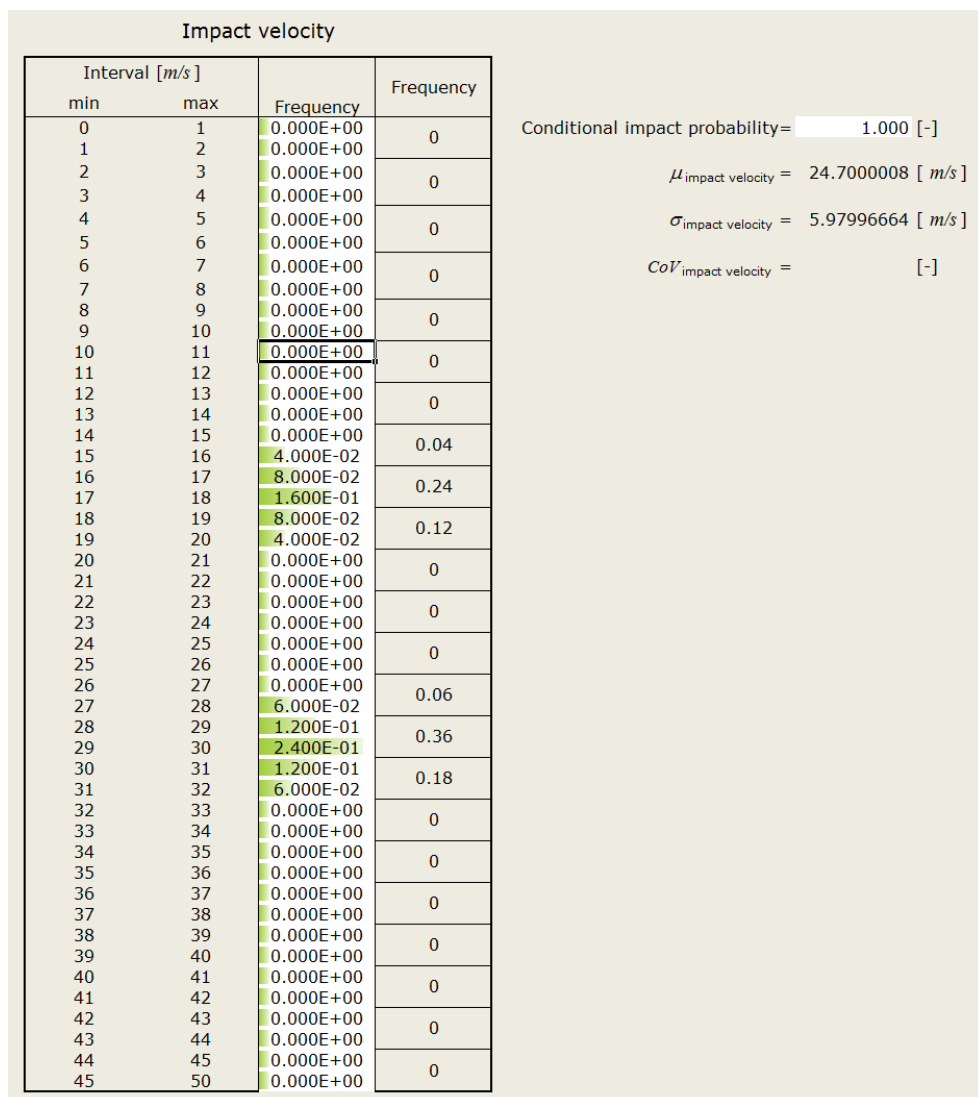


Abbildung 22 : Ergebnis der Fallanalyse.

## 2. Teil II / Anwendungstest

Da die Fallgeschwindigkeit als relative Häufigkeiten eingegeben wird, muss die Summe der Daten 1 ergeben. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stein die Galerie trifft (*conditional impact probability*) wurde zu Eins gesetzt.

Das Programm erfordert es, dass alle Felder ausgefüllt sind, d.h. es müssen Nullwerte in alle Felder eingegeben werden, die nicht relevant sind.

### Kommentare

Die Verwendung externer Trajektorienanalysen führt zu genaueren Ergebnissen und stellt keine besonderen Schwierigkeiten dar.

Es kann jede Form von Verteilungsfunktion der Einschlaggeschwindigkeiten berücksichtigt werden. Hier im Beispiel wurde eine bimodale Häufigkeitsverteilung berücksichtigt.

Wie zuvor erwähnt, beziehen sich die Häufigkeiten von Steinschlagereignissen in diesem Test auf den Einschlagort und nicht auf die Ablösestelle. Wenn die Ablösehäufigkeiten, die zur Beschreibung der Gefährdung eingegeben werden (vgl. Kapitel 1.3) sich auf die Trefferhäufigkeiten auf der Galerie beziehen, so kann die bedingte Trefferwahrscheinlichkeit (*conditional impact probability*) zu Eins gesetzt werden. Dies ist hier möglich, da das gewählte Trajektorienmodell eine Punktmasse berücksichtigt und die Trefferwahrscheinlichkeit der Galerie daher unabhängig von der Grösse des Ereignisses ist.

## 2.6. Verletzbarkeitsmodell / BPN

Die Maske zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie erfordert keine Eingaben des Benutzers. Alle erforderlichen Daten sind bereits eingegeben. Die Maske stellt nochmal die Eingabewerte zusammen und zeigt das verwendete Bayes'sche Netzwerk. Die Berechnung startet nach Betätigung des Buttons *calculate failure probability* (siehe Abbildung 23).

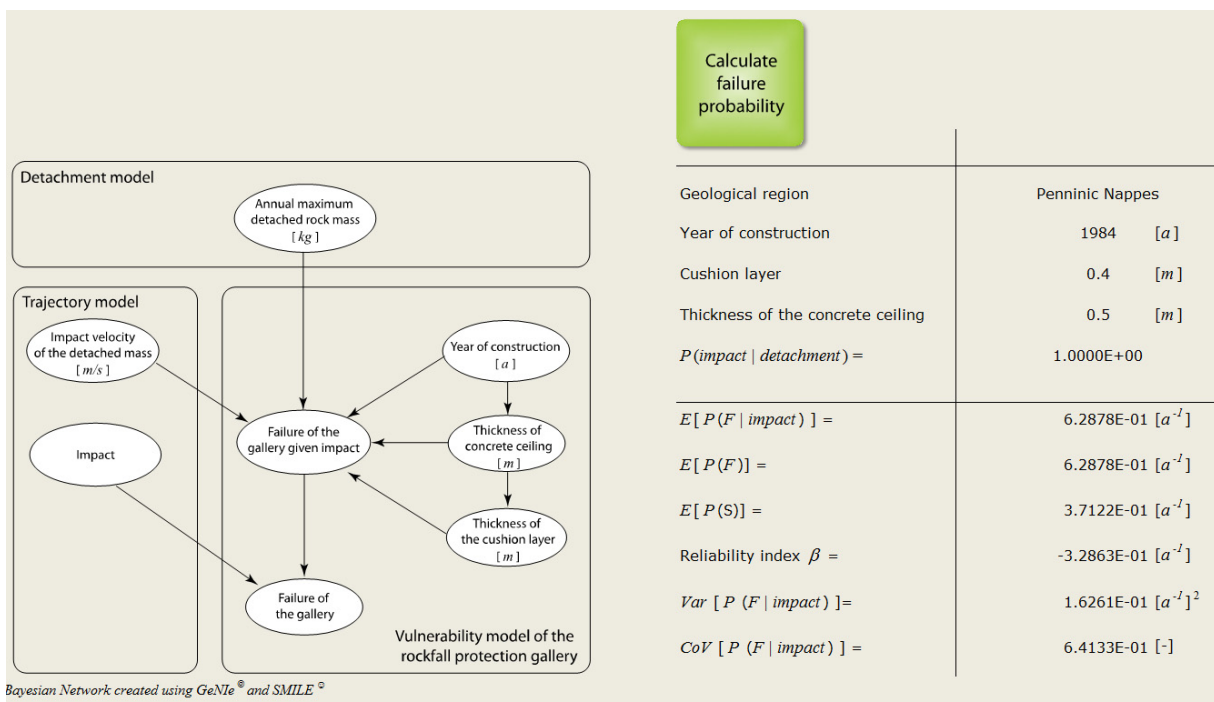


Abbildung 23 : Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie.

Der Erwartungswert der Versagenswahrscheinlichkeit stellt den Kern der Analyse dar und ist die Zahl mit der grössten Signifikanz für die Analyse. Er wird unter  $E[P(F)]$  gegeben.  $E[P(S)]$  gibt die Komplementärwahrscheinlichkeit zur Versagenswahrscheinlichkeit an und kann als jährliche Wahrscheinlichkeit für das Überleben der Galerie interpretiert werden.

### Kommentare

Die Grenzzustandsfunktion beschreibt den mechanischen Versagenszustand der Galerie. Sie ist im Programm impliziert und kann vom Anwender nicht geändert werden. Sie basiert auf den folgenden grundsätzlichen Annahmen:

- Der dynamische und statische Widerstand der Galerie gegenüber jedem aufschlagenden Stein wird durch das Modell von Schellenberg (Schellenberg (2008)) beschrieben, d.h. sie stimmt nicht mit dem Modell, welches in der bestehenden Richtlinie des ASTRA (2008) gegeben ist, überein.
- Die Widerstände werden ausschliesslich auf der Grundlage der Dicke der Betonplatte und der zur Bauzeit aktuellen Normengeneration berechnet. Der Bewehrungsgrad wird unter der Annahme der Ausbildung eines vollplastischen Spannungszustandes (vgl. SIA262:2003 (2003)) für die Grenzzustände Biegung und Durchstanzen des Steines durch die Platte berechnet. Durchstanzen der Stützen an den Auflagern wird als Versagensmechanismus ausgeschlossen.

In einer ersten Bewertung scheint die Betonplatte nach dem Modell von Schellenberg (2008) deutlich höhere Belastungen aufnehmen zu können als nach dem Modell des ASTRA. Für den Widerstand ist es aber nicht a-priori gesichert, dass die Betonplatten plastisch bemessen worden sind. Zudem kann im Programm die Eigenschaft der Dämpfungsschicht nicht verändert werden und somit keine Untersuchung durchgeführt werden, ob andere Materialien oder konstruktive Massnahmen das Risiko reduzieren könnten.

Die Annahmen im Programm sind getroffen worden, um einen generischen Charakter zu erhalten. Dieser generische Charakter wird durch die teilweise restriktiven Annahmen für die spezifischen Einzelfälle *erkauf*t. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass detailliertere Studien mit der generellen Methodik, die hier vorgestellt wird, möglich sind. Jede der getroffenen Annahmen kann in einer Einzelstudie relaxiert werden. Der Aufwand für die Berechnung und Beurteilung steigt entsprechend. Eine Präposterioranalyse kann generell zeigen, ob es sich lohnt, detailliertere Studien durchzuführen.

Die Plausibilität der Ergebnisse der Versagenswahrscheinlichkeit  $E[P(F)]$  kann nur bedingt durch Beobachtungen verifiziert werden, da die Beobachtungszeiträume meist zu gering sind. Nur bei sehr hohen Eintretenswahrscheinlichkeiten ist dies möglich. Gründe für sehr hohe Versagenswahrscheinlichkeiten der Galerie resultieren meist aus einer Überschätzung der Ablösehäufigkeiten. Ein weiterer Grund kann auch in den verwendeten Modellen zur Bestimmung der (statischen und dynamischen) Widerstände auf der Galerie liegen.

## 2.7. Konsequenzmodell

Die Eingabemaske für die Konsequenzen infolge Versagen der Galerie ist in Abbildung 24 gegeben. Sie ermöglicht dem Anwender Werte für unterschiedliche Typen von Konsequenzen zu definieren und einzugeben.

<i>Damage Gallery</i>	$\mu$	$\sigma$	Distribution
Property damage gallery [CHF/m]	25000	2500	Normal
Property damage road [CHF/m]	10000	2000	Normal
Administration costs [CHF]	5000	750	Normal
Clean-up costs [CHF/m]	10000	1800	Normal
<i>Compensation Costs</i>			
Cost per fatality [CHF]	3.00E+06	1.00E+06	Normal
Cost per HGV [CHF]	250000	62500	Normal
Cost per car [CHF]	17000	4250	Normal
<i>Societal Costs</i>			
Days of closed road	10	2	Log-Normal
Detour Length [km]	20	3	Log-Normal
Detour velocity [km/h]	100	15	Log-Normal
User costs [CHF/(h vehicle)]	35	3.5	Log-Normal
Marginal costs for a fatality [CHF]	3.88E+06		Deterministic

Abbildung 24 : Konsequenzmodell.

Standardmässig werden Werte für die Konsequenzen vom Programm vorgeschlagen, die der Anwender jedoch fallweise anpassen und verändern kann.

### Kommentare

- Die berücksichtigten Konsequenzen werden klar dargestellt.
- Die vorliegende Dokumentation enthält einige wertvolle Hinweise für die Quantifizierung der Konsequenzen.
- Ist es notwendig, weitere Konsequenzen zu berücksichtigen (direkt – intern – materiell oder andere), können diese den anderen Typen von Konsequenzen zugeordnet werden. Dabei ist eine besondere Sorgfalt des Anwenders erforderlich, damit die Risiken korrekt berechnet werden.

## 2.8. Risikoanalyse – Risikoverteilungen

Die Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen die detaillierten Ergebnisse der Risikoanalyse. Die Ergebnisse sind in einer hierarchischen Form geordnet.

<i>Risk</i>	$\mu$	$\sigma$	<i>CoV</i>	<i>Type of risk</i>	
Expected property damage gallery [CHF/a]	78563.1	51333.8	0.653	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected property damage road [CHF/a]	31330.3	21455.8	0.685	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected administration costs [CHF/a]	3140.0	2092.2	0.666	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected clean-up costs [CHF/a]	31419.4	21271.9	0.677	<i>direct</i>	<i>internal</i>
Expected property damage cars [CHF/a]	428.8	555.4	1.295	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected property damage HGV [CHF/a]	1577.1	2044.2	1.296	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected number fatalities [1/a]	3.2748E-02	3.6175E-02	1.105	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected compensation costs for fatalities [CHF/a]	98094.4	119053.4	1.214	<i>indirect</i>	<i>internal</i>
Expected days of road closure [days/a]	6.2860E+00	4.3068E+00	0.685	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected user costs [CHF/a]	108403.7	157644.2	1.454	<i>indirect</i>	<i>external</i>
Expected societal costs for fatalities [CHF/a]	127061.7	140360.6	1.105	<i>indirect</i>	<i>external</i>
<b><i>Aggregated Risk</i></b>	$\mu$	$\sigma$	<i>CoV</i>		
Direct internal risk [CHF/a]	144452.8	93796.9	0.649		
Indirect internal risk [CHF/a]	98094.4	119053.4	1.214		
Indirect external risk [CHF/a]	237471.2	286890.0	1.208		
Total internal risk [CHF/a]	242547.2	186183.2	0.768		
Total external risk [CHF/a]	237471.2	286890.0	1.208		

Abbildung 25 : Ausgabe der Risiken, aufgeschlüsselt für verschiedene Typen sowie aggregiert.

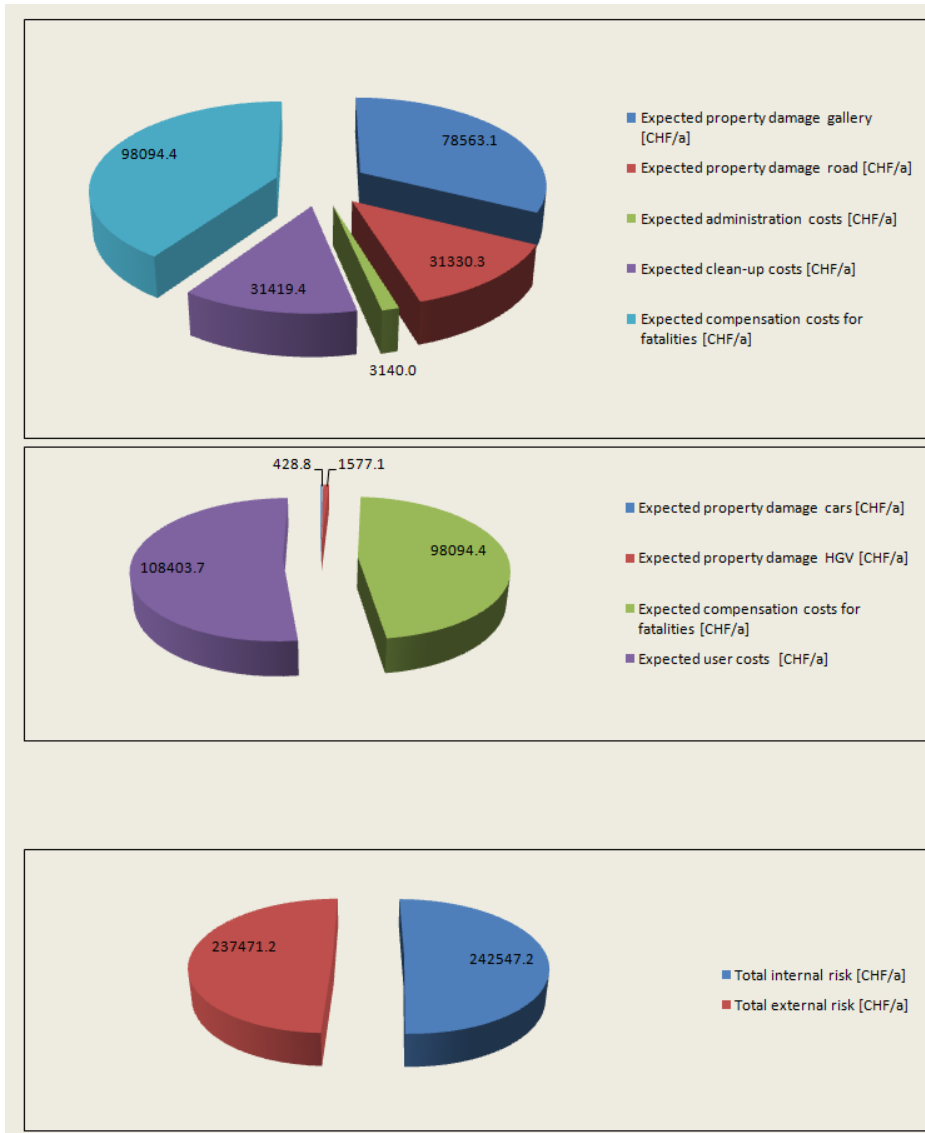


Abbildung 26 : Darstellung der aggregierten Risiken.

## Kommentare

Die Darstellung der Ergebnisse ist sehr klar und einfach und kann dem Anwender helfen, in ganz unterschiedlichen Entscheidungssituationen Entscheidungen zu treffen und zu rechtfertigen. So kann beispielsweise die Minimierung der totalen Konsequenzen gefordert sein. Auch Entscheidungen, die nur auf die Minimierung der Todesfälle abzielen, können unterstützt werden. Es sei angemerkt, dass Entscheidungen nur rational sind, wenn sie auf die Minimierung der Kosten des Entscheidungsträgers abzielen.

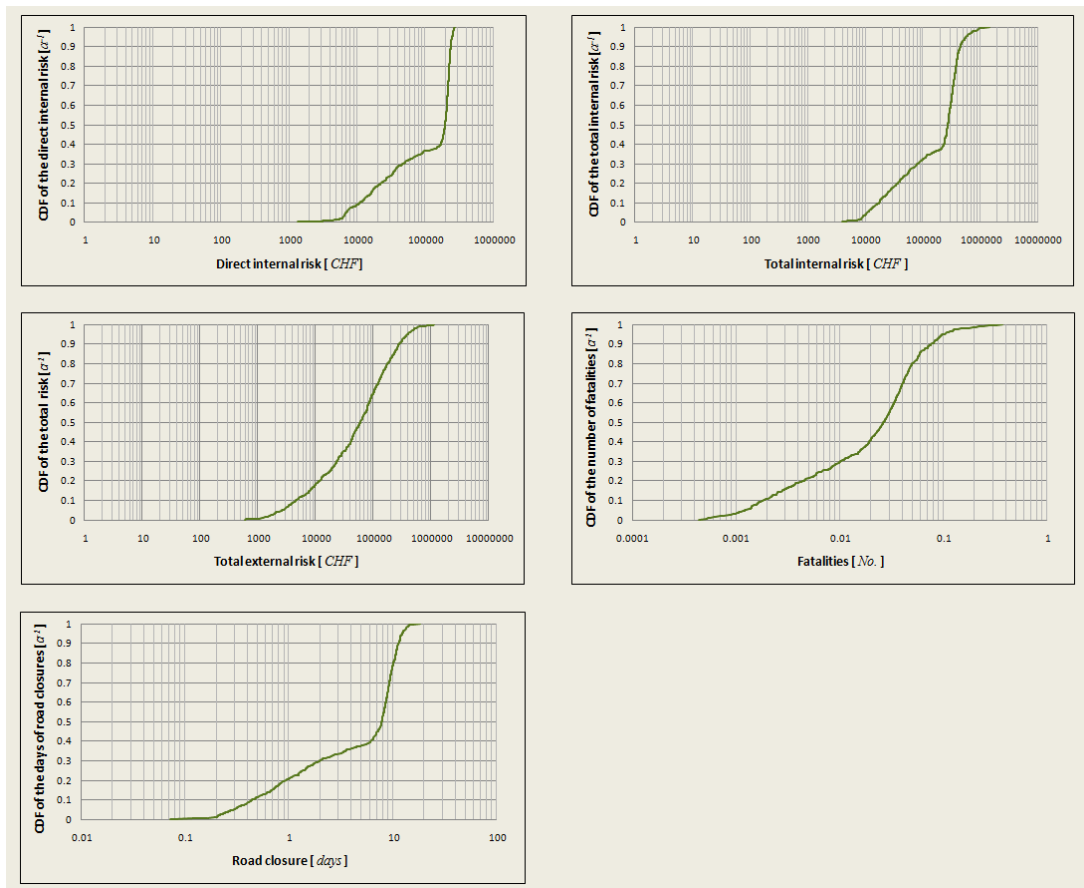


Abbildung 27 : Verteilung des Risikos.

## 2.9. Sensibilitätsanalyse

In diesem Teil wird eine Sensibilitätsstudie durchgeführt, um den Einfluss ausgewählter Parameter zu zeigen und das Potential und die Grenzen des Werkzeugs auszuloten.

### 2.9.1. Einfluss der bedingten Einschlagwahrscheinlichkeit

Zuerst wird der Einfluss der Änderung der bedingten Einschlagwahrscheinlichkeit in der Fallanalyse untersucht (vgl. auch Abbildung 22). Durch eine Reduktion der bedingten Einschlagwahrscheinlichkeit (*conditional impact probability*) von 1.0 auf 0.5 reduziert sich die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie  $E[P(F)]$  (Abbildung 23) und folgerichtig auch der Erwartungswert des Sachschadens an der Galerie (*expected property damage gallery*) (Abbildung 25) um den Faktor 0.5.

Dieser Parameter kann dazu verwendet werden, um Aspekte der Häufigkeit von Ablöseereignissen zu ändern. So kann anstelle der Formulierung *Ablösehäufigkeit* an der Ablösestelle auch die Häufigkeit an der Einschlagstelle formuliert werden und die bedingte Einschlagwahrscheinlichkeit zu 1.0 gesetzt werden.

### 2.9.2. Einfluss der Überschreitungshäufigkeit von Ereignissen

Die Werte zur Beschreibung der Ablösehäufigkeiten wurden halbiert (vgl. Abbildung 21). In diesem Fall reduziert sich die Versagenswahrscheinlichkeit um 66%. Es wird deutlich, dass die Versagenswahrscheinlichkeit sich leicht nichtlinear zur Exposition verhält.

### 2.9.3. Einfluss der Einschlaggeschwindigkeiten der Steine

Die Einschlaggeschwindigkeiten, die im Histogramm in Abbildung 22 gegeben sind, werden wie folgt variiert:

- a) Die Population der Einschlaggeschwindigkeiten zwischen 28 und 32 m/s wird zu 0 gesetzt. Die Häufigkeiten der Population zwischen 16 und 20 m/s wird mit 0.4 skaliert, so dass die Summe der relativen Häufigkeiten 1 ergibt.
- b) Die Population der Einschlaggeschwindigkeiten zwischen 16 und 20 m/s wird zu 0 gesetzt. Die Häufigkeiten der Population zwischen 28 und 32 m/s wird mit 0.6 skaliert, so dass die Summe der relativen Häufigkeiten 1 ergibt.

Die Populationen der Geschwindigkeiten zu trennen hat einen praktischen Hintergrund. So können Massnahmen betrachtet werden, die eine der Populationen filtern. Solche Massnahmen können beispielsweise die Anbringung eines Steinschlagnetzes sein.

Die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie für den Fall a) respektive b) beträgt  $4.20 \cdot 10^{-2} [a^{-1}]$  und  $5.39 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$ . Die Summe der beiden Fälle entspricht der ursprünglichen Modellierung ( $6.29 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$ ). Dasselbe gilt für die korrespondierenden Risiken für die beiden Fälle ( $11303 [CHF / a^{-1}] + 67260 [CHF / a^{-1}] \cong 78563 [CHF / a^{-1}]$ ).

Das Werkzeug eignet sich gut für die Beurteilung von Massnahmen, die sich auf die Reduktion der Einwirkungen beziehen.

### 2.9.4. Einfluss des Widerstands der Galerie

Die Indikatoren, die den Widerstand der Galerie beschreiben, sind das Baujahr, die Höhe der Eindeckung und die Dicke des Galeriedachs.

Eine Vergrößerung der Dicke der Betondecke von 0.50 m auf 0.65 m führt zu einer Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit von  $6.29 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$  auf  $3.13 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$ .

Wird nur das Baujahr der Galerie von 1984 auf 1956 geändert, so erhöht sich die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie von  $6.29 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$  auf  $6.80 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$ .

Von diesen quantitativen Ergebnissen können keine allgemeinen Regeln oder Trends abgeleitet werden. Die qualitativen Trends, die in diesem Test beobachtet werden, spiegeln die Erwartungen wieder, die aus den Veränderungen in der Eingabe resultieren sollten.

### 2.9.5. Einfluss der Eindeckungshöhe

Die Erhöhung der Dämpfungsschicht auf der Galerie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit. Eine Erhöhung der Eindeckung von 0.4 auf 0.8 m verringert die Versagenswahrscheinlichkeit von  $6.29 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$  auf  $2.48 \cdot 10^{-1} [a^{-1}]$ . Die Konsequenzen verringern sich damit im Verhältnis zur Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit.

### 2.9.6. Weitere Parameter

Wie bereits in Kapitel 2.3 erläutert, sind die folgenden Aspekte insbesondere zu beachten:

- Der Parameter *length of a section definiert* den Abstand zwischen Fertigungsabschnitten und wird lediglich in der Analyse der Konsequenzen verwendet. Auf die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit hat sie keinen Einfluss.
- Der Parameter *length* berücksichtigt die Länge der Galerie. Dieser Wert wird in der Berechnung nicht berücksichtigt und hat nur informierenden Charakter.
- Der Parameter zum Verkehr (z.B. Anzahl an Spuren pro Richtung) wird nicht verwendet, um die Breite der Galerie zu berücksichtigen und das Widerstandsmodell anzupassen. Diese Information wird nur in Bezug auf die Konsequenzen verwendet.

### 2.9.7. Generelle Anmerkungen

Das vorliegende Werkzeug ist ein leistungsfähiges Mittel zur Beurteilung des Risikos und zur Beurteilung der Effizienz von Massnahmen und Interventionen. Neben dem generischen Charakter des Programms (auf den in diesem Beispiel kein Fokus gelegt wurde), bietet das Programm eine Reihe von Möglichkeiten, um in einem ersten Stadium Massnahmen zu prüfen. Es kann helfen, optimale Strategien für die Risikoreduzierung zu identifizieren.

Die Prüfung der Plausibilität der quantitativen Ergebnisse erfordert eine besondere Sorgfalt seitens des Anwenders. Die Resultate sind sehr sensitiv in Bezug auf die vorliegenden Daten und Informationen über die Exposition. Auch die Modellierung des Widerstandes sind Vereinfachungen der Wirklichkeit, die die Sensitivität beeinflussen (z.B. das gewählte statische System und das verwendete Modell von Schellenberg (2008)).

Der Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie mit historischen Daten sollte mit Vorsicht bewertet werden. Es kann sein, dass die Angaben des Geologen zur Exposition beispielsweise zu pessimistisch getroffen wurden. Das Verletzbarkeitsmodell ist eine Neuentwick-

## 2. Teil II / Anwendungstest

lung und bedarf noch einer genauen Untersuchung. Es sollte noch nicht als Stand der Technik angesehen werden.

Für weitere Entwicklungen wird vorgeschlagen, sich auf die Ausweitung des Modells der Verletzbarkeit zu konzentrieren. Auf der einen Seite sollte das Modell für andere statische Systeme erweitert werden, auf der anderen Seite mehr Informationen über das System zulassen. Auch sollte das Modell experimentell weiter validiert werden und mehr Erkenntnisse im Bereich der dynamisch-mechanischen Beanspruchung gewonnen werden, insbesondere im Hinblick auf die verschiedenen Versagensmodi.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

#### 3.1. Systemdefinition

In der Systemdefinition können verschiedene Angaben zur Galerie gemacht werden, die zur Risikoermittlung benötigt werden. Viele dieser Angaben werden als Evidenz im Bayes'schen Netz, welches zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit verwendet wird, eingeführt (siehe Kapitel 3.7). Sind Werte dem Anwender unbekannt, so gibt er das Kürzel *N/A* (engl. *Not Available*) in der Eingabemaske ein. In diesen Fällen werden *a-priori* Verteilung für die Analyse verwendet. Im Folgenden werden die *a-priori* Verteilungen angegeben, diskutiert und – wo möglich – auch referenziert.

#### 3.2. Eigenschaften der Steinschlaggalerie

##### A-priori Verteilung der Baujahre der Galerien

Um die *a-priori* Verteilung der Baujahre der Galerien in der Schweiz zu bestimmen, wurde die Datenbank von Schellenberg und Vogel (2005) verwendet. Sie enthält 314 Einträge von Galerien aus einem Zeitraum von 1895 bis 2005. Die Häufigkeitsverteilung der Baujahre der Galerien (Steinschlag und Lawinen) ist in Abbildung 28 gegeben.

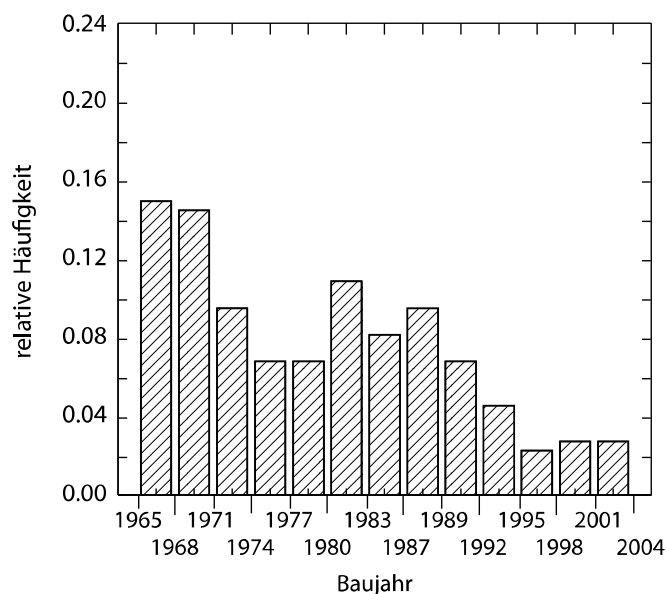


Abbildung 28 : Relative Häufigkeit der Baujahre von Steinschlag und Lawinengalerien in der Schweiz.

Aus dieser Häufigkeitsverteilung kann die Wahrscheinlichkeit dafür ermittelt werden, dass eine beliebig ausgewählte Galerie in der Schweiz in einem bestimmten Jahr gebaut worden ist.

Daraus kann geschlossen werden, dass 29% aller Galerien unter Verwendung der SIA162:1956 (1956) erbaut worden sind, 47% unter Verwendung der SIA162:1968 (1968), 7% mit der SIA162:1989 (1993) und 8% während der Gültigkeit SIA162:1993 (1993). Lediglich 1% sind unter Verwendung der neuesten Normengeneration, der SIA262:2003 (2003), gebaut worden. Die

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

fehlenden 9% wurden vor 1956 gebaut, die meisten davon unter Verwendung der SIA112:1935. Vor dieser Zeit gab es lediglich Verordnungen und provisorische Baunormen.

In diesem Modell wurden nur Normen nach 1956 berücksichtigt. Es gibt wenige Informationen zu den Eigenschaften der Materialien, die vor 1956 eingesetzt worden sind. Es kann jedoch angenommen werden, dass die vorher verwendeten Materialien nicht wesentlich unterschiedliche Charakteristiken hatten. Daher werden als Approximation die Materialkennwerte nach der SIA1956 auch für ältere Galerien verwendet.

Tabelle 5: *A-priori* Wahrscheinlichkeit der verwendeten Normengeneration.

Normengeneration	a-priori Wahrscheinlichkeit
SIA1956	0.38
SIA1968	0.47
SIA1989	0.07
SIA1993	0.08
SIA2003	0.01

Liegen Informationen über das Baujahr der Galerie vor, so wird diese Information direkt verwendet und im Bayes'schen Netz Evidenz über diesen Zustand eingefügt. Liegt keine Information über das Baujahr vor, d.h. der Anwender hat in dem entsprechenden Feld der Systemdefinition *N/A* eingegeben, so wird die *a-priori* Wahrscheinlichkeitsverteilung nach Tabelle 5 in der Berechnung verwendet.

#### **Dicke der Galeriedecke**

Neben den Baujahren wurde in der Datenbank von Schellenberg und Vogel (2005) auch die Art und die Dicken der Deckenplatten aufgenommen. Diese Information wurde hier verwendet, um die *a-priori* Wahrscheinlichkeit für die verschiedenen Dicken von Deckenplatten zu ermitteln. Die Datenbank enthält von 206 Galerien Informationen über die Dicke der Deckenplatte.

Wie die Abbildung 29 zeigt, ist die Bandbreite relativ gross. Die maximale Dicken von Deckenplatten von 2.00m, die in die Datenbank aufgenommen wurde, stellt eine Ausnahme dar und wurde hier nicht berücksichtigt. Da grössere Dick von Galeriedecken sehr selten sind, werden diese Fälle hier nicht berücksichtigt.

In Tabelle 6 ist die gewählte Diskretisierung der Deckenstärke, wie sie im Bayes'schen Netz verwendet wurde, und die *a-priori* Wahrscheinlichkeit zusammengestellt.

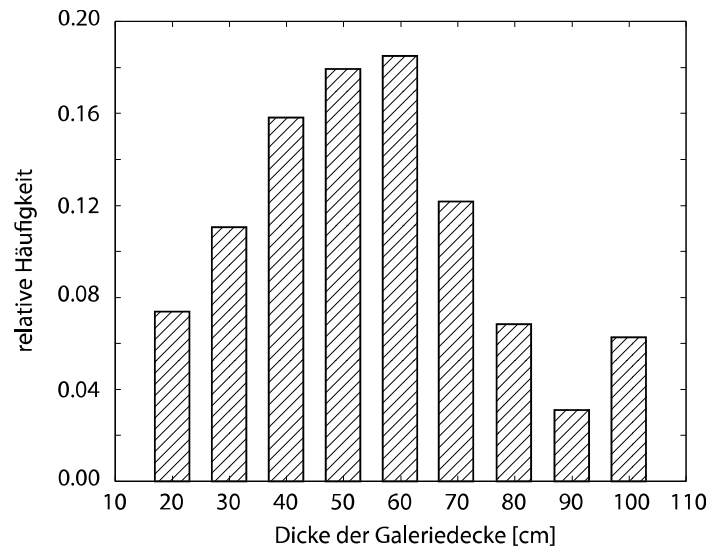


Abbildung 29 : Relative Häufigkeit der Dicken der Galeriedecken an Schweizer Steinschlaggalerien.

Tabelle 6: A-priori Wahrscheinlichkeit der Dicken der Galeriedecken in Abhängigkeit von der Normengeneration.

		Normengeneration				
		SIA1956	SIA1968	SIA1989	SIA1993	SIA2003
Dicke der Galeriedecke [m]	0.40	0.2222	0.2195	0.2856	0.0001	0.0179
	0.45	0.3333	0.0854	0.0001	0.0001	0.0179
	0.50	0.1851	0.1829	0.0713	0.0001	0.0179
	0.55	0.0001	0.0976	0.0001	0.0711	0.0179
	0.60	0.0369	0.0610	0.4286	0.0001	0.0179
	0.65	0.1111	0.0854	0.0713	0.1428	0.0179
	0.70	0.0001	0.0976	0.0001	0.1429	0.0179
	1.00	0.1111	0.1707	0.1429	0.6429	0.0179

### Höhe der Eindeckung

Über die Höhe der Sand-Kies-Eindeckung auf dem Galeriedach macht die Datenbank keine Aussagen. Anhand der Simplon-Studie von Jacquemoud und Pasquier (2007) und den darin vorhandenen Zeichnungen, wurde die bedingte Wahrscheinlichkeit der Eindeckungshöhe abgeschätzt. Die Bedingung ergibt sich aus dem erkennbaren Zusammenhang zwischen Deckenhöhe und Eindeckungshöhe. Auf dieser Basis wurden die Wahrscheinlichkeiten, die in Tabelle 7 gegeben sind, geschätzt.

Es ist deutlich der Trend zu erkennen, dass je grösser die Deckendicke der Galerie ist, desto höher ist auch die Eindeckung. Diese Tabelle wird nur verwendet, wenn der Anwender keine Evidenz in das Modell über die Höhe der Eindeckung einführt, d.h. *N/A* in der Eingabemaske eingibt.

Tabelle 7: Bedingte a-priori Wahrscheinlichkeit der Höhe der Eindeckung der Galerie

		Dicke der Galeriedecke [m]							
		0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	1.00
Höhe der Eindeckung [m]	0.40	0.8	0.75	0.4	0.1	0.05	0.001	0.001	0.001
	0.55	0.1	0.12	0.2	0.2	0.1	0.001	0.001	0.001
	0.70	0.05	0.08	0.2	0.4	0.6	0.198	0.048	0.001
	0.85	0.047	0.047	0.15	0.2	0.2	0.5	0.2	0.97
	1.00	0.001	0.001	0.048	0.98	0.048	0.2	0.5	0.3
	1.15	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.03	0.2	0.5
	1.30	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.05	0.1

### Länge des Bauabschnitts

Bei einem Versagensereignis der Galerie muss in der Regel nur ein kleiner Teil der Galerie ausgetauscht werden. Dieser Teil entspricht meist den Bau- und Betonierabschnitten der Galerie. Im Mittel dürften diese Bauabschnitte mit dem Stützenabstand zusammenfallen. Gibt der Anwender für die Länge des Bauabschnittes  $N/A$  ein, so wird mit einer mittleren Abschnittslänge von  $8.00m$  gerechnet.

### Anzahl Fahrspuren pro Richtung

Die meisten Galerien sind so ausgelegt, dass es nur eine Fahrspur pro Richtung gibt. Ausnahmen entstehen meist dadurch, dass eine Richtung durch einen Tunnel führt und die andere Richtung durch eine Galerie geschützt wird.

In diesen Fällen stehen pro Richtung zwei Fahrspuren zur Verfügung. Es kann angenommen werden, dass 90% aller Galerien eine Fahrspur pro Richtung besitzen. Stehen keine Informationen über die Anzahl Fahrspuren pro Richtung zur Verfügung, so wird diese *a-priori* Verteilung verwendet.

### Richtungen

Die Anzahl Richtungen, die geschützt werden (also eine oder zwei), ist abhängig davon, ob es an derselben Stelle auch einen Tunnel gibt. Ist ein Tunnel vorhanden, so wird nur eine Richtung von der Galerie geschützt. Hier gibt eine sehr hohe Korrelation zwischen Anzahl Fahrspuren pro Richtung und der Anzahl Richtungen. Gibt es zwei Fahrspuren pro Richtung, so ist fast sicher, dass nur eine Richtung geschützt wird. Auf der anderen Seite ist es fast sicher, dass zwei Richtungen geschützt werden, wenn es nur eine Fahrspur pro Richtung gibt.

Trotz dieses starken Zusammenhangs ist es sinnvoll, die beiden Indikatoren *Anzahl Fahrspuren* und *Richtungen* getrennt voneinander zu berücksichtigen, da dadurch auch die eindeutige und unmissverständliche Angabe und Berücksichtigung des DTV ermöglicht wird.

### 3.3. Eigenschaften des Verkehrs

#### Durchschnittlicher täglicher Verkehr DTV

Für die Modellierung der Konsequenzen infolge Steinschlags ist es notwendig, den Verkehr zu beschreiben. Die Verkehrsstärke beeinflusst das Risiko sowohl direkt durch die Möglichkeit, dass Verkehrsteilnehmer von einem Ereignis direkt betroffen sind, als auch indirekt durch die längeren Verkehrswege, die aus einer Sperrung der Strasse nach einem Versagensereignis resultieren.

Die Verkehrsstärke ist eine unsichere Grösse, dessen Variabilität mehrere Dimensionen hat. Sie zeigt eine tageszeitliche und eine jahreszeitliche Variabilität, kausal bedingt durch die unterschiedlichen Verkehrsklassen.

Für die Modellierung der Konsequenzen wird der DTV verwendet, da kein Zusammenhang zwischen der Steinschlaghäufigkeit und der Tages- und Jahreszeit modelliert wird. Daher muss auch die tageszeitliche und jahreszeitliche Variabilität des Verkehrs nicht explizit berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.4). Liegen Modelle oder weitere Indikatoren vor, die die jahreszeitliche Variabilität berücksichtigen können, so ist sowohl das Ablösemodell als auch das Verkehrsmodell dementsprechend anzupassen. Zur Berücksichtigung der Variabilität im Verkehr wird dieser Wert als Zufallsvariable modelliert. Der DTV wird aus den stündlichen Messwerten eines Jahres des Bundesamt für Statistik (BFS) (2007) (online verfügbar) modelliert und setzt sich zusammen aus der Summe der Fahrzeugkategorien CA (Busse), LI (Lieferwagen), LW (Lastwagen), LZ (Lastzüge), SZ (Sattelzüge), MR (MOTORRÄDER) und PW (Personenwagen).

Für die steinschlaggefährdeten Kantone Glarus (GL), Graubünden (GR), Nidwalden (NW), Schwyz (SZ), Tessin (TI), Uri (UR) und Wallis (VS) (nicht exklusive Liste, siehe auch Bundesamt für Strassen (2003)) sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen des DTV für die Nationalstrassen in Tabelle 8 und für Haupt- und Kantonsstrassen in Tabelle 9 zusammengestellt.

Diese Werte können in der Analyse verwendet werden. Wird kein Wert angegeben, so werden die Charakteristiken der Nationalstrassen in den steinschlaggefährdeten Kantonen in der Analyse berücksichtigt. Der Mittelwert aller Nationalstrassen in diesen Kantonen beträgt  $\mu_{DTV} = 11926 [Fzg / d]$  und die Standardabweichung beträgt  $\sigma_{DTV} = 3781 [Fzg / d]$ . Ist der Mittelwert bekannt und die Standardabweichung unbekannt, so wird in der Software die Standardabweichung über den mittleren Variationskoeffizient von  $COV = 0.32 [-]$  berechnet. Die Analyse der Daten zeigt, dass die Unsicherheiten des DTV mit einer Lognormalverteilung repräsentiert werden können.

Für Haupt- und Kantonalstrassen beträgt der Mittelwert des DTV  $\mu_{DTV} = 3224 [Fzg / d]$ . Die Standardabweichung beträgt  $\sigma_{DTV} = 1200 [Fzg / d]$ . Der Variationskoeffizient liegt mit  $COV = 0.37 [-]$  etwas über dem für Nationalstrassen.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

*Tabelle 8: Statistik des DTV pro Richtung für Nationalstrassen in den steinschlaggefährdeten Kantonen basierend auf Daten der automatischen Verkehrszählung von 2007 (berechnet unter Verwendung der Daten des Bundesamt für Statistik (BFS) (2007)).*

Zählstelle	Bezeichnung	Kanton	Strasse	$\mu_{DTV}$	$\sigma_{DTV}$
044	SAN BERNARDINO (TUNNEL)	GR	A 13	3060	1655
053	WEESEN, KERENZERBERG	GL	A 3	14927	3937
076	GRANCIA	TI	A 2	31957	5436
096	DOMAT/EMS	GR	A 13	13715	2806
100	CIRCONVAL. BELLINZONA	TI	A 2	18916	6383
110	SIMPLON, KULMTUNNEL	VS	A 9	1210	655
120	SISIKON	UR	A 4	6451	1553
132	PARDISLA, CHLUSTUNNEL	GR	A 28	7195	1215
150	GOTTHARDTUNNEL	UR	A 2	8312	2828
156	SEELISBERGTUNNEL	UR	A 2	10299	3309
165	MARTIGNY	VS	A 9	16969	3165
166	BIASCA	TI	A 2	13946	4182
195	ERSTFELD	UR	A 2	13645	4711
196	ANDERMATT, SCHOELLENE	UR	A 2	2465	1904
199	MENDRISIO	TI	A 2	25120	3946
201	SION	VS	A 9	10759	1645
203	ROVEREDO	GR	A 13	5342	1680
204	LAVORGO	TI	A 2	10770	3797
228	ZIZERS	GR	A 13	18086	3260
232	SAXON	VS	A 9	15373	2227
238	ROTHENBRUNNEN	GR	A 13	7459	2279
251	ERSTFELD	UR	A 2	9637	4028
253	GAMSEN (TUNNEL)	VS	A 9	7170	1121
265	MOLENO	TI	A 2	10549	4342
289	CAMIGNOLO	TI	A 2	14823	8880

Tabelle 9: Statistik des DTV pro Richtung für Kantonal- und Hauptstrassen in den steinschlaggefährdeten Kantonen basierend auf Daten der automatischen Verkehrszählung von 2007 (berechnet unter Verwendung der Daten des Bundesamt für Statistik (BFS) (2007)).

Zählstelle	Bezeichnung	Kanton	Strasse	$\mu_{DTV}$	$\sigma_{DTV}$
003	BRISSAGO S	TI	H 13	3911	800
004	GANDRIA E	TI	K 399	4337	876
005	SCHWANDEN N	GL	H 17	3183	486
014	JULIER, SILVAPLANA	GR	H 3	1764	664
027	DISENTIS E	GR	H 19	1826	389
041	GRAND-ST-BERNARD (TUNNEL)	VS	H 21	865	432
051	STABIO	TI	H 394	8398	1464
067	NATERS, BITSCH	VS	H 19	3429	852
091	CASTIONE N	TI	H 2	3860	662
092	MINUSIO, VERBANELLA	TI	H 13	9191	1238
098	CASTASEGNA	GR	H 3	1949	645
099	UMF. S-CHANF	GR	H 27	1676	481
101	MONTE CENERI	TI	K 2	5680	951
109	SION W	VS	H 9	8395	1546
131	TAMINS	GR	H 19	5216	1106
133	SCHULS W	GR	H 27	1268	454
138	BRUSIO N	GR	H 29	1976	692
155	GLETSCHEIN N, GRIMSEL	VS	H 6	1610	1059
157	ALVASCHEN, SOLISTUNNEL	GR	H 417	3035	968
164	VISP W	VS	H 9	8051	1429
169	FLUELA, TSCHUGGEN	GR	H 28	691	545
186	ST-GINGOLPH E	VS	H 21	3857	613
187	STALDEN VS, MERJEBRUECKE	VS	H 212	3405	807
197	DALLENWIL	NW	H 374	3846	564
209	MARTIGNY, LE BROCARD	VS	H 21	6382	1086
227	OFENPASS, BUFFALORA	GR	H 28	683	399
258	JULIER, LA VEDUTA	GR	H 3	1517	645
260	FURKAPASS, TIEFENBACH	UR	H 19	808	598
261	OBERALPPASS W	UR	H 19	856	554
262	SUSTENPASS, MEIEN	UR	H 11	460	503
263	NUFENENPASS	VS	-	552	378
264	KLAUSENPASS	UR	H 17	487	398

### Schwerlastverkehr

Der Schwerlastverkehr wird hier berechnet aus der Summe der Fahrzeuge aus den Fahrzeugkategorien Busse, Lieferwagen, Lastwagen, Lastzüge und Sattelzüge.

In der Software wird der Schwerlastverkehr über den Anteil am DTV modelliert. Im Mittel beträgt der Anteil des Schwerlastverkehrs in den steinschlaggefährdeten Kantonen in der Schweiz auf Nationalstrassen 15%. Dieser Wert wird in der Analyse verwendet, wenn der Anwender das

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Kürzel *N/A* in das Feld *HGV [% of AADT]* in der Eingabemaske eingibt. Auf Kantons- und Hauptstrassen ist der mittlere Anteil des Schwerlastverkehr am DTV mit 0.12% etwas geringer.

Die automatische Strassenverkehrszählung (AVZ) des ASTRA differenziert nicht an allen Zählstellen zwischen den verschiedenen Fahrzeugkategorien. In Tabelle 10 sind die Anteile des Schwerverkehrs an den Zählstellen, an denen die Fahrzeugkategorien unterschieden werden, für die Nationalstrassen zusammengestellt. Tabelle 11 zeigt die Statistik für Haupt- und Kantonsstrassen.

*Tabelle 10: Statistik des Schwerlastverkehrs pro Richtung für Nationalstrassen in den steinschlaggefährdeten Kantonen basierend auf Daten der AVZ von 2007 (berechnet unter Verwendung der Daten des Bundesamt für Statistik (BFS) (2007)).*

Nr.	Bezeichnung	Kanton	Strasse	$\mu_{SLV}$	% DTV
044	SAN BERNARDINO (TUNNEL)	GR	A 13	479	0.16
053	WEESEN, KERENZERBERG	GL	A 3	2196	0.15
076	GRANCIA	TI	A 2	4397	0.14
110	SIMPLON, KULMTUNNEL	VS	A 9	199	0.16
120	SISIKON S	UR	A 4	705	0.11
132	PARDISLA, CHLUSTUNNEL	GR	A 28	765	0.11
150	GOTTHARDTUNNEL	UR	A 2	2062	0.25
156	SEELISBERGTUNNEL	UR	A 2	2333	0.23
165	MARTIGNY N	VS	A 9	2391	0.14
166	BIASCA S	TI	A 2	2956	0.21
196	ANDERMATT, SCHOELLENEN	UR	A 2	180	0.07
199	MENDRISIO S	TI	A 2	3975	0.16
201	SION E	VS	A 9	1526	0.14
232	SAXON W	VS	A 9	2131	0.14
238	ROTHENBRUNNEN S	GR	A 13	1285	0.17
253	GAMSEN (TUNNEL)	VS	A 9	958	0.13

*Tabelle 11: Statistik des Schwerlastverkehrs pro Richtung für Kantonal- und Hauptstrassen in den steinschlaggefährdeten Kantonen basierend auf Daten der automatischen Verkehrszählung von 2007 (berechnet unter Verwendung der Daten des Bundesamt für Statistik (BFS) (2007)).*

Nr.	Bezeichnung	Kanton	Strasse	$\mu_{SLV}$	% DTV
014	JULIER, SILVAPLANA	GR	H 3	251	0.14
041	GRAND-ST-BERNARD (TUNNEL)	VS	H 21	140	0.16
099	UMF. S-CHANF	GR	H 27	199	0.12
164	VISP W	VS	H 9	974	0.12
209	MARTIGNY, LE BROCARD	VS	H 21	572	0.09
258	JULIER, LA VEDUTA	GR	H 3	174	0.11

## Stautunden pro Jahr

Die Anzahl der Stautunden auf einer spezifischen Strecke müssen vom Anwender anhand der lokalen Verkehrsbedingungen ermittelt werden. Tabelle 12 gibt die Stautunden pro Jahr der Jahre 2002 bis 2006 auf den Nationalstrassen der steinschlaggefährdeten Kantone an.

*Tabelle 12: Anzahl Stautunden nach Nationalstrassen der steinschlaggefährdeten Kantone von 2003 bis 2006 (alle Stauursachen aus: ASTRA (2006)).*

Strasse	Stautunden pro Jahr				Mittelwert
	2002	2004	2005	2006	
A2	4701	2914	3073	3591	3570
A3	819	1227	1621	1286	1238
A4	462	476	234	474	411
A9	512	1455	1766	294	1007
A13	180	203	222	415	255

Die dort angegebenen Stautunden beziehen sich auf die gesamte Strecke und berücksichtigen alle Stauursachen. Der Stau ist jedoch nicht gleichmässig über die gesamte Strecke verteilt, d.h. nicht auf jedem Stück der in Tabelle 12 genannten Nationalstrassen wird die angegebene Anzahl an Stautunden erreicht.

Es existieren unterschiedliche Stauschwerpunkte sowie Bereiche, die sehr wenig staugefährdet sind. Die Stautunden auf den Strecken pro Kilometer anzugeben ergibt daher keinen Sinn und Tabelle 12 kann nicht als Referenz für die Anzahl an Stautunden in einem Bereich herangezogen werden. Die genauen Daten für verschiedene Orte sind bei der Viasuisse in der SQL-Datenbank des Systems TIC (GEWI-TIC) gespeichert und können dort gegebenenfalls abgerufen werden. Eine Online-Veröffentlichung der Daten erfolgt zurzeit nicht.

Ist dem Anwender die Anzahl an Stautunden unbekannt, so wird in diesem Projekt lokal mit 100 Stautunden pro Jahr gerechnet. Zum Vergleich: am Stauschwerpunkt Gotthard Nord werden im Mittel 480 Stautunden pro Jahr erreicht (Bundesamt für Strassenwesen (2006)). Eine Variationskoeffizient von 0.35 wird angenommen, der die mittlere Variation auf einer Strecke der Daten, die in Tabelle 12 gegeben ist, widerspiegelt.

## Signalisierte Geschwindigkeit

Der Anwender kann die signalisierte Geschwindigkeit in der Galerie in der Eingabemaske angeben. Wird in das Feld *N/A* eingetragen, so hat der Anwender keine Informationen über die signalisierte Geschwindigkeit in der betrachteten Galerie. Daten über die signalisierte Geschwindigkeit in Galerien liegen nicht vor. Es kann jedoch angenommen werden, dass die signalisierte Geschwindigkeit in Galerien sich nicht signifikant von der signalisierten Geschwindigkeit in Strassentunneln unterscheidet. Basierend auf den Daten, die im Rahmen der Studie Salvisberg et al. (2004) in Tunneln gesammelt wurden, beträgt die mittlere signalisierte Geschwindigkeit in Tunneln  $90 \text{ km/h}$ . Dieser Wert wird hier ebenfalls verwendet, wenn der Anwender keine Angabe zur signalisierten Geschwindigkeit macht.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Die signalisierte entspricht jedoch nicht der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit. Es wird angenommen, dass die Fahrgeschwindigkeit als normalverteilte Zufallsvariable modelliert werden kann. Diese Annahme wird durch die Daten, die in Lindenmann und Zuberbühler (1993) veröffentlicht sind, bekräftigt. In dieser Studie entspricht der angegebene Median der Stichprobe dem Mittelwert der Stichprobe, was eine symmetrische Verteilung der Messdaten voraussetzt.

In Erath und Fröhlich (2004) wird die Fahrgeschwindigkeit auf den Nationalstrassen untersucht. Die Datenauswertungen zeigen für einen Beobachtungszeitraum von 1990 bis 2002, dass bei einer signalisierten Geschwindigkeit von  $120 \text{ km/h}$  50% aller Personenwagen schneller als  $115 \text{ km/h}$  fahren. Der Median der Messwerte entspricht  $v_{50} = 115 \text{ km/h}$ . 85% aller Personenwagen fahren langsamer als  $128 \text{ km/h}$  ( $v_{85} = 128$ ). Unter der Annahme einer Normalverteilung ergibt sich damit die Varianz der Fahrgeschwindigkeit zu:

$$\text{Var}[V_{drive}] = 157.5 \text{ km}^2 / \text{h}^2 \quad (1.8)$$

Der Variationskoeffizient der Fahrgeschwindigkeit beträgt damit  $\text{COV}[V_{drive}] = 0.11 [-]$ . Der Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit  $E[V_{drive}]$  kann aus dem Verhältnis der signalisierten Geschwindigkeit  $v_{sig}$  zu gemessener Fahrgeschwindigkeit ermittelt werden:

$$E[V_{drive}] = 0.96 v_{sig} \quad (1.9)$$

Dieser Zusammenhang gilt nicht nur für eine signalisierte Höchstgeschwindigkeit von  $120 \text{ km/h}$  sondern auch für Fahrgeschwindigkeiten bis zu  $60 \text{ km/h}$  auf Strecken ausserhalb geschlossener Ortschaften, wie aus den Daten von Lindenmann und Zuberbühler (1993) zu entnehmen ist. Auch der Variationskoeffizient bleibt bis zu Fahrgeschwindigkeiten von  $60 \text{ km/h}$  auf Strecken ausserhalb geschlossener Ortschaften konstant. Für andere Verkehrsbedingungen, d.h. in geschlossenen Ortschaften und bei signalisierten Geschwindigkeiten unter  $60 \text{ km/h}$  gelten diese Zusammenhänge nicht mehr.

### 3.4. Modellierung der Exposition

Die stochastische Natur des auslösenden Prozesses wird allgemein durch seine Eintretenshäufigkeit beschrieben. Bestenfalls gibt es Indikatoren, mit denen die Häufigkeit genauer beschrieben werden kann. Solche Indikatoren könnten beispielsweise die Niederschlagsmenge oder der Temperaturverlauf sein. Die physikalischen Mechanismen, die zur Auslösung eines Steinschlagereignisses führen, sind sehr unterschiedlich und komplex. Dies zeigen auch Studien, die sich mit der saisonalen Variabilität von Steinschlägen beschäftigen.

In verschiedenen Studien wurden sowohl jahreszeitliche als auch tageszeitliche Schwankungen in der Steinschlaghäufigkeit untersucht (Luckman (1976), Sass (2005) oder Schneuwly und Stoffel (2008)).

Es gibt lokale Gegebenheiten, die sowohl zu erhöhten Steinschlaghäufigkeiten in den Wintermonaten, als auch zu erhöhten Steinschlaghäufigkeiten in den Sommermonaten führen können.

In Schneuwly und Stoffel (2008) wurden anhand von Jahresringen Indizien dafür gefunden, dass die Steinschlagaktivität zwischen Oktober und Mitte Juli gleichverteilt ist. Ein Rückgang der Steinschlagaktivität wurde nur in den Monaten August bis Oktober beobachtet. Sass (2005) hingegen beobachtet eine tendenziell erhöhte Aktivität gerade in diesen Monaten. In der Literatur findet sich keine einheitliche und modellierbare jahreszeitliche und tageszeitliche Variabilität der Steinschlaghäufigkeit. Die auslösenden Mechanismen, wie z.B. Frost-Tau-Wechsel, Auswaschungen, Spannungen durch Temperaturschwankungen und geologische Charakteristiken sind sehr komplex und Sass (2005) folgert daher, dass eine Superposition dieser verschiedenen Mechanismen im Jahresverlauf zu einer Gleichverteilung der Ereignisse führt.

Bisher werden solche Indikatoren in der Häufigkeitsmodellierung noch nicht berücksichtigt. Die Kenntnis der jahreszeitlichen und tageszeitlichen Variabilität in der Ablösehäufigkeit hat einen gewissen Einfluss auf das Risiko, da die Charakteristiken des Verkehrs (d.h. die Verkehrsdichte) sowohl eine tageszeitliche als auch eine jahreszeitliche Variabilität besitzen. Die Trefferwahrscheinlichkeit von Fahrzeugen kann somit von einer zeitlichen Variabilität beeinflusst werden. Meist liegen keine Informationen über solche Indikatoren vor, und die Häufigkeit muss empirisch beschrieben werden. Zudem sind die bisher verfügbaren Modelle noch nicht in der Lage, diese Indikatoren in der Analyse zu berücksichtigen.

Zur Modellierung der Ablösehäufigkeit werden zunächst die relevanten Parameter für die Beschreibung der Gefahr, sowie die geographische Lage der Auslösestelle definiert. Für Steinschläge ist dies das Ablösevolumen eines Steins.

Das Ablösevolumen wird als Zufallsvariable modelliert, die hier allgemein mit  $V$  bezeichnet werden soll. Diese Zufallsvariable wird typischerweise durch die ihre jährliche Überschreitungshäufigkeit mit:

$$H_V(v) = E[A^>(v)] \quad (1.10)$$

beschrieben (Straub und Schubert (2008)). Mit  $A^>(v)$  ist die jährliche Anzahl an Ereignissen bezeichnet, die grösser als  $v$  sind und mit  $E[\square]$  ist der Erwartungswertoperator bezeichnet. Die Formulierung als Überschreitungshäufigkeit ist dort sinnvoll, wo einzelne Ereignisse zu Konse-

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

quenzen führen können. Beispiele hierfür sind ungeschützte Teile der Strasse, bei denen einzelne Steinschläge zu Todesfällen führen können. Für die Lastmodellierung hingegen sind Extremereignisse von Interesse. Hier kann die Wahrscheinlichkeit vernachlässigt werden, dass zwei oder mehr Ereignisse in einem Jahr zu Schäden führen. Für die Beschreibung von Extremereignissen wird die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit verwendet:

$$1 - F_V(v) = \Pr[A^>(v) \geq 1] \quad (1.11)$$

In Abbildung 30 ist der Unterschied zwischen Überschreitungshäufigkeit und der Überschreitungswahrscheinlichkeit dargestellt.

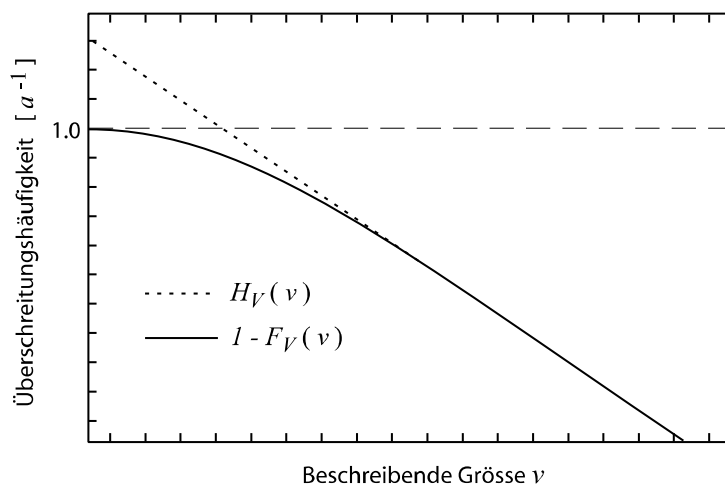


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Überschreitungshäufigkeit und der Überschreitungswahrscheinlichkeit.

Unter der Annahme, dass die einzelnen Ereignisse unabhängig voneinander sind, kann der Zusammenhang zwischen Überschreitungshäufigkeit und der Überschreitungswahrscheinlichkeit angegeben werden zu:

$$1 - F_V(v) = 1 - e^{-H_V(v)} \quad (1.12)$$

Um die Risiken zu berechnen, ist es notwendig, auch die Dichtefunktionen der jährlichen Wahrscheinlichkeit  $f_V(v)$  und der jährlichen Häufigkeitsdichte  $h_V(v)$  zu kennen. Diese werden definiert durch:

$$h_V(v) = -\frac{d}{dv} H_V(v) \quad (1.13)$$

$$f_V(v) = -\frac{d}{dv} F_V(v) = h_V(v) e^{-H_V(v)} \quad (1.14)$$

In manchen Fällen ist es notwendig, die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis in einer bestimmten Periode zu kennen. Unter der Annahme, dass die Naturereignisse einem stationären Prozess folgen, ist die Häufigkeit proportional zur betrachteten Periode  $\Delta T$ :

$$H_V^{\Delta T}(v) = \left( \frac{\Delta T}{1a} \right) H_V(v) \quad (1.15)$$

$$h_V^{\Delta T}(v) = \left( \frac{\Delta T}{1a} \right) h_V(v) \quad (1.16)$$

In diesem Projekt wird das jährliche Risiko berechnet und  $\Delta T$  ist daher  $1[a]$ . Die Modellierung von Naturgefahren basiert meist auf einer schlechten Datengrundlage und stark vereinfachten Modellen. Daher ist nicht nur die Naturgefahr selbst Unsicherheiten unterworfen (aleatorische), sondern auch die verwendeten Modelle (epistemische). Dem kann Rechnung getragen werden, indem die Überschreitungshäufigkeit nach Gleichung (1.10) unter Verwendung von unsicheren Parametern  $\theta$  erfolgt.

In Abbildung 31 ist die Überschreitungshäufigkeit und die korrespondierende Verteilung von  $H_V(v)$  infolge der epistemischen Unsicherheiten in den Parametern  $\theta$ .

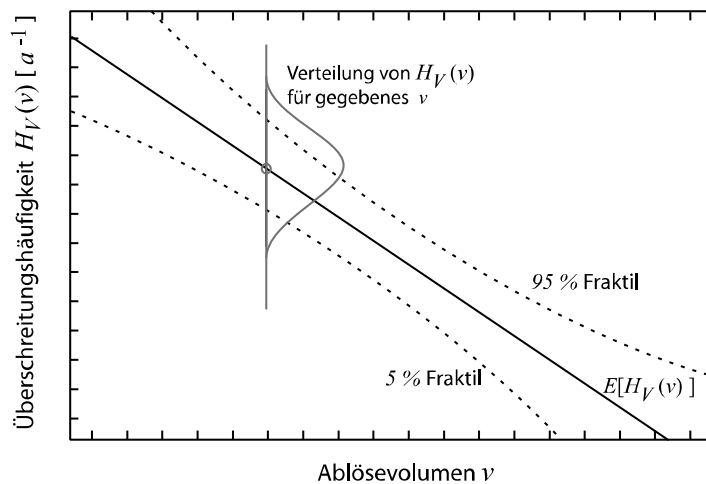


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Überschreitungshäufigkeit.

Die epistemischen Unsicherheiten werden in Risikoanalysen meist vernachlässigt. Dies kann zu einer starken Unterschätzung des Risikos führen (vgl. Coles et al. (2003)).

Für die Bestimmung der Überschreitungshäufigkeit stehen verschiedene Methoden zur Verfügung (Straub und Schubert (2008)):

- Analyse historischer Daten (z. B. Hungr et al. (1999), Dussauge-Peisser et al. (2002))
- empirische Modelle, die die Exposition als Funktion verschiedener Indikatoren beschreiben (z. B. Budetta (2004), Baillifard et al. (2003))
- phänomenologische Modelle (z. B. Jimenez-Rodriguez et al. (2006))
- Expertenmeinungen (z. B. Schubert et al. (2005))

Je nach Art der Naturgefahr haben alle diese Ansätze ihre Berechtigung und können eingesetzt werden. Die letzten Beiden eignen sich insbesondere für detaillierte ortsspezifische Analysen. Sie können, wenn historische Daten vorliegen, auch aktualisiert werden.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Es ist sinnvoll, die Überschreitungshäufigkeit  $H_V(v)$  durch ein parametrisches Modell zu beschreiben. Häufig beschreibt ein Potenzgesetz die Überschreitungshäufigkeit hinreichend genau und kommt in vielen Anwendungen zum Einsatz z. B. Gutenberg und Richter (1949), Hovius et al. (1997), Malamud und Turcotte (2006) oder Pelletier et al. (1997).

Das Potenzgesetz ist eine rein empirische Annahme, die keine physikalische oder mathematische Grundlage hat. Sind bessere Modelle vorhanden, sollten diese in der Risikoanalyse verwendet werden.

Zur Beschreibung der Überschreitungshäufigkeit wird hier jedoch allgemein ein Potenzgesetz der folgenden Form vorgeschlagen:

$$H_V(v|\boldsymbol{\theta}) = av^{-b}, \quad \boldsymbol{\theta}^T = (a, b) \quad (1.17)$$

Die Beschreibung der Überschreitungshäufigkeit mit einem Potenzgesetz hat einige Charakteristiken, denen Rechnung getragen werden sollte. Gleichung (1.17) geht für  $v \rightarrow 0$  gegen unendlich. Die Gültigkeit dieses Gesetzes ist daher nach unten beschränkt. Die Definition dieses Bereichs sollte in der Modellierung immer bestimmt und angegeben werden. Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit sind sehr kleine Steinvolumen nicht relevant und die untere Grenze wurde mit  $v_{\min} = 0.1 \text{ m}^3$  angenommen. Des Weiteren besitzt Gleichung (1.17) lediglich zwei Parameter zur Anpassung. Dadurch können kleine Veränderungen der Häufigkeiten in den unteren Gültigkeitsbereichen zu grossen Auswirkungen in der oberen Flanke der Häufigkeit führen.

Gleichung (1.17) ist auf die Parameter des Modells  $\boldsymbol{\theta} = [a, b]^T$  bedingt. Die epistemischen Unsicherheiten können berücksichtigt werden, indem  $\boldsymbol{\theta}$  als Zufallsvektor betrachtet wird. Die Bedingung kann durch Integration aufgelöst werden:

$$H_V(v) = \int_{\boldsymbol{\theta}} H_V(v|\boldsymbol{\theta}) f_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta}) d\boldsymbol{\theta} \quad (1.18)$$

Liegen keine Daten vor, gibt es die Möglichkeit, die Situation von einem Experten beurteilen zu lassen und diese qualitative Einschätzung zu quantifizieren. Nachdem die lokalen Gegebenheiten und die beschreibende Grösse  $v$  festgelegt sind, wird in einem ersten Schritt die beschreibende Grösse in Intervalle eingeteilt (siehe Abbildung 32). Die Intervalle sind so zu wählen, dass innerhalb der Intervalle sinnvolle Aussagen zur Überschreitungshäufigkeit gemacht werden können. Je detaillierter der Experte die Bereiche der beschreibenden Grösse unterteilt ( $v_{i,\min} - v_{i,\max}$ ), d. h. je mehr Bereiche gewählt werden, desto besser kann eine Anpassung an eine Verteilungsfunktion erfolgen. Hier wird der gesamte Volumenbereich in sieben Bereiche eingeteilt. Aus diesen Bereichen kann der Anwender die Bereiche frei wählen, über die er Informationen besitzt.

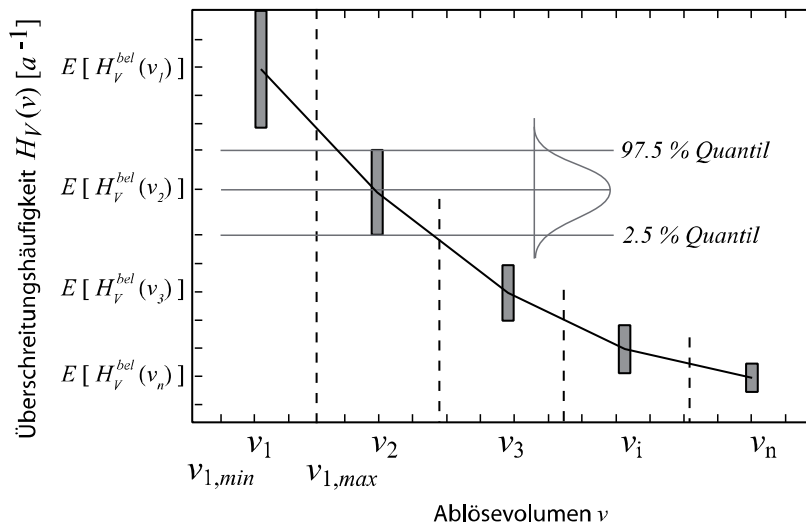


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Schätzungen der Erwartungswerte der Häufigkeiten durch Experten.

Für jedes Intervall macht der Experte eine Schätzung über einen oberen und einen unteren Wert der (jährlichen) Überschreitungshäufigkeit der Ereignisse. Diese Schätzung entspricht dem 2.5%- und dem 97.5%-Quantil der Verteilung der Ereignisse. Der Bereich, den der Experte einschätzt, entspricht somit einem Intervall, in dem 95% der Häufigkeiten auftreten.

Der Anwender kann auch den Mittelwert und die Standardabweichung schätzen und die Quantilwerte nach Gleichung (1.1) und (1.2) berechnen. Liegt ein Kataster über die Ereignisse vor, so kann auch dieses verwendet werden, um die Überschreitungshäufigkeit zu bestimmen. Dafür muss das Kataster einige Bedingungen erfüllen:

- Das Kataster enthält alle Ablöseereignisse, die eine Grösse von  $0.1 m^3$  überschritten haben.
- Das Kataster enthält Informationen über das Jahr und die Grösse des Ereignisses.
- Die Ereignisse können einer bestimmten Auslösestelle zugeordnet werden.
- Das Kataster beinhaltet eine ausreichende Menge an Ereignissen und ist ausreichend lange geführt worden.

Sind diese Bedingungen erfüllt, so können die Ereignisse analog zu Tabelle 13 kategorisiert werden. Dabei entspricht  $B_{k,i}$  der Anzahl an Steinen im Jahr  $k$ , die ein Volumen hatten, das grösser war als  $v_i$ .

Tabelle 13: Schematische Darstellung einer Kategorisierung von Ereignissen unter Verwendung eines Katasters.

	$v_i [m^3]$						
	$> 0.1 m^3$	$> 0.3 m^3$	$> 1.0 m^3$	$> 1.5 m^3$	$> 3 m^3$	$> \dots m^3$	$> 50 m^3$
Jahr 1	$B_{1,1}$	$B_{1,2}$	$B_{1,3}$	$B_{1,4}$	0	0	0
Jahr 2	$B_{2,1}$	$B_{2,2}$	$B_{2,3}$		0	0	0
Jahr n	$B_{n,1}$	$B_{n,2}$	$B_{n,3}$	$B_{n,4}$	$B_{n,5}$	0	0

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Der Erwartungswert  $E[H_V(v_i)]$  und die Standardabweichung für jeden Bereich kann über:

$$E[H_V(v_i)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{i,i} \quad (1.19)$$

$$Var[H_V(v_i)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (B_{i,i} - E[H_V(v_i)])^2 \quad (1.20)$$

berechnet werden. Dieses Vorgehen stellt nur eine Annäherung dar, um das Programm nutzen zu können. Eine direkte Schätzung der Parameter des Potenzgesetzes unter Verwendung einer Bayes'schen Regression wäre von Vorteil (siehe z. B. Gelman et al. (2004)). Das Programm in seiner jetzigen Version lässt die direkte Eingabe der prädiktiven Häufigkeitsverteilung noch nicht zu. Hier gäbe es prinzipiell die Möglichkeit einer Erweiterung.

Es wird angenommen, dass die marginalen Häufigkeitsverteilungen in einem Intervall der Lognormalverteilung folgen. Die Schätzung des Modus der Häufigkeitsverteilung in einem Intervall entspricht, bei logarithmischer Betrachtung, dem Erwartungswert der Normalverteilung (Abbildung 32).

Um die Parameter des Potenzgesetzes nach Gleichung (1.17)  $\theta = [a, b]^T$  zu schätzen, wird die Likelihood-Funktion korrespondierend zu den Informationen formuliert:

$$L(\theta | \mathbf{z}) \propto \prod_{i=1}^n f_{H_V}(\ln(H_V(v_i | \theta)) | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i}) \quad (1.21)$$

$f_{H_V}(\ln(H_V(v_i | \theta)) | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})$  wird mit der Normalverteilung beschrieben, mit dem Argument  $\ln(H_V(v_i | \theta))$  und den beiden Parametern  $\lambda_{v_i}$  und  $\zeta_{v_i}$ . Die Parameter  $\lambda_{v_i}$  und  $\zeta_{v_i}$  werden direkt aus den Angaben des Experten für die verschiedenen Volumenbereiche  $v_i$  berechnet:

$$\zeta_{v_i} = \sqrt{\ln \left( \left( \frac{\sqrt{Var[H_V^{bel}(v_i)]}}{E[H_V^{bel}(v_i)]} \right)^2 + 1 \right)} \quad (1.22)$$

$$\lambda_{v_i} = \ln(E[H_V^{bel}(v_i)]) - \frac{\zeta_{v_i}^2}{2} \quad (1.23)$$

Dabei entspricht  $E[H_V^{bel}(v_i)]$  dem Erwartungswert der Häufigkeit nach der Einschätzung des Experten für den Volumenbereich  $v_i$ , und  $\sqrt{Var[H_V^{bel}(v_i)]}$  ist die Varianz der Einschätzung der Häufigkeit des Experten. Die Einschätzung des Experten ist durch den hochgestellten Index *bel* gekennzeichnet (von engl. *belief*).

Die Parameter  $\theta = [a, b]^T$  sollen so geschätzt werden, dass die Angaben des Experten damit modelliert werden können. Dafür wird die Maximum Likelihood-Methode verwendet.

Da der Mittelwert bei der Lognormalverteilung nicht mit dem Modus zusammenfällt, die Maximum-Likelihood-Methode aber den wahrscheinlichsten Punkt schätzt, d. h. den Modus, wird zunächst das Potenzgesetz transformiert (vgl. Gleichung (1.21)):

$$\ln(H_\nu(v_i | \boldsymbol{\theta})) = \ln(a) - b \ln(v_i) \quad (1.24)$$

Mit dieser Transformation kann der Likelihood mit Hilfe der Normalverteilung berechnet werden:

$$L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{z}) \propto \prod_{i=1}^n \frac{1}{\zeta_{v_i} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(a) - b \ln(v_i) - \lambda_{v_i}}{\zeta_{v_i}}\right)^2\right) \quad (1.25)$$

Die logarithmierte Likelihoodfunktion kann angegeben werden zu:

$$l(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{z}) \propto \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{1}{\zeta_{v_i} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(a) - b \ln(v_i) - \lambda_{v_i}}{\zeta_{v_i}}\right)^2\right)\right) \quad (1.26)$$

Die Parameter können unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt werden, indem die logarithmierte Likelihood-Funktion (Gleichung (1.21)) maximiert wird:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \max \{ \ln [ L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{z}) ] \} \quad (1.27)$$

Das Maximum kann durch partielle Differenzierung nach den Parametern  $a$  und  $b$  berechnet werden:

$$\frac{\partial l(a, b | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})}{\partial a} = 0 \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial l(a, b | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})}{\partial b} = 0 \quad (1.29)$$

Das Gleichungssystem definiert durch die Gleichungen (1.28) und (1.29) ist analytisch lösbar. Die Lösung entspricht den Erwartungswerten ( $\mu_a, \mu_b$ ) der beiden Parameter  $a$  und  $b$ :

$$\mu_b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i)}{\zeta_{x_i}^2} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{x_i}}{\zeta_{x_i}^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i) \lambda_{x_i}}{\zeta_{x_i}^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\zeta_{x_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\zeta_{x_i}^2} \sum_{i=1}^n \frac{(\ln(x_i))^2}{\zeta_{x_i}^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i)}{\zeta_{x_i}^2} \right)^2} \quad (1.30)$$

$$\mu_a = \exp\left(\frac{\mu_b \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i)}{\zeta_{x_i}^2} + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{x_i}}{\zeta_{x_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\zeta_{x_i}^2}}\right) \quad (1.31)$$

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Die Parameter der Überschreitungshäufigkeit können durch eine bivariate Lognormalverteilung  $f(\boldsymbol{\theta})$  beschrieben werden. Die Lognormalverteilung ist hier gerechtfertigt, da beide Parameter eine untere Beschränkung haben – sie können nicht negativ werden.

Die Kovarianzmatrix der Parameter kann über die Fisher-Informations-Matrix berechnet werden (Fisher (1930)). Im Fall des Potenzgesetzes hat die Fisher-Informations-Matrix die Dimension  $2 \times 2$ . Die Einträge der Matrix berechnen sich über:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} \\ H_{2,1} & H_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 l(a,b | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})}{\partial^2 a} & \frac{\partial^2 l(a,b | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})}{\partial a \partial b} \\ \frac{\partial^2 l(a,b | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 l(a,b | \lambda_{v_i}, \zeta_{v_i})}{\partial^2 b} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Die Kovarianzmatrix ergibt sich direkt über die Inverse der Fisher-Informations-Matrix:

$$\mathbf{C} = \mathbf{H}^{-1} = \frac{1}{H_{1,1}H_{2,2} - (H_{1,2})^2} \begin{bmatrix} H_{2,2} & -H_{1,2} \\ -H_{2,1} & H_{1,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Var}[a] & \sqrt{\text{Var}[a]\text{Var}[b]}\rho_{ab} \\ \sqrt{\text{Var}[a]\text{Var}[b]}\rho_{ab} & \text{Var}[b] \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \sqrt{\text{Var}[a]} \\ \sigma_b &= \sqrt{\text{Var}[b]} \end{aligned} \quad (1.34)$$

mit

$$H_{1,1} = - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\ln(\mu_a) - \mu_b \cdot \ln(x_i) - \lambda_{x_i}}{\mu_a^2 \zeta_{x_i}^2} - \frac{1}{\mu_a^2 \zeta_{x_i}^2} \right) \quad (1.35)$$

$$H_{1,2} = H_{2,1} = - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i)}{\mu_a \cdot \zeta_{x_i}^2} \right) \quad (1.36)$$

$$H_{2,2} = - \left( \sum_{i=1}^n \frac{(\ln(x_i))^2}{\zeta_{x_i}^2} \right) \quad (1.37)$$

Damit ist die bivariate Lognormalverteilung  $f(a,b)$  vollständig beschrieben:

$$f(a,b) = \frac{\exp \left( -\frac{1}{2(1-\rho_{ab}^2)} \left( \left( \frac{\ln(a) - \lambda_a}{\zeta_a} \right)^2 - 2\rho_{ab} \frac{\ln(a) - \lambda_a}{\zeta_a} \frac{\ln(b) - \lambda_b}{\zeta_b} + \left( \frac{\ln(b) - \lambda_b}{\zeta_b} \right)^2 \right) \right)}{2\pi a b \zeta_a \zeta_b \sqrt{1-\rho_{ab}^2}} \quad (1.38)$$

mit

$$\zeta_a = \sqrt{\ln\left(\left(\frac{\sigma_a}{\mu_a}\right)^2 + 1\right)}$$

$$\lambda_a = \ln(\mu_a) - \frac{\zeta_a^2}{2}$$
(1.39)

und

$$\zeta_b = \sqrt{\ln\left(\left(\frac{\sigma_b}{\mu_b}\right)^2 + 1\right)}$$

$$\lambda_b = \ln(\mu_b) - \frac{\zeta_b^2}{2}$$
(1.40)

Die prädiktive Häufigkeitsverteilung wird analog nach (1.18) berechnet:

$$H_V(v) = \int_{\Theta} H_V(v|a,b) f_{A,B}(a,b) da db$$
(1.41)

Das in Gleichung (1.41) gegebene Integral kann nicht analytisch berechnet werden. Im Programm wird  $H_V(v)$  unter Verwendung numerischer Methoden berechnet. In der Oberfläche wird sowohl der Mittelwert als auch das 2.5%- und das 97.5%-Quantil der prädiktiven Häufigkeitsverteilung dargestellt. Somit kann die Anpassung des Modells an die Eingabe des Anwenders direkt visuell geprüft werden.

Abschliessend wird die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des jährlichen maximalen abgelösten Steinvolumens berechnet und dargestellt:

$$F_V(v) = \exp\left(-\int_{\Theta} H_V(v|a,b) f_{A,B}(a,b) da db\right)$$
(1.42)

Auch für diese Berechnung gibt es keine analytische Lösung und die Berechnung erfolgt numerisch.

### 3.5. Modellierung des Fallprozesses

Hat sich ein Stein gelöst, so bestimmen die Charakteristiken des Hangs die Geschwindigkeit (bzw. die Energie), die ein Stein an einer bestimmten Stelle des Hangs hat. Ziel der Beschreibung des Fallprozesses ist, die statistische Verteilung der Geschwindigkeit beim Anprall des Steins auf der Steinschlaggalerie zu ermitteln.

Es gibt zwei unterschiedliche Ansätze, mit denen der Anprall des Steins auf der Galerie beschrieben werden kann: einerseits mit der Energie andererseits mit der Geschwindigkeit und der Masse des Steins.

Die aggregierte Form der Beschreibung des Anpralls ist die kinetische Energie:

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad (1.43)$$

Hierin beschreibt  $E_{kin}$  die kinetische Energie,  $m$  die Masse eines Steins und  $v$  die Geschwindigkeit des Steins. Durch diese Aggregation geht Information verloren – es gibt mehrere Kombinationen von Masse und Geschwindigkeit, die zur selben kinetischen Energie führen. Für die Berechnung eines Schadens oder eines Versagens an Schutzbauwerken führen unterschiedliche Geschwindigkeiten und Massen auch zu unterschiedlichen Versagensarten. Daher ist es sinnvoll, den Aufprall explizit mittels der Aufprallgeschwindigkeit und der Masse zu beschreiben.

Die physikalische Beschreibung des Fallprozesses der Steine kann dazu verwendet werden, die Verteilung der Geschwindigkeit am Aufprallort zu bestimmen. Es existieren verschiedene Trajektorienmodelle, die zur Beschreibung des Steinschlags eingesetzt werden können (RocFall (2008), ROCKFALL 6.1 (2004) oder auch Ramms, WSL (2008)). In fast allen verfügbaren Trajektorienmodellen wird der stochastischen Natur des Fallprozesses durch eine einfache Monte-Carlo-Simulation Rechnung getragen.

Fallanalysen werden in der Regel von Geologen für die ortsspezifischen Gegebenheiten durchgeführt. Das in diesem Projekt entwickelte Programm bietet die Möglichkeit, die Resultate dieser ortsspezifischen Fallanalysen direkt zu berücksichtigen oder aber die generische Modellierung zu verwenden. Erstere ist genauer – Letztere bietet aber die Möglichkeit, eine schnelle Berechnung vorzunehmen. Entscheidet sich der Anwender, die Trajektorienanalyse extern durchzuführen und die Ergebnisse im Programm zu berücksichtigen, so müssen die Daten in der folgenden Form aufbereitet werden.

Aus den Anprallgeschwindigkeiten, die aus den Trajektorienanalysen resultieren, wird die bedingte relative Häufigkeitsverteilung  $h_v(v|i)$  der Geschwindigkeiten  $v[m/s]$  ermittelt, bedingt auf das Anprallereignis  $i$ . Die Klassengrenzen der Häufigkeitsverteilung sind programmbedingt vorgegeben. Von  $0[m/s]$  bis  $45[m/s]$  wird eine Klassenbreite  $1[m/s]$  gewählt. Da aus verschiedenen Gründen Geschwindigkeiten von über  $45[m/s]$  in der Regel nicht auftreten bzw. nicht relevant sind, werden alle Geschwindigkeiten, die grösser als  $45[m/s]$  sind, durch die letzte Klasse repräsentiert (vgl. Kapitel 1.4 und 1.5). Das Programm überprüft anschliessend, ob die Summe der Häufigkeiten gleich 1 ist. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, mit der die Galerie in Trajektorienana-

lysen getroffen wurde, ist separat zu ermitteln und in das Feld *Conditional impact probability* einzugeben.

Die Durchführung detaillierter Analysen sollte bei der Risikoermittlung als eine Handlungsoption gesehen werden. Durch sie kann das Risiko verringert werden – diese Option ist jedoch auch mit Kosten verbunden. Diesem Umstand sollte bei der Entscheidung, detailliertere Studien durchführen zu lassen, Rechnung getragen werden.

Es können auch die generischen Ergebnisse der Fallanalysen verwendet werden. Eine Beschreibung des generischen Hangmodells und der Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit beim Einschlag auf die Galerie erfolgt in den nächsten Kapiteln.

### 3.5.1. Trajektorienmodell

Im Rahmen der Beschreibung des Fallprozesses wurde der Hang generisch diskretisiert (siehe Kapitel 3.5.2). Für jede Diskretisierung wurden Trajektorienanalysen durchgeführt. Dabei wurde das zweidimensionale Trajektorienmodell *Rocfall* (RocFall (2008)) eingesetzt, das den Stein mit einen Punktmassenansatz (*lumped-mass*) modelliert. Programme, die diesen Ansatz verwenden, können nicht berücksichtigen, dass Steine im Fallprozess zerbrechen. Ebenso kann der Luftwiderstand nicht berücksichtigt werden. Dies kann, insbesondere wenn die freien Fallhöhen gross sind, zu unrealistisch grossen Geschwindigkeiten führen.

Die Wahl des Punktmassenansatzes impliziert, dass die Geschwindigkeit eines Steins unabhängig von der Masse des Steins ist. Damit ergibt sich für die Modellierung in diesem Projekt, dass die losgelöste Masse unabhängig von der erreichten Geschwindigkeit ist.

Die meisten der zurzeit kommerziell erhältlichen Trajektorienprogramme modellieren den Fallprozess in zwei Teilen. Relativ einfach ist die Beschreibung des freien Falls durch Wurfparabeln. Komplex hingegen ist die Modellierung des Kontaktes des Steins mit dem Boden. Dieser Stoss führt je nach Einschlaggeschwindigkeiten zur Umwandlung der Energie in plastische Verformungen. Da dieser Prozess von sehr vielen Faktoren abhängt und je nach Bodentyp verschiedenste physikalische Phänomene beschrieben werden müssten, wird in den kommerziellen Trajektorienmodellen die Modellierung stark vereinfacht und sogenannte Restitutionsfaktoren eingesetzt. Dies sind bodencharakteristische Werte, die den Geschwindigkeitsverlust des Steins beim Einschlag beschreiben:

$$V_{NA} = R_N V_{NB} \quad (1.44)$$

$$V_{TA} = R_T V_{TB} \quad (1.45)$$

In den Gleichungen (1.44) und (1.45) ist  $V_{NA}$  die Geschwindigkeit des Steins nach dem Einschlag in das Gelände normal zur Einschlagoberfläche und  $V_{TA}$  die Geschwindigkeit des Steins nach dem Einschlag in das Gelände tangential zur Einschlagoberfläche.  $V_{NB}$  und  $V_{TB}$  bezeichnen die normalen und tangentialen Komponenten der Geschwindigkeit vor dem Einschlag. Aus beiden Komponenten wird die Gesamtgeschwindigkeit bestimmt.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Mit  $R_N$  in Gleichung (1.44) ist der normale Restitutionsfaktor bezeichnet. Er nimmt Werte im Intervall  $[0,1]$  an.  $R_N = 0$  beschreibt den Fall eines vollkommen unelastischen Stosses und  $R_N = 1$  den Fall eines ideal elastischen Stosses. Dieselben Eigenschaften hat der tangentielle Restitutionsfaktor  $R_T$ . Beide Restitutionsfaktoren sind Zufallsvariablen im Modell und werden als trunziert normalverteilt angenommen.

Da bei höheren Geschwindigkeiten durch grössere plastische Verformungen mehr Energie umgewandelt wird, nutzt das Programm zusätzlich einen Skalierungsfaktor  $S[-]$  der den Restitutionsfaktor  $R_N$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit skaliert (Pfeiffer und Bowen (1989)):

$$S = \frac{1}{1 + (V_{rock}/K)^2} \quad (1.46)$$

Gleichung (1.46) konvergiert für  $K \rightarrow \infty$  gegen 0 und für  $K \rightarrow 0$  gegen 1. Für eine Fallhöhe von 800 m wird in Pfeiffer und Bowen (1989) ein Wert von  $K = 9.144 [m/s]$  vorgeschlagen. Im Rahmen dieses Projektes wird der Faktor  $K$  in Anlehnung an Pfeiffer und Bowen (1989) in Abhängigkeit von der Fallhöhe  $H_{total} [m]$  des Steins beschrieben:

$$K = 790.12 \cdot H_{total}^{-0.648} [m/s] \quad (1.47)$$

Die Theorie des Trajektorienmodells und des Berechnungsalgorithmus ist in Stevens (1998) detailliert beschrieben.

#### 3.5.2. Generisches Hangmodell

Um eine allgemeine Formulierung des sehr ortsspezifischen Fallprozesses zu erreichen, wird die Topographie des Hang zunächst nach Abbildung 33 diskretisiert.

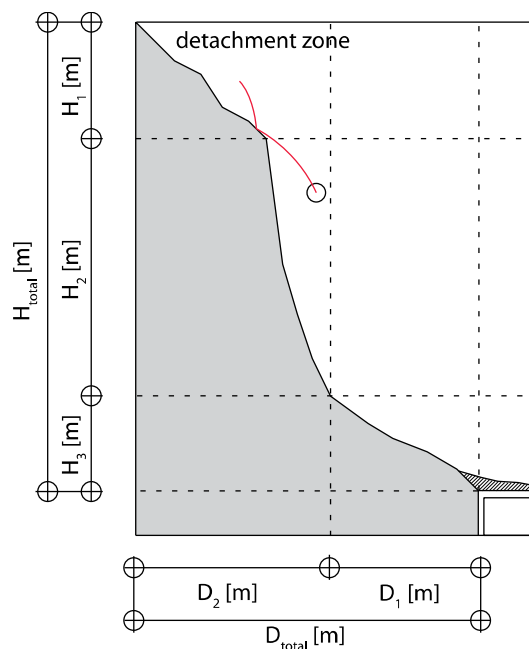


Abbildung 33: Diskretisierung des Geländes.

Der Anwender des Programms kann mit Hilfe einer topographischen Karte, digitalen Höhenmodellen oder unter Verwendung von geographischen Informationssystemen die Geometrie des Hangs ermitteln.

Der Hang wird in der Höhe in drei Sektionen eingeteilt ( $H_1$ ,  $H_2$  und  $H_3$ ), die jeweils in Metern angegeben werden. Die Steigung des Hangsegmentes  $H_1$  wird durch die Angabe von  $D_2$  bestimmt. Die Steigung des Segments  $H_2$  ist mit  $\varphi = 80^\circ$  festgelegt. Diese repräsentiert eine Freifallzone im Hang. Der Wert  $D_1$  bestimmt die Neigung des unteren Teils des Hangs. Durch die Eingabe der totalen Höhe  $H_{total}$ ,  $H_1$  und  $H_2$  sowie von  $D_{total}$  und  $D_1$  ist der Hang vollständig charakterisiert. Um den Hang etwas realistischer auszuformen, werden die Hangpartien  $H_1$  und  $H_2$  jeweils in zwei Sektionen unterteilt. Die Koordinaten des Hangs ( $x_i, y_i$ ) sind in Abbildung 34 gegeben.

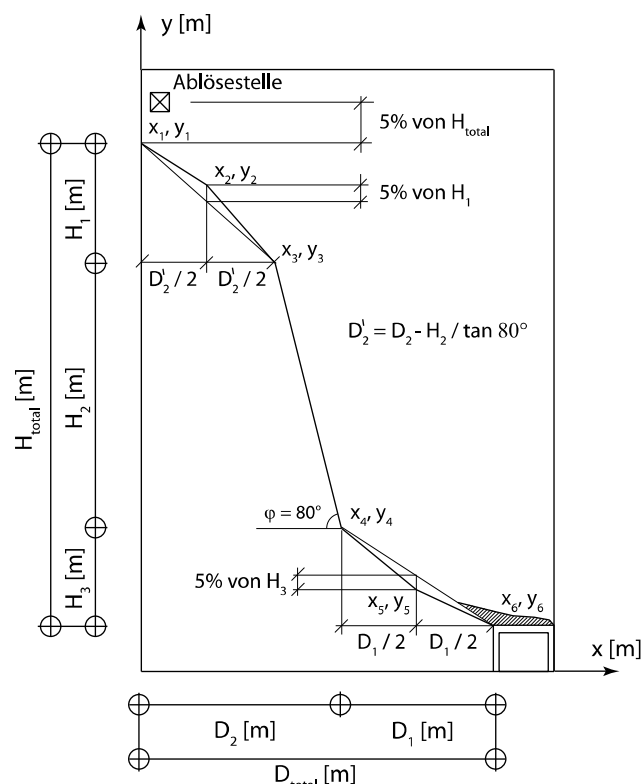


Abbildung 34: Koordinaten des generischen Geländemodells.

Nach der Eingabe des Benutzers erfolgt die Einteilung der Höhen prozentual zur Gesamthöhe. Für die in Tabelle 14 Kombinationen wurden die Fallanalysen durchgeführt und die Ergebnisse in einer Datenbank gespeichert.

Da das Trajektorienmodell einen Punktmassenansatz verfolgt, können die Zwischenwerte der Höhen interpoliert werden. Dabei wird ausgenutzt, dass die Geschwindigkeit der fallenden Steine  $v$  innerhalb gewisser Grenzen proportional zur Wurzel der Fallhöhe ist  $v \propto \sqrt{H_{total}}$ .

Als zusätzliche Randbedingung wurde festgelegt, dass sowohl die Steigung des Gesamtsystems, definiert durch  $H_{total} / D_{total}$ , grösser als  $30^\circ$  sein muss, als auch das die Steigungen der Teilsysteme  $H_1 / D_2$  und  $H_3 / D_1$  grösser als  $30^\circ$  sein muss. Bei geringeren Steigungen kommen die Steine zum

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

liegen und die Trefferwahrscheinlichkeit geht gegen Null. Daher werden diese Fälle hier nicht berücksichtigt.

Berücksichtigt man die Randbedingungen, so ergeben sich 6204 geometrische Hangkombinationen die untersucht wurden. Diese Anzahl beinhaltet noch nicht die geologischen Bedingungen und entspricht nicht der Anzahl an Trajektorienanalysen, die durchgeführt wurden. Die berücksichtigten geologischen Bedingungen sind in Kapitel 3.5.3 zusammengestellt.

*Tabelle 14: Wahl der Diskretisierung des Hangs für die Durchführung der Fallanalysen.*

$H_{total}$ [m]	$H_1$ [% von $H_{total}$ ]	$H_2$ [% von $H_{total}$ ]	$D_1$ [% von $D_{total}$ ]	$H_{total} / D_{total}$ [%]
10	7.5	7.5	7.5	7.5
35	22.5	22.5	22.5	22.5
75	37.5	37.5	37.5	37.5
125	52.5	52.5	52.5	52.5
250	67.5	67.5	67.5	67.5
350	82.5	82.5	82.5	82.5
450				97.5
550				112.5
650				127.5
850				142.5
				157.5
				172.5

### 3.5.3. Beschreibung der geologischen Eigenschaften des Hangs

Die Wahl der Restitutionsfaktoren (vgl. Gleichungen (1.44) und (1.45)) sind neben der Geometrie des Hangs weitere sehr ortsspezifische Einflussgrößen. Für eine generische Betrachtung müssen diese in Abhängigkeit von der Region, in der die Steinschlaggalerie steht, gewählt werden. Das Inventar an Steinschlaggalerien in der Schweiz zeigt, dass die meisten Galerien in tektonischen Zonen stehen, die durch Granite, Gneise und Alpenkalke geprägt sind. In Schellenberg (2008) findet sich eine Inventarliste der Steinschlaggalerien. Eine Überlagerung dieses Inventars mit geologischen Karten der Schweiz zeigt, dass die meisten Galerien im Aaremassiv, im Gotthardmassiv, in den Gebieten der Helvetischen Decken und den Penninischen Decken liegen. Die relevanten Gesteine in diesen Gebieten sind:

- Gneise und Granite als Kristallin in Aare- und Gotthardmassiv
- Kalkstein/Alpenkalk in den Helvetischen Decken
- Gneise (starke Überfaltung des Kristallins), Kalksteine in den Penninischen Decken

*Tabelle 15: Geologische Zonen der Schweiz und die definierten Gebiete.*

Gebiet	Gestein
Gotthard und Aaremassiv	Gneise, Glimmerschiefer, Mylonit, Phyllit, Granite, Amphibole, Gabbro, Diorit
Penninische Decken	Gneise, Glimmerschiefer, Mylonit, Phyllit, Bündnerschiefer
Helvetische Decken	Lias, Dogger, Malm Perm, Keuper, Rhaet, Perm

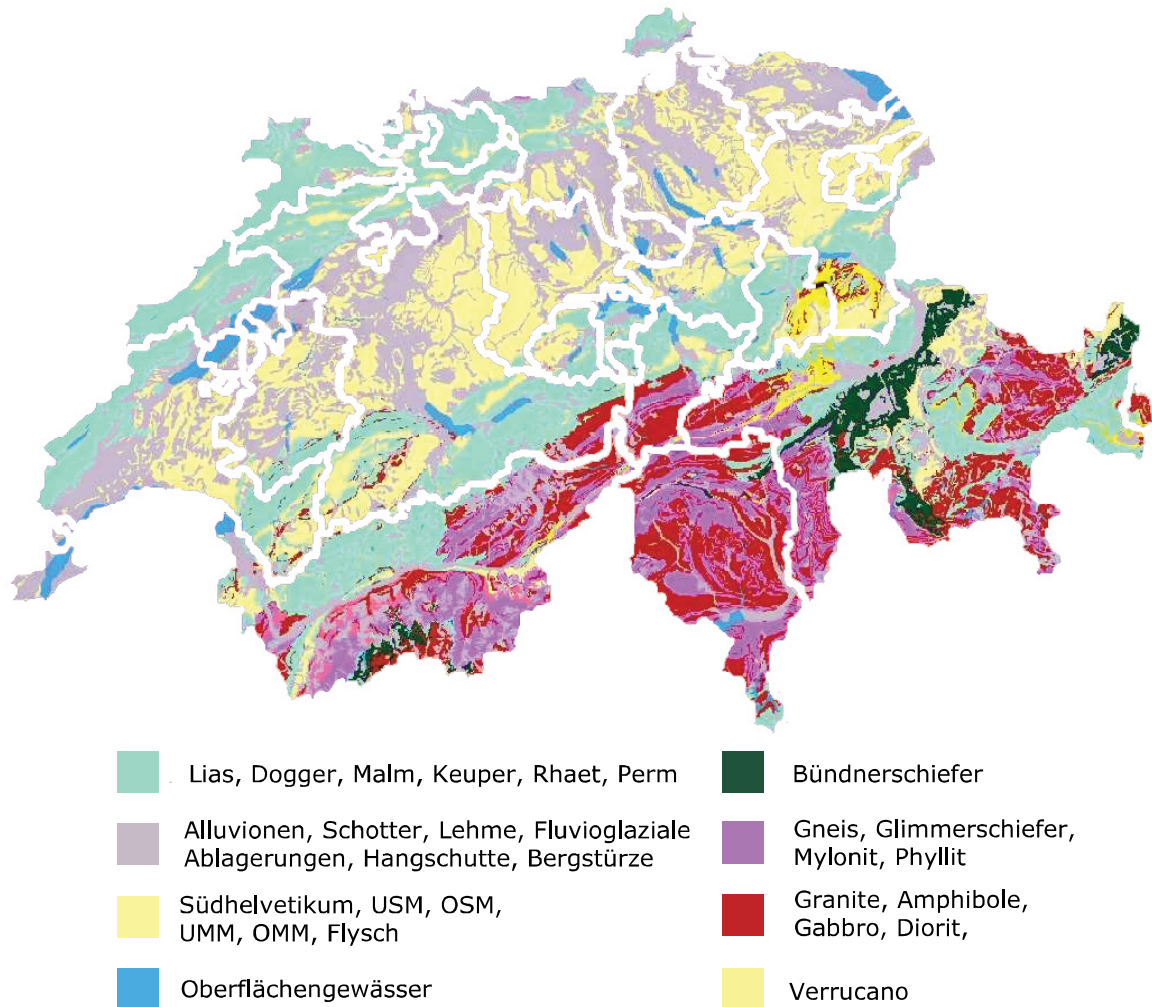


Abbildung 35: Geologische Zonen der Schweiz (© 2009 swisstopo).

Diese drei Hauptzonen wurden im Programm berücksichtigt, und charakteristische Werte der Restitutionsfaktoren für diese Gebiete gewählt. In Abbildung 35 sind die geologischen Zonen der Schweiz dargestellt. In Tabelle 15 sind diese geologischen Zonen den definierten Hauptzonen zugeordnet.

Neben den generellen Zonen wurden auch im Hang selbst unterschiedliche Restitutionsfaktoren für die drei Abschnitte  $H_1$ ,  $H_2$  und  $H_3$  gewählt, um ihren unterschiedlichen Charakteristiken Rechnung zu tragen.

$H_1$  charakterisiert einen weniger stark geneigten Abschnitt des Hangs und besitzt durch Ablagerung und sehr leichte Vegetation einen geringeren Restitutionsfaktor als glatter Fels. Der Abschnitt  $H_2$  ist stark geneigt und besteht aus festem Gestein. Die Restitutionsfaktoren sind tendenziell höher, d. h. es wird weniger Energie in plastische Verformung umgewandelt. Im unteren Bereich des Hangs  $H_3$  lagert sich Geröll an, welches häufig bewachsen ist. Dort ist der Restitutionsfaktor am geringsten.

Wälder wurden nicht in den Fallanalysen berücksichtigt. Kommerzielle Trajektorienmodelle bieten zurzeit noch nicht die Möglichkeit, Schutzwälder explizit zu berücksichtigen. Sind Schutzwälder vorhanden, wird vorgeschlagen, als erste Approximation Restitutionsfaktoren für sehr weiches Gestein zu wählen (z. B. weicher Kalkstein).

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Die Restitutionswerte, die für  $H_1$  und  $H_2$  gewählt worden sind unterscheiden sich nicht besonders stark, da sich innerhalb eines Hangs die Gesteinsabfolge in der Regel nicht stark ändert.

Im Trajektorienmodell werden die Restitutionsfaktoren als Zufallsvariablen berücksichtigt und durch ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung charakterisiert. In Tabelle 16 bis Tabelle 18 sind die verwendeten Restitutionsfaktoren für die verschiedenen Regionen zusammengestellt. Die Standardabweichungen, die hier verwendet worden sind, sind höher, als diejenigen, die sich in der Literatur finden (siehe z. B. Pfeiffer und Bowen (1989), Robotham et al. (1995), Chau et al. (2002)).

Bei den Angaben in der Literatur handelt es sich um spezifische Angaben für einen bestimmten Ort. Da die Fallanalysen hier jedoch generisch durchgeführt werden, sind die Unsicherheiten dementsprechend grösser. Für das Gotthard- und Aaremassiv und die Helvetischen Decken wurde ein Variationskoeffizient für die Restitutionsfaktoren von  $\sigma_R / \mu_R = 0.2$  gewählt. Da im Penninikum neben den sehr harten Gesteinen auch Kalkstein auftreten kann, wurde hier ein Variationskoeffizient von  $\sigma_R / \mu_R = 0.25$  gewählt.

*Tabelle 16: Zusammenstellung der generisch verwendeten Restitutionsfaktoren für das Gotthardmassiv.*

Gotthardmassiv	$R_N$		$R_T$	
	$\mu_{RN}$	$\sigma_{RN}$	$\mu_{RT}$	$\sigma_{RT}$
$H_1$	0.490	0.098	0.950	0.190
$H_2$	0.530	0.106	0.990	0.200
$H_3$	0.320	0.064	0.800	0.160

*Tabelle 17: Zusammenstellung der generisch verwendeten Restitutionsfaktoren für das Penninikum.*

Penninikum	$R_N$		$R_T$	
	$\mu_{RN}$	$\sigma_{RN}$	$\mu_{RT}$	$\sigma_{RT}$
$H_1$	0.440	0.110	0.810	0.203
$H_2$	0.490	0.123	0.850	0.213
$H_3$	0.315	0.079	0.750	0.188

*Tabelle 18: Zusammenstellung der generisch verwendeten Restitutionsfaktoren für die Helvetischen Decken.*

Helvetische Decken	$R_N$		$R_T$	
	$\mu_{RN}$	$\sigma_{RN}$	$\mu_{RT}$	$\sigma_{RT}$
$H_1$	0.303	0.061	0.615	0.123
$H_2$	0.315	0.063	0.712	0.142
$H_3$	0.315	0.063	0.700	0.140

Die Kombination der drei physikalischen Modelle mit den möglichen geometrischen Hangkonfigurationen erfordert die Durchführung von 18.612 Trajektorienberechnungen. In jeder dieser

Berechnung wurden 10.000 Simulationen durchgeführt. All diese Resultate sind in der Datenbank des Programms gespeichert. Je nachdem, welche Hangkonfiguration der Anwender eingibt, werden die Ergebnisse für diese Bedingungen geladen.

Die Modellunsicherheiten, die aus den gewählten Annahmen im Programm und der gewählten Diskretisierung des Hanges resultieren, werden über eine lognormalverteilte Zufallsvariable  $X \sim LN(1,0.1)$  berücksichtigt.

### 3.6. Modellierung der Verletzbarkeitskurven der Steinschlagschutzgalerie

Eine Verletzbarkeitskurve gibt die Wahrscheinlichkeit für einen Zustand eines Objektes an, bedingt auf einzelne oder mehrere beschreibende Indikatoren. Verletzbarkeitskurven haben die Dimension der Anzahl an Indikatoren, die sie beschreiben. Im einfachsten Fall sind sie eindimensional.

Die Entwicklung von Verletzbarkeitskurven ist insbesondere bei hierarchischen probabilistischen Modellen sinnvoll; sie erlauben die Berechnung von Grenzzuständen, bedingt auf gegebene Zustände des Systems. Die Verletzbarkeit kann häufig getrennt vom Gesamtsystem berechnet werden und später in das probabilistische Modell eingebunden werden. Erklärt werden kann die Bedeutung der Verletzbarkeit anhand des Gesetzes der totalen Wahrscheinlichkeit:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i) P(B_i) \quad (1.48)$$

Der Term  $P(A|B_i)$  in Gleichung (1.48) kann dabei als Verletzbarkeit interpretiert werden. Er gibt die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis  $A$ , bedingt auf den Indikator  $B_i$ , an.

Sei der Indikator  $B_i$  beispielweise die *Geschwindigkeit eines Steinschlags* an der Einschlagstelle und  $A$  das Ereignis *Versagen*, das mit  $F$  bezeichnet werden soll, so kann eine Verletzbarkeitskurve beispielweise eine Form annehmen, wie sie in Abbildung 36 dargestellt ist.

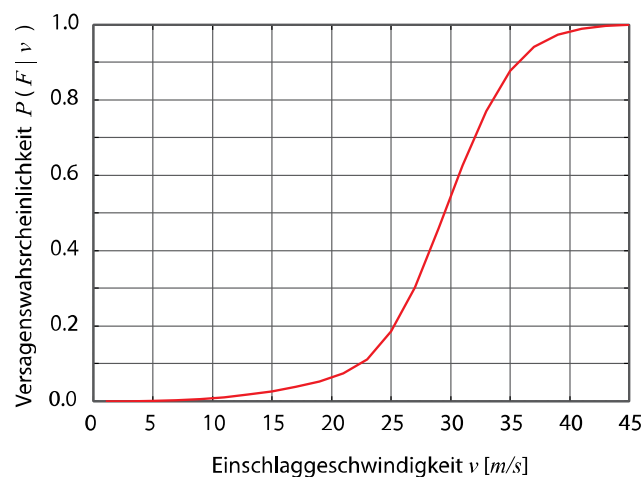


Abbildung 36: Beispielhafte Darstellung einer Verletzbarkeitskurve.

Auf der x-Achse ist die Einschlaggeschwindigkeit aufgetragen, mit der ein Stein auf der Galerie einschlägt, der so genannte Indikator. Die y-Achse gibt die Versagenswahrscheinlichkeit  $P(F|v)$  an, die Einschlaggeschwindigkeit  $v$  nimmt einen bestimmten Wert an. In Abbildung 36 beträgt beispielweise die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie  $P(F|v = 30[m/s]) = 0.55$ .

Abbildung 36 zeigt eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Situation. Es ist offensichtlich, dass nicht nur der Indikator *Geschwindigkeit eines Steins* die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie bestimmt, sondern auch Eigenschaften der Galerie und die Masse des Steins. Die benötigten Ver-

letzbarkeitskurven für die Steinschlaggalerie sind dadurch wesentlich komplexer, mehrdimensional und auf die folgenden fünf relevanten Indikatoren bedingt:

- Einschlaggeschwindigkeit eines Steins auf dem Galeriedach
- Masse des Steins
- Baujahr der Galerie
- Dicke der Betondecke
- Dicke der Eindeckung

Dabei sind das Baujahr der Galerie und die Dicke der Betondecke aggregierte Indikatoren. Das bedeutet, sie implizieren weitere Indikatoren, die für die Galerie relevant sind, aber aufgrund von Rechenzeiten und/oder Rechenkapazitäten nicht explizit modelliert worden sind.

Im Fall des Baujahrs sind dies Materialeigenschaften des Betons und der Bewehrung. Sie werden nach den Anforderungen der jeweils gültigen Normengeneration im Baujahr modelliert. Im Fall der Dicke der Betondecke ist es der Bewehrungsgrad. Hier wird angenommen, dass genau soviel Bewehrung eingebaut worden ist, dass sich in der Betondruckzone des Galeriedaches im Grenzzustand ein plastischer Spannungsblock ausbildet der genau so gross ist, dass keine Druckbewehrung notwendig ist. Damit ist der Querschnitt im Bemessungsfall voll ausgenutzt.

Da sich die Bemessungswerte der Betondruckfestigkeiten und die Bemessungswerte der Streckgrenze des Bewehrungsstahls der jeweiligen Normengeneration unterscheiden, unterscheidet sich auch der Bewehrungsgrad.

Die Versagenswahrscheinlichkeit wurde mit dem Modell von Schellenberg (2008) berechnet. Das Modell ist detailliert in Schellenberg (2008) beschrieben. Im Folgenden wird nur ein grober Überblick über das Modell gegeben.

Das Modell besteht aus einem Drei-Massen-Schwinger und ermöglicht die Vorhersage von Biegeversagen als auch von Durchstanzen infolge von Steinschlägen auf Steinschlaggalerien. Das Modell wurde anhand von verschiedenen Versuchen in unterschiedlichen Massstäben getestet und anhand von Versuchen im Massstab 1:2 kalibriert.

Das entwickelte Berechnungsmodell entspricht einem dynamischen System mit multiplen Freiheitsgraden und kann in der Form

$$p = \mathbf{M} \ddot{y} + \mathbf{C} \dot{y} + \mathbf{K} y \quad (1.49)$$

angegeben werden. Die erste Masse  $M_1$  des Systems entspricht der Masse des einschlagenden Steins,  $M_2$  ist die Masse des angenommenen Durchstanzkegels unter der Belastung und  $M_3$  entspricht der Masse der umgebenden Struktur des Bauwerks. Damit ergibt sich:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

Die Steifigkeitsmatrix der Galerie wird durch drei nichtlineare Federn beschrieben. Die erste Feder  $K_1$  beschreibt die Eigenschaften der Eindeckung,  $K_2$  das Schubverhalten am kritischen Schnitt in der Betondecke und  $K_3$  beschreibt die Biegesteifigkeit des globalen Systems.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

Für die Tragfähigkeit der Galerie ist die Dämpfung  $\mathbf{C}$  von untergeordneter Bedeutung, da in der Regel die erste Belastungsspitze zum Versagen der Galerie führt. Dennoch seien hier kurz die Komponenten der Dämpfung erwähnt. Die Dämpfung resultiert hauptsächlich aus dem verwendeten Material im System.  $C_1$  ist der Dämpfungskoeffizient der Eindeckung,  $C_2$  der Dämpfungskoeffizient der Galerie, der aus der lokalen Dämpfung der Galerie resultiert, und  $C_3$  ist der Dämpfungskoeffizient, der aus der globalen Dämpfung des Systems resultiert. Die Dämpfungsmatrix ergibt sich zu:

*Tabelle 19: Probabilistisches Modell zur Berechnung der Verletzbarkeitskurven.*

Parameter	Beschreibung	Mittelwert	COV	Verteilung
$\alpha$	Faktor der modalen Masse $M_3$	0.33	0.12	Lognormal
$k_w$	Faktor der globalen Steifigkeit des Systems	60	0.12	Lognormal
$\zeta_2$	Dämpfungskoeffizient des Durchstanzverhaltens	0.05	0.1	Lognormal
$\zeta_3$	Dämpfungskoeffizient des Biegeverhaltens	0.015	0.1	Lognormal
$\gamma_g$	Wichte der Eindeckung [kN / m <sup>3</sup> ]	20	0.15	Normal
$K_{10}$	Initiale Steifigkeit der Eindeckung [N / mm]	30000	0.1	Normal
$K_{1,\max}$	Maximale Steifigkeit der Eindeckung [N / mm]	500000	0.1	Normal
$\varphi$	Innerer Reibungswinkel der Eindeckung	33	0.1	Normal
$c_1$	Dämpfungskonstante der Eindeckung [Ns / m]	7000	0.14	Normal
$A_{sg}$	Maximale Stahldehnung [‰]	55	0.09	Normal

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 & -C_1 & 0 \\ -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 \\ 0 & -C_2 & C_2 + C_3 \end{bmatrix} \quad (1.52)$$

Die Gleichungen zur Bestimmung der Komponenten der Matrizen  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$  und  $\mathbf{C}$  sind in Schellenberg (2008) gegeben und sollen hier nicht wiederholt werden.

Zur Bestimmung von Gleichung (1.49) wird eine Zeitschrittintegration verwendet. Die Zeitschritte  $\Delta t \leq 1[\text{ms}]$  sind dabei klein im Vergleich zur Belastungszeit ( $\approx 12[\text{ms}]$ ). Die kleinen Zeitschritte erlauben eine vereinfachte Integration ohne Beeinträchtigung der Konvergenzeigenschaften (Schellenberg (2008)).

Die gesamte Berechnung inklusive der Zeitintegration wurden zur Bestimmung der Verletzbarkeitskurven in The MathWorks (2006) umgesetzt. Da keine geschlossene Grenzzustandsgleichung für das Durchstanzen und das Biegeversagen vorlag, wurden die Eingangsgrößen als Zufallsvariablen modelliert und die Versagenswahrscheinlichkeit unter Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen berechnet (siehe z. B. Melchers (2002)). Das verwendete probabilistische Modell ist in Tabelle 19 zusammengestellt.

Steifigkeit und Betonfestigkeit wurden nach JCSS (2001) unter Verwendung der Werte, die in Tabelle 20 gegeben sind, für die verschiedenen Normen modelliert.

Tabelle 20: Modellierung der Betonfestigkeit.

Norm	Repräsentativer Beton	Verteilung	Parameter		Momente [ $N/mm^2$ ]	
			$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\sigma$
SIA162:1956	BN 350	Lognormal	2.9	0.14	18.35	2.58
SIA162:1968	BN	Lognormal	3.03	0.24	21.30	5.18
SIA162:1989	BN	Lognormal	3.03	0.24	21.30	5.18
SIA162:1993	B35/25	Lognormal	3.38	0.16	29.75	4.78
SIA262:2003	C30/37	Lognormal	3.63	0.14	38.20	6.15

Tabelle 21: Modellierung der Stahlfestigkeit

Norm	Repräsentative Stahlsorte	Verteilung	Parameter		Momente [ $N/mm^2$ ]	
			$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\sigma$
SIA162:1956	II a)	Lognormal	6.02	0.07	412.60	28.92
SIA162:1968	III a)	Lognormal	6.23	0.05	508.40	25.44
SIA162:1989	S500	Lognormal	6.33	0.07	562.53	39.43
SIA162:1993	S500	Lognormal	6.33	0.07	562.53	39.43
SIA262:2003	B500B/A	Lognormal	6.33	0.07	562.53	39.43

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Um generische Verletzbarkeitskurven entwickeln zu können, sind einige Annahmen notwendig, die im Folgenden dargestellt und diskutiert werden.

Die verwendeten Materialien in den unterschiedlichen Normen, die in Tabelle 20 und Tabelle 21 dargestellt sind, sollen die gängigsten Baustoffe der jeweiligen Zeit repräsentieren.

Alterungseffekte, wie z.B. Beton oder Stahlkorrosion wurden nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass der Unterhalt an den Galerien effizient und optimal ausgeführt wurde.

Die derzeitige Fassung des Modells von Schellenberg (2008) nimmt an, dass die Steinschläge die Mitte des Galeriedachs treffen. Der Einschlagort des Steins beeinflusst das Tragverhalten der Galerie. Im Mittel kann das Tragverhalten jedoch durch einen Treffer in der Galeriedachmitte sinnvoll approximiert werden. Auch hier gilt, wenn die Modelle weiterentwickelt werden, so kann diese Annahme gelockert werden. Dafür ist auch erforderlich, aus dem Trajektorienmodell die räumliche Verteilung der Steinschläge auf dem Galeriedach auszulesen und im Modell zu verwenden. Im Bayes'schen Netz ist dann auch die Berücksichtigung eines weiteren Knotens notwendig, der die räumliche Verteilung der Einschläge berücksichtigt.

Es wurde angenommen, dass das Galeriedach bergseitig eingespannt ist und talseitig frei aufgelagert ist. Diese Annahme beeinflusst unter anderem die modale Masse von  $M_3$ . Die Annahme einer festen Einspannung und die Annahme einer freien Lagerung sind beides Idealisierungen der Wirklichkeit. In beiden Fällen (ob eingespannt oder frei gelagert), wirken mehr oder weniger steife Federn, dessen tatsächliche Steifigkeit unbekannt ist. Daher wurde hier bei der Modellierung des Faktors  $\alpha$  ein Variationskoeffizient von 0.12 gewählt.

Das Verhältnis der Spannweiten in der Betondecke wurde zu 0.9 festgelegt. Damit ist die Länge der Überspannung der Strasse etwas geringer als der Betonierabschnitt in Längsrichtung der Fahrbahn. In Abbildung 37 ist das schematische Modell der Galerie dargestellt.

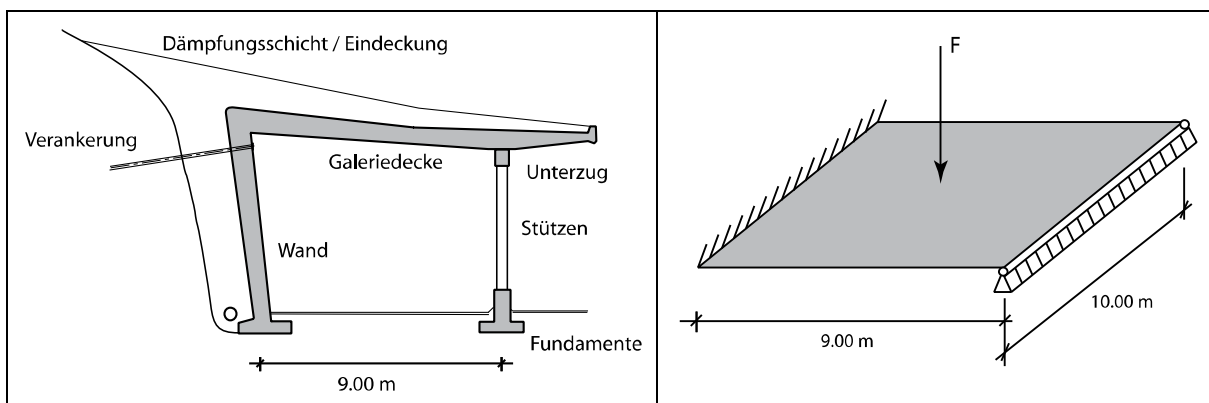


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Galerie (links) und Darstellung des statischen Modells der Galeriedecke (rechts).

Die verschiedenen Annahmen im Modell führen zu weiteren Modellunsicherheiten, die über eine lognormalverteilte Zufallsvariable  $X_{vul} \sim LN(1,0.15)$  berücksichtigt wurden. Es soll darauf hingewiesen werden, dass durch die Annahmen nicht nur Galerien beurteilt werden können, die diese Annahmen erfüllen – sie repräsentieren die allgemeinen Eigenschaften einer normalen Galerie aus dieser Population.

Eine genauere Modellierung, d. h. Berücksichtigung aller anderen Indikatoren und eine detailliertere Modellierung der Versagenswahrscheinlichkeit ist in diesem Rahmen (noch) nicht sinnvoll. Vergleicht man die Unsicherheiten und Vereinfachungen, die im Trajektorienmodell getroffen werden und notwendig sind, so ist das Verletzbarkeitsmodell sehr detailliert und die Annahmen, die zum Tragverhalten getroffen werden, relativ klein.

Die hier getroffenen Annahmen sind zurzeit noch notwendig – bei vereinfachten Verfahren, wie z. B. Ereignisbaumanalysen, die auf Expertenschätzungen basieren, sind solche Annahmen implizit getroffen. Diese Modelle lassen sich in der Regel nur schwer an andere Verhältnisse anpassen und verbessern, wenn neue Modelle oder Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

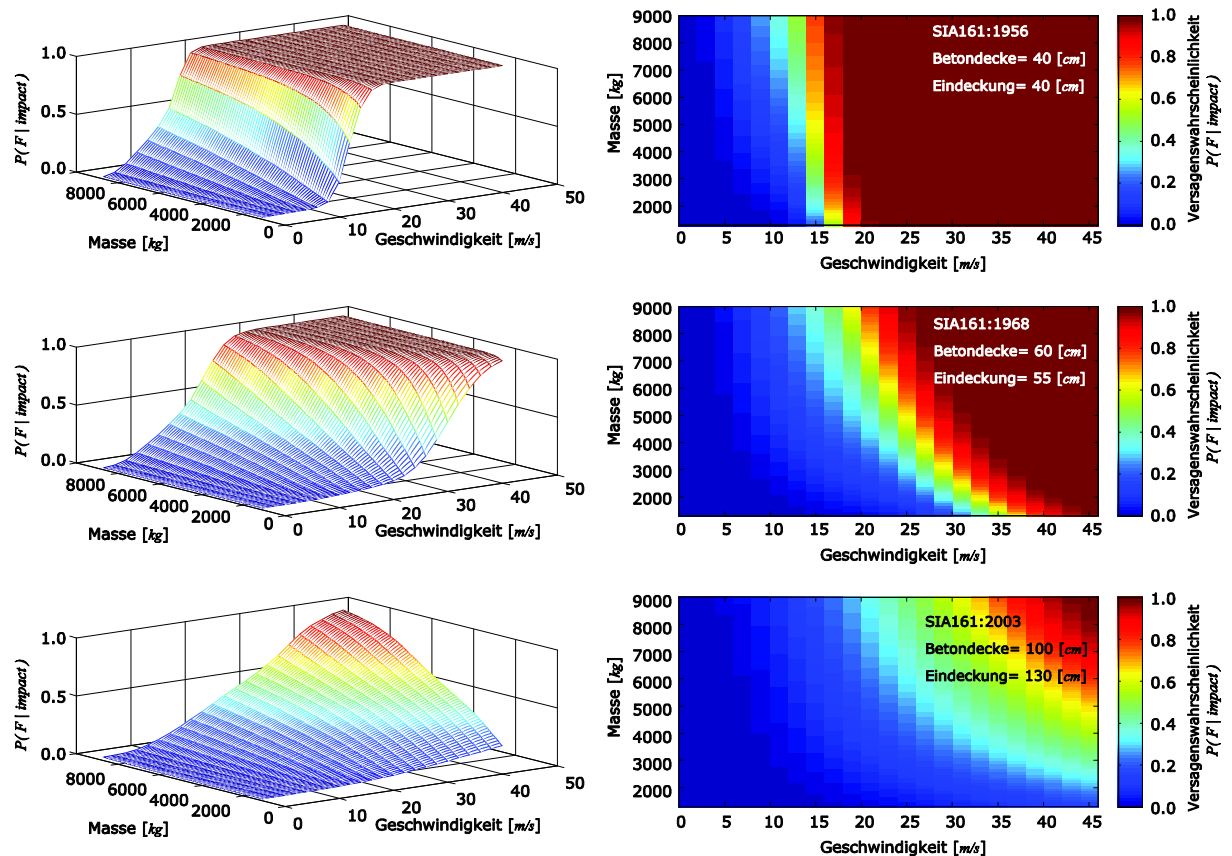


Abbildung 38: Zwei- und drei-dimensionale Darstellung der Verletzbarkeitskurven von Galerien mit verschiedenen Eigenschaften.

Drei ausgewählte Beispiele der berechneten Verletzbarkeitskurven sind in Abbildung 38 gezeigt. Die Abbildungen rechts zeigen eine zweidimensionale Projektion der Verletzbarkeitskurven in den Masse-Geschwindigkeitsraum. Die Farben repräsentieren die Versagenswahrscheinlichkeit. Links sind die gleichen Abbildungen dreidimensional gezeigt.

Deutlich ist in Abbildung 38 der Einfluss der Dicke der Betondecke und der Einfluss der Höhe der Eindeckung auf die Versagenswahrscheinlichkeit zu erkennen. Die Galerie mit einer Plattendicke von lediglich  $0.4\text{ m}$  reagiert sehr sensitiv auf die Einschlaggeschwindigkeit (Abbildung 38 oben). Steine mit einer Geschwindigkeit von mehr als  $20\text{ [m/s]}$  führen fast sicher zum Versagen. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Plattendicke und zunehmender Eindeckungshöhe sowohl die Biegetragfähigkeit als auch der Widerstand gegen Durchstanzen erhöht wird. Gerade bei Steinen mit einer geringeren Masse und einer hohen Geschwindigkeit, die in der Regel zum

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Durchstanzversagen führen, verringert sich die Versagenswahrscheinlichkeit deutlich (Abbildung 38, mittlere und untere Darstellung).

Ein Beispiel für den Einfluss der verwendeten Normengenerationen gibt die Abbildung 39. Auch wenn die Konzepte, nachdem die Normen die Tragfähigkeit bestimmen, unterschiedlich sind, so ist das tatsächliche Tragverhalten der Galerie bei einem Steinschlagereignis dennoch bei allen Galerien dasselbe. Da das verwendete Modell nicht die Realität bestimmt, spielt das Bemessungskonzept im Tragverhalten keine Rolle. Verantwortlich für das Tragverhalten sind die verbauten Materialien in ihrer Menge, ihren Eigenschaften und der Art des Einbaus. Es ist davon auszugehen, dass die heutigen Modelle das Tragverhalten besser beschreiben als alle vorhergegangenen Modelle. Andernfalls gäbe es kein Argument, neuere Modelle zu verwenden. Diese Betrachtungsweise rechtfertigt es, alle Galerien aus den verschiedenen Generationen mit dem gleichen (heutigen) Modell zu beschreiben und das Risiko mit diesem Modell zu berechnen.

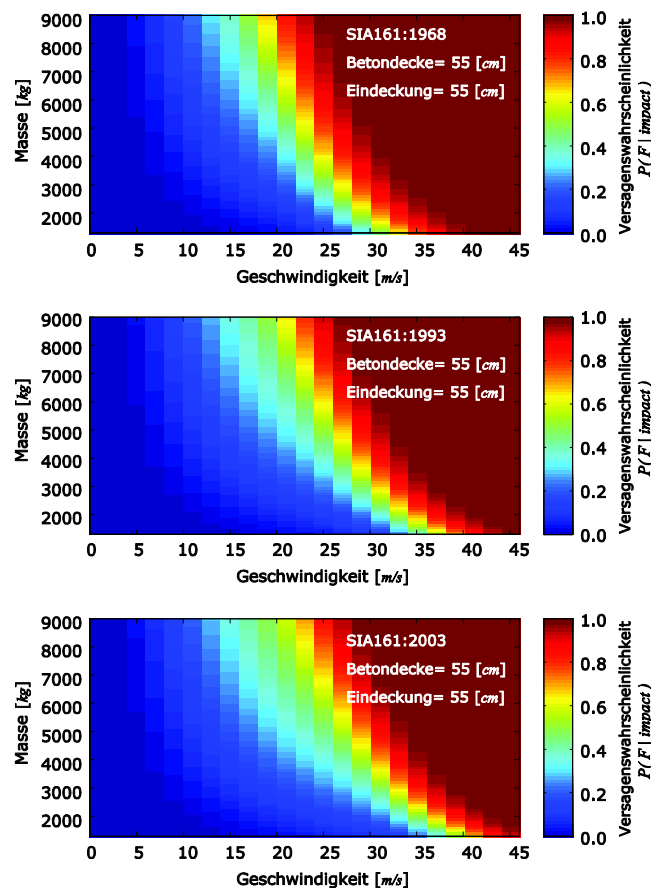


Abbildung 39: Zwei-dimensionale Darstellung der Verletzbarkeitskurven von Galerien aus verschiedenen Normengenerationen.

Der Einfluss der unterschiedlichen Festigkeiten im Stahl als auch im verwendeten Beton in den verschiedenen Normengenerationen ist erkennbar. Interessanterweise steigen im Mittel – wie zu erwarten – die Versagenswahrscheinlichkeit bei höheren Materialfestigkeiten, die Unsicherheiten in den Verletzbarkeitskurven nehmen hingegen zu (Abbildung 39).

Insgesamt wurden in diesem Projekt 280 Verletzbarkeitskurven berechnet, wie sie in Abbildung 39 und Abbildung 38 dargestellt sind. Für jede dieser Verletzbarkeitskurven sind 2.369 Kombina-

tionen aus Einschlaggeschwindigkeit und Steinmasse berechnet worden. Insgesamt wurde 663.320 mal die Versagenswahrscheinlichkeit  $P(F|impact, \xi)$  einer Galerie berechnet. Jede dieser Versagenswahrscheinlichkeiten ist auf das Set an Bedingungen  $\xi$ , das durch die relevanten Indikatoren gegeben, bedingt. Die Überlebenswahrscheinlichkeit  $P(S|impact)$  ergibt sich aus dem Komplementärereignis des Versagens zu  $P(S|impact) = 1 - P(F|impact)$ . Beide, die Versagenswahrscheinlichkeit und die Überlebenswahrscheinlichkeit, sind im Bayes'schen Netz im Knoten *Failure of the gallery given impact* repräsentiert (siehe Kapitel 3.7).

### **3.7. Bayes'sches Netz zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Steinschlagalerie**

#### **3.7.1. Einleitung zu Bayes'schen Netzen**

Eine probabilistische Methode, die die Risikoermittlung und die Entscheidungsfindung unterstützt, sind Bayes'sche Netze. Bayes'sche Netze sind Modelle, die es, ähnlich wie Ereignisbäume, ermöglichen, in übersichtlicher Weise komplexe Zusammenhänge darzustellen. Sie bieten jedoch wesentliche Vorteile und kommen daher sowohl in der Forschung als auch in der Industrie zunehmend zum Einsatz.

Bayes'sche Netze wurden in den letzten 20 Jahren entwickelt. Das ursprüngliche Ziel war es, Werkzeuge zur Entscheidungsfindung in Systemen mit künstlicher Intelligenz zu entwickeln. Heute werden sie vielfach in Expertensystemen zur Diagnose, wie z. B. in der Medizin (Kahn et al. (1997)), aber auch im Ingenieurwesen (Nishijima et al. (2007), Thiemig et al. (2009)) aufgrund ihrer grossen Effizienz und Flexibilität immer häufiger verwendet. Auch in Suchfunktionen in Softwareanwendungen kommen die Netze zum Einsatz.

Bayes'sche Netze können sowohl Ereignisbäume, Entscheidungsbäume als auch Fehlerbäume vollständig ersetzen. In Fehlerbäumen ist es zum Teil schwierig, kausale Abhängigkeiten zu modellieren. Bayes'sche Netze hingegen sind genau für diese Aufgabe entwickelt worden und lösen diese älteren Methoden immer mehr ab. Desweiteren erlauben die Netze die *a priori*, die *a posteriori* und die *pre posteriori* Entscheidungsanalyse. Die folgenden Ausführungen basieren im wesentlichen auf Jensen (2001), Kjaerulff und Madsen (2005), Kjaerulff und Madsen (2006), Rammelt (1998) und Faber (2006) und sollen eine kurze Einführung in die Thematik geben.

#### **Bestandteile Bayes'scher Netze**

Bayes'sche Netze (BN) bestehen aus gerichteten azyklischen Graphen (engl.: *directed acyclic graph DAG*). Der DAG enthält Knoten, die Zufallsvariablen repräsentieren. Diese Zufallsvariablen können kontinuierlichen Verteilungen folgen oder aus einem finiten Set diskreter Zustände bestehen. Zwischen den Variablen besitzt der Graph Verbindungen, die die Zusammenhänge zwischen den Variablen repräsentieren. Die Verbindungen besitzen eine Richtung, die den direkten Einfluss der einen Zufallsvariablen auf die andere ausdrückt. Die Richtung der Verbindung stellt den kausalen Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen dar. Bei Modellen, die nicht unbedingt auf kausalen Abhängigkeiten basieren und mit automatisierten Techniken zur Netzerstellung arbeiten, werden die Verbindung und die Richtung der Verbindung über Korrelationen zwischen einzelnen Zufallsvariablen bestimmt.

Kausale Zusammenhänge sind nicht immer offensichtlich und Kausalität ist abhängig von den Handlungen und Handlungsalternativen, die zur Verfügung stehen und die Zustände der Variablen verändern. In einigen Fällen muss der Experte demnach die Richtung der Verbindungen entsprechend der Fragestellung festlegen, da diese nicht a priori eindeutig ist.

Die Verbindungen im Graph dürfen nicht zyklisch sein, d. h. folgt man einer Verbindung eines Knotens seiner Richtung nach, so darf man nicht über endlich viele andere Knoten wieder zum Ausgangsknoten gelangen. Dies schliesst nicht aus, dass nicht mehrere Wege über verschiedene Verbindungen von einem Knoten zu einem anderen Knoten führen.

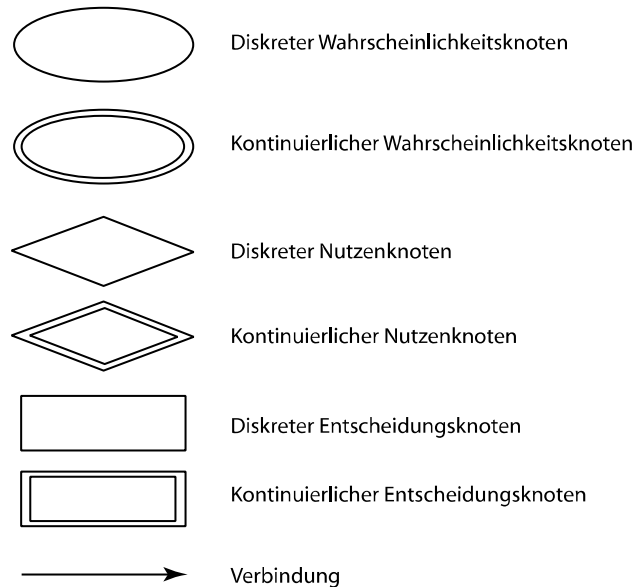


Abbildung 40 : Symbole in Bayes'schen Netzen.

In Abbildung 40 sind die Symbole dargestellt, mit denen ein Bayes'sches Netz aufgebaut werden kann. Generell wird zwischen kontinuierlichen und diskreten Knoten unterschieden. In kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsknoten werden die Zufallsvariablen durch ihre Verteilungsfunktion beschrieben. Diskrete Knoten enthalten (bedingte) Wahrscheinlichkeitstabellen (*Conditional Probability Table CPT*), in denen für die diskreten Zustände der Variable die Wahrscheinlichkeiten angegeben sind. Werden in einem Netz neben den Wahrscheinlichkeitsknoten auch Nutzenknoten verwendet, so kann mit Hilfe von solchen Netzen der Erwartungswert des Risikos direkt ermittelt werden. In diesem Fall werden die Netze als Einflussdiagramme bezeichnet. Auch die Nutzenknoten können diskrete Zustände oder kontinuierliche Funktionen enthalten. Neben der Risikoeermittlung können Bayes'sche Netze auch zur Entscheidungsfindung dienen. Hierfür werden in das Netz Entscheidungsknoten eingeführt, die unterschiedliche Entscheidungen modellieren. Die optimale Entscheidung ist diejenige, die den Nutzen im Netz maximiert. In der praktischen Anwendung werden meist nur diskrete Zustände in Bayes'schen Netzen verwendet. Zum einen, da in kommerzieller Software (z. B. Hugin (2006), GeNIe&Smile (2006)) die Verwendung kontinuierlicher Knoten bisher nur eingeschränkt möglich ist, zum anderen, da die Kombination von kontinuierlichen und diskreten Variablen nicht ohne weiteres möglich ist. Dies stellt allerdings keine wirkliche Einschränkung solcher Netze dar, da jede Verteilungsfunktion diskretisiert werden kann. Die Diskretisierung kann dabei an die Problemstellung angepasst werden. Bei einer geeigneten Diskretisierung der Zufallsvariablen ist die Information, die durch die Diskretisierung verloren geht, relativ gering. Eine Einschränkung bezüglich der Anzahl an Zuständen jedes Knotens besteht nicht. Im Rahmen dieses Projekts werden nur Bayes'sche Netze und Einflussdiagramme mit diskreten Zuständen der Zufallsvariablen verwendet.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Die Struktur des Netzes wird unter Verwendung von Familienbeziehungen beschrieben. Geht eine Verbindung von einem Knoten  $A$  zu einem Knoten  $B$ , so ist der Knoten  $A$  ein Elternknoten des Kindes  $B$ . Jedes Netz besteht aus mindestens einem Elternknoten.

Ein Bayes'sches Netz besteht aus:

- allen relevanten Indikatoren, die es erlauben, die Problemstellung zu beschreiben
- bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die die Indikatoren beschreiben
- einer Netzstruktur in Form eines azyklisch gerichteten Graphen

### Abhängigkeiten

Netzwerke können durch ihre Konfiguration kategorisiert werden. Abbildung 41 zeigt ein serielles Netz. In diesem Netz beeinflusst der Elternknoten  $A$  den Knoten  $B$ . Dieser hat wiederum einen direkten Einfluss auf den Knoten  $C$ . Jeder Knoten enthält Informationen über den Indikator, den sie repräsentieren. Diese Informationen sind unsicher und werden durch Variablen modelliert. Die zugrunde liegende Verteilung jedes Knotens ist bedingt auf seine Elternknoten. In Abbildung 41 ist nur die Verteilung des Knotens  $A$  unbedingt definiert. Ist ein Zustand eines Knotens mit Sicherheit bekannt, so kann diese Information in das Netz einfließen. Man spricht in diesem Fall von Evidenz. Fließt nun Evidenz in den Knoten  $A$  ein, so wird diese Information einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeiten der Knoten  $B$  und  $C$  haben. Besitzt man Evidenz über den Zustand des Knotens  $B$ , so ist der Informationsfluss zwischen den Knoten  $A$  und  $B$  unterbrochen. Die Knoten  $A$  und  $B$  sind *d-separiert*, d. h. bedingt unabhängig.

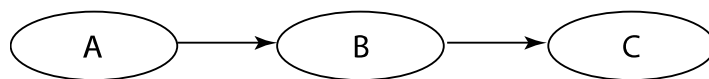


Abbildung 41: Serielles Bayes'sches Netz.

Sind alle Elternknoten eines Knotens evident, so ist dieser im *DAG* bedingt unabhängig von allen anderen seiner Vorfahren, gegeben es liegt keine Evidenz über Nachkommen des Knotens vor. In Abbildung 42 sind die Knoten  $B, C$  und  $D$  bedingt unabhängig, wenn Evidenz über den Knoten  $A$  vorliegt. Diese Konfiguration eines Netzes wird als divergierendes Netz bezeichnet.

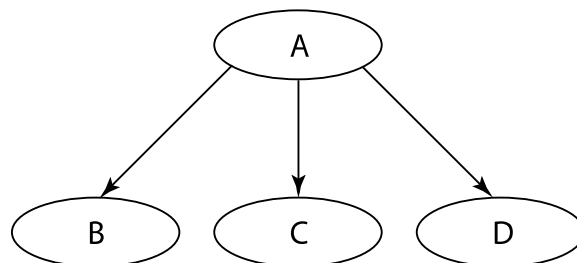


Abbildung 42 : Divergierendes Bayes'sches Netz.

Abbildung 43 zeigt ein konvergierendes Netz. Hier sind die Knoten  $B, C$  und  $D$  unabhängig, solange keine Evidenz über den Knoten  $A$  oder die Knoten  $B, C$  und  $D$  vorliegt. Wird Evidenz

über einen der Knoten im konvergierenden Netz eingeführt, sind alle Elternknoten  $B$ ,  $C$  und  $D$  voneinander abhängig. Dies wird mit bedingter Abhängigkeit bezeichnet.

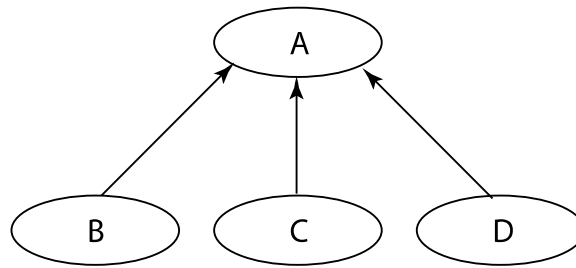


Abbildung 43: Konvergierendes Bayes'sches Netz.

Die Evidenz kann als harte Evidenz oder als weiche Evidenz in das Modell einfließen. Als harte Evidenz werden Informationen bezeichnet, die sicher sind, das heißt keine inhärenten Unsicherheiten haben. Weiche Evidenz bezeichnet den Fall, in der die Information unsicher ist. Eine d-Separation in seriellen oder divergierenden Netzwerken kann nur durch harte Evidenz erreicht werden. Abhängigkeiten in konvergierenden Netzwerken entstehen durch harte und weiche Evidenz in den gemeinsamen Kind Knoten.

### Wahrscheinlichkeiten in Bayes'schen Netzen und Inferenzberechnungen

Werden die Variablen in Bayes'schen Netzen durch diskrete Zustände beschrieben, können die Informationen über die Verteilungen mittels mehrdimensionaler Wahrscheinlichkeitstabellen beschrieben werden. Die Dimension  $\dim(Y)$  der bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen eines Knoten  $Y$  kann über Gleichung (1.53) bestimmt werden:

$$\dim(Y) = 1 + \sum_{i=1}^n X_i \quad (1.53)$$

Mit  $X_i$  sind die Elternknoten des Knotens  $Y$  bezeichnet. Für das divergierende Netz, das Abbildung 44 zeigt, besitzt der Knoten  $A$  nur eine Dimension, da er keine Elternknoten hat. Mit den beiden Elternknoten  $A$  und  $B$  besitzt die Wahrscheinlichkeitstabelle des Knotens  $C$  drei Dimensionen. Die Anzahl an Dimensionen steigt mit der Anzahl an Elternknoten. Wahrscheinlichkeitstabellen sind eine Möglichkeit, um diese Mehrdimensionalität darzustellen.

Jede Verteilungsfunktion der Variablen  $A$ ,  $B$  und  $C$  in Abbildung 44 sind durch zwei Zustände diskretisiert. In der Regel sind wesentlich mehr Zustände notwendig, um die Variablen sinnvoll zu repräsentieren. Da dadurch lediglich der Rechenaufwand zunimmt, wird hier zur Illustration nur mit zwei Zuständen gerechnet.

Ein besonderer Vorteil von Bayes'schen Netzen ist, dass bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen verwendet werden. Dies ermöglicht es, Experten eine *a priori* Verteilung für die Knoten anzugeben und Modellrechnungen auf ihre Plausibilität zu prüfen. Durch die bedingten Tabellen wird ein Grad an Überschaubarkeit (auch bei mehrdimensionalen Tabellen) erreicht. Für das Netz in Abbildung 44 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Knoten  $A$  und  $B$  sowie die bedingte

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Wahrscheinlichkeitsverteilung des Knotens  $C$ ,  $P(C|A,B)$  im Netz zu quantifizieren. Die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Knoten im Netz kann allgemein berechnet zu:

$$P(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^n P(x_i | pa_i, S^h) \quad (1.54)$$

Da hier nur Fälle betrachtet werden, in denen die Struktur des Netzes bekannt ist, wird im Folgenden die Bedingung auf die Struktur des Netzes  $S^h$  vorausgesetzt. Mit  $pa_i$  sind die Elternknoten bezeichnet. Zur Vereinfachung wird sie in der Notation nicht mitgeführt.

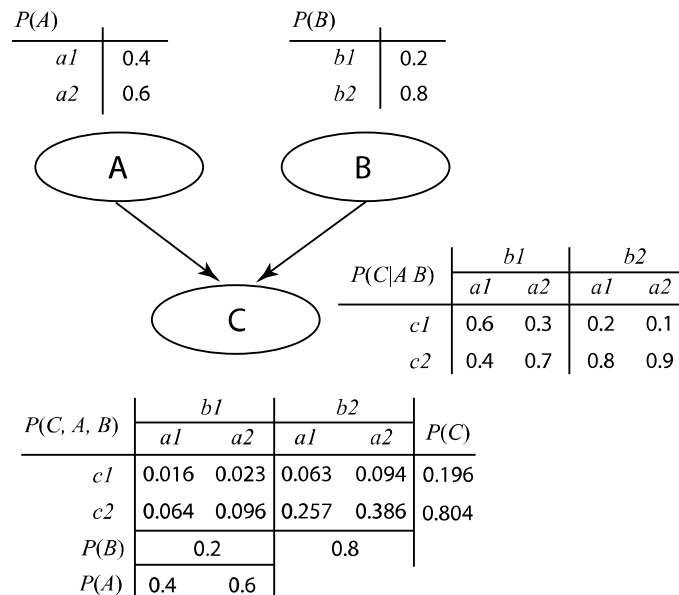


Abbildung 44: Konvergierendes Bayes'sches Netz mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeitstabellen.

In Gleichung (1.54) bezeichnet  $x_i$  die Zustände der einzelnen Knoten und  $pa_i$  die Elternknoten. Für die Netzstruktur in Abbildung 44 kann nach Gleichung (1.54) die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnet werden zu:

$$P(C, A, B) = P(C|A, B)P(A)P(B) \quad (1.55)$$

Die korrespondierende Wahrscheinlichkeitstafel ist in Abbildung 44 gegeben. Aus den Wahrscheinlichkeitstabellen lassen sich die Marginalverteilungen der einzelnen Knoten durch Integration bzw. Summation aller anderen Variablen berechnen. Für das Beispiel ergibt sich die Marginalverteilung für  $C$  nach:

$$P(C) = \sum_A \sum_B P(A, B, C) \quad (1.56)$$

Bei der Marginalisierung über mehreren Variablen spielt die Reihenfolge der Summation keine Rolle.

Die Inferenzberechnung in Bayes'schen Netzen dient der Propagation von Informationen durch das Netz. Die Inferenzberechnung nutzt dabei die Struktur, die Familienbeziehungen sowie die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen des Netzes, um mit effizienten Algorithmen diese Propa-

gation der Information im Netz zu berechnen. Für detaillierte Betrachtungen zu effizienten Algorithmen wird auf die oben angegebene Literatur verwiesen.

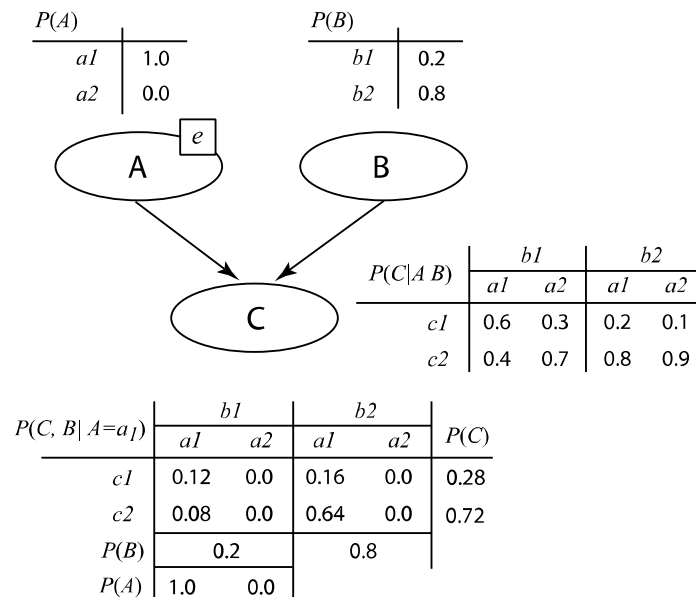


Abbildung 45: Konvergierendes Bayes'sches Netz mit Evidenz im Knoten A.

Hier wird die Inferenzberechnung nur an einfachen Beispielen gezeigt. Im ersten Beispiel ist der Zustand über die Variable  $A$  z. B. durch Beobachtungen sicher bekannt. Welchen Einfluss hat dies auf die anderen Variablen? Wie im zuvor für konvergierende Netze beschrieben, hat die Kenntnis über den Zustand der Variable  $A$  keinen Einfluss auf die Variable  $B$ . Beide sind unabhängig voneinander. Die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P(C, B | A = a_1)$  kann allgemein über Gleichung (1.57) berechnet werden.

$$P(\mathbf{X}_j | \boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{P(\boldsymbol{\varepsilon} | \mathbf{X}_j) P(\mathbf{X}_j)}{P(\boldsymbol{\varepsilon})} \tag{1.57}$$

In Gleichung (1.57) bezeichnet  $\boldsymbol{\varepsilon} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  ein Set von Evidenz über Variablen  $\mathbf{X}(\boldsymbol{\varepsilon})$  des Netzes. Mit  $\mathbf{X}_j$  sind alle Variablen bezeichnet, über die keine Beobachtungen vorliegen. Ziel ist es, die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser nicht beobachteten Variablen unter Berücksichtigung aller Beobachtungen zu berechnen. Das Ergebnis der Berechnungen für das Beispiel ist in der Tabelle in Abbildung 44 gegeben.

Liegt Evidenz in einem Kinder-Knoten eines konvergierenden Netzes über Knoten vor, so werden die Elternknoten bedingt abhängig voneinander. Zur Verdeutlichung ist dieser Fall in Abbildung 46 dargestellt. Es wird Evidenz über den Zustand des Knotens  $C = c_2$  eingeführt. Dadurch verändern sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Elternknoten nach Gleichung (1.57). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für Knoten  $A$  berechnet sich zu:

$$P(A = a_1 | C = c_2) = \frac{\sum_{i=1}^2 P(C = c_2 | A = a_1, B = b_i) P(B = b_i)}{\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 P(C = c_2 | A = a_j, B = b_i) P(B = b_i)} \tag{1.58}$$

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Das Ergebnis für die Knoten kann der Abbildung 46 entnommen werden.

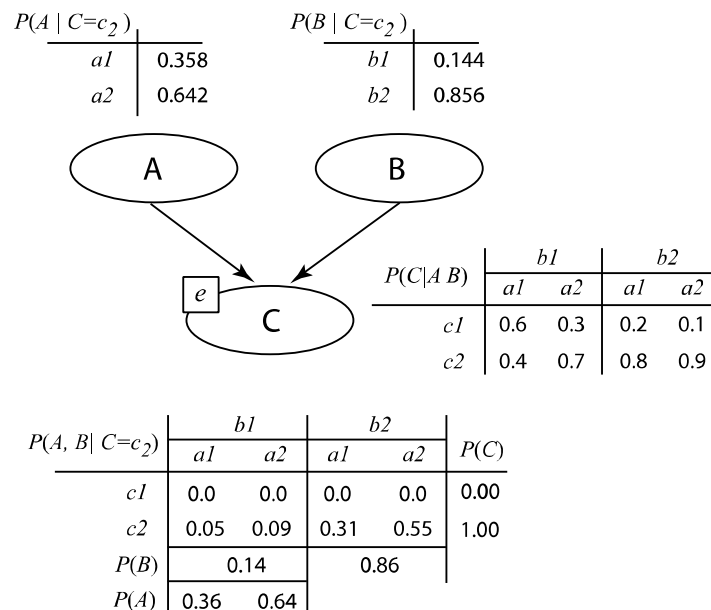


Abbildung 46: Konvergierendes Bayes'sches Netz mit Evidenz im Knoten C.

## Modellierung des Versagensereignisses der Galerie unter Verwendung Bayes'scher Netze

Das Bayes'sche Netz zur Berechnung der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit einer Steinschlaggalerie ist in Abbildung 11 dargestellt. Eine Zusammenstellung der Knoten, der zugehörigen Kategorie, der Grösse der bedingten Wahrscheinlichkeitstafeln (CPT) und eine Liste der Zustände der Knoten ist in Tabelle 22 gegeben.

Die Knoten *Annual maximum detached rock mass [kg]*, *Impact velocity of the detached mass [m/s]*, *Year of construction [a]*, *Thickness of the concrete ceiling* und *Thickness of the cushion layer [m]* haben einen direkten Einfluss auf das Versagensereignis der Galerie, welches durch den Knoten *Failure of the gallery given impact* repräsentiert wird.

Der Knoten *Annual maximum detached rock mass [kg]* enthält die Verteilung des jährlichen Maximums abgelösten Steinvolumens. Diese wird bereits im Expositionsmodell unter Verwendung der Eingabe des Anwenders und der Gleichung (1.42) in Kapitel 3.4 berechnet. Der Knoten ist in 103 Zustände diskretisiert und deckt den Bereich von  $0.1 \text{ m}^3 - 50 \text{ m}^3$  ab. Die Dichte des Gesteins wird mit  $2700 \text{ kg/m}^3$  modelliert.

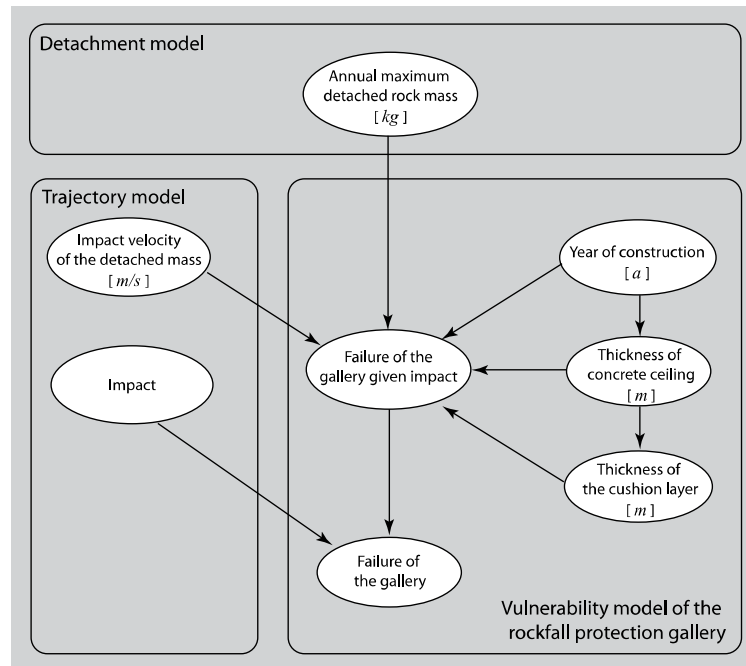


Abbildung 47: Bayes'sches Netz zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der Steinschlaggalerie.

Der Knoten *Impact velocity of the detached mass [m/s]* enthält die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einschlaggeschwindigkeiten der Steine auf die Galerie. Diese Verteilung wird über das Trajektorienmodell berechnet. Die Berechnung dieser Verteilung unter Verwendung des generischen Hangmodells ist in Kapitel 3.5.2 dargestellt. Durch das verwendete Trajektorienmodell (RocFall (2008)), das die Steine als Punktmassen modelliert, ist die Geschwindigkeit der Steine unabhängig von ihrer Masse. Daher gibt es im Bayes'schen Netz keine Verbindung zwischen dem Knoten *Annual maximum detached rock mass [kg]* und dem Knoten *Impact velocity of the detached mass [m/s]*.

Der Knoten *Year of construction [a]* enthält die *a-priori* Wahrscheinlichkeitsverteilung der Baujahre der Galerien in der Schweiz. Diese ist in Kapitel 3.2 gegeben. Kennt der Anwender das Baujahr der Galerie, so kann er dieses in der Systemdefinition angeben. Im Netz wird in der Analyse in diesem Fall auf die in diesen Jahren gültige Norm Evidenz gesetzt, was zufolge hat, dass die *a-priori* Wahrscheinlichkeitsverteilung der Baujahre in der Analyse nicht verwendet wird.

Im Knoten *Thickness of the concrete ceiling* ist die *a-priori* Wahrscheinlichkeitsverteilung der Dicken der Betondecken der Galerien in der Schweiz enthalten. Sie ist in Tabelle 6 (Kapitel 3.2) gegeben, wird aber nur verwendet, wenn keine Informationen über die tatsächliche Dicke der Betondecke vorliegt. Dieser Knoten hat einen direkten kausalen Zusammenhang zu dem Knoten *Thickness of the cushion layer [m]*: je dicker die Betondecke ist, desto höher ist auch die Eindeckung auf dem Galeriedach.

Dieser Knoten repräsentiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Dicke der Eindeckung. Die bedingte *a-priori* Verteilung der Eindeckung ist in Tabelle 7 gegeben. Auch diese wird nur verwendet, wenn keine Informationen über die Höhe der Eindeckung vorliegen.

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Tabelle 22: Definition der Knoten und der Zustände im Bayes'schen Netz

Kategorie	Knoten	Grösse CPT	Zustände
Detachment model	Annual maximum detached rock mass [kg]	103×1	270, 735, 1250, 1350, ..., 9950, 12500, 17500, ..., 37500, 45000, 55000, ..., 95000, 117500
Trajectory model	Impact velocity of the detached mass [m/s]	23×1	1, 3, ..., 45
	Impact [-]	2×1	Impact / No impact
Vulnerability model of the rockfall protection gallery	Year of construction [a]	5×1	1956, 1968, 1989, 1993, 2003
	Thickness of the concrete ceiling [m]	8×1	0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 1.00
	Thickness of the cushion layer [m]	7×1	0.40, 0.55, 0.70, 0.85, 1.00, 1.15, 1.30
	Failure of the gallery given impact	2×663.320	Failure / Survival
	Failure of the gallery	2×2	Failure / Survival

Der Knoten *Failure of the gallery given impact* enthält die Versagenswahrscheinlichkeit der Steinschlagalerie bedingt auf alle zuvor genannten Knoten. Es werden alle möglichen Kombinationen der Zustände der anderen Knoten berücksichtigt. Die bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle (CPT) hat dadurch die Grösse von 2×663.320. Wie diese so genannten Verletzbarkeitskurven, die der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit entsprechen, berechnet werden, ist in Kapitel 3.6 erläutert.

Der Knoten *Failure of the gallery given impact* ist auch darauf bedingt, dass ein Stein die Galerie erreicht. Im Fallprozess erreichen aufgrund der Charakteristik der Topographie und der Geologie nicht zwangsweise alle Steine die Galerie. Einige bleiben auf ihrem Weg liegen. Damit ist die Häufigkeit von Steinschlagereignissen im Laufe des Fallwegs veränderlich. An der Ablösestelle entspricht die Überschreitungshäufigkeit genau  $H_v(v)$ .

Sei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stein mit dem Volumen  $v$  an der Stelle  $x$  einschlägt gleich  $P(\text{impact}(x), v)$ , so ergibt sich die Häufigkeit von Steinschlagereignissen an der Stelle  $x$  zu  $H_v(v) \cdot P(\text{impact}(x), v)$ . Unter Verwendung der Vereinfachung des Punktmassenansatzes im Trajektorienmodell, die verursacht, dass die Reichweite des Steins unabhängig von der Masse ist, ergibt sich die Häufigkeit an jeder Stelle  $x$  im Hang zu:

$$H_v(v, x) = H_v(v) \cdot P(\text{impact}(x)) \quad (1.59)$$

Diese Wahrscheinlichkeit  $P(\text{impact}(x))$  kann durch Simulation direkt aus dem Trajektorienmodell gewonnen werden. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses an jeder Stelle  $x$  des Hangs kann analog zu Gleichung (1.42) berechnet werden:

$$F_v(v, x) = 1 - \exp(-H_v(v) \cdot P(\text{impact}(x))) \quad (1.60)$$

Zur Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie tragen nur die Steine bei, die die Galerie erreichen. Die Approximation  $\exp(-z) \approx 1 - z$  für kleine  $1 \gg z \geq 0$  erlaubt es  $P(\text{impact})$  im Modell von der Überschreitungshäufigkeit zu trennen und im Netz mit einem separaten Knoten zu modellieren. Die Gültigkeit der Approximation kann mit der Software leicht überprüft werden, indem alle Häufigkeiten in der Eingabe des Anwenders mit  $P(\text{impact})$  aus dem Trajektorienmodell multipliziert werden und im Trajektorienmodell  $P(\text{impact}) = 1.0$  gesetzt wird.

Im Knoten *Failure of the gallery* wird schlussendlich die unbedingte jährliche Versagenswahrscheinlichkeit berechnet, die für die weitere Risikoberechnung benötigt wird.

### **3.8. Modellierung der Trefferwahrscheinlichkeiten von Fahrzeugen**

Während Bauwerke eine Präsenzwahrscheinlichkeit von 1 haben, sind Personen im Strassenverkehr nur zeitweise einer Gefahr ausgesetzt. Zur Ermittlung des Personenrisikos müssen die jeweiligen Präsenzwahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Dabei sind die Charakteristiken der Gefahren zu berücksichtigen. Im Falle von Lawinen sind grosse Abschnitte betroffen (Wilhelm (1999)) und mehr als ein Fahrzeug kann sich während eines Lawinenabgangs im Lawinenkegel befinden. Beim Steinschlag sind nur einzelne Fahrzeuge betroffen und die Länge des gefährdeten Abschnitts hat keinen Einfluss auf die Präsenzwahrscheinlichkeit.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Fahrzeug zum Zeitpunkt des Ereignisses im gefährdeten Bereich befindet, lässt sich über das Produkt der räumlichen und zeitlichen Präsenzwahrscheinlichkeit bestimmen. Diese Präsenzwahrscheinlichkeiten (eigentlich *Präsenzhäufigkeiten*) können z. B. nach Bunce et al. (1997) berechnet werden.

Es ist sinnvoll, dass direkte und indirekte Trefferwahrscheinlichkeit unterschieden werden.

Bei einem direkten Treffer ist ein Fahrzeug direkt vom Ereignis betroffen. Die indirekte Trefferwahrscheinlichkeit berücksichtigt, dass ein Fahrzeug vor einem Ereignis nicht mehr zum stehen kommt und verunfallt. Das kann nur passieren, wenn das Ereignis innerhalb des Anhalteweges des Fahrzeuges eintritt.

Die folgende Chronologie der Ereignisse auf der Gotthardroute zeigt einige Beispiele für direkte und indirekte Trefferereignisse nach Steinschlagereignissen (entnommen aus: Reber (2009)).

- 16. Dezember 2002: Zwischen Amsteg und Wassen werden bei einem Steinschlag auf der Gotthardautobahn drei Autos beschädigt. Die Insassen kommen mit dem Schrecken davon. Die Autobahn bleibt während zehn Stunden gesperrt.
- 29. April 2003: Ein Felsbrocken durchschlägt zwischen Gurtzellen und Wassen eine Lawingalerie der Gotthardautobahn. Verletzt wird niemand.
- 21. März 2005: Zwei je fünf Kubikmeter grosse Felsbrocken durchschlagen bei Gurtzellen die Schutznetze und stürzen auf die Gotthardautobahn. Zwei Autofahrer bleiben trotz Kollision mit den Hindernissen unverletzt.
- 31. Mai 2006: Ein 64-jähriger Mann und seine 60-jährige Ehefrau aus der Region Pforzheim sterben, als um 06.45 Uhr bei Gurtzellen südlich der Gütli-Galerie ein Felssturz auf die Gotthardautobahn niedergeht. Ihr Auto wird von einem Felsblock getroffen und geht in Flammen auf. Die Räumung der bis zu 125 Tonnen schweren Blöcke ist schwierig. Die Gotthardautobahn bleibt einen Monat gesperrt. Der labile Felskopf wird gesprengt.
- 8. Februar 2008: Zwei Felsbrocken von je rund einem Kubikmeter Grösse stürzen zwischen Amsteg und Gurtzellen bei Meitschligen auf die Autobahn und die Kantonsstrasse. Vier Autos fahren auf das Gestein auf; die Insassen bleiben unverletzt.

Die Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Treffern ist notwendig, da die Todesfallwahrscheinlichkeit in beiden Fällen unterschiedlich ist. Eine Vernachlässigung der indirekten Präsenzwahrscheinlichkeit führt zu einer Unterschätzung des Risikos.

Die folgenden Berechnungen der Todesfallwahrscheinlichkeiten sind bedingt auf das Versagensereignis der Galerie. Die Grösse des Ereignisses, die zum Versagen geführt hat, muss dabei nicht berücksichtigt werden, da Steine, die die Galerie durchschlagen, eine Grösse haben, die bei einem direkten Treffer sicher zum Tode der Fahrzeuginsassen führen. Die Masse des Steins und den Teilen der Galerie, die durch das Ereignis auf der Strasse zu liegen kommen, ist zudem gross im Vergleich zur Masse des Fahrzeugs. Beides rechtfertigt die unabhängige Betrachtung der Todesfallwahrscheinlichkeit von der Masse des Steins. Diese Bedingungen gelten nicht, wenn freie Streckenteile beurteilt werden.

### Todesfallwahrscheinlichkeit infolge direkter Treffer

Zunächst wird die Annahme getroffen, dass der Verkehr gleichverteilt in Raum und Zeit ist. Eine Zeitabhängigkeit des Verkehrs wird nicht berücksichtigt. Die räumliche Präsenzwahrscheinlichkeit eines Fahrzeugs im fließenden Verkehr  $p_{p,f}$  berechnet sich zu:

$$p_{p,f} = \left( 1 - \frac{H_{Stau} [h]}{8760 [h/a]} \right) \cdot \min \left( \frac{DTV [Fzg/d] \cdot L_c [m]}{24 [h/d] \cdot 1000 [m/km] \cdot V_{drive} [km/h]}, 1 \right) \quad (1.61)$$

Dabei ist  $DTV$  der Durchschnittliche Tägliche Verkehr in  $Fzg/d$ ,  $L_c [m]$  die Fahrzeuglänge,  $V_{drive} [km/h]$  die Fahrgeschwindigkeit und  $H_{Stau} [h]$  die Anzahl Stautunden im Jahr. Die Verkehrscharakteristiken und die Verteilungen sind in Kapitel 1.2.3 zusammengestellt. Die Fahrzeuglänge für PKW beträgt im Mittel nach den Untersuchungen von Hoffmann und Nielsen (1994)  $4.5 m$ . Berücksichtigt man auch die anderen Fahrzeugklassen, so ergibt sich die mittlere Länge zu  $5.5 m$ . Der Variationskoeffizient der Fahrzeuglänge kann mit  $0.09$  angenommen werden und eine Lognormalverteilung zugrunde gelegt werden.

Im Stau ergibt sich die direkte Trefferwahrscheinlichkeit zu:

$$p_{p,c} = \left( \frac{H_{Stau}}{8760} \right) \cdot \left( \frac{L_c [m]}{L_c [m] + L_D [m]} \right) \quad (1.62)$$

Wobei  $L_D$  den Abstand zum nächsten Fahrzeug im Stau beschreibt. Der Abstand kann durch eine lognormalverteilte Zufallsvariable beschrieben werden und beträgt im Mittel  $2.5$  mit einem Variationskoeffizient von  $0.05$ . Die Todesfallwahrscheinlichkeit  $p_{d,d}$  bei einem direkten Treffer beträgt  $1$ . Der Besetzungsgrad der Fahrzeuge ist mit  $\beta = 1.5$  deterministisch angenommen.

### Todesfallwahrscheinlichkeit infolge indirekter Treffer

Analog zur Gleichung (1.61) kann die indirekte Trefferwahrscheinlichkeit berechnet werden zu:

$$p_{p.ind} = \left( 1 - \frac{H_{Stau} [h]}{8760 [h/a]} \right) \cdot \min \left( \frac{DTV [Fzg/d] S_H [m]}{24[h/d] 1000[m/km] V_{drive} [km/h]}, 1 \right) \quad (1.63)$$

Wobei  $S_H$  dem Anhalteweg des Fahrzeugs entspricht, der als Summe der zurückgelegten Strecke während der Reaktionszeit und dem Bremsweg definiert ist. Er berechnet sich zu:

$$S_H [m] = V_{drive} T \frac{1}{3.6} [m] + \frac{V_{drive}^2}{25.92 \cdot a} [m] \quad (1.64)$$

Hierin bezeichnet  $a$  die Bremsbeschleunigung des Fahrzeugs,  $V_{drive}$  die Fahrgeschwindigkeit und  $T$  die Reaktionszeit, bis der Bremsvorgang eingeleitet wird. Da die Reaktionszeiten in der Realität zwischen 0.3 und 4 Sekunden liegen, wird hier die Reaktionszeit als lognormalverteilte Zufallsvariable mit einem Mittelwert von 1.25 und einem Variationskoeffizient von 0.28 modelliert. Damit fallen 99% aller Reaktionszeiten in das Intervall zwischen 0.3 und 4 Sekunden. Die untere Grenze der Reaktionszeiten wird in Fällen erreicht, in denen der Verkehrsteilnehmer bereits vor einer Gefahr gewarnt ist (z. B. Kinder am Strassenrand). Der obere Bereich der Reaktionszeit tritt in Fällen auf, in denen der Fahrer abgelenkt ist (z. B. durch Telefonate). Die Bremsbeschleunigung  $a$  wird als konstant mit  $7.5 [m/s^2]$  angenommen.

In Tabelle 23 sind die Variablen, die für die Berechnung der Trefferwahrscheinlichkeit und der Todesfallwahrscheinlichkeit benötigt werden, zusammengestellt.

Tabelle 23: Zusammenstellung der Variablen zur Berechnung der Todesfallwahrscheinlichkeit bei indirekten Steinschlagtreffern.

Variable	Beschreibung	Einheit	Verteilung	Parameter
$T$	Reaktionszeit	[s]	Lognormal	$\mu_T = 1.25$ $\sigma_T = 0.35$
$H_{Stau}$	Stautunden	[h]	Lognormal	Eingabe durch Anwender
$DTV$	Durchschnittlicher täglicher Verkehr	[Fzg / d]	Lognormal	Eingabe durch Anwender
$v_{sig}$	Signalisierte Geschwindigkeit	[km / h]	Konstant	Eingabe durch Anwender
$V_{drive}$	Fahrgeschwindigkeit	[km / h]	Normal	$\mu_{V_{drive}} = 0.96 v_{sig}$ $\sigma_{V_{drive}} = 0.106 v_{sig}$
$a$	Bremsbeschleunigung	[m / s <sup>2</sup> ]	Konstant	7.5
$S_H$	Anhalteweg	[m]	Nach Gleichung (1.64)	Abhängig von der Eingabe des Anwenders
$W$	Abstand zwischen Fahrzeug und Einschlagort des Steines	[m]	Gleichverteilt	$\mu_W = 0.5 S_H$ $\sigma_W = S_H 12^{(-0.5)}$
$V_{car}$	Restgeschwindigkeit des Fahrzeugs beim Anprall	[km / h]	Nach Gleichung (1.65)	Abhängig von der Eingabe des Anwenders

Die Todesfallwahrscheinlichkeit bei einem indirekten Treffer ist abhängig von der Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeugs beim Aufprall auf den Stein. Da die Masse des Steins viel grösser ist als die Masse des Fahrzeugs, ergibt sich die Geschwindigkeitsreduktion direkt aus der Restgeschwindigkeit des Fahrzeugs beim Anprall auf das Ereignis. Diese kann unter Berücksichtigung der Reaktionszeit und des Anhaltewegs berechnet werden zu:

$$V_{car} = \begin{cases} V_{drive} & W \leq T \cdot V_{drive} \\ V_{drive} - 3.6 \cdot \sqrt{\left( W - T \cdot V_{drive} \frac{1}{3.6} \right) \cdot 2 \cdot a} & T \cdot V_{drive} < W \leq S_H \end{cases} \quad (1.65)$$

$W[m]$  bezeichnet den Abstand zwischen dem Fahrzeug und dem Einschlagort des Steines. An welcher Stelle der Stein innerhalb des Anhaltewegs des Fahrzeugs die Strasse trifft, ist gleichverteilt im Bereich  $0 \leq W \leq S_H$ . Der Parameter  $S_H$  der Gleichverteilung ist eine Zufallsvariable, die sich aus Gleichung (1.64) berechnet.

Leitet der Fahrzeugführer den Bremsvorgang ein, so hat das Fahrzeug zum Zeitpunkt des Anpralls noch eine Restgeschwindigkeit  $V_{car}$ . Im Fall des indirekten Treffers ist die Todesfallwahrscheinlichkeit eine Funktion der Restgeschwindigkeit.

Die Verteilungsfunktion  $F_{V_{car}}(v_{car})$  der Zufallsvariable  $V_{car}$  für eine Fahrgeschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$  ist in Abbildung 48 dargestellt. Gleichung (1.65) führt dazu, dass die Dichtefunktion der Zufallsvariable  $V_{car}$  bimodal ist.

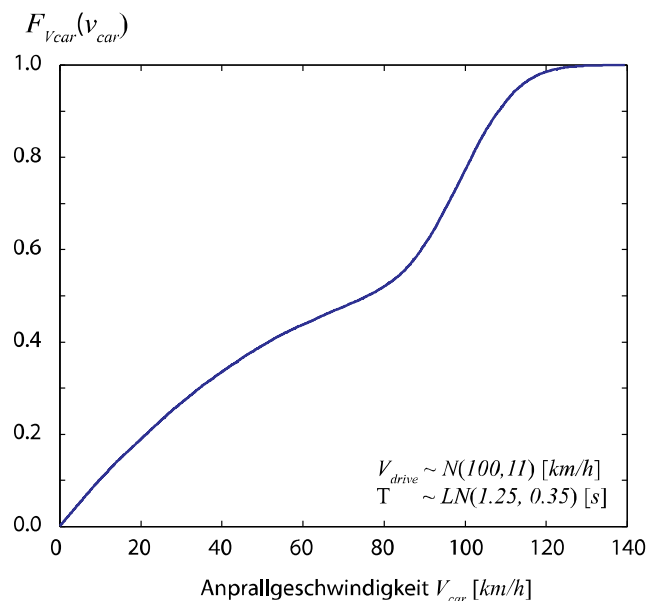


Abbildung 48: Verteilungsfunktion der Anprallgeschwindigkeit für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$ .

Evans (1994) modelliert die Todesfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Restgeschwindigkeit eines Fahrzeugs beim Anprall unter Verwendung eines empirischen Potenzgesetzes, welches er an Unfalldaten des National-Automotive-Sampling-Service (NASS<sup>1</sup>) der USA anpasst. Da die Daten des NASS nicht auf SI-Einheiten basieren, wurden die Parameter des Potenzgesetzes im

<sup>1</sup> <http://www-nass.nhtsa.dot.gov/NASS/CDS/Annrpts/AnnRpts.html>

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

Rahmen dieses Projektes neu bestimmt. Die Todesfallwahrscheinlichkeit  $p_D$  berechnet sich nach der folgenden empirischen Gleichung:

$$p_D = \min\left(e^{\lambda \ln(V_{car}) + \kappa}, 1\right) \quad (1.66)$$

Die Parameter  $\lambda$  und  $\kappa$  sind Regressionsparameter und können als normalverteilte Zufallsvariablen betrachtet werden. Die Parameterschätzung aus den Daten liefert die Mittelwerte und die Kovarianzmatrix der Parameter:

$$\begin{aligned} \mu_\lambda &= 4.520 \\ \mu_\kappa &= -21.36 \end{aligned} \quad (1.67)$$

Die Schätzung der Kovarianzmatrix erfolgt über die Fisher-Informations-Matrix (vgl. Kapitel 3.4) und ergibt sich zu:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1.971 & -8.06 \\ -8.06 & 33.52 \end{bmatrix} \quad (1.68)$$

Abbildung 49 zeigt die Anpassung der Gleichung (1.66) an die Daten. Die Unsicherheiten in der Anpassung sind aufgrund der geringen Datenmenge relativ gross. Durch die Kenntnis der Unsicherheiten in den Parametern kann über Integration die prädiktive Todesfallwahrscheinlichkeit berechnet werden.

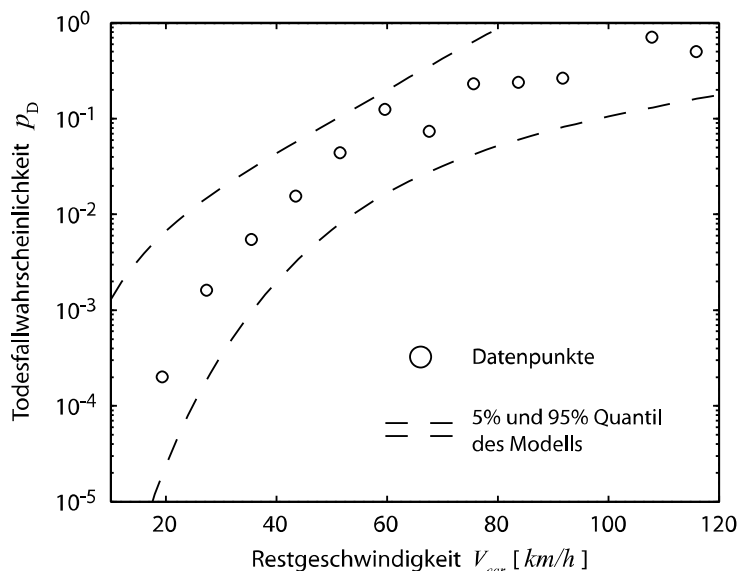


Abbildung 49: Bedingte Todesfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsreduktion durch den Anprall.

### **3.9. Modellierung der Konsequenzen**

Es werden verschiedene Typen von Konsequenzen unterschieden. Eine allgemeine Kategorisierung der Konsequenzen wurde in Schubert und Faber (2008a) vorgenommen. Es werden die folgenden frei kombinierbaren Typen von Konsequenzen unterschieden:

- direkte und indirekte
- interne und externe
- materiell und immateriell

Konsequenzen repräsentieren Güter und können daher materiell und immateriell sein. Materielle Konsequenzen entsprechen handelbaren Gütern. Der Wert von frei handelbaren Gütern kann direkt am Markt bestimmt werden. Sachschäden an der Galerie, an der Strasse und an Fahrzeugen können direkt in monetären Einheiten angegeben werden. Immaterielle Konsequenzen sind alle Güter, die nicht am freien Markt gehandelt werden. Zu ihnen zählen beispielsweise die Todesfälle infolge eines Steinschlagereignisses.

Die Konsequenzen des Todesfalls sind den externen Konsequenzen zuzuordnen, d. h. diese Konsequenzen sind nicht vom Entscheidungsträger zu tragen. Alle externen Konsequenzen werden von Dritten getragen. Zu ihnen zählen auch die Benutzerkosten der Strassenverkehrsteilnehmer.

Todesfälle können auch interne Konsequenzen verursachen. Als interne Konsequenzen werden alle Konsequenzen bezeichnet, die der Entscheidungsträger selbst zu tragen hat. Kompensationskosten, die infolge von Todesfällen an die Hinterbliebenen zu zahlen sind, sind interne Konsequenzen. Kompensationskosten sind materielle, interne Konsequenzen.

Eine weitere Unterscheidung ergibt sich durch die direkten und die indirekten Konsequenzen. Direkte Konsequenzen sind Schäden, die direkt durch das Ereignis ausgelöst werden. Indirekte Konsequenzen, die über diese direkten Schäden hinausgehen werden als indirekt bezeichnet. Diese häufig auch als Folgekonsequenzen bezeichneten Konsequenzen können wesentlich grösser sein als die direkten Konsequenzen.

Aus allen diesen Kategorien von Konsequenzen ergeben sich die verschiedenen Typen von Risiken. Die Höhe des indirekten Risikos kann dabei als Mass dafür gesehen werden, wie das System auf Störungen reagiert. Ein robustes System ist insensitiv gegenüber Störungen. Dementsprechend sind die indirekten Risiken gering im Vergleich zu den direkten Risiken. Aus dieser Überlegung lässt sich ein Mass der Robustheit von Systemen entwickeln (siehe auch Baker et al. (2008)). Die Unterscheidung dieser Komponenten des Risikos ermöglicht es dem Anwender, direkt Robustheitsbetrachtungen an der Galerie durchzuführen.

Es sollte bei der Entscheidungsfindung genau spezifiziert werden, wer der Entscheidungsträger ist und welche Konsequenzen dieser zu tragen bzw. zu verantworten hat (vgl. auch Kapitel 1.2). Gerade die externen Konsequenzen, die zum externen Risiko führen, sind in der Entscheidungsfindung kritisch zu betrachten. Sie werden häufig dazu verwendet, um Entscheidungen zu rechtfertigen. Es sollte dabei bedacht werden, dass der private Verkehrsteilnehmer die Wahl des Ver-

### 3. Teil III / Hintergrundinformationen zur Modellierung

kehrsmittels nach seinen Präferenzen trifft und die totalen Kosten des Verkehrsmittels mit in seine Entscheidungsfindung einbezieht. Die Sachschäden und Personenschäden durch etwaige Unfälle, die durch den Verkehrsteilnehmer entstehen können, sind infolge eines Risikotransfers ebenfalls durch den Verkehrsteilnehmer gedeckt. Die Versicherung übernimmt für ihn, je nach Deckungsgrad, diese Kosten. In den totalen Kosten berücksichtigt das Individuum auch, dass z. B. die Mieten ausserhalb der Stadt geringer sind als direkt in der Stadt. Ein Individuum entscheidet sich für eine Stadtrandlage, wenn es dies präferiert. Diese Präferenz schliesst alle Vorteile der Stadtrandlage ein: günstigere Mieten, weniger Lärm, bessere Luft etc. Die Kosten, die ihm durch einen Stau entstehen, sind ebenfalls bereits berücksichtigt und kompensiert. Die ihm entstehenden Staukosten eines Ereignisses sollten daher auch nicht in der Entscheidungsfindung der Strassenverwaltungen berücksichtigt werden. Zudem ist der Verkehrsteilnehmer nicht nur „Geschädigter“ in einem Stau. Er ist vor allem auch Verursacher. Dies bedeutet, dass ihm Kosten entstehen, die durch andere Verkehrsteilnehmer verursacht werden. Er selbst verursacht jedoch seinerseits auch wiederum Kosten bei anderen Verkehrsteilnehmern (Nash und Sansom (1999)).

Die Höhe der Konsequenzen können vom Anwender direkt spezifiziert werden. Ein Hinweis auf die Höhe der Konsequenzen kann Tabelle 1 entnommen werden. Die Konsequenzen können stark von dem abweichen, was in dieser Tabelle vorgeschlagen ist, und sie können sich über die Zeit verändern. Fallweise sollte geprüft und begründet werden, auf welcher Basis die Konsequenzen festgelegt worden sind.

Um die Sperrdauer nach einem Ereignis zu modellieren, bestehen zurzeit noch keine Grundlagen. Beispiele von Ereignissen zeigen, dass eine Sperrdauer von vier Wochen nach einem Ereignis im vernünftigen Bereich liegt (vgl. Tabelle 24). Es wird vorgeschlagen, mit einer mittleren Sperrdauer von 23 Tagen und einer Standardabweichung von 15 Tagen zu rechnen.

*Tabelle 24: Ereignisbeispiele mit Streckenausfall (aus: Fermaud et al. (2008)).*

Ort und Jahr	Ereignis	Sperrdauer
Brünigstrasse A8 bei Giswil, 1986	Bergsturz	Passtrasse ist 3 Wochen gesperrt. Danach wird eine Notstrasse in Betrieb genommen.
Chüebalmtunnel, A8 bei Iseltwald, 2003	Felssturz	Strasse ist 6 Wochen gesperrt.
Galerie de la Monnaie, Passstrasse Grosser St. Bernhard, 2003	Felssturz	Die Bergspur der zweispurigen Strasse ist während 2 Wochen gesperrt.
Gotthardstrasse, A2 bei Gurtellen, 2006	Felssturz	Strasse ist rund 4 Wochen gesperrt.
Gotthardstrasse, A2 bei Meitschligen, 2009	Steinschlag	Strasse ist rund 3 Tage gesperrt.

Die Festlegung der Umfahrungslänge und der Umfahrgeschwindigkeit, gegeben eine Strasse muss gesperrt werden, kann über das Nationale Personenverkehrsmodell NPVM (Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) (2006)) ermittelt werden.

Da dieses Modell nicht frei zugänglich ist und die Berechnungen relativ aufwendig sind, wird hier ein anderes Vorgehen zur Bestimmung der Umfahrungslänge und der Umfahrungszeit vorgeschlagen. Der Anwender des Programms kann zunächst die Quellen und die Ziele des Verkehrs auf der betroffenen Strasse identifizieren. Nach der Aufteilung und ungefähren Zuordnung der Verkehrsstärken kann eine normale Routenplanungssoftware dazu dienen, die Umfahrungslänge und die Umfahrdauer für die relevanten Quell- und Zielbeziehungen zu identifizieren. Die einzelnen Umfahrungszeiten und Wege können gemittelt werden. Im Programm können diese gemittelten Werte direkt in der Eingabemaske verwendet werden. Dieses Vorgehen gibt einen ersten Hinweis auf die zu erwartenden Benutzerkosten.

### **3.10. Risikoberechnungen**

Das Risiko ist definiert als Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit und Konsequenzen. Das Risiko ist damit der Erwartungswert der Konsequenzen. Die Quantifizierung des Erwartungswertes kann auf verschiedene Arten modelliert werden, je nachdem welche Informationen zur Verfügung stehen und in welchem Kontext die Risiken zu bewerten sind. Werden Risiken im Kontext einer Budgetierung bewertet, kann es notwendig sein, auch die statistische Verteilung der Risiken zu bestimmen. Da die benötigten Informationen aus einer Risikoanalyse von der Fragestellung abhängen, wird als Ergebnis sowohl der Erwartungswert als auch die Verteilung der Konsequenzen berechnet.

Die Risiken werden unter Verwendung von Monte-Carlo-Simulationen berechnet. Die Verteilung der Eintretenswahrscheinlichkeit des Versagens der Galerie wird unter Verwendung des Bayes'schen Netzes berechnet. Aus dieser Verteilung (siehe Kapitel 3.7) werden Zufallszahlen generiert.

Ebenso werden Realisationen aus den Verteilungen der Konsequenzen generiert. Durch Kombination der simulierten Versagenswahrscheinlichkeiten mit den Realisationen der Konsequenzen wird ein Satz von „Beobachtungen“ generiert, aus dem dann die Verteilung der ermittelt wird.

Zur Berechnung der Sachschäden an den Fahrzeugen und zur Berechnung der Todesfälle wird die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie, die direkte und die indirekte Trefferwahrscheinlichkeit der Fahrzeuge und die jeweiligen auftretenden Konsequenzen berücksichtigt (siehe Kapitel 3.8).

Für die Sachschäden an der Galerie, der Strasse, der Sperrdauer und den administrativen Kosten werden die Versagenswahrscheinlichkeiten und die jeweils auftretenden Konsequenzen berücksichtigt.

Die Ergebnisse werden sowohl separat als auch in aggregierter Form angegeben. Die Verteilung der Risiken erlauben es zudem, die Risiken auf übergeordneter Ebene zu aggregieren und für die Budgetplanung einzusetzen.



## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

### 4.1. Schlussfolgerungen

In diesem Projekt wurden zwei wesentliche Ziele erreicht:

- Es wurde ein Softwaretool entwickelt, mit dem effizient und konsistent Risikoberechnungen auf einer probabilistischen Basis durchgeführt werden können.
- Es wurde an einem ersten Beispiel gezeigt, wie generische probabilistische Modelle zukünftig auch für andere Sicherheitsbereiche entwickelt werden können und so die Entscheidungsträger in der Praxis unterstützen können.

Innerhalb eines solchen Projekts werden viele Ideen entwickelt und weitere Wege aufgezeigt, die gegangen werden sollten. Diese Ideen betreffen beide Ziele des Projekts. Im Kapitel 4.2 wird darauf genauer eingegangen. Die Software, die in diesem Projekt erstellt wurde, ist als beta Version zu verstehen. Dies bedeutet, dass sie der erste Schritt in eine neue Richtung ist. Alle Vereinfachungen, die aus verschiedenen Gründen in diesem Projekt getroffen wurden, geben Raum für weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die verwendete Methodik erlaubt es, als allgemeinen Rahmen Gültigkeit zu behalten, die Weiterentwicklungen zu berücksichtigen und zu implementieren. In diesem Sinne ist die Software generisch, erweiterbar und kann an die Bedürfnisse aus der Praxis angepasst werden, die durch ihre Verwendung entstehen werden.

Der generische Charakter der Software wurde teilweise mit Vereinfachungen erkauft. Für die generelle Anwendung der Methodik sind diese Vereinfachungen nicht unbedingt notwendig. So können detailliertere Analysen durchgeführt werden, die auf der gleichen Idee und den gleichen Grundsätzen basieren. Detailliertere Analysen sind aufwändig und kostenintensiv und daher nur in Einzelfällen angezeigt.

Einleitend wurde auf die Transparenz der Methodik hingewiesen. Eine Softwareanwendung kann dabei nur zu einem gewissen Grad transparent sein, da die Anwenderfreundlichkeit erfordert, dass die Berechnungen automatisiert und im Hintergrund ablaufen. Die Transparenz bezieht sich auf die Dokumentation und die Darstellung der Modelle. So kann der Anwender bei Bedarf alle Annahmen prüfen und hat die Möglichkeit, die Ergebnisse nachzurechnen und zu reproduzieren.

Das Projekt hat gezeigt, dass es machbar ist, praxisorientierte generische Modelle auf probabilistischer Basis zu erstellen. Ziel sollte es sein, zukünftig den hier vorgestellten Weg weiter zu verfolgen. Dazu gehört nicht nur die Erweiterung und Anpassung dieser Anwendung, sondern auch die Entwicklung weiterer Risikomodelle für andere Sicherheitsbereiche. Eine Verknüpfung mit einem Geografischen Informationssystem und anderen Datenbankformaten wäre zukünftig ein wesentlicher und richtungsweisender Schritt hin zu einem einheitlichen Risikomanagement und transparenten Informationsmanagement. Es besteht das Potential der Entwicklung eines einzigartigen softwarebasierten Risikomanagementsystems, welches die Bestrebungen des ASTRA und des Bundes in Bezug auf den Umgang mit Risiken unterstützt.

#### 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Zunächst werden die programmspezifischen Weiterentwicklungsmöglichkeiten diskutiert und aufgezeigt.

Ein entscheidender Punkt ist, dass generell in allen Risikomodellen fortlaufend geprüft wird, ob die Modelle, die verwendet werden, der aktuellen Forschung entsprechen. Gibt es bessere Modelle, so sollten diese ausgetauscht werden. Der modulare Aufbau im Programm lässt diesen Austausch prinzipiell zu.

Das Expositionsmodell basiert zurzeit auf einem Potenzgesetz. Das Potenzgesetz wird insbesondere im Bereich von Naturgefahren vielfach verwendet und kann die Überschreitungshäufigkeit von Ereignissen gut modellieren. Es kann jedoch Fälle und Charakteristiken geben, in denen das Potenzgesetz die Realität nicht in einer ausreichenden Masse beschreiben kann. Es wäre möglich, das Programm dahingehend zu erweitern, dass der Anwender wählen kann, ob er das vorgeschlagene Potenzgesetz verwendet oder ob er das jährliche maximale Ablösevolumen mit einem anderen Modell beschreibt und die Ergebnisse seiner Modellierung im Programm verwendet.

#### **4.2. Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der probabilistischen Risikomodellierung und damit der Entscheidungsunterstützung ist vielfältig. Nahezu alle Bereiche der Strassenverwaltungen könnten derzeit von risikobasierten Entscheidungshilfen profitieren, die leicht anzuwenden sind und vergleichbare Ergebnisse liefern. Die Art von Modellen, wie sie in diesem Projekt entwickelt worden sind, könnte auch für andere Sicherheitsbereiche, wie beispielsweise Tunnel, freie Strecken (z.B. auch Verkehrssicherheit) und weitere Schutzbauten für verschiedene Naturgefahren einen Mehrwert für die Strassenverwaltungen bringen. Sukzessive würde sich ein konsistentes Risikockockpit für den Bereich der Strassenverwaltungen entwickeln, das für die verschiedensten Entscheidungssituationen als Grundlage und Analysetool zur Verfügung stehen könnte.

Bisher kann das Risiko an Steinschlaggalerien berechnet werden. Mit einigen Anpassungen könnte das Modell auch für freie Strecken eingesetzt werden. Dies könnte die Entscheidungsfindung in Bezug auf die Wahl und Planung von Schutzbauten stark unterstützen und wird als äusserst relevante Weiterentwicklung gesehen.

Dies schlägt die Brücke zu Entwicklungen in andere Bereiche. Neben den Galerien existieren auch weitere Schutzbauten wie z. B. Schutznetze. Da dort bereits Bemessungsmodelle existieren, könnten für diese Verletzbarkeitskurven entwickelt werden, die wiederum direkt in das hier entwickelte Programm integriert werden könnten.

Eine weitere Erweiterung wäre eine Verknüpfung des Programms mit Geographischen Informationssystemen (GIS). Dies würde es ermöglichen, die Ergebnisse auf einer höheren Ebene direkt vergleichen zu können und so genannte *hot-spots* zu erkennen. Dies wäre insbesondere dann sinnvoll, wenn das Programm auch für ungeschützte Strecken anwendbar gemacht würde. Dazu müsste das Expositionsmodell gegebenenfalls angepasst werden.

Die erste Version des Programms basiert auf einer Microsoft-Excel-Umgebung und ist in VBA programmiert. Dies hat den Vorteil, dass excel interne Funktionen genutzt werden können. Eine Weiterentwicklung und Umsetzung des Programms in einer unabhängigen Umgebung (z. B. VB.Net) wäre jedoch prinzipiell von Vorteil, da das Programm damit unabhängig von Softwareanpassungen von Microsoft wäre.

Neben diesen Weiterentwicklungen auf höhere Ebene gibt es auch Bedarf an Weiterentwicklungen in der bestehenden Software. So sollte die Möglichkeit geschaffen werden, die Exposition allgemeiner zu beschreiben, so dass die Annahme eines Potenzgesetzes nicht zwingend notwendig ist. Eine einfache Möglichkeit wäre, eine Eingabemöglichkeit für die Extremwertverteilung der Ablösevolumen vom Anwender direkt einzugeben. Dies könnte analog zur Eingabe von Ergebnissen extern durchgeführter Trajektorienanalysen geschehen.

Eine Aktualisierung der Expertenschätzung unter Berücksichtigung von Daten (Kataster) wäre ebenfalls eine sinnvolle Erweiterung der Software.

Auf der Ebene des Widerstands der Galerie sollten mehr Indikatoren für die Galerie berücksichtigt werden, um das spezifische Tragverhalten der Galerie besser beschreiben zu können. Ebenfalls sollten weitere Typen von Galerien (wie z.B. leichte Steinschlaggalerien und Galerien mit gewölbten Decken) ausgewählt werden können.

Die meisten der hier genannten Punkte erfordern wenig Forschungsbedarf und könnten bei Bedarf kurzfristig umgesetzt werden.

### **4.3. Umsetzung in der Praxis**

Die Software ist so ausgelegt, dass sie in der Praxis für Beurteilungen von Galerien angewendet werden kann. Die Ergebnisse sind bedingt auf die getroffenen Annahmen in Bezug auf die Eingaben des Benutzers und der Annahmen im Programm zu verstehen.

Nachdem die notwendigen Informationen über das System zusammengetragen sind, lassen sich die Risikoanalysen für Galerien schnell durchführen. Das Werkzeug ermöglicht es, schnell einen Überblick über das Risiko infolge von Steinschlägen auf Steinschlaggalerien zu erhalten.

Die Anwendung der Software erfordert jedoch die sorgfältige Systembeschreibung und die sorgfältige Modellierung der Gefährdung. Die Experteneinschätzung über die Gefährdung ist ein wesentlicher Aspekt, der grosse Erfahrung und Expertise benötigt.

Für eine erste Überprüfung kann das Werkzeug mit der implementierten generischen Hangmodellierung stattfinden. Zeigt sich, dass das Risiko sehr hoch ist, sollten die Trajektorienanalysen spezifisch für die konkrete Situation durchgeführt werden und die Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die Praxis wird zeigen, inwieweit und in welchem Rahmen und in welche Richtung sich das Werkzeug weiterentwickeln wird.

## 5. Aramis Formular 3



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

### FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### ARAMIS SBT

#### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 16.04.2010

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2008/003

Projekttitel: Excel®-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien

Enddatum: 30.03.2010

#### Projektleiter

Name: Faber Vorname: Michael Havbro


Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Gruppe Risiko und Sicherheit

Strasse, Nr.: HIL E 22.2, IBK, Wolfgang Pauli Strasse 15

PLZ: 8093 Email: faber@ibk.baug.ethz.ch

Ort: Zürich Telefon: +41 44 633 31 17

Kanton, Land: Zürich, Schweiz Fax: +41 44 633 10 64

	Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK <b>Bundesamt für Strassen ASTRA</b>
<b>Texte:</b>		
Zusammenfassung der Projektresultate:	In diesem Projekt wurde ein generisches, Microsoft Excel®-basiertes Modell entwickelt, mit dem das Risiko unter Berücksichtigung der orts- und objektspezifischen Charakteristiken an Steinschlaggalerien berechnet werden kann. Als Ergebnis erhält der Anwender neben dem Erwartungswert auch die Verteilung des Risikos, sowohl getrennt für unterschiedliche Risiko-Beiträge, als auch in aggregierter Form.	
Zielerreichung:	<p>Die Projektziele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Ein Softwaretool zu entwickeln, mit dem effizient und konsistent Risikoberechnungen auf einer probabilistischen Basis durchgeführt werden kann.</i></li> <li>• <i>An einem ersten Beispiel zu zeigen, wie generische probabilistische Modelle zukünftig auch für andere Sicherheitsbereiche entwickelt werden können und so die Entscheidungsträger in der Praxis zu unterstützen.</i></li> </ul> <p>wurden erreicht.</p>	
Folgerungen und Empfehlungen:	<p>Die Art von Modellen, wie sie in diesem Projekt entwickelt worden sind, könnte auch für andere Sicherheitsbereiche, wie beispielsweise Tunnel, freie Strecken (z.B. auch Verkehrssicherheit) und weitere Schutzbauten für verschiedene Naturgefahren einen Mehrwert für die Strassenverwaltungen bringen. Sukzessive würde sich ein konsistentes Risikockpit für den Bereich der Strassenverwaltungen entwickeln, das für die verschiedensten Entscheidungssituationen als Grundlage und Analysetool zur Verfügung stehen könnte.</p> <p>Bisher kann das Risiko an Steinschlaggalerien berechnet werden. Mit einigen Anpassungen könnte das Modell auch für freie Strecken eingesetzt werden.</p> <p>Neben den Galerien existieren auch weitere Schutzbauten wie z. B. Schutznetze. Da dort bereits Bemessungsmodelle existieren, könnten für diese Verletzbarkeitskurven entwickelt werden, die wiederum direkt in das hier entwickelte Programm integriert werden könnten.</p> <p>Eine weitere Erweiterung wäre eine Verknüpfung des Programms mit Geographischen Informationssystemen (GIS). Dies würde es ermöglichen, die Ergebnisse auf einer höheren Ebene direkt vergleichen zu können und so genannte <i>hot-spots</i> zu erkennen.</p>	
Publikationen:	Schubert, M., Jacquemoud, J., Straub, D., Faber, M.H., (2010), Excel®-basiertes Werkzeug zur Risikoeermittlung bei Steinschlagschutzgalerien, Forschungsauftrag AGB 2008/003 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bericht Nr. 639, VSS, Zürich.	
ARAMIS SBT: Formular 3 Projektabschluss		Seite 2 / 4

## 5. Aramis Formular 3



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Strassen ASTRA**

### Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:

Die Begleitkommission ist der Meinung, dass die Ziele erreicht wurden und dass ein nützliches Instrument für die Praxis geschaffen wurde.

Der Bericht ist gut strukturiert und redaktionell guter Qualität. Die Unterteilung in den 3 Teilen „Hinweise zur Programmanwendung“, „Anwendungstest“ und „Hintergrundinformationen zur Modellierung“ ist zweckmässig und erleichtert die Lektüre.

Umsetzung:

Die entwickelte Methodik mit zugehöriger Software ermöglicht den praktisch tätigen Bauingenieuren und Geologen Risikoermittlungen für Steinschlagschutzgalerien auf probabilistischer Basis durchzuführen. Dazu wird kein Fachwissen im Gebiet der probabilistischen Modellierung vorausgesetzt. Dies wurde durch das dokumentierte Beispiel bestätigt. Das Beispiel hat gezeigt, dass die Methodik praxistauglich ist, jedoch in einer breiteren Anwendung weiter validiert werden sollte. Die absoluten Risikowerte sind insbesondere kritisch zu hinterfragen. Die Methodik ist u.a. sehr nützlich, um die Wirksamkeit von verschiedenen Massnahmen zu vergleichen.

weitergehender  
Forschungsbedarf:

Weitergehender Bedarf an Forschung und Entwicklung:

1. Signieren der Software, so dass die Makros als Vertrauenswürdig eingestuft werden und damit automatisch ausgeführt werden.
2. Berücksichtigung des Widerstandsmodells nach ASTRA-Richtlinie. Die vorliegende Methodik basiert auf dem Modell von Kristian Schellenberg (2008).
3. Erweiterung der Methodik und Software für andere statische Systeme von Galerien.
4. Im Programm mehr Informationen über das betrachtete Bauwerk zulassen (z.B. Berücksichtigung des effektiven Bewehrungsgehaltes).
5. Ablösemodell basiert auf einem Potenzgesetz. Andere Modellansätze könnten integriert werden, um mehr Flexibilität in Bezug auf die Anpassung an die in situ Bedingungen zu schaffen.
6. Weitere Validierung des Modells.
7. Erweiterung der Methodik für andere Risiken ( z.B. Steinschlagsrisiko auf der freien Strecke oder Risiken in Tunnel).

Einfluss auf  
Normenwerk:

Kein Einfluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Strassen ASTRA**

**Präsident Begleitkommission:**

Name:	Donzel	Vorname:	Michel
Amt, Firma, Institut:			
Strasse, Nr.:	Feldackerweg 15		
PLZ:	3067	Email:	michel.donzel@bluewin.ch
Ort:	Boll	Telefon:	+41 31 839 71 10
Kanton, Land:	Bern, Schweiz	Fax:	-

**Unterschrift Präsident Begleitkommission:**

*M. Donzel*



## 6. Referenzen

- ASTRA (2004). Vérification des galeries existantes – vérifications générales. V. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation. Bern, Switzerland.
- ASTRA (2006). Verkehrsentwicklung und Verfügbarkeit der Nationalstrassen Jahresbericht 2006. Bern, Switzerland.
- ASTRA (2008). Einwirkungen auf Steinschlagschutzgalerien, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. **Art. Nr. 308 317.d**: 22.
- Baillifard, F., M. Jaboyedoff und M. Sartori (2003). "Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using a GIS-based parameter rating approach." Natural Hazards and Earth System Sciences **3**(5): 431–438.
- Baker, J. W., M. Schubert und M. H. Faber (2008). "On the assessment of robustness." Structural Safety **30**(3): 253–267.
- Budetta, P. (2004). "Assessment of rockfall risk along roads." Natural Hazards and Earth System Sciences **4**(1): 71–81.
- Bunce, C. M., D. M. Cruden und N. R. Morgenstern (1997). "Assessment of the hazard from rock fall on a highway." Canadian Geotechnical Journal **34**: 344–356.
- Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) (2006). Nationales Verkehrsmodell, VM-UVEK.
- Bundesamt für Statistik (BFS) (2007). Automatische Strassenverkehrszählung (AVZ). Bundesamt für Statistik (BFS), date accessed: 27.01.2009, <http://www.portal-stat.admin.ch/avz-2007/>.
- Bundesamt für Strassen (2003). "Steinschlag": Naturgefahr für die Nationalstrassen. Schlussbericht der ASTRA - Expertengruppe, ASTRA.
- Bundesamt für Strassenwesen (2006). Verkehrsentwicklung und Verfügbarkeit der Nationalstrassen Jahresbericht 2006. Bern, Switzerland.
- Chau, K. T., R. H. C. Wong und J. J. Wu (2002). "Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences **39**(1): 69–77.
- Coles, S., L. R. Pericchi und S. Sisson (2003). "A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling." Journal of Hydrology **273**(1–4): 35–50.
- Dussauge-Peisser, C., A. Helmstetter, J.-R. Grasso, D. Hantz, P. Desvarreux, M. Jeannin und A. Giraud (2002). "Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis." Natural Hazards and Earth System Sciences **2**: 15–26.
- Erath, A. und P. Fröhlich (2004). Die Geschwindigkeiten im PW-Verkehr und die Leistungsfähigkeiten von Strassen über den Zeitraum 1950–2000. Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung. Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich. **183**: 103.
- Evans, L. (1994). "Driver injury and fatality risk in two-car crashes versus mass ratio inferred using Newtonian mechanics." Accident Analysis & Prevention **26**(5): 609–616.
- Faber, M., J. Köhler, M. Schubert, E. Sabiote, C. Fermaud, D. Imhof und A. Scheiwiller (2008). Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung, Forschungsauftrag AGB 2005/102, Bericht VSS Nr. FB 618.
- Faber, M. H. (2006). Risk and Safety in Civil, Surveying and Environmental Engineering. ETH Zürich, Lecture Notes: 395.
- Faber, M. H., Ed. (2008). Principles, System Representation & Risk Criteria. Risk Assessment in Engineering. Zürich.
- Fermaud, C., C. Willi, M. Faber, J. Köhler, M. Schubert und E. Sabiote (2008). Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten – Ermittlung des Netzrisikos, Forschungsauftrag AGB 2005/103, Bericht VSS Nr. FB 619.
- Fisher, R. A. (1930). Statistical methods for research workers. Edinburgh, Oliver and Boyd.
- Gelman, A., J. B. Carlin, H. S. Stern und D. B. Rubin (2004). Bayesian Data Analysis, CRC Press.
- GeNie&Smile (2006). Graphical Network Interface. Pittsburgh, USA, Decision Systems Laboratory, <http://dsl.sis.pitt.edu>.
- Gerber, W. (2006). Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL); Eidgenössische Forschungsanstalt WSL: 39.
- Gutenberg, B. und C. F. Richter (1949). Seismicity of the earth and associated phenomena. Princeton, Princeton University Press.
- Hoffmann, G. und S. Nielsen (1994). Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr, Abt. Strassenbau.
- Hovius, N., C. P. Stark und P. A. Allen (1997). "Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping." Geology **25**(3): 231–234.

## 6. Referenzen

- Hugin (2006). Hugin Researcher. Aalborg, Hugin Experts A/S.
- Hungr, O., S. G. Evans und J. Hazzard (1999). "Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia." Canadian Geotechnical Journal **36**: 224–238.
- Jacquemoud, J. und J. B. Pasquier (2007). Simplonstrasse A9 – Steinschlagschutz-MN. Überprüfung und generelles Konzept. DVBU/DSF/Nationalstrassen Oberwallis.
- JCSS (2001). Probabilistic Model Code, The Joint Committee on Structural Safety, online available: [www.jcss.ethz.ch](http://www.jcss.ethz.ch).
- Jensen, F. V. (2001). Bayesian networks and decision graphs. New York, Springer.
- Jensen, F. V. und T. D. Nielsen (2007). Bayesian networks and decision graphs. New York, NY, Springer.
- Jimenez-Rodriguez, R., N. Sitar und J. Chacon (2006). "System reliability approach to rock slope stability." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences **43**(6): 847-859.
- Kahn, C. E., L. M. Roberts, K. A. Shaffer und P. Haddawy (1997). "Construction of a Bayesian network for mammographic diagnosis of breast cancer." Computers in Biology and Medicine **27**(1): 19-29.
- Kjaerulff, U. B. und A. L. Madsen (2005). Probabilistic Networks - An introduction to Bayesian Networks and Influence Diagrams. Aalborg, HUGIN.
- Kjaerulff, U. B. und A. L. Madsen (2006). Probabilistic Networks for Practitioners - A Guide to Construction and Analysis of Bayesian Networks and Influence Diagrams. Aalborg, HUGIN.
- Lindenmann, H. P. und R. Zuberbühler (1993). Geschwindigkeiten auf verschiedenen Strassentypen. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT). Zürich, ETH Zürich.
- Luckman, B. H. (1976). "Rockfalls and rockfall inventory data: Some observations from surprise valley, Jasper National Park, Canada." Earth Surface Processes **1**(3): 287-298.
- Malamud, B. D. und D. L. Turcotte (2006). "The applicability of power-law frequency statistics to floods." Journal of Hydrology **322**(1-4): 168-180.
- Melchers, R. E. (2002). Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley & Sons.
- Nash, C. und T. Sansom (1999). Calculating Transport Congestion and Scarcity Costs. Final Report of the Experts Advisors to the High Level Group on Infrastructure Charging (working group 2), European Commission: 29.
- Nishijima, K. und M. H. Faber (2006). A budget management approach for societal infrastructure project. Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost Porto, Portugal, Taylor & Francis.
- Nishijima, K., M. Maes, J. Goyet und M. H. Faber (2007). Optimal Reliability of Components of Complex Systems Using Hierarchical System Models. Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, Stanford University, Palo Alto, USA.
- Pelletier, J. D., B. D. Malamud, T. Blodgett und D. L. Turcotte (1997). "Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides." Engineering Geology **48**(3-4): 255-268.
- Pfeiffer, T. J. und T. D. Bowen (1989). "Computer Simulation of Rockfalls." Bulletin of the Association of Engineering Geologists **XXVI**(1): 135-146.
- Rackwitz, R. (2000). "Optimization - the basis of code-making and reliability verification." Structural Safety **22**(1): 27-60.
- Raiffa, H. und R. Schlaifer (2000). Applied statistical decision theory. New York, Wiley.
- Rammelt, P. (1998). Lernen in Bayes'schen Netzen. Statistics and Economic Mathematics Group. Berlin, Technische Universität Berlin: 103.
- Reber, S. (2009). Felssturz auf A2 in Uri: Muss gesprengt werden? Tagesanzeiger. Zürich, Tamedia AG.
- Robotham, M. E., H. Wang und G. Walton (1995). "Assessment of Risk from Rockfall from Active and Abandoned Quarry Slopes." Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section a-Mining Industry **104**: A25-a33.
- RocFall (2008). Statistical rock fall analysis software. Toronto, Canada, Rockscience Incorporation.
- ROCKFALL 6.1 (2004). Steinschlag Simulationsprogramm "Rockfall". Witten, Germany, Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Umwelttechnik und Geologie mbH
- Salvisberg, U., R. Allenbach, M. Cavegn, M. Hubacher und S. Sigrist (2004). Verkehrssicherheit in Autobahn- und Strassentunneln des Nationalstrassennetzes. Bern, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu.
- Sass, O. (2005). "Temporal variability of rockfall in the Bavarian Alps, Germany." Arctic Antarctic and Alpine Research **37**(4): 564-573.
- Schellenberg, K. (2008). On the design of rockfall protection galleries IBK. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich. **PhD**: 181.
- Schellenberg, K. und T. Vogel (2005). Swiss Rockfall Galleries - Impact Load. IABSE Symposium 'Structures and Extreme Events', Lisbon 2005, IABSE.

- Schneuwly, D. M. und M. Stoffel (2008). "Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps." Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **8**(2): 203-211.
- Schubert, M. und M. H. Faber (2008a). Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten. Zürich, Forschungsauftrag AGB 2002/020, Bericht VSS Nr. FB 616: 210.
- Schubert, M. und M. H. Faber (2008b). System Effects in Portfolio Loss Estimation. ifip WG 7.5 Reliability and Optimization of Structural Systems, Mexico City, ifib.
- Schubert, M., D. Straub und M. H. Faber (2005). Reliability of rock-fall protection galleries - A case study with a special focus on the uncertainty modeling. Proceedings ICOSAR'05, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability, Rome, Italy.
- SIA162:1956 (1956). Normen für die Berechnung und Ausführung der Beton- und Eisenbetonbauten, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein. **SIA 162:1958**: 48.
- SIA162:1968 (1968). Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein. **SIA 162:1968**: 81.
- SIA162:1989 (1993). Betonbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein. **SIA 162:1989**.
- SIA162:1993 (1993). Teilrevision der SIA 162:1989 Betonbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein. **SIA 162:1993**: 88.
- SIA262:2003 (2003). Betonbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. **SIA 262:2003**: 90.
- Stevens, W. (1998). RocFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Department of Civil Engineering. Toronto, University of Toronto. Ontario, Canada. **Master**: 38.
- Straub, D. und M. Schubert (2008). "Modeling and managing uncertainties in rock-fall hazards." Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards **2**(1): 1 - 15.
- The MathWorks (2006). MATLAB 7.3 (R2006b). Natick, MA 01760-2098 USA.
- Thiemig, C., M. Schubert, J. Pinnekamp und M. H. Faber (2009). "Modeling of a Membrane Bioreactor using Bayesian Probabilistic Networks." submitted to Water Research
- von Neumann, J. und O. Morgenstern (1944). Theory of games and economic behavior. Princeton, N.J., Princeton University Press.
- VSS (2003). Erhaltungsmanagement; Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute. **SN 640 907**: 24.
- VSS SN 640 007 (2006). Strassenverkehrsunfälle, Unfallzahlen, Unfallstatistiken, Unfallkosten, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute. **SN 640 007**.
- Wilhelm, C. (1999). Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutz-Massnahmen an Verkehrsachsen. Praxishilfe. Bern, Bundesamt für Umwelt.
- WSL (2008). Rapid Mass Movements (RAMMS) - Ein Modellierungssystem für Naturgefahrenforschung und Praxis. Zurich, WSL.

## 6. Referenzen