Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 16 (2011)

Heft: 1

Artikel: Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen

Autor: Rovina, Hermann / Liniger, Markus / Jordan, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-327742

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 07.01.2026

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

Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 16/1, 2011 S. 57-79

Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen

Hermann Rovina[1], Markus Liniger[2], Peter Jordan[3], Ueli Gruner[4], Daniel Bollinger[5]

Die Autoren sind Mitglieder der Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN der Schweizerischen Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG. Zu den Tätigkeiten der AGN siehe Bull. angew. Geol. 2008 (Vol. 13/1, 101-103) und 2010 (Vol. 15/1, 105-106).

Stichworte: Sturzgefahren, Simulationen, Rechenmodelle 2D/3D, Genauigkeit, Vergleichbarkeit, Zuverlässigkeit

Zusammenfassung

Numerische Modellierungen von Steinschlagereignissen stellen eine zunehmend bedeutendere Grundlage für die Erstellung von Gefahrenkarten und die Bemessung von Schutzbauwerken dar. Dass die verschiedenen marktüblichen Programme bei konkreten Fragestellungen scheinbar zu unterschiedlichen Resultaten führen, hat zu Diskussionen geführt. Die in der Schweiz am häufigsten eingesetzten Programme werden deshalb betreffend der Eingabeparameter und Resultate, der zugrunde liegenden Haupt- und Zusatzalgorithmen sowie weiterer Aspekte verglichen. Wichtig ist dabei die Unterscheidung zwischen deterministischem und probabilistischem Ansatz. Der probabilistische Ansatz bedarf sowohl bei der Parametereingabe wie bei der Interpretation der Resultate grösster Sorgfalt und Erfahrung.

Anhand eines Flussdiagramms wird der Ideale Ablauf einer Modellierung dargelegt: Voraussetzung für ein aussagekräftiges Resultat ist eine detaillierte Beschreibung des Transitbereichs und eine sorgfältige Definition der zu modellierenden Szenarien. Diese wie auch die Plausibilisierung der Resultate müssen zwingend durch Fachleute im Feld erfolgen. Die Analyse bekannter Ereignisse dient der Kalibrierung. Wichtig ist, dass Ziel, Umfang und Art der Modellierung vorgängig zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer klar definiert werden.

Résumé

Les modélisations numériques d'événements de chutes de pierres sont de plus en plus utilisées pour le développement des cartes de danger et le dimensionnement d'ouvrages de protection. Le fait que les différents logiciels du marché conduisent dans les cas concrets à des résultats apparemment différents a donné lieu à des débats. Les programmes les plus utilisés en Suisse sont donc comparés dans un tableau concernant les données à fournir et les résultats obtenus, les algorithmes primaires et secondaires sous-jacents, ainsi que sur d'autres aspects. Il est important en la matière de faire la distinction entre approche déterministe et probabiliste. L'approche probabiliste nécessite le plus grand soin et une grande expérience, aussi bien pour déterminer les paramètres d'entrée que pour l'interprétation des résultats.

A l'aide d'un diagramme, le déroulement idéal d'une modélisation est présenté: la condition préalable à un résultat significatif est une description détaillée de la zone de transit et une définition soigneuse des scénarios à modéliser. Ces relevés, ainsi que la vérification de la plausibilité des résultats, doivent nécessairement être effectués par des experts directement sur le terrain. L'analyse des événements connus est utilisée pour l'étalonnage. Il est important que l'objectif, la portée et le type de modélisation soient clairement définis à l'avance entre le client et le mandataire.

[1] Rovina + Partner AG, Hauptstrasse 2, 3953 Varen
[2] Geotest AG, Grisigenstrasse 6, 6048 Horw
[3] Böhringer AG, Mühlegasse 10, 4104 Oberwil
[4] Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern
[5] Kanton Schwyz, Amt für Wald und Naturgefahren, Bahnhofstrasse 9, 6430 Schwyz

Abstract
Numerical modeling of rock fall events is an increasingly important basis for the development of hazard maps and the design of protective structures. The seemingly different results on specific problems of the commonly used programs led to discussions. The programs most widely used in Switzerland are thus compared in a table, including input parameters and results, the underlying primary and additional algorithms as well as other aspects. Important is the differentiation between the deterministic and probabilistic approach. The probabilistic approach requires the greatest care and experience both when putting in the parameter as well when interpreting the results.
With the help of a flow chart, the ideal development of a model is presented: The requirement for a meaningful result is a detailed description of the transit area and a careful definition of the scenarios that are to be modeled. This as well as the validation of the results must necessarily be done by specialists in the field. It's important that the goal, the extent and the form of the model are clearly defined preliminarily between the client and the contractor.

1. Ausgangslage und Zielsetzungen

Seit einigen Jahren bilden numerische Modellierungen ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Beurteilung von Sturzgefahren. Sie liefern Grundlagen zur Abgrenzung der Gefährdungsstufen in Gefahrenkarten, zu Risikoanalysen und zur Bemessung von Schutzbauten.
Jede Modellierung stellt eine Annährung an die Natur dar. Die Modellierung erfolgt bei den meisten Anwendungen entlang einer vorgegebenen Sturzbahn (zweidimensional, 2D), bei anderen flächig auf der Basis eines Terrainmodells (dreidimensional, 3D). Berechnet werden in der Regel Trajektorien, Sprunghöhen, Geschwindigkeiten und Energien (Translations- und Rotationsenergien).
In der Schweiz gelangen in der heutigen Praxis Programme verschiedener Anbieter zum Einsatz. Diese unterscheiden sich, was Eingabe und auch Berechnungsvorgänge anbetrifft, teilweise erheblich voneinander. Ein direkter Vergleich der Resultate verschiedener Programme ist daher nicht immer einfach. Mitunter stellen sich diesbezüglich beispielsweise auch Fragen bezüglich Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Vergleichbarkeit.
Im Weiteren zeigen bisherige Erfahrungen, dass auch Spezialisten aufgrund der subjektiven Parameteransprache durch den Modellierenden sowie der oft unterschiedlichen und nicht modellspezifischen Interpretation der Daten bei denselben Modellen nicht selten zu unterschiedlichen Resultaten gelangen.
Grundsätzlich stellt sich somit die Frage, wie mit Modellresultaten in der konkreten Anwendung umzugehen ist. Nachfolgend soll aufgezeigt werden, wie die Qualität, die Nachvollziehbarkeit und die Vergleichbarkeit von Sturzmodellierungen unabhängig der jeweiligen Software-Anwendung verbessert werden können. Die Empfehlung richtet sich sowohl an Modellierer wie auch an Anwender von Modellresultaten, aber auch an Besteller (Auftraggeber) solcher Modellierungen. Sie zeigt auf, welche Fragestellungen mit Modellen beantwortet und wo und wie Sturzmodelle mit Vorteil eingesetzt werden können. Sie soll auch bewusst machen, dass bei den verschiedenen eingesetzten Modellen die Eingabeparameter und die Berechnungsroutinen verschieden sind und daher auch die Resultate (unterschiedliche Statistiken) programmspezifisch unterschiedlich interpretiert werden müssen.
Die Autoren haben verschiedene Programme für Sturzmodellierungen analysiert. Sie stellen die Befunde hier wertefrei dar und geben bewusst keine Empfehlung für ein einzelnes Programm ab.

2. Anwendung von Sturzmodellierungen

Sturzmodellierungen bilden im zeitgemässen Naturgefahrenmanagement ein unentbehrliches Hilfsmittel. Sie gelangen primär zum Einsatz bei

- der Erstellung von Naturgefahrenkarten, wo sie eine wichtige Grundlage für das

integrale Risikomanagement bilden, in dessen Vordergrund raumplanerische Massnahmen stehen (Ausscheidung von Gefahrenzonen in der Zonenplanung, gegebenenfalls Spezifikationen im Baureglement);
- Gefahren- und Risikoanalysen an Verkehrswegen;
- Gefahren- und Risikoanalysen bei Einzelobjekten;
- Dimensionierung neuer Schutzbauten;
- Beurteilung der Wirksamkeit bestehender Schutzbauten.

Bei der Erarbeitung von Naturgefahrenkarten werden Sturzmodellierungen in der Regel als Hilfsmittel verwendet. Die Ausscheidung von Gefahrenbereichen erfolgt nicht allein gestützt auf die zahlengetreue Übernahme der Resultate aus den Modellierungen, sondern berücksichtigt auch die Erkenntnisse aus früheren Ereignissen sowie die örtlichen topografischen Gegebenheiten. Sturzmodellierungen (2D) werden denn auch meist nur punktuell bzw. linear eingesetzt, um Reichweiten und Intensitäten zu erfassen und damit Gefahrenräume und -stufen abgrenzen zu können. Bei der Erstellung von Gefahrenkarten werden Unschärfen in einem gewissen Masse ausgeglättet.
Bei Risikoanalysen, Kosten-Wirksamkeits-Analysen und bei der Dimensionierung von Schutzbauten stützt man sich hingegen meist stark auf die errechneten Zahlenwerte ab. So kann beispielsweise bei der Dimensionierung einer Schutzbaute die Beherrschung von 90 oder 95 % aller modellierten Ereignisse eine klare Zielvorgabe sein. Entsprechend oft wird bei der Massnahmenplanung auf einen solchen Perzentilwert fokussiert.

3. Bedeutung der Szenarien

3.1 Wiederkehrperiode

Unabhängig davon, ob Sturzmodellierungen eingesetzt werden, ist die Szenariendefinition Grundlage jeder Gefahrenbeurteilung. Die Bundesempfehlungen legen die Szenarien für das 30-, das 100- und das 300-jährliche Ereignis als Standard der Gefahrenbeurteilung fest. Besonders bei Verkehrswegen oder bei Anlagen, bei denen die Verfügbarkeit einer Infrastruktur eine wichtige Rolle spielt, kann es zweckmässig sein, auch ein häufigeres Szenario (z. B. ein 10-jährliches Ereignis) zu analysieren. EconoMe (aktuell Version 2.1) als schweizweit verwendetes Tool des Bundes zur Quantifizierung von Risiken erlaubt denn auch zusätzlich die Wahl eines «freien» Szenarios.
Verschiedentlich finden sich auch Formulierungen wie «1 bis 30 Jahre», «30 bis 100 Jahre» etc. Diese mögen zur Annahme verleiten, dass die gesamte Breite der in diesen Intervallen möglichen Ereignisse modelliert werden sollen. Tatsächlich muss jedoch nur das schlimmstmögliche Ereignis pro Wahrscheinlichkeits- oder Wiederkehrperioden-Intervall definiert werden, also standardmässig das 30-, das 100- und das 300-jährliche Ereignis. Bezogen auf die Sturzprozesse ist pro Ausbruchgebiet jeweils eine entsprechende repräsentative Blockgrösse und -form zu bestimmen.

3.2 Sturzkörper

Die Problematik der Szenarienbildung ist, insbesondere bei Massenbewegungsgefahren, immer wieder Gegenstand von Diskussionen. Im Fokus steht dabei das Kriterium der Wahrscheinlichkeit, deren Festlegung meist mit wesentlich grösseren Unsicherheiten behaftet ist als jene der Stärke oder Intensität eines Prozesses (siehe auch Kienholz 2008). Bei der Bildung der Szenarien von Sturzprozessen ist in erster Linie eine umfassende und sorgfältige Analyse der Trennflächenverhältnisse im Liefergebiet von Bedeutung. Daraus ergeben sich die möglichen Bruchkörper bzw. ihre Grösse und ihre Form. Dabei ist auch zu beachten, dass innerhalb eines Liefergebietes Bereiche variabler Durchtrennung vorliegen können, sei es wegen unterschiedlicher Lithologien

und/oder wegen wechselnder Tektonisierung des Gebirges. Andererseits kann ein Schadenpotenzial von mehreren Liefergebieten mit verschiedenartigen Felseigenschaften betroffen sein. Die Methode «MATTEROCK» (Rouiller & Marro 1997) ist ein Beispiel einer systematischen Erfassung der Trennflächenverhältnisse.
Die Analyse der beobachteten Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet gibt weitere Anhaltspunkte, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Sturzkörpergrösse zu erwarten ist. Die Ereignisdokumentation sowie die klare Unterscheidung zwischen jungen und alten Sturzkörpern bzw. aktiven und weniger aktiven Ausbruchgebieten (gemäss Symbolbaukasten 1995) bilden wichtige Grundlagen dazu. Erschwerend kommt allerdings hinzu, dass bei der Betrachtung abgelagerter Blöcke zu beurteilen ist, in welchem Ausmass sie beim Sturzvorgang in einzelne Teilkörper zerbrochen sind. Dazu kann wiederum die Analyse der Trennflächenkonfiguration im Liefergebiet Hinweise liefern.

3.3 Transit- und Ablagerungsbereiche

Bei der Bestimmung der Szenarien sind nicht nur die Aufnahmen in den Liefergebieten von Bedeutung, sondern auch die der Transit- und Ablagerungsbereiche. Dazu gehört die Wahl der relevanten Sturzbahn(en). Bei der Festlegung der physikalischen Parameter des Transitgebietes sollten genaue Abschnitte definiert und entsprechend ihrer abschnittsbezogenen Gegebenheiten einzeln parametrisiert werden. Gegebenenfalls sind hier ebenfalls szenarienbezogen die ungünstigsten Konfigurationen (z. B. gefrorener Boden) anzunehmen.
Für die Erstellung von Gefahrenkarten sowie generell bei Gefahren- und Risikoanalysen ist der Ist-Zustand eines Gebietes massgebend. Im Grundsatz ist der Wald stets zu berücksichtigen. Oft wird der Wald bei der Wahl der Szenarien als gegebener Parameter berücksichtigt. Es ist aber auch denkbar, den Wald als Massnahme zu betrachten, beispielsweise dann, wenn der Sturzprozess durch gezielte Aufforstungen abgemindert oder verhindert werden soll. In speziellen Fällen kann es auch zweckmässig sein, Modellierungen ohne Wald durchzuführen, zum Beispiel um die Auswirkungen einer reduzierten oder fehlenden Waldwirkung (z. B. in baumarmen Sturzcouloirs) zu erfassen. Analoge Überlegungen gelten bei vorhandenen Schutzbauten (Prozesswirkung mit und ohne Schutzbaute). Was die Berücksichtigung von Schutzbauten bei der Gefahrenbeurteilung sowie die Wirkung des Waldes betrifft, wird auf «PLANAT Protect» (speziell Teil C in Romang et al. 2008) verwiesen.

Im Gegensatz zu anderen gravitativen Naturgefahren und insbesondere zum Hochwasser treten Sturzprozesse meist selektiv punktuell (bzw. linear) auf. Dieser Umstand darf weder bei der Wahl der Szenarien noch bei der Ausarbeitung der Gefahrenkarte (über die Wahrscheinlichkeit) einen Einfluss haben. Er wird einzig in der Risikoanalyse durch den Parameter der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit (siehe «PLANAT Risikokonzept» Bründl et al. 2009, EconoMe 2.1) berücksichtigt.

Die Szenarien wie auch Ausnahmen von den üblicherweise getroffenen Annahmen sind mit dem Auftraggeber abzusprechen.

4. Genauigkeitsanforderungen

Die Genauigkeitsanforderungen richten sich nach der Problemstellung. Sie sind im Grundsatz durch den Auftraggeber festzulegen. Allerdings kann die diesbezügliche Erfahrung desselben beschränkt sein, so dass der Auftragnehmer bereits auf dieser Stufe beratend tätig werden muss.
Sturzmodellierungen für Gefahrenhinweiskarten, Gefahrenkarten oder zur Dimensionierung von Schutzbauten unterscheiden sich bezüglich Genauigkeitsanforderungen und dem Umgang mit Unsicherheiten. Was

das Vorgehen, die zu erarbeitenden Produkte und die Festlegung der Schutzziele betrifft, gelten heute faktisch die Standards des Bundes (Richtlinien und Empfehlungen, bei Schutzbauten Mindestanforderungen NFA) sowie der PLANAT (Risikokonzept, Protect). Abweichungen davon müssen gut und nachvollziehbar begründet sein.

Verschiedene Programme zur Modellierung von Sturzprozessen liefern als Resultate Perzentile (z. B. 80% oder 90%) bezüglich Sturzenergie, Sprunghöhe und Reichweite. Gerade bei Risikoanalysen und der Bemessung von Schutzbauten, welche quantitative Angaben erfordern, wird auf solche Prozentwerte abgestützt. So wird bei der Planung von Schutzbauten verbreitet davon ausgegangen, dass durch eine Baute ein hoher Prozentsatz der modellierten Ereignisse beherrscht werden soll. Häufig gilt der 90%- oder der 95%-Wert als die Grenze, für die vernünftigerweise noch ein Schutz zu erzielen ist.
Der Bereich von 95-100% wird in der Praxis meist rechnerischen «Ausreissern» zugeschrieben, die aus Sturzmodellierungen mit probabilistischen Programmen resultieren können. Wenn eine solche Modellierung auf realistischen Parametern beruht, können diese «Ausreisser» eventuell einem selteneren Szenario mit unerwarteten Ereignisabläufen entsprechen.
Da die Streugrössen bzw. die Perzentile in den einzelnen Modellen unterschiedlich gehandhabt werden (verschiedene Berechnungsalgorithmen, verschiedenartige modellabhängige Generierung der statistischen Verteilung), kann keine generelle Empfehlung dazu gemacht werden, welches Perzentil zu verwenden sei. Es ist deutlich darauf aufmerksam zu machen, dass die 95-Perzentile bei Programm A nicht der 95-Perzentile bei Programm B entspricht. Analoges spielt bei der Erstellung von Gefahrenkarten eine Rolle: Bis zu welcher Perzentile sollen die Sturzkörper für die Abgrenzung von Gefahrenbereichen berücksichtigt werden? Wenn 5% der modellierten Blöcke des 100-jährlichen Ereignisses weiterrollen, können sie bei der Ausscheidung von Gefahrenbereichen vernachlässigt werden?
Im Einzelfall sind solche und ähnliche Fragen mit dem Auftraggeber abzusprechen, wobei die programmspezifischen Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen.

5. Allgemeines Vorgehen bei Sturzmodellierungen

Sturzmodellierungen können zwei- oder dreidimensional durchgeführt werden. Die Wahl der Methode richtet sich einerseits nach der Fragestellung. Andererseits ist zu beachten, dass in der Praxis Programme zur 2D-Simulation wesentlich verbreiteter sind als solche zur 3D-Modellierung. Für die Zuverlässigkeit der Resultate ist eine plausible und präzise Formulierung der Szenarien sowie eine zuverlässige Erfassung der physikalischen Eigenschaften der Transitgebiete bei beiden Methoden ausschlaggebend.

Das allgemeine Vorgehen bei Sturzmodellierungen ist in Fig. 1 in Form eines Flussdiagramms aufgezeigt. Es unterscheidet sich im Wesentlichen nicht vom generellen Vorgehen bei der Beurteilung von Naturgefahren.
Sturzmodellierungen sind als Hilfsmittel zu betrachten. Gegenüber den meist vielfältigen Variationen der natürlichen Gegebenheiten stellen sie starke Vereinfachungen dar. Sie entbinden nicht vor sorgfältigen Abklärungen der in Fig. 1 unter Ziffer 1 und 2 aufgeführten Sachverhalte durch Fachleute. Um möglichst exakte Resultate zu erlangen, sind unter Umständen mehrere Schritte der Kalibrierung und Plausibilisierung (Ziffer 4 in Fig. 1) der Modellierungsergebnisse erforderlich. Die Resultate sollten nicht in Widerspruch zu den dokumentierten Ereignissen stehen.

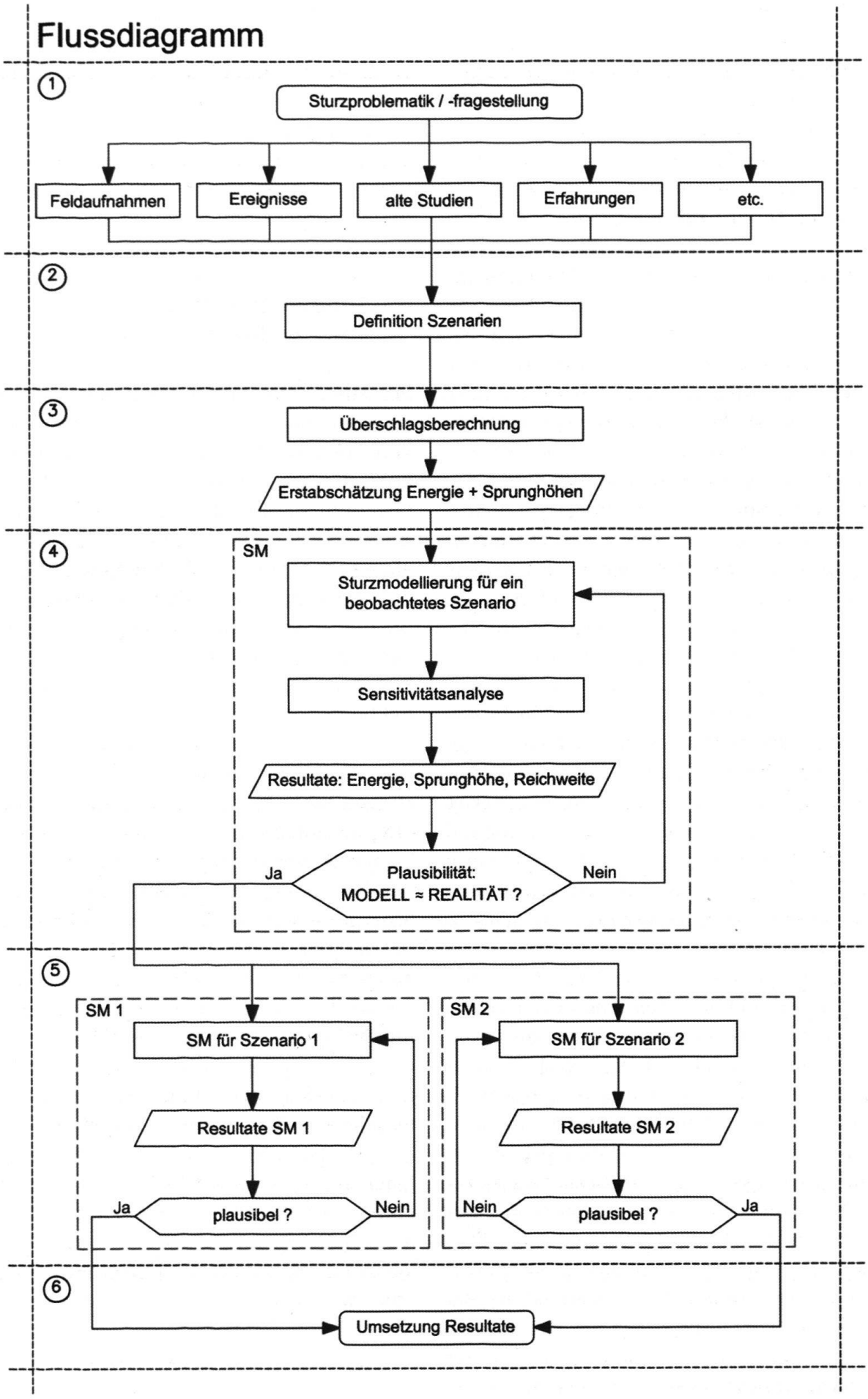
Flussdiagramm
1
Sturzproblematik / -fragestellung
Feldaufnahmen
Ereignisse
alte Studien
Erfahrungen
etc.
2
Definition Szenarien
3
Überschlagsberechnung
Erstabschätzung Energie + Sprunghöhen
4
SM
Sturzmodellierung für ein beobachtetes Szenario
Sensitivitätsanalyse
Resultate: Energie, Sprunghöhe, Reichweite
Ja
Plausibilität: MODELL ≈ REALITÄT ?
Nein
5
SM 1
SM für Szenario 1
Resultate SM 1
Ja
plausibel ?
Nein
SM 2
SM für Szenario 2
Resultate SM 2
Nein
plausibel ?
Ja
6
Umsetzung Resultate

Fig. 1

5.1 2D-Sturzmodellierungen

2D-Sturzmodellierungen wurden ursprünglich für die Positionierung und Dimensionierung von Schutzbauten entwickelt. Vom jeweiligen Schadenpotenzial (z. B. Strasse, Gebäude) werden Fallbahnen (Profilschnitte) zu den potenziellen Ausbruchgebieten gezogen. Solche Geländeprofile können dank den heute zur Verfügung stehenden digitalen Geländemodellen (z. B. DTM-AV) relativ einfach und schnell erstellt und für eine aussagekräftige Modellierung eingesetzt werden. Für jedes schadenpotenzialrelevante Ausbruchgebiet werden je nach Problemstellung die massgebenden Szenarien festgelegt (Blockgrösse, Blockform, Waldwirkung, evtl. gefrorener Boden etc.). Entlang der Profilschnitte wird die Bodenbeschaffenheit erhoben, aus der abschnittsbezogen die physikalischen Parameter abgeleitet werden (Dämpfung, Rauigkeit des Untergrundes etc.), welche die Sturzprozesse beeinflussen. Die Sturzmodellierungen für die vordefinierten Szenarien liefern für jeden Abschnitt des Profilschnitts Sprunghöhen, Energien und prozentuale Durchgänge des vorgegebenen Sturzkörpers, basierend auf einer Vielzahl (in der Regel hunderte) von Rechendurchgängen. So können nicht nur die mögliche Prozesseinwirkung am Schadenpotenzial, sondern auch die optimale Positionierung der Schutzbauten, deren Höhe und die zu absorbierenden Energien ermittelt werden. Können keine Sturzmodellierungen durchgeführt werden, so liefert die Methode Gerber (1994) Anhaltspunkte.

In den vergangenen Jahren wurden Sturzmodellierungen zunehmend für flächige Gefahrenanalysen, namentlich zur Erstellung von Gefahrenkarten eingesetzt. Massgebendes

Fig. 1: Allgemeines Vorgehen bei Sturzmodellierungen. [1] Grundlagen: Eine wichtige Grundlage für die Sturzmodellierung (SM) bilden die Feldaufnahmen: Im Gelände werden Blockeigenschaften (Form, Grösse), Trennflächenkonfiguration und Bruchkörperbildung, Bodenbeschaffenheit und Wald sowie «stumme Zeugen» aufgenommen. Letztere können Hinweise auf Reichweite, Sprunghöhe und -weite geben. Eine wichtige Informationsquelle stellen auch der Ereigniskataster (bisherige Ereignisse) sowie allfällige Erkenntnisse aus früheren Studien dar. In die Modellierung können zudem die gesammelten Erfahrungswerte aus anderen Profilen einfliessen. [2] Definition Szenarien: Auf Basis der Beobachtungen im Gelände werden gemäss Fragestellung unterschiedliche Berechnungsszenarien definiert. Die Szenarien umfassen in der Regel in Abhängigkeit der Eintretenswahrscheinlichkeit Annahmen zu Form und Grösse der Steine und Blöcke (Einzelwert oder Intervall), zu Ausnahmesituationen bei den Transitraumparametern (z.B. gefrorener Boden) etc. Die Szenarien sind mit dem Auftraggeber abzusprechen. [3] Überschlagsberechnung: Mit Vorteil erfolgt eine Abschätzung der zu erwartenden Energien und Sprunghöhen mittels einer Überschlagsberechnung (z. B. Pauschalgefällemethode). Dadurch kann der Bereich der zu erwartenden Energien und Sprunghöhen eingegrenzt werden. [4] Sturzmodellierung und Plausibilitätsprüfung: Im Idealfall kann eine erste Sturzmodellierung für ein im Gelände beobachtetes Szenario durchgeführt werden (→ Kalibrierung). Die Eingabeparameter (Blockgrösse, Geometrie, Oberflächeneigenschaften im Transit- und Ablagerungsgebiet) werden solange justiert, bis mit dem Berechnungsmodell die Beobachtungen im Gelände nachvollzogen werden können. Es empfiehlt sich, die Plausibilitätsprüfung unter Verwendung einer möglichst geringen Parametervariation durchzuführen. Es muss auch der Frage nach der Zuverlässigkeit der Simulationen – unter Berücksichtigung aller Modell- und Eingabeunsicherheiten – Rechnung getragen werden. Sobald die Berechnungsresultate eine genügende Übereinstimmung mit den Geländebefunden zeigen, liegt ein «plausibles» Sturzbahnprofil für das gewählte Szenario vor, welches unter Berücksichtigung der ändernden Randbedingungen für die Modellierung von anderen Szenarien weiterverwendet werden kann. [5] Sturzmodellierung der definierten Szenarien und -familien: Ausgehend von der kalibrierten Sturzmodellierung bzw. den plausibilisierten Parametern beobachteter Ereignisse kann die Modellierung seltener Ereignisse angegangen werden (Szenarien 1, 2 etc.). Allenfalls ergeben sich durch die Modellierungen neue, zusätzliche Szenarien, die zu berücksichtigen sind. Auch diese Modellierungen sind hinsichtlich ihrer Plausibilität zu prüfen. [6] Fachliche Umsetzung der Resultate: Vor der Umsetzung müssen die Resultate der Sturzmodellierungen unter Berücksichtigung aller Programm- und Eingabeunsicherheiten kritisch beurteilt werden.

Kriterium für die Zuordnung zu einer Gefahrenstufe sind die pro Wahrscheinlichkeitsklasse auftretenden Sturzenergien (siehe Intensitäts-Wahrscheinlichkeits-Diagramm in BWW, BRP, BUWAL 1997). Entscheidend ist die Auswahl repräsentativer Sturzprofile, deren Modellresultate lateral einigermassen zuverlässig extrapoliert werden können. Da 2D-Sturzmodellierungen nur selektiv an ausgewählten Stellen (z. B. bei grösseren Schadenpotenzialen) eingesetzt werden, sind bei der flächigen Ausscheidung von Gefahrenräumen die sich lokal verändernden Gegebenheiten (Topografie, Waldwirkung, Bodenbeschaffenheit) auf der Basis von Feldbegehungen zu berücksichtigen. Die Pauschalgefällemethode (Gerber 1994) kann dabei zusätzlich ein taugliches Hilfsmittel bilden.

5.2 3D-Sturzmodellierungen

Bei 3D-Modellierungen werden die Sturzbahnen der einzelnen Blöcke (Trajektorien) auf einem digitalen Gelände- oder Terrainmodell (DGM, DTM) berechnet. Für die Durchführung der Modellierung ist, wie bei den zweidimensionalen Simulationen, die Vorgabe der Ausbruchgebiete, der Blockgrössen und die Erfassung aller für den Prozess relevanten Geländeparameter erforderlich. Die Eingabe erfolgt jedoch in Form codierter Flächen, welche über das DGM gelegt werden. Dreidimensionale Berechnungen sind aufwändiger und die Detailauflösung aufgrund grosser Datenmengen oder Ungenauigkeiten im DGM unter Umständen limitiert. Es ist wichtig, das DGM vorgängig hinsichtlich möglicher Fehler zu prüfen.
Die Resultate (Trajektorien, Energien, Geschwindigkeiten, Sprunghöhen) lassen sich als Flächen, abgestuft in vorgegebenen Intervallen, darstellen. Der wesentliche Gewinn von 3D-Modellen ist das Erkennen von Mulden- und Rinnenstrukturen, welche die Trajektorien bündeln. Ein Vorteil liegt auch darin, dass damit grossflächige Analysen durchgeführt werden, wie beispielsweise für Gefahrenhinweiskarten oder das Projekt SilvaProtect, bei dem für die gesamte Fläche der Schweiz 3D-Sturzmodellierungen durchgeführt worden sind (Giamboni et al. 2008). Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft 3D-Modellierungen standardmässig eingesetzt werden. Die entsprechenden Instrumente sind in Entwicklung.

6. Programmübersicht

In der Schweiz gelangen verschiedene Modellierungsprogramme zum Einsatz. Die gegenwärtig in der Praxis am meisten verwendeten sind Zinggeler + Geotest, Rockfall V 7.1, RocFall, CRSP (Colorado Rockfall-Simulation Program), EBOUL, Rockyfor3D V3.0, und RockFall Analyst. Sie wurden im Rahmen der vorliegenden Studie näher untersucht. Eine Übersicht der ermittelten Eigenschaften vermittelt Tab. 1 (für eine umfassende Übersicht download unter http://www.sfig-gsgi.ch). Weitere Programme wurden nicht geprüft, u. a. weil die entsprechenden Informationen zu knapp sind oder weil sie nur wenig zur Anwendung gelangen.
Nachfolgend wird eine summarische Übersicht der wichtigsten Merkmale der untersuchten Programme gegeben.

6.1 Eingabeparameter

Blockeigenschaften
Die Sturzkörpergeometrie wird als «idealisierter» Körper meist durch die Blockformen definiert: Quader, Prisma, Ellipsoid, Scheibe (Zylinder) oder Kugel. In den Modellen wird jeweils ein typischer Körper pro Sturzbahn eingesetzt. Die Eingabe erfolgt durch die Kantenlänge (Quader), durch den Radius (Kugel), durch Dicke und Radius (Zylinder) oder durch drei Raumachsen (Prisma, Ellipsoid). Allen Programmen gemeinsam ist, dass die Zerkleinerung des Sturzkörpers während des Sturzvorganges nicht simuliert werden kann.

Startpunkt

Der Start der Sturzmodellierung kann als Ausbruchspunkt(e) (vorgegebene Startkoordinaten) oder als Ausbruchbereich bestimmt werden (probabilistischer Ansatz: Programm wählt pro Einzelmodellierung Startkoordinaten zufällig aus einem Intervall aus). Im zweiten Fall ist für ein aussagekräftiges Resultat eine hohe Anzahl von Einzelmodellierungen erforderlich. Die minimale Anzahl richtet sich dabei nach der Ausdehnung des Intervalls. Sie beträgt in der Regel mehrere hundert.

Die Simulationsalgorithmen setzen – ausser beim freien Fall – eine (geringe) Startgeschwindigkeit und Anfangsrotation des Sturzkörpers voraus (kann z. B. als Absprengen des Blocks durch Frosteinwirkung verstanden werden). Bei verschiedenen Programmen werden diese Werte bei jeder Einzelmodellierung innerhalb eines Intervalls variiert. Diese Parameter können bei manchen Programmen durch den Anwender verändert werden. Von dieser Möglichkeit sollte aus Sicht der Vergleichbarkeit und der Nachvollziehbarkeit nur sehr zurückhaltend und wohl überlegt Gebrauch gemacht werden. Grosse Variationsintervalle verlangen wiederum nach einer grossen Zahl von Einzelmodellierungen.

Sturzbahn, Geländeparameter

Geländeparameter müssen je nach Programm verschieden erfasst werden und fliessen dann auch unterschiedlich in die Algorithmen (Berechnungsvorgänge) ein. Dies gilt insbesondere für die Eingabe, z. B. der Dämpfung und Rauigkeit. Teils erfolgen die Rechnungen mit fixen Eingaben, teils können auch Streuungsintervalle berücksichtigt werden. Zusammen mit den unterschiedlichen Berechnungsalgorithmen führt dies zu einer statistischen Streuung der Resultate.

Bei allen Programmen kann die Sturzbahn in Abschnitte oder Lamellen unterschiedlicher Hangeigenschaften unterteilt werden. Bei 3D-Modellen werden die Eigenschaften der Rasterzelle zugeordnet. Die Eigenschaften können bei gewissen Programmen über eine vordefinierte Variationsbreite zufällig variiert werden. Die Dämpfung kann entweder über die Gleit- und Haftreibung (Reibungswinkel), normale und tangentiale Restitutionsfaktoren oder Angaben zu den elastischen Eigenschaften des Bodens eingegeben werden. Ein Programm erfasst diese Eigenschaften indirekt über die Ansprache vorgegebener Bodentypen. Dasselbe Programm liefert auch eine relativ feine Abstufung zur Rauigkeit des Untergrundes (glatt bis sehr rau). Weitere Programme tragen der Rauigkeit als Funktion des Radius des simulierten Blockes Rechnung. Teils muss die Rauigkeit für jede Blockgrösse festgelegt werden. Nicht bei allen Programmen ist klar, wie die Rauigkeit genau berücksichtigt wird. Prinzipiell gilt: eine hohe Rauigkeit hat auf einen grossen Sturzkörper einen geringeren Einfluss als auf einen kleinen.

Die Rauigkeit ist der am schwierigsten zu erfassende Parameter. Er bildet die Geländeunebenheiten ab, welche aufgrund der Auflösung im Profil nicht vom Modell erfasst werden können. Bei kurzen Profilen mit hoher Profilauflösung (z. B. DTM-AV) ist die Rauigkeit teilweise dank der hohen Auflösung integriert, bei langen Profilen mit geringer topographischer Auflösung zwischen den Höhenlinien muss der bremsende Effekt kleiner Geländeunebenheiten über diesen Parameter eingegeben werden.

Wald

Der Wald kann bei drei der analysierten Programme direkt durch die Stammzahl bzw. Bestandesdichte (variabel erfassbar), die Baumdurchmesser (variabel, teils Streubereiche erfassbar) und teilweise die Baumart(en) berücksichtigt werden. Einzelne Bäume können mit Ausnahme eines Programmes nicht eingegeben werden. Die Energieverluste durch Baumtreffer werden in zwei der hier betrachteten Programmen quantifiziert, wobei die Zentrizität des Treffers in einem Fall mittels Zufallsfunktion berücksichtigt wird. Bei den restlichen Program-

men fliesst der Wald nicht in die Simulation ein. Der Waldeinfluss muss dort indirekt über andere Hangparameter (Rauigkeit, Dämpfung) approximiert werden.
Die Waldfunktionen in den verschiedenen Programmen sind unterschiedlich. Der Wald stellt somit auch hier nur eine rechnerische Annäherung an die bestehenden Verhältnisse dar.

Schutzbauwerke
Im Prinzip kann ein Bauwerk als Variation der Geländeoberfläche und dort veränderten Bodeneigenschaften eingegeben werden. Das ist allerdings nur bei Schutzdämmen sinnvoll. Zwei Programme erlauben die Eingabe von Barrieren (z. B. Schutznetze) durch die Definition von deren Lage, Höhe, Winkel und Energieaufnahmekapazität.
Bei der Dimensionierung von Schutzbauwerken ist zu berücksichtigen, dass die Modellierungen mit einem Massenpunkt rechnen. Bei einer Sprunghöhe von beispielsweise 2.8 m und einem Blockradius von 0.6 m genügt eine Netzhöhe von 3 m nicht. Die Blockoberkante liegt in diesem Fall auf 3.4 m und der Block wird das Netz mit grosser Wahrscheinlichkeit aufgrund seiner Rotationsenergie überwinden.
Alle Modellierungen sind Einzelblocksimulationen. In einem Ereignis können unter Umständen (je nach Ausbruchszenarien) mehrere Blöcke hintereinander auf ein Netz treffen. Dies ist bei der Dimensionierung zu berücksichtigen (siehe auch Romang et al. 2008).

6.2 Algorithmen

Bewegungsarten
Berechnet werden der freie Fall, Springen (schiefer Wurf), Rollen und teilweise auch Gleiten. Das Rollen wird meist über einen wählbaren Rollwiderstand erfasst. Dabei mitberücksichtigt werden das Trägheitsmoment, Blockform und -radius sowie die Untergrunddämpfung. Das Rollen wird bei einem Programm durch kleinste Sprünge approximiert. Zwei der betrachteten Programme unterscheiden nicht zwischen Gleiten und Rollen.
Das Springen wird im Wesentlichen durch die Interaktionen beim Kontakt Sturzkörper/Boden definiert. Bestimmende Faktoren für die meisten Programme sind dabei Einschlagwinkel und -geschwindigkeit, Blockgrösse, Untergrunddämpfung und Effekte durch die elasto-plastische Bodenreaktion (Einschlagtrichter). Die Änderung des Drehmoments beim Kontakt mit dem Boden bzw. der Austausch zwischen Rotations- und Translationsenergie werden berücksichtigt.
Der Wechsel zwischen den verschiedenen Bewegungsarten wird programmbezogen unterschiedlich vollzogen und ist teils nicht eruierbar bzw. nicht im Detail bekannt. Ein plausibler Ansatz für den Übergang vom Springen zum Rollen ist das Verhältnis von Sprunghöhe und Blockgrösse.

Stillstandkriterium
Der Abbruch der Modellierung, d. h. die letzten Meter eines sich bewegenden Blockes, erfolgt über die vom Benutzer teils frei definierbare Abbruchgeschwindigkeit. Bei zwei der betrachteten Programme ist das Stillstandkriterium nicht offen gelegt.

6.3 Darstellung der Resultate

Darstellung
Die 2D-Modelle stellen die Resultate als Histogramme und/oder Summenkurven an frei wählbaren Kontrollquerschnitten oder längs des gesamten Profils dar (Beispiele in Fig. 2). In der Regel werden Energien, Sprunghöhen und Reichweiten bzw. Prozentzahlen der Blockdurchgänge wiedergegeben. 3D-Modelle bilden die Resultate auf Rasterzellen bezogen ab, teils direkt als räumlich konturierte Karten (Beispiele in Fig. 3). Je nach Programm werden unterschiedliche Perzentile abgebildet (z. B. 50%, 80%, 95%). Meist sind diese Werte vorgegeben, in einem Fall aber frei konfigurierbar.

Daten

Die Berechnungsdaten sind in der Regel für jeden berechneten Weg- oder Zeitschritt verfügbar. Gegebenenfalls müssen sie exportiert und in einer anderen Software aufbereitet werden.

Reproduzierbarkeit

Wo keine Zufallsvariablen und/oder Streuungen in die Berechnung einfliessen, liefert lediglich ein Programm prinzipiell reproduzierbare Resultate. Alle anderen Programme generieren Streuungen, welche zu einer pro-

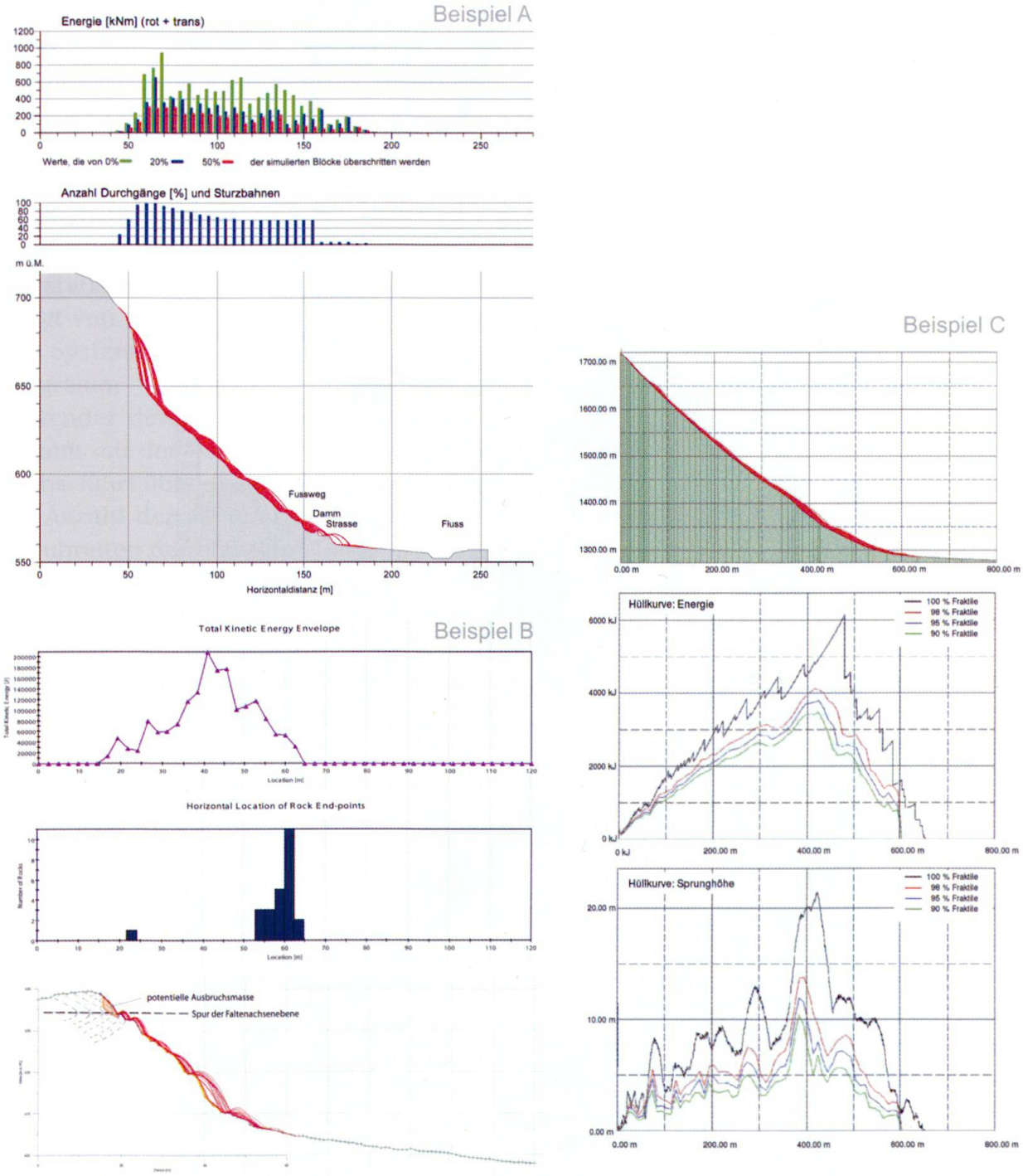

Fig. 2: Praxisbeispiele (ausgewählte Programme) von Darstellungen der Resultate von 2D-Sturzmodellierungen für ein gegebenes Szenario. Abgebildet sind die Hangprofile mit den modellierten Sturzbahnen und die längs dem Profil auftretenden Energien, die prozentualen Sturzkörperdurchgänge (Beispiele A, B) sowie die Sprunghöhen (zusätzlich in Beispiel C). Abgebildete Programme: RocFall (Rocscience Inc.), Rokkfall 7.1 (Dr. Spang), Zinggeler + Geotest (GEOTEST). Beispiele von Anwendern erstellt.

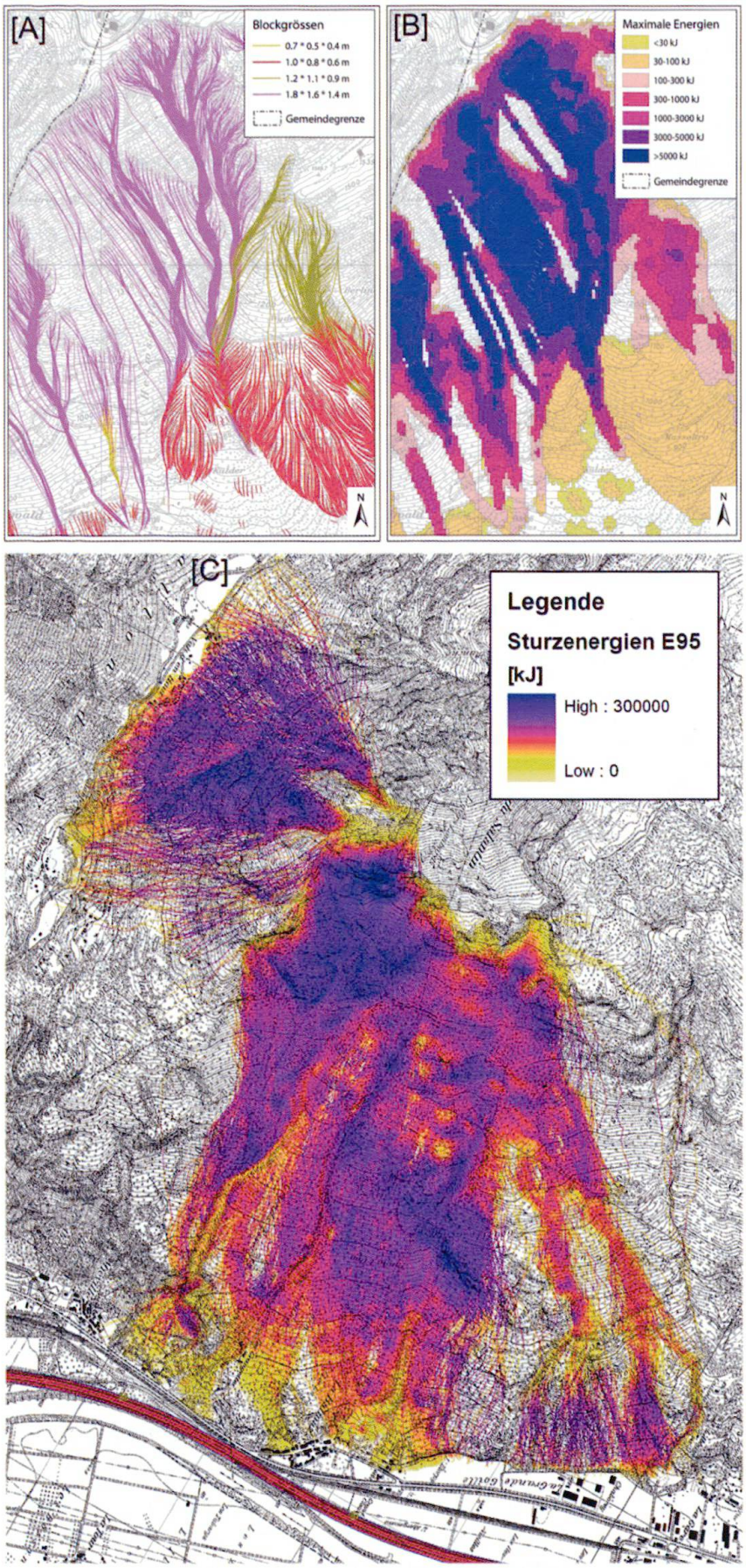

Fig. 3: Darstellung der Resultate von 3D-Sturzmodellierungen. [A] Abbildung mit Trajektorien für die massgebenden Blockgrössen der verschiedenen Liefergebiete; [B] Abbildung der in Klassen zusammengefassten Sturzintensitäten derselben Liefergebiete; [C] Abbildung der Sturzintensitäten (unklassiert). Abgebildete Programme: Rockyfor3D (Dorren), Zinggeler + Geotest (GEOTEST). Beispiele von Anwendern erstellt.

babilistischen Aussage führen. Für eine statistische Reproduzierbarkeit muss eine ausreichend grosse Zahl von Simulationen (Anzahl modellierter Sturzkörper) durchgeführt werden.
In einem der untersuchten Programme ist die Reproduzierbarkeit gegeben, wenn die Streubreite der Parameter (inkl. Startpunkt des Sturzes) auf null gesetzt wird. Ein weiteres Programm erzielt dann reproduzierbare Resultate, wenn der Wald nicht berücksichtigt wird (Zufallsvariable Baumtrefferzentrizität).

6.4 Statistik

Die statistische Streuung der Endresultate hängt von den Variationen der verschiedenen Systemgrössen ab, welche durch das Programm vorgegeben oder durch den Anwender definiert werden. Die Variation beginnt mit der Definition des Ausbruchbereichs, führt über die Sturzkörpergrösse und die Anzahl der simulierten Blöcke zu den Streubreiten der einzelnen Eingabeparameter. Bei einzelnen Programmen spielt zudem auch die Variation der lokalen Hangneigung eine Rolle. Somit kommt auch der Genauigkeit der Erfassung des Hangprofils eine wichtige Bedeutung zu. Es ist davon auszugehen, dass mindestens 100 Simulationen pro Ausbruchzelle erforderlich sind, um statistisch signifikante Ergebnisse zu erzielen. Generell ist festzuhalten: je mehr Variationen bei den Eingabeparametern möglich sind, desto grösser ist die Streuung der Resultate.
Weitere Einzelheiten zu den statistischen Aspekten von Sturzmodellierungen finden sich im Anhang.

7. Umgang mit Unsicherheiten

7.1 Unsicherheiten und Fehler

Allgemeines
Die Erfassung und Beurteilung von Sturzprozessen ist mit Unsicherheiten behaftet. Je grösser die Unsicherheiten, umso grösser ist der Raum für Interpretationen. Es öffnet sich ein Ermessensspielraum, der vom Bearbeiter sorgfältig auszuloten ist (siehe dazu PLANAT 2000). Sturzmodellierungen tragen dazu bei, nicht zuletzt wegen der programmspezifischen Unterschiede.
Neben dem verwendeten physikalischen Modell der verschiedenen Bewegungsarten (Springen, Rollen, z. T. Gleiten) und den dazugehörigen Kennwerten, der Genauigkeit der Geometrie und dem Einbezug des Waldes, muss beim Studium der Funktionsweise der verschiedenen Sturzbahn-Programme auch der Implementierung der Parametervariation die notwendige Beachtung geschenkt werden. D. h. der Benutzer muss die Möglichkeiten der Parametervariation nicht nur kennen, sondern dies auch im konkreten Fall anwenden, um sich auf diese Weise der Realität zu nähern. Die Berechnung von Sturzbahnen weisen generell grosse Unsicherheiten auf, die es zu beurteilen gilt und denen auch bei der Dimensionierung von Schutzbauwerken die notwendige Aufmerksamkeit (sprich Sicherheitsfaktor) beizumessen ist. Einerseits lassen sich beispielsweise die Bodenparameter aus verschiedenen Gründen nicht hinreichend genau eingrenzen (z. B. durch Rückrechnungen). Weitere Unsicherheiten ergeben sich durch die Genauigkeit der Geometrie (2D oder 3D) und durch die Blockgeometrie. Es ist ausserdem zu vermuten, dass für die meisten Parameter – auch in einer als homogen angenommenen Zone - eine zufällige Verteilung der Grösse (des Parameterwertes) in der Natur vorliegt (Dudt & Heidenreich 2001).

Häufige Unsicherheit bzw. Unschärfen
Der Ausführende von Sturzmodellierungen muss sich der Genauigkeit seiner Angaben

Tab. 1: Vereinfachte, zusammenfassende Übersicht der analysierten Programme für Sturzsimulationen (umfassende Übersicht download unter http://www.sfig-gsgi.ch).

Programm (Hersteller)	Rockfall V7.1 (Spang)	Rockyfor 3D (Dorren)	Zinggeler + Geotest (GEOTEST)	RocFall (Rocscience inc.)	Colorado (Col. Dep. of Transp.)	Bemerkungen
käuflich erhältlich	ja	ja (1)	ja (nur 2D)	ja	ja	(1) Mitgliedschaft im Verein ecorsis Q erforderlich, Modell gratis
Berechnungsart (vgl. Kapitel Statistik)						
Berechnung probabilistisch	ja	ja	nein (2)	ja	ja	(2) nur Waldfunktion probabilistisch
Berechnung deterministisch	nein (3)	nein	ja	nein (3)	nein (3)	(3) Standard nein, ja wenn alle Parametervariationen auf 0 gesetzt werden
Berechnungsmöglichkeiten						
2D-Simulationen (Profile)	ja	nein	ja	ja	ja	
3D-Simulationen (flächig auf DGM)	nein (*)	ja	ja (4)	nein	nein	(4) nur durch Hersteller. (*) angekündigt
Prozessart Springen	ja	ja	ja	ja	ja	
Prozessart Rollen	ja	nein (5)	ja	ja	ja	(5) wird als sehr kleine Sprünge gerechnet
Prozessart Gleiten	ja	nein	nein	nein	nein	
Eingabeparamter für Geländeabschnitte (Profillamellen, Geländebereiche)						
Anzahl Einzelblöcke für Berechnung	ja	ja	ja	ja	ja	
Blockform rund: Kugel, Scheibe, Zylinder	ja	ja	ja (6)	ja	ja	(6) Rundungsgrad (rund: Kugel, Ellipsoid)
Blockform eckig, beliebig über 3 Achsen	nein	ja	ja	nein	ja	
Dämpfung (Gleit- und Haftreibung, Elastizität)	ja	ja	ja	ja	ja	
Rauigkeit	ja	ja	ja	nein	ja	
Wald als Dämpfungsfunktion (Filterfunktion)	ja (7)	nein	nein	nein	nein	(7) abhängig von Stammzahl und -dichte
Wald mit Stammdurchmesser und -dichte (Berechnung Interaktion Stein/Baum)	nein	ja	ja	nein	nein	
Datenaufbereitung Eingabeparameter mit GIS für 3d-Simulationen	nein (*)	QGIS	ESRI	nein	nein	(*) 3D-Funktion angekündigt
Parametervariation (Vorgabe, Variation bei Einzelberechnung)						
Ausbruchsort (Punkt, Bereich)	ja (9)	ja (9)	ja (8)	ja (9)	ja (9)	ja = Einfluss auf Ausgabestatistik
Blockgrösse (Variation am Start gegenüber Vorgabe)	ja (9)	ja (9)	nein	nein	nein	
Hangneigung (Variation gegenüber Profilneigung)	ja (9)	ja (9)	nein	nein	ja (9)	(8) Variation deterministisch (fix verteilt über vorgegebenen Bereich)
Dämpfung (Variation gegenüber Vorgabe in Profillamellen)	ja (9)	ja (9)	nein	nein	nein	
Rauigkeit (gegenüber Vorgabe in Profillamellen)	ja (9)	ja (9)	nein	nein	nein	(9) Variation probabilistisch (zufällig verteilt über vorgegebenen Bereich)
Baumdurchmesser (Variation in vorgängig fixierter Bandbreite)	nein	ja (9)	ja (9)	nein	nein	
Baum: Trefferzentrizität	nein	ja (8)	ja (9)	nein	nein	
Resultatdarstellung (Trajektorien, Geschwindigkeit, Sprunghöhen, Energie, Blockdurchgang)						
Statistische Verteilung entlang des gesamten Profils	ja	nein	ja	ja	ja	
Statistische Verteilung an fixierter Stelle	ja	nein	nein	nein	nein	
Flächige Datenausgabe	nein (*)	ja	ja	nein	nein	(*) 3D-Funktion angekündigt

bzw. der entsprechenden Unsicherheiten bei der Problemstellung bewusst sein. Er muss im Stande sein, dem Auftraggeber den Einfluss der Unsicherheiten auf die Resultate zu erläutern. Unsicherheiten bzw. Unschärfen zeigen sich beispielsweise in folgenden Bereichen:

- Szenarien, insbesondere bezüglich der Wiederkehrdauer eines Ereignisses (Unsicherheiten bei der Erfassung der ausbrechenden Blöcke und deren Formen);
- Auswahl der repräsentativen Sturzbahn(en) bei 2D-Sturzsimulationen;
- Erfassung des Hangprofils und der Geländeformen (konventionelle zeichnerische Übernahme aus Übersichtsplan oder digitales Geländemodell [unterschiedliche Auflösungen]); die Plausibilität des Profils ist zu kontrollieren, besonders bei langen Profilen ist eine Überprüfung im Detail notwendig;
- Eingabeparameter (Einfluss der Unsicherheit bezüglich Bremsfaktoren des Geländes und des Waldes; programmbedingte Verallgemeinerungen bzw. Vereinheitlichungen);
- Programmbedingte Randbedingungen (probalistischer Ansatz: Parametervariation durch Zufallsgeneratoren, Ungenauigkeiten bei der Berechnung von Grossblöcken, Übergang vom Rollen zum Springen, Stillstandkriterien etc.).

Die Resultate sind stets zu plausibilisieren, anhand der Feldbeobachtungen, dokumentierten Ereignissen und/oder der Pauschalgefällemethode.
Analog zu den Genauigkeitsanforderungen ist klar und nachvollziehbar festzuhalten, gestützt auf welche Grundlagen, Überlegungen und Absprachen eine Gefahrenbeurteilung oder Dimensionierung einer Massnahme vorgenommen worden ist. Eine Möglichkeit, Unsicherheiten zu klassifizieren, zeigt Tab. 5.1 in Teil C von «PLANAT Protect» (Romang et al. 2008). Allerdings liegt dieser Bewertung ein beträchtlicher subjektiver Ermessensspielraum zugrunde.

7.2 Sicherheitsfaktor

Bei geotechnischen Fragestellungen verlangen die verschiedenen Normen (z. B. SIA-Norm 267), dass bei den entsprechenden Berechnungen jeweils Sicherheitsfaktoren mitgerechnet werden, die bei der Dimensionierung eines Werkes zu berücksichtigen sind. Diese Problematik stellt sich grundsätzlich auch bei der Dimensionierung von Schutzbauwerken, wenn diese aufgrund von Sturzmodellierungen vorgenommen wird.
Die Autoren empfehlen aus der Sicht einer einheitlichen Praxis, den für eine Dimensionierung von Schutzbauten grundsätzlich sinnvollen Sicherheitsfaktor einzig bei der Definition der Eingabeparameter zu berücksichtigen. In Analogie zu SIA 267 bieten sich in erster Linie die Eingabeparameter der einzelnen Profilabschnitte (Lamellen) an. Der Sicherheitszuschlag sollte nicht an der Grösse der Sturzkörper ansetzen, weil dadurch eine durch die Untersuchungen im Gelände (Trennflächenanalyse, «stumme Zeugen») erhobene, einigermassen objektivierbare Systemgrösse verändert würde. Zudem ist zu beachten, dass die untersuchten Programme die Zerkleinerung eines Sturzkörpers nicht berücksichtigen und deshalb bezüglich Energien und Reichweiten tendenziell eher pessimistischere Werte errechnet werden. Faktisch entspricht dies einem programm-immanenten Sicherheitszuschlag. Es ist theoretisch denkbar, den Sicherheitsfaktor auch bei der Wahl des für die Bemessung relevanten Perzentils einzubeziehen, je nachdem, welche statistischen Ergebnisse ein Programm überhaupt liefert. So könnte beispielsweise in Absprache mit dem Auftraggeber festgelegt werden, dass ein Schutzbauwerk 98% aller errechneten Prozesseinwirkungen standhalten müsste.
Keinesfalls sollten Sicherheitszuschläge gleich mehrmals (d. h. Profilabschnitte plus Sturzkörpergrössen plus massgebendes Perzentil) vorgenommen werden, weil sich dann die Zuschläge summieren, was zu einer nicht erwünschten Überdimensionierung einer Schutzbaute führt.

Ferner ist zu beachten, dass die Sicherheit einer Schutzbaute nicht einzig in den programmgegebenen Resultaten und den darin allenfalls enthaltenen Sicherheitszuschlägen liegt. Entscheidend sind auch Fragen bezüglich Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit, wie sie in «PLANAT-Protect» behandelt sind (Romang et al. 2008).

8. Folgerungen und Empfehlungen

8.1 Allgemeines

- Sturzmodellierungen stellen eine mehr oder weniger starke Vereinfachung natürlicher Gegebenheiten dar. Ihre Resultate bilden somit keine Realitäten nach, sondern sind als Hilfsmittel zu verstehen, um damit eine möglichst nachvollziehbare Annäherung an die Verhältnisse der Natur abzubilden. In diesem Umstand liegen auch klar die Grenzen von Sturzmodellierungen. Gleichwohl sind Sturzmodellierungen in der heutigen Praxis des Naturgefahrenmanagements unerlässlich, besonders bei der Dimensionierung von Schutzbauten.
- Die hier vorliegenden Angaben liefern lediglich eine Übersicht über die Verschiedenartigkeit der auf dem Schweizer Markt häufig eingesetzten Programme und deren Produkte. Für genauere Aussagen müssten die Programme anhand konkret gerechneter, identischer Fälle miteinander verglichen werden, wozu ein grösserer Aufwand unter dem Beizug erfahrener Modellierer erforderlich wäre.
- Die Empfehlungen gelten grundsätzlich auch für hier nicht betrachtete und insbesondere auch für zukünftige Programme (namentlich auch für 3D-Programme). Die gewissenhafte Arbeit des Modellierers, sei es im Feld bei der Bestimmung der Sturzkörpergrössen und der weiteren Hangparameter, sei es im Büro bei der Plausibilisierung der Modellierungsresultate, ist letztlich der wichtigste und entscheidende Faktor bei den einleitend aufgeworfenen Fragestellungen.

8.2 Erfassung des Systems und der Szenarien

- Wenn immer vorhanden sind hochauflösende digitale Terrainmodelle zu verwenden. Für Gebiete unterhalb 2000 m Höhe steht heute in der ganzen Schweiz das DTM-AV zur Verfügung. Wir empfehlen, für Gebiete unterhalb 2000 m standardmässig das DTM-AV zu verwenden, sofern für die Problemstellung nicht ein detaillierteres DTM zur Verfügung steht. Im Bericht zu den Untersuchungen ist die verwendete topografische Grundlage anzugeben. Das DTM ist allerdings hinsichtlich möglicher Artefakte zu überprüfen (v. a. im Wald).
- Bei der Festlegung der physikalischen Parameter des Transitgebietes sollten genaue Abschnitte definiert und entsprechend der abschnittsbezogenen Gegebenheiten einzeln parametrisiert werden. Gegebenenfalls sind szenarienbedingt ungünstigste Konfigurationen (z. B. gefrorener Boden) anzunehmen. Intervallbereiche, innerhalb derer die Parameter frei (nach Zufallsgenerator) variieren können, sollten möglichst eng definiert werden. In einzelnen Programmen sind solche Parametervariationen möglich, mit entsprechendem Einfluss auf die Statistik.
- Je grösser die Streuung bei den Eingabeparametern ist, umso mehr Simulationen sind für ein bestimmtes Szenario zu rechnen. Dadurch kann eine statistische Konvergenz der Resultate erzielt werden und die Ergebnisse werden aussagekräftiger. Bei Programmen, wo mehrere Parameter pro Einzeldurchgang variiert werden, sind – bei geringer (Standard-) Streuung – pro Szenario mindestens 500 und bei grösserer Streuung entsprechend mehr Durchgänge zu rechnen. Unter Umständen sind 1000 oder mehr Simulationen notwendig.
- Die Szenarien wie auch einzelne Ausnahmen von den üblicherweise getroffenen Vorgaben sind mit dem Auftraggeber abzu-

sprechen. Eine nachvollziehbare Gefahren- und Risikobeurteilung setzt bereits bei der Festlegung der Szenarien ein.

- Sofern Ereignisse bekannt sind, sind die Sturzmodellierungen anhand dieser Ereignisse zu kalibrieren. Wenn später ein Ereignis eintritt, dann sollte es dazu dienen, vorhandene Resultate von früheren Sturzsimulationen zu kontrollieren. Dabei soll es nicht in erster Linie darum gehen, dem früheren Bearbeiter einen allfälligen «Fehler» nachweisen zu wollen, sondern um Verbesserungen vornehmen zu können («lessons learnt»). Aus den Erfahrungen am einzelnen Hangprofil können durchaus auch generelle Erfahrungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen hervorgehen. Zudem ist klar, dass sich bei einer Überprüfung am konkret eingetretenen Ereignis die Frage stellt, inwieweit die einschlägigen Sachregeln und der Ermessensspielraum bei der ursprünglichen Beurteilung eingehalten worden ist. Auftraggeberseitig muss akzeptiert werden, dass gerade beim Umgang mit Naturgefahren verschiedene Unsicherheiten bestehen und die Ermessensspielräume des Naturgefahrenspezialisten relativ gross sein können. Es muss deshalb die Bereitschaft bestehen, für Kontrollen die entsprechenden finanziellen Mittel verfügbar zu machen.
- Im Bericht ist klar festzuhalten, inwieweit die modellierten Resultate a] anhand eines Ereignisses kalibriert werden konnten, b] Übereinstimmungen mit dem Ereigniskataster und c] mit den Feldbefunden («stumme Zeugen», Geländeanalyse) bestehen.

8.3 Resultate der Modellierungen

- Der Vergleich der verschiedenen wichtigsten Programme zur Simulation von Sturzprozessen zeigt, dass diese untereinander nicht 1:1 vergleichbar sind. Werden bezüglich Szenarien und Sturzbahneigenschaften identische Sturzprofile mit verschiedenen Programmen berechnet, so können unterschiedliche Resultate entstehen. Beispielsweise entspricht die 95-Perzentile bei Programm A nicht jener bei Programm B.
- Von den untersuchten Programmen liefert nur eines reproduzierbare Resultate. D. h. bei nicht veränderten Einstellungen liefert dieses bei einem neuen Rechendurchgang dieselben Resultate hinsichtlich Reichweiten, Energien und Sprunghöhen.
- Aus den im Anhang dargelegten statistischen Aspekten gehen folgende wesentlichen Punkte hervor:
  - Das genaue Verständnis des jeweiligen Programmes ist bei der Beurteilung der probabilistischen Berechnung sehr wichtig (Verteilfunktion der Parameter etc.).
  - Die Streubreite der Resultate hängt natürlich entscheidend von der Streubreite der einzelnen eingegebenen Parameter ab, deshalb müssen realistische Streubreiten der Parameter verwendet werden.
  - Die mit einer Sturzbahnanalyse berechneten Resultate liegen ebenfalls in einer Wahrscheinlichkeitsfunktion vor.
  - Die sinnvolle Anzahl der zu simulierenden Sturzkörper hängt bei einer probabilistischen Berechnung von der im Profil vorhanden Streubreite ab. Je höher die Streubreite, desto mehr Sturzbahnen sollten berechnet werden.
  - Soll ein Einbezug eines Sicherheitsfaktors bei der Dimensionierung von Schutzbauwerken verwendet werden, ist es von entscheidender Bedeutung, ob die Sturzbahnen deterministisch oder probabilistisch durchgeführt wurden.
- Aufgrund ihrer eigenen Erfahrungen gehen die Autoren der vorliegenden Studie davon aus, dass die massgebenden Werte bei Gefahrenbeurteilungen und für die Bemessung von Schutzbauten im Regelfall durch die Kurvenbereiche abge-

deckt werden, welche durch den Mittelwert und die doppelte Standardabweichung definiert sind (Normalverteilung vorausgesetzt), was einem Vertrauensniveau von ~ 95% entspricht. Der 95%-Wert ist äquivalent zum «charakteristischen» Wert einer geotechnischen Grösse nach SIA 267. Unter Berücksichtigung der erwähnten programmspezifischen Unterschiede können als letztlich massgebende Kurvenbereiche jene zwischen 90 und 98% Perzentilwerten betrachtet werden. 2-10% der Werte können somit als mutmassliche «Ausreisser» oder extreme Ereignisabläufe bezeichnet werden, welche bei den meisten Anwendungen vernachlässigbar sind. Bei der Ausarbeitung von Gefahrenkarten können sie allenfalls als Argument für die Ausscheidung eines Restgefährdungsbereichs herangezogen werden, vor allem wenn starke Sturzintensitäten vorliegen.

8.4 Praxis

- Sturzmodellierungsprogramme sind wichtige, unverzichtbare Hilfsmittel, welche allerdings mit der notwendigen Sorgfalt einzusetzen sind. Die Resultate sind immer aufgrund der Feldbefunde und bekannten Ereignisse zu plausibilisieren. Vorsicht ist beim Vergleich der Resultate verschiedener Programme angebracht, da diese aus verschiedenen Gründen unterschiedliche Ergebnisse liefern.
- Sturzmodellierungen, einschliesslich der vorgängigen Felduntersuchungen, sind durch qualifizierte Fachperson durchzuführen. Die Ergebnisse sind durch einen weiteren, mit dem jeweiligen Programm gut vertrauten Fachspezialisten beurteilen oder zumindest kontrollieren zu lassen (4-Augen-Prinzip).
- Sturzmodellierungen für Gefahrenkarten oder Schutzbautenbemessungen erfordern zwingend eine vorgängige Feldbegehung. Für eine sorgfältige Beurteilung eines einzelnen Sturzprofils von ca. 300 m horizontaler Länge in einem von Fuss zugänglichen Gelände muss von einem Aufwand von approximativ 1 bis 2 Arbeitstagen ausgegangen werden (Feldaufnahmen, Beschaffung Unterlagen, Modellierung und Plausibilisierung; exkl. Berichterstattung). Werden in einem Gebiet zugleich mehrere Hangprofile analysiert, so können sich selbstverständlich wesentliche Synergien ergeben. In solchen Fällen kann indes angenommen werden, dass der Nettoaufwand für ein einzelnes Profil realistischerweise nicht unter ½ Arbeitstag liegen dürfte.
- Bei der Submission von Arbeiten, bei denen Sturzmodellierungen Bestandteil des Auftrags sind, ist aus Vergleichsgründen zu empfehlen, auftraggeberseitig eine feste Anzahl von mittels Sturzmodellierung zu bearbeitenden Hangprofilen vorzugeben (oder eine entsprechende Spezifikation für 3D-Modellierungen).

Dank

Verschiedene Personen haben durch die Lieferung von Unterlagen, durch Auskünfte oder durch die kritische Durchsicht des Manuskripts zum Zustandekommen des vorliegenden Artikels beigetragen, namentlich Luuk Dorren, Christoph Spang, Marco Schwab, Manfred Thüring, Lorenz Guldenfels, Robert Pfeiffer, Bernard Loup, Hugo Raetzo und Hansrudolf Keusen. Ihnen sei an dieser Stelle bestens gedankt.

Glossar

Deterministischer Ansatz: Alle Parameter sind fix vorgegeben. Die Berechnung ergibt ein reproduzierbares Resultat.

Lamelle: In sich als homogen betrachteter Abschnitt auf einer Sturzbahn, der sich von anderen Abschnitten durch unterschiedliche Hangeigenschaften unterscheidet.

Probabilistischer Ansatz: Für einige oder alle Parameter werden Streubereiche oder Verteilfunktionen definiert. Pro Einzeldurchgang wählt der Algorithmus nach dem Zufallsprinzip beliebige Werte aus dem Streubereich. Dadurch wird ein funktionaler Zusammenhang zur Beschreibung der Unsicherheit der Eingangsgrösse eingeführt. Die Wahl der Verteilungsfunktion (Normal-Verteilung, Uniform-Verteilung) kann für die Berechnung von entscheidender Bedeutung sein. Die Berechnungen liefern entsprechend Resultate mit Streubereich. Die Berechnungen sind nur innerhalb statistischer Grenzen reproduzierbar.

Randbedingungen: Sämtliche Eingabegrössen, welche für die Berechnung verwendet werden.

Schar von Sturzbahnen: Durch Änderung der Randbedingungen/Eingabeparameter entstehen mehrere Sturzbahnen, welche sich in ihrem Verlauf unterscheiden und charakteristisch für ein gefordertes Szenario sind.

Modellierung: Vereinfachtes Nachbilden einer komplexen Situation oder eines komplexen Systems, um einen Nachvollzug und eine Prognose vorzunehmen. In einer Modellierung können mehrere Sturzbahn-Modellläufe enthalten sein.

Sturzbahn (auch Trajektorie): Verlauf eines einzelnen Sturzkörpers unter bestimmten Randbedingungen.

Sturzbahn-Modellierung: Nachbildung/Berechnung eines Szenarios mittels mehrerer Sturzbahnen (äquivalent: Sturzmodellierung, Sturzsimulation).

Szenario/Szenarien: Konkrete Randbedingungen, welche mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in der Natur vorkommen, beobachtet oder erwartet werden bzw. einen hypothetischen Ablauf eines Gefahrenprozesses bestimmen.

Wahrscheinlichkeitsfunktion: Eine Wahrscheinlichkeitsfunktion beschreibt im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung eindeutig ein Zufallsexperiment. Sie gibt für jeden Ausgang des Zufallsexperiments dessen Auftretenswahrscheinlichkeit an.

Bibliografie

BAFU, Bundesamt für Umwelt 2007: Fachspezifische Erläuterungen zur Programmvereinbarung im Bereich Schutzbauten und Gefahrengrundlagen. Handbuch NFA im Umweltbereich, Teil 3, Anhang A5 (download: http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00088/).

Bründl, M. (Ed.) 2009: Risikokonzept für Naturgefahren – Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern, 420 S.

BUWAL, BWG 1995: Naturgefahren, Empfehlungen: Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene. Reihe Naturgefahren, EDMZ Bern, 20 S.

BWW, BRP, BUWAL 1997: Empfehlungen zur Berücksichtigung von Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Reihe Naturgefahren, Bern, 1997, 42 S.

Dorren, L. K. A. 2011: Rockyfor3D (v4.0) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper, www.ecorisq.org. 28 p.

Dudt & Heidenreich 2001: Treatment of the uncertainty in a three-dimensional simulation for rock falls. International Conference of Landslides Davos, pp. 507–514.

EconoMe 2.1: www.econome.admin.ch

Gerber 1994: Beurteilung des Prozesses Steinschlag. FAN-Kurs 1994, Poschiavo. WSL Birmensdorf.

Giamboni, M., Wehrli. A., Losey, S. 2008: Simulation von gravitativen Naturgefahren für das Schutzwaldmanagement in der Schweiz: das Projekt SilvaProtect-CH. Bull. angew. Geol. 13/2, 83–95.

Kienholz, H., Gosteli, G., Fässler, M., Aeberhard, S. 2008: Fachtechnische Analyse der Gefahrengrundlagen. In: Bezzola, G. R. & Hegg, C. (Hrsg.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825, 197–219.

PLANAT 2000: Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Beurteilung von Naturgefahren im Sinne der Wald- und Wassergesetzgebung. 2/2000. (download: http://www.planat.ch/ressources/planat_product_d_6.pdf).

Romang H., Böll A., Bollinger D., Hunzinger L., Keusen H. R., Kienholz H., Koschni A., Margreth S. 2008: Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung. Umsetzung der Strategie Naturgefahren Schweiz: Einzelprojekt A 3. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bern (PLANAT «PROTECT»)

Rouiller, J. D., Marro, Ch. 1997: Application de la méthodologie MATTEROCK à l'évaluation du danger lié aux falaises. Eclogae geol. Helv. 90/3, 393-399.

Spang C., Romunde B., Waldecker J., Ganser H. 2008: Entwurf und Bemessung von Steinschlagschutzzäunen mit ROCKFALL 7.1, Fels- und Hangsicherung Müden II / Computerorientierte Geologie der ÖGG Universität Salzburg.

Spang R. M. & Romunde B. 2005: Simulation von Steinschlagprozessen mit Berücksichtigung von Blockgrösse und Waldeinfluss. – FAN Forum, ETH Zürich.

Stahel W. A. 2002: Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, Braunschweig/Wiesbaden.

Anhang: Deterministische vs. probabilistische Berechnungen bei Sturzbahnsimulationen (H. Rovina)

I. Variation der Eingabeparameter

Um mittels einer Sturzbahn-Berechnung eine Schar von verschiedenen Sturzbahnverläufen zu erreichen ist es notwendig, gewisse Grössen während jedem Berechnungslauf zu variieren. Dies kann entweder durch einen vorgegebenen Raster von Eingabeparameter-Werten erreicht werden (z. B. der Startpunkt der Sturzblöcke wird entlang einer vorgegebenen Linie oder eines Rasters definiert) oder unterschiedliche Sturzbahnen können mittels einer statistischen Variation von einem oder mehreren Parameter-Werten erreicht werden. Bei den meisten hier vorgestellten Programmen können einzelne oder die meisten Parameter-Werte mittels einer statistischen Verteilung variiert werden (Fig. 4).

II. Wahl der Verteilfunktion

Bei probabilistischen Berechnungen kommt zusätzlich zur bereits relativ schwierigen Bestimmung der Parameterwerte eine weitere Schwierigkeit hinzu: Für den zu variierenden Parameterwert muss zusätzlich noch eine realistische Verteilfunktion sowie die für die jeweilige Verteilfunktion notwendigen Kennwerte eingegeben werden (z. B. Mittelwert μ und Standardabweichung σ bei normal verteilten Parametern, Maximum und Minimum bei uniformen Verteilungen). Bei einzelnen Programmen - wie z. B. Rockfall von Dr. Spang – kann die Verteilfunktion nicht gewählt werden; alle Parameterwerte werden standardmässig mit einer uniformen Verteilung zufällig variiert. Beim Programm Eboul der EPFL können hingegen verschiedene Verteilfunktionen verwendet werden (Fig. 5).

III. Art und Weise der Parametervariation

Es ist wichtig zu wissen, welcher Parameter in welchem Berechnungsschritt zufällig variiert wird: die Blockgrösse wird zum Beispiel meist zu Beginn einer Sturzbahn festgelegt und bleibt während der gesamten Sturzbahn konstant; für die Bodenparameter ist es denkbar, dass – auch in einer homogenen Schicht – entweder bei jedem Bodenkontakt oder bei jeder Änderung der Bodenlamelle ein neuer Parameterwert generiert wird. Je nach Algorithmus des Programmes spielt unter Umständen auch die Lamellenbreite einer Bodenschicht eine wesentliche Rolle. Da aufgrund der heutigen digitalen Geländemodelle (DGM) generell engmaschige Profilstützpunkte verwendet werden, wird die Sturzbahn in zahlreiche Lamellen aufgeteilt. Diesen Lamellen wird bei den meisten Programmen jeweils

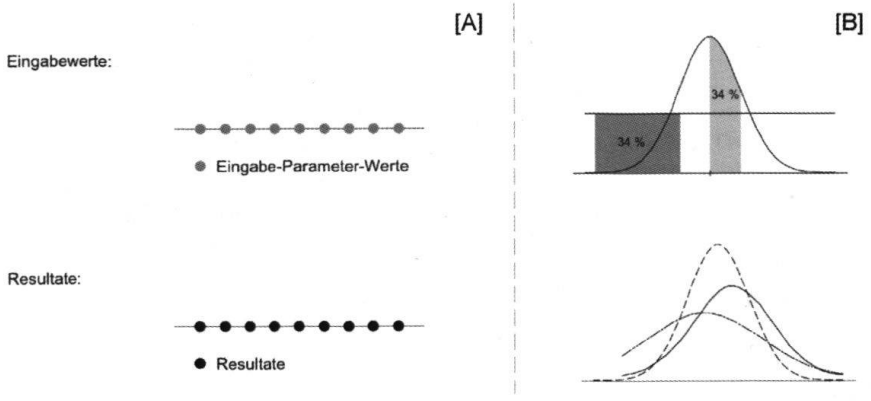

Fig. 4: Variation der Eingabeparameter. Die Variation der Eingabeparameter kann entweder entlang eines vorgegebenen Rasters erfolgen [A] oder die Parameter werden mittels einer statistischen Verteilung variiert [B]. Die Resultate sind wiederum entlang eines Rasters verteilt [A] oder folgen einer statistischen Verteilung [B].

ein Bodentyp zugeordnet, welche über einen gewissen Bereich gleiche Parameterwerte aufweisen können («Homogenzone»).
Werden die Sturzbahnresultate der in Fig. 6 vorgestellten Profile verglichen (Programm Rockfall, Dr. Spang), stellt man fest, dass bei Variante A eine grössere Streuung der Resultate berechnet wird, obwohl man eventuell erwartet hätte, dass beide Varianten dieselben Resultate liefern würden. Dies liegt daran, dass beim Start eines Blockes die Bodenparameter für jede Lamelle innerhalb der eingegebenen Grenzen zufällig variiert werden. Extreme Bodenkennwerte wirken sich daher stärker aus, da der Bodenkontakt mehrmals mit den extremen Bodenparametern berechnet wird. Bei vielen schmalen Lamellen nähert sich eine Grösse eher dem Mittelwert an. Die Streuung der Resultate ist dementsprechend kleiner.

IV. Deterministische und probabilistische Berechnungen

Es ist zu beachten, dass bei Programmen, die eine probabilistische Vorgehensweise ermöglichen, auch eine rein deterministische Berechnung möglich ist. Die Nachvollziehbarkeit einer deterministischen und einer probabilistischen Berechnung ist anders zu beurteilen. Bei einer deterministischen Berechnung wird nach jedem Berechnungslauf dieselbe Schar von Sturzbahnen berechnet. Bei einer probabilistischen Berechnung ist dies nicht mehr der Fall. Erst bei einer genügend grossen Anzahl von Sturzblöcken ergeben sich bei verschiedenen Berechnungsläufen vergleichbare Verteilungen der Resultate. Das Resultat besteht nicht wie bei der deterministischen

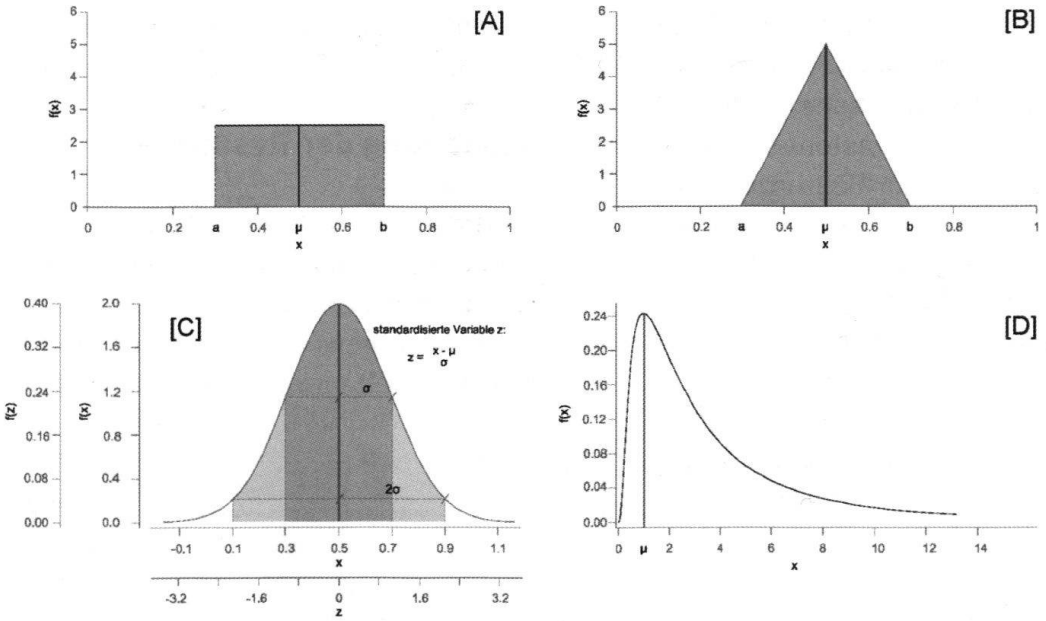

Fig. 5: Darstellung verschiedener Verteilfunktionen: [A] Uniforme Verteilung mit Wertebereich: $0.3 \leq x \leq 0.7$ und Mittelwert $\mu = 0.5$. Die uniforme Verteilung besitzt auf dem gesamten Intervall (a, b) eine konstante Wahrscheinlichkeitsdichte. Dies bedeutet, dass alle Werte in diesem Intervall dieselbe Wahrscheinlichkeit besitzen. [B] Dreiecksverteilung mit Wertebereich: $0.3 \leq x \leq 0.7$ und Mittelwert $\mu = 0.5$. Die Form der Dreiecksverteilung wird durch die Parameter a (minimaler Wert), b (maximaler Wert) und c (wahrscheinlichster Wert) bestimmt. Die Wahrscheinlichkeit eines Wertes nimmt vom wahrscheinlichsten Wert zum maximalen und minimalen Wert jeweils linear ab. [C] Normalverteilung mit Mittelwert $\mu = 0.5$ und Standard-Abweichung $\sigma = 0.2$. Die Wahrscheinlichkeit eines Wertes ist bei der Normalverteilung durch die Form der Glockenkurve bestimmt, wobei es sich beim Mittelwert um den wahrscheinlichsten Wert handelt. In der Grafik sind zur Veranschaulichung die Intervalle im Abstand von 1 und 2 Standardabweichungen vom Mittelwert dargestellt, welche rund 68% bzw. 95.5% der Fläche unter der Glockenkurve umfassen. Die Normalverteilung kann durch Standardisierung der Variable in die Standardnormalverteilung umgewandelt werden. [D] Log-Normalverteilung: Bei der Log-Normalverteilung ist der Logarithmus einer logarithmisch-normalverteilten Zufallsvariable normalverteilt. Es handelt sich bei dieser Verteilung um eine unsymmetrische, schiefe Verteilung, bei der mehr oder weniger tiefe Werte am wahrscheinlichsten sind und hohe Werte bzw. ganz tiefe Werte unwahrscheinlicher sind.

Berechnung aus einer genau definierten Schar von Sturzbahnen, sondern aus einer Verteilung von leicht unterschiedlichen Sturzbahnen. Es ist also darauf zu achten, dass eine genügend grosse Anzahl von Sturzblöcken simuliert wird, um vergleichbare Resultate zu erhalten. Generell kann gesagt werden, dass je grösser die Parameter-Streuung in einem Profil ist, desto grösser muss die Anzahl der zu simulierenden Sturzblöcke sein (Fig. 7).

Wird mit zu grossen Streubreiten der Parameter gearbeitet, weisen die Sturzbahn-Resultate (Sprunghöhen und Energien) ebenfalls eine sehr grosse Streuung auf, die kaum mit der Realität in Einklang gebracht werden können. Daher ist es wichtig, nicht nur vernünftige Werte der Bodenparameter, sondern auch eine möglichst realitätsnahe Streubreite der Parameter vorzugeben.

Nicht nur die mittels Sturzbahnanalysen abgeschätzten Mittelwerte oder Maximalwerte (Reichweiten, Energien, Sprunghöhe), sondern auch deren statistische Verteilung werden häufig für die Dimensionierung von Schutzbauwerken sowie zur Begrenzung von Gefahrenzonen verwendet. Dabei werden häufig gewisse Werte oder gewisse Bereiche der Resultate nicht berücksichtigt. Es kann nach zwei verschiedenen Methoden vorgegangen werden:

- Fall 1: die Werte werden rangiert und für die Dimensionierung werden extreme Werte (sogenannte «Ausreisser») nicht berücksichtigt.
- Fall 2: die Werte werden vorgängig durch eine geeignete Verteilung (z. B. Normalverteilung) beschrieben und für die Dimensionierung der Schutzbauwerke werden nur bestimmte Bereiche der Verteilung (z. B. 98%-Perzentil) verwendet. In diesem Fall werden Ausreisser weniger stark gewichtet, da durch diese lediglich die Lageparameter der Verteilung verschoben werden.

Es ist hierbei wichtig zu unterscheiden, ob die Werte vorgängig rangiert und für die Dimensionierung die höchsten Werte nicht berücksichtigt wurden oder ob die Werte vorgängig durch eine geeignete Verteilung (z. B. Normalverteilung) beschrieben und für die Dimensionierung bestimmte Bereiche der Verteilung (z. B. ausserhalb des 98%-Perzentilbereichs) nicht einbezogen wurden.

V. Beurteilung der Resultate

Im Grunde genommen wird mit einer Sturzbahnberechnung das Sturzverhalten eines einzigen Sturzkörpers berechnet. Die mit den Modellierungen gewonnenen Resultate entsprechen generell immer einer Wahrschein-

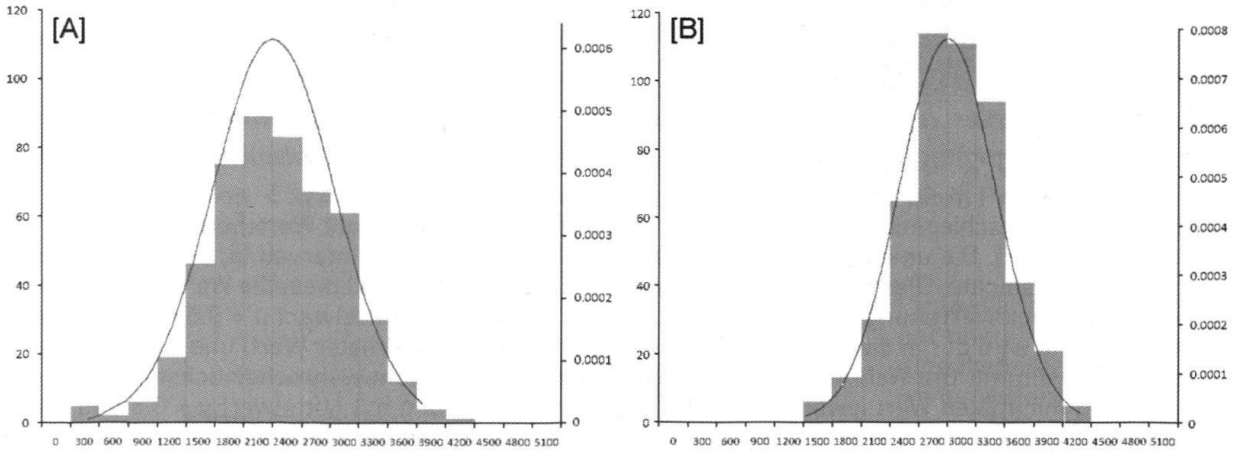

Fig. 6: Vergleich der totalen Energien von zwei Sturzbahnprofilen mit gleichen Bodenparametern («Homogenzone»), aber unterschiedlicher Lamellenbreite (Variante A: Lamellenbreite ca. 50 m; Variante B: Lamellenbreite < 5 m). Die Berechnung wurde mit 500 Blöcken unter Variation der Bodenrauigkeit durchgeführt. In den Diagrammen sind jeweils das Histogramm sowie die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung dargestellt (Abszisse: Energie in kJ; Ordinate links: Anzahl Blöcke, Ordinate rechts: Normalverteilung, Wahrscheinlichkeitsdichte). Der Mittelwert der Normalverteilung ist bei Variante B etwa 600 kJ grösser als bei A.

lichkeitsverteilung, welche einer Verteilungsfunktion (unter Umständen der Normalverteilung) zugeordnet werden kann. So können beispielsweise Aussagen gemacht werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Sturzkörper eine bestimmte Energie erreicht. Um in einem konkreten Fall Aussagen über das Eintreffen eines bestimmten Wertes machen zu können, muss zusätzlich zu einer Sturzbahnanalyse die Wahrscheinlichkeit eines Sturzkörperabbruchs in der Natur abgeschätzt werden (Ereignisanalyse) und mit den Resultaten der Sturzmodellierung kombiniert werden. Ein Beispiel: eine Sturzbahnanalyse ergibt eine normal verteilte Sprunghöhe von 2.8 m bei ca. 2 Standardabweichungen (98%-Perzentil), was bedeutet, dass 98% aller Blöcke eine kleinere Sprunghöhe als 2.8 m haben. Wenn jedes Jahr 10 Sturzkörper gleicher Grösse und Geometrie zum Absturz gelangen, bedeutet dies, dass circa alle 5 Jahre mit einer Sprunghöhe von > 2.8 m zu rechnen ist (2/100 × 10 Blöcke pro Jahr = 2/10 pro Jahr → alle 5 Jahre ein Sturzkörper).

Die Resultate von Sturzbahnanalysen können im Sinn der SIA 261 (Einwirkungen auf Tragwerke) als «Einwirkungen» (eventuell als «aussergewöhnliche Einwirkungen», 261/1, Kap. 7) betrachtet werden. Dabei sind je nach Wahrscheinlichkeit der Einwirkung unterschiedliche oder keine Partialsicherheitsfaktoren anzuwenden. Bei einer probabilistischen Berechnung wird durch die Eingabe der Verteilung der Eingabeparameter bereits eine Art Sicherheitsfaktor in die Sturzbahnberechnung mit einbezogen, ähnlich wie dies mit der Methode der Partialsicherheitsfaktoren in der Geotechnik der Fall ist. Bei einer deterministischen Berechnung können die Unsicherheiten in der Parameterwahl kaum berücksichtigt werden, es sei denn, es wird mit vorsichtig geschätzten Eingabeparametern gerechnet. Dies ist jedoch schwierig zu realisieren, da beispielsweise eine Erhöhung bzw. eine Abminderung eines Parameterwertes sowohl eine verstärkende, als auch eine abmindernde Wirkung auf die resultierenden Sturzenergien haben kann.

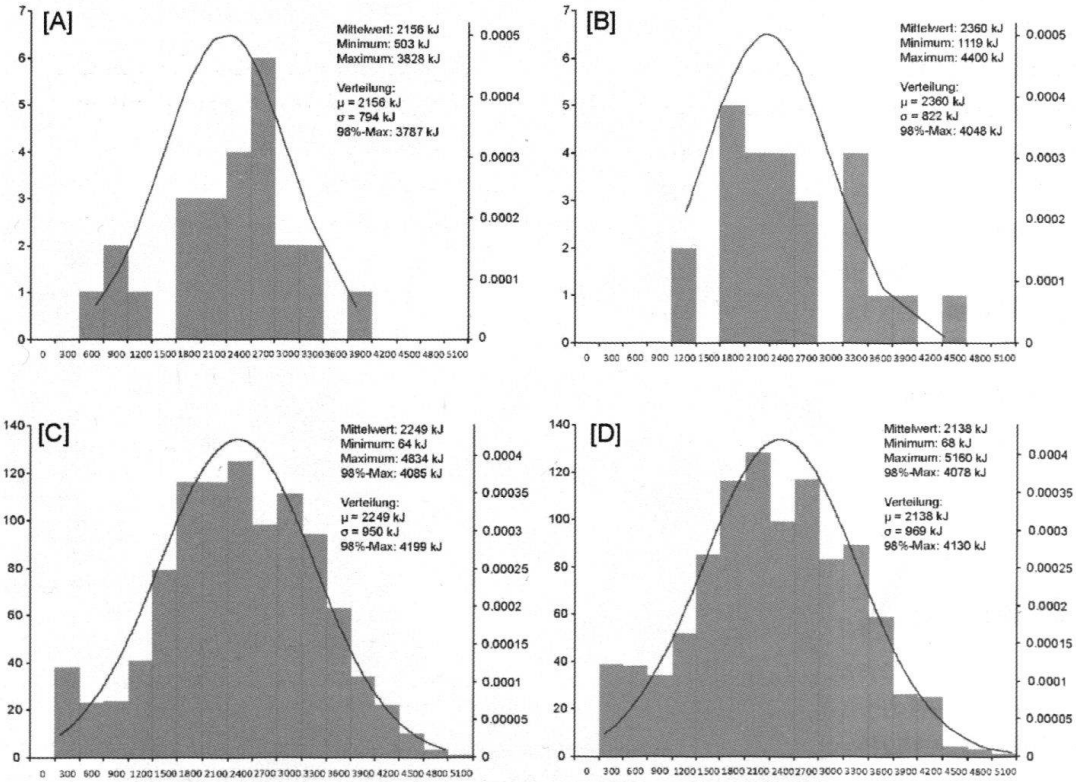

Fig. 7: Einfluss der Anzahl modellierter Sturzblöcke bei gleicher Lamellenbreite: Die Modellierungen A und B wurden mit jeweils 25 Blöcken, die Modellierungen C und D mit 1000 Blöcken durchgeführt. In den Diagrammen sind jeweils das Histogramm sowie die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung dargestellt.

1. Rüdlingen, Schweiz
2. Giampilerie, Italien
3. A83 "Rest and be Thankful", Schottland

Mensch und Infrastruktur vor Hangmuren schützen

In nicht kanalisierten Hängen schützen flexible Hangmuren-Barrieren vor oberflächennahen Rutschungen:

- leichte Bauweise
- einfache Installation
- Funktion in umfangreichen Grossfeldversuchen nachgewiesen
- projektspezifisch dimensionierbar mit FARO Simulation
- Runsen im gleichen Streckenabschnitt werden mit flexiblen Murgang-Barrieren gesichert

Lesen Sie mehr in unserer Fotodokumentation "A83 Rest and be Thankful - Schottland" und / oder besprechen Sie Ihre Bedürfnisse mit unseren Spezialisten.

GEOBRUGG®
BRUGG

Geobrugg AG
Schutzsysteme
Aachstrasse 11 • CH-8590 Romanshorn
Tel. +41 71 466 81 55
Fax +41 71 466 81 50
info@geobrugg.com
www.geobrugg.com