

LUUK DORREN, BERNARD LOUP, HUGO RAETZO

Einsatz von Modellen in der Schweizer Sturzgefahrenbeurteilung

Application of models in Swiss rockfall hazard analyses

Zusammenfassung:

In der Schweiz bilden numerische Modellierungen ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Beurteilung von Sturzgefahren. In diesem Artikel präsentieren wir, wie diese Gefährdung in der heutigen Praxis berücksichtigt wird und welche Rolle die Modelle einnehmen. Zu Beginn behandeln wir die Schweizer Anforderungen und den Arbeitsablauf bei der Beurteilung von Sturzgefahren. Dabei diskutieren wir Aspekte der Transparenz bei der Anwendung von Modellen, sowie Vorteile und Beschränkungen von verschiedenen 2D und 3D Modellen. Unser Fazit ist, dass die Durchführung der Sturzmodellierung der Aufgabenstellung angepasst werden muss. Die Rolle des Modellbenutzers ist entscheidend für die Gefahrenbeurteilung. Darum soll klarer und nachvollziehbarer festgehalten werden, welche Grundlagen, Annahmen und Überlegungen zur Sturzgefahrenbeurteilung geführt haben.

Stichwörter:

Steinschlag, Felssturz, Simulation, Gefahrenanalyse, Anforderungen

Abstract:

In Switzerland, numerical models are an indispensable tool in the evaluation of rockfall hazards. In this article we present how rockfall hazards are being assessed in today's practice in Switzerland as well as the role played by models in this process. Therefore we present the Swiss requirements for hazard assessment, as well as a work flow for rockfall modelling. We discuss aspects of transparency in the use of models and the advantages and limitations of various 2D and 3D models. Our conclusion is that the realisation of a rockfall modelling study needs to be adjusted to the scope of the hazard analysis. The role of the model user is crucial for the outcomes of the hazard assessment. Therefore, it needs to be declared on which assumptions, considerations and agreements a rockfall hazard assessment has been performed.

Keywords:

Rockfall, rock avalanche, simulation, hazard analysis, requirements

Einleitung

Sturzgefahren (z.B. Steinschlag, Felssturz) stellen in vielen Bereichen unterhalb von Felswänden Probleme dar. Um die Gefahren zu beurteilen, ist es nicht nur erforderlich die Eintretenswahrscheinlichkeit, sondern auch die Intensität sowie die Reichweite der möglichen Sturzereignisse festzulegen. Daher bilden numerische Modellierungen ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Beurteilung von Sturzgefahren. Sie gelangen primär zum Einsatz bei der Erstellung von Naturgefahrenkarten, wo sie eine wichtige Grundlage für das integrale Risikomanagement bilden. In dessen Vordergrund stehen einerseits raumplanerische Massnahmen im Siedlungsgebiet (Ausscheidung von Gefahrenzonen in der Zonenplanung, gegebenenfalls Spezifikationen im Baureglement). Andererseits sind Gefahren- und Risikoanalysen auch für Verkehrswege und Einzelobjekte notwendig. Zudem sind Modellierungen hilfreich bei der Dimensionierung neuer Schutzbauten und bei der Beurteilung der Wirksamkeit bestehender Schutzbauten (Rovina et al., 2011).

In diesem Artikel präsentieren wir, wie Sturzgefahren in der heutigen Praxis in der Schweiz beurteilt werden und welche Rolle die Modelle einnehmen. Der Rahmen für diese Gefahrenbeurteilungen wird seit 1997 durch die Bundesempfehlung "Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten" (BRP/BWW/BUWAL, 1997; Raetzo & Loup, 2011) gegeben. Diese Empfehlung wurde überarbeitet und wird demnächst in einer neuen Richtlinie (BAFU, im Druck) publiziert. Die Grundprinzipien werden beibehalten. Mit dieser neuen Richtlinie wird unter anderem eine einheitlichere Beurteilung von Sturzgefahren angestrebt. Sie präzisiert, wie das für Sturzgefahren relevante Waldgesetz umgesetzt werden soll. Sie dient deshalb allen Akteuren, die in der Prävention vor Sturzgefahren tätig sind. Einige Prinzipien dieser Richtlinie und die Anforderungen bei der Gefahrenbeurteilung werden in diesem Artikel präsentiert. Zusätzlich erläutern wir den Arbeitsablauf, die Geländearbeit, die Transparenz von Modellen, die Vorteile und mögliche Beschränkungen von verschiedenen 2D- und 3D-Modellen.

Definitionen der Sturzprozesse

Das Ablösen von Fest- und/oder Lockergestein in steilem Gelände wird als Sturzprozess bezeichnet. Das Material bewegt sich frei fallend, springend, rollend oder fliessend in die Tiefe. Sturzprozesse sind schnelle Massenbewegungen. In der Schweiz werden vier Kategorien (Tabelle 1) gegliedert nach Volumen und Komponentengrösse unterschieden:

1. Steinschlag
2. Blockschlag
3. Felssturz
4. Bergsturz

| Prozess | Durchmesser der Komponente | Volumen | Bemerkung |
|-------------|----------------------------|---|---|
| Steinschlag | < 50 cm | - | I.d.R. Einzelsteine pro Ereignis |
| Blockschlag | ≥ 50 cm | ≤ 100 m ³ | I.d.R. Einzelblöcke pro Ereignis |
| Felssturz | - | > 100 m ³ ≤ 1 Mio. m ³ | Felssturzmasse, i.d.R. Sturz einer Vielzahl von Fels- und Gesteinsblöcken, anschliessend Fragmentierung |
| Bergsturz | - | > 1 Mio. m ³ | Initialphase mit kompakter Bergsturzmasse |

Tab. 1: Sturzprozesse gemäss Schweizer Definition.

Tab. 1: Swiss rockfall definitions.

Steinschlag ist in den Alpen ein häufiger Prozess. Da die Sturzbahnen (Trajektorien) und Energien von kleinen und grossen Gesteinskörpern sehr viel variieren, ist eine Unterscheidung der Grösse mit der Masse oder dem Durchmesser von Bedeutung. Beim Zerfall einer Felswand spricht man bei kleinen Gesteinsbruchstücken (Durchmesser < 50 cm) von Steinschlag, bei grossen Bruchstücken (Durchmesser > 50 cm) von Blockschlag. Die Gesteinsart, Exposition, Frostwirkung und Verwitterung sind wichtige Bedingungen für diese Prozesse. Die Sturzeschwindigkeiten im Transitgebiet liegen in der Regel zwischen 5 und 30 m/s.

Bei Felssturz handelt es sich um ein grö-

seres, in sich mehr oder weniger stark fragmentiertes Gesteinspaket das sich aus dem Gebirge löst. Das Materialvolumen beschränkt sich im Allgemeinen auf 100 bis mehrere 100'000 m³ pro Ereignis. Die Transportgeschwindigkeiten in Transitgebieten liegen in der Regel zwischen 10 und 40 m/s. In den Schweizer Alpen ereignen sich jedes Jahr mehrere Felsstürze.

Bei einem Bergsturz brechen grossvolumige Gesteinsmassen im Verbund ("en bloc") aus dem Gebirge. Kennzeichnend sind grosse Materialvolumen bis mehrere Millionen Kubikmeter, sowie Sturzeschwindigkeiten von über 40 m/s. Das

abgebrochene Gestein kann über weite Distanzen (manchmal mehrere Kilometer) transportiert werden bis es zur Ablagerung kommt. Hier spielen aussergewöhnliche Mobilisierungsphänomene eine Rolle die heutzutage mit unterschiedlichen Theorien erklärt werden. Bergstürze vermögen die Landschaft nachhaltig zu verändern, zum Beispiel indem sie Barrieren für Bäche und Flüsse aufschütten, was die Überflutung von grossen Gebieten zur Folge haben kann. Bergstürze sind relativ selten. In den letzten Jahrhunderten ereigneten sich Bergstürze in der Schweiz in Derborence (18. Jh.), Goldau (19.Jh.), Elm (19.Jh.) und Six des Eaux Froides (bei Sierre, 1946).

Bearbeitungsstufen

Drei Bearbeitungsstufen (M1 bis M3), mit unterschiedlichen Anforderungen, wurden für die Gefahrenbeurteilungen festgelegt (BAFU, im Druck):

M1: Stufe Gefahrenhinweiskarte (grober Massstab, i.d.R. 1:50'000 bis 1:10'000)

M2: Stufe Gefahrenkarte (mittlerer Massstab, i.d.R. 1:10'000 bis 1'5'000)

M3: Stufe Massnahmenstudie (detaillierter Massstab, i.d.R. 1:5'000 bis 1:1'000)

Die höchsten Anforderungen gelten für die Planung von Massnahmen, für Detailstudien und für Gutachten (M3). In diesem Fall sind Unsicherheiten in der Beurteilung möglichst klein zu halten. Im Rahmen der Raumplanung müssen amtlich verbindliche Gefahrenkarten erstellt werden (M2). Auch hier wird ein relativ hoher Standard verlangt, der in seiner räumlichen Genauigkeit bei zirka zehn Metern liegt ("parzellengenau" im Siedlungsbereich). Für Gefahrenhinweiskarten gelten hingegen keine Anforderungen (M1), weil diese vom Gesetz her nicht verbindlich sind und entsprechend der Zielsetzung unterschiedlich erstellt werden.

Gefahrenstufen

Die Gefahrenstufen, die in der Schweiz gehandhabt werden, sind in der Intensität-Wahrscheinlichkeitsmatrix (siehe Abb. 1) definiert. Gemäss diesen Matrix muss für eine Gefahrenkarte die Intensität für das Ereignis, oder Szenario, mit einer hohen, mittleren, geringen und sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit definiert werden. Diese wurden erstmals in BFF/SLF (1984) definiert und beschreiben in der Schweiz:

1. das häufige Ereignis, das man statistisch gesehen mehrmals (bis ungefähr 3 mal) im Leben beobachten kann (Wiederkehrdauer bis ungefähr 30 Jahre),

2. das seltene Ereignis das man statistisch gesehen 1 mal im Leben beobachten kann (Wiederkehrdauer bis ungefähr 100 Jahre),
3. das sehr seltene Ereignis, das grob genommen 10 mal seltener ist als das häufige Ereignis (Wiederkehrdauer bis ungefähr 300 Jahr), und
4. das extrem seltene Ereignis (Extremereignis, Wiederkehrdauer grösser als 300 Jahre, z.B., 500 oder 1000 Jahre).

Das Extremereignis wurde in der Vergangenheit nicht systematisch betrachtet. Die letzten Unwetter haben aber gezeigt, dass der Überlastfall und Extremereignisse für die Risikoanalyse und für die Vorbereitung der Interventionskräfte relevant sind. Bei Hochwassergefahren wird das Extremereignis in der Regel betrachtet. Die statistische Herleitung von Szenarien wird mit zunehmender Wiederkehrdauer, bzw. abnehmender Eintretenswahrscheinlichkeit schwieriger. Sehr seltene Ereignisse und vor allem Extremereignisse sind eher als qualitative Beurteilung einer Wahrscheinlichkeit zu betrachten.

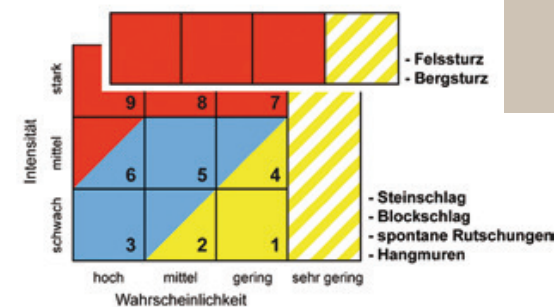


Abb. 1: Die Intensität-Wahrscheinlichkeitsmatrix mit den verwendeten Gefahrenstufen.

Fig. 1: The Swiss intensity-probability matrix with the used hazard classes.

Für Sturzgefahrenbeurteilungen werden oft zusätzlich ein jährliches und ein zehnjährliches Ereignis untersucht. Diese Szenarien sind für die Verkehrswege und die entsprechenden Risikoana-

lysen von Bedeutung. Für die Stufe M1 wird dagegen unabhängig der natürlichen Variationen nur ein einziges Szenario für grosse bis sehr grosse Gebiete definiert (z.B. für 40'000 km²).

Die Intensität wird auch in drei Klassen verteilt: schwach (0- 30kj), mittel (30 – 300 kj) und stark (> 300kj). Diese Intensitätsklassen entsprechen in etwa denen von Mölk (2009) vorgeschlagenen Klassen bei der Ereignisdokumentation von Steinschlägen und Felsstürzen in Österreich. Für Gefahrenhinweiskarten werden in der Schweiz keine Intensitätskarten erstellt.

Transparenz

Die Modellierung alleine ist nicht ausreichend für eine verbindliche Sturzgefahrenbeurteilung auf den Stufen M2 und M3. Dies erfordert einen Arbeitsablauf mit sechs unterschiedlichen Phasen (Dorren et al., 2011, Mölk et al., 2011, Rovina et al., 2011). Die notwendige Darlegung von Annahmen und die Transparenz können nur dann gewährleistet werden, wenn im technischen Bericht für jede der sechs Phasen alles nachvollziehbar festgehalten wird. Die sechs Phasen des Arbeitsablaufes sind:

- A. Vorbereitungsphase
- B. Definition der Szenarien
- C. Sturzmodellierung
- D. Plausibilisierung der Modellergebnisse
- E. Festlegen der maximalen Reichweite
- F. Erstellen der Intensitäts- und Gefahrenkarten

Für eine Gefahrenhinweiskarte (M1) werden eher Rohdaten genutzt und die Phasen D, E und F meistens weggelassen.

Vorbereitungsphase

Während der Vorbereitungsphase müssen in erster Linie die historischen Ereignisse ausgewertet werden, weil diese einen ersten Überblick über das Ausmass und die Häufigkeit der Sturzereignisse vor Ort geben. Hierbei sind der Ereigniskataster, historische Karten (Siegfriedkarten, Dufourkarten), kantonale und kommunale Archive, sowie bestehende Sturzgefahrenbeurteilungen wichtige Grundlagen. Weitere Informationsquellen sind lokale Einwohner und Fachexperten im Gebiet, da sie meistens rezente und häufige Sturzereignisse gut kennen. Alle diese Aufzeichnungen sollen bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft werden. Leider existieren kaum umfassende Aufzeichnungen. Wenn Daten vor Ort fehlen, können Informationen über benachbarte Hänge mit ähnlichen Eigenschaften (z.B. Geologie, Topographie und Oberflächenbeschaffenheit) hilfreich sein. Spezielle Kataster führen die Strassenämter (Tiefbauämter) und die Bahngesellschaften, weil deren Betrieb direkt mit den Ereignissen auf der Infrastruktur behindert wird (Rovina et al., 2011).

Weiter ist es extrem wichtig, das Studiengebiet zu beschreiben und zu kartieren. Das heisst, das Liefergebiet, das Transit- und Ablagerungsgebiet, sowie die bestehenden Schutzmassnahmen müssen lokalisiert und charakterisiert werden. Im Liefergebiet sind die strukturgeologischen Eigenschaften (Trennflächen, Felsstabilität etc.) zu analysieren und im Transit- und Ablagerungsgebiet muss die Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit, Dämpfung) aufgenommen werden. Die Eigenschaften des Waldes müssen aufgenommen werden, weil dessen Wirkung für Steinschlag relevant ist. Dazu gehört die Stammzahl, die Zusammensetzung der Baumarten, die Durchmesserverteilung, sowie die räumliche Verteilung der verschiedenen Waldbe-

stände und Schneisen im Wald. Laserscanningdaten ermöglichen eine automatische Erfassung von Wald und teilweise Stammdaten. (vgl. Persson, 2002; Dorren et al., 2006).

Der Gutachter erstellt auf den Stufen M2 und M3 eine Karte der Phänomene. Dabei müssen alle stummen Zeugen und notwendigen Daten aufgezeichnet werden (Abb. 2): Grösse, Form, Position der abgelagerten Steine, Steinschlagspuren, Einschläge am Boden und in der Höhe, z.B. mittels Erhebung von Steinschlagwunden an Baumstämmen (Schneuwly und Stoffel, 2008). Demnach müssen alle möglichen Schutzmassnahmen (Netze, Dämme, Verankerungen, Barrieren, Galerien, Betonmauer, Leitplanken entlang Strassen, usw.) aufgenommen werden. Hierbei sind die geografische Lage, der Werktyp und die geschätzte Energieaufnahmekapazität, sowie ihre Dimensionen zu beachten.

Die letzte Phase der Vorbereitung beschäftigt sich mit der Erstellung der Daten, die für die Modellierung benötigt werden. Dies beinhaltet die Generierung eines Hangprofils oder eines Digitalen Geländemodells (DGM). Genauigkeit und Qualität des DGMs müssen vorgängig geprüft werden. Weiter braucht es die Zuweisung der benötigten Modellparameter an Polygone oder Rasterzellen (für räumlich kontinuierliche Modelle) oder an Hangsegmenten (für Modelle basierend auf Hangprofile). Die Auflösung des DGMs oder des Hangprofils hat einen grossen Einfluss auf die Modellergebnisse (Azzoni et al., 1995; Crosta und Agliardi, 2003). Für eine Hinweiskarte (M1) ist eine Auflösung von 10-20 m angepasst. Für die Stufen M2 und M3 sollten es 2-10 m sein.

Die Vorbereitungsphase und die Grundlagen müssen der Bearbeitungsstufe Rechnung tragen. Der Aufwand ist auf der Stufe M3 am grössten und entsprechend viel kleiner auf Stufe M1.



Abb. 2: Stumme Zeugen von Sturzereignisse im Schutzwald.

Fig. 2: Silent witnesses of rockfall events in a protection forest.

Definition der Szenarien

Mit den Szenarien beschäftigt wird festgelegt, welche Blockgrössen wo mit welcher Wahrscheinlichkeit abstürzen können. Bei der Bildung der Szenarien ist deshalb eine umfassende und sorgfältige Analyse der Trennflächenverhältnisse im Liefergebiet sowie eine Analyse der beobachteten Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet von Bedeutung (Liniger 2006). Aus der Analyse im Liefergebiet ergeben sich die möglichen Bruchkörper, bzw. ihre Grösse und ihre Form. Die Analyse der Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet gibt weitere Anhaltspunkte, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Sturzkörpergrösse zu erwarten ist. Diese Annahme entspricht einer Extrapolation, die mögliche Veränderungen der Stabilitätsverhältnisse im Einzugsgebiet ausblendet. Veränderungen können beispielsweise klimatischer oder hydrogeologischer Art sein.

Die Ereignisdokumentation sowie die klare Unterscheidung zwischen jungen und alten Sturzkörpern bzw. aktiven und weniger aktiven Ausbruchgebieten bilden wichtige Grundlagen bei der Wahl der Szenarien (Rovina et al. 2011). Bei der Betrachtung abgelagerter Blöcke ist zu beachten, dass sie beim Sturzvorgang möglicherweise in kleinere Teilkörper zerbrochen sind.

Wenn eine komplette Dokumentation der historischen Ereignisse vorliegt, dann können darauf basierende Angaben über die Eintretenswahrscheinlichkeit gemacht werden. Die meisten dieser Aufzeichnungen sind unvollständig, weil dies mit Aufwand verbunden ist und weil man früher Ereignisse schlicht nicht dokumentierte. Eine statistische Herleitung über eine Zeitreihe von Jahrhunderten ist deshalb selten realistisch, weshalb für grosse, seltene, sehr seltene und extreme Sturzereignisse Annahmen der Experten notwendig sind. Dabei bildet die Analyse der Trennflächenverhältnisse und, wenn möglich, auch die Analyse der beobachteten Sturzkörper im Transit- und Ablagerungsgebiet, eine wichtige Grundlage.

Sturzmodelle

Im Bereich der Sturz-Modellierung werden verwendete Modelle häufig in zwei Gruppen aufgeteilt: zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Modelle. Meistens sind 2D Modelle diejenigen, die ein Hangprofil verwenden. 3D steht für völlig unterschiedliche Modellarten. Für einige sind es Modelle, die Sturztrajektorien in einem 3D Raum (x, y, z) berechnen. Für andere sind es Modelle, die ein DGM verwenden. Es gibt leider keinen Konsens für diese Definition. Entscheidend sind die räumlichen Dimensionen, in denen das verwendete Modell die Berechnungen durchführt. Analog der gängigen Praxis verwenden wir hier die Begriffe 2D für die Methodik mit Hangprofilen und 3D für Modelle, die ein DGM verwenden.

Grundsätzlich werden in der Schweizer Praxis drei Modellarten eingesetzt:

1. Geometrische Modelle (2D oder 3D)
2. Trajektorienmodelle (2D oder 3D)
3. Prozessbasierte Felssturzmodelle (2D oder 3D)

Geometrische Modelle beschreiben eine statistische Beziehung zwischen der Fallhöhe und der Länge der Auslaufstrecke. Diese Modelle sind alle auf dem Prinzip des Pauschalgefälles (Heim, 1932) entwickelt worden. Die Grundsätze sowie ihre Möglichkeiten sind in der Literatur ausführlich beschrieben worden (z.B. Körner 1980, Jaboyedoff & Labiouse, 2011). Geometrische Modelle werden in der Praxis sowohl für Steinschläge als für Fels- und Bergstürze eingesetzt. Sie können für ein Hangprofil, oder flächig auf der Basis eines DGMs verwendet werden.

Das gleiche gilt für Trajektorienmodelle. Bei diesen Modellen werden die Sturzbahnen der einzelnen Blöcke (Trajektorien), sowie Energien, Durchgangsfrequenzen und Sprunghöhen auf einem Hangprofil oder einem DGM berechnet (Abb. 3). Volkwein et al. (2011) geben dazu eine detaillierte Übersicht. Für die Durchführung der Modellierung ist die Bestimmung von Liefergebieten, Blockgrößen und Geländeparametern erforderlich (Rovina et al., 2011). In der Schweiz gelangen verschiedene solche Modellierungsprogramme zum Einsatz. Die zur Zeit in der Praxis häufig verwendeten sind CRSP, EBOUL, RocFall, Rockfall V7.1, RockFall Analyst, Rockyfor3D und Zinggeler+Geotest. Sie wurden von Rovina et al. (2011) näher untersucht. Die Ergebnisse findet man unter http://www.sfig-gsgi.ch/Arbeitsgruppen/ProgrammVergleich_komplett_20120207_1.pdf.

Leider gibt es nur wenige Studien zur Beurteilung der Qualität. Für Energien, Geschwindigkeiten, Sprunghöhen und Auslaufdistancen liegen nicht systematisch Messwerte und Modelldaten zum Vergleich vor, weshalb man nicht weiss, ob

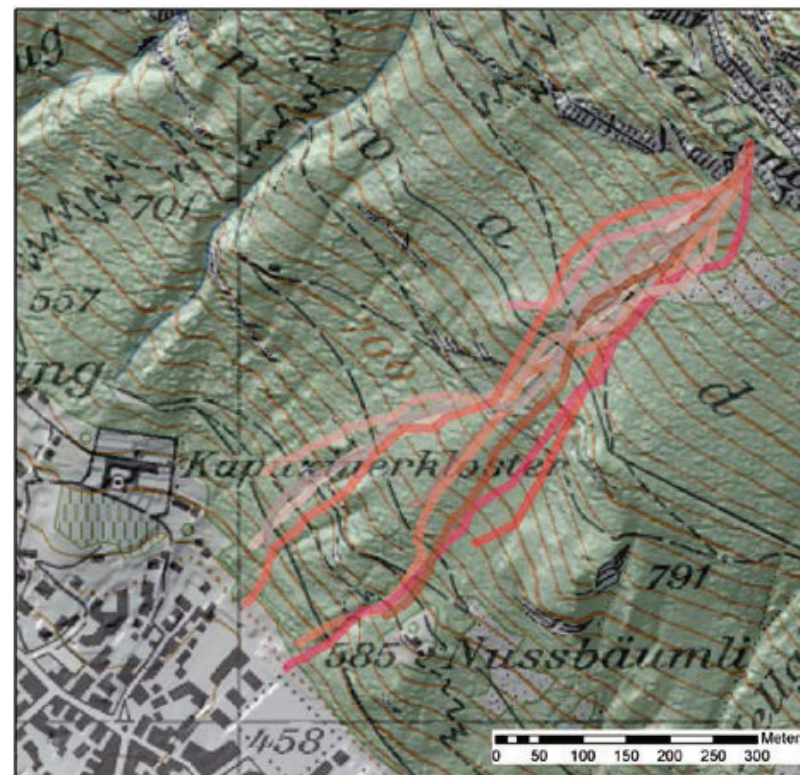


Abb. 3: 10 Sturzbahnen modelliert mit dem Trajektorienmodell Rockyfor3D.

Fig. 3: 10 rockfall paths modelled with the rockfall trajectory model Rockyfor3D.

alle Modellresultate der Realität entsprechen. Zwei solche Studien (Labiouse, 2004; Berger und Dorren, 2006) kommen zum Schluss, dass es grundsätzlich möglich ist, Energien, Sprunghöhen und Auslaufdistancen für einen Grossteil von stürzenden Einzelblöcken vorherzusagen. Voraussetzung ist, dass die Modellparameter gut kalibriert sind. Die Streuung der Ergebnisse der verschiedenen Modelle war aber enorm und die Messwerte für Energien sowie Sprunghöhen wurden teils massiv, d.h. bis zum vierfachen Wert (=400%), überschätzt. In der Studie des Cemagref in Grenoble (Berger & Dorren, 2006) konnten die Gutachter keine Plausibilisierung vornehmen, was gewisse Fehler erklären kann. Es wurden neun verschiedene Modelle

komplexen Topographie eine kritische Aufgabe ist.

Für die Berechnung der Reichweiten von grossen Felsstürzen und Bergstürzen werden oftmals geometrische Modelle eingesetzt (Meissl, 1998). In Ausnahmefällen werden prozessbasierte Simulationsmodelle verwendet: z.B. DAN (-W oder -3D; Hungr, 1995; Hungr und McDougall, 2009) oder AVAL (-1D oder -2D; Christen et al., 2002). Weil solche Ereignisse selten auftreten, ist es schwierig, diese Modelle für Spezialfälle zu kalibrieren. Sie erlauben aber die Darstellung von optimistischen und pessimistischen Szenarien.

Eine Zusammenfassung der Vorteile, der Beschränkungen und der Einsatzbereiche von verschiedenen Modellen gibt die Tabelle 2.

angewendet, wobei drei Modelle von mehreren Teilnehmern verwendet wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass zwei verschiedene Benutzer des gleichen Modells entweder völlig falsche oder sehr genaue Ergebnisse erzeugten. Dies zeigt auf, dass die Rolle des Modellbenutzers für die Gefahrenbeurteilung entscheidend ist. Beide Studien zeigen auch, dass es in der Modellierung einfacher ist, die Auslaufdistancen zu bestimmen als Sprunghöhen und Energien genau zu berechnen. Eine andere Schlussfolgerung war, dass die Wahl der Hangprofile für 2D Modelle in einer

| Bearbeitungsstufe | Prozess | Geeignetes Modell* (2D / 3D) | Vorteil | Beschränkung |
|-------------------|----------------------|------------------------------|--|---|
| M1 | Stein- / Blockschlag | GM (3D) | Schnelle Methode, wenig Parameter. | Grobe Abschätzung der Reichweiten Überschätzung der laterale Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes. |
| | Stein- / Blockschlag | TM (3D) | Präzise Identifizierung von potentiellen Gefahrenbereichen. | Aufwändig für grosse Gebiete. |
| M2 | Fels- / Bergsturz | GM (3D) | Schnelle Methode, wenige Parameter. | Aussergewöhnliche Mobilisierung-Phänomene die zu extremen Auslaufdistanzen führen werden nicht modelliert. |
| | Stein- / Blockschlag | TM (2D) | Gute Angaben zu Sprunghöhen und Energien. | Schwierig in komplexer Topographie. Keine Angaben zu der lateralen Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes. |
| | Stein- / Blockschlag | TM (3D) | Gute und räumlich kontinuierliche Angaben zu Sprunghöhen, Energien und Ablagerung. Realistische Waldwirkung. | Gutes DGM muss vorhanden sein. Bestehende Dämme müssen im DGM eingebaut werden. |
| | Fels- / Bergsturz | GM (2D/3D) | Schnelle Methode, wenige Parameter. | Grobe Abschätzung der Reichweiten. Überschätzung der laterale Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes (bei 3D). Aussergewöhnliche Mobilisierungsphänomene die zu extremen Auslaufdistanzen führen werden nicht modelliert. |
| | Fels- / Bergsturz | TM (2D) | Angaben zu Sprunghöhen und Energien von grossen Einzelblöcken. | Nur kleinere Felsstürze können modelliert werden. Schwierig in komplexer Topographie. Keine Angaben zu der lateralen Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes. |
| | Fels- / Bergsturz | TM (3D) | Angaben zu Sprunghöhen, Energien und Ablagerung von grossen Einzelblöcken. | Nur kleinere Felsstürze können modelliert werden. |
| M3 | Fels- / Bergsturz | FM (2D) | Realistische Modellierung der Auslaufdistanz des Ereignisses. | Aufwändige Kalibrierung. Keine Angaben zu der lateralen Verbreitung des Transit- und Ablagerungsgebietes. |
| | Fels- / Bergsturz | FM (3D) | Realistische Modellierung des Ereignisses. | Aufwändige Kalibrierung. |
| | Stein- / Blockschlag | TM (2D) | Gute Angaben zu Sprunghöhen und Energien. | Schwierig in komplexer Topographie. |
| | Stein- / Blockschlag | TM (3D) | Gute und räumlich kontinuierliche Angaben zu Sprunghöhen, Energien und Ablagerung. Realistische Waldwirkung. | Gutes DGM muss vorhanden sein. Bestehende Dämme müssen im DGM eingebaut werden. |
| | Fels- / Bergsturz | FM (3D) | Realistische Modellierung des Ereignisses. | Aufwändige Kalibrierung. |

* GM = geometrisches Modell, TM = Trajektorienmodell, FM = prozessbasiertes Felssturzmodell

Tab. 2: Einsatzbereich, Vorteile und Beschränkungen von Sturzmodellen.

Tab. 2: Range of application, advantages and limitations of rockfall models.

Erstellung der Gefahrenkarte

Zur Erstellung der Gefahrenkarte müssen nach den Modellierungen (Phase C) noch drei weitere Schritte durchgeführt werden:

1. Plausibilisierung der Modellergebnisse (Phase D)
 2. Festlegen der maximalen Reichweite (Phase E)
 3. Erstellung der Intensitätskarten (Phase F)
- Anschliessend wird die Gefahrenkarten erstellt.

Die Resultate der Modellierung sind immer zu plausibilisieren, mit dokumentierten Ereignissen, anhand der Feldbeobachtungen und/oder mit der Pauschalgefällemethode (Rovina et al., 2011). Abweichungen zwischen Modellergebnissen und Feldbeobachtungen können aus verschiedenen Gründen entstehen: zum Beispiel wegen der Wirkung von Schutzmassnahmen, Wanderwegen und Betonmauern. Eine Anpassung der Modellergebnisse oder eine neue angepasste Modellierung ist in diesem Fall notwendig (Dorren et al., 2011). Anschliessend kann die maximale Reichweite des modellierten Sturzzenarios festgelegt werden. Dies bedeutet, dass Ausreisser, falls vorhanden, aus den erzeugten Datensätzen entfernt und dokumentiert werden müssen. Solche Ausreisser sind zum Beispiel Einzelblöcke, die zu weit oder mit extremen Ablenkungen modelliert worden sind. So kann eine Zone definiert werden, die für das gegebene Szenario als Ablagerungsgebiet gilt. Innerhalb dieser Zone müssen dann mit Hilfe des Modells die Intensitäten festgelegt werden (schwache, mittlere und starke Intensitäten, siehe Abbildungen 1 und 4). Rovina et al. (2011) gehen davon aus, dass die massgebenden Werte bei Gefahrenbeurteilungen und für die Bemessung von Schutzbauten im Regelfall durch folgende Kurvenbereiche der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Energien (bzw. der Sprunghöhen) abgedeckt

werden: Mittelwert und doppelte Standardabweichung. Bei einer Normalverteilung entspricht dies einem Vertrauensintervall von ca. 95%. In der Praxis werden in der Regel Vertrauensintervalle von 90 bis 98% verwendet. Dieser Wert variiert, weil die Modelle unterschiedliche Berechnungsarten verwenden. Als mögliche Ausreisser oder extremes Szenario werden somit zwei bis zehn Prozent der Resultate betrachtet. Es ist Aufgabe der Experten, die relevanten Werte für die Gefahrenbeurteilung festzulegen. Bei der Ausarbeitung von Gefahrenkarten können sie allenfalls als Argument für die Ausscheidung eines Restgefährdungsbereichs herangezogen werden, vor allem wenn starke Sturzintensitäten vorliegen. Intensitätskarten werden für alle definierten Eintretenswahrscheinlichkeiten (bzw. Wiederkehrperioden) auf den Bearbeitungsstufen M2 und M3 erstellt. Für die Bearbeitungsstufe M1 werden keine Intensitätskarten erstellt (Raetz & Loup, 2011).

Fazit

Für die Gefahrenbeurteilung werden verschiedene, teils sehr unterschiedliche 2D und 3D Modelle eingesetzt. Die Durchführung der Sturzmodellierung muss der Aufgabenstellung, der Bearbeitungsstufe bei der Gefahrenbeurteilung (M1, M2 oder M3) und den zeitlichen Ressourcen angepasst werden.

Eine Sturzmodellierung alleine reicht nicht aus, um eine Gefahrenbeurteilung auf den Stufen M2 und M3 durchzuführen. Alle Phasen (A bis F) des beschriebenen Arbeitsablaufs müssen durchgeführt werden. Feldbeobachtungen und -messungen haben ein grosses Gewicht in der Gefahrenbeurteilung.

Die Rolle des Modellbenutzers, sei es bei der Bestimmung der Eingangsdaten, oder bei der Plausibilisierung der Resultate, ist entscheidend für die Gefahrenbeurteilung.

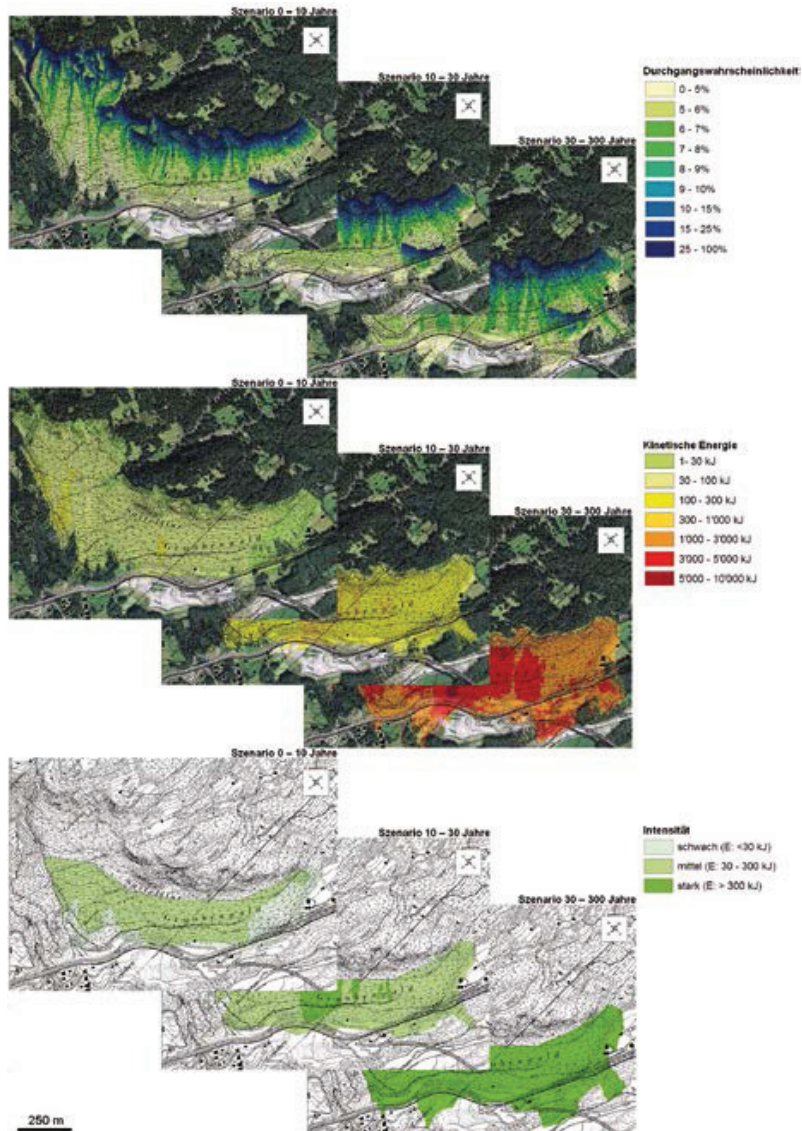


Abb. 4: Von den Simulationsergebnissen bis zu den Intensitätskarten (Karten: TUR GmbH).

Fig. 4: From the simulation results towards the intensity maps (maps: TUR GmbH).

Ziel ist, dass im technischen Bericht klarer festgehalten wird, welche Grundlagen und Annahmen zur Gefahrenbeurteilung geführt haben. Eine Zusammenfassung bestehender Studien, eine Liste der historischen Ereignisse, die Feldbeobachtungen, die definierten Szenarien, die zugrundeliegenden Annahmen, die Eingabeparameter, die

modellierten Ergebnisse, die Überlegungen bei deren Plausibilisierung sowie bei der Festlegung der Reichweiten und die Erstellung der Intensitätskarten sollen im technischen Bericht dokumentiert, erläutert und begründet sein. Nur so wird die Nachvollziehbarkeit der Sturzgefahrenbeurteilung gewährleistet.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dr. Luuk Dorren
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Gefahrenprävention
3003 Bern, Schweiz
luuk.dorren@bafu.admin.ch

Dr. Bernard Loup
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Gefahrenprävention
3003 Bern, Schweiz
bernard.loup@bafu.admin.ch

Dr. Hugo Raetzo
Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Gefahrenprävention
3003 Bern, Schweiz
hugo.raetzo@bafu.admin.ch

Literatur / References:

- ASTRA (2009). Risikokzept Naturgefahren Nationalstrassen. Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstrassen. Dokumentation 89001, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern: 97 S.
- AZZONI A., LA BARBERA G., ZANINETTI A. (1995). Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 32(7): 709-724.
- BAFU (im Druck). Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- BERGER F., DORREN L.K.A. (2006). Objective comparison of rockfall models using real size experimental data. Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides, Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan: 245-252.
- BFF/SLF (1984). Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Forstwesen BFF / Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bern: 21 S.
- BRP/BWW/BUWAL (1997). Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Raumplanung BRP/Bundesamt für Wasserwirtschaft BWW/Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern: 42 S.
- CHRISTEN M., BARTELT P., GRUBER U. (2002). AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. Proceedings of the International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, 14-18 October 2002, Matsumoto, Japan. Vol. 2: 715-72.
- CROSTA G.B., AGLIARDI F. (2003). A methodology for physically based rockfall hazard assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences 3: 407-422.
- DORREN L.K.A., MAIER B., BERGER F. (2006). Assessing protection forest structure with airborne laser scanning in steep mountainous terrain. Proc. Int. Workshop 3D Remote Sensing in Forestry, EARSeL, Vienna: 238-242.
- DORREN L.K.A., DOMAAS U., KRONHOLM K., LABIOUSE V. (2011). Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. In: S. Lambert & F. Nicot (eds.). Rockfall engineering. ISTE Ltd. and John Wiley & Sons Inc.: 143 - 173.
- HEIM A. (1932). Bergsturz und Menschenleben. Fretz und Wasmuth, Zurich: 218 S.
- HUNG O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. Canadian Geotechnical Journal 32(4): 610-623.
- HUNG O., MCDUGALL S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computers and Geosciences 35: 978-992.
- JABOYEDOFF M., LABIOUSE V. (2011). Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. Natural Hazards and Earth System Sciences 11: 819-828.
- KÖRNER H.J. (1980). Modelle zur Berechnung der Bergsturz und Lawinenbewegung. Proc. Interpraevent Symposium 1980. Bad Ischl. Band 2: 15-55.
- LABIOUSE V. (2004). Fragmental rockfall paths: comparison of simulations on alpine sites and experimental investigation of boulder impacts. 9th International Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Balkema: 457-466.
- LINIGER M. (2006). Die Herausforderung der Gefahrenprognose bei Massenbewegungen: Rutsch- und Sturzprozesse. Bull. angew. Geol. (11/2): 75-88.
- MEISSL G. (1998). Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geographische Studien Band 28. Innsbruck: 249 S.
- MÖLK M. (2009). Ereignisdokumentation Prozesse: Steinschlag, Felssturz. Universitätskurs Ereignis-Dokumentation, Hrsg. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- MÖLK M., SAUSGRUBER T., BÄK R., KOCIU A. (2011). Standards and methods of hazard assessment for rapid mass movements (rock fall and landslide) in Austria. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 74/166: 88-99.
- PERSSON A., HOLMGREN J., SODERMAN U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (68): 925-932.
- RAETZO H., LOUP B. (2011). Geological hazard assessment in Switzerland. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen- Erosions- und Steinschlagschutz 74/166: 100-107.
- ROVINA H., LINIGER M., JORDAN P., GRUNER U., BOLLINGER D. (2011). Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen. Swiss Bull. angew. Geologie (16/1): 57-79.
- SCHNEUWLY D.M., STOFFEL M. (2008). Changes in spatio-temporal patterns of rockfall activity on a forested slope - a case study using dendrogeomorphology. Geomorphology 102: 522-531.
- VOLKWEIN A., SCHELLENBERG K., LABIOUSE V., AGLIARDI F., BERGER F., BOURRIER F., DORREN L.K.A., GERBER W., JABOYEDOFF M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - a review. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11: 2617-2651.