

# Vergleich zweier numerischer Steinschlags Simulationsprogramme (2D) anhand eines Fallbeispiels

Comparison of two numerical analysis codes for 2D rockfall simulation based on a case study

Thomas Zwack<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipl.-Geol. Thomas Zwack, Moser/Jaritz ZT-GmbH (Saalfelden-AT), t.zwack@moser-jaritz.at

## Zusammenfassung

Entlang eines Streckenabschnitts am Gesäuseeingang (Steiermark, Österreich) wurden Sturzprozesse untersucht, die eine potentielle Gefährdung für eine Bahnlinie darstellen. Dabei sollten die Modellansätze der verwendeten Simulationsprogramme Rockfall 6.1 und Rofmod 4.1 untersucht, sowie deren Anwendungsgrenzen aufgezeigt werden. Mangels vollständig rekonstruierbarer Sturzereignisse, musste die Modellkalibrierung anhand von Richtwerten aus Sturzversuchen, Geländebeobachtungen und allgemeinen Kriterien, wie der in Abhängigkeit der Hangneigung dominierenden Fortbewegungsart, erfolgen. In einem derartigen Fall sind die Simulationsergebnisse jedoch unter großem Vorbehalt zu betrachten. Das belegen die ungenügenden Ergebnisse der durchgeführten Simulationen. Zwar können die maximalen Reichweiten in beiden Modellen gut eingestellt werden, das entscheidende Plausibilitätskriterium sollte jedoch die Kinematik der modellierten Sturzblöcke sein. Hierfür können die Hangneigung sowie das aus Geländeuntersuchungen abgeleitete Prozessverhalten herangezogen werden. Die in Rockfall eingegebene Oberflächenrauigkeit darf nur in Ausnahmefällen mit den Beobachtungen im Gelände gleichgesetzt werden. Zudem sollten die Restitutionskoeffizienten an die Blockgröße angepasst werden. Rofmod ist mangels einer Variation der Eingangsparameter nicht in der Lage, die natürliche Vielfalt der Sturzprozesse darzustellen. Problematisch scheint auch der vordefinierte und vermutlich zu gering gewählte Rollwiderstand.

**Schlüsselworte:** 2D-Steinschlagsimulation, Rockfall 6.1, Rofmod 4.1, Anwendungsgrenzen 2D-Modelle

## Abstract

Several rockfall processes representing a potential risk for a railway were examined along a track section at the Gesäuseeingang (Styria, Austria). By using the 2D numerical simulation software Rockfall 6.1 and Rofmod 4.1, the different modeling approaches were evaluated and their specific limitations identified. Due to a lack of completely reconstructable rockfall events, the model calibration was based on reference values from field tests, field observations and general criteria, such as the dominant movement type depending on the slope angle. In such a case, the results of the models have to be considered carefully as is demonstrated for several unsatisfactory simulation results. Though the maximum range can be well adjusted in both models, the crucial plausibility criterion should be a realistic simulation of kinematics of the modeled rock blocks. For this purpose, the slope angle as well as the process behavior derived from field investigations are used. Only in exceptional cases, it is possible to use the surface roughness from field investigations as input data in Rockfall. Furthermore the coefficients of restitution should be adapted to the block size. Because of the missing randomization of the input parameters, Rofmod isn't able to reproduce the natural diversity of rock fall processes. Another problem in Rofmod seems to be the predefined rolling resistance which is presumably underestimated.

**Keywords:** 2D-rockfall simulation, Rockfall 6.1, Rofmod 4.1, 2D-model limitations

## 1 Untersuchungsgebiet

Die im Zuge einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München (ZWACK 2012) untersuchte Talflanke liegt circa 7 km östlich der Stadt Admont (Steiermark), am Eingang zum Gesäuse-Nationalpark in der Ennsschlucht. Morphologisch dominieren bis zu 500 m steil aufragende und schroffe Felswände aus dickbankigen bis massigen Dachsteinkalken, in die sich, entlang von in etwa NS-Richtung verlaufenden Störungszonen, tiefe Rinnen eingeschnitten haben, in denen die Sturzprozesse kanalisiert werden. Unterhalb der Felswände vermitteln mit 30° bis 35° geneigte, blockreiche Hangschutt- bzw. Hangumlagerungssedimente zur breiten Schwemmebene der Enns. Entlang

der Talflanke verläuft die von Steinschlag gefährdete Bahnlinie auf einem 10 m bis 20 m hohen Damm. Neben historisch dokumentierten Sturzereignissen mit Einzelblöcken im Ausmaß von einigen Kubikmetern konnten im Gelände auch rezente Ereignisse nachgewiesen werden.

## 2 Methodik

Um das Prozessgeschehen zu verstehen und die modellrelevanten Eingangsdaten für die Simulationen zu erheben, wurden zunächst intensive Geländeuntersuchungen (u.a. Kartierung stummer Zeugen, Gefügemessungen und Kluftkörperanalysen) durchgeführt und zur weiteren Bearbeitung in ein GIS-Projekt überführt. Die Eingangsparameter für die



Simulationen wurden aus den Aufnahmen von Homogenbereichen (Oberflächenbeschaffenheit, Untergrundzusammensetzung) oder anhand von Herstellerangaben und Literaturwerten (Dorren et al. 2005, Kuhn 2004, Rickli et al. 2004) bestimmt.

Zum besseren Modellverständnis und um den Einfluss der unterschiedlichen Eingangsparameter auf das Simulationsergebnis abzuschätzen, wurden zunächst Vorabstudien an stark vereinfachten Modellen durchgeführt. Für die Modellkalibrierung wurden, die im Gelände ermittelten Sprunghöhen und ein rekonstruierter Sturzbahnverlauf, sowie anhand einer Literaturrecherche, ermittelte Kennwerte aus in situ-Fallversuchen, verwendet. Vom Hersteller voreingestellte Steuerungsgrößen blieben unverändert.

Nach erfolgter Kalibrierung wurden diverse Szenarien simuliert, um den Einfluss der Blockgröße und die Auswirkung eines Waldbestandes zu untersuchen. Hiermit sollte einerseits die Funktionsweise der Waldmodule getestet und andererseits die Fähigkeit der Programme untersucht werden, dass größenabhängige Bewegungsverhalten der Sturzkörper abzubilden. Mittels Detailauswertungen einzelner Sturzbahnen sowie der Geschwindigkeiten, Energien, Sprunghöhen und der Reichweitenverteilung wurden die Modelle schließlich miteinander verglichen.

Für die Simulationen wurde eine Sturzbahn ausgewählt, entlang der ein junges Sturzereignis mit einem 1,6 m<sup>3</sup> großen Einzelblock anhand stummer Zeugen im Transit- und Ablagerungsbereich rekonstruiert werden konnte. Die Topographie sowie die Untergrundeigenschaften entlang der Sturzbahn können der Abbildung 1 entnommen werden.

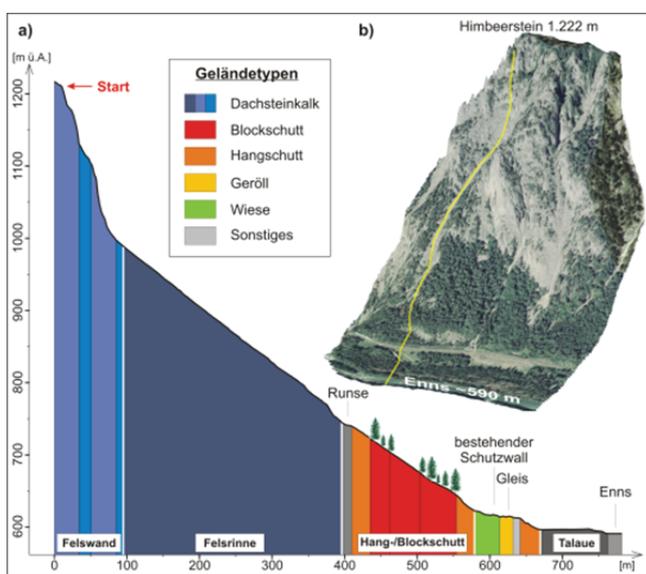


Abb. 1: a) Simulationsprofil mit verschiedenen Untergrundtypen; b) 3D-Ansicht des Untersuchungsgebietes mit dem simulierten Sturzbahnverlauf (gelbe Linie).

Fig. 1: a) Simulated profile showing the different types of underground; b) 3D-overview of the study area with the simulated rockfall trajectory (yellow line).

### 3 Simulationsprogramme

#### 3.1 Verwendete Modelltypen

Die kommerziell erhältlichen Programme Rockfall 6.1 (RF; Dr. Spang) und Rofmod 4.1 (RM; Geotest AG) verfolgen prozessbasierte, 2-dimensionale Simulationsansätze und beruhen auf der Grundlage physikalischer Gesetze sowie empirischer Ansätze. In den Starrkörpermodellen werden die Sturzblöcke in RF als sphärische oder zylindrische und in RM als sphärisch bis quaderförmige Körper betrachtet, wobei alle Bewegungsformen, einschließlich der Rotation, berücksichtigt werden.

Aufgrund der Komplexität der zu beschreibenden Kontaktreaktion zwischen Hangoberfläche und Sturzblöcken werden die Blöcke in den verwendeten Programmen als vollkommen elastische Starrkörper betrachtet. RF vernachlässigt außerdem die plastische Untergrunddeformation bei Zusammenstößen. Die Modelle verlangen zudem eine real nicht existierende Trennung zwischen den Bewegungsarten Springen und Rollen. Diese wird über statische Grenzwerte erreicht, die von den Herstellern vorgegeben sind.

Zusätzlich werden mit der Reduzierung des räumlichen Problems auf zwei Dimensionen „3D-Effekte“ vernachlässigt. So werden seitliche Ablenkungen vom Hauptsturzweg infolge von Kontaktreaktionen nicht berücksichtigt.

#### 3.2 Funktionsumfang und Eingangsparameter

Je nach verwendetem Programm müssen unterschiedliche Eingangsparameter und Startbedingungen festgelegt werden. In RM erfolgt die Charakterisierung des Untergrundes und der Hangoberfläche mit zwei Parametern. In RF sind hierfür sieben Parameter erforderlich (Tab. 1). Eine objektive Bestimmung der Parameter im Gelände ist oft schwierig, weshalb häufig auf Herstellerangaben oder Literaturwerte zurück gegriffen wird. Neben (semi-) quantitativ im Gelände zu bestimmenden Parametern wie der Oberflächenrauigkeit, existieren einige Kenngrößen, zu deren Bestimmung keine allgemein gültigen Verfahren oder Wertebereiche existieren (SPANG & SÖNSER 1995).

Tab. 1: Eingangsparameter von Rockfall 6.1 und Rofmod 4.1.

Tab. 1: Input parameters of Rockfall 6.1 and Rofmod 4.1

	Eingangsparameter	Rockfall 6.1	Rofmod 4.1
Gelände- geometrie	Profilkoordinaten	✓	✓
	Profilrauigkeit	✓ ( $O_a$ , $O_f$ )	✓
	Rollwiderstand	✓	-
Untergrund	Dämpfung	✓ ( $D_t$ , $D_n$ )	✓
	Haftreibungswinkel	✓	-
	Gleitreibungswinkel	✓	-

Hierzu zählen in RF neben den Reibungswinkeln und dem Rollwiderstand insbesondere die Dämpfungsfaktoren, die das Simulationsergebnis jedoch maßgeblich beeinflussen. Beispielhaft hierfür ist zudem der Rollwiderstand, der anhand von einigen Tabellenwerten, die aus Versuchen mit

Stahlkugeln stammen, abgeschätzt werden soll. Für den Benutzer wird so eine objektive Ermittlung der Eingangsparameter nur sehr eingeschränkt möglich. Abhilfe schaffen hier die in RM vordefinierten und verallgemeinerten Untergrundtypen wie „Fels“ oder „Blockschuttflächen“, denen vom Hersteller bestimmte Wertebereiche für den Dämpfungskoeffizienten zugewiesen sind. Die Rauigkeitszahl kann anhand des Durchmessers und dem Abstand der Rauigkeitskomponenten quantitativ im Gelände erhoben werden. Mit den Waldmodulen sind beide Programme in der Lage, einen Waldbestand zu berücksichtigen.

### 3.3 Modellansätze

In RM ist im Gegensatz zu RF keine zufällige Variation der eingegebenen Parameter innerhalb festgelegter Grenzen möglich. Eine statistische Verteilung wird primär durch unterschiedliche Startpunkte der Blöcke oder mittels einer Variation der Startbedingungen erreicht. In RF kann zudem eine Neuberechnung der Oberflächenrauigkeit nach jedem simulierten Sturzblock erfolgen. Obwohl in RF deutlich mehr Parameter angegeben werden müssen, wird das Simulationsergebnis, wie in RM, im Wesentlichen über die Dämpfungsparameter und die Oberflächenrauigkeit gesteuert.

#### 3.3.1 Untergrunddeformation und Sprungverhalten

Der Hauptunterschied von RM zu RF besteht darin, dass RM quaderförmige Blockgeometrien simulieren kann und einen speziellen Algorithmus zur Berechnung eines Aufpralltrichters, beim Kontakt zwischen Sturzkörper und Hangoberfläche, beinhaltet. Die plastische Untergrunddeformation wird dabei entscheidend von der Dämpfung beeinflusst, die im Vergleich zu RF nur über einen Koeffizienten definiert wird. Die von PFEIFFER & BOWEN (1989) geforderte Anpassung des Dämpfungskoeffizienten in Abhängigkeit der Masse des Sturzkörpers und der Impactgeschwindigkeit wird in RM durch den Eingang der Aufprallgeschwindigkeit, der Masse und der Blockgröße bei der Berechnung des Aufpralltrichters, berücksichtigt.

Der Einfluss der Blockgeometrie kommt in RM besonders bei Sprungbewegungen zum Tragen. Bei der Berechnung des Absprungwinkels nach einem Impact wird die wirkende Hebelkraft des rotierenden Blockes berücksichtigt. Dies gilt ebenso für Rollbewegungen, bei denen nach jeder Umdrehung die Geländeneigung abgefragt und untersucht wird, ob aus der aktuellen Rotationsenergie und der Hebelwirkung ein Sprung berechnet werden kann (ZINGGELER & PFEIFER 2009). Die eingegebene Blockform beeinflusst somit das Sprungverhalten und kann einen deutlichen Einfluss auf die maximalen Reichweiten der Sturzkörper haben.

Im Gegensatz dazu, werden die Dämpfungskoeffizienten bei der massenunabhängigen Simulation in RF als Materialkonstanten betrachtet, obwohl CHAU et al. (2002) Skalierungsfunktionen für die Restitutionskoeffizienten als grundlegend ansehen, da sie die entscheidenden Eingangsparameter bei der Simulation von Sturzprozessen sind. Der Einfluss der normalen Dämpfung ist in RF aufgrund des laut Herstellerangaben zu verwendenden Wertebereiches kaum von Bedeutung. Demgegenüber können schon kleine Änderungen der tangentialen Dämpfung erhebliche Auswirkungen

auf das Sprungverhalten beziehungsweise auf die Ablagerung von Blöcken haben.

#### 3.3.2 Rauigkeitskonzept

Grob betrachtet wird ein Geländeschnitt von der übergeordneten Topographie der Hangoberfläche definiert. Im Detail wird die Hangoberfläche von einer Mikrorauigkeit überlagert, die von Rauigkeitserhebungen (abgelagerten Blöcken, umgestürzte Bäume, etc.) hervorgerufen wird. Diese Mikrorauigkeit wird in RF durch den Parameter „Oberflächenrauigkeit“ in RM über die „Rauigkeitszahl“ berücksichtigt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, anhand von hochauflösenden Geländemodellen erstellte Profilschnitte, vor der Simulation zu glätten. Darüber hinaus führt eine große Anzahl von mehreren hundert Datenpunkten bei langen Profilen zu erheblichen Rechenzeiten und kann Programminstabilitäten hervorrufen.

Die Mikrorauigkeit wird in RF durch die Generierung von Rauigkeitserhebungen in Form von Spitzen (Abb. 2) nachgebildet (SPANG & ROMUNDE 2008). Zu Problemen führt die Tatsache, dass die Oberflächenrauigkeit zusätzlich die Aufgabe hat, die reale Blockform abzubilden. Hierdurch sollen rollende Kugeln bzw. Zylinder zu Kollisionen mit der Hangoberfläche und infolgedessen zum Springen gezwungen werden (SPANG & SÖNSER 1995).

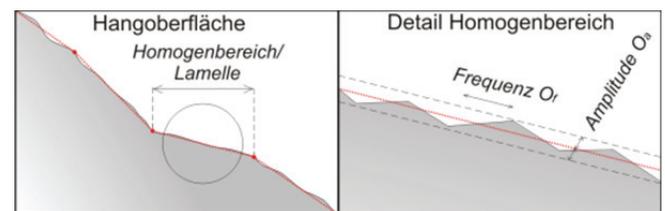


Abb. 2: Konzept der Oberflächenrauigkeit in RF anhand eines schematischen Hangprofils (verändert nach SPANG, 2008)

Fig. 2: Concept of surface roughness in RF illustrated by a schematic slope profile (modified from SPANG, 2008)

Wie in der Natur, stellen die generierten Spitzen, in Abhängigkeit der Sturzkörpergröße, unterschiedlich schwer zu überwindende Hindernisse dar. Damit wird versucht, den Sortierungs- bzw. „Eierkartoneffekt“ auf Schutthalde abzubilden, wonach die Reichweite von Sturzkörpern primär von deren Blockgröße und dem Verhältnis zur Oberflächenrauigkeit bestimmt wird (SPANG et al. 2008). Die Rauigkeit bei reinen Rollbewegungen wird dagegen über den Rollwiderstand eingestellt.

Die in RM enthaltene Rauigkeitszahl bewirkt bei jedem Bodenkontakt in Abhängigkeit der Größenverhältnisse zwischen Sturzblock und Rauigkeitskomponenten einen empirisch berechneten Energieverlust, der für kleinere Blöcke zunimmt (ZINGGELER & PFEIFER 2009). Hierdurch soll das Sprungverhalten, entsprechend dem Verhältnis der Blockgröße zur Profilrauigkeit, angepasst werden.

## 4 Simulationsresultate

### 4.1 Unsicherheiten

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Impactenergien von über 50 % der simulierten Blöcke am Fuß der rd. 180 m



hohen Steilwand zwischen 3 und 12 MJ liegen. Bei einem Aufprall auf harten Felsuntergrund würde dies in der Realität häufig zu Rissbildungen in den Blöcken und somit zu Energieverlusten oder sogar zu deren Zerbrechen führen. Diese Unsicherheiten am Simulationsanfang sind deshalb so problematisch, weil sie sich nach unten hin fortpflanzen.

Einen weiteren Unsicherheitsfaktor bildet die an den Aufprallbereich anschließende Felsrinne, die in der Natur deutlich ausgeprägte Richtungsänderungen aufweist. In der Realität führt dies zu Stoßreaktionen mit den steilen Rinneflanken und folglich zu einer Ablenkung quer zur Falllinie („Flippereffekt“), verbunden mit erheblichen Energieverlusten. Gerade im Bereich der Felsrinne waren die simulierten Sprünge sehr groß, was im Hangschuttbereich zu unrealistischen Sturzbahnverläufen und enormen Reichweiten führte. Um realistischere Ergebnisse zu erhalten wurde daraufhin in beiden Programmen versucht, die Energieverluste beim Aufprall sowie den 3D-Effekt in der Felsrinne mit Hilfe höherer Dämpfungen und/oder Oberflächenrauigkeiten abzubilden.

An dem betrachteten Profil wurden trotz aufwendiger Simulationen keine befriedigenden Resultate erzielt. Davon unabhängig liefern die zwei unterschiedlichen Modellansätze, mitunter deutlich voneinander abweichende Ergebnisse (Abb. 3). Vor dem Hintergrund, dass die Resultate mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, dürfen die folgenden Aussagen daher nicht einfach verallgemeinert werden.

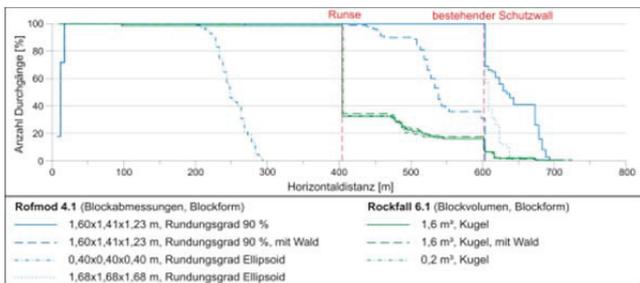


Abb. 3: Deutliche Unterschiede in der Reichweitenverteilung in RF und RM. Die Ergebnisse in RF weichen kaum voneinander ab, wohingegen in RM klare Unterschiede in Abhängigkeit des simulierten Szenarios zu erkennen sind.

Fig. 3: Notable differences in the range distribution of RF and RM. The results of RF diverge only little, whereas the results of RM diverge considerably depending on the simulated scenario.

### 4.2 Rockfall

Grundsätzlich kann RF die im Gelände beobachtete Situation unter der Verwendung gerade noch realistischer Untergrundparameter nur unbefriedigend darstellen. In Bezug auf die Sturzbahnverläufe, Ablagerungsbereiche sowie die auftretenden Energien und Geschwindigkeiten scheinen die Simulationsergebnisse für den Großteil der simulierten Trajektorien durchaus realistisch. Dennoch ist der Anteil unrealistischer Sturzbahnen mit Sprunghöhen bis zu 20 m und Sprungweiten >100 m mit circa 20 % unbefriedigend hoch.

Insgesamt besitzen die modellierten Trajektorien eine große Variationsbreite. Neben rollenden treten auch springende Blöcke auf, wobei im Transitbereich eine strikte Trennung zwischen den unterschiedlichen Bewegungsformen erkenn-

bar war (Abb. 4). Dies dürfte mit den stetigen Energieverlusten infolge der zahlreichen Bodenkontakte beim „springenden Rollen“ zusammenhängen und ist ursächlich auf die künstlichen Grenzgeschwindigkeiten zurückzuführen. In einer Simulation mit kleinen Sturzkörpern ( $r = 20$  cm), waren die Resultate mit Ausnahme der masseabhängigen kinetischen Energien annähernd identisch (Abb. 3). Demnach ist RF nicht in der Lage, die blockgrößenabhängige Prozessdynamik abzubilden. Eine Ursache sind womöglich die hohen Geschwindigkeiten, die an dem simulierten Geländeschnitt auftreten. Wahrscheinlicher scheint jedoch die Vermutung, wonach die Untergrundparameter Oberflächenrauigkeit, Rollwiderstand und Dämpfung an die simulierte Blockgröße angepasst werden müssen.

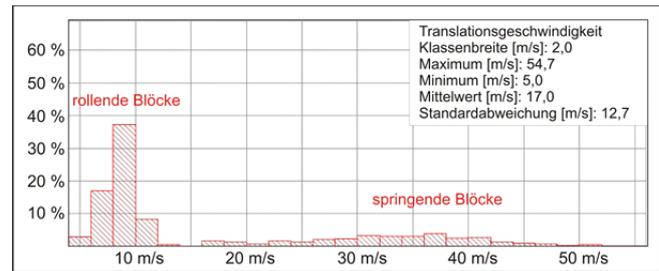


Abb. 4: Klassenhistogramm der Translationsgeschwindigkeiten aus RF ( $X=350$  m; 1498 von 1500 Steinen). Neben einem markanten Maximum bei niedrigen Werten ist ein breiteres bei höheren Werten vorhanden, was auf die Trennung zwischen den unterschiedlichen Bewegungsformen zurück zu führen ist.

Fig. 4: Class histogram of the translation velocities in RF at  $X = 350$  m (1498 of 1500 stones). Clearly visible is a distinctive peak at low velocities and a wide maximum at higher ones due to the separation between rolling and bouncing blocs.

### 4.3 Rofmod

Zusammenfassend ist RM nicht in der Lage, die im Gelände beobachtete Situation, unter Verwendung gerade noch realistischer Untergrundparameter, befriedigend abzubilden, obwohl die maximalen Reichweiten annähernd richtig wiedergegeben werden konnten. Lediglich 50% aller simulierten Blöcke im Transitbereich liegen mit maximalen Sprunghöhen von 8 m und Geschwindigkeiten von 35 m/s innerhalb üblicher Literaturwerte. Unterschiedliche Ablagerungsbereiche entlang des Hanges konnten selbst mit unrealistisch hohen Dämpfungen („nasser, tiefer Boden“) bzw. Rauigkeitszahlen ( $RZ=15$ ) nicht simuliert werden.

Das Spektrum der simulierten Bahnkurven ist gering, da lediglich die Startposition variabel ist und lokale Hängenebenheiten vernachlässigt werden. Mit der Berücksichtigung eines Waldbestandes und der implizierten Zufallsfaktoren bei der Berechnung von Kontaktreaktionen kann dem jedoch entgegengewirkt werden.

Am augenscheinlichsten sind die gleichförmig verlaufenden Sturzbahnen sowie die nicht plausible Größenordnung der Sprünge (Sprungweiten ~100 m, Sprunghöhen ~8 m). Entsprechend der vorherrschenden Hangneigung sollten im Bereich der Felsrinne und des Schutthanges rollende Bewegungen dominieren. Dagegen konnte RM im Transitbereich selbst unter Verwendung unrealistisch hoher Dämpfungswerte und Rauigkeitszahlen ausschließlich springende Blöcke simulieren. Als Ursache wird das anhand von Test-

modellierungen validierte Spring-Roll-Kriterium vermutet, dass nach Herstellerangaben wenn möglich nicht verändert werden sollte (GEOTEST AG 2006). Bereits KUHN (2004) vermutete anhand vergleichender Simulationen dokumentierter Sturzereignisse mit Rofmod (V3), dass der voreingestellte Rollreibungswinkel von rd.  $24^\circ$  zu gering gewählt ist.

Die blockgrößenabhängige Reichweite („Sortierungseffekt“) sowie das unterschiedliche Bewegungsverhalten kleinerer Blöcke kann RM dank seines Rauigkeitskonzeptes sehr gut abbilden. Der Einfluss der von RM berechneten, blockgrößenabhängigen Verformung des Untergrundes scheint eher gering zu sein. Inwieweit der erzeugte Blockgrößeneffekt realistisch ist, wurde jedoch nicht untersucht.

#### 4.4 Waldmodule

Die Berücksichtigung zweier Waldbestände im Transitbereich mit Längen von 33 m bzw. 60 m führte in beiden Modellen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während in RF keine merkliche Beeinflussung der Simulationsergebnisse erkennbar war, hatte der simulierte Waldbestand in RM einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse (Abb. 3).

Die Auswertungen legen die Vermutung nahe, dass RM die Waldwirkung überschätzt. Besonders unrealistisch erscheint die Tatsache, dass bei der Passage der Waldabschnitte alle 500 simulierten Blöcke mit einem Baum kollidierten. Dies widerspricht zum einen der von KALBERER (2006) beschriebenen Filterwirkung des Waldes, wonach die Waldwirkung starken Streuungen unterliegt und somit lediglich als Filter für einen Teil der Sturzkörper wirksam ist. Zum anderen wird im Benutzerhandbuch (GEOTEST AG 2006) empfohlen, bei relativ kurzen Waldabschnitten (<100-200 m) eine Simulation ohne Waldbestand durchzuführen, da einzelne Blöcke diesen ohne Treffer passieren können.

Die geringe Waldwirkung in RF steht vermutlich im Zusammenhang mit dem inzwischen veralteten Kenntnisstand, auf dem das integrierte Waldmodul beruht. So werden im Benutzerhandbuch zur neuesten Programmversion (DR. SPANG, 2008) die viel zu geringen Bruchschlagarbeiten nach Sell aus dem Jahre 1987 angegeben.

## 5 Erkenntnisse

### 5.1 Rockfall

In RF sind keine Skalierungsfunktionen für die Restitutionskoeffizienten enthalten, wodurch der Einfluss aus der Kinematik des Sturzblockes unberücksichtigt bleibt. Im Umkehrschluss sollten die Koeffizienten daher der Blockgröße angepasst werden. Diesbezüglich finden sich weder in der Literatur, noch seitens des Herstellers Angaben.

Ähnliche Aussagen können für die auf den ersten Blick einfach zu bestimmende Oberflächenrauigkeit getroffen werden, da diese in RF gleich mehrere Aufgaben erfüllt und sowohl von den Rauigkeitserhebungen auf der Hangoberfläche als auch von der Größe und Form des Sturzkörpers abhängt. Aus dieser Doppelfunktion darf die in das Programm eingegebene Oberflächenrauigkeit nur in Ausnahmefällen, mit den Beobachtungen im Gelände, gleichgesetzt werden. Des Weiteren ist bei der Angabe der Frequenz und der Amplitude zu berücksichtigen, dass vereinzelte Hinder-

nisse im Ausmaß des Sturzkörpers nicht abgebildet werden können, da RF bei weiten Rauigkeitsabständen eine nahezu glatte Hangoberfläche generiert (Abb. 5). Mit einer feineren Untergliederung des Homogenbereiches in mehrere Lamellen kann dem entgegen gewirkt werden. Allerdings sind die Positionen der Spitzen dann nicht mehr variabel. Zusammenfassend hat die Oberflächenrauigkeit in RF einen entscheidenden Einfluss auf das Simulationsergebnis, da sie maßgeblich das Bewegungsverhalten der Sturzkörper steuert. Dabei sind vor allem Hindernisse im Ausmaß des Designblocks oder darüber von Relevanz.

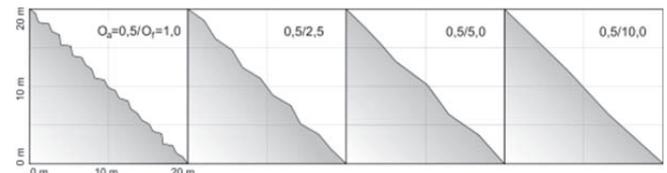


Abb. 5: Darstellung der Oberflächenrauigkeit in RF mit konstanter Amplitude  $O_a$  und variabler Frequenz  $O_f$ . Deutlich zu erkennen ist die glatte Hangoberfläche bei weiten Frequenzen.

Fig. 5: Illustration of the surface roughness in RF with constant amplitude  $O_a$  and varying frequency  $O_f$ . The smooth slope surface is clearly visible at wide frequencies.

Ein systematischer „Programmfehler“, der möglicherweise mit den hohen Sturzenergien in Verbindung steht, scheinen die beobachteten „Ausreißer“ zu sein. Sie entstehen, wenn hochenergetische Blöcke annähernd hangparallel auf markante Spitzen der Oberflächenrauigkeit prallen. Diese konnten auch mit unrealistisch hohen Dämpfungen sowie einer Verringerung der Variationsbreite der Eingangswerte von 15% auf 5% Prozent nicht verringert werden.

### 5.2 Rofmod

RM ist mangels einer Variation der Eingangsparameter nicht in der Lage, die natürliche Vielfalt der Sturzprozesse darzustellen, was sich in der geringen Streubreite der simulierten Trajektorien widerspiegelt. Eine höhere Variabilität der Sturzbahnen ist erst im Auslaufbereich anzutreffen, da infolge der Hangverflachung und der engräumigen Topographieänderungen stark wechselnde Aufprallbedingungen existieren, die jedoch in der Natur auch entlang des Transitbereiches auftreten.

Die Mikrorauigkeit wird aufgrund des Rauigkeitskonzeptes allerdings vernachlässigt. RM kann somit Zusammenstöße mit Hindernissen auf der Hangoberfläche nicht simulieren. In der Realität üben diese jedoch einen großen Einfluss auf das Bewegungsverhalten und die Ablagerung von Sturzkörpern aus. Ein Beispiel ist das Phänomen, dass ein springender Block mit hoher Geschwindigkeit auf einen ähnlich großen Hangschuttblock trifft und unmittelbar zum Stehen kommt (AZZONI et al. 1992). Dies kann, wie in den Simulationen beobachtet, dazu führen, dass im groben Blockschuttbereich trotz hoher Rauigkeitszahlen ( $RZ=15$ ) keine Blöcke abgelagert werden. Darüber hinaus bleibt der Absprungwinkel, im Gegensatz zu einer Kollision mit einem realen Hindernis nahezu unbeeinflusst, worin eine weitere Ursache für die geringe Variabilität der Simulationsergebnisse liegt. Das keine rollenden Blöcke simuliert werden konnten, hängt möglicherweise mit dem vordefinierten und zu gering gewählten Rollwiderstand zusammen.



### 5.3 Modellgrenzen

An dem ausgewählten Geländeprofil scheinen insbesondere die vernachlässigten 3D-Effekte im Bereich der Felsrinne einen limitierenden Faktor darzustellen. AGLIARDI & CROSTA (2003) werten dies als ebenso bedeutend, wie den Einfluss der Blockgeometrie auf die Festkörperdynamik des Sturzblockes. Auch die Modellannahme vollkommen elastischer Starrkörper erwies sich als problematisch.

## 6 Resümee

Im Fall topographisch komplexer und langer Geländeschnitte, scheinen die verwendeten Programme aufgrund der modellspezifischen Vereinfachungen und programmexterner Unsicherheitsfaktoren (z.B. Wahl der Ausbruchsorte) nicht in der Lage, verlässliche Resultate zu liefern.

Stehen keine rekonstruierbaren Sturzereignisse für Rückrechnungen zur Verfügung, muss die Modellkalibrierung anhand von Richtwerten aus Sturzversuchen, Geländebeobachtungen und allgemeinen Kriterien, wie der in Abhängigkeit der Hangneigung dominierenden Fortbewegungsart, erfolgen. Die Simulationsergebnisse sind in einem derartigen Fall jedoch unter großem Vorbehalt zu betrachten. Das belegen die ungenügenden Ergebnisse der durchgeführten Simulationen. Zwar können die maximalen Reichweiten in beiden Modellen gut eingestellt werden, das entscheidende Plausibilitätskriterium sollte jedoch die Kinematik der modellierten Sturzblöcke sein. Hierfür können die Hangneigung sowie das aus Geländeuntersuchungen abgeleitete Prozessverhalten herangezogen werden. Erst darauf aufbauend dürfen die Reichweiten justiert werden.

Zusammenfassend können auf den ersten Blick sehr einfach zu handhabende Simulationsprogramme, die Erfahrung und das spezielle Wissen von Steinschlagexperten nicht ersetzen. Eine ausführliche Geländestudie und die Kenntnis des Prozessgeschehens bilden die Grundvoraussetzung für eine sachgemäße Beurteilung von Steinschlagprozessen.

## Literatur

- AGLIARDI, F. & CROSTA, G.B. (2003): High resolution three-dimensional numerical modeling of rockfalls. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40/4: 455–471.
- AZZONI, A., ROSSI, P.P., DRIGO, E., GIANI, G.P. & ZANINETTI, A. (1992): In situ observations of rockfalls analysis parameters. – In: Bell, D. (Eds.). *Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 307–314.
- CHAU, K.T., WONG, R.H.C. & WU, J.J. (2002): Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39/1: 69–77.
- DORREN, L.K.A., BERGER, F., LE HIR, C., MERMIN, E., TARDIF, P. (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. – *For. Ecol. Manage.*, 215: 183–195.
- DR. SPANG (2008): *Rockfall 7 - Rockfall Simulation Program Rockfall 7 - Users Manual, Demoversion*. – 49 p., Witten.
- GEOTEST AG (2006): *Benutzerhandbuch Steinschlag-Modellierung Rofmod 4.1*. – Zollikofen (Geotest AG).
- KALBERER, M. (2006): *Quantifizierung und Optimierung der Schutzwaldleistung gegenüber Steinschlag*. – Unveröff. Diss. Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg im Breisgau.
- KUHN, CH. (2004): *Felsstürze - Beiträge zu ihrer Simulation*. – Unveröff. Dipl.-Arb. BOKU Wien. Wien.
- PFEIFFER, T.J. & BOWEN, T.D. (1989): Computer simulations of rockfalls. – *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26: 135–146.
- RICKLI, C., F. GRAF, W. GERBER, M. FREI & A. BÖLL (2004). *Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs*. – *Schutzwald und Naturgefahren*. Forum für Wissen 2004. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Birmensdorf: 27–34.
- SPANG, CH. & ROMUNDE, B. (2008): Preprocessing and smoothing of surface models for rockfall simulation. – in: *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*. 23–25 June. Morschach, Switzerland, 108–110.
- SPANG, CH., 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*. 02.07.2008. Salzburg.
- SPANG, R.M. & SOENSER, T. (1995) Optimized rockfall protection by "ROCKFALL". – in: Fujii, T. (Eds.). *Proceedings of the 8th International Conference on Rock Mechanics*. 25–30 September 1995. Tokyo, Japan. *comptes rendus* 3, 1233–1242.
- STATHAM, I. (1979): A simple dynamic model of rockfall: some theoretical principles and field experiments. – *Int. Colloquium on Physical and Geomechanical Models*. ISMES Bergamo, 237–258.
- ZINGGELER, A. & PFEIFER, R. (2009): *Steinschlagmodellierung GEOTEST + Zinggeler, Modellbeschreibung*. – 21 S. Zollikofen.
- ZWACK, T. (2011): *GIS-gestützte, ingenieurgeologische Studien zu Sturzprozessen am Himbeerstein (Gesäuse-Nationalpark, Steiermark) mit einer vergleichenden Steinschlagmodellierung unter der Verwendung der Programme Rockfall 6.1 und Rofmod 4.1*. – Unveröff. Dipl.-Arb.. Lst. f. Ingenieurgeologie TU München. München.