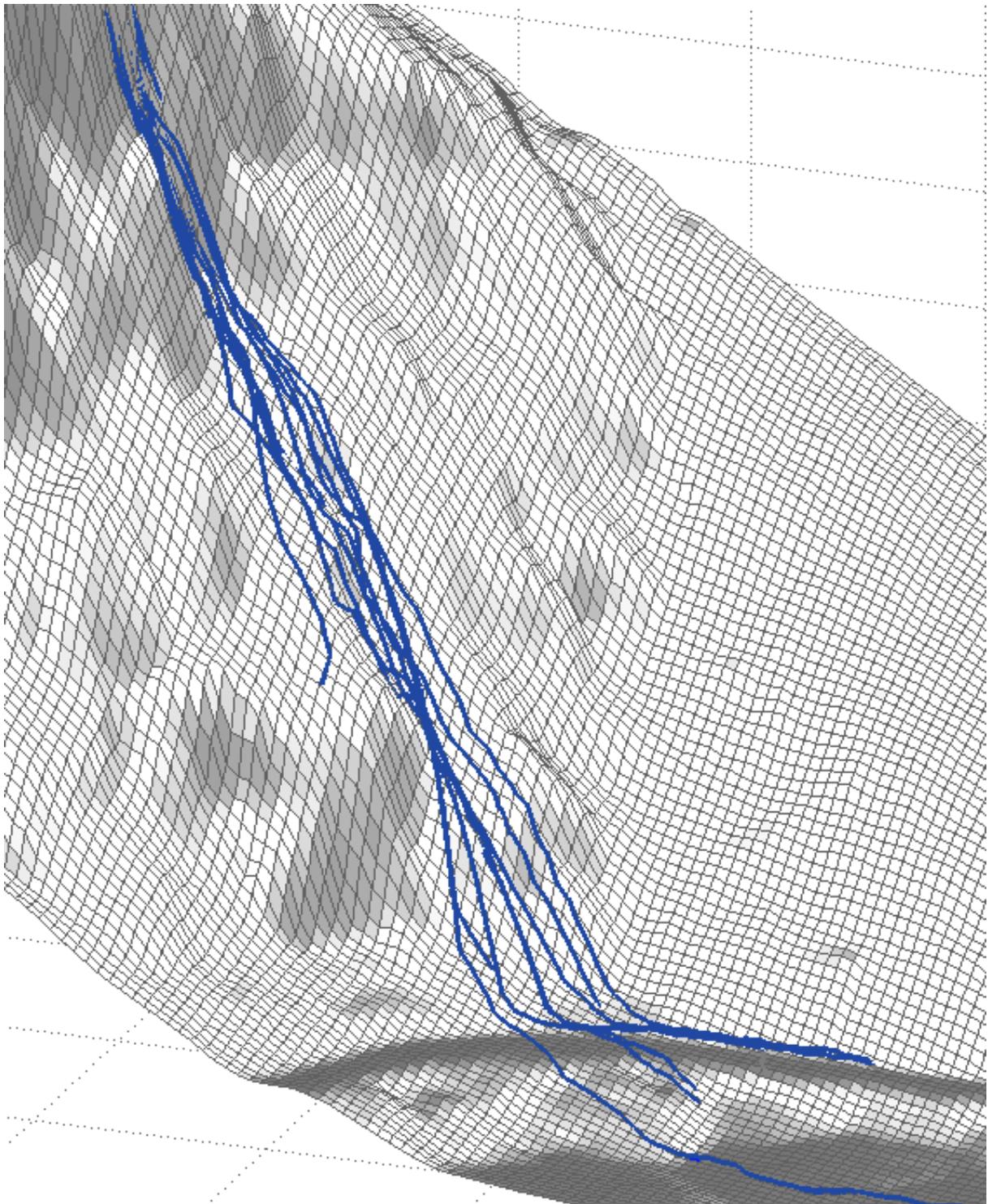


Rockyfor3D (V5.1) enthüllt

Transparente Beschreibung des kompletten 3D-Steinschlagmodells



ecorisQ

Steinschlag, Rutschungen, Lawinen und Schutzwald Experten

Bibliografische Informationen

Autor

Dr. Luuk K. A. Dorren (Bundesamt für Umwelt BAFU, CH)

Beteiligte an der Entwicklung des Modells

Dr. Frédéric Berger (Irstea Grenoble, FR)
Dr. Franck Bourrier (Irstea Grenoble, FR)
Prof. Dr. Willem Bouten (Universiteit van Amsterdam, NL)
Dr. Luuk K. A. Dorren (Bundesamt für Umwelt BAFU, CH)
Mathilde Gallouet (Université Joseph Fourier Grenoble, FR)
Roderick Kühne (Universität Bern, CH)
Uif S. Putters (Universiteit van Amsterdam, NL)
Dr. Bahjat Safadi (Laboratoire d'Informatique Grenoble, FR)
Dr. Harry C. Seijmonsbergen (Universiteit van Amsterdam, NL)
Dr. Sanneke van Asselen (Vrije Universiteit Amsterdam, NL)
Dr. Mark J. van Wijk (Wageningen University, NL)
Prof. Dr. Jasper Vrugt (University of California – Irvine, USA)

Urheber

Association ecorisQ
Saint Hilaire du Touvet
Frankreich

Zitierweise

Dorren L.K.A., 2012. Rockyfor3D (V5.1) enthüllt – Transparente Beschreibung des kompletten 3D-Steinschlagmodells. ecorisQ Paper (www.ecorisq.org): 32 S.

© ecorisQ 2012

Datum: 27.08.2012

Außer zu kommerziellen Zwecken ist ein Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

Dank gilt den folgenden Kollegen für ihre hilfreichen Anregungen:

Dr. Ulrik Domaas (NGI, NO), Dr. Oliver Jancke (Irstea Grenoble, FR), Dr. Jean-Bruno Pasquier (Géoval, CH), Daniel Pauli (Übersetzer, DE)

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Modelleingabe und Schnellstart.....	2
2.1	Eingabe-Rasterdaten	2
2.2	Simulation mit Wald	9
2.3	Simulation mit Steinschlagnetzen	11
2.4	Berechnungsschirme	11
2.5	Simulationseinstellungen	12
2.6	Starten von Rockyfor3D	12
3	Hauptkomponenten des Modells	14
3.1	Blockform	14
3.2	Parabolischer freier Fall	14
3.3	Kontakt mit der Hangoberfläche	14
3.4	Baumanprall	18
3.5	Berechnung der Fallrichtung	20
4	Modellausgabedaten	23
5	Bibliografie	26
	Auflistung der Änderungen	28
	Anhang I. Präzision der Oberflächenrauheitswerte	29
	Anhang II. Parameterwerte-Beispiele für unterschiedliche Hangoberflächen.....	30

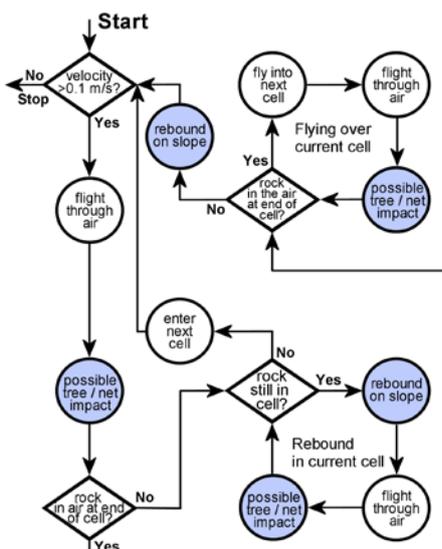
1 Einleitung

Rockyfor3D ist ein Simulationsmodell, das die individuellen Fallbahnen einzelner Steine dreidimensional (in 3D) berechnet. Das Modell verbindet physikalisch-basierte, deterministische Algorithmen mit stochastischen Ansätzen und macht Rockyfor3D damit zu einem sogenannten "probabilistischen, prozessbasierten Steinschlagmodell". Rockyfor3D kann für Steinschlagsimulationen auf regionaler und lokaler Ebene sowie für einzelne Hänge eingesetzt werden.

Es wird seit 1998 entwickelt, anfangs auf der Grundlage früherer Veröffentlichungen zum Thema Steinschlag (z. B. Habib 1977; Azimi et al. 1982; Falchetta 1985; Wu 1985; Bozzolo und Pamini 1986; Spang 1988; Pfeiffer und Bowen 1989; Van Dijke und Van West 1990; Zinggeler 1990; Descoedres 1997; Meissl 1998; für eine ausführliche Übersicht siehe Guzzetti et al. 2002 oder Dorren 2003) und später durch persönliche Feldbeobachtungen, Experimente in Zusammenarbeit mit dem Team von Frédéric Berger (Irstea Grenoble) sowie durch Versuche mit vielen selbst entwickelten oder bereits veröffentlichten Modellalgorithmen. Ab Version 5.0 ist der Programmcode in C geschrieben.

Rockyfor3D taucht in seiner Fortentwicklung unter verschiedenen Namen (Rocky3, RockyFor) in einer Reihe wissenschaftlicher Artikel auf (Dorren und Maier 2001; Dorren und Seijmonsbergen 2003; Dorren und Heuvelink 2004; Dorren et al. 2004; Dorren et al. 2006; Stoffel et al. 2006). Das Ziel dieser Abhandlung ist es, die Funktionsweise des Programms zu erläutern. Gleichzeitig soll eine transparente und einheitliche Übersicht über die verwendeten Algorithmen geliefert werden, die in der aktuellen Version des Modells (Rockyfor3D V5.1) verwendet werden. Diese Version wird ecorisQ (siehe www.ecorisq.org) und seine Mitglieder von Luuk Dorren zur Verfügung gestellt.

Rockyfor3D wird fortlaufend bei Forschungsprojekten zu Testzwecken eingesetzt, was potentiell zu einer Verbesserung der Modell-Algorithmen führt (vgl. Bourrier et al. 2009). **Damit Rockyfor3D gute Ergebnisse liefert, werden konsistente Eingabedaten benötigt, die an die Realität im Gelände, an den Umfang der Analyse sowie an das Ziel der Steinschlagstudie angepasst sind** (1. eine regionale Gefahrenanalyse, 2. eine kommunale Gefahrenkarte, oder 3. eine detaillierte Gefahrenanalyse für einen einzelnen Hang).



Rockyfor3D simuliert die Steinschlagfallbahn in Form von 3D-Vektordaten. Dazu berechnet es Sequenzen des klassischen parabolischen freien Falls durch die Luft, den Kontakt mit der Hangoberfläche sowie gegebenenfalls Baumanpralle (Abb.1). Das Rollen wird durch eine Abfolge von kurzen Kontakten dargestellt, das Gleiten der Steine wird nicht modelliert.

Abb. 1. Flussdiagramm von Rockyfor3D. Die blauen Kreise zeigen Modellierungsschritte, bei denen sich die Fallrichtung des simulierten Blocks gegebenenfalls verändert.

Die benötigten Eingabedaten bestehen aus einer Reihe von ASCII-Rastern (ESRI-Format; Erläuterung siehe Kapitel 2), die die Topografie und die Eigenschaften der Hangoberfläche bestimmen sowie aus einer Reihe von Parametern, die die Ausgangskonditionen definieren. Diese Eingabedaten und eine kurze Anleitung zum Starten von Rockyfor3D werden im folgenden Kapitel ausführlich beschrieben. Die wichtigsten Komponenten des Rockyfor3D-Modells werden detailliert in Kapitel 3 beschrieben. Informationen zur Ausgabe von Rockyfor3D werden ausführlich im Kapitel 4 behandelt.

2 Modelleingabe und Schnellstart

2.1 Eingabe-Rasterdaten

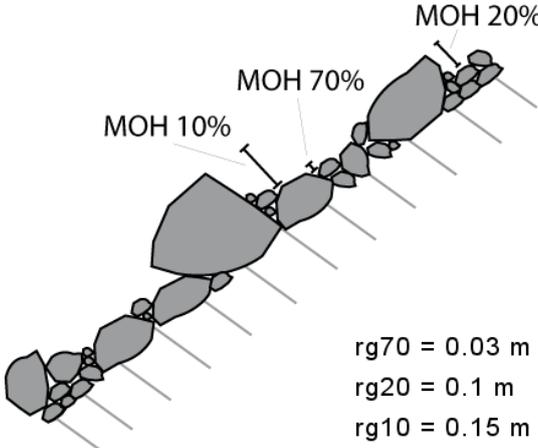
Rockyfor3D benötigt als Eingabedaten minimal zehn Rasterkarten. **Alle Rasterkarten müssen über den gleichen Kartenumfang und die gleiche Zellengröße verfügen.** Mit zunehmender Zellengröße nehmen die räumliche Präzision der simulierten Karten sowie die Genauigkeit der simulierten Kinematik ab. Gleichwohl hat die Praxis gezeigt, dass sich bei einer Auflösung von 1 m × 1 m die Qualität bei erheblich zunehmender Datenmenge nicht unbedingt verbessert. Die bevorzugte Auflösung liegt zwischen 2 m × 2 m und 10 m × 10 m (vgl. Dorren und Heuvelink 2004).

Alle Raster sollten im Format ESRI ASCII Grid formatiert sein, das von allen Texteditoren gelesen werden kann. Unten ist ein Beispiel für ein kleines Raster dieses Formats dargestellt. Die Kopfzeile (Header) gibt Auskunft über die Anzahl der Spalten und Zeilen des Rasters (*ncols* und *nrows*), über die Zellengröße oder die Auflösung des Rasters (in m), die x- und y-Koordinaten des Zentrums (oder der unteren linken Ecke) der unteren linken Zelle (*xllcenter/xllcorner* und *yllcorner/yllcenter*) und über den Wert, der für NoData-Werte (NODATA_value; default = -9999) steht. Dezimalstellen sollten durch einen Punkt (.) gekennzeichnet werden und nicht durch ein Komma (,).

Folgende **zehn** Raster werden mindestens benötigt, um Rockyfor3D nutzen zu können:

Nr.	Rastername	Beschreibung
1	<i>dem.asc</i>	<p>ein gerastertes digitales Höhenmodell (DHM), welches die Topografie darstellt (Doppelraster; [Werte 0 – 8850,00 m oder NODATA_value]). Fernerkundungslaserdaten (LiDAR) liefern in der Regel genaue DHM. Auf der Basis der DHM errechnet Rockyfor3D eine Hangkarte nach Zevenbergen und Thorne (1987; siehe auch Burrough und McDonnell 1998, S. 191). Es folgt ein kleines Beispiel <i>dem.asc</i>:</p> <pre> ncols 5 nrows 3 xllcorner 123456.123 yllcorner 1234567.123 cellsize 2.5 NODATA_value -9999.00 1115.81 1114.28 1109.25 1107.74 1105.01 1110.31 1109.35 1107.33 1103.57 -9999.00 </pre>

		1006.55 1005.00 999.62 -9999.00 -9999.00
2	<i>rockdensity.asc</i>	<p>eine Rasterkarte mit der Gesteinsdichte in jeder Quell- oder Startzelle (Ganzzahl-Raster, 2 oder 4 Byte; [Werte 0 oder 2000 - 3300 kg.m⁻³]). Die Gesteinsdichte-Karte definiert die Zellen, die mit den Ausgangspositionen übereinstimmen (Wert größer als 0). Darüber hinaus definiert dieses Raster die Dichte (in kg m⁻³) des Blocks, der von jeder Quellzelle simuliert wird. Daher werden Rasterzellen mit dem Wert 0 nicht als Quellzellen angesehen. Ausgehend von diesen Zellen mit einem Wert von beispielsweise 2500 oder 3000, wird ein Block mit einer Dichte von 2500 kg m⁻³ bzw. 3000 kg m⁻³ simuliert.</p> <p>Um Randeffekte zu vermeiden, sollten keine Quellzellen in den beiden äußeren Zeilen oder Spalten des Rasters enthalten sein. Dort enthaltene Quellzellen werden nicht berücksichtigt !</p>
3 4 5	<i>d1.asc</i> <i>d2.asc</i> <i>d3.asc</i>	<p>drei Rasterkarten, die die Höhe, Breite und Länge des Blocks in jeder Quellzelle (Doppelraster; [Werte 0 - 20,00 m]) definieren. Diese Rasterkarten müssen Werte in Meter enthalten. Wenn ein Abmessungswert in einer der drei Raster gleich 0 ist, wird diese Rasterzelle nicht als Quellzelle genommen. Die drei Blockabmessungen, die in jeder Quellzelle definiert wurden, sind eine uniform verteilte Zufallsvariable mit einem vordefinierten Prozentsatz (auf Basis der definierten Mengenänderung zwischen ± 0 % ± 50 %) vor jeder Simulation. Dieser zufällige Prozentsatz ist für alle drei Blockabmessungswerte einer Simulation immer gleich. Das bedeutet, dass wenn die Variierung des Volumens auf 5 % festgelegt ist, werden alle drei Blockabmessungen nach dem Zufallsprinzip um einen Wert zwischen 0 und 1,639 % verringert oder vergrößert.</p>
6	<i>blshape.asc</i>	<p>eine Rasterkarte zur Festlegung der Form des fallenden Blocks für jede Quellzelle (Ganzzahl-Raster; [Werte 0-4]). Das Blockform-Raster kann die folgenden Werte enthalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 Keine Blockform / keine Quellzelle definiert 1 Rechteckiger Block (alle drei Durchmesser können voneinander abweichen) 2 Ellipsenförmiger Block (alle drei Durchmesser können voneinander abweichen) 3 Kugelförmiger Block (alle drei Durchmesser sind identisch) 4 Scheibenförmiger Block (kleinster Durchmesser beträgt maximal ein Drittel der beiden anderen Blockdurchmesser, die eine ähnliche Größe haben) <p>Ist keine Blockform in der Quellzelle definiert (Wert 0), simuliert Rockyfor3D je nach Blockabmessungen einen ellipsenförmigen oder kugelförmigen Block (vorausgesetzt, dass d1, d2, d3 und die Gesteinsdichte in dieser Rasterzelle größer als 0 sind).</p>

<p>7 8 9</p>	<p><i>rg70.asc</i> <i>rg20.asc</i> <i>rg10.asc</i></p>	<p>drei Rasterkarten, die die Oberflächenrauheit des Hangs definieren (Doppelraster; [Werte 0-100,00 m]). Die Oberflächenrauheit des Hangs bedeutet nicht die Mikrotopografie (z. B. kleine Geländestufen), sondern beschreibt Steine, die Hindernisse am Hang für die fallenden Blöcke darstellen. Diese Rauheit muss im Feld bestimmt werden, indem homogene Zonen im Untersuchungsgebiet ausgesucht werden, die als Polygone auf der Karte angezeigt werden. Für jedes Polygon wird die Oberflächenrauheit festgelegt, die als Größe des die Hangoberfläche bedeckenden Materials beschrieben wird. Dabei wird das Polygon im Feld hangabwärts betrachtet und die Oberflächenrauheit durch die Größenwahrscheinlichkeitsklassen rg70, rg20, rg10 ausgedrückt.</p> <p>Jede dieser Klassen wird durch eine Rasterkarte dargestellt und entspricht der Höhe eines repräsentativen Hindernisses (MOH) in Metern, auf das ein fallender Block in entsprechend 70 %, 20 % und 10 % der Fälle während eines Kontakts im definierten Polygon trifft (Abb. 2). Die Rauheitswerte liegen zwischen 0 und 100 m (siehe Anhang II). Ist die Hangoberfläche glatt, ist ein Rauheitswert von 0 m zu verwenden. Ein Wert von 100 m kann verwendet werden, um die simulierten Blöcke beispielsweise in einem Fluss zum Stoppen zu bringen. Die Wahl der MOH-Werte erfordert höchste Aufmerksamkeit, da Rockyfor3D sehr empfindlich auf diese Parameter reagiert. Mithilfe der Oberflächenrauheit wird der tangentielle Restitutionskoeffizient errechnet. Es handelt sich dabei lediglich um einen Parameter zur Bestimmung des Energieverlustes bei einem Kontakt mit der Oberfläche. Es ist keine Rauheit, die der Topografie hinzugefügt wird, wie es im DHM dargestellt ist. Es hat demnach keinerlei Auswirkung auf die Geländehöhe oder den Neigungswinkel in einer Rasterzelle.</p>  <p>Abb. 2. Eine Darstellung der Hindernishöhen (MOH) repräsentativ für 70 %, 20 % und 10 % der Oberfläche innerhalb einer homogenen Zone am Hang. Die MOH sollten im Feld hangabwärts blickend festgelegt werden.</p> <p>rg70 = 0.03 m rg20 = 0.1 m rg10 = 0.15 m</p> <p>Während jeder Kontaktberechnung wird die Größe des Materials, auf das der Block trifft, zufällig aus den drei Größenwahrscheinlichkeitsklassen ausgewählt, wobei die Auswahlwahrscheinlichkeiten entsprechend bei 70, 20 bzw.</p>
----------------------	--	--

		<p>10% liegen. Jede Größenwahrscheinlichkeitsklasse wird durch ein Raster repräsentiert. Die Zellenwerte in der Rasterkarte <i>rg70.asc</i> repräsentieren beispielsweise die Größe des Materials, das 70 % der Oberfläche dieser Zellen bedeckt. Die Oberflächenrauheit ist ein wichtiger Parameter im Feldaufnahmeblatt (Tabelle 1), um Simulationen mit Rockyfor3D vorzubereiten. Abbildung 3 dient dazu, die Größenwahrscheinlichkeitsklassen im Feld zu schätzen. Anhang I enthält Beispiele von Rauheitswerten aus dem Feld, und Anhang II erläutert die Präzision der zu verwendenden Rauheitswerte.</p>
10	<i>soiltype.asc</i>	<p>eine Rasterkarte, die die Art des Untergrunds definiert (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 7]). Dieses Raster beschreibt die Elastizität des Untergrunds und muss ebenfalls für jedes Polygon im Feld kartiert werden. Es muss mithilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) in eine Rasterkarte namens <i>soiltype.asc</i> umgewandelt werden. Rockyfor3D kann mit 8 verschiedenen Bodenarten (Untergrundtypen) arbeiten, die in Tabelle 2 aufgelistet sind. Im Modell stehen diese Bodenarten in direktem Zusammenhang mit R_n-Werten (= normale Restitutionskoeffizienten). Zur Untergrundanalyse wird empfohlen eine kleine Grube mit einem Geologenhammer zu graben und unter den Bodenbewuchs zu schauen.</p> <p>Eine Bemerkung zur Bodenart 7 (asphaltierte Straße): Bislang verfügen wir über keinerlei experimentelle Daten über die Energieaufnahme-Eigenschaften von asphaltierten Straßen während einer dynamischen Einwirkung. Unser R_n-Wert, der zwischen 0,32 und 0,39, variiert, ist leicht geringer als der von Hoek (1987) et al. angenommene Wert von 0,4. Das Modell könnte den Energieverlust während eines Aufpralls auf solche Straßen unterschätzen. Fallen dem Benutzer die Steine zu weit, können die mehr Energie absorbierenden Bodenarten 3, 2 oder 1 für asphaltierte Straßen verwendet werden. Wir freuen uns über Feedback von Benutzern, die Erfahrungen bei der Anpassung der Bodenarten für asphaltierte Straßen gemacht haben. So können wir das Modell weiter verbessern.</p>

Tabelle 2: Die von Rockyfor3D verwendeten Bodenarten und die damit verbundenen R_n -Werte

Bodenart	Allgemeine Beschreibung des Untergrunds	Mittlerer R_n -Wert	Wertebereich R_n
0	Fluss, Sumpf oder Material, in das ein Stein komplett eindringen kann.	0	0
1	Feines Bodenmaterial (Tiefe > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Feines Bodenmaterial (Tiefe < ~100 cm) oder Sand/Kiesgemisch im Tal	0,28	0,25 - 0,31
3	Geröll ($\emptyset < \sim 10$ cm); oder mittlerer kompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen; oder Forststraße	0,33	0,30 - 0,36
4	Talus ($\emptyset > \sim 10$ cm); kompakter Boden mit großen Gesteinsteilen	0,38	0,34 - 0,42
5	Anstehendes Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Bodendecke	0,43	0,39 - 0,47
6	Anstehendes Gestein	0,53	0,48 - 0,58
7	Asphaltstraße	0,35	0,32 - 0,39

Tipps zur Erstellung der Raster Nr. 2 - 10:

Erstellen Sie eine Polygon-Vektordatei mit neun Attributen (benannt wie Rastername) oder [laden Sie eine Shape-Datei sowie automatische Skripte zur Datenaufbereitung hier herunter](#). Digitalisieren Sie homogene Geländeeinheiten immer auf der Grundlage von Orthofotos, DHM-Schummerung, Hangkarten, genauen topographischen Karten sowie nach Feldbeobachtungen. Rastern Sie danach die erstellte Vektordatei neunmal unter Verwendung der verschiedenen Attribute der Polygon-Karte. ([siehe dieses Dokument für weitere Informationen zum Thema Datenverarbeitung](#)). **Alle Rasterkarten müssen über den gleichen Kartenumfang und die gleiche Zellengröße verfügen!** Ein Testraster-Datensatz kann [hier heruntergeladen werden](#).

Tabelle 1: Feldaufnahmeblatt zur Steinschlagsimulation mit Rockyfor3D

Allgemein						
Datum*		Nr. Polygon [#]		[#] jedes Polygon bildet eine homogene Einheit; die Größe hängt von der Kartengröße ab		
Ort*		Neigungswinkel*	(° / %)			
Name*		Zone*	Start / Quelle	Transit	Abgelagert	
Eigenschaften des Polygons						
1. Vorherrschender Stein (abgelagert im Polygon oder potentiell aus der Steinschlagquelle fallend)						
Blockform	1. rechteckig	2. ellipsoid	3. kugelförmig	4. scheibenförmig		
Abmessungen des Blocks (d1, d2, d3): (m) x (m) x (m)						
Gesteinsdichte (kg m ⁻³):						
2. Boden- / Untergrundart im Polygon						
Material, aus dem der Untergrund beschaffen ist	<input type="checkbox"/> Fluss, Sumpf oder Material, in das ein Stein komplett eindringen kann.	<input type="checkbox"/> feines Bodenmaterial (Tiefe > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> feines Bodenmaterial (Tiefe < ~100 cm) oder Sand- / Kiesgemisch im Tal	<input type="checkbox"/> Geröll (Ø < ~10 cm); mittel-kompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen / Forststraße	<input type="checkbox"/> Talus (Ø > ~10 cm) / kompakter Boden mit großen Gesteinsteilen	<input type="checkbox"/> Anstehen- des Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Boden-decke
	(soiltype) von Rockyfor3D benötigte Werte	0	1	2	3	4
3. Oberflächenrauheit im Polygon						
MOH : typische Hindernishöhe normal zur Hangoberfläche (m), auf die der Block in 70 %, 20 % und 10 % der Fälle während eines Kontakts an der Hangoberfläche trifft. Muss im Feld hangabwärts blickend festgelegt werden!			MOH für 70% des Probegebiets (rg70)	0 - 100 (m)		
			MOH für 20% des Probegebiets (rg20)	0 - 100 (m)		
			MOH für 10% des Probegebiets (rg10)	0 - 100 (m)		
Liegende Baumstämme*	Mittlere Größe = m	Bedecktes Gebiet = %				
4. Wald*						
Repräsentative Untersuchungsfläche: m m						
BHD [#] (cm)	[#] BHD: Brusthöhendurchmesser (bergseitig, 1,3 m über der Erde gemessen)					
Aufzeichnung aller BHD ≥ 5 cm gemessen im Untersuchungsgebiet: z. B. 8, 31, 17, 13, ...						
Stämme / ha						
Durchschnittliche BHD (cm)		Nadelbäume (%)				
Standardabweichung BHD (cm)						
Arten*						
5. Indikatoren zur Steinschlagaktivität / Stumme Zeugen *						
Mittlere Anzahl der Baumanpralle durch Steinschlag*		Höhe(n) der Baumanpralle durch Steinschlag (m) *				
Tiefe der Einschlagkrater (m) *		kürzlich abgelagerte Steine im Polygon*		Ja / Nein		
6. Bemerkungen / Entwurf*						

* optionale Felder; diese sind nicht erforderlich für Rockyfor3D

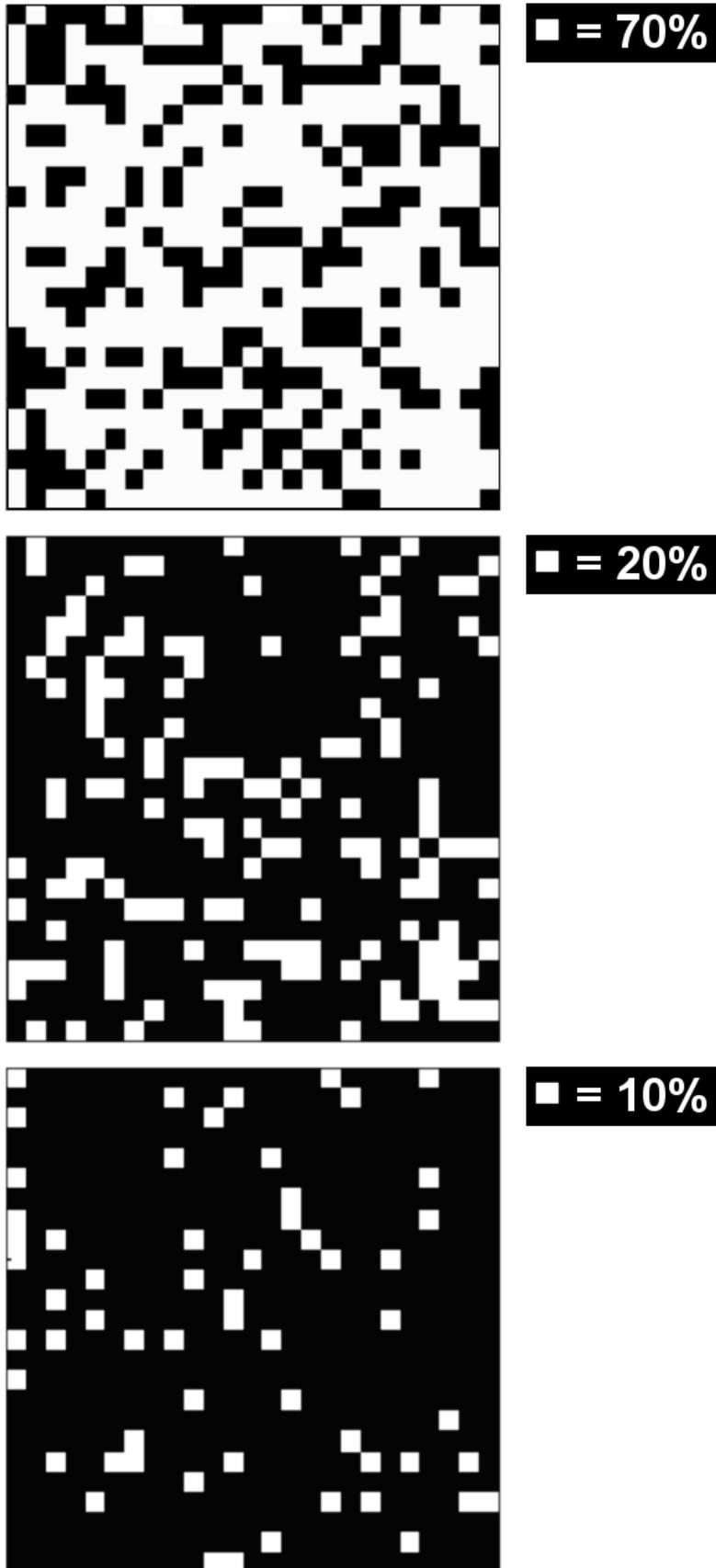


Abb. 3. Unterstützende Abbildungen zur Schätzung der Größenwahrscheinlichkeitsklassen im Feld

2.2 Simulation mit Wald

Wird eine Simulation "mit Wald" durchgeführt, bietet Rockyfor3D zwei Optionen zur Eingabe der Walddaten an:

1. Die erste Option ist die Erstellung einer Baum-Datei, die die x- und y-Koordinaten jedes Baums sowie dessen BHD in cm enthält. Neben arbeitsintensiver Waldinventur im Feld lassen sich diese Daten auch automatisch durch die Analyse eines normalisierten Oberflächenmodells aus Fernerkennungs-laserdaten und nach Methoden von Popescu et al. (2002), Dorren et al. (2007), Monnet et al. (2010) und vielen anderen generieren. Ein entsprechendes Programm ist im Internet gratis erhältlich: http://ssl.tamu.edu/personnel/s_popescu/treevaw/index.htm. Diese Baum-Datei sollte *treefile.txt* heißen und im Arbeitsverzeichnis (working directory) zur Verfügung stehen. Diese Datei sollte folgendes Format haben (**ohne Kopfzeile (Header)**).

```
136578.55 2236789.45 43
136554.89 2236793.22 27
136531.39 2236801.37 34
...
```

Zusätzlich zur Datei *treefile.txt* muss das Raster *conif_percent.asc* im Arbeitsverzeichnis (working directory) zur Verfügung stehen (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 100 %]). In dieser Rasterkarte repräsentieren die Zellenwerte den mittleren Prozentsatz von Nadelbäumen (%) in jeder Zelle (vgl. Abb. 4). Dieses Raster muss über den gleichen Kartenumfang und die gleiche Zellengröße wie das Raster *dem.asc* verfügen.

2. Bei Option zwei wird der Wald durch folgende **vier** Rasterkarten repräsentiert:
 - *nrtrees.asc* – die Zellenwerte repräsentieren die Anzahl der Baumstämme pro Hektar in den einzelnen Zellen (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 10000 ha⁻¹])
 - *dbhmean.asc* – die Zellenwerte repräsentieren den mittleren BHD in den einzelnen Zellen (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 250 cm])
 - *dbhstd.asc* – die Zellenwerte repräsentieren die Standardabweichung der BHD in den einzelnen Zellen (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 250 cm])
 - *conif_percent .asc* (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 100 %]) – die Zellenwerte repräsentieren den mittleren Prozentsatz von Nadelbäumen (%) innerhalb jeder Zelle

Auf der Grundlage dieser vier Raster (siehe auch Abb. 4) platziert das Modell nach dem Zufallsprinzip eine bestimmte Anzahl von Bäumen mit vorgegebenen Durchmessern in jedes Pixel. Danach wird eine Baum-Datei erstellt, der die x- und y-Koordinaten aller Bäume sowie deren BHD enthält. Diese Baum-Datei wird in Ihrem Arbeitsverzeichnis (working directory) unter *treefile.txt* gespeichert und kann bei der nächsten Simulation verwendet werden. Die Zuordnung des BHD basiert auf einer [Gammaverteilung](#), die durch einen Form- und Größenparameter definiert wird. Dieser wird aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der BHD in jeder Zelle gebildet. Alle

Wald-Raster müssen über den gleichen Kartenumfang und die gleiche Zellengröße wie das Raster *dem.asc* verfügen.

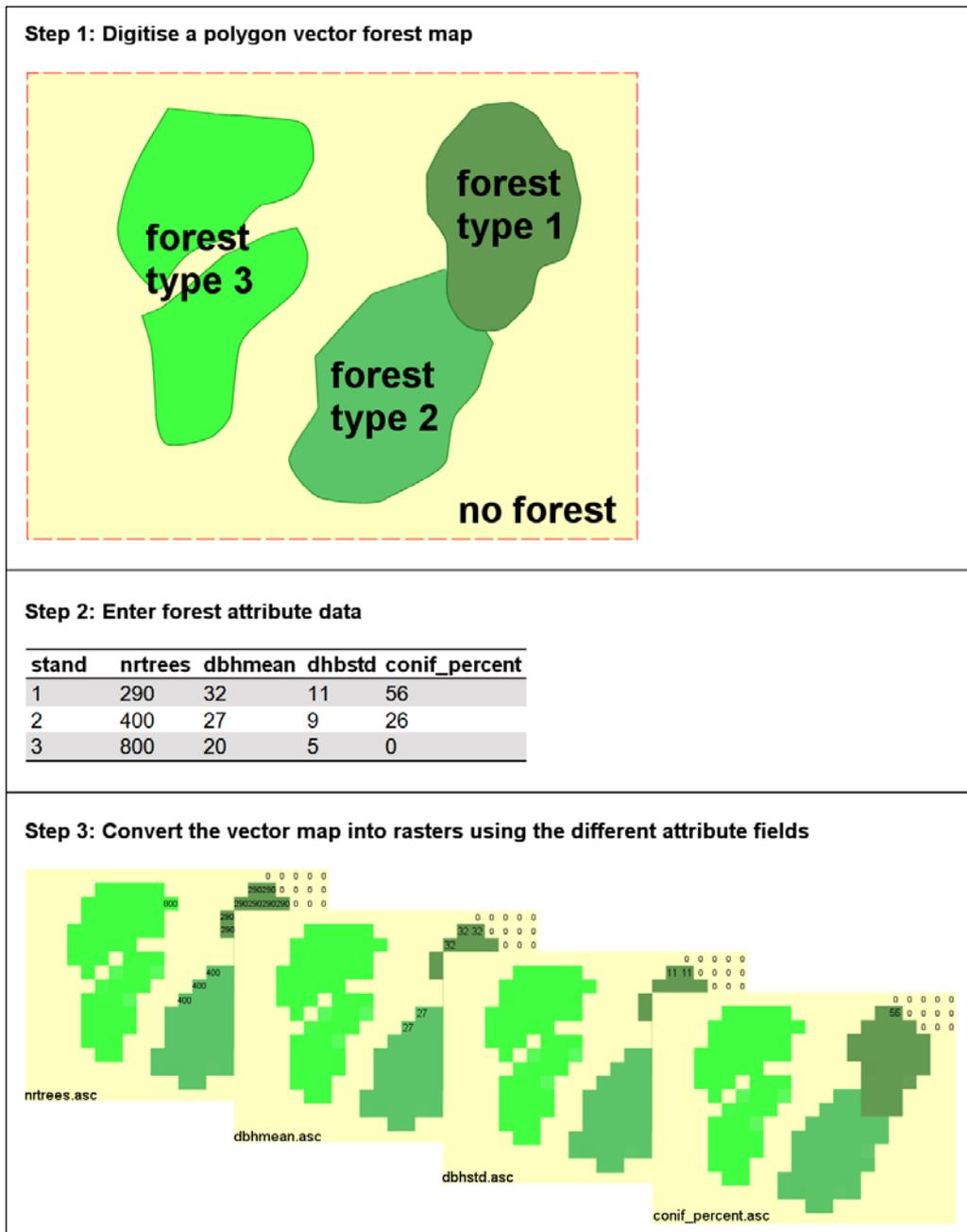


Abb. 4. Ein Arbeitsablauf für die Erstellung der Wald-Rasterkarten für Option B.

Der Vorteil von Option A ist, dass die sogenannte horizontale Waldstruktur gut repräsentiert ist. Das bedeutet, dass wichtige Steinschlagbahnen gut dargestellt werden. Bei Option B sind sehr genaue und zeitintensive Digitalisierungsarbeiten notwendig, um die gleiche strukturelle Präzision zu erreichen. Der Vorteil von Option B ist, dass die Waldschichten, die von den dominanten Bäumen verdeckt werden (z. B. Unterholzvegetation), besser dargestellt werden können als mithilfe von Laser-Fernerkundungsdaten. Da sich diese Waldschichten aus eher kleineren und zahlreichen Bäumen zusammensetzen, können sie eine erhebliche Schutzfunktion zusätzlich zu den dominanten großen Bäumen bieten.

2.3 Simulation mit Steinschlagnetzen

Wenn eine Simulation "mit Steinschlagnetzen" durchgeführt werden soll, sollten die folgenden drei Raster im Arbeitsverzeichnis (working directory) zur Verfügung stehen.

1. *net_number.asc* (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 999])
2. *net_energy.asc* (Ganzzahl-Raster; [Werte 0 - 20000 kJ])
3. *net_height.asc* (Ganzzahl- oder Doppelpelaster; [Werte 0 - 10 m])

Diese Raster können durch Vektorisierung und Rasterisierung einer oder mehrerer Linien mit den Attributen *net_number* (Netznummer) (-), *net_energy* (Netzenergie = die Energieaufnahme des Schutznetzes in kJ) und *net_height* (Netzhöhe in m, **gemessen normal zur Hangoberfläche !**) erstellt werden. Alle Steinschlagnetz-Raster müssen über den gleichen Kartenumfang und die gleiche Zellengröße wie das Raster *dem.asc* verfügen. Jede Linie, die ein Netz repräsentiert, muss über eine separate *net_number* (Netznummer) verfügen. Es gibt keine Begrenzung für die Anzahl der Netze. Allerdings sollten sie sich auf der gerasterten Karte nicht überschneiden.

2.4 Berechnungsschirme

Wird die Simulation "mit Steinschlagnetzen" durchgeführt, werden detaillierte Daten zur Steinschlagkinematik "in den Netzen" gesammelt, die als Berechnungs- oder Überprüfungsschirme dienen. Diese Daten werden in einer Textdatei mit dem Namen "*Rockyfor3D_v50_Calc_SCR_ _dd-mm-yy_HHhMM.txt*" gespeichert, die problemlos mit einem Tabellenkalkulationsprogramm geöffnet werden kann.

Das Setzen von *net_energy* (Netzenergie) und *net_height* (Netzhöhe) auf 0 ermöglicht die effiziente Datensammlung an der Position einer bestimmten Netzlinie und die Berücksichtigung des Trenneffekts eines Netzes in der Simulation. Auch bei einem *net_height*-Wert von 0 werden Daten erfasst. Dies erfolgt jedes Mal, wenn ein Stein in eine der Zellen, an denen ein "Netz" virtuell platziert ist, eindringt oder sie passiert. Es gibt keine Begrenzung für die Anzahl der Netze / Berechnungsschirme.

Die folgenden Daten werden für jeden eingehenden Block ins Netz erfasst (Berechnungsschirm):

- kinetische Energie (E = translatorisch und rotatorisch in kJ)
- Flughöhe, normal zur Hangoberfläche (Ph in m)
- Geschwindigkeit (V in m s^{-1})
- Rotationsgeschwindigkeit (V_{rot} in rad s^{-1})
- Anprallwinkel (Imp_a in Grad = Winkel zwischen einer horizontalen Ebene und der Blockfallbahn im Moment, wenn der Block ins Netz trifft; ein negativer Wert steht für einen fallenden Block, ein positiver Wert steht für einen steigenden Block).

Darüber hinaus wird die Gesamtzahl der Blöcke (n) bei Ankunft im Netz (oder im Berechnungsschirm) erfasst. Die auszugebende Text-Datei enthält sowohl weiterbearbeitete Daten, als auch die simulierten Rohdaten pro Berechnungsschirm). Die weiterbearbeiteten Daten beinhalten für jede Berechnungsschirmnummer (scr_nr) zum Beispiel den Median sowie die 90 %-, 95 %- und 98 %-Werte (bzw. x_{50} , x_{90} , x_{95} oder x_{98}) der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die oben genannten Variablen. Der scr_nr -Wert entspricht dem Wert der Steinschlagnetznummer, die in Abschnitt 2.3. beschrieben ist.

2.5 Simulationseinstellungen

Die folgenden Simulationseinstellungen können über die grafische Benutzeroberfläche (GBO) von Rockyfor3D eingestellt werden:

- die Anzahl der Simulationen pro Quellzelle, bzw. die Anzahl der einzelnen Steinschlag-Fallbahnen, die ausgehend von jeder Quellzelle simuliert werden
- die Variierung des Blockvolumens in Prozent, bzw. die Prozentzahl, mit der die drei definierten Blockabmessungen während jeder Fallbahn-Simulation per Zufall variiert werden
- die zusätzliche Anfangsfallhöhe (in m), welche die Höhe über der DHM-Oberfläche ist, aus der der Block fallen gelassen wird. Dies erlaubt es dem Benutzer die vertikale Anfangsgeschwindigkeit des simulierten Blocks zu steigern. Dieser Wert kann auch hilfreich sein bei der Verwendung von niedrig auflösenden DHM, in denen kleine Felswände ungenau dargestellt werden. Der Standardwert liegt bei 0 m.
- ob ein Wald bei der Simulation berücksichtigt werden soll oder nicht; Bei einer Simulation "mit Wald" sollte definiert werden, welche Eingabedaten verwendet werden (siehe Abschnitt 2.2.).
- ob Netze oder Berechnungsschirme bei der Simulation berücksichtigt werden sollen oder nicht (siehe Abschnitt 2.4.)

Weitere Anfangsparameter, die durch Rockyfor3D vorgegeben werden, sind die horizontale Geschwindigkeit $V_{hor} = 0,5 \text{ m s}$ und die vertikale Geschwindigkeit $V_{vert} = -0,5 \text{ m s}$. Die Geschwindigkeitskomponente V_{vert} beim ersten Aufprall am Hang kann durch das Erhöhen der zusätzlichen Fallhöhe verändert werden.

2.6 Starten von Rockyfor3D

Zum Starten von Rockyfor3D muss das Programm zunächst mithilfe der Datei **setup.exe** installiert werden. Danach kann das Programm ganz normal geöffnet werden. Zuerst wird ein Arbeitsverzeichnis (working directory) ausgewählt (vgl. Abb. 5), das **alle erforderlichen Eingabe-Rasterdateien** (*dem.asc*, *d1.asc*, usw.) beinhaltet. Danach können alle anderen Simulationseinstellungen definiert und die Simulation durch Drücken der Taste "Run Simulation" ("Starte Simulation") gestartet werden. Tritt ein bekannter Fehler auf, wird dies dem Benutzer über ein Nachrichtenfenster mitgeteilt. Unbekannte Fehler können zu einem Programmabsturz führen. In diesem Fall sollte ein Programmneustart durchgeführt und geduldig gewartet werden. Computer können manchmal eigenwillig sein. Nach Beenden der Simulationen werden die Ausgabe-Rasterdaten (vgl. Kapitel 4) im

vorher festgelegten Arbeitsverzeichnis (working directory) gespeichert und eine Schummerung des Geländemodells mit der die Zahl der Blöcke, die jede Zelle passieren, in der Benutzeroberfläche angezeigt. Das Ausgabegeraster kann mit Standard-GIS-Software, z. B. Open-Source-Programmen wie SAGA-GIS (www.saga-gis.org) oder QGIS (www.qgis.org), oder ESRI vom kommerziellen Anbieter ArcGIS geöffnet werden.

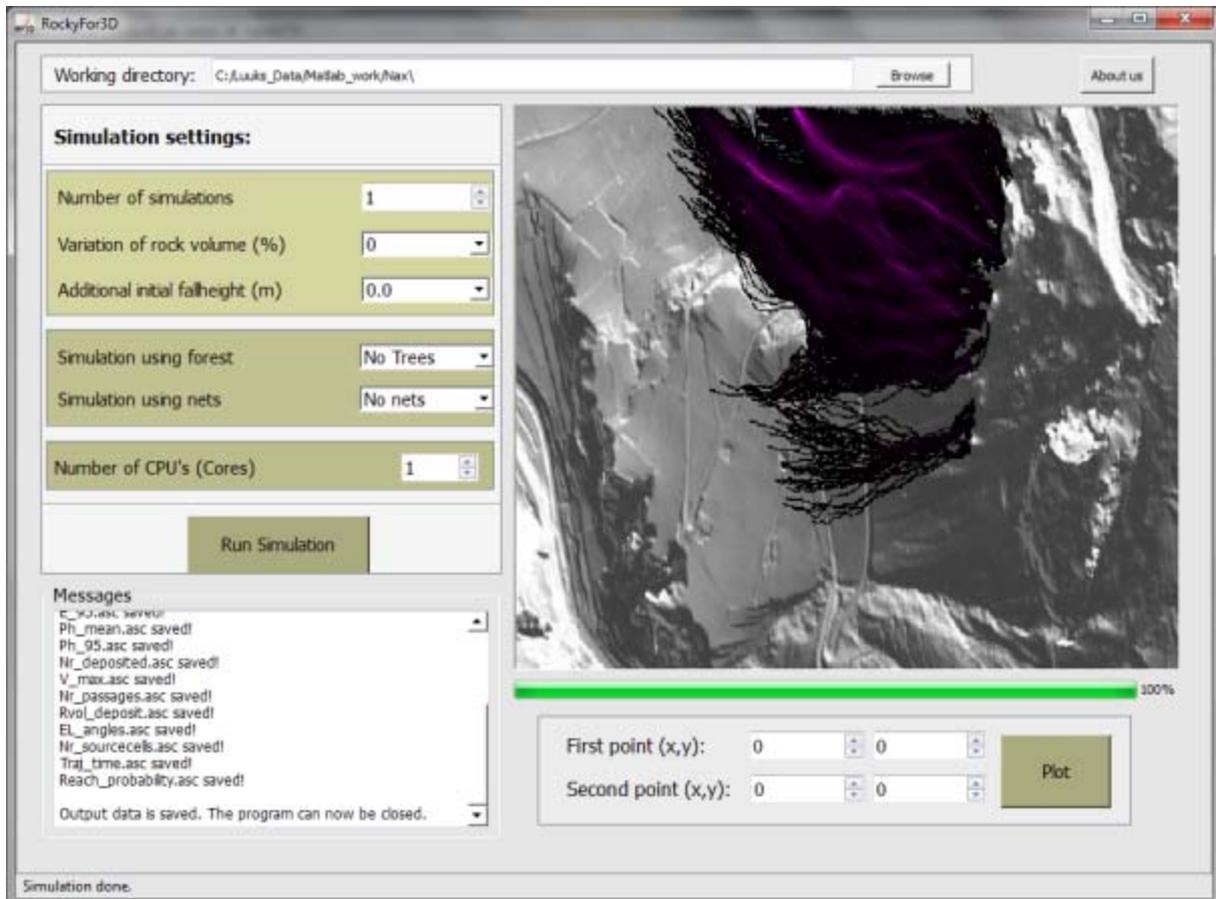


Abb. 5. Die grafische Benutzeroberfläche von Rockyfor3D.

Nach Fertigstellung der Simulationen kann eine vorläufige Datenanalyse mithilfe der grafischen Benutzeroberfläche (GBO) durchgeführt werden. Der Benutzer kann sich einen Fächer von simulierten Energien, Flughöhen und Auslaufgebieten anhand eines 2D-Profiles anzeigen lassen, das über einen Start- und einen Endpunkt definiert wird (schieben Sie den Mauszeiger über die Karte, um zu sehen, wie dies funktioniert). Durch Drücken des Knopfes "Plot" ("Grafisch darstellen") nach Eingabe der beiden Profilpunkte, wird das 2D-Analyseprofil in einem weiteren Fenster angezeigt. Die im Analyseprofil angezeigten Daten werden im Arbeitsverzeichnis (working directory) unter folgendem Namen als ASCII-txt-Datei gespeichert: "*Rockyfor3D_v50_ProfileData_dd-mmm-yyyy.txt*".

3 Hauptkomponenten des Modells

3.1 Blockform

Bei Rockyfor3D können quadratische oder rechteckige, ellipsoide, kugelförmige, bzw. scheibenförmige Blockformen für die Simulationen eingegeben werden. Diese Blockform bestimmt 1) wie das Blockvolumen (und damit auch die Masse) und 2) wie das Trägheitsmoment auf der Grundlage der drei definierten Blockdurchmesser d_1 , d_2 und d_3 definiert wird. Zur Berechnung der Blockposition, des Kontakts mit der Hangoberfläche und des Baumanpralls verwendet Rockyfor3D immer eine Kugelform (siehe auch Abb. 4), die zwei verschiedene Durchmesser haben kann: 1) der kleinste der definierten d_1 , d_2 und d_3 , der berechnet, ob der Block einen Baum trifft und 2) ein größerer, der der Mittelwert der beiden größten Durchmesser von d_1 , d_2 und d_3 ist. Letzterer dient der Berechnung des Energieverlusts während des Bodenkontakts, d.h. dem Verhältnis zwischen der Oberflächenrauheit und dem Radius der größten Blockperimeter (siehe auch Gleichung 7).

Andere komplexere Blockformen sowie explizite Auswirkungen der Blockform auf die Fallrichtung werden nicht berücksichtigt. Dies setzt einen Algorithmus voraus, der die Berechnung einer statistisch fundierten Anzahl von Fallbahnen zulässt und gleichzeitig alle Effekte der Blockform auf die wirkliche Art des Anpralls berücksichtigt. Bisher gibt es keinen Algorithmus, der beide Bedingungen erfüllt. Da sich die von Rockyfor3D für die Berechnung der Fallrichtung verwendeten Algorithmen auf Feldbeobachtungen mit multiplen Blockformen stützen, wird die Form implizit durch die bei der Simulation eingesetzten Wahrscheinlichkeits-Fallrichtungsalgorithmen mit berücksichtigt.

3.2 Parabolischer freier Fall

Der parabolische freie Fall wird mithilfe eines Standardalgorithmus für eine gleichmäßig beschleunigte parabolische Bewegung in der Luft berechnet. Diese Berechnung ermöglicht die Bestimmung der Position und der Geschwindigkeit an der Schnittstelle zur 3D-Topografie, die durch das digitale Höhenmodell (DHM) dargestellt wird. Rockyfor3D simuliert eine 3D-Fallbahn, indem es den Fortschritt auf der x-, y- und z-Achsen berechnet. Hier entspricht die x-Achse jeweils der Ost-West-Richtung, die y-Achse der Nord-Süd-Richtung und die z-Achse der vertikalen Position. Durch die Koordinaten x und y ist die 3D-Fallbahn mit den Eingabe- und Ausgabe-Rasterkarten verbunden. Sind die Position des Bodenkontaktes, die Eigenschaften der Hangoberfläche, die durch die Eingabe-Rasterkarten an der Position definiert sind, sowie die Eingangsgeschwindigkeit bekannt, kann die Kontaktberechnung beginnen.

3.3 Kontakt mit der Hangoberfläche

Die Geschwindigkeit nach einem Kontakt mit der Hangoberfläche wird prinzipiell mithilfe von zehn Funktionen berechnet. Ein erster wichtiger Schritt ist die Umwandlung der Eingangsgeschwindigkeit auf der horizontalen Ebene xy (V_{hor}) und auf der vertikalen Ebene z (V_{vert}) in eine normale eingehende V_n und tangentielle Geschwindigkeit V_t (in Bezug zur lokalen Hangneigung) (vgl. Abb. 6).

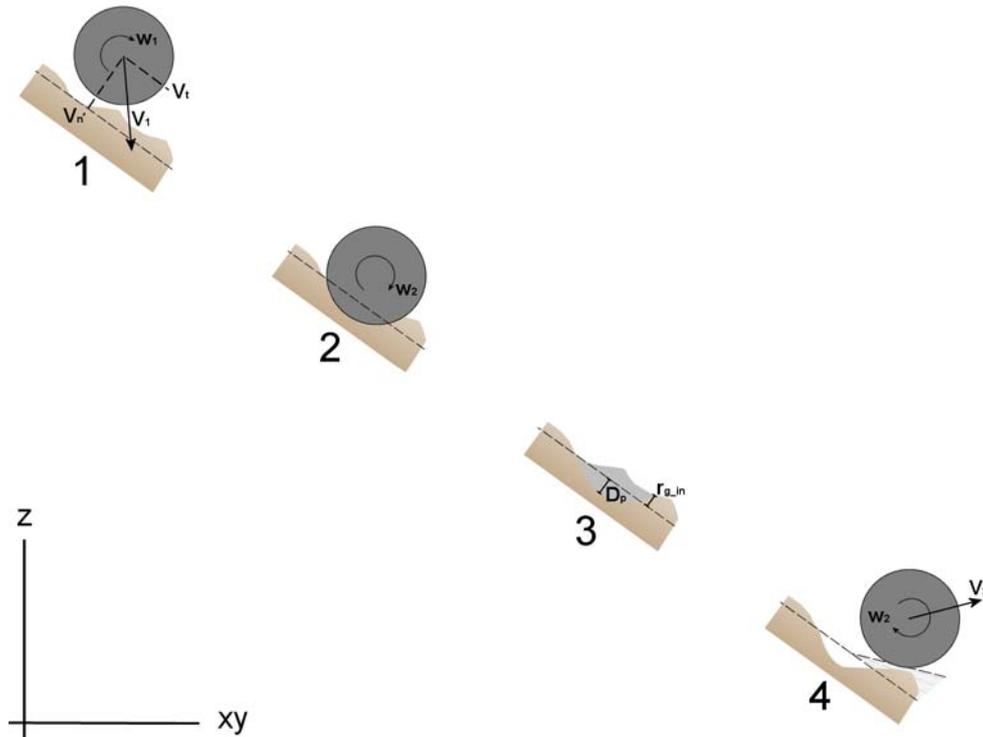


Abb. 6. Der Kontakt, wie er durch die von Rockyfor3D verwendeten Algorithmen dargestellt wird

Danach wird die Eindringtiefe des Blocks am Anprallort auf der Grundlage der Arbeiten von Pichler et al. 2005 berechnet:

Die erforderlichen Parameter für diesen Algorithmus sind:

- der normale Restitutionskoeffizient (R_n)
- der Blockdurchmesser (d in m)
- die Masse des Steins (RockMass in kg)
- die anprallende Geschwindigkeit des fallenden Blocks (V in m/s)

Die verwendeten Konstanten sind:

- $k = 1,207$ (dimensionslose Konstante, die die kugelförmige Blockform berücksichtigt)
- $B = 1,2$ (dimensionslose Kompressibilitätsparameter des betroffenen Materials, der nach Pichler et al. 2005 bei unterschiedlichen Bodentypen kaum variiert)

Die Hauptfunktionen der Eindringtiefe (D_p) lauten:

$$\frac{D_p}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln \left[\frac{1 + I_e / N}{1 + k\pi / 4N} \right] + k \quad \text{für } \frac{D_p}{d} > k \quad (1)$$

$$\frac{D_p}{d} = \sqrt{\frac{1 + k\pi / 4N}{1 + I_e / N}} \frac{4k}{\pi} I_e \quad \text{für } \frac{D_p}{d} \leq k \quad (2)$$

wobei

$$I_e = \frac{RockMass * V^2}{R_i * d^3} \quad (3)$$

wobei R_i der Eindruckwiderstand des betroffenen Materials (in MPa) ist. Dieser wird folgendermaßen berechnet:

$$R_i = 55 * 10^9 * R_n^7 \quad (4)$$

Diese Funktion liefert Werte zwischen 1 - 5 MPa für feine Böden und 200 - 250 MPa für anstehendes Gestein.

$$N = \frac{RockMass}{\rho_{soil} * d^3 * B * 0.5} \quad (5)$$

wobei ρ_{soil} die Dichte des getroffenen Materials (in $kg\ m^3$) ist und folgendermaßen berechnet wird:

$$\rho_{soil} = 1200 * \ln(R_n) + 3300 \quad (6)$$

Diese Funktion liefert Werte zwischen $1500\ kg\ m^3$ für feine Böden und $2500\ kg\ m^3$ für anstehendes Gestein.

Bei Rockyfor3D entspricht die maximale Eindringtiefe D_p dem simulierten Blockradius. Sobald die Eindringtiefe berechnet wird, kann mit der Berechnung der Blockgeschwindigkeit nach einem Bodenkontakt begonnen werden.

Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Blockgeschwindigkeit nach dem Bodenkontakt ist der tangentielle Restitutionskoeffizient (R_t , vgl. Chau et al. 2002). Dorren et al. (2004) zeigten, dass der R_t durch die Zusammensetzung und die Größe der Oberfläche umgebenden Materials und durch den Radius des fallenden Blocks bestimmt wird, da für größere Steine die effektive Oberflächenrauheit geringer als für kleinere Steine ist (vgl. Kirkby und Statham 1975; Dorren 2003). Ein analoges Prinzip ist das des Hangvariations-Koeffizienten (slope variation coefficient), der beispielsweise von Pfeiffer und Bowen (1989), Spang und Krauter (2001) und Dorren et al. (2004) verwendet wird. Daher haben Dorren et al. (2006) folgenden Algorithmus zur Berechnung der R_t vorgeschlagen:

$$R_t = \frac{1}{1 + ((MOH + D_p) / R)} \quad (7)$$

wobei MOH die repräsentative Hindernishöhe an der Hangoberfläche (m) ist; D_p ist die Eindringtiefe (m) und R ist der Radius des fallenden Blocks (m).

Die Praxis zeigt, dass es unmöglich ist, an einem Hang mit aktivem Steinschlag eine detaillierte Messung des MOH an jedem Messpunkt zu gewährleisten. Da es jedoch möglich ist, eine Polygon-Karte mit durchschnittlichen Durchmessern der die Oberfläche bedeckenden Materials anhand verschiedener Durchmesserklassen zu erstellen, sollte R_t einer solchen Karte entnommen werden. Wir entschieden uns für die Kartierung von drei Hindernisklassen, die repräsentativ für die mittlere

Hindernishöhe sind, auf die ein Stein während eines Kontakts von 70 %, 20 %, und 10% in einem im Feld kartierten Polygon trifft. Dann wählt der Kontaktalgorithmus von Rockyfor3D die MOH auf der Grundlage der drei Bodenbedeckungsklassen im Polygon anhand einer Zufallszahl aus. Die Werte der drei Größenwahrscheinlichkeitsklassen Rg70, Rg20 und Rg10 stehen für jeweils 70 %, 20 % und 10 % der Kontaktberechnungen.

Der Wert R_t wird verwendet, um die tangentielle Geschwindigkeitskomponente des Blocks nach dem Kontakt (V_{t2}) gemäß Pfeiffer und Bowen (1989) zu errechnen:

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 * (I * V_{rot1}^2 + RockMass * V_{t1}^2) * R_t}{I + RockMass * R^2}} \quad (8)$$

wobei V_{t1} = die tangentielle Geschwindigkeitskomponente des Blocks vor dem Kontakt ist; V_{rot1} ist die Rotationsgeschwindigkeit vor dem Kontakt und I ist das Trägheitsmoment der definierten Blockform.

Vor der eigentlichen Berechnung von V_{t2} variiert das Modell den Wert des berechneten R_t mit +/- 10 %, um die in der Natur beobachtete Varianz in der Oberflächenrauheit darzustellen. Das Gleiche gilt für den normalen Restitutionskoeffizienten (R_n), der zur Berechnung der normalen Geschwindigkeitskomponente des Blocks nach dem Kontakt V_{n2} gemäß Pfeiffer und Bowen (1989) verwendet wird:

$$V_{n2} = \frac{-V_{n1} * R_n}{1 + (abs(V_{n1})/9)^2} \quad (9)$$

wobei V_{n1} die normale Geschwindigkeitskomponente des Blocks vor dem Kontakt ist. Der Faktor $(abs(V_{n1})/9)^2$ passt den Abfall des normalen Restitutionskoeffizienten an den Anstieg der Anprallgeschwindigkeit an. Dieser Faktor repräsentiert einen Übergang von eher elastischen Bodenkontakten bei geringer Normalgeschwindigkeit zu weniger elastischen Bodenkontakten, die durch verstärktes Auseinanderbrechen des Blocks sowie durch die Kraterbildung der Hangoberfläche bei größerer Geschwindigkeit verursacht werden (Habib 1976). Daher bezieht das Modell indirekt auch die Auswirkungen des Anprallwinkels auf die Art des Kontakts mit ein (vgl. Wu 1984).

Die Rotationsgeschwindigkeit nach dem Kontakt V_{rot2} wird folgendermaßen berechnet:

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) * 2}{5 * R} \right] \quad (10)$$

Ähnlich wie bei Pfeiffer und Bowen (1989) wird der Hangwinkel an der Stelle des Kontakts nach einer einheitlich uniform verteilten Zufallsvariable verringert. Doch die Maximalabnahme des Hangwinkels ist auf 4° festgelegt. Ein Rollen wird durch eine Folge von kurzen Kontakten mit einem Abstand, der gleich dem Radius des Blocks ist, und einem absoluten Mindestabstand von 0,2 m dargestellt. Die letzten beiden Bedingungen gelten für ein leichtes Gefälle zwischen 0 und 30 .

3.4 Baumanprall

Da das Modell anstatt Iterationen analytische Lösungen verwendet, ist die exakte Position des simulierten Blocks kontinuierlich bekannt. So kann die Anprallposition an den Baumstämmen und der Einfluss auf die Energieaufnahme während solcher Anpralle berechnet werden. Zusätzlich zur Anprallposition an den Baumstämmen verwendet das Modell den Durchmesser des getroffenen Baums, den Baumtyp (Nadel- oder Laubbaum) sowie die Blockenergie. Die Positionen und Durchmesser der Bäume in direkter Nähe des simulierten Blocks sind in einem Untermenü mit den x- und y-Koordinaten sowie den BHD-Werten kontinuierlich verfügbar. Erfolgt ein Baumanprall, verliert der Block einen Teil seiner kinetischen Energie, die mithilfe von vier Hauptfunktionen berechnet wird. Diese Funktionen sind in Abb. 7 dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

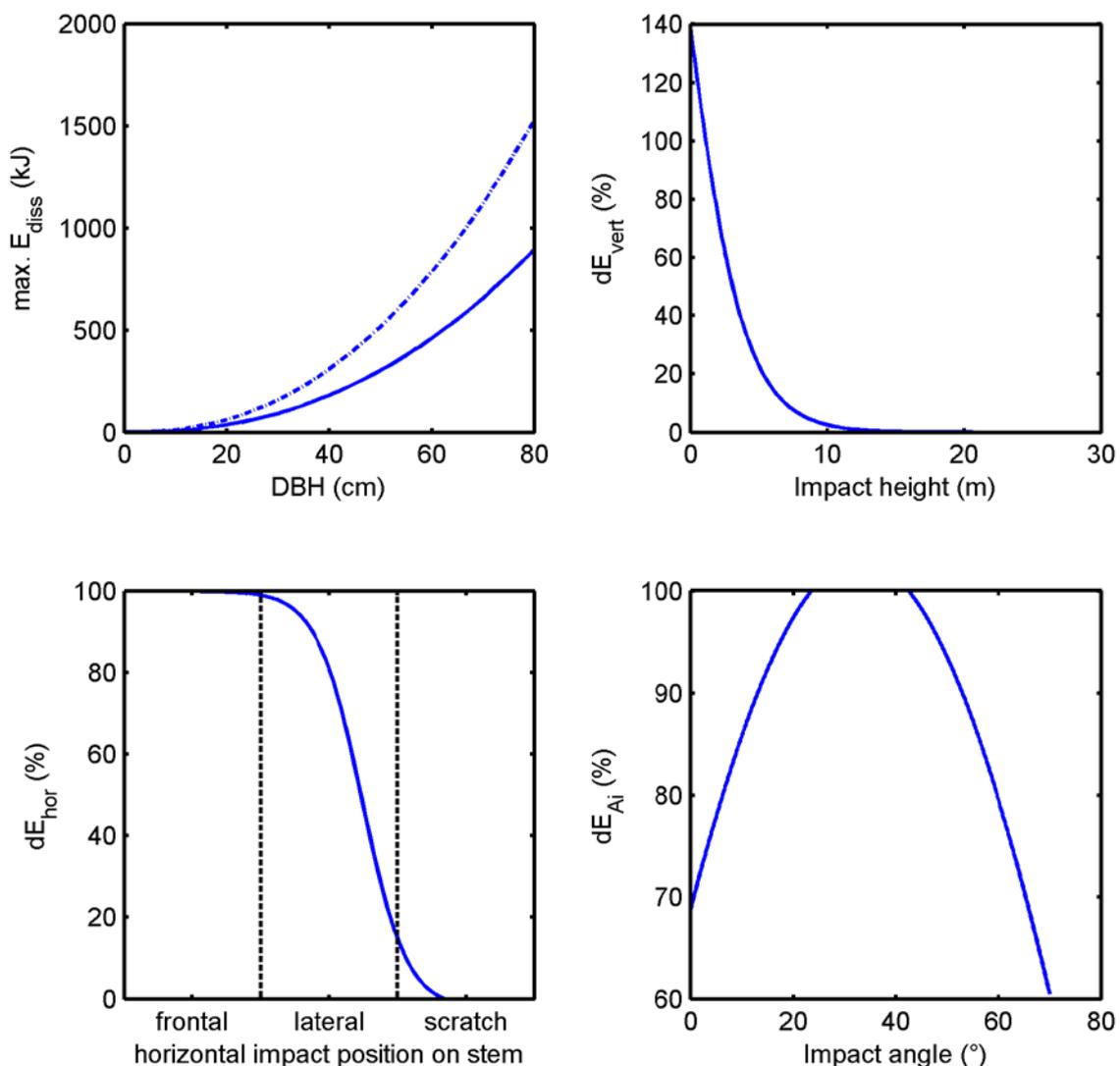


Abb. 7. Darstellung der vier Hauptfunktionen zur Berechnung der Energieaufnahme während eines Baumanpralls. Das obere rechte Schaubild wurde mit einer Baumhöhe von ~13 m (BHD = 20 cm) berechnet.

Nach Dorren und Berger (2006) ist die maximale kinetische Energie (E_{dissM}), die von einem Baum aufgenommen werden kann, vom Stammdurchmesser und der Baumart abhängig:

$$E_{dissM} = FE_ratio * 38.7 * DBH^{2.31} \quad (11)$$

wobei E_{dissM} = das Maximum an kinetischer Energie ist, das durch einen Baum aufgenommen werden kann (in J); FE_ratio = das Bruchenergieverhältnis einer Baumart (nach Dorren und Berger 2006) und der BHD in cm. Rockyfor3D verwendet nur zwei Durchschnittswerte für FE_ratio : 0,93 für Nadelbäume und 1,59 für Laubbäume.

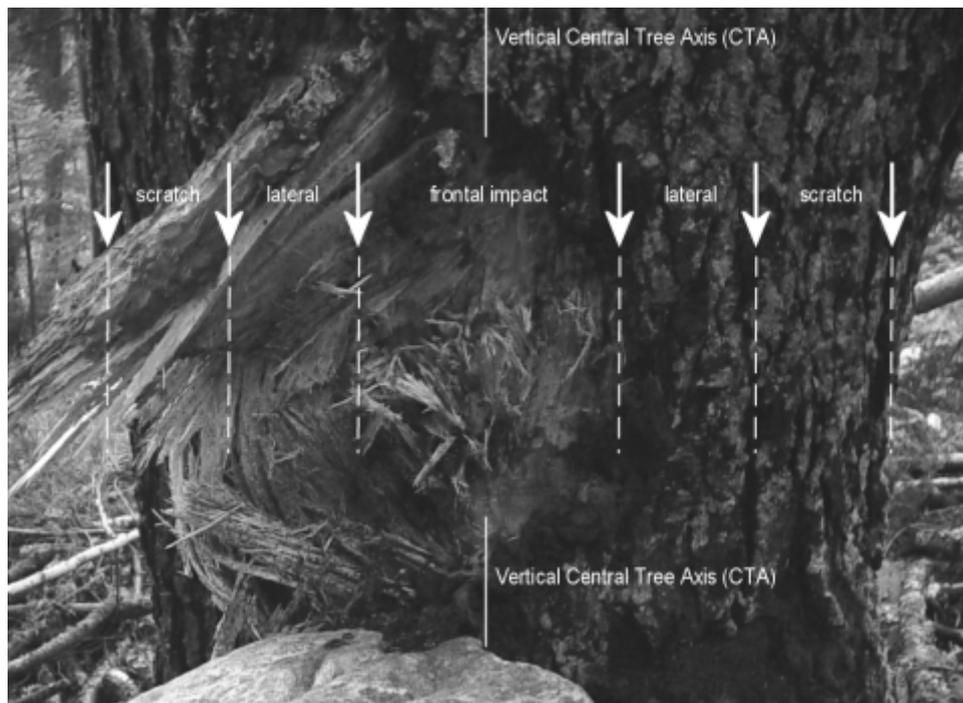


Abb. 8. Drei Haupttypen für Zusammenstöße nach der horizontalen Entfernung zwischen dem Zentrum des Zusammenstoßes und der vertikalen zentralen Baumachse (CTA) aus der Perspektive des Zusammenstoßes.

Ob die maximale Energie wirklich während des Anpralls verringert wird, hängt von der horizontalen (vgl. Abb. 8) und der vertikalen Position des Zusammenstoßes mit dem Baumstamm ab. Die Auswirkung der horizontalen Position (dE_{hor}) wird durch die folgende Funktion bestimmt (nach Dorren und Berger 2006):

$$dE_{hor} = -0.046 + \frac{0.98 + 0.046}{1 + 10^{(0.58 - ((Pi - CTA) / 0.5 \times DBH)) \times (-8)}} \quad (12)$$

wobei dE_{hor} = maximale Energie ist, die von einem Baum aufgenommen werden kann, in Verbindung mit der horizontalen Position des Anpralls [-]; $Pi - CTA$ = horizontale Entfernung zwischen dem Anprall und der vertikalen zentralen Baumachse (in m) und der BHD (in cm).

Die Auswirkung der vertikalen Position oder der Anprallhöhe wird mithilfe der folgenden drei Gleichungen berechnet. Zuerst wird die theoretische Höhe des Baums (H_{tree} in m) auf der Basis des BHD (in cm) berechnet.

$$H_{tree} = 1.22 * DBH^{0.8} \quad (13)$$

Danach wird der Prozentsatz der maximalen Energie, die durch einen Baum aufgenommen werden kann (dE_{vert} [-]), in Verbindung mit der vertikalen Position des Anpralls (Z_i in m) berechnet:

$$dE_{vert} = 1.62 * \left(\frac{1}{1 + e^{18.04 * (Z_i / H_{tree}) + 0.02 * DBH - 2.35}} - \frac{1}{1 + e^{15.69 + 0.02 * DBH}} \right) \quad (14)$$

Gleichung 13 basiert auf der Analyse einer Vielzahl in den Alpen gemessener Bäume. Gleichung 14 und 15 basieren auf neueren Datenanalysen, die von Dorren und Berger (2006), Jonsson (2007) und Lundström et al. (2009) veröffentlicht wurden. Diese neu entwickelten Funktionen und die zugrunde liegenden Analysen werden in nächster Zukunft von Berger und Dorren veröffentlicht.

Der Prozentsatz an maximaler Energie, die durch einen Baum aufgenommen werden kann, in Verbindung mit dem Anprallwinkel (α_{imp} in Grad) des Blocks in Bezug auf den vertikal stehenden Baum ($dE_{\alpha_{imp}}$ [-]) wird wie bei Jonsson (2007) berechnet:

$$dE_{\alpha_{imp}} = \min(1, (1.03 * \sin(1.46 * \frac{\min(\alpha_{imp}, 70)}{180} * \pi + 0.73)) \quad (15)$$

Die absolute, durch einen Baum aufzunehmende Energie (E_{dtree} in kJ) wird folgendermaßen berechnet:

$$E_{dtree} = E_{dissM} * dE_{vert} * dE_{hor} * dE_{\alpha_{imp}} / 1000 \quad (16)$$

3.5 Berechnung der Fallrichtung

Richtungsänderung aufgrund eines Kontakts mit der Hangoberfläche

Die Fallrichtung des simulierten Blocks wird am Anfang durch die Neigung der Quellzelle bestimmt. Die Richtung des fallenden Steins verändert sich durch Kontakte mit der Hangoberfläche oder Zusammenstöße mit Bäumen. Der Ablenkungswinkel nach einem Kontakt mit der Hangoberfläche wird durch die Topografie, die Fallrichtung des Blocks vor dem Kontakt und die Geschwindigkeit des fallenden Blocks bestimmt.

Während eines Kontakts erlaubt das Modell dem Block eine Ablenkung seiner Richtung vor dem Kontakt hin zu der Richtung des Rasterzellenpunktes, den der Block berührt (Abb. 9). Die Hangneigung ist die hangabschüssige Richtung der maximalen Wertveränderungsrate jeder Rasterzelle zu vier benachbarten Zellen (die zwei oben und unten sowie die zwei links und rechts). So steht die Neigung für die steilste Hangrichtung in jeder Zelle und wird wie bei Zevenbergen und Thorne (1987) berechnet. Wie viel der Block von seiner Fallrichtung vor dem Kontakt in Richtung

der Hangneigung in der Rasterzelle abweicht, wird mithilfe einer Zufallszahl und der Geschwindigkeit des Blocks bestimmt (vgl. Tabelle 3).

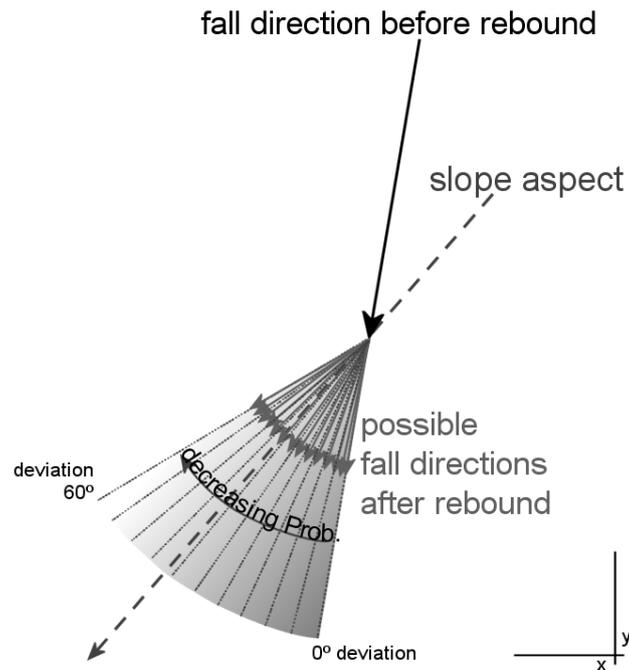


Abb. 9. Das Prinzip des Algorithmus, der die Fallrichtung nach dem Kontakt mit der Hangoberfläche berechnet.

Die Zufallszahl bestimmt, ob der Block zwischen 0 und 5° von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird, oder zwischen 5 und 10°, 10 - 15°, 15 - 20°, ..., 50 - 55°. Alle diese Fälle verfügen über vordefinierte begleitende Eintrittswahrscheinlichkeiten, die durch die Geschwindigkeit des Blocks vor dem Kontakt bestimmt werden, wie in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Wahrscheinlichkeiten (in %) für die Spannen der Ablenkungswinkel nach dem Kontakt für drei Geschwindigkeitsklassen, die von Rockyfor3D verwendet werden.

Ablenkungs- winkel (°)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10 \text{ m.s}^{-1}$	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15 \text{ m.s}^{-1}$	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15 \text{ m.s}^{-1}$	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Die Werte in Tabelle 3 basieren auf statistischen Analysen zu Steinschlagfallbahnen und -geschwindigkeiten, die während Steinschlagexperimenten von Dorren et al. (2006) beobachtet wurden. Bewegt sich der Block im Modell hangaufwärts, sind die oben beschriebenen Ablenkungsspannen für beide Richtungen erlaubt, die sich seitlich zur Richtung vor dem Kontakt befinden. Fällt der Block in eine Grube (eine kleine Vertiefung) im digitalen Höhenmodell (DHM), bleibt die Richtung vor und nach dem Kontakt unverändert.

Richtungsänderung aufgrund eines Baumanpralls

Auf Grundlage der von Dorren et al. (2005) beschriebenen Experimente kann die Fallbahn eines Blocks durch einen Baumanprall seitlich bis zu 76° von seiner

ursprünglichen Fallrichtung abgelenkt werden. Dies gilt für die eingehende und ausgehende Richtung in einem Kreis mit 5 m-Radius um den getroffenen Baum. Lokal, d.h. in der Nähe des Baumstamms kann diese Ablenkung der Fallrichtung vor und nach dem Anprall bis zu 180° betragen. Die Abweichung des Blocks nach einem Baumanprall hängt von der Position des Blockzentrums im Verhältnis zum Baumstamm zum Zeitpunkt des Anpralls ab. Auf dieser Grundlage wurden drei wesentliche Anpralltypen definiert (siehe auch Abb. 8). Auf der Grundlage dieser drei Anpralltypen werden die in Tabelle 4 angegebenen Wahrscheinlichkeiten in Kombination mit einer gleichmäßig verteilten Zufallszahl verwendet, um die Ablenkung zu berechnen.

Tabelle 4. Wahrscheinlichkeiten (in %) für Ablenkung der Fallrichtung nach einem Baumanprall.

Anpralltyp	Wahrscheinlichkeiten (in %)		
	0 - 22,5° Ablenkung	22,5° - 67,5° Ablenkung	67,5° - 76° Ablenkung
Frontal	44	50	6
Seitlich	11	84	5
Schramme	72	24	4

4 Modellausgabedaten

Wenn ein simulierter Block eine bestimmte Rasterzelle überfliegt oder in ihr Bodenkontakt hat, wird das Maximum der verschiedenen in dieser Zelle simulierten Variablen (siehe auch Abb. 10) in separaten Rastern in der betreffenden Zelle aufgezeichnet. Die Ausgabe von Rockyfor3D erfolgt daher im Rasterformat und hat den gleichen Umfang, Zellengröße und Zellenformat wie das Eingaberaster.

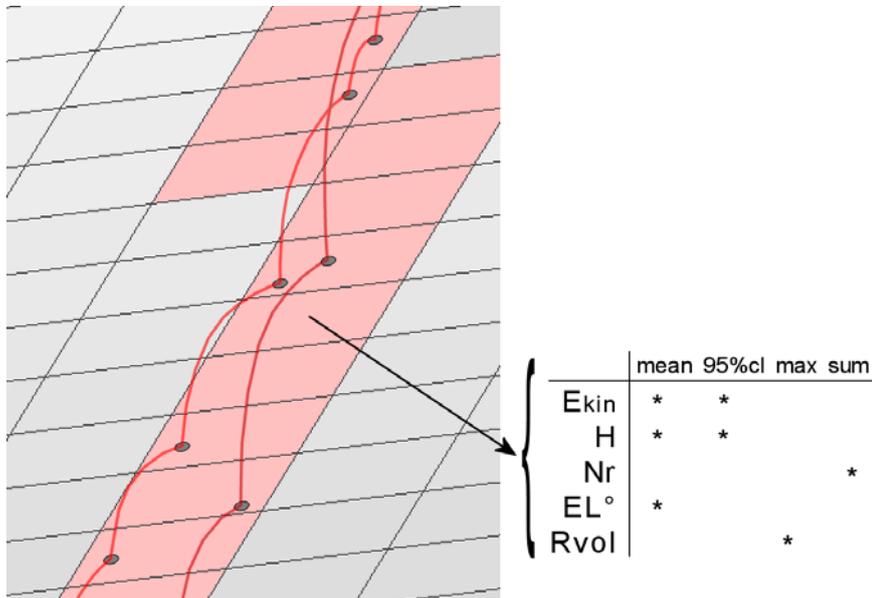


Abb. 10. Von einer 3D-Vector Trajektorie zu Raster-Ausgabedaten.

Die von Rockyfor3D erzeugten Ausgaberraster sind:

- ***E_mean.asc***: **Mittelwert der max. kinetischen Energiewerte** (Translations- und Rotationsenergie in kJ) von allen simulierten Blöcken in einer bestimmten Zelle.
- ***E_50.asc*, *E_90.asc*, *E_95.asc*, *E_98.asc*, *E_99.asc***: Diese Raster entsprechen resp. den Median, sowie die 90, 95, 98 und 99 Perzentile der kinetischen Energiewerte die in jeder Zelle aufgezeichnet werden. Die Ausgabe erfolgt in Ganzzahl-Format und entspricht folgende Energie-Klassengrenzen:
≤3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 270, 285, 300, 500, 1'000, 1'500, 3'000, 5'000, 10'000, >10'000 (in kJ).
- ***E_95Cl.asc***: das 95% Konfidenzintervall (KI) (**95% KI = E_mean + 2 * Standardabweichung der maximalen Werte in einer Zelle, ausgehend von einer Normalverteilung**) der maximalen kinetischen Energiewerte (in kJ), die in jeder Zelle aufgezeichnet werden. Standardabweichungswerte (σ) werden von Rockyfor3D folgendermaßen berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)} \quad (17)$$

Die E_95CI-Werte sind sozusagen die maximalen Energiewerte, die in einer bestimmten Zelle aufgezeichnet werden. Um Steinschlag-Schutzmaßnahmen zu dimensionieren, empfehlen wir die in den Berechnungsschirmen gesammelten Energiewerte und Flughöhen zu verwenden.

- *Ph_mean.asc*: der Mittelwert der maximalen Sprunghöhe des Massenschwerpunkts des Blockes (in m, gemessen in normaler Richtung zur Hangoberfläche) aller Blöcke, die die Zelle passieren
- *Ph_50.asc*, *Ph_90.asc*, *Ph_95.asc*, *Ph_98.asc*, *Ph_99.asc*: Diese Raster entsprechen resp. den Median, sowie die 90, 95, 98 und 99 Perzentile der Sprunghöhen des Massenschwerpunkts des Blockes die in jeder Zelle aufgezeichnet werden. Die Ausgabe erfolgt in Ganzzahl-Format und entspricht folgende Höhenklassen-Grenzen: ≤0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, >20 (in m).
- *Ph_95CI.asc*: 95% KI aller maximalen Sprunghöhenwerte des Massenschwerpunkts des Blockes (in m, gemessen in normaler Richtung zur Hangoberfläche), die in jeder Zelle aufgenommen wurden. Die Berechnung des Ph_95CI-Werts erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie beim E_95CI-Wert. Er kann also als die maximale Flughöhe in jeder Zelle verwendet werden.
- *Nr_passages.asc*: die Zahl der Blöcke, die jede Zelle passieren
- *Nr_sourcecells.asc*: die Zahl der Quellzellen, die eine bestimmte Zelle [-] "füttern"; Das bedeutet, dass diese Karte für jede Zelle anzeigt, aus wie vielen unterschiedlichen Quellzellen die Blöcke in dieser bestimmten Zelle kamen.
- *Reach_probability.asc*: $(Nr_passages * 100) / (Nr_simulations_per_source_cell * Nr_sourcecells)$ [%]. Diese Karte zeigt an, ob es wahrscheinlich (höhere Werte in der Karte) oder unwahrscheinlich ist (niedrigste Werte in der Karte größer als 0), dass ein Stein in einer bestimmten Zelle ankommt.
- *Nr_deposited.asc*: die Zahl der Blöcke, die in jeder Zelle gestoppt wurden. **Diese Karte eignet sich sehr gut zur Skizzierung der Reichweiten eines Untersuchungsgebiets und als Grundlage für eine Gefahrenkarte.**
- *Rvol_deposit.asc*: das maximale Blockvolumen (in m³), das in jeder Zelle gestoppt wurde
- *EL_angles.asc*: ein Raster mit den minimalen, neu berechneten Fahrböschungswinkeln (FB-Winkel) pro Zelle (in °). Der FB-Winkel (beschrieben von Heim 1932; Scheidegger 1973; Toppe 1987; Gerber 1998, Jaboyedoff und Labouse 2003) ist der Neigungswinkel einer virtuellen direkten Linie zwischen dem Ausgangs- und Endpunkt eines gefallenen Blocks. Diese Rasterkarte kann mit herkömmlichen FB-Winkelwerten (27° - 33° im Fall von nicht bewaldeten Hängen und höhere Werte für bewaldete Hänge) verglichen werden.
- *Traj_time.asc*: minimale Zeit, um eine Rasterzelle aus den definierten Quellgebieten [s] zu erreichen
- *V_max.asc*: die absolute maximale simulierte Geschwindigkeit pro Rasterzelle (m/s). Diese Daten sollten mit Vorsicht verwendet werden, da es keine weiteren Informationen über die statistische Verteilung der Blockgeschwindigkeiten gibt. Das Ergebnis wurde auf Anfrage hinzugefügt.

Im Fall einer Simulation "mit Wald" werden folgende beide Raster zusätzlich erstellt:

- *Tree_impact_heights.asc*: max. Anprallhöhe am Baum pro Rasterzelle [m]
- *Nr_tree_impacts.asc*: Anprallanzahl pro Rasterzelle [-]

Alle Ausgabe-Rasterkarten liegen im (Raster-)Format ESRI ASCII Grid vor und können direkt geöffnet und mit den meisten GIS-Programmen dargestellt werden. In einigen Fällen ist ein Import in das jeweilige GIS-Programm erforderlich.

Nach jeder Simulation erzeugt Rockyfor3D eine Log-Datei unter dem Namen "*Rockyfor3D_v50_LOGFILE_DD-mm-yyyy_HHhMM.txt*", die die folgenden Informationen enthält:

Rockyfor3D v5.0 - Simulations completed on Tue Jan 24 15:12:39 2012

simulation started on Tue Jan 24 15:12:33 2012

simulation settings:

- rock volume variation = +/- 0
- nr. of simulations per source cell = 1
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2382
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- Simulation without forest and with nets

Overall simulated block volumes:

- min = 0.100000 m3
- mean = 0.100000 m3
- max = 0.100000 m3

Overall simulated energy values:

- maximum of the mean energy values = 323.900000 kj
- maximum energy value = 462.100000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated trajectories:

EL_angle[°]	frequency[-]	frequency[%]
24.00	1.00	0.04

Output rasters (for explanation see also:
www.ecorisq.org/docs/Rockyfor3D.pdf, chapter 4)

REMARKS

Es wird empfohlen, spezifische Informationen zur abgeschlossenen Simulation im Abschnitt REMARKS (Bemerkungen) hinzuzufügen und diese Log-Datei in einem separaten Verzeichnis zusammen mit allen Ausgaberrastern zu speichern. So können die verwendeten Szenarien für die abgeschlossene Simulation immer nachvollzogen werden.

5 Bibliografie

- Azimi, C., Desvarreux, P., Giraud, A. und Martin-Cocher, J., 1982. Méthode de calcul de la dynamique des chutes des blocs - Application à l'étude du versant de la montagne de la Pale (Vercors). Bull. Liais. Lab. Ponts Chauss. 122: 93-102.
- Burrough, P.A. und McDonnell, R.A., 1998. Principles of geographic information systems. Oxford University Press, Oxford, Großbritannien: 333 S.
- Bozzolo D. und Pamini R., 1986. Simulation of Block Falls down a valley side. Acta Mech. 63: 113-130.
- Bourrier, F., Dorren, L.K.A., Nicot, F., Berger und F., Darve, 2009. Toward objective rockfall trajectory modelling using a stochastic rebound algorithm. Geomorphology 110: 68-79.
- Chau, K.T., Wong, R.H.C. und Wu, J. J., 2002. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39: 69-77.
- Descoedres, F., 1997. Aspects géométriques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. Soc. Suisse Mécan. Sols Roch. 135: 3-11.
- Dorren, L.K.A., 2003. A review of rockfall mechanics and modelling approaches. Progr. Phys. Geog. 27(1): 69-87.
- Dorren, L.K.A. und Maier, B., 2001. GIS basierte Felssturz-Modellierung auf regionalem Maßstab im Montafon (Vorarlberg, Österreich). Forschen und Entdecken 9: 227-236.
- Dorren, L.K.A. und Seijmonsbergen, A.C., 2003. Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. Geomorphology 56(1-2): 49-64.
- Dorren, L.K.A. und Heuvelink, G.B.M., 2004. Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model. Int. J. Geog. Inf. Sci. 18: 595-609.
- Dorren, L.K.A., Maier, B., Putters, U.S. und Seijmonsbergen, A.C., 2004. Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. Geomorphology 57(3): 151-167.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., Le Hir, C., Mermin, E. und Tardif, P., 2005. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. Forest Ecol. Manage. 215(1-3): 183-195.
- Dorren, L.K.A. und Berger, F., 2005. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. Tree Phys. 26: 63-71.
- Dorren, L.K.A., Berger, F. und Putters, U.S., 2006. Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. Nat. Haz. Earth Syst. Sci. 6: 145-153.
- Dorren, L.K.A., Berger, F. und Maier, B., 2007. Cartographier la structure de la végétation forestière avec un système lidar aéroporté en terrain montagnard, Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 186: 54-59.
- Falcetta J.L., 1985. Un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux. Rev. Franç. Géotech. 30: 1-80.
- Gerber, W. 1998: Waldwirkung und Steinschlag. In: Schwitter, R. (Ed.): Dokumentation der 14. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN 1998, unpublished report, Grafenort / Engelberg: pp. 1-15.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R. und Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls, Comp. & Geosc. 28: 1079-1093.
- Habib, P., 1977, Note sur le rebondissement des blocs rocheux. In: Proc. Meet. on Rockfall Dynamics and Protective Works. Bergamo, Italy. ISMES Publ. 90: pp. 123-125.
- Heim, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. Beiblatt Vierteljahrsschrift Naturforsch. Gesell. Zürich, 77: 218.
- Hoek, E. 1987. Rockfall - a program in Basic for the analysis of rockfall from slopes. Unpubl. Notes, University of Toronto/Golder Associates.
- Jaboyedoff, M. und Labiouse, V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics. South African Inst. of Mining and Metallurgy: 575-578.
- Jonsson, M.J., 2007. Energy absorption of trees in a rockfall protection forest, PhD Thesis ETHZ No. 17214: 209 S.
- Kirkby, M.J. und Statham, I., 1975. Surface stone movement and scree formation, J. Geol. 83: 349-362.
- Lundström, T., Jonsson, M.J., Volkwein, A. und Stoffel, M., 2009. Reactions and energy absorption of trees subject to rockfall: a detailed assessment using a new experimental method. Tree Phys. 29: 345-359.

- Meissl, G., 1998, Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innbruck. Geog. Stud. 28: 249 S.
- Pichler, B., Hellmich, Ch. und Mang, H.A., 2005. Impact of rocks onto gravel - design and evaluation of experiments. *Int. J. Impact Eng.* 31: 559-578.
- Pfeiffer T.J. und Bowen T.D., 1989. Computer simulation of rockfalls. *Bull. Ass. Eng. Geol.* XXVI: 135-146.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Nelson, R.F., 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Comp. Elec. Agric.* 37:71-95.
- Scheidegger, A.E., 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mech.* 5: 231-236.
- Spang, R.M., 1988. Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications. In: *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne: pp. 1237-1243.
- Spang, M.R. und Krauter, E., 2001. Rock fall simulation - A state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers. – *Int. Conf. Landslides; Causes, Impacts and Countermeasures*, 17-21 June 2001, Davos, Switzerland: pp. 607-615.
- Stoffel, M., Wehri, A., Kühne, R., Dorren, L.K.A., Perret, S. und Kienholz, H., 2006. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *For. Ecol. Manage.* 225: 113-222.
- Toppe, R. 1987: Terrain models - A tool for natural hazard mapping. In: Salm, B. und Gubler, H., (Eds.): *Avalanche formation, movement and effects*, IAHS Publ. 162: pp. 629-638.
- Van Dijke, J.J. und Van Westen C., 1990. Rockfall hazard, a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS. *ITC J.* 1: 40-44.
- Wu, S.S., 1984, Rockfall evaluation by computer simulation. *Transportation Research Record*, Transp. Res. Board, Washington, DC, Nr. 1031: pp. 1-5.
- Zevenbergen L.W. und Thorne, C.R., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surf. Proc. Landforms* 12: 47-56.
- Zinggeler, A., 1990. Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern – Modellierung der relevanten Teilprozesse, MSc. Thesis Univ. Bern, Geog. Inst.: 116 S.

Auflistung der Änderungen

Rockyfor3D Version	Datum	Änderungen im Modell (<i>m</i>) oder in dieser Beschreibung (<i>d</i>)
5.0	24.01.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung für die Version 5.0 angepasst (<i>d</i>) - Rollen/kleinere Kontakte für sich hangaufwärts bewegende Blöcke angepasst (<i>m</i>) - treefile.txt kann keine Kopfzeile (Header) enthalten (<i>m</i>)
5.0	15.02.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Wert R_n für asphaltierte Straßen geändert (<i>m/d</i>) - Download-Links für die Templates <i>testdata</i> und <i>terrain.shp</i> hinzugefügt (siehe S. 5) (<i>d</i>)
5.0	1.03.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung der Verteilung (Gamma) zur Zuordnung der BHD-Werte für die einzelnen Bäume korrigiert (siehe S. 8) (<i>d</i>)
5.0	30.05.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Link zu den SAGA-Scripts integriert (Siehe S. 5) (<i>d</i>)
5.1	20.09.2012	<ul style="list-style-type: none"> - Beschreibung für die Version 5.1 angepasst (<i>d</i>) - E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc, E_99.asc, Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc, Ph_99.asc als Ausgabe hinzugefügt (<i>m</i>)

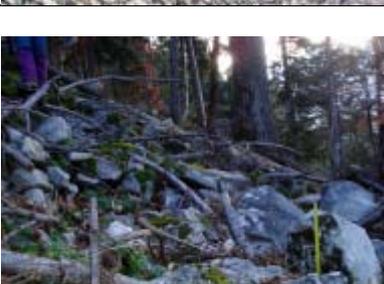
Anhang I. Präzision der Oberflächenrauheitswerte

Bei Rockyfor3D wird die Oberflächenrauheit nur mithilfe der Materialgröße des Untergrundes bestimmt (von Grobkies (> 20 mm) ausgehend; siehe [http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_size_\(grain_size\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_size_(grain_size))) und nicht durch Mikro-Topografie, wie beispielsweise Kuhspuren auf Wiesenhängen. Je nach Größe der Steine/Materialien auf dem Untergrund, die eine wirkliche Rauheit oder sogar "Hindernisse" für den fallenden Stein bei einem Kontakt mit der Oberfläche darstellen, müssen die Oberflächenrauheitswerte mehr oder weniger präzise sein. Wir schlagen deshalb vor, nur die in der folgenden Tabelle dargestellten Werte für die Festlegung der Parameter rg70, rg20 und rg10 zu verwenden.

Größe der Oberflächenrauheit (MOH)	Mögliche Werte für Rg (in m)
Keine Rauheit, keine Hindernisse	0
> 0 – 10 cm	0,03, 0,05, 0,08, 0,1
> 10 – 50 cm	0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4, 0,5
> 50 cm – 1 m	0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1
> 1 – 2,5 m	1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 2, 2,5
> 2,5 – 10 m	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
> 10 m	100

Anhang II. Parameterwerte-Beispiele für unterschiedliche Hangoberflächen

Foto	rg70	rg20	rg10	Bodenart
	0	0	0,05	6
	0	0,05	0,1	5
	0,25	0,5	0,9	4
	0,03	0,05	0,05	3
	0,05	0,05	0,1	4

	0,05	0,1	0,2	4
	0,03	0,03	0,03	3
	0	0	0,05	3
	0	0	0	7
	0,15	0,15	0,25	4
	0,1	0,35	0,15	4

	0	0	0	1
	100	100	100	0

Bodenart	Allgemeine Beschreibung des Untergrunds	Mittlerer R _n -Wert	Wertebereich R _n
0	Fluss, Sumpf oder Material, in das ein Stein komplett eindringen kann.	0	0
1	Feines Bodenmaterial (Tiefe > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Feines Bodenmaterial (Tiefe < ~100 cm) oder Sand/Kiesgemisch im Tal	0,28	0,25 - 0,31
3	Geröll (Ø < ~10 cm); oder mittlerer kompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen; oder Forststraße	0,33	0,30 - 0,36
4	Talus (Ø > ~10 cm); kompakter Boden mit großen Gesteinsteilen	0,38	0,34 - 0,42
5	Anstehendes Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Bodendecke	0,43	0,39 - 0,47
6	Anstehendes Gestein	0,53	0,48 - 0,58
7	Asphaltstraße	0,35	0,32 - 0,39