

SANDRA MELZNER, ALEXANDER PREH

Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis

Runout Models for Rockfalls and Rock Avalanches and its Use for Decision Making Issues

Zusammenfassung:

In der Praxis stellt die Abgrenzung potentieller Wirkungsbereiche von Sturzprozessen mittels Reichweitenmodellen einen sehr wichtigen Teil einer Gefährdungsanalyse dar. Für die Simulation der Reichweite und/oder der Sturzbahnen (Trajektorien) potentieller Sturzprozesse stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung, die von einfachen empirischen Ansätzen bis hin zu komplexen Berechnungsansätzen reichen. Zu dem derzeitigen Stand der Forschung hat sich noch kein Sturzmodell herauskristallisiert, welches ohne Einschränkungen universell für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden kann. Erfahrungen in der Anwendung mehrerer Modelle, sowie Modellierungserfahrung in unterschiedlichen Landschaftsräumen und die Entwicklung quantitativer Validierungsmethoden sind notwendig, um realistischere Aussagen über die Anwendbarkeit eines Modells auf unterschiedliche Fragestellungen treffen zu können.

Stichwörter:

Sturzprozesse, Steinschlag, Massensturz, Sturzmodelle, Gefahrenbewertung

Abstract:

To identify potentially hazardous rockfall areas, it is not only necessary to evaluate unstable rockblocks/ rock masses, but also to estimate the trajectories of possible future rockfall events. Various approaches exist to simulate rockfall runout distances and/or rockfall kinematics, ranging from simple empirical models to complex process-based models. On the current status of research, no model can be used without limitations for different applications. Thus, experiences with different models but as well experiences in various landscapes and the development of quantitative validation methods are essential, when it comes to the implementation of those techniques into land planning decision making issues.

Keywords:

rockfall, rock avalanche, runout modell, hazard assessment

Einleitung

In vielen gebirgigen Regionen weltweit sind Sturzprozesse eine sehr häufig auftretende Prozessgruppe, die Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährden (Abb. 1). Sturzprozesse lassen sich in Einzelabstürze (Steinschlag/Blockschlag) und Massenstürze (Felssturz/Bergsturz) untergliedern. Das wesentliche Unterscheidungskriterium zwischen einem Einzelabsturz und einem Massensturz ist, dass sich beim Massensturz eine zusammenhängende Felsmasse



Für die Simulation der Reichweite und/oder der Sturzbahnen (Trajektorien) potentieller Sturzprozesse stehen unterschiedlichste Methoden zur Verfügung, die von einfachen empirischen Ansätzen bis hin zu dreidimensionalen Prozessmodellen reichen. Bedeutende Unterschiede zwischen den Modellen resultieren vorwiegend aus der Verwendung voneinander abweichender Berechnungsansätzen, die zwangsläufig in einer sehr unterschiedlichen Anzahl/Art von Eingangsparametern und Anzahl/Art von Simulationsergebnissen resultiert.



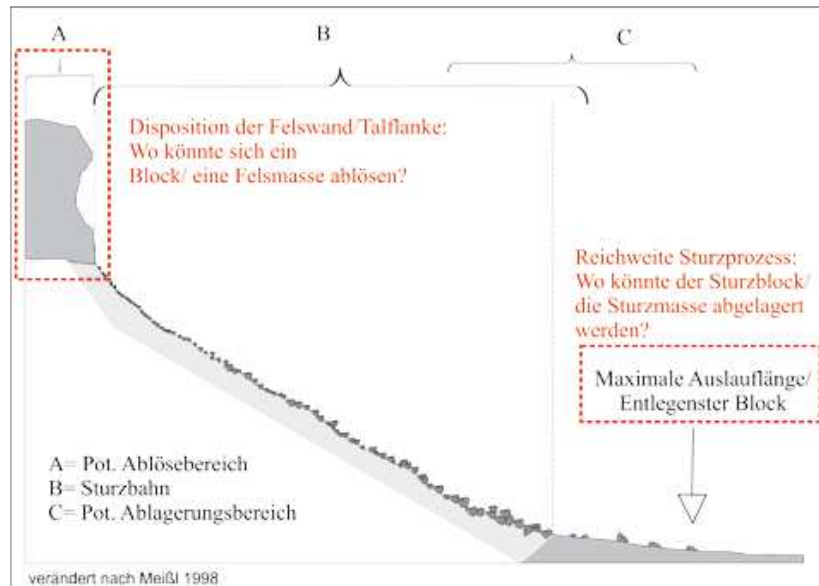
ablöst, die im Laufe des Ablöse- und Sturzprozesses in zahlreiche Blöcke desintegriert wird. Bei größeren Felsstürzen und Bergstürzen beeinflusst dabei die Interaktion der Blöcke sowie das Zerbrechen der Blöcke infolge eines Aufschlages maßgeblich die Bewegung der Sturzmasse hinsichtlich ihrer Ausbreitung.

Ein wesentlicher Teil einer Gefährdungsanalyse von Sturzprozessen stellt – neben der ingenieurgeologischen Analyse der Disposition der Felswände (für Details vgl.: Melzner et al., 2008; Melzner et al., 2012; Poisel, Preh & Hofmann, 2011) – die Abgrenzung potentieller Wirkungsbereiche mittels Reichweitenmodellen dar (Abb. 2).

Methoden für die Bestimmung des Wirkungsbereichs von Sturzprozessen

Die Sturzbahn und die Ablagerungsposition eines/ einer Sturzblockes/-masse sind weitestgehend abhängig von der Position des Ablösebereichs, der Versagensmechanismen und der Geometrie und mechanischen Eigenschaften vom Hang aber auch von dem/der Sturzblock/-masse (Abb. 2).

Nach dem derzeitigen Stand der Forschung gibt es kein Modell, das sowohl die Versagensmechanismen von Talflanken und Felswänden als auch den danach potentiell auftretenden



Sturzprozess in einem Rechengang simulieren kann. Die meisten der Modelle berücksichtigen lediglich die Position des Ablösebereichs und die Kubatur/Form des Sturzblockes/-masse.

Empirische Ansätze oder **analytischen Modelle** stellen einfache und zeitextensive Methoden für die Ausweisung relativer maximaler Reichweiten von Sturzprozessen dar (Abb. 3) (vgl. dazu Heim, 1932; Hungr & Evans, 1988; Meißl, 1998; Sassa, 1988; Scheidegger, 1973; Dorren, 2003; Volkwein et al., 2011; Melzner et al., 2012). Diese Methoden beruhen auf einfachen geometrischen Annahmen bzw. Algorithmen, sodass der Anwender bei den meisten dieser Ansätze sehr wenig Eingangsparameter benötigt.

Mit Hilfe **komplexer Prozessmodelle** kann im Gegensatz zu den empirischen Ansätzen die Kinematik eines Sturzprozesses/einer Sturzmasse (z.B. Energien, Sprunghöhen etc.) berechnet werden. Bei Modellen für Massenstürze hat

die interne Deformation der Sturzmasse während des Prozesses einen maßgeblich Einfluss auf ihre Ausbreitung. Die seitliche Ausbreitung und der Energieverlust infolge der internen Deformation der Masse können mit komplexen numerischen Modellen abgeschätzt werden. Bei den Modellen für Einzelabstürze werden die Sturzblöcke zu meist als starrer Körper betrachtet und die Sturzbahn analytisch berechnet.

Modelle für die Simulation von Einzelabstürzen (Stein-/Blockschlag)

Die **analytischen Prozessmodelle** für Einzelabstürze werden in 2D- und 3D-Modellen unterschieden. Mittels **2D-Modellen** kann entlang eines Hangprofils (Bemessungsprofils) die Kinematik eines Sturzblockes berechnet werden. Die Simulationsergebnisse (z.B. Energien und Sprunghöhen) werden meistens für die Planung und Di-

mensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (Netze, Dämme) auf der Hangskala verwendet. 2D-Modelle können jedoch auch für die Ausweisung von Gefahrenzonen für größere Hangabschnitte (lokale Hangskala) eingesetzt werden, indem mehrere repräsentative Hangprofile ausgewählt werden und die Simulationsergebnisse (z.B. Energien) von diesen Hangquerschnitten mittels Expertenwissen interpoliert werden. Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Modelltyps ergeben sich vorwiegend bei der Festlegung des repräsentativen Hangprofils bzw. des adäquaten Abstands von mehreren Hangprofilen zueinander. Hingegen erweist sich die zeitextensive Datenerhebung und Datenaufbereitung der relevanten Modellparameter und Durchführung der Simulationen mittels übersichtlicher Benutzeroberflächen bei 2D-Modellen als sehr anwenderfreundlich.

Mit **3D-Modellen** werden die Trajektorien von Sturzprozessen räumlich berechnet. Flächendeckende Aussagen über potentielle Wirkungsbereiche von Sturzereignissen sind daher möglich und die Interpolation von Simulationsergebnissen auf Basis von Expertenwissen ist hinfällig. Somit ist der große Vorteil in der Anwendung dieser Methodik gegenüber den 2D-Ansätzen die Fähigkeit, die Komplexität des Sturzprozesses besonders im Hinblick auf 3D-Effekte der Topographie (z.B. seitliche Ablenkung zum steilsten Gefälle) bei der Abgrenzung potentieller gefährdeter Bereiche miteinzubeziehen. Nachteilig bei der Anwendung von 3D-Modellen ist zum einen der erhöhte Aufwand für die flächendeckende Datenerhebung und -aufbereitung und zum anderen die Berechnungsdauer, die je nach Modellauflösung bzw. dem Modell zugrunde gelegten Algorithmen sehr hoch sein kann. Die Anwender dieser Modelle benötigen fundierte Kenntnisse von GIS-Systemen, um die erforderlichen Eingabedaten des Modells für die Simulation vorbereiten zu können. Erschwerend kommt hinzu, dass im Gegen-

satz zu den 2D-Modellen nur wenige 3D-Modelle bisher auf dem Markt erhältlich sind (z.B. PIR 3D, Rockfall Analyst, Rockyfor3D), sodass auf Grund deren Komplexität die Simulation oftmals an den Softwarehersteller vergeben werden muss.

Ein weiteres signifikantes Unterscheidungskriterium zwischen den unterschiedlichen Prozessmodellen ist der Berechnungsansatz (Implementierung des Blocks, Art der Dämpfung und des Rollwiderstands). Bei einigen Modellen wird der Block als form- und dimensionsloser Massenpunkt („lumped mass approach“) dargestellt; im Gegensatz dazu wird bei einer anderen Modellgruppe der Block als unverformbarer Körper („rigid body approach“) betrachtet. Eine Mischform zwischen diesen beiden Ansätzen stellt der sogenannte „hybrid approach“ dar, bei dem ein dimensionsloser Block für die Simulation des freien Falls/ der Flugbahn, für den Aufprall und Rückprall jedoch ein starrer Block mit geometrischer Form angenommen wird. Weitere wesentliche Unterschiede ergeben sich bei den Modellen beispielsweise in der Art, wie wichtige Hangparameter (z.B. Rauigkeit, Dämpfungseigenschaften) in das Modell integriert werden, ob und wie der Effekt von Bäumen und sekundärer Schutzmaßnahmen auf den Sturzprozess berücksichtigt wird. Einige Modelle verwenden einen probabilistischen Ansatz, um die Unsicherheiten in der Qualität der Eingangsparameter besser zu berücksichtigen.

Tabellarische Auflistungen über existierende Software für die Modellierung des Stein-/Schlagprozesses finden sich beispielsweise in den Publikationen von Guzzetti et al. (2002) und Volkwein et al. (2011).

Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsansätze unterscheiden sich die Prozessmodelle stark in der Art aber auch Anzahl der benötigten Eingangsparameter (Tabelle 1). So benötigen empirische Ansätze aufgrund der ein-

fachen geometrischen Beziehung sehr wenige Eingangsdaten, die Prozessmodelle hingegen aufgrund der komplexeren mathematischen Funktionen mehr Eingangsvariablen.

Die in Tabelle 1 beispielhaft aufgeführten Modelle unterscheiden sich auch deutlich

hinsichtlich der Anzahl und Art von Ausgabeparameter (Tabelle 2). Demnach können lediglich die Modellausgabe „maximale Reichweite“ (Geometrisches Gefälle) mit der Modellausgabe „Anzahl der Blockdurchgänge pro Rasterzelle“ (STONE & Rockyfor3D) verglichen werden. Für einen Ver-

	Geometrisches Gefälle	STONE (Guzzetti et al., 2002)	Rockyfor3D v. 4.0 (beta) (Dorren, 2011)	Rockfall 7.1 (Dr. Spang GmbH)
DHM	JA	JA	JA	NEIN
Abbruchbereich	JA	JA Startmatrix- Datei mit der Anzahl der Simulationen pro Zelle	JA Jede Startzelle mit Angabe zur Felsdichte (kg/m ³)	JA x/y- Koordinate +/- gewählte Bandbreite
Blockform	NEIN	NEIN „lumped mass approach“	JA „hybrid- approach“ (4 Blockformen)	JA „hybrid- approach“ (4 Blockformen)
Rauigkeit	NEIN	JA Datei mit horizontaler Elastizitätsmatrix (R t)	JA Mittlere Höhe eines potentiellen Hindernisses normal zur Hangoberfläche (MOH)	JA Beschreibung über Wellenlängen - Amplitudenbeziehung

gleich von Rockyfor3D und Rockfall 7.1 müsste man das „50% Perzentil der maximalen Energie“ von Rockfall 7.1 mit den „mittleren Energie“ von

Rockyfor3D vergleichen. Desweiteren könnte die Modellausgabe „maximale Sprunghöhe“ für den Modellvergleich verwendet werden.

Geometrisches Gefälle (Heim 1932, Meißl 1998)	STONE (Guzzetti et al., 2002)	Rockyfor3D v. 4.0 (beta) (Dorren, 2011)	Rockfall 7.1 (Dr. Spang GmbH)
Maximale Ausläufänge für jeden definierten geometrischen Winkel	Anzahl von Blockdurchgängen je Rasterzelle	Anzahl von Blockdurchgängen pro Rasterzelle	Anzahl von Blockdurchgängen über den Profilverlauf
	Maximal simulierte Geschwindigkeit je Rasterzelle (m/s)	Maximal simulierte Geschwindigkeit je Rasterzelle (m/s)	Statistische Geschwindigkeitsverteilung aller modellierten Blöcke an definierten Profilmittelpunkten (Kontrollquerschnitt und Bauwerk)
		Mittelwert der maximalen Energie (trans + rot, in kJ) aller Blöcke je Rasterzelle	Hüllkurve der maximalen Energie (Darstellung von frei wählbaren Perzentilen) → für jeden Abschnitt des Profils und in der Achse jeder Schutzmaßnahme die statistische Verteilung
		Das 95 % Vertrauensintervallniveau der maximalen kinetischen Energie je Rasterzelle	
	Maximale Sprunghöhe/Flughöhe je Rasterzelle (in m)	Maximale Sprunghöhe (in m; gemessen normal zur Neigung des Hanges) je Rasterzelle	Hüllkurve der maximalen Sprunghöhe (Darstellung von frei wählbaren Perzentilen) → für jeden Abschnitt des Profils und in der Achse jeder Schutzmaßnahme die statistische Verteilung
		Das 95% Vertrauensintervallniveau der Sprunghöhe (in m; gemessen in normaler Richtung) je Rasterzelle	
		Anzahl der abgelagerten Blöcke je Rasterzelle	Lage von Blöcken entlang des Profils und/oder Ablagerung der Blöcke
			Statistische Verteilung der Trefferwinkel aller modellierten Blöcke auf ein Bauwerk
		Wahrscheinlichkeit, dass ein Block eine Rasterzelle durchquert (in %)	
		Maximale Volumen der abgelagerten Blöcke je Rasterzelle (in m ³)	
		Kleinsten Energielinienwinkel je Rasterzelle (in Grad)	
		Minimale Zeitspanne, die benötigt wird von dem Ablösepixel (in s)	
		Maximale Einschlaghöhe am Baum(in m) je Rasterzelle	
		Anzahl der Baumeinschläge je Rasterzelle	

Die meisten auf dem Markt erhältlichen Prozessmodelle haben anwenderfreundliche Eingabemasken, bei denen je nach Modell mehr oder weniger viele Möglichkeiten gegeben werden, die Startbedingungen der Simulation bzw. kontrollierenden Faktoren zu verändern.

Modelle für die Simulation von Massenstürzen (Felssturz und Bergsturz)

Zur Bestimmung der Reichweite von Massenstürzen stehen – neben den bereits erwähnten empirischen Verfahren und analytischen Modellen – numerische Prozessmodelle zur Verfügung.

Die **numerischen Prozessmodelle** können in kontinuumsmechanische und diskontinuumsmechanische Modelle unterschieden werden.

Kontinuumsmechanische Modelle basieren auf Berechnungsansätzen, welche für die Analyse von Strömungen in offenen Kanälen entwickelt wurden. Bei diesem Modellansatz wird die Sturzmasse als äquivalente Flüssigkeit betrachtet (Hung, 1995). Um eine komplette, dreidimensionale Berechnung zu ermöglichen wird bei diesen Modellen eine konstante Geschwindigkeitsverteilung (Mittelwert) über die Höhe vorausgesetzt (Savage & Hutter, 1989). Dieser Umstand stellt eine grobe Vereinfachung der Natur dar, ist aber zulässig, solange die Höhe des Sturzstroms (Heim, 1932) klein gegenüber seiner flächigen Ausbreitung ist. Dass komplexe Materialverhalten wird mit Hilfe von rheologischen Modellen zur Beschreibung der internen Deformation und des basalen Scherwiderstands abgebildet. Die in der Praxis am häufigsten eingesetzten Materialmodelle sind das „Mohr-Coulombsche Reibungsmodell“ und das „Materialmodell nach Voellmy“, welches reibungsabhängiges und turbulentes Verhalten kombiniert. Tabelle 3 zeigt die für eine DAN-Berechnung (Hung, 1995; McDougall, 2006) notwendigen Eingabeparameter.

Mittlerweile stehen mehrere kontinuumsmechanische Codes zur Verfügung, wobei jedoch die meisten nicht kommerziell vertrieben werden. Eine Auflistung der verfügbaren numerischen Prozessmodelle kann der 2007 beim International Forum on Landslide Disaster Management (HongKong) veröffentlichten Benchmark-Exercise (Hung, Morgenstern & Wong, 2007) entnommen werden.

Bei den **diskontinuumsmechanischen Modellen** wird die Sturzmasse als Ensemble von diskreten (distinkten) Elementen modelliert (Cundall, 1971). Will & Konietzky (1988) nutzten den Partikel Flow Code (PFC) der Itasca Consulting Group erstmals für die Modellierung von Felsstürzen. Bei diesem Ansatz wird die Sturzmasse durch eine Ansammlung starrer, kugelförmiger Partikel modelliert und der feste Untergrund (Sturzbahn) mit Hilfe von starren Wandelementen dargestellt. Der Sturzprozess wird dabei über das Kontaktverhalten der Partikel untereinander und mit der Sturzbahn kontrolliert (Preh & Poisel, 2007).

Die für eine PFC-Berechnung erforderlichen Eingabeparameter sind in Tabelle 3 aufgelistet. Dazu ist anzumerken, dass das PFC-Modell (und somit die erforderlichen Eingabeparameter) eher mit den Prozessmodellen für Stein-/Blockschlag (Tabelle 1) als mit den kontinuumsmechanischen Modellen zu vergleichen ist.

Die Tabelle 4 zeigt einer Zusammenstellung der möglichen Ausgaben der unterschiedlichen Methoden. Dabei ist die Qualität der Ausgaben sehr unterschiedlich. Während der DAN-Code die Ablagerungen z.B. in Form von digitalen Höhenmodellen ausgibt, die als Konturplot über das Geländemodell gelegt werden, gibt PFC auch die Blockverteilung des abgelagerten Materials wieder. Daher können mit PFC auch Sedimentationseffekte wie das Aufschwimmen von großen Blöcken (inverse grading) abgebildet werden.

Ein weiterer Vorteil des diskontinuumsmechanischen Ansatzes mittels PFC ist darin

begründet, dass auch die Dynamik von Massenstürzen (Abbildung von Flugphasen, Springen einzelner Blöcke, Krafteinwirkung auf den Untergrund) abgebildet werden kann. Dies ist bei der

Modellierung von kleineren Sturzmassen (Felsstürze) als auch bei der Simulation des Auflaufens der Masse auf Barrieren (z.B. Dämme) als Vorteil zu bewerten. DAN empfiehlt sich aufgrund der

	Empirische Verfahren	Analytische Modelle	DAN2D (Hung, 1995)	DAN3D (McDougall, 2006)	PFC (Itasca Consulting Group)
DHM	NEIN	NEIN	Pseudo-3D Lösung	JA, moderat geglättet	JA
Hangprofil	JA	JA	JA	NEIN	NEIN
Rheologische Modelle	NEIN	Reibungsmodell & Voellmy	Reibungsmodell (mit konstantem Porendruck-Verhältnis), plastisch, laminar, turbulent, Bingham, Potenzgesetz und Voellmy	Reibungsmodell (mit konstantem Porendruck-Verhältnis), Bingham, und Voellmy	
Interne Verformung	NEIN	NEIN, unverformbarer Block	Mohr-Coulombsche Versagenshypothese	Mohr-Coulombsche Versagenshypothese	JA, intrinsisches (innewohnendes) Merkmal des Particle Flow Codes (PFC)
Blockgröße	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA
Blockform	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA, durch die Vereinigung einzelner Partikel (clumps)
Dämpfung (Interaktion Block-Untergrund)					viskose Dämpfung in Normal- und Scherrichtung
Scherwiderstand (Interaktion Block-Untergrund)					Reibungsmodell
Rollwiderstand (Interaktion Block-Untergrund)					Funktion des Einsinken des Blocks in den Untergrund
Dämpfung (Block Interaktion)					viskose Dämpfung in Normal- und Scherrichtung
Scherwiderstand (Block Interaktion)					Reibungsmodell (Mohr-Coulomb)
Rollwiderstand (Block Interaktion)					proportional zur Winkelgeschwindigkeit
Erosion	NEIN	NEIN	JA	JA	NEIN

großen Anzahl an durchgeführten Rückrechnungen und der einfachen rheologischen Modellen für Prognoseberechnungen. Zusätzlich kann bei DAN die Erosion von Material während des Sturzprozesses als auch der Einfluss einer wassergesättigten oder schneebedeckten Sturzbahn einfach berücksichtigt werden.

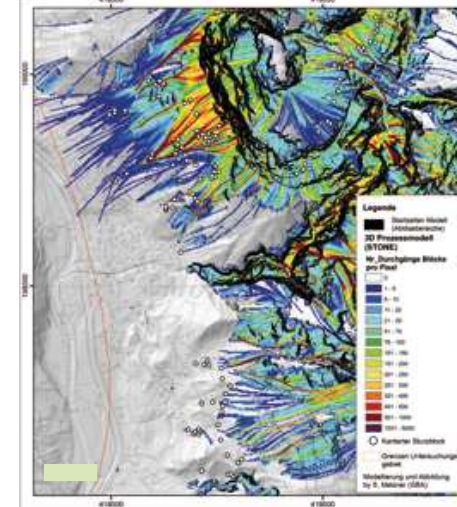
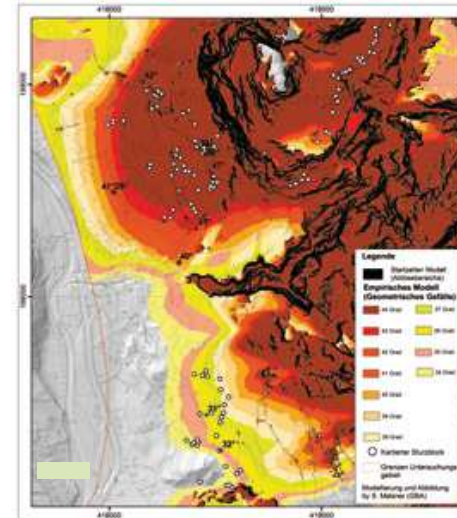
Simulationsergebnisse und ihre Relevanz für die Praxis

Zu Beginn einer Steinschlagstudie muss zunächst genau festgelegt werden, was für ein Ziel verfolgt

wird. Je nachdem, ob das Ziel die Untersuchung eines großen Gebiets (Regionalstudie), die Abgrenzung von Gefahrenzonen auf Gemeindeebene, Planung/Dimensionierung von Schutzmaßnahmen auf der Hangskala, Rückrechnung von Ereignissen oder Sensibilitätsanalysen sind, muss eine dem Ziel und Projektbudget angepasste Bearbeitungsstrategie mit entsprechender Auswahl an Methoden erfolgen.

Im Folgenden soll anhand von drei Fallbeispielen aufgezeigt werden, wofür unterschiedliche Modelle verwendet werden können und welche Limitierungen und Rahmenbedingungen

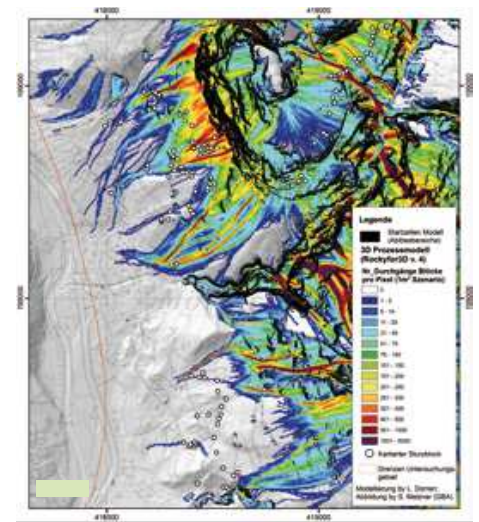
bei der Bearbeitung, Simulation aber auch bei der Bewertung der Güte der Simulationsergebnisse auftreten können. Dies ist vor dem Hintergrund des Einfließens der Simulationsergebnisse in Gefahren- und Risikoanalysen von hoher Bedeutung.



Beispiel 1: Anwendung von unterschiedlichen Steinschlagmodellen innerhalb von Regionalstudien

Für große Gebiete (Regionalstudien) ist zu Beginn einer Bearbeitung der Kenntnisstand über die gebietsspezifischen, Steinschlag bedingenden Faktoren und Ereignisse in der Regel sehr gering bzw. meist nur in kleinen Bereichen der Untersuchungsregion vorhanden. Demensprechend müssen Parameterkarten aus existierenden Basisdaten (z.B. Geologische Karten, DKM etc.) generiert werden, um sie als Grundlage für die Zuordnung der relevanten Eingangsparameter für eine 3D-Modellierung verwenden zu können.

In Abbildung 3 sind die Simulationsergebnisse von zwei 3D-Prozessmodellen und einem empirischen Ansatz dargestellt: im Falle des Ansatzes des Geometrischen Gefälles sind die maximalen Reichweiten für mehrere geometrische Winkel, beim STONE- und Rockyfor3D v.



	Empirische Verfahren	Analytische Modelle	DAN2D (Hungar, 1995)	DAN3D (McDougall, 2006)	DAN3D (McDougall, 2006)
Reichweite	Fahrböschung, Pauschalgefälle	Pauschalgefälle	Fahrböschung, Pauschalgefälle, Maximum (Front & Ende)	Fahrböschung, Pauschalgefälle, Maximum (Front & Ende)	Fahrböschung, Pauschalgefälle, maximale Ausläufänge Schwerpunkt und Ausläufänge jedes einzelnen Blocks
Verteilung der Ablagerungen	NEIN	NEIN	Profil	Ablagerungshöhen der sich bewegenden Masse und Höhe der Ablagerung	Blockverteilung der bewegten und ruhenden Masse
Geschwindigkeit	NEIN	für den Schwerpunkt	Verlauf der Front-, End-, min. und max. Geschwindigkeit über die Zeit	Bereiche mit gleicher maximaler Geschwindigkeit je Zeitschritt	Verlauf der min., max. und mittleren Geschwindigkeit über die Zeit
Energie	NEIN	für den Schwerpunkt	Verlauf der kinetischen Energie über die Zeit	NEIN	kinetische Energie über die Zeit (Rotation, Translation und gesamte kinetische Energie)
Prozessdauer	NEIN	NEIN	JA	JA	JA
Erosion	NEIN	NEIN	Erosionsprofil	Erosionstiefe (digitales Höhenmodell)	NEIN
Krafteinwirkung auf den Untergrund	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN	JA, intrinsisches Merkmal des Particle Flow Codes

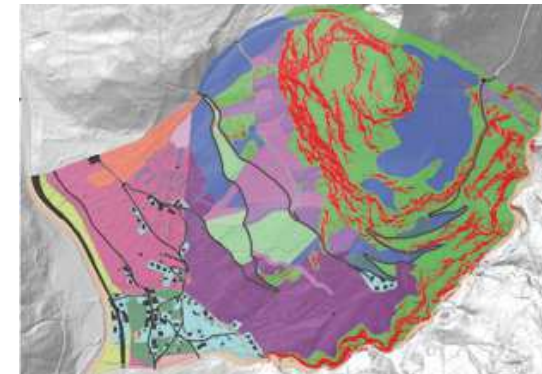
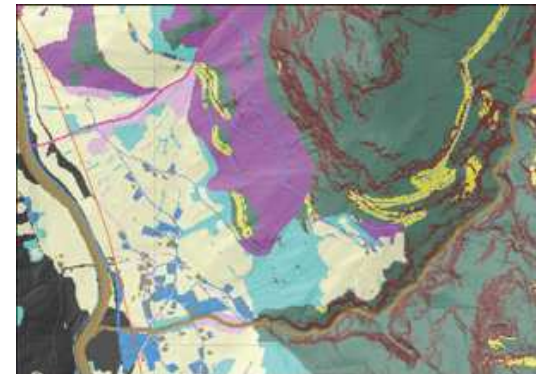
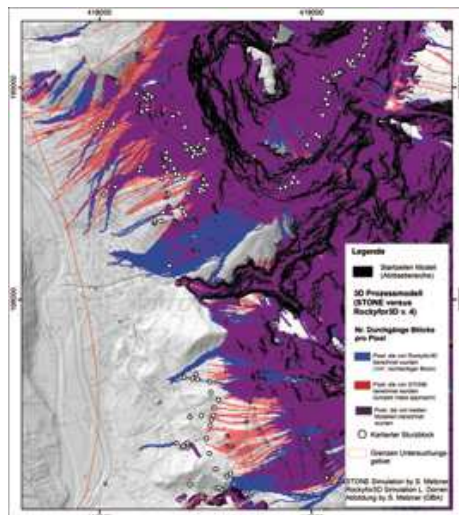
4.0-Modell die Anzahl der Blockdurchgänge pro Fläche dargestellt. Alle Modellierungen wurden mit der gleichen Anzahl von Startzellen (schwarze Bereiche in Abb. 3 & 4) und mit einer Auflösung von 5m gerechnet (vgl. für Details über die Bearbeitung und Berechnungen: Dorren et al., 2011; Melzner et al., 2012).

Das empirische Modell (Geometrisches Gefälle) generiert aufgrund der einfach geometrischen Winkelbeziehung keine Trajektorien, sondern lediglich generalisierte Reichweiten, die in Abhängigkeit vom gewählten Winkel variable Erstreckung haben können. Die Berechnungsergebnisse der beiden 3D-Modelle fallen recht unterschiedlich aus (vgl. Abb. 3 und Abb. 4): das STONE-Modell generiert tendenziell recht lange Trajektorien, die ein fächerförmiges Erscheinungsbild haben. Die räumliche Erstreckung der Trajektorien des Rockyfor3D-Modells hingegen variiert bedeutend stärker innerhalb des Untersuchungsgebiets und zeigen Konzentrationen von Blockdurchgängen vornehmlich in den Tiefenlinien. Im Gegensatz zu STONE, das einen „lumped mass“-Ansatz unterliegt (vgl. Guzzetti et al., 2002), können die Rockyfor3D-Trajektorien sich in Abhängigkeit von der gewählten Sturzblockgröße in ihrer Auslauflänge signifikant unterscheiden. So zeigen Simulationen mit kleineren Blockgrößen bedeutend kürzere, größere Sturzblockgrößen längere Reichweiten als das Ergebnisse für 1m^3 Sturzblöcke in Abbildung 3 & 4. Neben der Blockgröße berücksichtigt das Rockyfor3D-Modell auch die Form von Sturzblöcken, was zu unterschiedlichen Modellausgaben führen kann (Dorren, 2011).

Der Vergleich der maximalen Reichweiten vergangener Steinschlagereignisse (weiße Punkte in Abb. 3 & 4) mit den simulierten Trajektorien der beiden 3D-Modelle zeigt, dass in einigen Bereichen eine gute, in anderen Bereichen eine weniger gute Übereinstimmung mit den Stum-

men Zeugen vorliegt (Abb. 4). Interpoliert man die Endpunkte der simulierten Trajektorien, haben die so ausgewiesenen maximalen Reichweiten in vielen Bereichen eine ähnliche Ausdehnung wie der einfache empirische Ansatz. In anderen Bereichen liefert der empirische Ansatz in Bezug auf die Stummen Zeugen sogar bessere Ergebnisse.

Die Ausführungen zeigen, dass die Vergleichbarkeit und nachvollziehbare Bewertung der Güte der beiden 3D-Berechnungen in dieser Form nicht möglich ist. Dies ist darin begründet, dass für die Simulationen stark generalisierte Parameterkarten verwendet wurden, die aus dem Verschnitt unterschiedlichster, vorwiegend großmaßstäblicher Datengrundlagen (z.B. Geologische Karte im Maßstab 1:50.000) erstellt wurden. Diese wurden hinsichtlich der relevanten Modellparameter klassifiziert und die benötigten Modellparameter auf Basis punktueller Erhebun-

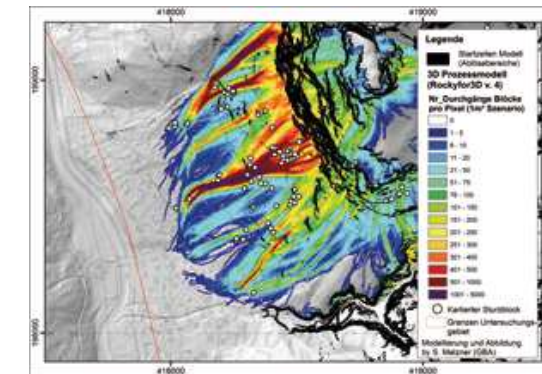
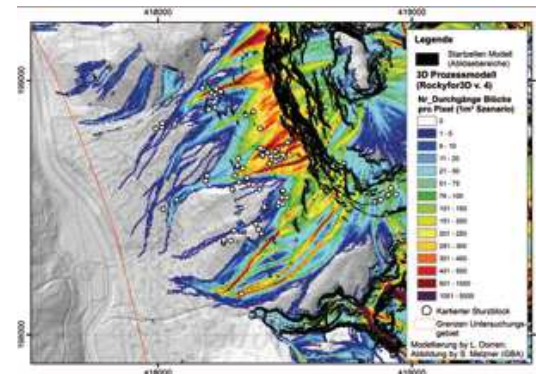


gen bzw. Erfahrungswerten des Bearbeiters zugewiesen (Abb. 5a).

Seitens der Autoren wird die Meinung vertreten, dass es nicht sinnvoll sein kann, Prozessmodelle für sehr große Untersuchungsgebiete zu verwenden, da die Datenlage zu schlecht ist, um den komplexen Algorithmen der 3D-Modelle gerecht zu werden. Zudem suggerieren die Trajektorien im Gegensatz zu dem groben maximalen Reichweiten des empirischen Ansatzes eine Genauigkeit,

die faktisch nicht gegeben ist (vgl. dazu im Detail: Melzner et al., 2011; Melzner et al., 2012).

Für Untersuchungen auf Gemeindeebene (Lokale Raumskala) bzw. Hangskala ist es somit unabdingbar, dass ein hoher Kenntnisstand über die gebietspezifischen Eigenschaften eines Gebiet vorliegt, damit die benötigten Modelleingangsdaten mit einem höheren Detaillierungsgrad für die Berechnungen einfließen können (vgl. Abb. 5b).



In Abbildungen 6 ist ein Ausschnitt der zuvor beschriebenen regionalen Modellierung (Abb. 6a) den Ergebnissen einer Modellierung mit detaillierteren Eingangsdaten für einen Teilbereich gegenüber gestellt. Um die Ergebnisse der Rockyfor3D-Simulationen vergleichen zu können, wurde die detaillierten Simulationen ebenfalls in 5m Auflösung durchgeführt und gleichen Simulationsbedingungen (z.B. Blockgröße und -form) durchgeführt.

Anhand des Simulationsvergleichs wird ersichtlich, dass durch die detaillierte Simulation einige Bereiche potentiell durch Steinschlag betroffen werden könnten, die durch die regionale Simulation als potentiell „sicher“ ausgewiesen wurden.

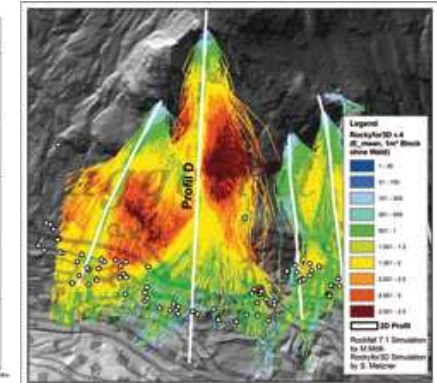
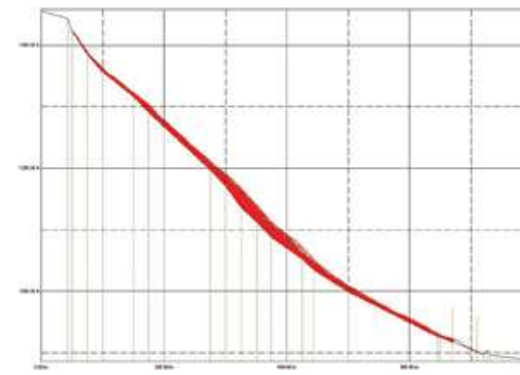
Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, dass regionale Simulationen lediglich als erster Hinweis für eine potentielle Gefährdung verwendet werden sollten. Für die Abgrenzung von Gefahrenzonen und/oder Planung von Schutzmaßnahmen sollten die relevanten Modellparameter im Detail flächendeckend im Gelände erhoben werden. Viel Erfahrung in der Anwendung eines Modells in unterschiedlichen Landschaftsräumen ist notwendig, um den benötigten Detailierungsgrad der Datenerhebung in Bezug auf eine gewisse Fragestellung einschätzen zu können.

Beispiel 2: Vergleich von 2D- und 3D-Steinschlagmodellen auf der Hangskala

Für einzelne Hänge bzw. Hangabschnitte können mit vertretbarem Aufwand detaillierte Daten für die Bewertung der Steinschlaggefährdung erhoben werden. Die Ergebnisse solcher Detailstudien werden vorwiegend für die Planung und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen und Abgrenzung von Gefahrenzonen verwendet. In Österreich wird seitens des Forsttechnischen Dienstes der Wildbach und Lawinenverbauung (WLV) vor-

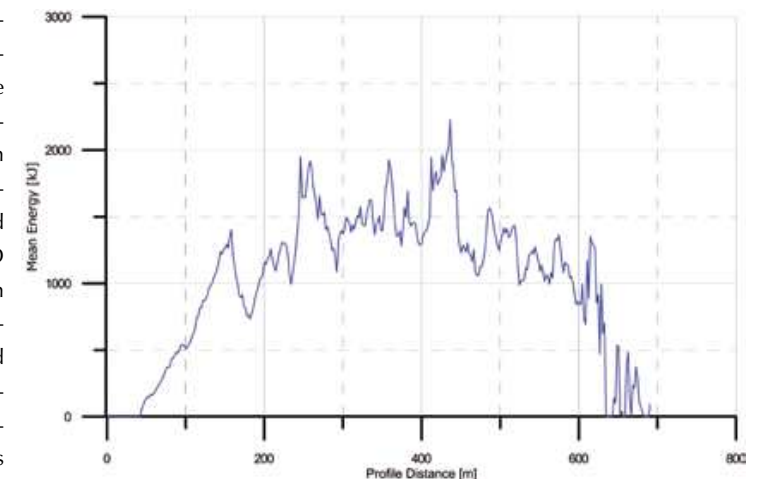
wiegend das 2D-Prozessmodell Rockfall 7.1 (Dr. Spang GmbH) für die Planung und Dimensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (z.B. Netze, Dämme) verwendet. In Abbildung 7 a ist beispielhaft ein Profil dargestellt, entlang dem eine 2D-Modellierung seitens der WLV durchgeführt wurde. Auf Basis der Modellergebnisse „statistische Verteilung der Sprunghöhe an einer definierten Position des Bemessungsprofils“, „verschiedenen Perzentilen der Energie“ und „Blockdurchgänge“ kann mittels einer Gefahren- und Risikoanalyse entschieden werden, ob eine Schutzmaßnahme erforderlich ist und welcher Standort den effektivsten Schutz bieten würde (Mölk, 2008). Wie in Abbildung 7 b ersichtlich wird, können mittels einer Sequenz von repräsentativen 2D-Profilen auch größere Hangbereiche hinsichtlich einer potentiellen Gefährdung untersucht werden und ein Brauner Gefahrenhinweisbereich abgegrenzt werden (Details hierzu in: Mölk, 2008).

Seitens der Fachabteilung Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt (GBA) wurde für das gleiche Untersuchungsgebiet eine 3D-Simulation mittels Rockyfor3D v. 4.0 durchgeführt. Hierfür wurden alle relevanten Modellparameter (Tabelle 1) flächendeckend in einem Maßstab von 1:5.000 kartiert und in einem GIS entsprechend aufbereitet. Um die Modellergebnisse von Rockyfor3D mit den Ergebnissen von Rockfall 7.1 besser vergleichen zu können, wurden nur jene Bereiche vom DHM als Startbereich für die Sturzberechnungen für die 3D-Simulation verwendet, die auch von dem Profil der 2D-Simulation geschnitten wurden. In Abbildung 7b sind die Ergebnisse der Rockyfor3D Berechnungen und die Lage der Bemessungsprofile der 2D Modelle dargestellt. Damit lässt sich gut erkennen, dass im Falle des 3D-Modells der 3D-Effekt der Topographie in die Modellrechnungen eingeht und dadurch die seitlichen Ablenkungen der Sturzblöcke berücksichtigt werden.

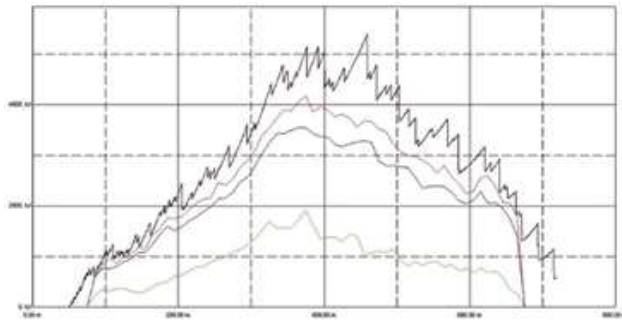


Wie in Tabelle 2 aufgezeigt wird, kommen nur wenige Parameter für den direkten Modellvergleich von Rockyfor3D und Rockfall 7.1 in Frage. Um die mittleren Energien von Rockyfor3D mit der maximalen Energie von Rockfall 7.1 vergleichen zu können, wurde das 50% Perzentil der Energie der modellierten Blöcke über den Profilverlauf

von Rockfall 7.1 dargestellt. Interessanterweise zeigen beide Modelle recht ähnliche Werte im Bereich des gewählten 2D-Profiles (Abb. 8a und 8b). Die Rockyfor3D Berechnungen zeigen jedoch auch sehr deutlich, dass bedeutend höhere Energien in anderen Bereichen auftreten können, als es entlang des gewählten Hangquerschnitts für die 2D-Modellierung der Fall ist (Abb. 7).



Obwohl die flächendeckende Datenerhebung und Durchführung einer 3D-Modellierung mit einem größeren Aufwand verbunden ist, lässt sich die Komplexität des Sturzprozesses bedeutend besser darstellen. Problematisch gestaltet sich jedoch die Tatsache, dass bei einigen 3D-Prozessmodellen (z.B. STONE und Rockyfor3D) keine



umsmechanische und diskontinuumsmechanische Prozessmodelle (Tabelle 4) zur Verfügung. Anhand des kontinuumsmechanischen Codes DAN3D (McDougal, 2006) und des diskontinuumsmechanischen Codes PFC3D (Itasca Consulting Group) werden die beiden grundlegenden Berechnungsansätze

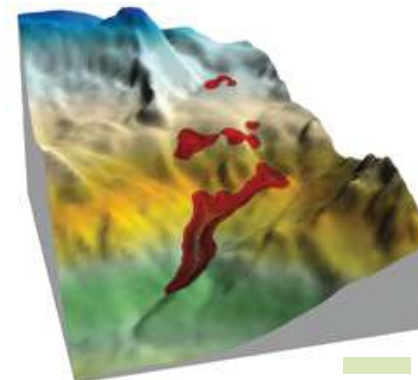
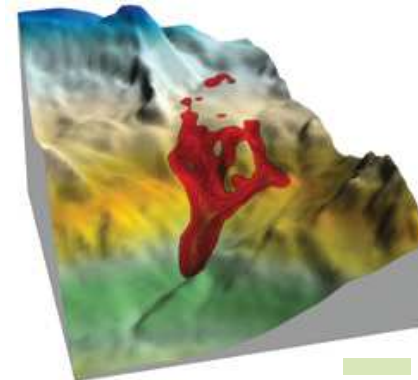
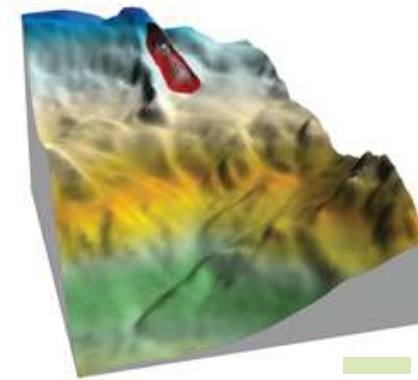
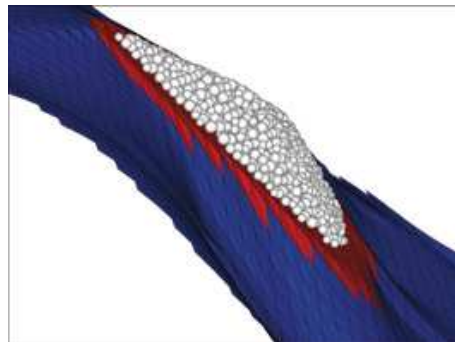
bzw. lediglich mittlere Energiewerte standardmäßig ausgegeben werden, was häufig ein wichtiger Parameter für die Dimensionierung von Schutzmaßnahmen darstellt. So wird in Österreich in Zukunft gemäß ONR 24810 als charakteristische Energieeinwirkung das 99% Perzentil verwendet werden.

Beispiel 3: Numerische Analyse von Fels- und Bergstürzen mittels PFC3D und DAN3D

Wie im Kapitel 2 beschrieben stehen zur numerischen Analyse von Fels- und Bergstürzen kontinu-

einander gegenübergestellt.

Bei beiden Ansätzen ist die initiale Versagensfläche und das daraus resultierende Abbruchvolumen ein wesentlicher Eingangsparameter der Berechnung (Abb. 9a). Diese muss mittels einer ingenieurgeologischen Kartierung und einer felsmechanischen Analyse des Versagensmechanismus festgelegt werden. Beim PFC-Modell wird die Sturzmasse als vollkommen desintegriert angenommen und durch eine irreguläre Anordnung (Packung) von kugelförmigen Partikeln modelliert (Abb. 9b). Die Partikelgenerierung erfolgte dabei unter Berücksichtigung einer abgeschätzten Po-



rosität (Preh, 2004) innerhalb des durch die Geländeoberfläche und der Ablösefläche begrenzten Volumens.

Beim DAN-Modell wird die Sturzmasse als äquivalente Flüssigkeit betrachtet (Hungr, 1995) und dem Abbruchvolumen gleichgesetzt. Dabei obliegt es dem Anwender die Auflockerung der Sturzmasse infolge des Zerbrechens während des Abbruchs abzuschätzen und durch eine Erhöhung des Abbruchvolumens zu berücksichtigen. Beide Berechnungsansätze benötigen zum Aufbau des Geländes ein digitales Höhenmodell mit regelmäßigem Punktrastraster (Gitter-DHM).

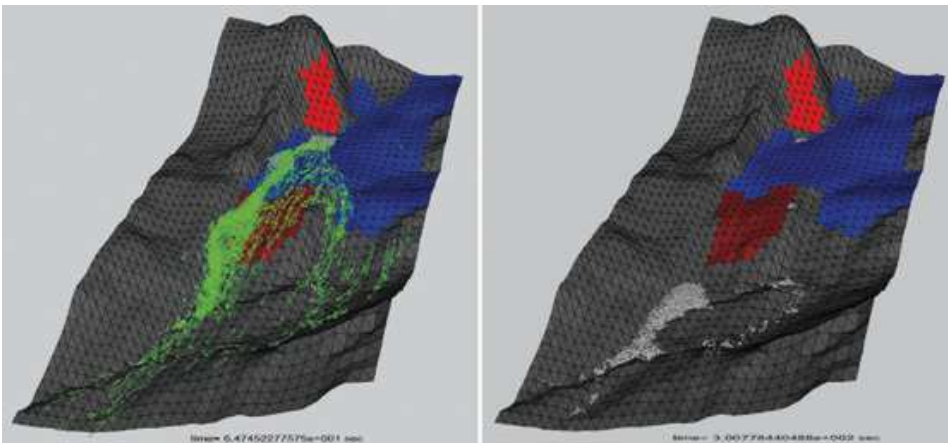
Die Kalibrierung der Modelle erfolgt in der Regel mittels Rückrechnung von vergleichbaren und ausreichend dokumentierten Ereignissen. Für den kontinuumsmechanischen Code DAN konnten mittels Rückrechnung zahlreicher, gut dokumentierter Massenstürze grundlegende Parameter für Prognoseberechnungen abgeleitet werden (Hungr & Evans, 1996; Sosio et al., 2008). Die von Hungr & Evans (1996) empfohlenen Prognoseparameter liefern bei ca. 75% der 23 der Untersuchung zugrundeliegenden Ereignissen brauchbare Vorhersagen. Bei PFC können bei kleineren Felsstürzen die erforderlichen Dämpfungsparameter (vgl. Tabelle 3b) auch durch die Rückrechnungen von Einzelabstürzen gewonnen werden.

Am Beispiel der Modellierung des Bergsturzes Punta Thurwieser mittels DAN3D (Abb. 10a, 10b & 10c) und PFC^{3D} (Abb. 11) lassen sich die Möglichkeiten der beiden Berechnungsansätze gut darlegen. Der Bergsturz Punta Thurwieser (Abbildung 2) ereignete sich am 18. September 2004 an der Südflanke der Puntha Thurwieser (3.658 m.ü.A) nahe dem Zembrù Tal in den italienischen Alpen (Ortler). Dabei stürzte eine hauptsächlich aus Dolomit bestehende Felsmasse mit einer Kubatur von ca. 2,2 Millionen m³ in das Marè Tal und legte dabei eine Strecke von rund 2,9 km zu-

rück. Aufgrund der Morphologie und der Beschaffenheit der Sturzbahn (blanker Fels, Gletscher und Moränenmaterial) zeigte der Sturzprozess ein sehr turbulentes Verhalten. Die Sturzmasse teilte sich phasenweise in mehrere Pfade auf und auch der mittels Videoanalyse ermittelte Geschwindigkeitsverlauf der Sturzfront zeigt mehrere Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen.

Mit beiden Berechnungsansätzen konnte der beobachtete turbulente Verlauf als auch die kartierten Ablagerungen des Bergsturzes (Abb. 10 & 11) gut abgebildet werden. Auch der kontinuumsmechanische DAN-Code ist aufgrund seiner Formulierung (Smoothed Particle Hydrodynamics) in der Lage das Aufspalten der Sturzmasse in mehrere Pfade als auch die Vereinigung kleinerer Teile der Sturzmasse zu modellieren (Abb. 10a, 10b & 10c).

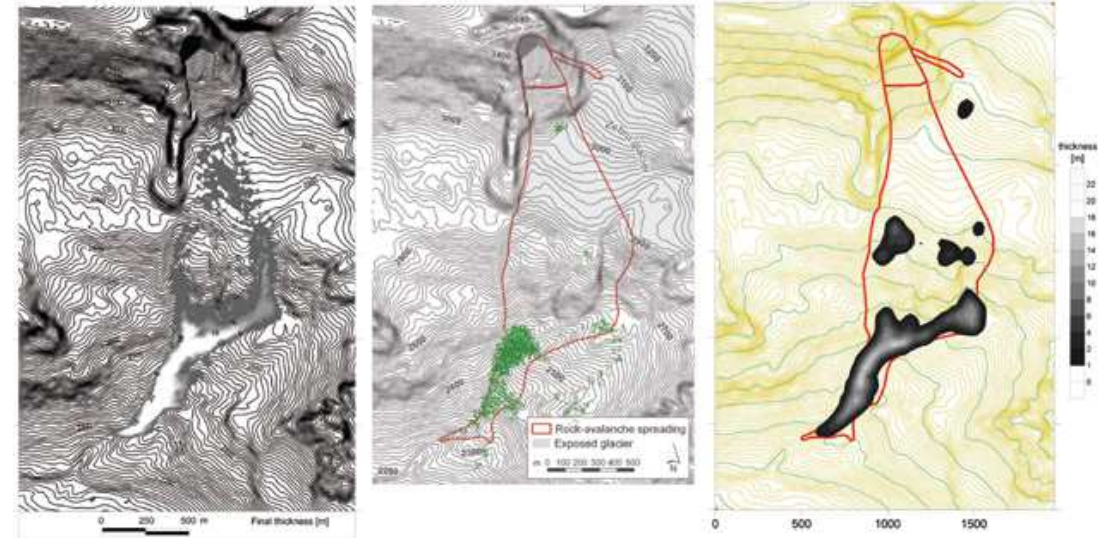
Die Gegenüberstellung der kartierten mit den berechneten Ablagerungen (Abb. 12) zeigt, dass beiden Modelle die Reichweite des Massensturzes gut wiedergeben. Bei der Verteilung der Ablagerungen zeigt das DAN-Modell jedoch eine größere Übereinstimmung mit der Kartierung.



Das DAN-Modell besitzt zusätzlich den Vorteil, dass die abgelagerte Masse direkt als Höhenmodell ausgelesen werden kann, während die Ablagerungshöhen beim PFC mit Hilfe der Partikelpositionen (Textdateien) berechnet werden müssen.

Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die für den Sturzprozess relevanten Widerstandsparameter abhängig von der Art der Bewegung sind. Bei turbulenten Massenstürzen ist Rollwiderstand und die Dämpfung der Block-Block-Kontakte bedeutend, während bei kohärenten Bewegungen (z.B. Frank Slide) der Reibwiderstand ausschlaggebend ist. Im Vergleich zu DAN benötigen PFC-Modelle einen wesentlich höheren Modellierungsaufwand und auch lange Rechenzeiten (bei komplexen Modellen oft mehrere Stunden).

Numerische Modelle werden zu dem derzeitigen Stand der Technik vorwiegend für die Rückrechnung einzelner Massensturzereignisse bzw. Prognose einzelner instabiler Talflanken verwendet.



Schlussfolgerungen

Auch wenn sich in Zukunft auf Länderebene bzw. transnational mit der Entwicklung von Mindeststandards und Richtlinien verstärkt beschäftigt wird, sollte berücksichtigt werden, dass die Einschätzung des Gefahrenpotentials durch Sturzprozesse nur bedingt möglich ist.

Modellrechnungen sind ein wichtiges und oft das einzige Hilfsmittel zur Einschätzung des Gefahrenpotentials durch Sturzprozesse. Jedoch sollte den Anwendern klar sein, dass jedes Modell auf einfachen Modellvorstellungen (Berechnungsansätzen) beruht und die Komplexität der Natur nur annäherungsweise wiedergeben kann. Modelle liefern bei ähnlicher Datenlage/güte immer unterschiedliche Ergebnisse, jedes Modell muss daher für sich kalibriert werden. Erkenntnisse, die mit einem Modell gesammelt wur-

den, können nicht eins zu eins auf ein anderes Modell übertragen werden. Zu dem derzeitigen Stand der Forschung hat sich noch kein Sturzmodell herauskristallisiert, welches ohne Einschränkungen universell für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden kann.

Viele Sturzmodelle können nicht käuflich erworben werden, sondern sind an die Expertise der Softwareentwickler gebunden. Den Anwendern von extern ausgeführten Modellierungen muss bewusst sein, dass mit jedem Modell auf ein gewünschtes Berechnungsergebnis „hingerechnet“ werden kann. Detaillierte Beschreibungen der Modelle und der Modelldurchführung sowie der Eingangsdaten und Modellergebnisse sind somit die einzige Möglichkeit, die Simulationsergebnisse hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit im Hinblick einer Gefahrenzonierung und/oder Planung von Schutzmaßnahmen prüfen zu können.

Das initiale Versagen (Versagensmecha-

nismus, Abbruchsvolumen) ist ein wesentlicher Parameter bei der Analyse von Sturzprozessen. Diese Anfangsbedingungen (Position des potentiellen Herkunftsbereichs, Volumen und initiale Geschwindigkeit) bestimmen den daraus resultierenden Sturzprozess maßgeblich und müssen im Rahmen detaillierter ingenieurgeologischer Kartierungen und Analysen erhoben und bei der Gefahrenbewertung mit einfließen. Zu dem derzeitigen Stand der Forschung werden solche Dispositionsanalysen der Felswände von der Sturzsimulation getrennt betrachtet, da es bislang noch kein Modell gibt, das sowohl die Versagensmechanismen als auch den danach potentiell auftretenden Sturzprozess simulieren kann.

Im Rahmen einer Gefahrenanalyse im klassischen Sinne werden auch Informationen über die Wiederkehrwahrscheinlichkeit benötigt. Im Falle von fluvialen Prozessen gestaltet sich dies bedeutend einfacher, da sie sich in einen definierten Raum (Gerinnebett/ Talaue) abspielen, gebietsintegrale Betrachtungen ausreichen und oft direkt mit dem Auslöser (Niederschlagsereignis) verknüpfbar sind, was überhaupt erst Zeitreihenanalysen ermöglicht. Die Einschätzung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit bei Sturzprozessen ist nahezu unmöglich, da sehr viele Faktoren für die Auslösung eines Sturzprozesses zusammenspielen, flächendetaillierte Betrachtungen erforderlich sind und zudem die Regenerierbarkeit der Materialherkunftsbereiche hinsichtlich zukünftiger Ereignisse meistens nicht gegeben ist oder nur schwer abschätzbar ist.

Wenn ein reproduzierbares und extrapolierbares Modellergebnis geschaffen werden soll, ist es nicht empfehlenswert die Modellberechnungen anhand von kartierten stummen Zeugen willkürlich (ohne Kenntnis des Abbruchbereichs und des Sturzpades) zu kalibrieren, sondern gute prozessorientierte Basisdaten zu

erheben und in die Analyse einfließen zu lassen. Erfahrungen in der Anwendung unterschiedlicher Modelle sowie Modellierungserfahrung in unterschiedlichen Landschaftsräumen und sehr gute Gebietskenntnisse sind notwendig, um realistischere Aussagen über die Fähigkeit eines Modells in Bezug auf die unterschiedlichen Fragestellungen treffen zu können.

Solange es nicht quantitative Validierungsmethoden gibt, ist es schwierig, einen Standard zu definieren, in Bezug auf die Methode aber auch den relevanten Kriterien für eine Gefahrenbeurteilung.

Danksagung

Die Rockyfor3D Simulation auf der Regionalen Raumskala (Dorren) und die Berechnung des Geometrischen Gefälles (Melzner) wurden im Rahmen des INTERREG IV Projekts „Massmove“ (www.massmove.at) erhoben/generiert. Die ALS-Daten der beiden Untersuchungsgebiete „Oberes Mölltal“ und „Bad Bleiberg“ sind Eigentum der Kärntner Landesregierung.

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Dipl. Sandra Melzner
Geologische Bundesanstalt Österreich-
Fachabteilung für Ingenieurgeologie
Neulinggasse 38, A-1030 Wien
sandra.melzner@geologie.ac.at

Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh
TU Wien- Institut für Geotechnik,
Forschungsbereich Ingenieurgeologie
Karlsplatz 13/220-1, A-1040 Wien
alexander.preh@tuwien.ac.at

Literatur / References:

- BOZZOLO, D. (1987).
Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Stein-
schlag. PhD Dissertation, ETH Zürich 1987.
- CUNDALL, P. (1971).
A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in
Blocky Rock Systems. Proceedings of the Symposium of the International
Society of Rock Mechanics, Vol.1. Nancy, France.
- DORREN, L.K.A. (2003).
A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 27: 69-87.
- DORREN, L.K.A. (2011).
Rockyfor3D (v4.1) revealed- transparent description of the complete 3D-
rockfall model. *ecorisQ paper*, www.ecorisq.org: 30 S.
- DORREN, L.K.A., LIENER, S., HÖSLE, B. (2011).
Producing susceptibility maps using 3D-rockfall simulations and shallow
landslide modelling in the Moelltal and Auental (Carinthia, Austria). *Mass-
move report* 2011: 39 S.
- GUZZETTI, F., CROSTA, G., DETTI, R., AGLIARDI, F. (2002).
STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-
falls. *Computers & Geosciences* 28: 1079-1093
- HEIM, A. (1932).
Bergsturz und Menschenleben. Zürich: Fretz und Wassermuth
- HUNGR, O. (1995).
A model for the run out analysis of rapid flow slides, debris flows, and
avalanches. *Canadian Geotechnical Journal* 32: 610-623.
- HUNGR, MORGENSTERN & WONG (2007).
Review of Benchmarking Exercise on Landslide Debris Runout and Mobil-
ity Modelling. in: "Proceedings of the 2007 International Forum on Landslide
Disaster Management", K. Ho et al. (Hrsg.); 2 (2008), ISBN: 978-962-
7619-30-7: 755 - 812.
- HUNGR, O. and EVANS, S.G. (1996).
Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. In Proceedings
of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim. Edited by K.
Senneset. A.A. Balkema, Rotterdam: 233-238.
- MEISSL, G. (1998).
Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-ge-
stützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum.
Innsbrucker Geographische Studien Band 28.
- MELZNER, S., LOTTER, M., KOCIU, A., TILCH, N. (2008).
Erstellung einer detaillierten Gefahrenhinweiskarte und ingenieurgeo-
logische Ausarbeitung relativer Gefahrenklassen für ausgewählte Gebiete
Kärntens im Maßstab 1:10.000. Testgebiet Bad Bleiberg- Prozessgruppe
Fallen/Stürzen. Unveröffentl. GBA Enderbericht, 153 S.
- MELZNER, S., MÖLK, M., DORREN, L., RECHENBACH, P., GUZZETTI, F. (2011).
Rockfall runout modelling for susceptibility evaluation: a multi-scale com-
parison at different sites. Vortrag und extended abstract bei dem "Inter-
disciplinary Workshop on Rockfall Protection 2011, www.rocecs2011.at.
- MELZNER, S. (2012).
Simulation of rockfall trajectories using process-based models. Vortrag und
extended abstract beim "Yosemite Forum" des United States Department of
the Interior, National Park Service am 14.2.2012 in Kalifornien.
- MELZNER, S., LOTTER, M., TILCH, N., KOCIU, A. (2012).
Rockfall susceptibility assessment at the regional and local scales as a basis
for planning site-specific studies in the Upper Moelltal (Carinthia, Austria)
INTERREG IV, Proj 1381-277. Berichte der Geologischen Bundesanstalt
Band 91, www.geologie.ac.at: 107 S.
- MCDUGALL, S. (2006).
A New Continuum Dynamic Model for the Analysis of Extremely Rapid
Landslide Motion across Complex 3D Terrain. Ph.D. Thesis, Department of
Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, 2006.

MÖLK, M. (2008).
Steinschlagsschutz Bad Bleiberg. Steinschlagssimulation als Basis für die Di-
mensionierung von Schutzmaßnahmen. Bericht des Forsttechnischen Dienst
für Wildbach und Lawinenverbauung, Geologische Stelle, Innsbruck.

ONR 24810.
Technischer Steinschlagsschutz: Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und
konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung. Entwurf.
Austrian Standards Institute.

PREH, A. (2004).
Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschie-
bungen mit Hilfe des Particle Flow Codes. PhD Dissertation, Inst. for Eng.
Geology, Vienna University of Technology.

PREH, A. AND POISEL, R. (2007).
3D modelling of rock mass falls using the Particle Flow Code PFC3D..
Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock
Mechanics, Lisbon, July 9-13, 2007. Specialized Session S01 – Rockfall –
Mechanism and Hazard Assessment.

POISEL, R. PREH, A. KOC, O. (2008).
Punta Thurwieser rock avalanche and Frank slide: A comparison based on
PFC3D runout models; Vortrag: 2007 International Forum on Landslide Disaster
Management, Hong Kong, China (eingeladen); 10.12.2007 - 12.12.2007; in:
"Proceedings of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Manage-
ment", K. Ho et al. (Hrsg.); 2 (2008), ISBN: 978-962-7619-30-7: 1059 - 1078.

POISEL, R. PREH, A. HOFMANN, R. (2011).
Slope failure process recognition based on mass-movement induced struc-
tures Hauptvortrag: 2nd Conference on Slope Tectonics, Vienna (eingela-
den); 06.09.2011 - 10.09.2011; in: "2nd Conference on Slope Tectonics", I.
Baron, M. Jaboyedoff (Hrsg.): 6 S.

POISEL R., A. PREH, O. HUNGR (2008).
Run Out of Landslides - Continuum Mechanics versus Discontinuum Me-
chanics Models. *Geomechanik und Tunnelbau*, 1 (2008), 5: 358 - 366.
Sassa, K. (1988). Geotechnical model for the motion of landslides. In Pro-
ceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne. Edi-
ted by C. Bonnard. A.A. Balkema, Rotterdam: 37-56.

SCHEIDEGGER, A. E. (1973).
On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides.
Rock Mechanics 5: 231-236.

SOSIO, CROSTA & HUNGR, O. (2008):
Complete dynamic modelling calibration for the Thurwieser rock avalan-
che (Italian Central Alps), *Engineering Geology* 100 (2008): 11–26.

VOLKWEIN, A., SCHELLENBERG, K., LABIOUSE, V., AGLIARDI, F., BERGER,
F., BOURRIER, F., DORREN, L.K.A., GERBER, W., JABOYEDOFF, M. (2011):
Rockfall characterisation and structural protection- a review. *Nat. Hazards
Earth Syst. Sci.*, Vol. 11: 2617-2651.

WILL, J., and KONIETZKY, H. (1998).
Neue Techniken der Numerik zur Berechnung von Felsböschungen. *Fels-
bau* 16: 155-167.