



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DISSERTATION

**Dreidimensionale numerische Simulation von Felsmassenstürzen
mittels der Methode der Distinkten Elemente (PFC)**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

a.o.Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Rainer Poisel

E203

Institut für Ingenieurgeologie, TU-Wien

und

Prof. Dr.-Ing.habil. Peter Egger

Labor für Felsmechanik, ETH Lausanne

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl. Ing. Werner Roth

A-1160 Wien, Friedmangasse 6/ 14

Wien, im Juni 2003

A handwritten signature in black ink that reads 'Werner Roth'.

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Ingenieurgeologie der Technischen Universität Wien.

Herrn a.o.Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Rainer Poisel, dem „Geburtshelfer der eigenen Gedanken“, danke ich herzlich für die Betreuung und Unterstützung der vorliegenden Arbeit. Großen Dank schulde ich auch Dr.-Ing.habil. Peter Egger, der sich freundlicherweise als zweiter Begutachter zur Verfügung gestellt hat und durch wertvolle Anregungen und Korrekturen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Den derzeitigen und ehemaligen Mitarbeitern des Instituts für Ingenieurgeologie, besonders Christine Cerny, möchte ich hier ebenfalls ein herzliches Dankeschön sagen, für zahlreiche, konstruktive Diskussionen und die moralische Unterstützung, die unverzichtbar waren für den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit.

Für die Bereitstellung von Daten und die entgegengebrachte Hilfsbereitschaft möchte ich mich bei der Firma Geobyte und der Firma Itasca bedanken.

Herzlich bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei allen Kollegen, Diplomanden und Freunden, die wesentlich an der Fertigstellung dieser Dissertation beteiligt waren.

Kurzfassung

Massenbewegungen in alpinen Regionen stellen oft eine Gefährdung von besiedeltem Gebiet und Infrastruktureinrichtungen dar. Die Auswirkungen von drohenden Massenbewegungen abschätzen zu können, ist daher von großer Wichtigkeit.

Aus geomechanischer und felsmechanischer Sicht erschien es aus Gründen der Modellierbarkeit sinnvoll, im Gegensatz zu den gebräuchlichen Klassifizierungen Massenbewegungen in den Auslöse- oder Versagensmechanismus einer Talflanke oder Felsböschung und den Sturzprozess zu unterteilen. Die Sturzprozesse werden in Steinschlag, Felssturz und Bergsturz eingeteilt. Während unter Steinschlag der Sturz von Einzelblöcken verstanden wird, werden mit Felssturz und Bergsturz rasche, sturzartige Massenbewegungen unterschiedlicher Volumina bezeichnet, bei denen Felsmassen, bestehend aus diskreten, interagierenden Einzelblöcken, durch gravitative Kräfte bewegt werden. Für die Begriffe Felssturz und Bergsturz wird der Überbegriff „Felsmassensturz“ eingeführt.

Für die numerische Untersuchung von Felsmassenstürzen im dreidimensionalen Raum unter Zugrundelegung realer physikalischer Zusammenhänge wurde das Programm PFC (Particle Flow Code), basierend auf der Methode der Distinkten Elemente, herangezogen. Die Grundelemente von PFC sind kugelförmige Partikel, die sich beliebig anordnen und zu größeren Einheiten verbinden lassen, sowie ein- bzw. zweidimensionale Wandelemente. PFC besitzt neben den Bewegungs- und Kontaktgesetzen für einzelne Blöcke auch eine Routine für die Ermittlung jener Blöcke, die miteinander oder mit der Geländeoberfläche in Kontakt treten. Die Partikel können an ihren Kontaktpunkten Bindungen eingehen, die infolge einer zu großen Belastung (Aufprall) auch wieder brechen können. Für eine realistische Modellierung des Sturzprozesses war es notwendig neben der vorhandenen nichtviskosen Dämpfung eine viskose Dämpfung für den Aufprall eines Blockes auf die Geländeoberfläche einzuführen und geeignete Dämpfungswerte anhand von numerischen Aufschlagtests und durch Rückrechnung (z.B. des Felsmassensturzes Frank Slide, Alberta, Kanada) zu ermitteln. Die Bewegungsarten Springen, Gleiten, Rollen und der freie Fall, die bei Steinschlägen und Felsmassenstürzen auftreten, und die Interaktion zwischen Partikeln konnten damit in PFC realistisch modelliert werden.

Die Möglichkeiten realistischer, dreidimensionaler Modellierungen von Felsmassenstürzen in PFC^{3D} mithilfe der durchgeführten Adaptionen werden an den Beispielen der Felsmassenstürze Eiblschrofen (Tirol, Österreich) und der Massenbewegung Oselitzenbach (Kärnten, Österreich) gezeigt. Diese auf geomechanischen Grundlagen basierende Methode ist daher geeignet, bei der Abgrenzung von Gefährdungsgebieten, bei der Dimensionierung von Schutzmaßnahmen usw. im Zusammenhang mit Felsmassenstürzen einen wichtigen Beitrag zu leisten.

Abstract

Mass movements in alpine regions are often endangering populated areas and infrastructural facilities. Therefore the ability to give an estimation of the area affected by a possible mass movement is of great importance.

Contrary to classification systems of landslides commonly used, the processes of mass movements have been divided into failure mechanisms of rock slopes and into the runout process due to geomechanical and rock mechanical aspects and because of modelling reasons. Several terms such as rock avalanche, sturzstrom, rockfall, fragmental rockfall are used to describe the runout.

In this paper the term rock mass fall is introduced in order to describe a rapid mass movement, where a mass of discrete, interacting rock blocks falls downslope due to gravity. Therefore the possible runout processes are divided into falls of single blocks - a fragmental rockfall - and into the so called rock mass fall.

The program PFC (Particle Flow Code) based on the Distinct Element Method was used in order to model rock mass falls realistically in 3 dimensions based on physical relations. PFC models the movement and interaction of circular (2D) or spherical (3D) particles and wall elements using the laws of motion and of force - displacement. In the course of the calculation the contacts between particles and particles or particles and walls are detected automatically. The particles may be bonded together at their contact points, and the bondage can break due to an impact.

For realistic modelling of the runout a viscous damping routine in case of a particle - wall contact was introduced. The viscous damping acts concurrently with the non viscous damping, which is varied additionally due to the nature of the wall. Numerical drop tests, comparisons with the results of a rockfall program and back analyses (e.g. the rock mass fall of the Frank Slide) provided appropriate damping factors. Thus, the movement types bouncing, sliding, rolling and free falling of single rock blocks and the interaction between the blocks occurring in a rock mass fall could be modelled realistically by using the adapted code of PFC.

This method was applied in order to estimate the three dimensional effects of a possible rock mass fall at the Eiblschrofen (Tyrol, Austria) and of the mass movement Oselitzenbach (Carinthia, Austria).

Thus this method using geomechanical basics offers an appropriate possibility of estimating areas endangered by rock mass falls and of dimensioning protective measures.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG.....	1
2	BEGRIFFSBESTIMMUNGEN DER MASSENBEWEGUNGEN.....	2
2.1	Klassifizierungen	3
2.2	Steinschlag, Felssturz, Bergsturz	8
2.3	Felsmassenstürze	11
2.3.1	Allgemeine Definitionen bei Felsmassenstürzen	11
2.3.2	Geschwindigkeit.....	14
2.3.3	Bewegungsabläufe.....	15
3	METHODEN ZUR ERMITTLUNG DER AUSBREITUNG VON FELSMASSENSTÜRZEN	22
4	GRUNDLAGEN DES PARTICLE FLOW CODES (PFC).....	31
4.1	Berechnungskreislauf.....	34
4.2	Kraftverschiebungsgesetz.....	36
4.3	Konstitutive Beziehungen	41
4.3.1	Steifigkeitsmodell.....	42
4.3.2	Gleitmodell.....	43
4.3.3	Bindungsmodell.....	44
4.4	Bewegungsgesetz.....	47
4.5	Zeitschritt.....	49
4.6	Mechanische Dämpfung.....	52
4.7	Kontaktermittlung.....	53
5	MODELLIERUNG EINES FELSMASSENSTURZES MITTELS PFC	56
5.1	Adaptierungen	59
5.2	Dämpfungsfaktoren und Mikroparameter	65

5.3	Numerische Aufschlagtests.....	66
5.4	Vergleich von PFC mit einem Steinschlagsimulationsprogramm	67
5.4.1	RocFall	67
5.4.2	Vergleich PFC - RocFall	68
5.5	Modellierung des Geländes.....	84
5.6	Modellierung der Sturzmasse.....	86
6	REFERENZBEISPIEL BERGSTURZ FRANK SLIDE, ALBERTA, KANADA .	87
6.1	Problemstellung	87
6.2	Modellierung.....	90
6.3	Ergebnisse	92
6.3.1	Ball-, Wandreibungswinkel.....	92
6.3.2	Viskose Dämpfungsfaktoren	94
6.3.3	Nichtviskose Dämpfungsfaktoren	95
6.3.4	Lagerung, Zerbrechen der Blöcke	95
7	ANWENDUNGSBEISPIELE	97
7.1	Anwendungsbeispiel - Eiblschrofen.....	97
7.1.1	Problemstellung.....	97
7.1.2	Modellierung	99
7.1.3	Ergebnisse	102
7.2	Anwendungsbeispiel - Massenbewegung Oselitzenbach.....	109
7.2.1	Problemstellung.....	109
7.2.2	Modellierung	111
7.2.3	PFC ^{2D} Ergebnisse	114
7.2.4	PFC ^{3D} Ergebnisse.....	117
8	INTERPRETATION, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	123
9	ZUSAMMENFASSUNG	129
10	LITERATURVERZEICHNIS	132

1 Einleitung

Fels- und Bergstürze sowie deren Folgeerscheinungen haben in der Menschheitsgeschichte große Katastrophen ausgelöst, zahlreiche Menschenleben gefordert und Sachwerte in großem Ausmaß vernichtet. Durch den Bergsturz vom Dobratsch (Kärnten, Österreich) im Jahr 1348 z.B. sollen 17 Dörfer und Weiler, 3 Schlösser und 9 Kirchen verschüttet oder zerstört worden sein, der durch den Bergsturz verursachte Rückstau der Gail überflutete 10 Dörfer. Der Bergsturz vom Monte Toc (Belluno, Italien) im Jahr 1963 verursachte im Stausee Vajont eine Flutwelle, die über die Staumauer stürzte, die Stadt Longarone verwüstete und beinahe 2000 Tote forderte.

Es gab daher zahlreiche Versuche die Ausbreitung von Fels und Bergstürzen abzuschätzen. In diesen Verfahren wird versucht, die Ausbreitung rascher, sturzartiger Massenbewegungen mittels statistischer Zusammenhänge, analytischer Betrachtung von Einzelblockereignissen oder kontinuumsmechanischer Verfahren zu ermitteln. Diese Verfahren haben jedoch die Nachteile, dass sie entweder nur zweidimensional sind (d.h. ein Profil betrachten), oder nur Einzelblöcke behandeln, die nacheinander, d.h. ohne Interaktion „hinuntergeworfen“ werden, oder die Ausbreitung kontinuumsmechanisch verschmiert betrachten.

Daher versucht die vorliegende Arbeit, mittels der Distinkten Elemente Methode PFC (Particle Flow Code) eine Möglichkeit aufzuzeigen, den Sturz einer aus interagierenden Blöcken bestehenden Masse dreidimensional und auf realen physikalischen Zusammenhängen beruhend zu modellieren.

2 Begriffsbestimmungen der Massenbewegungen

Massenbewegungen in alpinen Gebieten werden in der geologisch - geotechnischen Fachliteratur unterschiedlich eingeteilt und klassifiziert. Kienholz et al. (1998) definieren:

- Geologisch / geomorphologische Prozesse, bei denen Material durch die Wirkung der Schwerkraft und *ohne Mithilfe eines Transportmediums* von einem Ort an einen anderen bewegt wird (z.B. Felssturz, Rutschung, ...), werden als **Massen(selbst)bewegungen** bezeichnet. Ergänzend ist festzustellen, dass Bergwasser (Kluftwasser, mit einem maximalen Anteil von etwa 10%) dabei nicht als Transportmedium zu verstehen ist.
- Geologisch / geomorphologische Prozesse, bei denen Material unter dem Einfluss der Schwerkraft *durch wesentliche Mithilfe von Transportmedien* (Schnee, Eis, Wasser, ...) von einem Ort an einen anderen verschoben wird (z.B. Geschiebetransport in einem Wildbach), werden als **Massentransport** bezeichnet.

International wird der Begriff „Rutschung“ (landslide) in Übereinstimmung mit der Nomenklatur der UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (WP/LI, 1993) als Oberbegriff für eine hangabwärts gerichtete Bewegung von Boden-, Fels- und Schuttmassen verwendet (Abbildung 2.1).

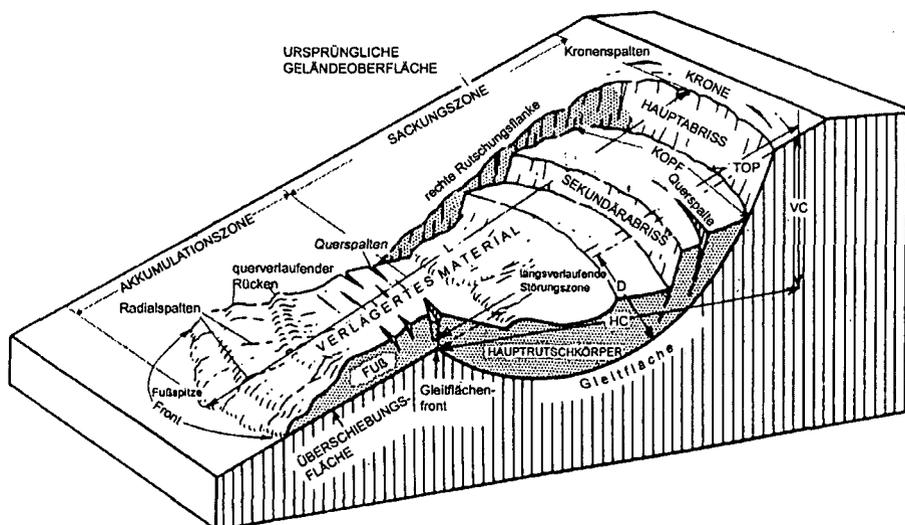


Abbildung 2.1: Prinzipskizze einer Rutschung nach der Nomenklatur des Multilingual Landslide Glossary (WP/LI, 1993; verändert).

2.1 Klassifizierungen

Heim (1932)

Einer der ersten Versuche einer Klassifikation von Massenbewegungen im alpinen Gebiet wurde von Heim (1932) durchgeführt. Heim versucht die Erscheinungen der Bergstürze ausgehend von Schuttbewegungen und Felsbewegungen in einzelne Typen mit Übergängen in verschiedene Richtungen zu unterscheiden. Das wesentlichste Klassifizierungsmerkmal war dabei die *Bewegung der Masse von oben nach unten*. Als Schuttbewegungen werden bei Heim Massenbewegungen im Lockergestein bzw. Boden bezeichnet.

Terzaghi (1950, 1962)

Terzaghi unterteilt die Massenbewegungen aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Materials. Dabei wird der Begriff „landslide“ einer Massenbewegung von Fels oder „Boden“ (Lockergestein) zugeordnet, der eine rasche Verschiebung zugrunde liegt. Die Geschwindigkeit einer für eine Massenbewegung typischen Bewegungsrate kann auf einige cm/h beschleunigt, und anschließend wieder reduziert werden. Im Gegensatz dazu steht der Begriff des „Kriechens“, der eine kontinuierliche Bewegung beschreibt, die eine Geschwindigkeit von weniger als einige cm/Dekade aufweist.

Die Unterscheidung zwischen einer raschen Massenbewegung („landslide“), dem Kriechen eines Hanges („creep“), oder ob ein Hang sich in Ruhe befindet, wird über die Festlegung von Festigkeiten definiert. Überschreitet die Belastung die Festigkeit des Hanges („*compressive strength*“), tritt Materialversagen ein, und es kommt zu einer raschen Massenbewegung. Liegt die Belastung unterhalb der Festigkeit des Hanges, aber oberhalb der Festigkeit, die ein Kriechen auslöst („*fundamental strength*“), so kriecht der Hang. Ist das Spannungssystem zufolge der Belastung im Hang unterhalb der „*fundamental strength*“, dann ist der Hang in Ruhe.

Nemčok et. al. (1972)

Nemcok et. al. unterscheidet aufgrund des geomechanischen Charakters und der Bewegungsgeschwindigkeit vier Grundtypen der Bodenbewegungen:

- *Kriechen* – geologisch langdauernde, nicht beschleunigte Bewegung ohne ausgeprägte Gleitflächen; dabei umfasst Kriechen einen großen Bereich der

Bewegungen: langsame Bewegungen von einigen cm/Jahr bis zu lang dauernden großen gravitativen Massenbewegungen im Gebirge.

- *Gleiten* – Hangbewegungen zusammenhängender Massen längs einer oder mehrerer Gleitflächen.
- *Fließen* – Hangbewegungen von flüssigkeitsähnlichem Charakter.
- *Fallen* – plötzliche Hangbewegungen, wobei die bewegte Masse den inneren Zusammenhang und kurzfristig auch den Kontakt mit dem Liegenden verliert.

Nebenkriterien, die die Aktivität einer Rutschung näher beschreiben, wurden von Klengel et al. (1974) formuliert und werden verwendet, um die von Nemčok et al. (1972) eingeteilten Typen näher zu charakterisieren. Diese Nebenkriterien sind folgende:

Alter, Aktivität, Genese, Entwicklungsstadium, Grundrissform, Tiefgang, Häufigkeit des Auftretens, Folge, äußere Form.

Varnes (1978); Cruden & Varnes (1996)

Die heute international verwendete Klassifizierung basiert auf der Klassifizierung von Varnes (1978) und Cruden & Varnes (1996) und bildet die Grundlage für das Multilingual Landslide Glossary (WP/LI, 1993). Hier werden die folgenden Typen unterschieden:

- *Fallen (fall)* – beginnt mit dem Lösen von Boden- oder Felsmaterial in einem steilen Hang entlang einer Fläche, auf der geringe oder keine Scherbewegungen stattfinden. Das Material stürzt dann fallend, springend oder rollend ab.
Ergänzend ist zu bemerken, dass dieser Bewegungstyp zumeist auf einen anderen Bewegungstyp wie z.B. Kippen, Gleiten oder Driften folgt.
Der hier verwendete Begriff *Fallen* beinhaltet die Begriffe Fallen und Stürzen, wobei Fallen den freien Fall eines Gesteinskörpers oder einer Felsmasse kennzeichnet, während Stürzen die Gleit-, Fall-, Sprung- und Rollbewegungen eines Ereignisses zusammenfasst.
- *Kippen (topple)* – eine Vorwärtsrotation von Blöcken aus Fels oder kohäsivem Bodenmaterial aus dem Hang heraus um einen Punkt oder eine Achse unterhalb ihres Schwerpunktes.

- *Gleiten (slide)* – eine hangabwärts gerichtete Bewegung von Boden- oder Felsmassen auf Gleitflächen oder auf Zonen intensiver Scherverformung.
- *Driften (spread)* – eine laterale Bewegung von Fels- oder kohäsiven Bodenmassen bei einem gleichzeitigen Einsinken in die liegenden, weniger kompetenten Schichten. Eine intensive Scherung auf Gleitflächen findet nicht statt. Driften kann durch Liquifaktion oder Fließen (und Extrusion) des liegenden, weniger kompetenten Materials entstehen.
- *Fließen (flow)* – eine räumliche, kontinuierliche Bewegung, bei der Scherflächen nur kurzzeitig vorhanden, dicht angeordnet und gewöhnlich nicht erhalten bleiben. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht der einer viskosen Flüssigkeit. Die üblicherweise als Kriechen bezeichneten Bewegungen gehören hier zum Bewegungstyp „Fließen“.

Mit dieser Einteilung lassen sich nicht alle Einzelheiten einer Hangbewegung unterscheiden.

Daher werden mithilfe von Nebenkriterien die Bewegungstypen weiter untergliedert.

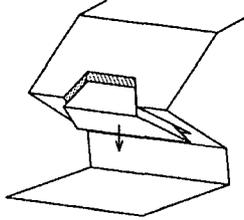
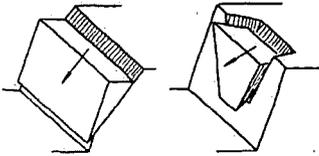
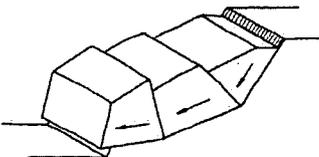
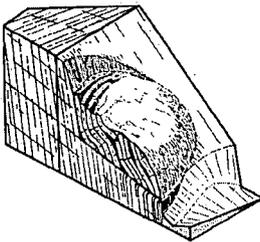
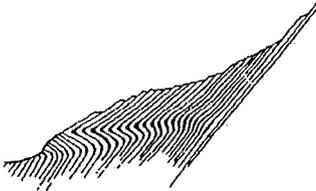
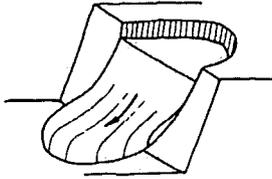
Nebenkriterien, die die Aktivität einer Rutschung nach (WP/LI, 1993) beschreiben, sind:

Zustand der Rutschung – aktiv, blockiert, reaktiviert, inaktiv, latent, abgeschlossen, stabilisiert, fossil.

Verteilung der Rutschungsaktivität – fortschreitend, rückschreitend, vergrößernd, verkleinernd, beschränkt ausgebildet, fortsetzend.

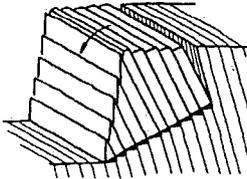
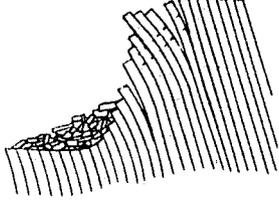
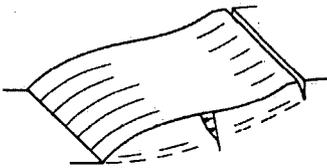
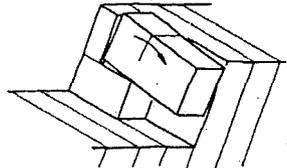
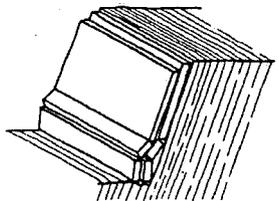
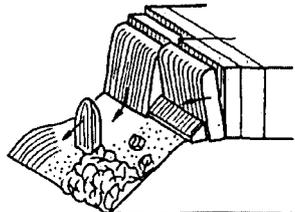
Art der Rutschungsaktivität – komplex, zusammengesetzt, sukzessiv, Einzel- und Mehrfachrutschung.

Die in den genannten Klassifizierungen aufgezählten Typen von Massenbewegungen stellen größtenteils Kombinationen von Bewegungsarten (Fallen nach Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996, z.B. bedeutet Gleiten, Rollen und Springen) bzw. Abfolgen von Bewegungsmechanismen (vgl. Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3) dar. Eine mechanische Beschreibung würde daher ein Idealmodell für Fels erfordern.

Examples of rockslide initial failure mechanisms and their numerical models Part 1		
	Falling of rock blocks	R.E. GOODMAN & G.-H. SHI Block Theory (1985)
	Sliding of a rock block on a single or on two discontinuities (Translational sliding)	R.E. GOODMAN & G.-H. SHI Block Theory (1985)
	Sliding of several rock blocks on a polygonal sliding plane	P. GUSSMANN Kinematical Elements in Geomechanics. NUMOG (1988)
	Rock slumping (backward rotation of rock blocks)	D.S. KIEFFER Ph.D Thesis University of California-Berkeley (1998)
	Kink band slumping (relation to buckling?!)	??
	Sliding of a fractional body on a shelly, newly formed sliding surface (rotational sliding) (mainly in rock masses of low strength, e.g. heavily fractured rock; block dimensions \ll slope height)	A.W. BISHOP Geotechnique 5 (1955)

R. Poisel 24.3.03

Abbildung 2.2: Beispiele von Versagensmechanismen von Felsböschungen mit den jeweiligen Berechnungsansätzen, Teil 1 (Poisel, 2003).

Examples of rockslide initial failure mechanisms and their numerical models Part 2		
	<p>Toppling of column- or slab-shaped rock blocks (forward rotation similar to dominos; mainly when joint strength is low and rock block strength is high)</p>	<p>R.E GOODMAN & J.W. BRAY Proc. Conf. Rock Eng. for Foundations and Slopes (1976)</p>
	<p>Flexural toppling</p>	<p>M. HITTINGER & R.E GOODMAN Report, University of California, Berkeley (1978)</p>
	<p>Slope sagging Continuously decreasing creep of rock mass downslope with increasing depth (mainly in rock masses of low strength, e.g. shales, phyllites)</p>	<p>O.C. ZIENKIEWICZ, C. HUMPHESON & R.W. LEWIS Geotechnique 25 (1975)</p>
	<p>Rotation of single rock blocks (e. g. rotation of a rock block on a discontinuity due to eccentric bearing or partial yielding of bearing)</p>	<p>W. WITTKÉ Rock Mechanics. Springer (1990)</p>
	<p>Buckling of column- or slab-shaped rock blocks (column- or slab thickness \ll slope height)</p>	<p>D. S. CAVERS Rock Mechanics 14 (1981)</p>
	<p>Translational or rotational descent of tower- or slab-shaped blocks of competent rock upon an incompetent base ("Hard on soft")</p>	<p>R. POISEL & W. EPPENSTEINER Proc. 5th Int.Symp. Landslides (1988)</p>

R. Poisel 24.3.03

Abbildung 2.3: Beispiele von Versagensmechanismen von Felsböschungen mit den jeweiligen Berechnungsansätzen, Teil 2 (Poisel, 2003).

Diskontinuumsmechanische Modelle für geklüfteten Fels sind z.B. nicht in der Lage, Sturzprozesse mit großen Verschiebungen zu untersuchen. Daher erscheint es aus geomechanischer und felsmechanischer Sicht sinnvoll, im Gegensatz zu den aufgezeigten Klassifizierungen, eine Massenbewegung im Fest- und Lockergestein in den

- Auslösemechanismus oder Versagensmechanismus, und
- den eigentlichen Sturzprozess

zu unterteilen. Eine Zusammenstellung von Versagensmechanismen von Felsböschungen mit den jeweiligen Berechnungsansätzen, die als Auslösemechanismen für Sturzprozesse verstanden werden können, sind in Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3 dargestellt.

Für die Beschreibung bzw. Einteilung des Sturzprozesses einer Massenbewegung werden im geotechnischen Sprachgebrauch die Begriffe Bergsturz, Felssturz und Steinschlag verwendet, die im Folgenden diskutiert werden.

2.2 Steinschlag, Felssturz, Bergsturz

Die Begriffe Bergsturz, Felssturz und Steinschlag sind im geotechnischen Sprachgebrauch verbreitet und gehören nach der internationalen Klassifizierung (Cruden & Varnes, 1996) zu dem Bewegungstyp *Fallen*. Eine Unterteilung des Bewegungsablaufes beim *Fallen* wird bei dieser Klassifizierung jedoch nicht durchgeführt.

Die Einteilung in Steinschlag, Felssturz und Bergsturz bezieht sich, wie zuvor definiert, nur auf den eigentlichen Sturzprozess. Dabei werden diese Begriffe in der Fachliteratur (Abele, 1974; John & Spang, 1979; Rochet, 1987; Krauter, 2001; Evans & Hungr, 1993) unterschiedlich definiert bzw. gegeneinander abgegrenzt. Die am häufigsten verwendeten Kriterien für die Unterteilung bzw. Abgrenzung der Begriffe voneinander sind das Volumen der bewegten Masse und der Bewegungsmechanismus.

Volumen

Ein häufig verwendetes Unterscheidungsmerkmal für die Einteilung in Steinschlag, Felssturz oder Bergsturz ist das Volumen der bewegten Masse. Dieses Volumen wird im Fall eines Steinschlages, bei dem es zum Absturz eines Einzelblockes kommt, z.B. von John & Spang

(1979) mit $0,1 \text{ m}^3$, von Krauter (2001) mit 5 m^3 und von Rochet (1987) mit etwa 250 m^3 angegeben.

Als Felssturz wird nach Krauter (2001) der Sturz einer Felsmasse bezeichnet, bei dem ein Einzelkörper größer als $0,3 \text{ m}^3$ ist, oder das Gesamtvolumen von 5 m^3 überschritten wird. Die obere Grenze für den Felssturz wird nach Krauter (2001) mit 10000 m^3 angegeben.

Ein Bergsturz wird von Abele (1974) folgendermaßen definiert:

Bergstürze sind Fels- und Schuttbewegungen, die mit hoher Geschwindigkeit (in Sekunden oder wenigen Minuten) aus Bergflanken niedergehen und im Ablagerungsgebiet ein Volumen von über 1 Mio. m^3 besitzen oder eine Fläche von über $0,1 \text{ km}^2$ bedecken.

Bewegungsmechanismus

Heim (1932, S.84 ff) erklärt im Zusammenhang mit der stürzenden Talfahrt der Felsstürze das Phänomen der Trümmerströme und bezeichnet diese als „Sturzströme“. Heim beschreibt die allgemeine Erscheinung der Sturzströme wie folgt:

Immer werden zuerst, gleich nach der Ablösung, die Felsblöcke am größten sein. Sehr rasch zerschlagen sie sich, und wir haben es mit einer Masse von kleineren Blöcken zu tun.

Natürlich kommen bis ins Ablagerungsgebiet noch alle Größen vor. ... Die einzelnen Blöcke drehen sich in Folge der zurückhaltenden Reibung am Untergrund und der vorwärtsdrängenden im Schwerpunkt anfassenden Sturzbewegung. Sie sind nicht glatte Kugeln, sondern unregelmäßig eckige und kantige Stücke. Da schlägt ein Block an den Felsgrund oder an einen Nachbarblock an. ... Der Schlag wird vom einen Block auf die benachbarten übertragen und von diesen aufgenommen und wegen gleicher Gefangenschaft wieder weitergegeben. Kein Block kann aus der vorgezeichneten allgemeinen Sturzrichtung hinaus, er bleibt eingeschlossen in der Hauptfahrlinie. ... In der stürzenden ungeheuren Trümmermasse verliert jeder Block seine Selbständigkeit. ... Es entsteht eine einheitliche Summenbewegung, ein gemeinsames Fließen der Masse. ... Die Bewegung wird zu einem gemeinsamen, einheitlichen, brausenden, knirschenden und zermalmenden Strömen.

Eine Trennung der Fels- und Bergstürze nach diesem Bewegungsmechanismus, wonach die Bergstürze eine sturzstromartige Bewegung ausführen, die bei den Felsstürzen fehlen soll, ist nicht eindeutig möglich. Zwar ist dieser sturzstromartige Bewegungstyp bei den größeren Volumina eher entwickelt; eine scharfe Grenze kann jedoch nicht gezogen werden, denn die Konfiguration der Ablagerungsgebiete vieler Felsstürze ist nur durch sturzstromartige Bewegung zu erklären (Abele, 1974).

Nach Heim (1932) entwickelt sich eine strömende Bewegung eines Bergsturzes erst ab ca. 0,5 Mio. m³ Felsmasse und einer Sturzhöhe von einigen hundert Metern. Diese Masse muss jedoch gleichzeitig abgehen, um die Kriterien eines Bergsturzes zu erfüllen.

Beobachtungen von Evans & Hungr (1993) und Rochet (1987) geben an, dass der Übergang vom freien Stürzen einzelner Blöcke in ein kohärentes Strömen einer disintegrierten Felsmasse von der Geologie der Ablösungszone und der Geometrie der Sturzbahn abhängig ist, und geben dafür als Grenze ein Volumen von 10⁵ m³ bis 10⁶ m³ an.

Im englischen Sprachraum findet keine Unterteilung zwischen Steinschlag und Felssturz statt. Aufgrund des ähnlichen Bewegungsvorganges wird häufig auf eine Differenzierung verzichtet. Für Steinschläge und Felsstürze wird der Begriff des „fragmental rockfall“ eingeführt, bei dem der Bewegungsablauf, wie bei der Definition von Kienholz et al. (1998), von einzelnen Blöcken dominiert und die Interaktion zwischen den Blöcken nicht oder kaum vorhanden ist (Evans & Hungr, 1993).

Bei Kienholz et al. (1998) erfolgt die Unterscheidung der Begriffe Felssturz und Bergsturz nur aufgrund unterschiedlicher Bewegungsmechanismen, allerdings wird keine Volumenangabe gemacht:

- *Bergsturz* - Absturz sehr großer, im ursprünglichen Verband mehr oder weniger kohärenter Felsmassen unter Erreichung hoher Geschwindigkeiten, wobei der Transportmechanismus durch eine starke Wechselwirkung zwischen den Komponenten („Sturzstrom“) gekennzeichnet ist.
- *Felssturz* - Sturz einer Felsmasse, die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine fraktioniert wird, wobei die Interaktion zwischen den Komponenten keinen maßgeblichen Einfluss auf die Dynamik des Prozesses hat.
- *Steinschlag, Blockschlag* - Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen ($\varnothing < 50$ cm) und Blöcken ($\varnothing > 50$ cm).

Zwischen Steinschlag und Felssturz wird bei dieser Definition hinsichtlich des Bewegungsmechanismus keine Unterscheidung getroffen.

2.3 Felsmassenstürze

Im Gegensatz zu den zuvor verwendeten Definitionen für Felssturz und Bergsturz wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass auch bei einem Felssturz kleiner Massen eine Interaktion zwischen den einzelnen Blöcken stattfindet, die die Bewegung bzw. Ausbreitung der Masse beeinflusst. Daher wird hier der Begriff Felsmassensturz eingeführt. Dieser Begriff soll, im Gegensatz zu den verwendeten Bezeichnungen Felssturz bzw. Bergsturz, als eine allgemeine Bezeichnung für eine rasche, sturzartige Massenbewegung verstanden werden, bei der eine Felsmasse aus diskreten Einzelblöcken durch gravitative Kräfte bewegt wird. Die Interaktion zwischen den Blöcken sowie ein Zerschneiden der Blöcke zufolge eines Aufschlages beeinflusst dabei maßgeblich die Bewegung der Masse hinsichtlich der Ausbreitung eines Felsmassensturzes. Der Begriff Felsmassensturz umfasst hier sowohl den Begriff Felssturz als auch den Bergsturz.

Die Einteilung des Sturzprozesses erfolgt in der vorliegenden Arbeit somit in den Sturz von Einzelblöcken, den Steinschlag, und in den Felsmassensturz. Dabei wird der Sturzprozess in beiden Fällen durch eine rasche Bewegung des Einzelblockes bzw. der Einzelblöcke der Felsmasse beschrieben. Bei einem Felsmassensturz treten somit wie bei einem Steinschlag die Bewegungsmechanismen Rollen, Gleiten, Springen (in Form einer Wurfparabel) und der freie Fall auf. Zusätzlich wird, wie bei Heim (1932) beschrieben, eine Interaktion zwischen den Sturzblöcken, die die Sturzmasse aufbauen, berücksichtigt. Diese Interaktion ermöglicht damit das Strömen bzw. die sturzstromartige Bewegung, die von Heim (1932) beschrieben wird. Für die numerische Umsetzung dieser mechanischen Vorgaben erscheint das diskontinuumsmechanische Programm PFC - Particle Flow Code - am ehesten geeignet, da neben den Bewegungs- und Kontaktgesetzen für einzelne Blöcke auch eine Routine für die Ermittlung jener Blöcke, die miteinander oder mit der Geländeoberfläche zumindest zeitweise in Kontakt sind, vorhanden ist.

2.3.1 Allgemeine Definitionen bei Felsmassenstürzen

Das Gesamtgebiet, das von einem Felsmassensturz beeinflusst wird, wird mit den folgenden Begriffen beschrieben (Abbildung 2.4):

- Abriss-, Ablösegebiet: oberes Gebiet, von dem sich die Gesteinsmassen lösen.

- Fahr-, Sturzbahn: mittleres Gebiet, über dem sich die Gesteinsmassen zur Tiefe bewegen.
- Ablagerungsgebiet: unteres Gebiet, in dem die Felsmasse zur Ruhe kommt.

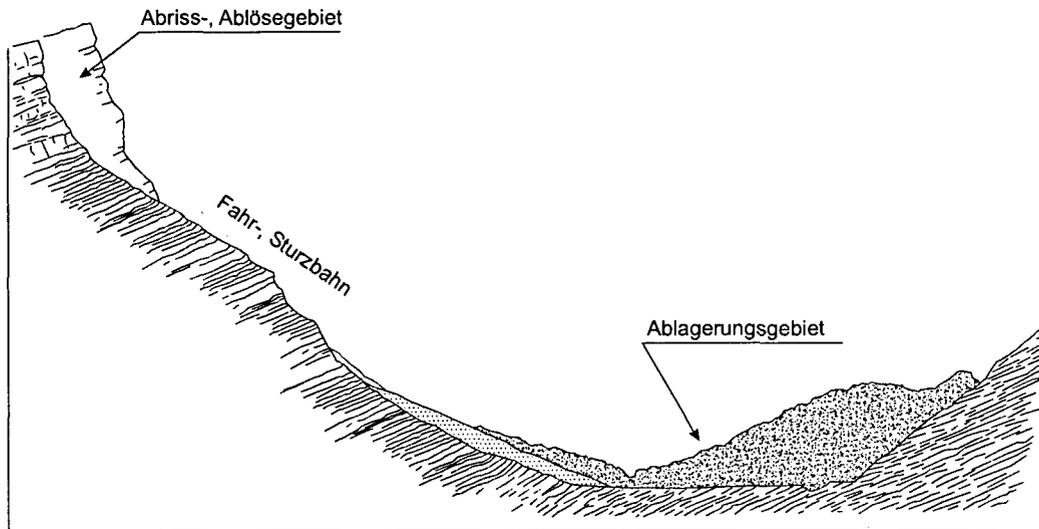


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Felsmassensturzes (nach Heim, 1932).

Fahr-, Sturzbahn

Die Fahrbahn ist ein wichtiger und wesentlicher Einflussfaktor für die Dynamik eines Felsmassensturzes. Der Verlauf und die Beschaffenheit der Fahrbahn entzieht der stürzenden Felsmasse kinetische Energie. Durch Ablenkungen in der Fahrbahn wird die Bewegungsenergie der bewegten Felsmasse bzw. der Sturzstrom stärker abgemindert, während eine gerade Sturzbahn relativ wenig Bewegungsenergie entzieht. Die Form der Sturzbahn kann bewirken, dass der Sturzstrom als Ganzes bestehen bleibt und sich nicht in die Breite verläuft.

Ablagerungsgebiet

Im Ablagerungsgebiet ist die Kornverteilung der Bergsturzmasse ähnlich wie die Kornverteilung in einer Grundmoräne (van Husen, 2000). Die Korngrößenverteilung einer Grundmoräne, dargestellt im einfach logarithmischen Maßstab kann nach van Husen (1977) näherungsweise linear angenommen werden. Eine Analyse der Felsmassen im Ablagerungsgebiet des Bergsturzes von Mount Cayley in British Columbia, Kanada (Evans, et al., 2001) bestätigt diese Annahme.

Gefälle

Heim (1932, S.112 f.) stellte fest, dass die Reichweite von Bergstürzen mit der Größe der Masse, der Höhe des Absturzes und der Regelmäßigkeit der Fahrbahn zusammenhängt.

Um die Reichweite von Bergstürzen anhand eines charakteristischen Maßes leichter abschätzen zu können, wurden verschiedene Gefälls- oder Böschungslinien definiert, die man aus Längsprofilen von Bergstürzen entnehmen kann.

Geometrisches Gefälle

Heim (1932, S. 113 f.) definiert jenen Winkel als *Geometrisches Gefälle*, der sich aus der Geraden zwischen dem obersten Anrisspunkt am Abrissgebiet und dem tiefsten bzw. am weitesten entfernten Punkt der Ablagerung mit der Horizontalen ergibt. Dieser Winkel kann sehr leicht bestimmt werden, hängt jedoch stark von den zufälligen Unregelmäßigkeiten und der Krümmung der Fahrbahn ab.

Schwerpunktsgefälle

Der Winkel zwischen der Geraden vom Schwerpunkt des Ablagerungsgebietes und dem Schwerpunkt des Abrissgebietes mit der Horizontalen wird als *Schwerpunktsgefälle* bezeichnet. Das Schwerpunktsgefälle ist jedoch sehr schwer zu messen, da es oft schwierig ist, die Lage des Schwerpunktes im Ablagerungsgebiet oder im Abrissgebiet zu bestimmen. Die praktische Bedeutung dieses Gefälles ist eher gering, da es wichtiger ist, zu wissen, wie weit die maximale Ausdehnung der Gefahrenzone eines Bergsturzes reicht, als die Lage des Schwerpunktes der Trümmernasse.

Fahrböschung

Die Fahrböschung ist nach Heim (1932, S. 113) der „*Fallwinkel der Verbindungslinie vom obersten Abrissrand nach dem tiefsten und fernsten Endpunkt der Ablagerung, gemessen senkrecht über dem Stromstrich, der zur Geraden gestreckt ist*“. Nach Abele (1974) ist die Fahrböschung jener Winkel, den die in Schussrichtung verlaufende und zur Geraden gestreckte Verbindungslinie zwischen der Oberkante der Abbruchnische und dem äußersten Endpunkt der Ablagerung mit der Horizontalen bildet.

Die Fahrböschung ist immer flacher als das geometrische Gefälle, wobei die Unterschiede umso geringer werden, je geradliniger die Sturzbahn ist. Der Unterschied zwischen dem geometrischen Gefälle und der Fahrböschung ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

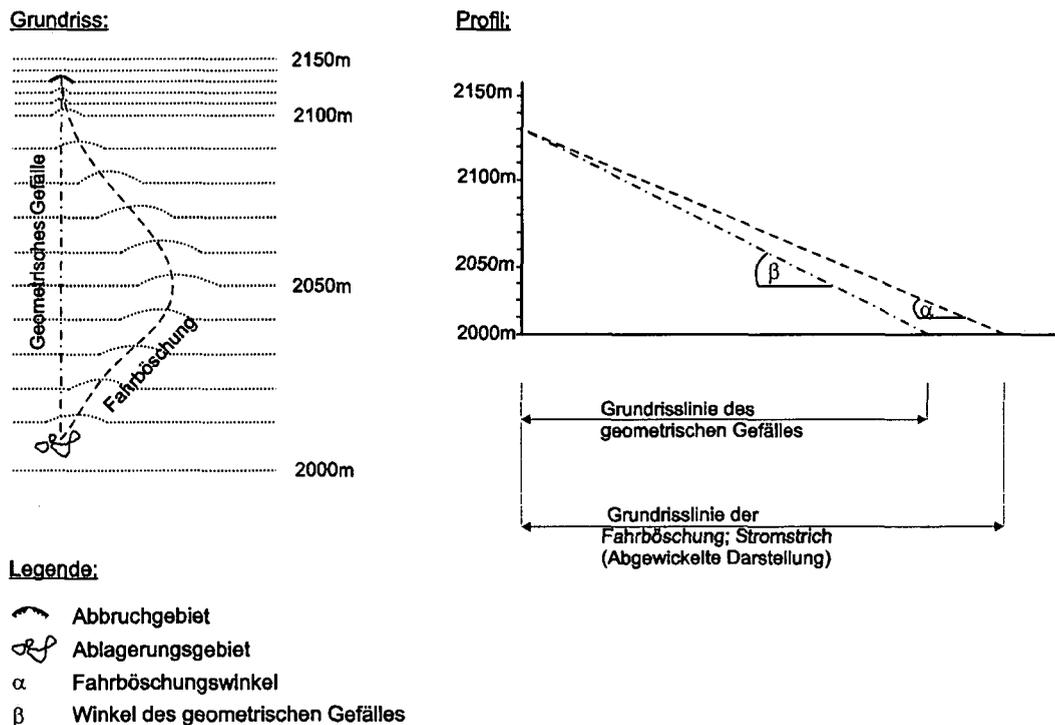


Abbildung 2.5: Darstellung des geometrischen Gefälles und der Fahrböschung in Grundriss und Profil (nach Meißl, 1998).

Brandungsböschung

Unter Brandung versteht man jenen Bereich, in dem der Sturzstrom am Gegenhang hinaufläuft und stehen bleibt. Die Brandungsböschung ist der Winkel der geraden Verbindungslinie vom obersten Abrissrand zum obersten Punkt der Brandungswelle mit der Horizontalen.

2.3.2 Geschwindigkeit

Für Berg- und Felsstürze mit einem Volumen von 10^7 bis 10^9 m³ werden in der Literatur Höchstgeschwindigkeiten von bis zu 10² m/s (Voigth & Pariseau, 1978) angegeben. Grundsätzlich lässt sich keine klare Einteilung der Massenbewegungen zufolge der Geschwindigkeiten angeben. Die Zusammenstellung von Beobachtungen und die Aufnahme von Geschwindigkeiten von verschiedenen Ereignissen liefern zumindest eine klare Trennung zwischen schnellen Fels- und Bergstürzen und langsamen Bewegungen wie Bodenfließen (Evans, 2001). Der englische Ausdruck „rock avalanche“ in Abbildung 2.6 entspricht dabei dem „Sturzstrom“. Die Werte für die maximale Geschwindigkeit liegen bei den beobachteten Fällen zwischen 30-100 m/s.

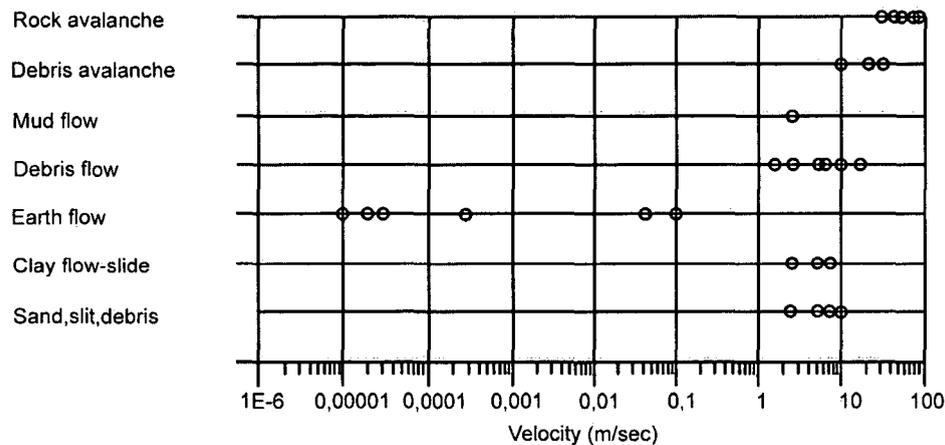


Abbildung 2.6: Eine Aufstellung von maximalen Geschwindigkeiten verschiedener „flow-like landslides“ (nach Hungr, 2001).

2.3.3 Bewegungsabläufe

Die kinematische Unterscheidung der Bewegungszustände bei einzelnen stürzenden Blöcken sind Rollen, Gleiten, Springen (in Form einer Wurfparabel) und der freie Fall (Bozzolo, 1987). Im Fall eines Felsmassensturzes tritt, wie zuvor beschrieben, zusätzlich die Interaktion zwischen den einzelnen Sturzblöcken, die nach Heim (1932) eine sturzstromartige Bewegung bzw. ein Strömen bewirken, hinzu.

Freier Fall

Ritchie (1963) gibt zwar als untere Grenze eine Hangneigung von 63° an, bis zu der es im Fall eines Absturzes eines Felsblockes zu einem freien Fall kommt. Jedoch zeigt die Fallrichtung eines Sturzblockes, der sich im freien Fall befindet, nach der physikalischen Definition zum Erdmittelpunkt. Nach dieser Definition ist daher die Grenze für eine Hangneigung, ab der es im Fall eines Absturzes eines Felsblockes zu einem freien Fall kommt, ein Böschungswinkel $>90^\circ$. Der freie Fall kann somit nur in überhängenden Wandpartien auftreten (Abbildung 2.7). Für die Berechnung der Bewegung eines Blockes, der sich im freien Fall befindet, sind vereinfachende Annahmen nötig. Es wird angenommen, dass der Luftwiderstand weder auf die Schwerpunktsbahn noch auf die Rotation des Steines um seinen Schwerpunkt einen Einfluss ausübt. Diese Annahmen liegen den meisten Berechnungsmodellen zugrunde. Experimentelle Messungen haben gezeigt, dass der Einfluss des Luftwiderstandes auf die Bewegung des Schwerpunktes vernachlässigbar klein ist (Bozzolo, 1987).

Die Geschwindigkeit v und die kinetische Energie E_{kin} eines Felsblockes nach dem Sturz aus einer Höhe h können unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes wie folgt angegeben werden:

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (2.1)$$

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.2)$$

h ... Fallhöhe [m]

g ... Erdbeschleunigung [m/s^2]

m ... Sturzmasse [kg]

Die fallende Masse schlägt am Wandfuß in der Aufschlagzone auf. Die Grenzen dieser Aufschlagzone hängen dabei von der Art der Ablösung des Felsblockes ab. Die *Aufschlagzone* ist gekennzeichnet durch Zerplatzen und andere Zerkleinerungsphänomene der herabfallenden Gesteinsblöcke, wobei bereits der größte Teil der Bewegungsenergie verloren geht. Für Felsblöcke von $0,3 \text{ m}^3$ Größe wurde aufgrund der gemessenen Geschwindigkeiten ein Energieverlust von 75 % bis 85 % errechnet (Broili, 1974, S.74). Ähnliche Beobachtungen wurden auch in einem Walliser Felssturzgebiet für $1 - 10 \text{ m}^3$ große Blöcke gemacht. Man kann daher davon ausgehen, dass die Fallhöhe zwar einen Einfluss auf die Geschwindigkeit und die kinetische Energie hat, aber aufgrund des hohen Energieverlustes beim Aufprall auf den weiteren Bewegungsablauf des Felsblockes nur eine geringe Auswirkung hat. An die *Aufschlagzone* schließt zumeist eine Zone springender Bewegung an (Broili, 1974).

Springen (in Form einer Wurfparabel)

Das Springen ist jene Bewegungsart, bei der sich die Felsblöcke nach einem Abprall vom Hang in einer parabolischen Flugphase weiterbewegen. Bei jedem Aufprall besteht die Möglichkeit, dass die Felsblöcke in eine andere Bewegungsart, wie Gleiten oder Rollen, überwechseln.

Wie weit, wie hoch und ob die Felsblöcke springen, hängt im Wesentlichen von der Hangneigung und der Blockgröße ab, sowie auch von der Bodenart (z.B. blanker Fels oder bewachsener Boden). Nach Versuchen von Ritchie (1963) sind die bei jedem erneuten Aufprall auftretenden Energieverluste umso größer, je rauer die Böschungsoberfläche im Verhältnis zur Größe der Sturzmasse ist. Die Energieverluste nehmen ebenso bei

Die parabelförmige Flugbahn, die beim Springen angenommen wird, wurde in Versuchen (Bozzolo, 1987) bestätigt. Das Bild einer Flugparabel zeigt Abbildung 2.8 und kann wie folgt ermittelt werden:

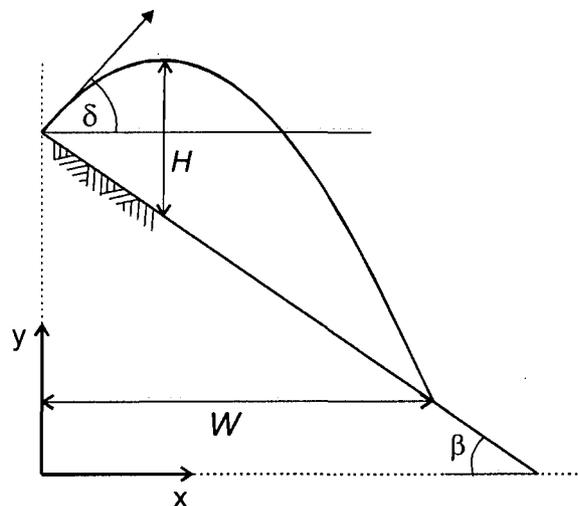


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung einer Flugparabel

Die Lage zum Zeitpunkt t ist:

$$x(t) = v_0 \cdot t \cdot \cos \delta \quad (2.3)$$

$$y(t) = v_0 \cdot t \cdot \sin \delta - \frac{gt^2}{2} \quad (2.4)$$

Die Parabelgleichung ergibt sich zu:

$$y = x \cdot \tan \delta - \frac{x^2 g}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \delta} \quad (2.5)$$

Die Scheitelhöhe H :

$$H = \frac{v_0^2 \cdot \sin \delta}{2} \cdot \left(\frac{\sin \delta}{g} + \cos \delta \cdot \tan \beta \right) \quad (2.6)$$

Die Sprungweite W :

$$W = \frac{2v_0^2}{g} \cdot (\sin \delta \cos \delta + \cos^2 \delta \cdot \tan \beta) \quad (2.7)$$

Die Geschwindigkeit v in x - und y -Richtung ergibt sich zu:

$$v_x = v_0 \cdot \cos \delta = \text{konst.} \quad (2.8)$$

$$v_y = v_0 \cdot \sin \delta - g \cdot t \quad (2.9)$$

v_0 ... Absprunggeschwindigkeit [m/s]

β ... Hangneigung [°]

δ ... Absprungwinkel [°]

Wie von Broili (1974) beobachtet, schließt an die Sprungphase häufig eine Phase rollender Bewegung an.

Rollen

Die Bewegungsart Rollen ist durch die Rotation des Sturzblockes um seine eigene Achse ohne Verlust des Bodenkontaktes definiert.

Rollen ist die dominierende Bewegungsart auf langen Sturzbahnen und mäßig geneigten Hängen (Evans & Hungr, 1993). Ritchie (1963) gibt als maximale Böschungsneigung, bei der Rollen auftritt, einen Wert von 45° an.

Fotografische Aufnahmen der Bewegungen von großen Blöcken mit Volumina bis zu 13 m³ ermöglichten es, für die Rolldynamik der Steine folgende Beobachtungen zu machen (Bozzolo, 1987):

- *Die Schwerpunktschwindigkeiten des Steins zeigen ziemlich starke Schwankungen auch bei konstanter Neigung des Hanges. Das Volumen der Steine, die Rauigkeitserhebungen auf dem Hang und die Neigung des Hanges spielen für den Zuwachs oder die Abnahme der Geschwindigkeitsbeträge eine bedeutende Rolle. Bei steilen Hängen sind die Unterschiede für grosse und kleine Steine jedoch gering, da die Flugprozesse gegenüber den reinen Rollprozessen zunehmen.*
- *Die Schwerpunktschwindigkeiten sind oft größer als das Produkt des Umfanges mit der Winkelgeschwindigkeit (Frequenz). Es liegt also meist kein reines Rollen vor.*
- *Zwischen zwei Rollphasen geht die Bewegung oft in Flugbahnen über, die für große Steine sehr flach verlaufen. Bozzolo (1987) lässt daher in seinem Modell kein*

Rollen zu, sondern lässt stattdessen ungleichförmige Blöcke mit ganz kurzen Distanzen springen.

Für die Beschreibung der Schwerpunktbewegung eines Sturzblockes und für die Abgrenzung von Rollen und Gleiten wird das Coulombsche Reibungsgesetz angewendet (Gerber & Scheidegger, 1974). Der dabei verwendete Rollreibungskoeffizient hängt von mehreren Faktoren ab:

- Form der Sturzblöcke (je runder der Felsblock geformt ist, desto geringer ist sein Rollreibungskoeffizient).
- Verhältnis der Abmessungen der Sturzblöcke zu den Abmessungen der Rauigkeitserhebungen der Rollfläche. Ein auf einer rauen Felsoberfläche oder Schuttdecke rollender Stein erfährt eine deutliche, reibungsbedingte Geschwindigkeitsverringerung, wenn die Rauigkeit oder die Größe der die Schuttdecke aufbauenden Komponenten in der Dimension des sich bewegenden Steins liegen oder seine Größe übertreffen (Ritchie, 1963).
- Mechanische Eigenschaften des Bodens (elastisches oder plastisches Verhalten).

Gleiten

Das Gleiten tritt im Wesentlichen am Ende und nur teilweise am Beginn eines Sturzprozesses auf. Die Bewegung geht am Beginn meist nach einer kurzen Gleitphase sofort in eine Rollphase über, insbesondere beim Vorhandensein von lokalen Neigungsänderungen (Bozzolo, 1987).

Ein Felsblock beginnt zu gleiten, wenn seine Haftreibung (die Widerstandskraft) geringer wird als die treibende Kraft, d.h. wenn der Haftreibungskoeffizient kleiner als der Tangens der Hangneigung ist. Nach Bewegungsbeginn bestimmt der Gleitreibungskoeffizient den Energieverlust des bewegten Körpers.

Interaktion zwischen den Blöcken – Strömen nach Heim (1932)

Der Bewegungsvorgang großer zusammenhängender Felssturzmassen, bestehend aus trockenem Felsschutt, wird nach Heim (1932) als Strömen bezeichnet. Als Untergrenze für strömende Massen gibt Heim (1932) ein Volumen von 0,5 Mio. m³ und eine Sturzhöhe von mindestens einigen hundert Metern an. Der Trümmerstrom kann, muss aber nicht, in einer

Rinne zusammengehalten werden. Ein Strömen der Felsmasse muss dabei jedoch nicht auf Grund eines Wasser-Fels-Gemisches zustande kommen.

Der genaue Vorgang und die mechanischen Zusammenhänge beim Strömen einer Felsmasse sind nicht geklärt. Da Heim (1932) die Bewegung des Trümmerstromes („Sturzstrom“) auch als „Strömen“ und als „Fließen“ bezeichnet, wurde versucht, das Bewegungsverhalten numerisch mit kontinuumsmechanischen Ansätzen und mit Ansätzen aus der Flüssigkeitsmechanik zu modellieren (Hungr, 1995; Sousa & Voigth, 1991, Hutter & Savage, 1988).

3 Methoden zur Ermittlung der Ausbreitung von Felsmassenstürzen

Im alpinen Gebiet besteht durch Massenbewegungen, die rasch und plötzlich erfolgen, eine große Gefährdung. Es wurde daher versucht, in erster Linie für diese raschen, sturzartigen Massenbewegungen geeignete Abschätzverfahren bzw. geeignete Berechnungsmethoden zu entwickeln, um die Reichweite bzw. die Ausbreitung und damit den Gefährdungsbereich zu ermitteln.

Für eine Einteilung der Berechnungsmethoden werden zuerst die raschen, sturzartigen Massenbewegungen in zwei Gruppen eingeteilt:

- Die erste Gruppe umfasst alle sturzartigen Bewegungen von Einzelblöcken, bei denen die Bewegungsabläufe der einzelnen stürzenden Felsblöcke klar in Gleiten, Rollen, Springen und den freien Fall unterscheidbar sind. Eine Interaktion zwischen den einzelnen Blöcken und ein Zerschlagen wird dabei nicht berücksichtigt.
- Die zweite Gruppe umfasst alle Methoden zur Ermittlung der Ausbreitung von Felsmassenstürzen.

Generell können für beide Gruppen die Methoden in empirische und in dynamische eingeteilt werden. Die dynamischen Methoden umfassen dabei sowohl analytische als auch numerische Verfahren.

- *Empirische Methoden* – Empirische Beziehungen entstehen durch die Verallgemeinerung von Erfahrungswerten; diese sind rein phänomenologischer Art und nicht direkt aus physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet (Konietzky, 2000).
- *Dynamische Methoden* – Die Lösungen analytischer Methoden liefern im mathematischen Sinn exakte Lösungen und besitzen meist einen hohen Grad an Verallgemeinerung. Analytische Lösungen sind leicht nachvollziehbar, und es besteht die Möglichkeit, die Lösung explizit anzugeben. Die Beschränkung liegt jedoch darin, dass geschlossene analytische Lösungen nur für sehr einfache Problemstellungen gelten.
Bei den numerischen Methoden ist die explizite Angabe einer Lösung nicht mehr

möglich. Es wird dabei versucht, unter anderem mit Ansätzen aus der Kontinuumsmechanik bzw. der Flüssigkeitsmechanik und mit granularen Methoden das Bewegungsverhalten von sturzartigen Massenbewegungen zu simulieren.

Basierend auf dieser Einteilung zeigen die Tabelle 3.1 (vgl. Bozzolo, 1987; Hungr & Evans, 1988; Spang & Sönsner, 1995; Lee & Elliot, 1998; Chau et al., 2002) und die Tabelle 3.2 (vgl. Hungr, 1990; Egger, 1996; Legros, 2002; Pirulli et al., 2003) Zusammenstellungen von empirischen Beobachtungen, von Berechnungsmethoden und von Berechnungsmodellen, die die Ausbreitung und Reichweite von raschen, sturzartigen Massenbewegungen im alpinen Gebiet ermitteln.

Tabelle 3.1: Zusammenstellung von verschiedenen Berechnungsmethoden und Berechnungsansätzen sowie von Versuchen und Beobachtungen für rasche, sturzartige Massenbewegungen - Einzelblöcke.

Einzelblöcke					
Art der Methode	Autor(en)	Jahr	Beschreibung		
empirische	Ritchie, A.	1963	Steinschlagversuche		
	Broilli, L.	1974	Felssturz im Großversuch		
	Kirkby, M.J. & Statham, I.	1975	Steinschlagversuche		
			Steinschlagsimulationsprogramme	Dimension	Programm
dynamische	Benitez, M.A. et al.	1977	Massenpunktmodell (lumped mass)	2	
	Piteau, D.R. et al.	1978	Massenpunktmodell (lumped mass)	2	
	Bozzolo, D. & Pamini, R.	1982	Massenpunktmodell (lumped mass)	2	
	Spang, R.	1988	Starrkörpermodelle (rigid body)	2	Rockfall
	Pfeiffer, T.J. & Bowen, T.D.	1989	Massenpunktmodell (lumped mass)	2	CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program)
	Bozzolo, D.	1987	Starrkörpermodell (rigid body)	2	
	Descouedres, F. & Zimmermann, Th.	1987	Starrkörpermodell (rigid body)	3	
	Hoek, E.	1987	Massenpunktmodell (lumped mass)	2	RocFall
	Hungr, O. & Evans, S.G.	1988	Massenpunktmodell (lumped mass)	2	
	Kobayashi, Y. et al.	1990	Starrkörpermodell (rigid body)	2	
	Azzoni, A. et al.	1995	Starrkörpermodell (rigid body)	2	CADMA
	Golder Associates	1997	Starrkörpermodell (rigid body)	2	Rockfal3, Weiterentwicklung auf der Basis von CRSP
Geo&Soft	2003	Starrkörpermodell (rigid body)	3	ROTO MAP	

Tabelle 3.2: Zusammenstellung von verschiedenen Berechnungsmethoden und Berechnungsansätzen sowie von Versuchen und Beobachtungen für rasche, sturzartige Massenbewegungen - Felsmassenstürzen.

Felsmassenstürze			
Art der Methode	Autor(en)	Jahr	Beschreibung
empirische	Heim, A.	1932	Zusammenhang Fahrböschung - Volumen
	Scheidegger, E.	1973	Zusammenhang Fahrböschung - Volumen
	Hsü, K. J.	1975	physikalische Tests mit Bentonitsuspension
	Li, T.	1983	Zusammenhang Fahrböschung - Volumen
dynamische	Analytische Modelle		
	Heim, A.	1932	Gleitblock
	Voellmy, A.	1955	Schneelawinen
	Körner, H.J.	1976	Vergleich Bergstürze und Schneelawinen
	Hutchinson, J.N.	1986	"sliding-consolidation" Modell
	Sassa, K.	1988	Gleitblock mit Berücksichtigung des Porenwasserdruckes
	Cannon, S.H. & Savage, W.Z.	1988	Berücksichtigung einer Massenänderung
	van Gassen, W. & Cruden, D.M.	1989	Berücksichtigung einer Massenänderung
	Kontinuummmechanische Methoden		
	Jenkins, J.T. & Savage, S.B.	1983	
	Hutter, K. & Savage, S.B.	1988	
	Norem, H. et al.	1990	
	Sousa, J. & Voight, B.	1991	
	Takahashi, T. et al.	1992	
	O'Brien, J.S.	1993	
	Hungr, O.	1995	
	Diskontinuumsmechanische - granulare Methoden		
	Campbell, C.S.	1990	
	Cao, J. et al.	1996	
Straub, S.	1996		

Methoden zur Ermittlung der Reichweite von Einzelblöcken:

Empirische Methoden

In situ Steinschlag-Versuche von Ritchie (1963) ergaben einen Zusammenhang zwischen der Böschungsneigung und der Bewegungsart einzelner fallender Blöcke nach dem 1. Aufschlag. Die Daten von Felsstürzen im Großversuch von Broili (1974) zeigten, dass die wesentlichen Bewegungsphänomene wie Flughöhe, Flugweite und Geschwindigkeit einzelner Felsblöcke

deutlich von ihrer Größe beeinflusst werden. Diese Versuche lieferten erste wesentliche Daten für die Lage und Dimensionierung von Schutzvorrichtungen gegen Steinschläge. Basierend auf solchen in situ Messungen und Messungen in Laboratorien wurden analytische Methoden vorgeschlagen, die die Reichweite von Sturzblöcken abschätzen. Generell werden dabei die Sturzblöcke als Massenpunkte betrachtet, und man verzichtet auf die Beschreibung der einzelnen Bewegungsphasen. Diese empirischen Abschätzungen besitzen eine gute Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Reichweiten, besonders dann, wenn die von den Steinen beschriebenen Bahnen in Bodennähe verlaufen (z.B. im Fall einer rollenden Bewegung). Ein Äquivalent zu einer Fahrböschung bei Steinschlägen, wie sie bei Bergstürzen definiert wird, wurde aufgrund von Analysen von Steinschlägen, die durch das Erdbeben in Friaul 1976 ausgelöst wurden, von Onofri & Candian (1979: in Evans & Hungr, 1993) vorgeschlagen.

Dynamische Methoden

Die Programme, die entwickelt wurden, um den Bewegungsablauf (Gleiten, Rollen, Springen) von einzelnen stürzenden Blöcken zu simulieren, werden als Steinschlagsimulationsprogramme bezeichnet. Dabei können die zweidimensionalen Modelle grob in zwei Kategorien unterteilt werden:

- *Massenpunktmodelle (lumped mass)* – dabei wird der Sturzblock als Massenpunkt beschrieben, und
- *Starrkörpermodelle (rigid body)* – dabei wird der Sturzblock als Starrkörper beschrieben (häufig Zylinder, Kugeln, Prismen).

Zusammenstellungen der entwickelten Steinschlagsimulationsprogramme findet man auch bei Bozzolo (1987), Evans & Hungr (1993), Spang & Sönser (1995) und Lee & Elliot (1998). Aus den Ausgangsdaten, wie Form und Größe des Sturzblockes, Oberflächenrauigkeit des Sturzhangs und Profil der Sturzbahn, wird die Lage des Felsblockes nach dem Sturzprozess ermittelt. Mithilfe von Rückrechnungen von tatsächlichen Steinschlägen wurden die Parameter (wie z.B. Dämpfungsfaktoren, Rauigkeit, Reibungskoeffizienten,...), die bei den einzelnen Programmen verwendet werden, um die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit der Sturzbahnen zu berücksichtigen, kalibriert. Diese Kalibrierungen liefern für den Anwender die Grenzen der Parameter für unterschiedliche Hangoberflächen wie z.B. bei Spang & Sönser (1995) für:

- *Fels - weitgehend eben*
- *Fels - uneben*
- *Fels - mit Schuttdecke bewaldet*
- *Verwitterungsboden - bewachsen*
- *Fels - mit dünner Hanglehmdecke*
- *Geröllhalde - mit dünner Hanglehmdecke*
- *Verwitterungsboden - bewachsen*

Diese Parameter werden für die Ermittlung der Reichweite innerhalb bestimmter, sinnvoll gewählter Grenzen zufällig variiert, um zusätzlich alle erfassbaren Faktoren, die einen komplexen Sturzvorgang beeinflussen können, realistisch zu berücksichtigen.

Als Ergebnis werden danach die Sturzgeschwindigkeit und die Höhe der Sprungparabeln bestimmt, sodass mithilfe der Modelle die Dimensionierung und der Aufstellungsort von Schutzbauten, nach Bestimmung der entsprechenden Aufprallgeschwindigkeit und -energie, geplant werden können.

Ein dreidimensionales Steinschlagsimulationsprogramm ist das Starrkörpermodell von Descoedres & Zimmermann (1987), das anlässlich einer Untersuchung eines Felssturzes im Wallis entwickelt und dort kalibriert wurde. Neben den Eingangsdaten, wie Blockform und Blockgröße, Koordinaten der Ablösestelle, Kennziffern zur Elastizität und Plastizität der Hangabschnitte sowie Reibungskoeffizienten, wird zur Benutzung dieses Modells auch ein möglichst genaues digitales Geländemodell benötigt.

Ein weiteres dreidimensionales Programm ist ROTOMAP (geo&soft, 2003). Auch hier ist die Kenntnis eines möglichst genauen digitalen Geländemodells notwendig. Als Ergebnisse dieser Modelle werden, wie im zweidimensionalen Fall, die Sturzbahnen und die Geschwindigkeit und Energie entlang derselben ermittelt.

Methoden zur Ermittlung der Ausbreitung von Felsmassenstürzen:

Empirische Methoden

Anhand statistischer Analysen der Daten von großen Bergstürzen wurden empirische Methoden entwickelt. Der Grundgedanke bei diesen Methoden ist, eine Vorhersage über die Ausbreitung bzw. die Reichweite des Bergsturzes zu treffen, wenn man das Volumen des erwarteten Bergsturzes abschätzen kann.

Heim (1932) erkannte, dass die von einem Bergsturz zurückgelegte Distanz umso größer wird, je größer das Volumen des Bergsturzes ist. Scheidegger (1973) beschrieb diese Beobachtung mithilfe des Zusammenhanges zwischen dem Verhältnis von maximaler Fallhöhe des Absturzes H zu der maximalen horizontalen Erstreckung des Bergsturzes L und dem Volumen des Absturzmaterials. Das Verhältnis H/L entspricht dabei dem Tangens der Fahrböschung, d.h. dem Fallwinkel der Verbindungslinie vom obersten Abrissrand zum tiefsten und fernsten Endpunkt der Ablagerung. Eine einfache Gleitblockanalyse nach Heim (1932) legt die Fahrböschung als „effektiven“ Reibungswinkel des Bergsturzes fest und gibt die Größe der Fahrböschung bzw. des Reibungskoeffizienten als bestes vergleichbares Maß für die Mobilität eines Bergsturzes an. In einer doppelt logarithmischen Darstellung zeigt sich, dass eine negative logarithmische Korrelation zwischen H/L und dem Volumen des Bergsturzes besteht (Abbildung 3.1; Scheidegger, 1973; Li, 1983).

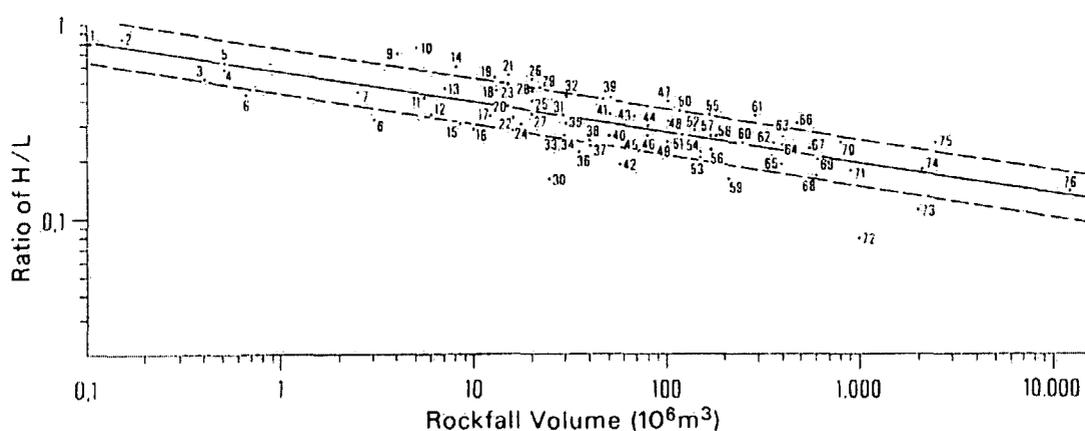


Abbildung 3.1: Verhältnis der maximalen Fallhöhe des Absturzes H zu der maximalen horizontalen Erstreckung des Bergsturzes L zu dem Volumen des Absturzmaterials von Bergstürzen (aus: Li, 1983).

Strichlierte Linien – Standardabweichung bezogen auf die durchgezogenen Korrelationslinien.

Ein weiterer Zusammenhang besteht zwischen dem Volumen des Bergsturzes und der vom Bergsturz bedeckten Fläche. Eine solche Beziehung wurde von Hungr (1990), Davies (1982) und Li (1983) beschrieben. Aufgrund einer statistischen Analyse der Daten von 76 Bergstürzen in den Alpen zeigte Li (1983), dass eine positive logarithmische Korrelation zwischen dem Volumen des Bergsturzes und der vom Bergsturz bedeckten Fläche besteht (Abbildung 3.2). Diese Methode wird als „*mass-balance-method*“ bezeichnet.

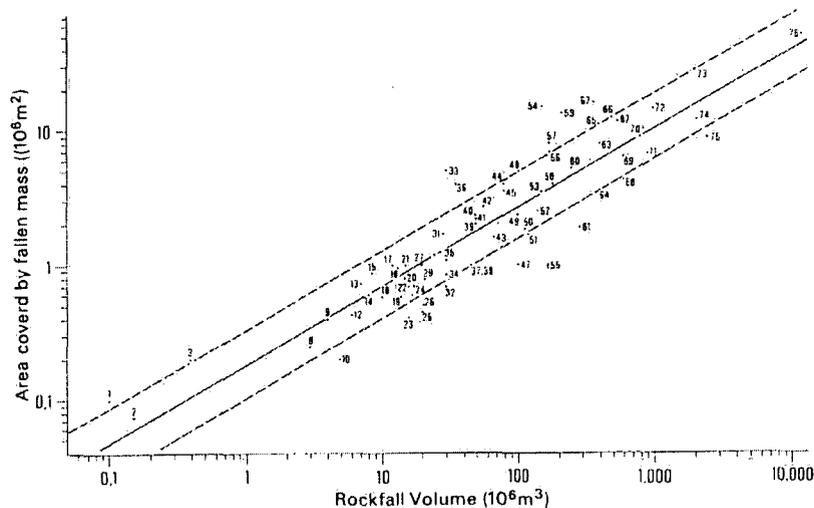


Abbildung 3.2: Zusammenhang zwischen dem Volumen eines Bergsturzes und der vom Bergsturz bedeckten Fläche (aus: Li, 1983).

Strichlierte Linien – Standardabweichung bezogen auf die durchgezogenen Korrelationslinien.

Es wurden mehrere Theorien entwickelt, um den Mechanismus von Bergstürzen und damit die große Reichweite bzw. die große Mobilität von Bergstürzen zu erklären. Einige Theorien versuchen die große Mobilität der Bergstürze mithilfe eines äquivalenten Reibungswinkels und andere in einem Übergang zu einem flüssigkeitsähnlichen Verhalten der stürzenden Masse aus Festgesteinsblöcke zu erklären. Unterschiedliche Medien, wie Luft, Wasser, Dampf oder eine Suspension aus feinen Partikeln sind in einzelnen Theorien als Erklärung herangezogen worden:

- Kent (1966) vertrat die Theorie, dass die *Luft eine Verflüssigung* des Bergsturzes bewirkt.

- Shreve (1968) präsentierte die Theorie, dass ein Bergsturz auf einem *Luftpolster* gleitet und versuchte, diese Theorie anhand von morphologischen Eigenschaften des Ablagerungsgebietes zu erklären.
- Habib (1975) demonstrierte, dass Bergstürze genug Energie enthalten, um das *Porenwasser in Dampf* umzuwandeln, und dadurch für große tiefgreifende Massenbewegungen verantwortlich sein kann.
- Eine *Verflüssigung durch Staub* wurde von Hsü (1975) vorgeschlagen. Nach Hsü kann ein Bergsturz, dessen Absturzmasse aus einer trockenen Felsmasse besteht, mit dem Fließen einer Masse aus kohäsionslosen Partikeln (grains) in einem flüssigen Medium verglichen werden. Der Reibungswiderstand bei einem solchen Partikelfluss („*grain flow*“) ist dann nach Bagnold (1954) geringer als beim Gleiten eines Festkörpers, da der Auftrieb zufolge der Flüssigkeit in den Zwischenräumen die Normalspannung der mitgerissenen Partikel reduziert. Hsü (1975) schlug daher vor, dass der Staub, der - bei einem Bergsturz erzeugt wird - als Flüssigkeit gesehen werden kann, in der die größeren Felsstücke fließen.
- Erismann (1979) erklärte das Abgleiten eines großen Bergsturzes mit einer *Selbstschmierung durch transformiertes (geschmolzenes oder dissoziiertes) Gestein*.
- Die Theorie der *mechanischen Verflüssigung* (Hsü, 1975; McSavenney, 1978; Davies, 1982) basiert auf der Annahme, dass das mechanische Verhalten des Abscherens eines „granularen“ Materials bei hohen Dehngeschwindigkeiten verändert wird, nämlich dann, wenn der Partikel - Partikel - Kontakt vom kontinuierlichen Gleiten in einen intermittierenden Aufprallvorgang übergeht (Hungr, 1990).
- Die Theorie der *akustischen Verflüssigung* wurde von Melosh (1979) vorgeschlagen. Melosh zeigte in einer theoretischen Abhandlung, dass Vibrationen, die auf einer Gleitbahn bei schnellen Massenbewegungen erzeugt werden, den dynamischen Reibungswinkel eines Schuttstromes reduzieren können.
- Eine andere Theorie erklärt die Mobilität von Bergstürzen mit der *Schmierung durch ein mitgerissenes, wassergesättigtes Bodenmaterial* in der Sturzbahn (Heim, 1932; Hutchinson, 1986; Sassa, 1988; Hungr, 1990). Basierend auf dieser Theorie wurden

von Sassa (1988) und Hutchinson (1986) unabhängig voneinander zwei dynamische Modelle entwickelt.

Dynamische Methoden

Die empirischen Methoden erfassen die Ausbreitung von Felsmassenstürzen nur sehr ungenau bzw. mit großen Abweichungen. Besondere Geländeformen z.B. können mit diesen Methoden nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu ist bei den analytischen Methoden (Heim, 1932; Körner, 1976; Sassa, 1988; van Gassen & Cruden, 1989), die bereits die Sturzbahn berücksichtigen, eine differenziertere Betrachtung der Ausbreitung eines Felsmassensturzes möglich.

Vor allem die Beschreibung von Felsmassenstürzen als Trümmerstrom, der durch die Interaktion der Felsblöcke strömt bzw. fließt, legte die Modellierung mit kontinuumsmechanischen Modellen auf der Grundlage der Flüssigkeitsmechanik nahe (Soussa & Voight, 1991; Takahashi et al., 1992; O'Brien et al., 1993). Die Theorie von granularen Medien wird verwendet, um das Verhalten einer Flüssigkeit kontinuumsmechanisch zu beschreiben (Jenkins & Savage, 1983). Modelle basierend auf dieser Theorie liefern Hutter & Savage (1988) bzw. Savage & Hutter (1989). Das dynamische Modell von Hungr (1995) ist ebenfalls ein kontinuumsmechanisches Modell, erlaubt aber im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Modellen die Variation des rheologischen Verhaltens im Material und entlang der Sturzbahn.

Im Gegensatz zu dem kontinuumsmechanischen Ansatz, mittels einer verschmierten Betrachtungsweise einen Felsmassensturz zu modellieren, basieren die granularen Methoden auf realen physikalischen Zusammenhängen zur Beschreibung der Vorgänge in einem Bergsturz. Granulare Modelle, die das Fließverhalten diskontinuumsmechanisch beschreiben, stellen Campbell (1989,1990); Campbell et al., 1995; Cao et al. (1996) und Straub (1996, 1997) auf. Diese Untersuchungen erfolgten allerdings nur in einem zweidimensionalen Schnitt.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, Felsmassenstürze im dreidimensionalen Raum unter Zugrundelegung realer physikalischer Zusammenhänge in Mehrblocksystemen zu modellieren. Die numerischen Analysen wurden mit dem kommerziellen Programm PFC – Particle Flow Code durchgeführt, das die zuvor beschriebenen Zusammenhänge weitgehend, bzw. nach entsprechend durchgeführten Adaptierungen, berücksichtigt.

4 Grundlagen des Particle Flow Codes (PFC)

Der Particle Flow Code (PFC) ist ein Verfahren zur numerischen Modellierung von komplexen Systemen auf der Basis der Methode der Distinkten Elemente (Hart, 1996). Die Grundelemente von PFC sind in der 2D Version scheibenförmige oder kugelförmige und in der 3D Version kugelförmige Partikel und ein- bzw. zweidimensionale Wandelemente. Die Partikel lassen sich beliebig anordnen und zu größeren Einheiten verbinden. Unter dem Einfluss äußerer Kräfte kommt es zu Bewegungen und Wechselwirkungen des Partikelensembles. Der Berechnungsalgorithmus von PFC verfügt über eine Detektionsautomatik, die alle sich aufgrund der Partikelbewegungen einstellenden Kontakte - sowohl mit einem anderen Partikel als auch mit einem Wandelement - erkennt. Weiters sind durch den Berechnungsalgorithmus alle kinematischen Bewegungsmöglichkeiten eines jeden Partikels zu jedem Zeitpunkt der Modellierung gewährleistet, wobei es jederzeit aufgrund der im Modell herrschenden physikalischen Zustände zur Aufhebung oder Neubildung von Kontakten kommen kann.

Die Partikel können durch Verbindung an ihren Berührungspunkten zu einem Festkörper verbunden werden, der wiederum durch eine progressive Schädigung der Bindungen zerstört werden kann. Ein wesentlicher Vorteil des Systems liegt darin begründet, dass makro- und mikromechanische Prozesse gleichzeitig modelliert werden können. Aufgrund der expliziten Berechnungsweise und der geometrisch einfachen Grundbausteine können selbst im PC-Bereich ausgesprochen große Systeme mit starken Nichtlinearitäten bzw. physikalischen Instabilitäten zeit- und kosteneffektiv berechnet werden.

Im Folgenden wird das numerische Verfahren, das die Grundlage für PFC bildet diskutiert. Um Felsmassenstürze mit PFC modellieren zu können, war es notwendig, einige Modifizierungen durchzuführen.

Klassifizierung

Um das numerische Verfahren, das die Grundlage von PFC bildet, besser innerhalb der in der Geomechanik verwendeten Verfahren einordnen zu können, werden zuerst die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale charakterisiert. Eine Unterteilung der numerischen Verfahren kann in der Geomechanik nach der Art der

- mechanischen Beschreibung,
- Ortsdiskretisierung und
- Zeitdiskretisierung

erfolgen.

Bei der „mechanischen Beschreibung“ eines zu untersuchenden Materials wird zwischen Kontinuumsmechanik und Diskontinuumsmechanik unterschieden. Bei der Kontinuumsmechanik bleibt der Zusammenhalt der Struktur bei der Formänderung erhalten, und die Verschiebungskomponenten sind stetige Funktionen des Raumes. Im Gegensatz dazu wird in der Diskontinuumsmechanik kein Zusammenhalt der Gesamtstruktur bei der Formänderung vorausgesetzt, und die diskreten (distinkten) Elemente können sich frei bewegen. Dabei besteht ein Modell aus diskreten Elementen und/oder Blöcken, die selbst wiederum ein Kontinuum darstellen. Viele dieser diskreten Blöcke bilden das Diskontinuum. Wechselwirkungen zwischen den Blöcken entstehen, wenn die Blöcke (Elemente) in Kontakt sind oder während der Berechnung in Kontakt treten. Daraus resultieren sowohl Anforderungen an die numerischen Algorithmen als auch an die Darstellung der Bewegungen bzw. Versagensmechanismen (Will, 1998).

Für die „Ortsdiskretisierung“ erfolgt eine vollständige Diskretisierung des Mediums in Form eines Netzes mit Knoten. Eine Ortsdiskretisierung wird bei den Differentialmethoden, wie der Finite Element Method oder der Finite Difference Method, durchgeführt. Dabei wird ein algebraisches Gleichungssystem gelöst, das im statischen Fall die Knotenkräfte über eine Steifigkeitsmatrix mit den Knotenverschiebungen verbindet. Das Deformations- und Spannungsverhalten der Elemente wird dann über Interpolations- bzw. Formfunktionen beschrieben.

Die „Zeitdiskretisierung“ lässt sich in explizite und implizite Lösungsverfahren unterteilen. Ein Lösungsverfahren wird als explizit bezeichnet, wenn die Lösung des Gleichungssystems explizit geschrieben werden kann. Das Grundkonzept expliziter Lösungsverfahren beruht auf der Berechnung eines kritischen Zeitschrittes Δt , in dem die Informationsausbreitungsgeschwindigkeit in einem System immer kleiner ist als die vorhandene physikalische Ausbreitungsgeschwindigkeit der Belastung. Dies führt zu unabhängigen Bewegungsgleichungen an allen Diskretisierungspunkten. Die dynamischen Gleichgewichtsbetrachtungen können somit in jedem Zeitschritt am Knoten aufgestellt werden und z.B. mithilfe der zentralen Differenzenmethode gelöst werden.

Bei impliziten Lösungsverfahren werden z.B. nichtlineare Gleichungssysteme mithilfe von inkrementellen iterativen Verfahren gelöst. Das bedeutet, dass bei impliziten Verfahren in jedem Zeitschritt bzw. im Iterationsinkrement ein lineares Gleichungssystem gelöst werden muss, dessen Ergebnis im Fall der Beschreibung von Nichtlinearitäten eine gewisse Abweichung vom exakten Lösungspfad aufweist.

Distinkte Elemente Methode

Das numerische Verfahren der Distinkten Elemente ist in die Gruppe der Diskreten Elemente Verfahren einzuordnen. Wesentliche Merkmale der Diskreten Elemente Verfahren sind:

- Es müssen die diskreten Blöcke mit ihrer Geometrie und ihrem Materialverhalten beschrieben werden können. Das Materialverhalten kann dabei starr oder verformbar angenommen werden. Die Annahme eines starren Blockes ist gerechtfertigt, wenn davon ausgegangen werden kann, dass es im physikalischen System hauptsächlich zu Bewegungen in den Diskontinuitäten / Kontakten kommt. Bei zu erwartenden hohen Spannungsniveaus und nennenswerten Verformungen der Elemente können diese nicht mehr gewährleistet werden, und eine Verformbarkeit der Elemente sollte gewährleistet sein.
- Um die Wechselwirkung der Blöcke erfassen zu können, werden Kontakte (Interfaces) formuliert. Die Eigenschaften der Kontakte (Punkt-, Linien-, oder Flächenkontakt) und die Art der Wechselwirkung zwischen den Elementen müssen definiert werden. Für das Verhalten der Bewegung in Normalrichtung zu der Kontaktebene kann ein „harter“ oder „weicher“ Kontakt formuliert werden. Ein „harter“ Kontakt bedeutet dabei keine Penetration der Blöcke und ist für Systeme geringer Reibung auf niedrigem Spannungsniveau anwendbar. In Systemen mit größerer Reibung und hohem Spannungsniveau (geklüfteter Fels) sollte jedoch der Einfluss der Normalsteifigkeit berücksichtigt werden. Eine unrealistisch große Durchdringung der Blöcke ist jedoch zu vermeiden.
- Es müssen leistungsfähige Algorithmen zur Kontaktermittlung eingesetzt werden. Diese müssen bestimmen können, welche Blöcke in Kontakt sind, während der Berechnung in Kontakt treten können oder ihren Kontakt verlieren können. Bei beliebig geformten polygonalen Körpern ist die Kontaktermittlung äußerst

zeitaufwendig. Es müssen Größe und Richtung der Kontaktkräfte und damit die Art der Wechselwirkung am Kontakt bestimmt werden.

Die Distinkte Element Methode (DEM) wurde von Cundall (1971) für die Berechnung von felsmechanischen Problemstellungen entwickelt und bildet die numerische Grundlage der Programme UDEC, 3DEC und PFC von Itasca, bei denen die zugrundeliegenden Differentialgleichungen nach dem expliziten Finite Differenzen Verfahren gelöst werden. Das Verfahren der Distinkten Elemente bietet innerhalb der Diskreten Elemente Verfahren gegenwärtig die umfassendsten Modellierungsmöglichkeiten.

Vereinfachungen und Modifizierungen gegenüber den Diskreten Elemente Verfahren, die bei PFC durchgeführt wurden, dienen einerseits dazu, um die Rechenzeit zu minimieren und andererseits, um die Anzahl der zu modellierenden Partikel zu erhöhen, und umfassen folgende Punkte (Cundall, 1996):

- Die Partikel haben nicht die Grundform von Vielflächern, sondern sind Kugeln.
- Die Kontaktfläche reduziert sich auf einen Punkt.
- Die Partikel selbst sind nicht deformierbar, sondern starre Gebilde.
- Die Deformierbarkeit wird generell durch Stoffgesetze zwischen den Partikeln erreicht.
- Geometrisch komplizierte Elementarbausteine werden durch den Zusammenschluss mehrerer Kugелеlemente bzw. Wandelemente hergestellt, die dann wiederum einen neuen Elementarbaustein darstellen.

4.1 Berechnungskreislauf

Das Berechnungsverfahren der Distinkten Elemente Methode in PFC besteht aus einem expliziten zeitgesteuerten Algorithmus. Ein expliziter Berechnungsalgorithmus bietet einen Vorteil, wenn große, stark nichtlineare und physikalisch instabile Prozesse mit großen Deformationen und Verschiebungen betrachtet werden.

Der Berechnungskreislauf, dargestellt in Abbildung 4.1, läuft in Berechnungs-, Zeitschritten ab und wendet in jedem Zeitschritt das Bewegungsgesetz auf jedes Partikel und ein Kraft-Verschiebungsgesetz für jeden Kontakt an. Es findet keine Kopplung der Beziehungen für jedes einzelne Partikel zu einer Gesamtmatrix statt. Kontakte, die zwischen zwei Partikeln oder einem Partikel und einer Wand bestehen, können während der Simulation automatisch gebildet oder gelöst werden. Am Beginn jedes Zeitschrittes wird die Kontaktliste erneuert, aufgrund der gegenwärtigen Positionen der Partikel und der Wände.

Anschließend wird das Kraft-Verschiebungsgesetz bei jedem Kontakt angewendet, um die Kontaktkräfte zu ermitteln, basierend auf der relativen Bewegung der beiden Elemente und deren Kontaktmodell (konstitutive Beziehungen). Anschließend wird das Bewegungsgesetz auf jedes Partikel angewendet und dessen Position und Geschwindigkeit aufgrund der resultierenden Kräfte und Momente, die aus den Kontakt- und Massenkräften berechnet werden, erneuert. Danach werden die Wandpositionen ermittelt, die sich aus den vorgegebenen Verschiebungen ergeben.

Für das Ende der Berechnung wird ein Abbruchkriterium verwendet, wobei das Abbruchkriterium auf unterschiedliche Weise definiert werden kann. Eine Berechnung endet entweder nach einer vorgegebenen Anzahl von Berechnungsschritten oder wenn ein Toleranzkriterium erreicht wird.

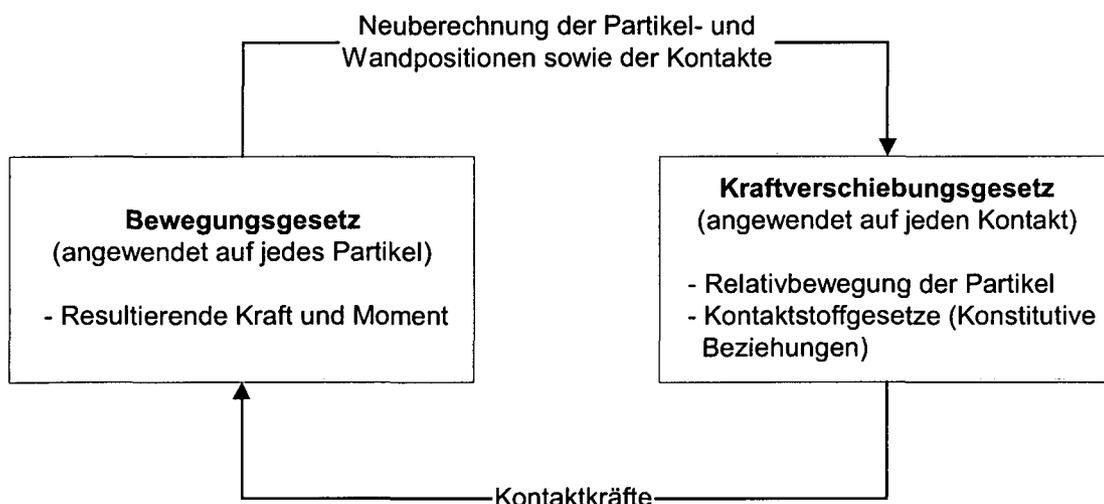


Abbildung 4.1: Berechnungskreislauf in PFC

4.2 Kraftverschiebungsgesetz

Durch die Anwendung des Kraftverschiebungsgesetzes und die Verwendung von konstitutiven Beziehungen (Kontaktsteifigkeitsmodell, Gleitmodell und Bindungsmodell) wird ein Materialverhalten modelliert. Dabei definiert das Kraftverschiebungsgesetz allgemein die Beziehung zwischen der relativen Verschiebung zweier Partikel (=Bälle) an einem Kontakt zu der Kontaktkraft, die zwischen den beiden Partikeln wirkt. Es werden zwei Kontaktformen unterschieden, Ball-Ball- und Ball-Wand-Kontakt, wobei die Kontaktkraft gemäß den Voraussetzungen der DEM bei beiden Kontaktformen in einem Punkt wirkt. In den nachfolgenden Gleichungen bezeichnen die Größen mit dem Index i immer einen Vektor mit den Komponenten $\{1,2,3\}$ im dreidimensionalen Raum bzw. $\{1,2\}$ in der Ebene.

Das Kraft-Verschiebungsgesetz wird an einem Kontakt angewendet, und wird durch den Kontaktpunkt, $x_i^{[C]}$, welcher auf der Kontaktfläche liegt, und durch den Einheitsnormalvektor n_i beschrieben. Der Kontaktpunkt liegt innerhalb des Überschneidungsvolumens. Bei einem Ball-Ball-Kontakt zeigt der Normalvektor von Ballmittelpunkt zu Ballmittelpunkt; bei einem Ball-Wand-Kontakt zeigt der Normalvektor vom Ballmittelpunkt entlang der kürzesten Linie zur Wand hin. Die Kontaktkraft wird in eine Normalkraft (in Richtung des Normalvektors) und in eine Scherkraft (in der Kontaktebene) zerlegt. Das Kraftverschiebungsgesetz stellt diese Kraftkomponente mittels Normal- und Scherkraftsteifigkeit in Relation zur relativen Verschiebung.

Das Kraftverschiebungsgesetz wird im Folgenden für beide Kontaktarten (Ball-Ball und Ball-Wand) beschrieben. Abbildung 4.2 zeigt den Fall eines Ball-Ball-Kontaktes, die beiden kugelförmigen Partikel sind mit **A** und **B** bezeichnet. Abbildung 4.3 zeigt den Fall eines Ball-Wand-Kontaktes, die Wand ist mit **w** und der kugelförmige Partikel mit **b** bezeichnet. Für beide Fälle werden im Folgenden die relevanten Gleichungen dargestellt. In beiden Darstellungen wird mit U^n die Überlappung bezeichnet.

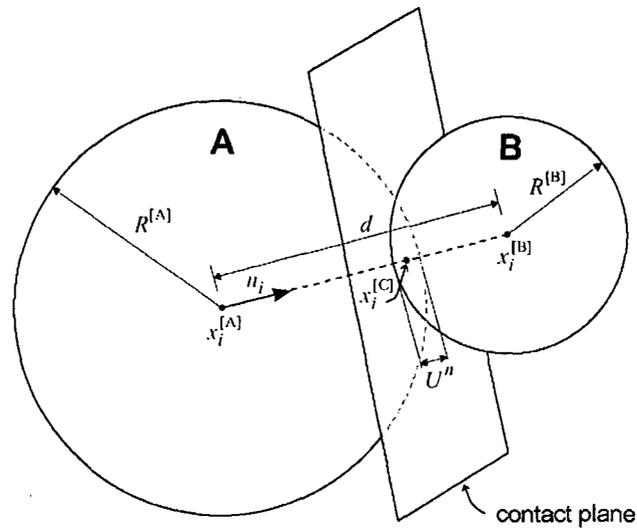


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Ball-Ball-Kontaktes (Itasca, 1999b).

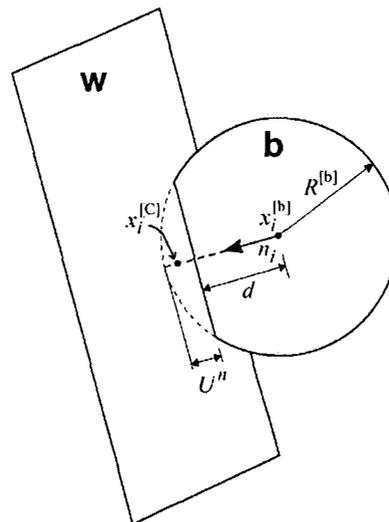


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Ball-Wand-Kontaktes (Itasca, 1999b).

Für den Ball-Ball-Kontakt gilt für der Normalvektor n_i , der die Kontaktebene (contact plane) festlegt,

$$n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d}, \quad (4.1)$$

wobei $x_i^{[A]}$ und $x_i^{[B]}$ die Positionsvektoren der Mittelpunkte der Partikel A und B sind. Der Abstand d zwischen den beiden Kugelmittelpunkten wird mit

$$d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})} \quad (4.2)$$

angegeben.

Bei einem Ball-Wand-Kontakt zeigt der Normalvektor n_i in Richtung des kürzesten Abstandes d zwischen Ballmittelpunkt und Wand. Diese Richtung findet man, indem man die Lage des Ballmittelpunktes bestimmten definierten Bereichen zuordnet. Die in PFC gewählte Vorgehensweise ist in Abbildung 4.4 anhand einer zweidimensionalen Wand, bestehend aus zwei Liniensegmenten AB und BC, dargestellt. Wände in PFC haben eine aktive und eine inaktive Seite. Ein Kontakt zwischen einem Partikel und einem Wandelement kann nur auf der aktiven Seite erkannt werden. Der Raum auf der aktiven Seite der Wand kann mithilfe der Wandnormalen an den Eckpunkten in fünf Bereiche unterteilt werden. Liegt nun der Ballmittelpunkt im Bereich 2 oder 4, so berührt das Partikel die Wand entlang der Liniensegmente AB und BC, und n_i ist normal auf das Wandsegment. Befindet sich der Ballmittelpunkt in den Bereichen 1, 3 oder 5, so berührt der Ball die Wand an einem der Eckpunkte, und n_i zeigt vom Wandendpunkt zum Ballmittelpunkt.

Der Vorteil der Ermittlung des Kontaktpunktes rein über die Geometrie liegt darin, dass nachträgliche Änderungen der Radien ohne Eingriff in den Lösungsalgorithmus möglich sind. Nach der Änderung der Radien werden im nächsten Rechenschritt die neuen Kontakte über die Betrachtung der Geometrie erfasst.

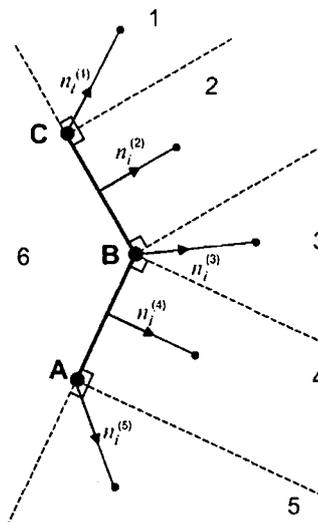


Abbildung 4.4: Festlegung der Richtung des Normalvektors n_i bei einem Ball-Wand-Kontakt (Itasca, 1999b)

Die Überlappung U^n ist als relative Verschiebung an den Kontakten in Richtung der Normalen definiert.

$$U^n = \begin{cases} R^{[A]} + R^{[B]} - d, & (\text{Ball - Ball}) \\ R^{[B]} - d, & (\text{Ball - Wand}) \end{cases} \quad (4.3)$$

wobei $R^{[\Phi]}$ der Radius des Balles Φ ist. Die Lage des Kontaktpunktes ergibt sich nach

$$x_i^{[C]} = \begin{cases} x_i^{[A]} + (R^{[A]} - \frac{1}{2}U^n)n_i & (\text{Ball - Ball}) \\ x_i^{[b]} + (R^{[b]} - \frac{1}{2}U^n)n_i & (\text{Ball - Wand}). \end{cases} \quad (4.4)$$

Der Kontaktkraftvektor F_i , der die Wirkung des Balls A auf den Ball B (bei einem Ball-Ball-Kontakt) und die Wirkung des Balls b auf die Wand w (bei einem Ball-Wand-Kontakt) darstellt, kann in einen Normalkraftvektor F_i^n und einen Scherkraftvektor F_i^s , bezogen auf die Kontaktfläche, zerlegt werden.

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (4.5)$$

Der Normalkraftvektor F_i^n im Kontaktpunkt wird aus der Überlappung U^n und der Normalsteifigkeit K^n [Kraft/Verschiebung] ermittelt,

$$F_i^n = K^n \cdot U^n \cdot n_i, \quad (4.6)$$

wobei n_i der Normalvektor der Kontaktebene ist. Der Wert von K^n wird nach dem verwendeten Kontaktsteifigkeitsmodell berechnet.

Zu beachten ist, dass die Normalsteifigkeit K^n einem Sekantenmodul entspricht und sich somit der Gesamtwert der Verschiebung auf den Gesamtwert der Normalkraft bezieht. Die Berechnung der Normalkontaktkraft aus der momentanen Geometrie macht den Rechenprozess genauer und ermöglicht eine Änderung der Position und der Radien der Bälle, auch nach dem Beginn der Berechnung.

Die Schersteifigkeit k_s ist im Gegensatz zur Normalsteifigkeit ein Tangentenmodul und verbindet die inkrementellen Werte der Scherkraft und der Scherbewegung der am Kontakt beteiligten Bälle. Die Scherkontaktkraft wird schrittweise berechnet. Bei Kontaktbildung wird die Scherkontaktkraft auf Null gesetzt. Jedes in den nachfolgenden Berechnungsschritten ermittelte relative Scherverschiebungsinkrement ergibt ein Inkrement einer elastischen Scherkraft, das zur Scherkontaktkraft addiert wird. Die Bewegung des Kontaktes ergibt sich aus der Neuberechnung von n_i und $x_i^{[C]}$ in jedem Rechenschritt.

Die Scherkomponente des Vektors des Kontaktverschiebungsincrements, das während eines Zeitschrittes Δt auftritt, berechnet sich mithilfe der Scherkomponente der Kontaktgeschwindigkeit V_i^s aus

$$\Delta U_i^s = V_i^s \cdot \Delta t \quad (4.7)$$

und wird zur Berechnung des elastischen Scherkraftvektorkrements verwendet,

$$\Delta F_i^s = -k^s \Delta U_i^s \quad (4.8)$$

wobei k^s die Scherkraftsteifigkeit [Kraft/Verschiebung] am Kontakt ist. Der Wert der Scherkraftsteifigkeit wird nach dem aktuellen Kontaktsteifigkeitsmodell ermittelt. Die Scherkraftsteifigkeit ist ein Tangentenmodul und wird somit mit k bezeichnet.

Die neue Gesamtscherkontaktkraft wird durch die Aufsummierung des alten Scherkraftvektors mit dem Inkrement des Scherkraftvektors berechnet.

$$F_i^s \leftarrow F_i^s + \Delta F_i^s \quad (4.9)$$

Die relative Bewegung am Kontakt bzw. die Kontaktgeschwindigkeit V_i , welche als Geschwindigkeit des Balls B relativ zu Ball A am Kontaktpunkt bei Ball-Ball-Kontakt gesehen wird und als Geschwindigkeit der Wand w relativ zum Ball b am Kontaktpunkt eines Ball-Wand-Kontakts gesehen wird, ergibt sich aus

$$\begin{aligned} V_i &= (\dot{x}_i^{[C]})_{\Phi_2} - (\dot{x}_i^{[C]})_{\Phi_1} \\ &= (\dot{x}_i^{[\Phi_2]} + e_{i3k} \omega_i^{[\Phi_2]} (x_k^{[C]} - x_k^{[\Phi_2]})) - (\dot{x}_i^{[\Phi_1]} + e_{i3k} \omega_i^{[\Phi_1]} (x_k^{[C]} - x_k^{[\Phi_1]})), \end{aligned} \quad (4.10)$$

wobei $\dot{x}_i^{[\Phi_j]}$ und $\omega_3^{[\Phi_j]}$ die Translations- und Rotationsgeschwindigkeiten der Partikel Φ_j sind, für die Folgendes gilt:

$$\{\Phi_1, \Phi_2\} = \begin{cases} \{A, B\} & (\text{Ball} - \text{Ball}) \\ \{b, w\} & (\text{Ball} - \text{Wand}). \end{cases} \quad (4.11)$$

Die Kontaktgeschwindigkeit kann, bezogen auf die durch n_i festgelegte Kontaktfläche, in eine Normal- und eine Scherkomponente zerlegt werden. Somit ergibt sich eine Normalgeschwindigkeit V_i^n und eine Schergeschwindigkeit V_i^s . Die Schergeschwindigkeit V_i^s kann berechnet werden mit

$$V_i^s = V_i - V_i^n = V_i - V_j \cdot n_j \cdot n_i. \quad (4.12)$$

Die Werte der Normal- und Scherkontaktkräfte, die durch die Gleichungen 4.6 und 4.9 ermittelt wurden, werden korrigiert, um den Bedingungen aus den Kontaktgesetzen zu genügen. Nach dieser Korrektur wird der Einfluss der Kontaktkräfte zu den resultierenden Kräften und dem resultierenden Moment des Teilchens wie folgt berechnet

$$\begin{aligned} F_i^{[\Phi 1]} &\leftarrow F_i^{[\Phi 1]} - F_i \\ F_i^{[\Phi 2]} &\leftarrow F_i^{[\Phi 2]} - F_i \\ M_i^{[\Phi 1]} &\leftarrow M_i^{[\Phi 1]} - e_{ijk} (x_j^{[C]} - x_j^{[\Phi 1]}) F_k \\ M_i^{[\Phi 2]} &\leftarrow M_i^{[\Phi 2]} - e_{ijk} (x_j^{[C]} - x_j^{[\Phi 2]}) F_k, \end{aligned} \quad (4.13)$$

wobei $F_i^{[\Phi j]}$ und $M_i^{[\Phi j]}$ die Summen der Kräfte und Momente des Partikels Φ_j sind, und F_i ist durch Gleichung (4.5) gegeben.

4.3 Konstitutive Beziehungen

Die konstitutiven Beziehungen werden allgemein auch Werkstoff- bzw. Materialgleichungen genannt und werden in PFC durch sogenannte Kontaktmodelle beschrieben. Es sind drei Kontaktmodelle in PFC vordefiniert, die jedem Kontakt zugewiesen werden:

- Steifigkeitsmodell
- Gleitmodell
- Bindungsmodell

Das Steifigkeitsmodell liefert eine elastische Beziehung zwischen Kontaktkraft und relativer Verschiebung. Das Gleitmodell liefert einen Zusammenhang zwischen Normal- und Scherkraft und einer relativen Verschiebung (=Gleitung) zwischen zwei Bällen im Kontaktfall.

Das Bindungsmodell ermöglicht es, Grenzen für die aufnehmbaren Normal- und Scherkräfte für in Kontakt befindliche Partikeln zu setzen, d.h. es kann eine Normal- und Scherfestigkeit angegeben werden.

Es können Modelle miteinander kombiniert werden, mithilfe der Programmiersprache FISH die vorhandenen Modelle modifiziert und mithilfe der Programmiersprache C++ neue Kontaktmodelle entwickelt werden. Neben einem elastischen und elasto-plastischen Materialverhalten im Kontakt kann damit auch ein viskoelastisches oder viskoses Materialverhalten modelliert werden.

4.3.1 Steifigkeitsmodell

Das Steifigkeitsmodell regelt die elastische Interaktion zweier in Kontakt befindlicher Partikel (Abbildung 4.5). Wie im Kraftverschiebungsgesetz bereits beschrieben, wird die Normalsteifigkeit als Sekantensteifigkeit betrachtet und damit die Gesamtnormalkraft in Relation zur Gesamtnormalverschiebung nach Gleichung (4.6) gesetzt. Die Schersteifigkeit ist eine Tangentensteifigkeit und stellt nach Gleichung (4.8) das Inkrement der Scherkraft in ein Verhältnis zum Inkrement der Scherverschiebung. Je nach verwendetem Steifigkeitsmodell werden unterschiedliche Werte für Kontaktsteifigkeiten ermittelt. PFC stellt zwei unterschiedliche Steifigkeitsmodelle zur Verfügung, ein lineares Steifigkeitsmodell und ein vereinfachtes Hertz-Mindlin Steifigkeitsmodell.

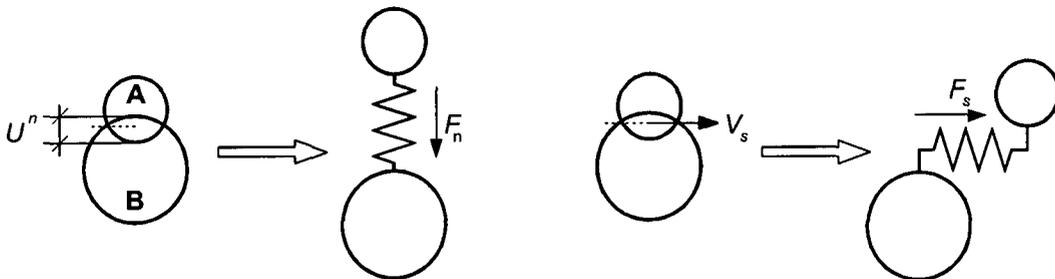


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Steifigkeitsmodells (Hainbüchner, 2001; verändert).

Bei dem linearen Steifigkeitsmodell erfolgt die Berechnung der Normal- und der Schersteifigkeit k_n und k_s [Kraft/Verschiebung] der in Kontakt stehenden Elemente so, als wären die beiden Steifigkeiten in Serie geschaltet. Damit ergibt sich eine Sekanten-Normalkontaktsteifigkeit K^n mit

$$K^n = \frac{k_n^{[A]} \cdot k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (4.14)$$

und eine Tangenten-Scherkontaktsteifigkeit k_s mit

$$k^s = \frac{k_s^{[A]} \cdot k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}}; \quad (4.15)$$

dabei stehen die Indizes [A] und [B] für die beiden in Kontakt stehenden Elemente.

4.3.2 Gleitmodell

Das Gleiten eines Partikels wird über ein Kontaktmodell, das sogenannte Gleitmodell, gesteuert, das eine immanente Eigenschaft zweier in Kontakt befindlicher Elemente ist (Ball-Ball oder Ball-Wand). Es erlaubt das Auftreten von Gleitung mithilfe einer Grenzscherkraft, aber es liefert keine Zugfestigkeit.

Das Gleitmodell ist immer vorhanden, solange keine Kontaktbindung (siehe Bindungsmodell) den in Kontakt befindlichen Partikeln zugewiesen ist. Das bedeutet, dass die Kontaktbindung vor dem Gleitmodell angewendet wird. Die zwei Kontaktmodelle (Gleitmodell und Bindungsmodell) beschreiben somit die konstitutive Beziehung zweier Partikel, die an einem Punkt in Kontakt treten. Die Parallelbindung, das zweite in PFC zur Verfügung gestellte Bindungsmodell, beschreibt ein zementartiges Material zwischen den Bällen. Das Gleitmodell und die Parallelbindung können gleichzeitig wirksam sein.

Das Gleitmodell wird durch den Reibungskoeffizienten μ [dimensionslos] beschrieben, wobei der kleinere der beiden Reibungskoeffizienten der in Kontakt befindlichen Elemente verwendet wird.

Das Kriterium für eine nichtvorhandene Normalfestigkeit ist die Überlappung aus Gleichung (4.3). Ist diese nun kleiner oder gleich Null, dann wird die Normalkontakt- und Scherkontaktkraft auf Null gesetzt.

Der Kontakt wird auf Gleitung überprüft, und die maximal zulässige Scherkraft

$$F_{\max}^S = \mu |F_i^N| \quad (4.16)$$

ermittelt. Ist $|F_i^S| > F_{\max}^S$, dann ist Gleiten während des nächsten Rechenschrittes zulässig, und F_i^S wird beschränkt auf F_{\max}^S .

$$F_i^S \leftarrow F_i^S \left(\frac{F_{\max}^S}{|F_i^S|} \right) \quad (4.17)$$

4.3.3 Bindungsmodell

In PFC können die Partikel über definierte Bindungen zusammengebunden werden. Es gibt zwei Bindungsmodelle:

- Kontaktbindung
- Parallelbindung

In beiden Fällen wird die Bindung über Scherfestigkeiten und Zugfestigkeiten definiert. Die Kontaktbindung tritt nur im Kontaktpunkt auf. Bei der Parallelbindung wirkt die Bindung in einem kreisförmigen oder rechteckigen Querschnitt zwischen den Partikeln. Bei der Kontaktbindung kann somit nur eine Kraft übertragen werden, während bei der Parallelbindung zusätzlich zur Kraft auch ein Moment übertragen werden kann. Beide Bindungsarten können gleichzeitig an einem Kontakt verwendet werden. Bei beiden Bindungsarten können somit Zugkräfte übertragen werden. Eine Bindung existiert solange, bis die Normal- oder Scherkraft die zulässige Zugfestigkeit der Bindung in die jeweilige Richtung überschreitet, dann bricht die Bindung. Es können nur Bälle mit Bällen über ein Bindungsmodell verbunden werden. Die Bindungsmodelle wirken jedoch nicht zwischen Bällen und Wänden.

Kontaktbindung und Gleitmodell sind in Serie geschaltet, wobei zuerst die Kontaktbindung wirkt. Die Parallelbindung und das Gleitmodell sind parallel geschaltet und wirken somit gleichzeitig.

Kontaktbindung

Eine Kontaktbindung kann schematisch als ein Paar elastischer Federn dargestellt werden, wobei die Normal- und Schersteifigkeiten an einem Punkt wirken. Den beiden Federn wird eine Scher- und Zugfestigkeit zugewiesen. Das Gleitmodell existiert bei einer Kontaktbindung nicht, d.h. die Scherkraft wird nicht auf ein bestimmtes zulässiges Maximum reduziert (4.16). Stattdessen wird die Scherkontaktkraft durch die Scherfestigkeit limitiert. Zugkräfte sind an solchen Kontaktbindungen zulässig und werden mithilfe des Kontaktverschiebungsgesetzes (4.6) für den Fall, dass keine Überlappung vorliegt ($U^n < 0$), ermittelt. In diesem Fall agiert die Kontaktbindung, um die Bälle zusammenzuhalten. Die Größe dieser Normalkontaktzugkraft ist durch die Normalkontaktbindungskraft begrenzt.

Eine Kontaktbindung ist durch die folgenden zwei Parameter definiert:

- Normalkontaktbindungskraft F_c^n [Kraft]
- Scherkontaktbindungskraft F_c^s [Kraft]

Ist die Normalkontaktzugkraft gleich oder größer als die Normalkontaktbindungskraft, bricht die Bindung, und die Normal- und Scherkontaktkraft werden gleich Null gesetzt. Wird der Wert der Scherkontaktkraft gleich oder größer als die Scherkontaktbindungskraft, dann bricht die Bindung, jedoch werden die Kontaktkräfte nicht geändert, außer, die Scherkraft überschreitet das Reibungslimit (4.16).

Das grundlegende Verhalten der Scher- und Normalkomponenten der Kontaktkraft und der relativen Verschiebung für den Partikelkontaktpunkt zeigt Abbildung 4.6. Zu jedem Zeitpunkt ist entweder das Kontaktbindungsmodell oder das Gleitmodell aktiv. In Abbildung 4.6 ist F^n die Normalkontaktkraft und ist eine Zugkraft, wenn $F^n > 0$.

U^n ist die relative Normalverschiebung, wobei $U^n > 0$ eine Überlappung bedeutet. F^s ist die Größe der Gesamtscherkontaktkraft, U^s ist die Größe der Gesamtscherverschiebung, bezogen auf den Punkt, an dem die Kontaktbindung entstanden ist.

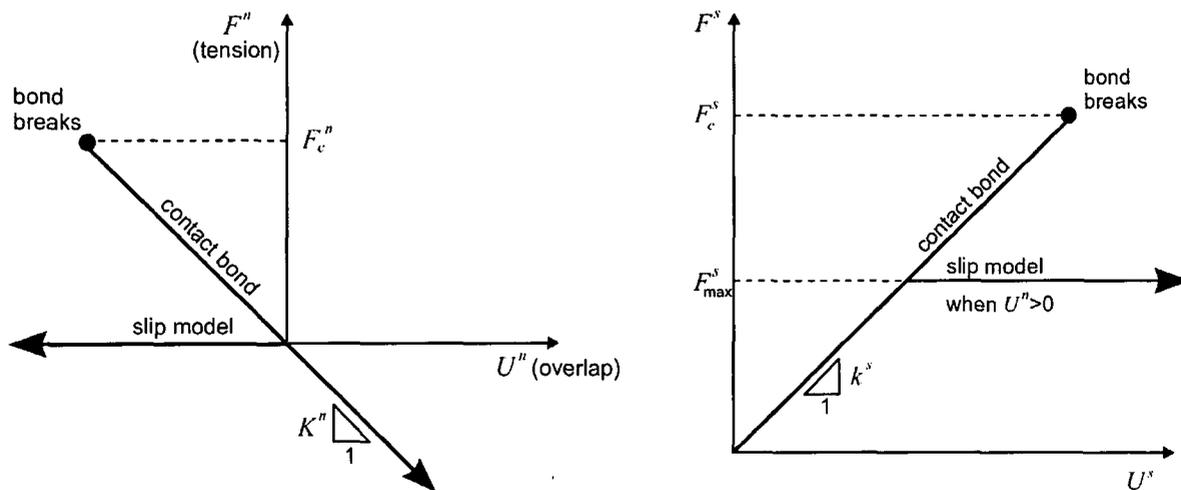


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der konstitutiven Beziehung für die Kontaktbindung; links: Normalkomponente der Kontaktkraft; rechts: Scherkomponente der Kontaktkraft (Itasca, 1999b).

Die Parallelbindung

Die Parallelbindung beschreibt das generelle Verhalten eines endlich großen Stückes zementartigen Materials zwischen zwei Bällen. Die zwei Bälle werden entweder als zylindrische Scheiben oder als Kugeln behandelt. Die Parallelbindung wirkt elastisch

zwischen den Partikeln und wirkt parallel zum Gleitmodell oder zur Kontaktbindung. Parallele Bindungen übertragen beides, Kräfte und Momente zwischen den Partikeln, während bei Kontaktbindungen nur Kräfte am Kontaktpunkt übertragen werden. Es kann somit bei einer Parallelbindung zu einer resultierenden Kraft und einem resultierenden Moment kommen, die auf die miteinander verbundenen Partikel wirken.

Eine parallele Bindung kann man sich als eine Ansammlung von elastischen Federn mit konstanten Normal- und Schersteifigkeiten, die über die entweder runde (bei kugelförmigen Partikeln in PFC^{2D} und PFC^{3D}) oder rechteckige Querschnittsfläche (bei zylindrischen Partikeln in PFC^{2D}) auf der Kontaktebene mit dem Kontaktpunkt, als Mittelpunkt, gleichmäßig verteilt sind, vorstellen (Abbildung 4.7). Diese Federn wirken parallel zu jenen, die im Kontaktpunkt über das Steifigkeitsmodell definiert sind. Eine relative Bewegung im Kontakt, nach der Einrichtung der Parallelbindung, bewirkt aufgrund der Parallelbindungskraft eine Kraft und ein Moment im Kontaktmaterial. Diese Kraft und dieses Moment wirken auf die verbundenen Partikel und können in Beziehung mit der maximalen Normal- und Scherspannung innerhalb des Bindungsmaterials gebracht werden. Übersteigt eine der Spannungen die dazugehörige maximale Bindungsfestigkeit, so bricht die Parallelbindung.

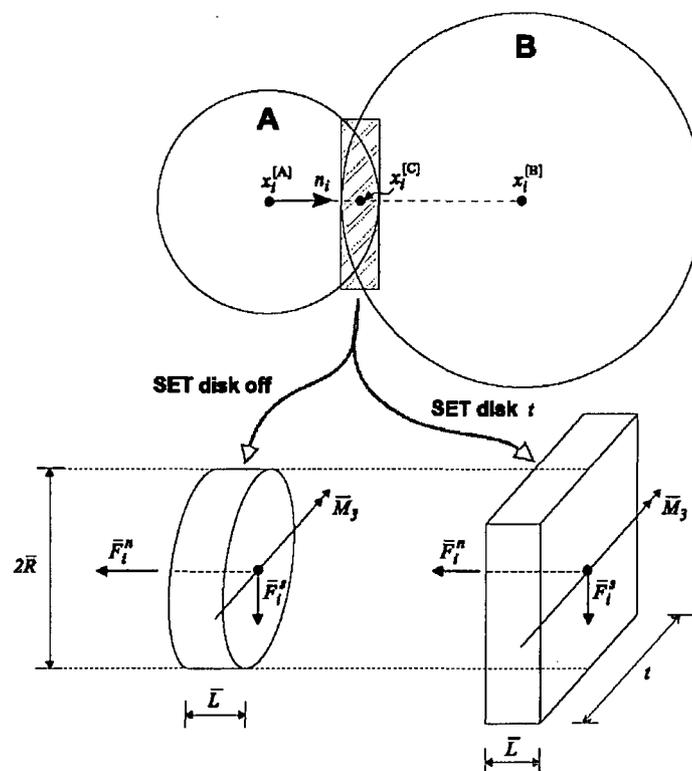


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung der Parallelbindung (Itasca, 1999a).

Eine Parallelbindung ist durch die folgenden Parameter definiert:

- Normalsteifigkeit \bar{k}^n [Spannung/Verschiebung]
- Schersteifigkeit \bar{k}^s [Spannung/Verschiebung]
- Normalfestigkeit $\bar{\sigma}_c$ [Spannung]
- Scherfestigkeit $\bar{\tau}_c$ [Spannung]
- Bindungsradius \bar{R}

4.4 Bewegungsgesetz

Die Bewegung eines einzelnen unverformbaren Partikels resultiert aus dem Eigengewicht des Partikels und den auf ihn wirkenden Kontaktkräften. Zuzufolge der Resultierenden des Kraftvektors und des Momentenvektors wird dann die translatorische Bewegung sowie die Rotation des Partikels dargestellt. Dabei ist die translatorische Bewegung des Massenmittelpunktes mit dessen Position x_i , die Geschwindigkeit mit \dot{x}_i und die Beschleunigung mit \ddot{x}_i , beschrieben. Die Beschreibung der Rotationsbewegung des Partikels erfolgt analog mit der Winkelgeschwindigkeit ω_i und der Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}_i$.

Die Bewegungsgleichungen können in zwei Vektorgleichungen angeschrieben werden. Dabei werden die Translationsbewegung mit der resultierenden Kraft und die Rotationsbewegung mit dem resultierenden Moment verknüpft.

$$F_i = m \cdot (\ddot{x}_i - g_i) \quad \dots \text{ translatorische Bewegung} \quad (4.18)$$

$$M_i = \dot{H}_i \quad \dots \text{ rotatorische Bewegung} \quad (4.19)$$

In Gl. (4.18) ist F_i die Summe aller äußeren Kräfte, m die Masse des Partikels und g_i der Massenbeschleunigungsvektor, z.B. Gravitation. In der Vektorgleichung für die Rotation (4.19) ist M_i das angreifende Moment und \dot{H}_i das Drehmoment des Partikels. Die Beziehung in Gl. (4.19) kann auf ein lokales Koordinatensystem bezogen werden. Wenn das lokale Koordinatensystem so liegt, dass es mit den Hauptträgheitsachsen des Partikels zusammenfällt, so reduziert sich die Gl. (4.19) zu der Eulerschen Bewegungsgleichung.

$$M_1 = I_1 \cdot \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \cdot \omega_2 \cdot \omega_3$$

$$M_2 = I_2 \cdot \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \cdot \omega_1 \cdot \omega_3$$

$$M_3 = I_3 \cdot \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \cdot \omega_2 \cdot \omega_1 \quad (4.20)$$

In Gl. (4.20) sind I_1, I_2 und I_3 die Hauptträgheitsmomente der Partikel, $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2$ und $\dot{\omega}_3$ die Winkelbeschleunigungen bezogen auf die Hauptachsen; und M_1, M_2 und M_3 die Komponenten des resultierenden Momentes bezogen auf die Hauptachsen.

Bei Kugeln mit dem Radius R und einer über das Volumen gleichmäßig verteilten Masse fällt der Schwerpunkt mit dem geometrischen Mittelpunkt zusammen. Somit sind die Achsen jedes beliebigen lokalen Koordinatensystems, das den Ursprung im Mittelpunkt der Kugel hat, gleichzeitig die Hauptträgheitsachsen, und die Trägheitsmomente sind alle gleich groß. Bei scheibenförmigen Partikeln, die nur um den Normalenvektor der Ebene rotieren, sind die beiden Winkelgeschwindigkeiten $\omega_1 = \omega_2 = 0$, da die beiden Hauptträgheitsachsen außerhalb der Modellebene liegen. Demzufolge kann die Gl. (4.20) für den zwei- als auch dreidimensionalen Fall auf ein globales Koordinatensystem bezogen werden.

$$M_i = I \cdot \dot{\omega}_i = (\beta \cdot m \cdot R^2) \cdot \dot{\omega}_i \quad (4.21)$$

mit

$$\beta = \begin{cases} 2/5, & (\text{kugelförmiges Teilchen}) \\ 1/2, & (\text{scheibenförmiges Teilchen}). \end{cases} \quad (4.22)$$

Die Bewegungsgleichungen, beschrieben in Gl. (4.18) und Gl. (4.21), werden nach Umwandlung in eine Differenzgleichung unter Verwendung des mittleren Differenzenquotienten über den Zeitschritt Δt gelöst. Dabei werden die Größen \dot{x}_i und ω_i mit dem mittleren Intervall $(t \pm n\Delta t/2)$ berechnet, während die Größen $x_i, \ddot{x}_i, \dot{\omega}_i, F_i$ und M_i mit dem Hauptintervall $(t \pm n\Delta t)$ ermittelt werden.

Die Gl. (4.23) und Gl. (4.24) beschreiben die translatorische und rotatorische Beschleunigung zum Zeitpunkt t mit den Geschwindigkeitswerten des mittleren Intervalls.

$$\ddot{x}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} \left(\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} - \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} \right) \quad (4.23)$$

$$\dot{\omega}_i^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} (\omega_i^{(t+\Delta t/2)} - \omega_i^{(t-\Delta t/2)}) \quad (4.24)$$

Setzt man die Gl. (4.23) und Gl. (4.24) in die Gleichungen Gl. (4.18) und Gl. (4.21) ein, so ergeben sich die Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt $(t+\Delta t/2)$.

$$\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{F_i^{(t)}}{m} + g_i \right) \cdot \Delta t \quad (4.25)$$

$$\omega_i^{(t+\Delta t/2)} = \omega_i^{(t-\Delta t/2)} + \left(\frac{M_i^{(t)}}{I} \right) \cdot \Delta t \quad (4.26)$$

Aus den Geschwindigkeiten in Gl. (4.25) und (4.26) lassen sich abschließend die Positionen der Partikelmittelpunkte wieder neu bestimmen.

$$x_i^{(t+\Delta t)} = x_i^{(t)} + \dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)} \cdot \Delta t \quad (4.27)$$

Der Berechnungskreislauf aus Abbildung 4.1 kann nun wie folgt beschrieben werden:

Ausgehend von den Werten $\dot{x}_i^{(t-\Delta t/2)}$, $\omega_3^{(t-\Delta t/2)}$, $x_i^{(t)}$, $F_i^{(t)}$, und $M_i^{(t)}$, werden mithilfe von Gl.

(4.25) und (4.26) die Geschwindigkeiten $\dot{x}_i^{(t+\Delta t/2)}$ und $\omega_3^{(t+\Delta t/2)}$ ermittelt. Anschließend wird

mit Gl. (4.27) die Position des Partikelmittelpunktes $x_i^{(t+\Delta t)}$ berechnet. Die aktualisierten

Kräfte und Momente $F_i^{(t+\Delta t)}$ und $M_i^{(t+\Delta t)}$ werden im nächsten Berechnungszyklus durch

Anwendung des Kraftverschiebungsgesetzes ermittelt.

4.5 Zeitschritt

Viele Differenzgleichungen sind rundungsempfindlich (instabil). Dies bedeutet, dass auch

kleinste Anfangs- oder Rundungsfehler sich im Lauf der Rechnung mit wachsendem Betrag

fortpflanzen und das Ergebnis bis zur völligen Unbrauchbarkeit verfälschen. Hingegen ist ein

System stabil, wenn der Einfluss von Fehlern im Lauf der Rechnung abklingt. Explizite

zentrale Differenzgleichungen werden nun in PFC verwendet, um die

Bewegungsgleichungen zu integrieren. Die Stabilität der Differenzgleichungen hängt nun

von der Wahl einer bestimmten Schrittweite ab. Das bedeutet, dass in PFC die ermittelte

Lösung nur dann stabil bleibt, wenn die Größe des kritischen Zeitschrittes (der kritische

Zeitschritt) nicht überschritten wird. Der kritische Zeitschritt hängt von der kleinsten

Eigenschwingung des gesamten Systems ab und wird mithilfe der kleinsten Eigenfrequenz

bestimmt. Um die kleinste Eigenfrequenz zu bestimmen, müsste eine modale Analyse, die auf einer Eigenwertanalyse zur Bestimmung der Eigenformen basiert, für das System durchgeführt werden. Eine globale Eigenwertanalyse wäre für ein so großes und immer wechselndes System, welches in PFC verwendet wird, unpraktisch. Deshalb wurde von Itasca eine einfache Prozedur entwickelt, mit der der kritische Zeitschritt vor jedem Berechnungszyklus abgeschätzt werden kann. Dabei wird der aktuelle Zeitschritt als ein Bruchteil von seinem geschätzten kritischen Wert angenommen.

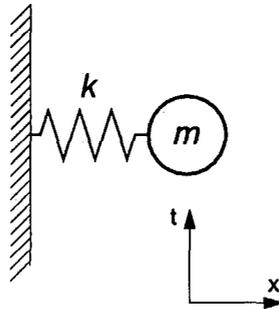


Abbildung 4.8: Einmassenschwinger.

Die Ermittlung des Zeitschrittes wird mithilfe eines Einmassenschwingers beschrieben (Abbildung 4.8). Es wird ein eindimensionaler Einmassenschwinger betrachtet, mit einer Punktmasse m und einer Feder mit der Steifigkeit k . Die Bewegung der Punktmasse wird mithilfe der Differentialgleichung $-k \cdot x = m \cdot \ddot{x}$ beschrieben. Die kritische Größe für den Zeitschritt t_{crit} , bei einer finiten Differentiation zweiter Ordnung, ist nach Bathe und Wilson (1976)

$$t_{crit} = \frac{T}{\pi}; \quad T = 2\pi\sqrt{m/k}, \quad (4.28)$$

wobei T die Periodenlänge des Systems ist.

Betrachtet man ein System einer unendlichen Serie von Punktmassen und Federn, so ergibt sich die kleinste Periodenlänge des Systems, wenn sich die Massen synchron in die entgegengesetzte Richtung bewegen, sodass die Mitte jeder Feder sich nicht verschiebt.

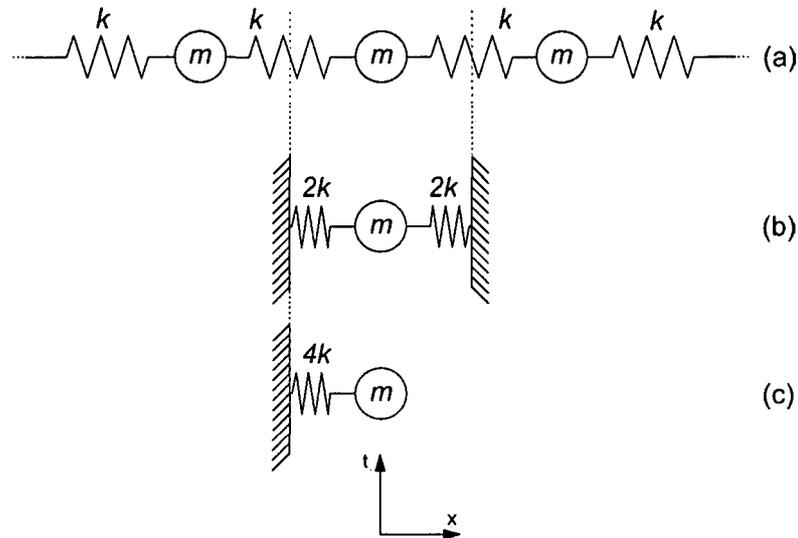


Abbildung 4.9: System einer unendlichen Serie von Punktmassen - Mehrmassenschwinger.

Die Bewegung eines einzelnen Massenpunktes in diesem System kann durch die beiden äquivalenten Systeme (b) und (c) in Abbildung 4.9. dargestellt werden. Der kritische Zeitschritt für dieses System ergibt sich unter Verwendung von Gl. (4.28) damit zu

$$t_{crit} = 2\sqrt{m/(4k)} = \sqrt{m/k}, \quad (4.29)$$

wobei k die Steifigkeit jeder Feder in Abbildung 4.9 ist. Mit dem Einmassenschwinger und mit dem Mehrmassenschwinger lassen sich die translatorischen Bewegungen eines Systems beschreiben. Die Rotation kann mit ähnlichen Systemen beschrieben werden, wobei die Masse m eines Partikels durch dessen Massenträgheitsmoment I und die Steifigkeit $k = k^{tran}$ durch die Drehsteifigkeit k^{rot} ersetzt wird. Somit ergibt sich der kritische Zeitschritt eines Mehrmassenschwingers zu

$$t_{crit} = \begin{cases} \sqrt{m/k^{tran}} & (Translation) \\ \sqrt{I/k^{rot}} & (Rotation). \end{cases} \quad (4.30)$$

Die in PFC verwendeten Systeme sind Ansammlungen von Partikeln, die unterschiedliche Massen und Steifigkeiten haben können. Die gewählte Steifigkeit wird mithilfe der Diagonalwerte der Steifigkeitsmatrix, die die Inkremente der Verschiebung und Rotation in Relation zu den Inkrementen der Kräfte und Momente setzt, abgeschätzt. Der für den Berechnungszyklus gewählte kritische Zeitschritt der Partikelansammlung wird bestimmt, indem nun für jeden Partikel für jeden Freiheitsgrad, unter der Annahme, dass die

Freiheitsgrade entkoppelt sind, die Gl. (4.30) angewendet wird. Der kritische Zeitschritt ist dann das Minimum aller kritischen Zeitschritte.

Aus Gl. (4.30) folgt direkt, dass die Größen wie Partikeldichte, Partikelradius und Steifigkeit in direktem Zusammenhang mit dem kritischen Zeitschritt stehen. Hohe Steifigkeiten, kleine Partikelradien und kleine Massen verlangsamen die Berechnung.

4.6 Mechanische Dämpfung

In den verwendeten Partikelansammlungen wird die Energie durch die Reibung umgewandelt. Bei einigen Systemen ist diese Energieumwandlung (-minimierung) durch die alleinige Reibungskraft jedoch nicht ausreichend, um das System innerhalb einer nicht zu großen Anzahl an Zeitschritten in ein Gleichgewicht zu bringen. Daher ist in PFC zusätzlich eine lokale nichtviskose Dämpfung (Cundall, 1987) implementiert, die die Bewegungsgleichungen jedes Partikels abdämpft. Eine Dämpfungskraft ist in den Bewegungsgleichungen Gl. (4.18) und Gl. (4.21) hinzugefügt und ergibt sich zu

$$F_{(i)} + F_{(i)}^d = M_{(i)} A_{(i)}; \quad i = 1 \dots 6 \quad (4.31)$$

$$M_{(i)} A_{(i)} = \begin{cases} m\ddot{x}_{(i)} & \text{für } i = 1 \dots 2 \\ I\dot{\omega}_{(i-3)} & \text{für } i = 4 \dots 6, \end{cases} \quad (4.32)$$

wobei $F_{(i)}$, $M_{(i)}$ und $A_{(i)}$ die generalisierten Kräfte, Massen und Beschleunigungen sind; $F_{(i)}$ beinhaltet die Wirkung der Gravitation; $F_{(i)}^d$ ist die Dämpfungskraft.

$$F_{(i)}^d = -\alpha |F_{(i)}| \text{sign}(v_{(i)}) \quad i = 1 \dots 3 \quad (4.33)$$

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} +1 & \text{wenn } y > 0 \\ -1 & \text{wenn } y < 0 \\ 0 & \text{wenn } y = 0 \end{cases} \quad (4.34)$$

Die generalisierten Geschwindigkeiten ergeben sich zu

$$v_{(i)} = \begin{cases} \dot{x}_{(i)} & \text{für } i = 1 \dots 3 \\ \omega_{(i-3)} & \text{für } i = 4 \dots 6 \end{cases} \quad (4.35)$$

Die Dämpfungskraft wird durch die Dämpfungskonstante α , mit dem Ausgangswert 0,7 gesteuert; die Dämpfungskonstante kann für jedes einzelne Partikel individuell gesetzt werden.

Bei dieser Art der Dämpfung sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Nur eine beschleunigte Bewegung wird gedämpft; d.h. es gibt keine Dämpfung bei einem stationären Zustand.
- Die Dämpfungskonstante α ist dimensionslos.
- Die Dämpfung ist frequenzunabhängig, daher werden alle Bereiche der Partikelansammlung mit unterschiedlichen Eigenschwingungen gleich gedämpft, sofern sie dieselbe Dämpfungskonstante α haben.

Bei dieser Dämpfung ist der Energieverlust je Zyklus unabhängig vom Zeitschritt, mit dem der Zyklus ausgeführt wird. Es ist wichtig, dass die Dämpfungskraft immer entgegengesetzt zur Bewegung gerichtet ist. Sie ergibt sich aus den angreifenden Kräften, im Gegensatz zu einer viskosen Dämpfung, die von der Größe der Geschwindigkeit abhängt.

4.7 Kontaktermittlung

Im Laufe einer Berechnung werden in PFC ständig Kontakte neu gebildet und wieder gelöst. Eine Überprüfung aller möglichen Kontakt-Kombinationen ist nicht sinnvoll, da die Rechenzeit für die Überprüfung aller Kontakte mit der Anzahl der zu überprüfenden Elemente quadratisch steigt.

Daher ist nun eine robuste und effiziente Technik zur Identifizierung von in Kontakt befindlichen Elementen notwendig (Cundall, 1988). Im Folgenden wird das in PFC verwendete Verfahren für den dreidimensionalen Fall beschrieben. Für den zweidimensionalen Fall ist das Verfahren sinngemäß anzuwenden.

Das System bzw. der Raum, der die Elemente (Partikeln, Wände) beinhaltet, wird in rechtwinkelige dreidimensionale „Zellen“ eingeteilt. Jedes Element (Partikel oder Wand) besitzt einen kleinsten umhüllenden Raum. Dieser das Element umhüllende Raum („envelope space“) ist definiert als der kleinste rechtwinkelige dreidimensionale Raum der das Element einschließt und dessen Kanten parallel zu den Koordinatenachsen verlaufen. Abbildung 4.10 zeigt für den ebenen Fall die Zuordnung der Elemente zu den Zellen.

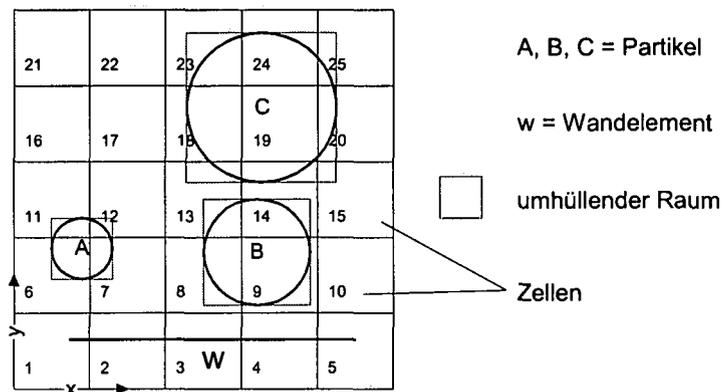


Abbildung 4.10: Beispiel für die Zuordnung der Elemente zu den „Zellen“ für den ebenen Fall.

Für jede Zelle wird eine Liste der zugewiesenen Elemente erstellt. Sind alle Elemente den entsprechenden Zellen zugeordnet, ist es einfach, die Nachbarn eines gegebenen Elementes zu identifizieren, da in den Listen der jeweiligen Zellen alle Nachbarn bereits gespeichert sind.

Die Berechnungszeit für die Zellenzuordnung und die Suchfunktion für die Nachbarelemente sind in erster Linie von der Größe der Elemente und ihrer Verteilung im Raum abhängig und nicht von der Elementanzahl im System. Die Berechnungszeit für die Kontaktermittlung des ganzen Systems ist dann direkt proportional zur Elementanzahl, wenn das Zellvolumen proportional zum durchschnittlichen Elementvolumen ist.

Es ist schwierig, eine Formel für die optimale Zellengröße anzugeben. Denn mit Erhöhung der Zellenanzahl erhöht sich auch die Berechnungszeit für die Zellenzuordnung und die Suchfunktion für die Nachbarelemente. Daher ist die optimale Zelldichte in etwa eine Zelle pro Element.

Bei der Bewegung der Partikel wird die Zuordnung zu den Zellen ständig kontrolliert / aktualisiert, und es wird nach neuen Kontakten zu den Nachbarn gesucht. Jedes Mal, wenn mindestens ein Partikel den zugeordneten Zellenraum verlässt, muss die Zelleneinteilung und Zellenzuordnung neu erfolgen. Der Vorgang der Zelleneinteilung und der Zellenzuordnung der Elemente zu den Zellen ist sehr zeitaufwendig und kann die Berechnung sehr verlangsamen.

Dieser Vorgang der Zelleneinteilung und Zellenzuordnung wird durch die Überschreitung der aufsummierten Bewegungen eines Elementes ausgelöst. Die Variable u_i^{acc} wird nach der neuen Zelleneinteilung wieder auf Null gesetzt und in jedem Zeitschritt nach Gl. (4.36) aktualisiert.

$$u_i^{acc} \leftarrow u_i^{acc} + du_i \quad (4.36)$$

Die Variable du_i ist dabei das Inkrement der Verschiebung des Elementes. Ist also bei einem Element die Verschiebung u_i^{acc} größer als die vordefinierte Toleranz CTOL, wird eine neue Zelleneinteilung und Zellenzuordnung aktiviert, wobei die neue Zellengröße um 10 % in Richtung der größten Verschiebung vergrößert wird.

Die Kontaktüberprüfung wird für ein Suchvolumen durchgeführt, das um $2\sqrt{3} \times CTOL$ größer ist als der das Element umhüllende Raum, um einerseits die größtmögliche Bewegung des Elementes zuzulassen und um andererseits alle möglichen Nachbarelemente zu berücksichtigen. Ist der Abstand zwischen zwei Elementen kleiner oder gleich CTOL, dann wird ein Kontakt gebildet. Ist der Abstand größer als CTOL, wird der Kontakt gelöst.

Es ist sinnvoll, bei Systemen, in denen große Partikelbewegungen zu erwarten sind, die Zelleneinteilung zu vornherein zu beeinflussen. Dies ist möglich, indem man an den Ecken eines Modells Partikel erzeugt, fixiert, die dann an der Berechnung nicht teilnehmen. Die Beeinflussung der Zelleneinteilung bewirkt eine Reduktion der Berechnungszeit in dem in Abbildung 4.11 angegebenen Beispiel bis zu 30 %.

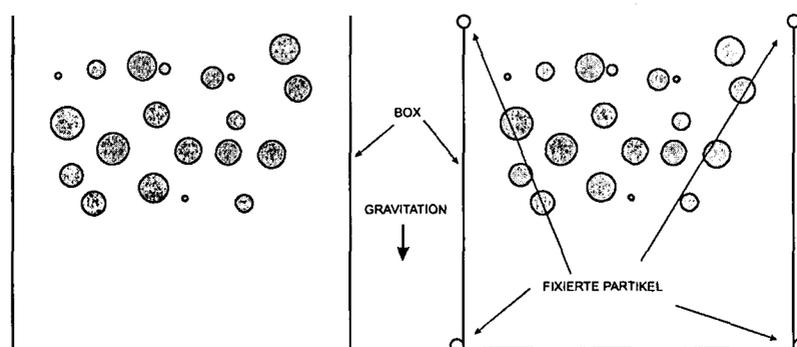


Abbildung 4.11: Modellierung der Ränder aus Wandelementen und fixierten Partikeln beeinflusst die Zelleneinteilung und damit die Berechnungszeit.

5 Modellierung eines Felsmassensturzes mittels PFC

In PFC gibt es grundsätzlich zwei Methoden einen Felsmassensturz bzw. die Ausbreitung eines Felsmassensturzes (runout) zu simulieren:

- 1) Die erste Methode, einen Felsmassensturz mittels PFC zu simulieren, besteht darin, die gesamte Flanke aus Partikeln zu modellieren (Abbildung 5.1).

Mittels der Partikelbindungen wird zuerst das Versagen bzw. die Ablösung der bewegten Masse und anschließend der Massensturz modelliert (Preh, 2003). Diese Methode hat allerdings den Nachteil, dass für die Modellierung der gesamten Flanke eine große Anzahl von Partikeln erforderlich ist bzw. die Partikel relativ groß sein müssen, damit die Software- und die Rechnerkapazität nicht überschritten werden.

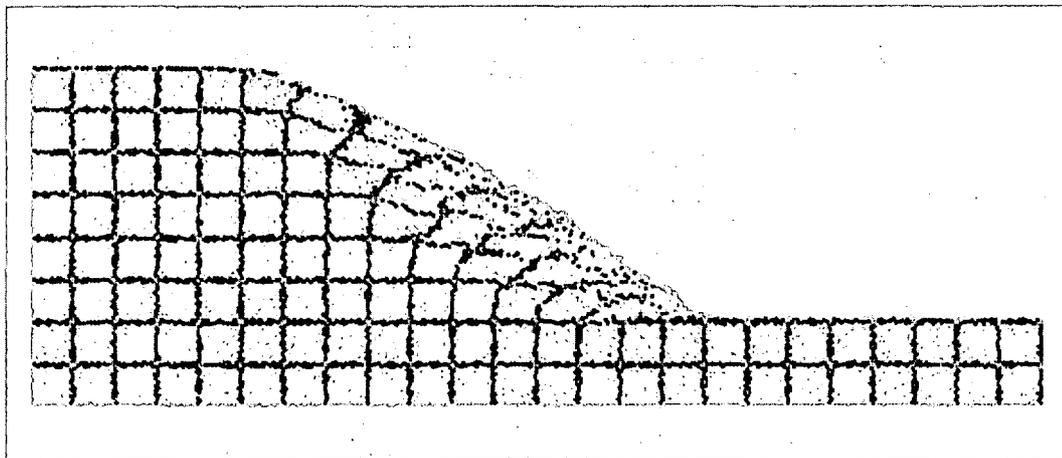


Abbildung 5.1: Aufbau eines Hanges mittels Partikeln in PFC^{2D} (instabiler Zustand), (Itasca, 1999c).

- 2) Die zweite Methode, einen Felsmassensturz mittels PFC zu simulieren, besteht darin, die Geländeoberfläche und die Ablöseflächen mit Wandelementen und nur die Sturzmasse aus Partikeln zu generieren (Abbildung 5.2). Diese Methode hat den Nachteil, dass der Versagensmechanismus und die Geometrie der sich ablösenden Masse bekannt sein müssen oder mittels anderer Verfahren (wie z.B. FLAC^{3D}) berechnet werden müssen.

Vorteil dieser Methode besteht jedoch darin, dass das PFC-Modell für den Fall, dass nur der Absturz einzelner, unzerbrechlicher Sturzblöcke betrachtet wird, mit konventionellen Steinschlagsimulationsprogrammen hinsichtlich der Methodik

vergleichbar ist und dadurch die Möglichkeit einer Kalibrierung bietet. Ein weiterer Vorteil ist, dass nur die Sturzmasse aus Partikeln aufgebaut wird. Daher steht für die Modellierung der Sturzmasse eine Maximalanzahl von Partikeln zur Verfügung und daher kann deren Bewegung genauer untersucht werden. Auf diese zweite Methode wird im Folgenden näher eingegangen.

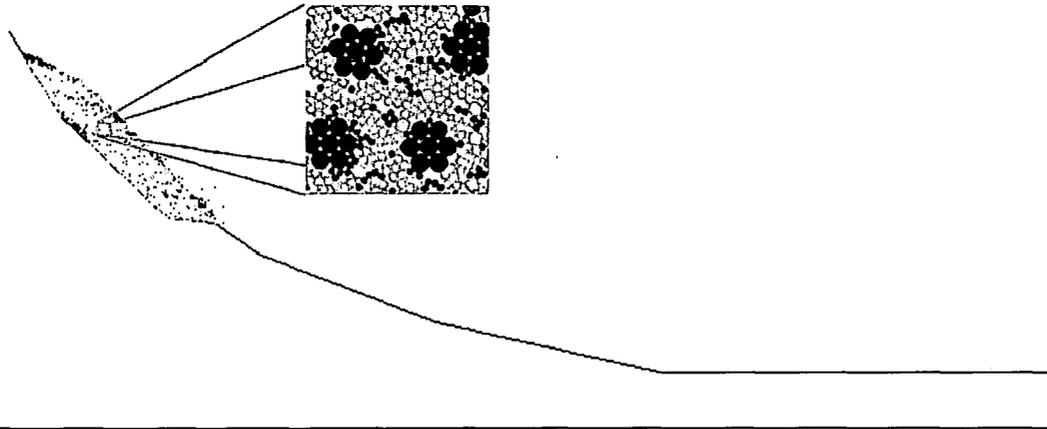


Abbildung 5.2: Aufbau eines Hanges mittels Wand-Elementen in PFC^{2D}, Sturzmasse aus Partikeln.

Bei einem Sturzprozess eines Einzelblockes werden die folgenden Bewegungsarten unterschieden:

- Freier Fall – eine senkrechte zum Erdmittelpunkt zeigende Bewegung
- Springen – in Form einer Wurfparabel
- Gleiten
- Rollen

Die Bewegungsarten Springen, Gleiten und Rollen beruhen auf einer Interaktion zwischen dem Sturzblock und der Geländeoberfläche. Im Fall eines Felsmassensturzes, bei dem es zum Absturz einer größeren Felsmasse kommt, wird zusätzlich eine Interaktion zwischen den Blöcken angenommen. Eine solche Interaktion zwischen den Blöcken wird auch von Heim (1932) bei der Beschreibung eines Trümmerstromes angenommen. Auch beim Absturz kleinerer Felsmassen wird die Interaktion zwischen den Sturzblöcken berücksichtigt – im

Unterschied zur allgemeinen Definition eines Felssturzes, bei der kaum eine bis keine Interaktion zwischen den Sturzblöcken angenommen wird (Kienholz et al., 1998). Mithilfe des diskontinuumsmechanischen Programms PFC können diese Interaktion zwischen den einzelnen Partikeln und zwischen den Partikeln und der Geländeoberfläche berücksichtigt werden. Durch die mathematische Formulierung der Bewegungs- und Kontaktgesetze ist natürlich auch die Modellierung der Bewegungsarten Fallen, Springen, Gleiten und Rollen möglich.

Für eine realistische Modellierung eines Felsmassensturzes in Form einer raschen, sturzartigen Bewegung mittels PFC sind allerdings einige Adaptierungen des Berechnungsablaufes notwendig.

Diese Adaptionen wurden mithilfe von FISH-Programmrouinen umgesetzt. FISH ist die in PFC implementierte Programmiersprache. Die ermöglicht dem Benutzer, Variable und Funktionen zu definieren. Diese Funktionen können verwendet werden, um benutzerspezifische Charakteristika zu implementieren. Mittels FISH können die Eigenschaften jedes Partikels und jedes Kontaktes zu jedem Zeitpunkt der Berechnung ausgelesen, verändert und wieder eingelesen werden. Durch die Implementierung der FISH-Programmrouinen ergibt sich jedoch eine deutliche Verlängerung der Berechnungszeit. Eine zweite Möglichkeit, die Adaptierungen durchzuführen, besteht mittels der in PFC ebenfalls zur Verfügung gestellten C⁺⁺ Schnittstelle. Ab der PFC^{2D} und PFC^{3D} Version 3.0, die derzeit in einer Beta-Version zur Verfügung stehen, ist es nun auch möglich, bei der Programmierung mittels C⁺⁺ auf die gleichen Variablen und Funktionen wie bei der FISH-Programmierung zuzugreifen. Der Vorteil der C⁺⁺ Schnittstelle liegt darin, dass die Änderungen direkt in den PFC Code geschrieben werden und sich dadurch eine Beschleunigung der Rechenzeit gegenüber der FISH- Programmierung ergibt. Die Konvertierung der im Folgenden beschriebenen Adaptierungen von FISH in C⁺⁺ wurde in einem ersten Schritt durchgeführt, konnte aber für die nachfolgenden Tests und Berechnungen noch nicht herangezogen werden.

5.1 Adaptierungen

Die im Folgenden beschriebenen Adaptierungen des PFC-Codes wurden sowohl im zweidimensionalen Fall als auch im räumlichen Fall durchgeführt.

PFC ermittelt den Bewegungszustand und die Interaktion zwischen den Elementen mithilfe der Distinkten Elemente Methode (DEM). Die Lösung der Bewegungsgleichungen erfolgt nach dem expliziten Finite Differenzen Verfahren. Dabei werden die Bewegungsgleichungen numerisch über die Zeit integriert, und alle bewegungshemmenden Faktoren werden durch Dämpfungs- (nichtviskose Dämpfung) und Reibungskräfte berücksichtigt.

$$F_i = m(a_i - g_i) \quad (5.1)$$

$$M_i = I\dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{5}mR^2\right)\dot{\omega}_i \quad (5.2)$$

$$F_i - \alpha F_i \text{sign}(v_i) = m(a_i - g_i) \quad \dots \text{ translatorische Bewegungsgleichung} \quad (5.3)$$

$$M_i - \alpha M_i \text{sign}(\omega_i) = I\dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{5}mR^2\right)\dot{\omega}_i \quad \dots \text{ rotatorische Bewegungsgleichung} \quad (5.4)$$

F_i ... resultierende Kräfte

m ... Masse

a_i ... Beschleunigung

M_i ... resultierende Momente

I ... Massenträgheitsmoment

$\dot{\omega}_i$... Winkelbeschleunigung

R ... Partikelradius

$$-\alpha |F_{(i)}| \text{sign}(v_{(i)}); \quad i = 1 \dots 6 \quad \dots \text{ generalisierte Dämpfungskräfte} \quad (5.5)$$

$$\text{sign}(v) = \begin{cases} +1 & \text{für } v > 0 \\ -1 & \text{für } v < 0 \\ 0 & \text{für } v = 0 \end{cases}$$

$$v_{(i)} = \begin{cases} \dot{x}_{(i)}, & i = 1 \dots 3 \\ \omega_{(i-3)}, & i = 4 \dots 6 \end{cases}$$

$v_{(i)}$... generalisierte Geschwindigkeiten

$\dot{x}_{(i)}$... Translationsgeschwindigkeiten

$\omega_{(i-3)}$... Winkelgeschwindigkeiten

Die Größe der Dämpfungskraft für diese nichtviskose Dämpfung wird dabei durch die Dämpfungskonstante α bestimmt und kann für jedes einzelne Partikel angegeben werden. Als Default - Wert wird die Dämpfungskonstante vom Programm unabhängig von der Art der Berechnung automatisch auf 0,7 gesetzt. Dieser Wert ist nur für statische Berechnungen geeignet, für dynamische Berechnungen muss der Wert entsprechend variiert werden.

Freier Fall

Bei der nichtviskosen Dämpfung wird in jedem Berechnungsschritt unabhängig von der Kontaktart (Partikel-Partikel, Partikel-Wand, kein Kontakt) nur eine beschleunigte Bewegung gedämpft.

Befindet sich ein Partikel im freien Fall, wird also für das Partikel kein Kontakt identifiziert, so muss die lokale nichtviskose Dämpfung auf 0 reduziert werden, um eine nahezu gleichförmig beschleunigte Bewegung zu erreichen.

Springen

Um das Sprungverhalten sowie den Geschwindigkeitsverlauf eines Partikels zufolge eines Partikel-Wand-Kontaktes aufzuzeigen, wurden Aufschlagtests auf eine horizontale Fläche durchgeführt. Bei Verwendung der Dämpfungskonstanten $\alpha = 0,7$ (d.h. es wird beim Partikel-Wand-Kontakt der Dämpfungskonstanten der nichtviskose Dämpfungsfaktor $wcont = 0,7$ zugewiesen) springt das Partikel kaum von der Wand ab. Bei einer Verringerung der nichtviskosen Dämpfung steigt die Sprunghöhe und damit die Anzahl der Aufschläge. Es ist jedoch nicht möglich, mit dieser Art der Dämpfung z.B. bei gleicher Anzahl von Aufschlägen eine größere Reduktion der Geschwindigkeit zu erreichen. Daher wird zusätzlich eine viskose Dämpfung eingeführt.

Dabei wird beim Aufprall eines Partikels auf ein Wandelement eine Reduktion der Geschwindigkeit in normaler und tangentialer Richtung mittels Verwendung von tangentialen und normalen Dämpfungsfaktoren durchgeführt, wie sie auch bei Steinschlagsimulationsprogrammen verwendet werden. Die Geschwindigkeit (v_{N0}) des Partikels mit dem Radius r und der Masse m vor dem Aufprall in Richtung der Wandnormalen bei Identifizierung eines Kontaktes wird direkt mittels des normalen Dämpfungsfaktors R_N abgemindert.

$$v_{N1} = R_N v_{N0} \quad (5.6)$$

Die Geschwindigkeit tangential zum Wandelement (v_{T1}) sowie die Rotationsgeschwindigkeit (ω_1) nach dem Aufprall ergeben sich mittels energetischer Betrachtung mithilfe der tangentialen (R_T) und der normalen (R_N) Dämpfungsfaktoren (= „Restitutionskoeffizienten“) und unter Verwendung der empirisch ermittelten Beziehung von Pfeiffer & Bowen (1989) zu:

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{r^2 [I(\omega_0)^2 + m(v_{T0})^2] \cdot F_1 F_2}{I + m \cdot r^2}} \quad (5.7)$$

$$\omega_1 = \frac{v_{T1}}{r} \quad (5.8)$$

mit

$$F_1 = R_T + \frac{(1 - R_T)}{\left(\frac{(v_{T0} - \omega_0 \cdot r)}{C_{F1}}\right)^2 + 1,2} \quad (5.9)$$

$$F_2 = \frac{R_T}{\left(\frac{v_{N0}}{C_{F2} \cdot R_N}\right)^2 + 1,0} \quad (5.10)$$

Dabei sind die empirisch ermittelten Konstanten $C_{F1} = 6,096$ m/s (20ft/s) und $C_{F2} = 76,2$ m/s (250ft/s). Nach der Rücktransformation der abgeminderten lokalen Geschwindigkeit nach dem Aufprall (v_{N1} , v_{T1}) auf ein globales Koordinatensystem erfolgt der nächste Berechnungsschritt.

Der Sprungverlauf wird somit bei einem Partikel-Wand-Kontakt über die (lokale) nichtviskose Dämpfung mittels der Variablen $wcont$ und über die viskose Dämpfung mittels den Variablen R_T und R_N („Restitutionskoeffizienten“) gesteuert. Abbildung 5.3 zeigt das

Berechnungsschema der Adaptionen. Die viskose Dämpfung erfolgt nach diesem Schema nur im ersten Berechnungsschritt nach der Kontaktidentifizierung. Im zweiten Berechnungsschritt nach der Kontaktidentifizierung wird die Geschwindigkeit des Partikels ohne Verwendung der viskosen Dämpfung ermittelt. Die nichtviskose Dämpfung, die bei der Kontaktidentifizierung bei einem Partikel-Partikel-Kontakt über die Variable $bcont$, und bei einem Partikel-Wand-Kontakt über die Variable $wcont$ gesetzt wird, bleibt jedoch auch in den nachfolgenden Berechnungsschritten bis zur Identifizierung eines neuen Kontaktes auf den jeweiligen Wert gesetzt.

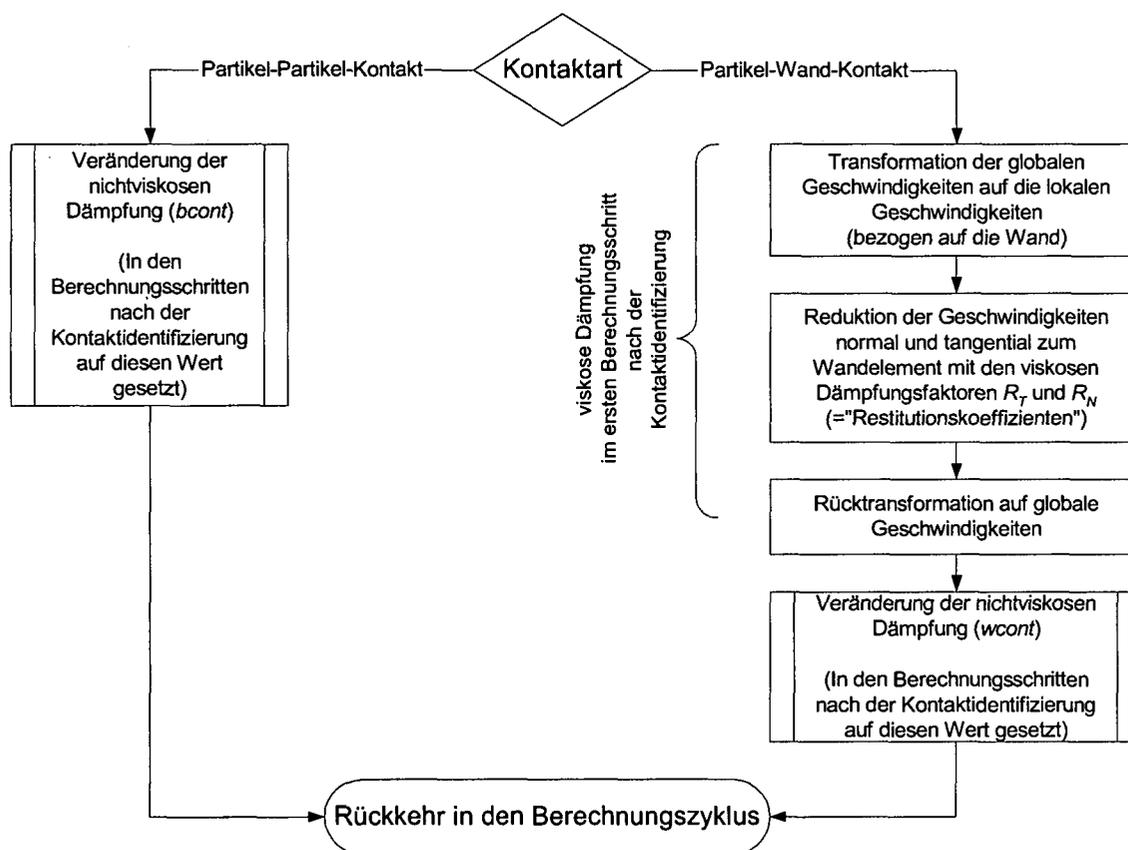


Abbildung 5.3: Berechnungsschema der Adaptionen für die Felsmassensturzberechnung.

Die zuvor beschriebene Dämpfungsroutine wurde ebenfalls in PFC^{3D} implementiert. Da man zum Zeitpunkt des Aufpralles des Partikels auf ein Wandelement in PFC^{3D} keinen direkten Zugriff auf die Wandebene hat, musste die Normale auf das Wandelement mithilfe des Ballmittelpunktes und des Kontaktpunktes ermittelt werden. Das lokale Koordinatensystem ist dann durch die Streichrichtung, den Fallvektor und durch den Normalvektor auf die

Ebene ε , wie in Abbildung 5.4 dargestellt, gegeben. Die tangentielle viskose Dämpfung erfolgt dann für die maximale Geschwindigkeit, die in der lokalen Ebene ε wirkt.

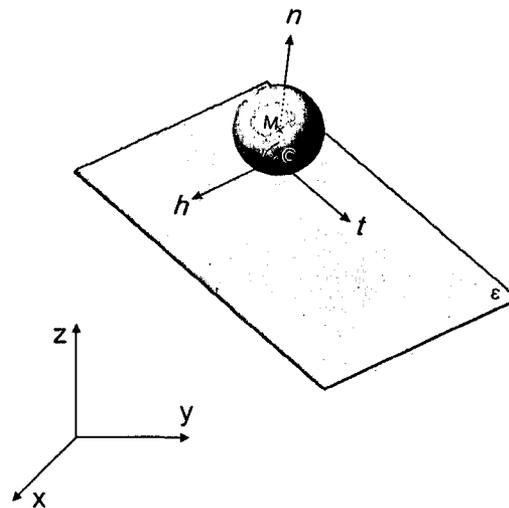


Abbildung 5.4: Bestimmung eines räumlichen lokalen Koordinatensystems (h, t, n) beim Aufprall des Partikels auf das Wandelement.

Gleiten

Ausschließlich für die Bewegungsart Gleiten mussten keine Adaptierungen des PFC-Codes durchgeführt werden. Eine Unterscheidung des Bewegungszustandes in Gleiten und Rollen (wie bei Steinschlagsimulationsprogrammen) ist bei PFC nicht erforderlich. Das Gleiten eines Partikels über ein Wandelement wird über das in PFC vorhandene Gleitmodell gesteuert, das eine immanente Eigenschaft zweier in Kontakt befindlicher Elemente ist. Das Gleitmodell wird durch den Reibungskoeffizienten μ [dimensionslos] beschrieben, wobei der kleinere der beiden Reibungskoeffizienten der in Kontakt befindlichen Elemente verwendet wird. Der Kontakt wird auf Gleiten überprüft, und es wird die maximal zulässige Scherkraft

$$F_{\max}^S = \mu |F_i^N|$$

ermittelt.

Ist $|F_i^S| > F_{\max}^S$, dann ist Gleiten während des nächsten Rechenschrittes zulässig, und F_i^S wird beschränkt auf F_{\max}^S .

$$F_i^S \leftarrow F_i^S \left(\frac{F_{\max}^S}{|F_i^S|} \right).$$

Rollen

In PFC muss nicht wie in Steinschlagsimulationsprogrammen der Bewegungsmodus bestimmt werden, sondern es wird die Kontaktart ermittelt, und danach werden die Partikel beeinflusst. Bei einem Ball-Wand-Kontakt wird daher neben den horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitsanteilen auch die Rotationsgeschwindigkeit abgemindert und zwar unter Verwendung der Bedingung für reines Rollen und der - durch die Verwendung der tangentialen und normalen Dämpfungsfaktoren abgeminderten - Tangentialgeschwindigkeit des Partikels im Kontaktpunkt.

Zur Modellierung eines Sturzblockes kann entweder ein einzelnes Partikel oder eine Partikelansammlung, ein sogenannter „Cluster“, verwendet werden. Dabei werden die einzelnen Partikel des Clusters mittels Parallelbindung miteinander verbunden. Zufolge eines Aufpralls auf ein Wandelement wird nur die Geschwindigkeit jenes Balles verringert (gedämpft), der in Kontakt mit der Wand steht. Es wird jedoch nicht die Geschwindigkeit des ganzen Blockes reduziert. Dadurch ergeben sich innerhalb des Blockes Spannungen, die die Bindungsfestigkeit übersteigen, das heißt, den Block zerbrechen lassen können. Durch die kantige Form eines solchen Clusters ist auch automatisch ein Rollwiderstand und damit eine Rollreibung gegeben.

Im Fall eines Partikels erfolgt die Dämpfung der Rotation des Partikels durch die eingeführte viskose Dämpfung nur im ersten Berechnungsschritt der Kontaktbildung. Die nachfolgenden Berechnungsschritte werden als ganz normaler Kontakt betrachtet und dabei nur über die nichtviskose Dämpfung gedämpft. Eine Dämpfung des Ballaufpralls bzw. die Steuerung des Rollens des Balles über das Wandelement erfolgt in den Berechnungsschritten nach der Kontaktidentifizierung nur noch über die nichtviskose Dämpfung.

Wie sich in den Variationsrechnungen in Kapitel 5.4.2 zeigt, sind die Reichweiten zufolge Rollens speziell von kugelförmigen Partikeln mit einem großen Volumen zu groß. Daher ist es notwendig, zusätzlich eine Rotationsdämpfung einzuführen. Diese viskose Rotationsdämpfung wurde in PFC^{3D} implementiert und reduziert die Winkelgeschwindigkeit eines Partikels, das sich in Kontakt mit einem Wandelement befindet, mit dem Dämpfungsfaktor $damp_r$. Abbildung 5.5 zeigt exemplarisch die Reichweitenänderung eines rollenden Balles mit dem Radius $r = 0,5 \text{ m}$ und einer Dichte von 2700 kg/m^3 auf einer horizontalen Ebene durch die Verwendung des Rotationsdämpfungsfaktors.

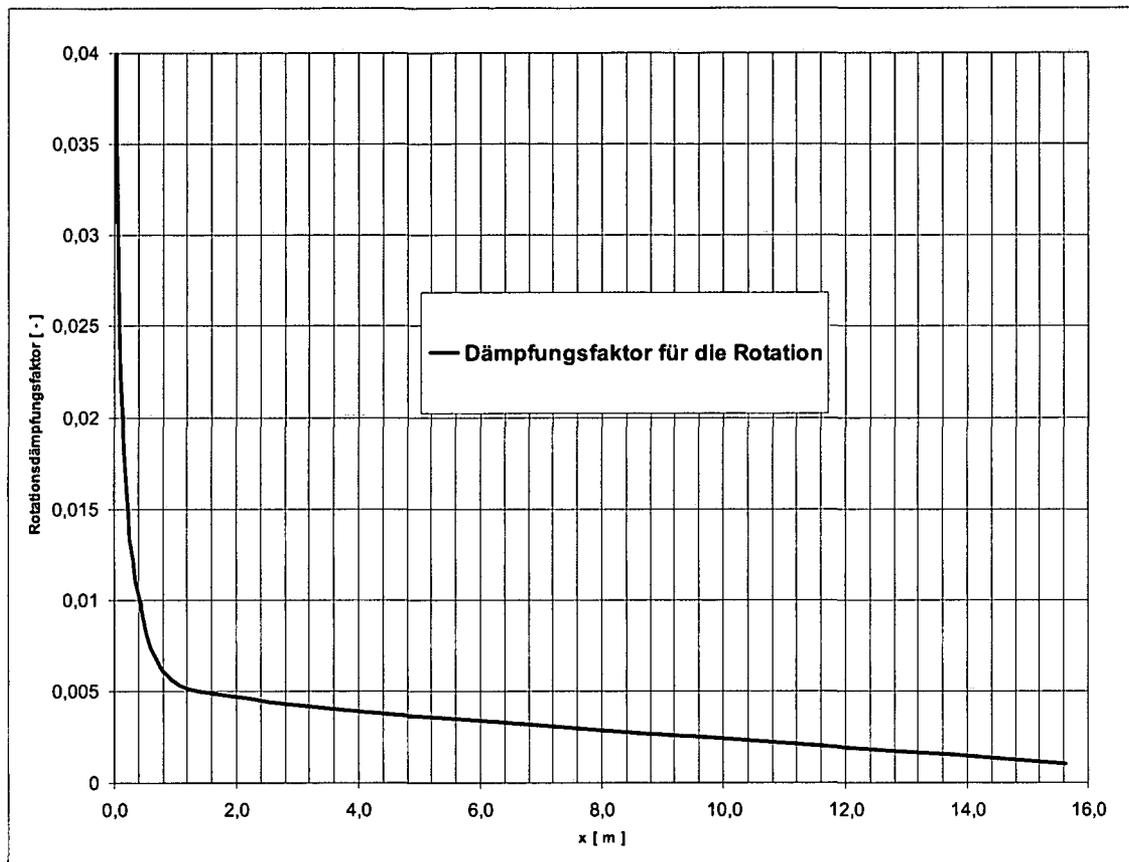


Abbildung 5.5: Reichweitenänderung eines rollenden Balles auf einer horizontalen Ebene durch den eingeführten Rotationsdämpfungsfaktor ($damp_r$).

5.2 Dämpfungsfaktoren und Mikroparameter

Die eingeführten Dämpfungsfaktoren und die vorhandenen Materialparameter können, bezogen auf die Modellierung eines Felsmassensturzes, in zwei Arten eingeteilt werden:

- 1) Parameter zur Modellierung des Verhaltens zwischen der Sturzmasse und der Geländeoberfläche.

R_N - Normaler viskoser Dämpfungsfaktor = normale Restitutionskoeffizienten

R_T - Tangentialer viskoser Dämpfungsfaktor = tangentialer Restitutionskoeffizient

$wcont$ - Nichtviskoser Dämpfungsfaktor (Ball-Wand-Kontakt)

φ_{wall} - Wandreibungswinkel

$damp_r$ - Rotationsdämpfungsfaktor (in PFC^{3D})

- 2) Parameter zur Modellierung des Verhaltens der Sturzmasse, der Modellierung der Sturzblockeigenschaften und damit zur Modellierung des Strömens.

<i>bcont</i>	- Nichtviskoser Dämpfungsfaktor (Ball-Ball-Kontakt)
φ_{ball}	- Ballreibungswinkel
<i>pb_n/s</i>	- Bindungsfestigkeiten
<i>clball</i>	- Blockform, Cluster

5.3 Numerische Aufschlagtests

Um die Auswirkungen der eingeführten Dämpfungsfaktoren zu analysieren, wurden numerische Aufschlagtests durchgeführt.

Dabei wurde das Sprungverhalten sowie der Geschwindigkeitsverlauf eines kugelförmigen Partikels zufolge eines Aufschlags auf eine horizontale Fläche betrachtet. Es zeigte sich, dass bei alleiniger Verwendung der nichtviskosen Dämpfungskonstanten $\alpha = 0,7$ das Partikel kaum von der Wand abspringt (Abbildung 5.6a).

Bei einer Verringerung der nichtviskosen Dämpfung stieg die Sprunghöhe und damit die Anzahl der Aufschläge.

Bei alleiniger Verwendung der nichtviskosen Dämpfung ist es jedoch nicht möglich, z.B. bei einer gleichen Anzahl von Aufschlägen, eine Reduktion der Geschwindigkeit und der Sprunghöhe zu erreichen. Durch die eingeführte viskose Dämpfung erfolgt beim Aufprall eines Partikels auf ein Wandelement eine Reduktion der Geschwindigkeit in normaler und tangentialer Richtung mittels Verwendung von tangentialen und normalen Dämpfungsfaktoren.

Für die Steuerung des Sprungverlaufes wirken somit bei einem Partikel-Wand-Kontakt die nichtviskose Dämpfung (*wcont*) und die viskose Dämpfung (mit den Restitutionskoeffizienten R_N und R_T). Abbildung 5.6b zeigt den Sprunghöhen- sowie den Geschwindigkeitsverlauf bei einer nichtviskosen Dämpfung (*wcont* = 0,1) und einer viskosen Dämpfung ($R_N = 0,5$). Im Vergleich dazu springt das Partikel bei alleiniger Verwendung der nichtviskosen Dämpfung (0,7) kaum von der Wand ab (Abbildung 5.6a). Je nach Untergrund kann damit ein realistischer Sprungverlauf modelliert werden. Bei einem felsigen Untergrund ist demzufolge

ein Wert für w_{cont} von 0,08-0,15, und bei einem bewachsenem Untergrund ein Wert für w_{cont} von 0,15-0,3 zu verwenden.

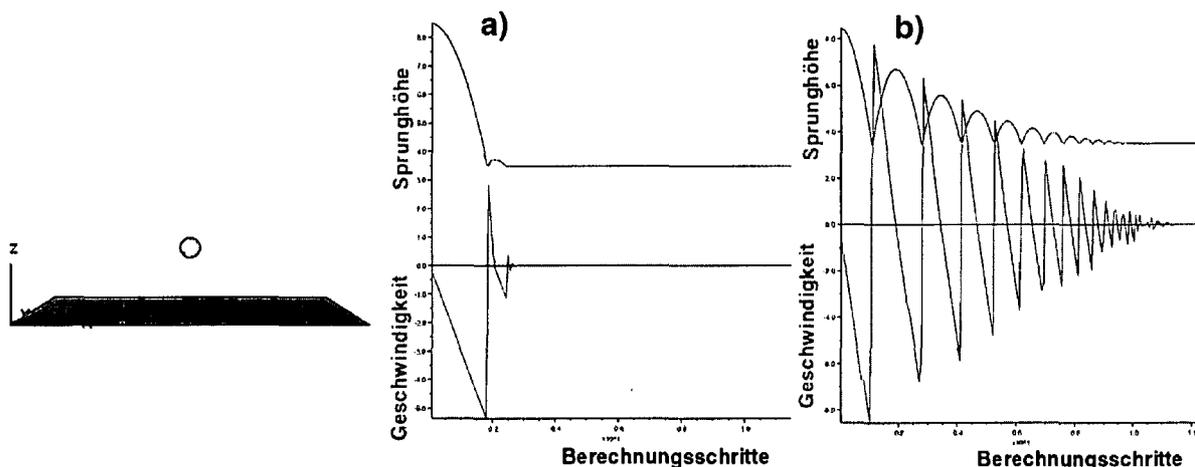


Abbildung 5.6: Geschwindigkeits- und Sprunghöhenverlauf bei einem Partikel-Wand-Kontakt, bei a) der alleinigen nichtviskosen Dämpfung $w_{cont} = \alpha = 0,7$, und bei b) einer nichtviskosen Dämpfung $w_{cont} = 0,1$ und einer zusätzlichen viskosen Dämpfung $R_N = 0,5$.

5.4 Vergleich von PFC mit einem Steinschlagsimulationsprogramm

5.4.1 RocFall

Das Programm RocFall 4.0 ist ein kommerzielles Steinschlagsimulationsprogramm der Firma Rocscience. Der in diesem Programm verwendete Algorithmus wurde ursprünglich von Hoek (1987) entwickelt und wurde von Stevens (1998) erweitert.

Das Programm ist ein zweidimensionales Punktmassenmodell, in dem die Bewegungsarten „Springen“ mit einer parabolischen Flugbahn, „Gleiten“ und „Hinaufgleiten“ erlaubt sind. Beim Springen und Gleiten werden in diesem Modell die Größe und die Form der Sturzblöcke nicht berücksichtigt. Der Sturzblock wird in der Berechnung als Punkt mit einer Masse betrachtet. Während des Sturzprozesses verändert sich diese Masse nicht. Das bedeutet jedoch, dass der Block zufolge eines Aufpralles auf die Geländeoberfläche nicht in kleinere Teile zerbrechen kann. Bei diesem Programm wird der Luftwiderstand in den verwendeten Gleichungen nicht berücksichtigt. Die Rotation des Sturzblockes wird durch die Einführung einer Dämpfungsfunktion, in die die Körperausmaße des Sturzblockes einfließen, erfasst. Die

Sturzblockausmaße werden jedoch nur beim Aufprall des Blockes auf die Geländeoberfläche berücksichtigt.

Die Geländeoberfläche wird in diesem Modell durch Liniensegmente dargestellt, wobei die Liniensegmente an ihren Endpunkten miteinander verbunden sind. Jedoch können sich die Liniensegmente nicht kreuzen. Jedem Liniensegment können spezifische Oberflächeneigenschaften mit einer Standardabweichung, wie z. B. die normalen und tangentialen Dämpfungsfaktoren und der Reibungswinkel, zugewiesen werden. Für die Simulation eines Steinschlagprozesses werden mehrere einzelne Sturzblöcke nacheinander von einem definierbaren Auslösepunkt „hinuntergeworfen“. Bei der Ermittlung der Reichweite, des Energie- und des Geschwindigkeitsverlaufs erhält man somit eine Verteilung der Ergebnisse und damit eine bessere Bandbreite für die Abschätzung von gefährdeten Bereichen.

Der Bewegungsablauf kann auch bei überhängendem Gelände berechnet werden. Zusätzlich können auch Barrieren berücksichtigt werden.

5.4.2 Vergleich PFC - RocFall

Problemstellung

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, entsprechen die in PFC eingeführten Dämpfungsfaktoren beim Bewegungszustand „Springen“ jenen Dämpfungsfaktoren, wie sie in den Steinschlagsimulationsprogrammen verwendet werden. Daher wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt bezüglich der Geschwindigkeits- und Energieverläufe sowie der Flugbahnen in den verschiedenen Berechnungsmethoden. Anhand eines Beispiels - eines Hanges mit 60° Neigung, bei dem sich die Sturzblöcke hauptsächlich springend vorwärts bewegen - werden die Ergebnisse der Programme PFC^{2D}, PFC^{3D} und des Steinschlagsimulationsprogrammes RocFall 4.0 der Firma Rocscience diskutiert.

Die Geometrie des Hanges ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Fallhöhe in diesem Modell beträgt 188 m mit einer horizontalen Auslaufebene.

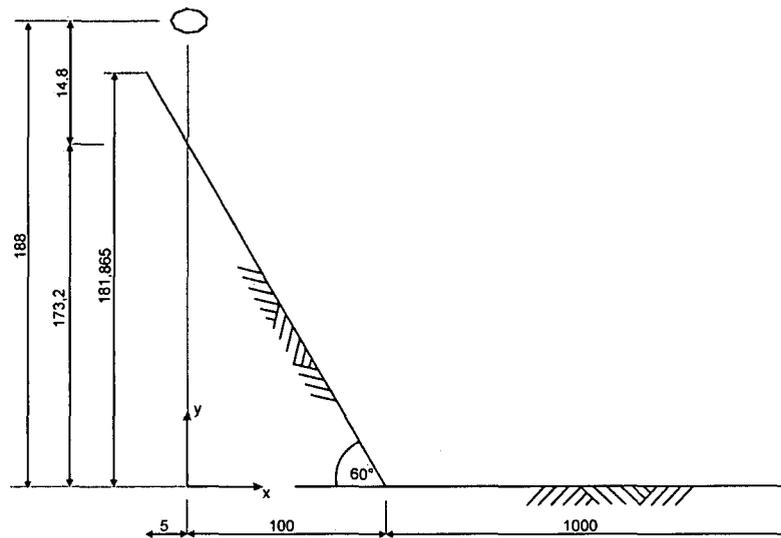


Abbildung 5.7: Geometrie des 60° Hanges für die Vergleichsrechnungen PFC und RocFall.

Die Vorgehensweise für die Sturzberechnung ist bei beiden Programmen ähnlich.

Die Geländeoberfläche, wie in Abbildung 5.7 dargestellt, wird mithilfe von Wandelementen generiert, und der Sturzblock wird am angegebenen Auslösepunkt positioniert. Danach erfolgt die Berechnung des Sturzprozesses. In RocFall besteht die Möglichkeit, mehrere Blöcke nacheinander vom angegebenen Auslösepunkt „hinunterzuwerfen“, wobei die Parameter statistisch variiert werden. Für die Vergleichsrechnungen wird jedoch jeweils nur ein Block geworfen, und es wird keine Standardabweichung der Eingangsparameter gesetzt.

Für einen Vergleich der beiden Programme werden die folgenden Eigenschaften variiert:

- Sturzblockmasse / Sturzblockgeometrie
- Oberflächeneigenschaften

Bezüglich der Variation der Sturzblockmasse und der Sturzblockgeometrie (Volumen) werden in PFC mehrere Varianten untersucht.

- In der ersten Variante ist der Sturzblock eine Kugel mit einem Radius R von 0,455 m, einer Masse von 1000 kg und einem Volumen von $0,37 \text{ m}^3$.
- In der zweiten Variante hat der kugelförmige Sturzblock einen Radius R von 5,21 m, eine Sturzmasse von 1.595.790 kg und ein Volumen von 591 m^3 . In den PFC^{2D} Berechnungen wurde anstelle des kugelförmigen Sturzblockes auch ein Cluster mit

einem Durchmesser von 10,4 m und einer Sturzblockmasse von 1,6e6 kg verwendet. Ein Cluster im Fall der PFC^{2D} Berechnung ist ein aus 7 Kugeln zusammengesetzter Sturzblock, die mittels Parallelbindung zusammengehalten werden.

- Die Größe und die Masse des Sturzblocks wurden dabei so gewählt, dass sie denen des größten Sturzblocks in der Berechnung des Frank Slide Bergsturzes entsprechen. Die gewählten Bindungsfestigkeiten für die Parallelbindungen sind in Tabelle 5.2 angegeben.

Zum Vergleich wurden zwei RocFall Berechnungen mit Sturzblockmassen von ebenfalls 1e3 kg und 1,6e6 kg durchgeführt. Eine Sturzblockgeometrie kann dabei jedoch nicht berücksichtigt werden, da die Sturzblöcke in der Berechnung nur als Massenpunkte betrachtet werden.

Für einen weiteren Vergleich wurden Sturzprozesse zwischen Extremwerten von normalen und tangentialen Dämpfungsfaktoren untersucht, nämlich zwischen einer felsigen Geländeoberfläche und einer bewachsenen Geländeoberfläche.

Dabei wurden sowohl in den PFC als auch in den RocFall Berechnungen die gleichen Werte für den Wandreibungswinkel sowie für die normalen und tangentialen Dämpfungsfaktoren verwendet (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: In den Vergleichsrechnungen in PFC und RocFall verwendete Parameter für die Wandelemente (Oberflächeneigenschaften).

Parameter	Beschreibung	Wert
Fels – felsige Oberfläche		
R_T	[-] Tangentialer Restitutionskoeffizient	0,99
R_N	[-] Normaler Restitutionskoeffizient	0,53
φ	[°] Wandreibungswinkel	30
Verwitterungsboden – bewachsene Oberfläche		
R_T	[-] Tangentialer Restitutionskoeffizient	0,8
R_N	[-] Normaler Restitutionskoeffizient	0,3
φ	[°] Wandreibungswinkel	30

Die in den PFC Berechnungen zusätzlich verwendeten Parameter für das Sturzmaterial, die in den Vergleichsrechnungen gesetzt wurden, sind in Tabelle 5.2 angegeben. Die Ball- und Wandsteifigkeiten wurden für die PFC Berechnungen über den Zusammenhang zwischen

Partikelradien und über einen Kontaktelastizitätsmodul abgeschätzt. Das bedeutet, dass die Kontaktsteifigkeiten mit dem Partikelradius steigen.

Tabelle 5.2: In den Vergleichsrechnungen in PFC verwendete Mikroparameter für das Sturzmaterial.

Parameter		Beschreibung	Wert
ρ	[kg/m ³]	Partikeldichte	2700
μ	[-]	Ballreibungskoeffizient	0,577
$b_{k_n} = b_{k_s}$	[Pa]	Normale, tangentielle Ballsteifigkeiten	1e8-5e9
$w_{k_n} = w_{k_s}$	[Pa]	Normale, tangentielle Wandsteifigkeiten	1e8-5e9
$pb_n = pb_s$	[N/m ²]	Parallele Bindungsfestigkeiten für zerbrechliche Blöcke unzerbrechliche Blöcke	2,00E+07 1,00E+09
\bar{R}	[m]	Bindungsradius	1,73

Im Folgenden werden die Ergebnisse der PFC und RocFall Berechnungen hinsichtlich

- der Reichweite,
- der kinetischen Energie,
- der Geschwindigkeit und der
- Bewegungsbahn

gegenübergestellt.

Reichweite

Wie zuvor beschrieben, wird in PFC die nichtviskose Dämpfung beim Aufprall eines Partikels auf ein Wanelement mit dem Parameter w_{cont} verändert. Der Parameter w_{cont} wurde variiert, und die Positionen des Endpunktes bei den einzelnen Berechnungen wurden miteinander verglichen.

Für die Berechnung der Reichweite des Sturzblocks in Form eines kugelförmigen Partikels mit dem Radius 0,4455 m und der Masse von 1e3 kg wurden die Ball- und Wandsteifigkeiten $kn=ks$ in PFC jeweils mit 1e8 Pa angesetzt. Die Ergebnisse der Reichweite für eine felsige Oberfläche und eine bewachsene Oberfläche (die Oberflächenparameter sind in Tabelle 5.1 angegeben), bei einer Variation der nichtviskosen Wanddämpfung $w_{cont} = 0,08 - 0,3$, sind in Tabelle 5.3 angegeben. Generell zeigt der Vergleich erwartungsgemäß, dass bei einer

Sturzblockmasse von $1e3$ kg die Reichweite der Sturzblöcke bei einer bewachsenen Oberfläche geringer ist als bei einer felsigen Oberfläche, und zwar um ca. 30-40 %,. Die Gegenüberstellung der PFC Ergebnisse für eine felsige Oberfläche zeigt, dass die Reichweiten der PFC^{3D} Berechnungen um ca. 10 % gegenüber der 2D-Berechnungen abweichen.

Die beste Übereinstimmung gegenüber der RocFall Berechnung ergab sich bei kleineren Werten der nichtviskosen Wanddämpfung ($wcont = 0,1$).

Bei bewachsenem Untergrund ergab die Gegenüberstellung der PFC Berechnungen, dass die Reichweite des Sturzblockes in der 3D-Berechnung bei niedrigen $wcont$ Werten (0,08-0,1) geringer ist als bei der PFC^{2D} Berechnung.

Bei größeren $wcont$ Werten (0,3) ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen allen drei Programmen.

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Reichweiten - Ergebnisse von PFC^{2D}, PFC^{3D} und RocFall bei einem Sturzblock mit einer Masse von 1000 kg.

Sturzmasse [1e3 kg] - Felsige Oberfläche			
Nichtviskose Wanddämpfung	Lage des Endpunktes [m]		
$wcont$	PFC ^{2D}	PFC ^{3D}	RocFall
0,08	312,8	279	
0,1	308,1	278,5	289,04
0,2	239,1	259,9	
0,3	216,6	192,8	
Sturzmasse [1e3 kg] - Bewachsene Oberfläche			
0,08	204	161,7	
0,1	176,4	149,3	
0,2	136,3	148,9	
0,3	128,7	129	128

In einer zweiten Variation wurde der Einfluss der Masse auf die Berechnung untersucht. Dazu wurde in der PFC^{2D} Berechnung ein Cluster, bestehend aus 7 Kugeln und mit einer Masse von $1,6e6$ kg verwendet. Dieser Cluster entspricht einer Kugel mit dem Radius 5,206 m, die in der PFC^{3D} Berechnung verwendet wurde. Die Ball- und Wandsteifigkeiten $kn = ks$ in den PFC Berechnungen wurden aufgrund des größeren Blockes in dieser Berechnung jeweils mit $2e9$ Pa angesetzt. Durch die Verwendung der Clusterform in PFC^{2D} wirkt jedoch indirekt eine Rollreibung, hervorgerufen durch den Bewegungsablauf des Clusters.

In PFC^{3D} wurden nur kugelförmige Partikel verwendet, bei denen keine Rollreibung wirkt. Um dennoch eine Gegenüberstellung zwischen Clustern in PFC^{2D} und Kugeln in PFC^{3D} zu ermöglichen, wurde eine Rotationsdämpfung in PFC^{3D} implementiert. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind zusammen mit denen der RocFall Berechnung vergleichend in Tabelle 5.4 dargestellt.

Generell kann man auch hier sehen, dass die Reichweite der Sturzblöcke bei einer bewachsenen Geländeoberfläche geringer ist als bei einem felsigen Untergrund. Dabei ergab sich eine Reduktion der Reichweite der Sturzblöcke auf bewachsenem Untergrund im Vergleich zu felsigem Untergrund von ca. 60 %. In PFC^{3D} wurde die Rotationsdämpfung für die bewachsene Geländeoberfläche entsprechend erhöht. Für die bewachsene Oberfläche wurde $damp_{r=}$ 0,006 und für die felsige Oberfläche wurde $damp_{r=}$ 0,0015 gewählt.

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung der Reichweiten - Ergebnisse von PFC^{2D}, PFC^{3D} und RocFall bei einem Sturzblock mit einer Masse von 1,6e6 kg auf felsiger und bewachsener Geländeoberfläche.

Sturzmasse [1,6e6 kg] - Felsige Oberfläche			
Nichtviskose Wanddämpfung	Lage des Endpunktes [m]		
<i>wcont</i>	PFC ^{2D}	PFC ^{3D}	RocFall
0,08	485	451,3	
0,1	416,6	441,6	
0,2	337,4	397,6	289,1
Sturzmasse [1,6e6 kg] - Bewachsene Oberfläche			
0,08	163,6	176,4	
0,1	158,6	174	
0,2	152,4	166,5	
0,3	151	159,5	128

Aus dem Vergleich zwischen den beiden PFC Berechnungen erkennt man, dass die mittels PFC^{2D} berechneten Reichweiten um ca. 10 % geringer sind, als die 3D- Berechnungen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der RocFall Berechnung zeigt, dass die nichtviskose Wanddämpfung $wcont \geq 0,3$ gesetzt werden muss.

Es ist zu beachten, dass bei der RocFall Berechnung die Größe der Masse keinen Einfluss auf die Reichweite des Sturzblockes hat. Beobachtungen in der Natur an Schutthalden zeigen jedoch, dass die größeren Blöcke immer weiter fahren als die kleineren Blöcke. Diese

Beobachtung in der Natur wird somit bei den PFC- Berechnungen realistisch wiedergegeben. Vergleicht man nämlich die PFC- Berechnungen so erkennt man, dass bei gleichen Dämpfungsparametern das größere Volumen eine größere Reichweite erzielt als das kleinere Absturzvolumen.

Generell kann somit festgestellt werden, dass die nichtviskose Dämpfung w_{cont} hinsichtlich der Reichweite für die Modellierung eines Steinschlages bei felsigem Untergrund mit Werten von 0,08-0,1 und bei bewachsenem Untergrund mit Werten $\geq 0,3$ angenommen werden soll. Dabei sind diese nichtviskosen Dämpfungswerte sowohl für PFC^{2D} als auch für PFC^{3D} gültig.

Kinetische Energie

Für die Beurteilung der kinetischen Energie kann bei einem Steinschlag einerseits der Energieverlauf - aufgetragen über die Zeit oder über den zurückgelegten Weg - und andererseits der Maximalwert der kinetischen Energie betrachtet werden.

Die Ergebnisse für die Maximalwerte der kinetischen Energie aus den PFC Berechnungen und der RocFall Berechnung für die beiden Volumina 0,37 m³ und 591 m³ und die zuvor in Tabelle 5.1 definierten Oberflächeneigenschaften sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

Bei einer Sturzmasse von 1e3 kg ergaben sich zufolge der unterschiedlichen nichtviskosen Dämpfungswerte, $w_{cont} = 0,08-0,3$, in den PFC Berechnungen Differenzen in den Maximalwerten der kinetischen Energie für einen felsigen Untergrund von bis zu 34 %.

Bei einem bewachsenen Untergrund ergeben sich sogar Energiedifferenzen bis zu 74 %.

Die Maximalwerte der kinetischen Energie sind bei den PFC^{2D} Berechnungen höher als bei den PFC^{3D} Berechnungen. Ein genauer Prozentsatz oder ein Zusammenhang konnte dabei nicht festgestellt werden.

Für den Felsblock mit 1,6e6 kg ergab sich bei den PFC Rechnungen keine Veränderung der Maximalwerte der kinetischen Energie zufolge der unterschiedlichen nichtviskosen Dämpfung. Allerdings sind die Maximalwerte der kinetischen Energie aus der 3D Rechnung um rund 13 % höher als die PFC^{2D} Werte. Die Maximalwerte der kinetischen Energie aus der RocFall Rechnung liegen für beide Massen über den Werten der PFC Berechnungen.

Eine mögliche Erklärung für die weit gestreuten Ergebnisse bei einer Sturzmasse von 1e3 kg und die eindeutigen Maximalwerte bei der Sturzmasse von 1,6e6 kg ist, dass der Einfluss der nichtviskosen Dämpfung mit zunehmender Masse sinkt und der Einfluss der viskosen

Dämpfung (normale und tangential Restitutionskoeffizienten, Reibungskoeffizient) steigt. Bei kleineren Massen kommt es somit zu einer stärkeren Überlagerung der beiden Dämpfungsarten. Das bedeutet, dass bei großen Massen die Wahl der geeigneten viskosen Dämpfung (Restitutionskoeffizienten) wesentlich ist für die realistische Modellierung eines Steinschlages. Im Gegensatz dazu ist bei kleineren Massen für die Modellierung eines Steinschlages auch ein geeigneter Wert für die nichtviskose Dämpfung wesentlich. Geeignete Werte hinsichtlich der Maximalwerte der kinetischen Energie sind in diesem Fall für die nichtviskose Dämpfung w_{cont} nach den Untersuchungen von 0,08-0,1 zu wählen.

Tabelle 5.5: Gegenüberstellung der Maximalwerte der kinetischen Energie für alle berechneten Varianten.

Kinetische Energie E_{kin} [J]		PFC ^{2D}	PFC ^{3D}	RocFall
Sturzmasse [1e3 kg]	w_{cont}	Felsige Oberfläche		
	0,08	1,28E+06	1,11E+06	1,38E+06
	0,1	1,23E+06	1,31E+06	
	0,2	1,03E+06	7,63E+05	
	0,3	8,32E+05	7,20E+05	
	w_{cont}	Bewachsene Oberfläche		
	0,08	1,40E+06	1,01E+06	1,05E+06
	0,1	1,33E+06	4,10E+05	
	0,2	6,80E+05	5,66E+05	
	0,3	6,03E+05	2,54E+05	
Sturzmasse [1,6e6 kg]	w_{cont}	Felsige Oberfläche		
	0,08 – 0,3	4,41E+08	5,02E+08	2,21E+09
	w_{cont}	Bewachsene Oberfläche		
0,08	4,41E+08	5,02E+08	1,67E+09	

Die Gegenüberstellung des Verlaufes der kinetischen Energie aus der RocFall und den PFC Berechnungen in Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 zeigt exemplarisch die gute Übereinstimmung der berechneten Energieverläufe.

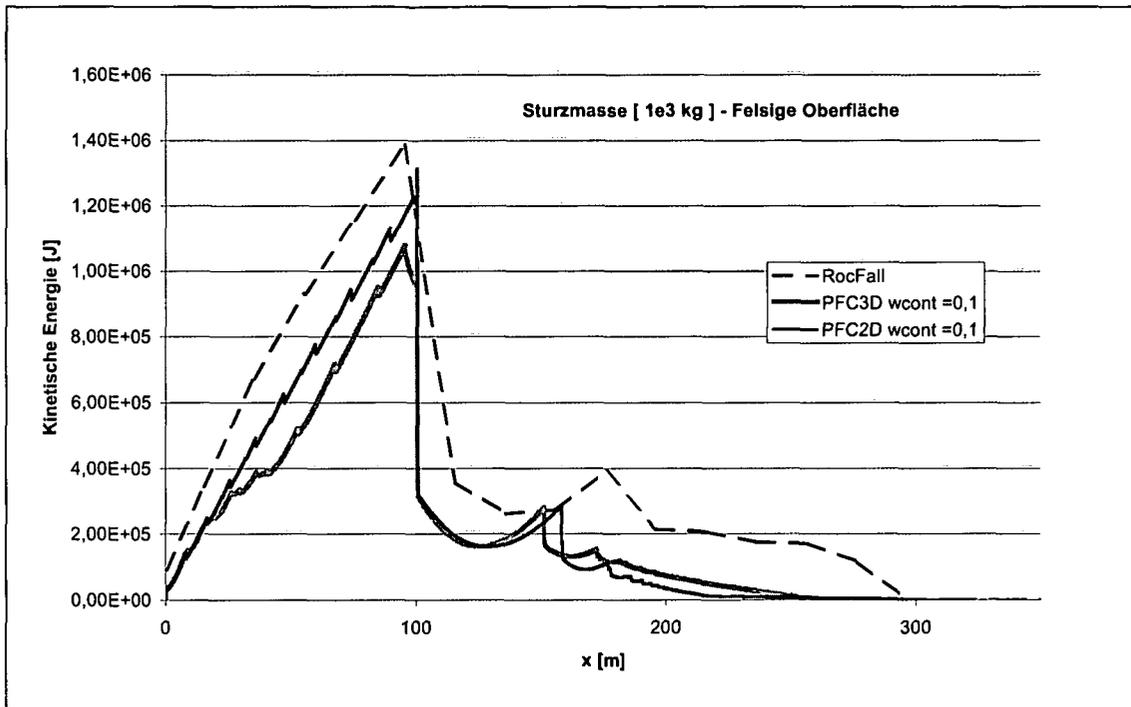


Abbildung 5.8: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Energieverlaufes bei einer felsigen Oberfläche aus der RocFall, der PFC^{2D} und der PFC^{3D} Berechnung.

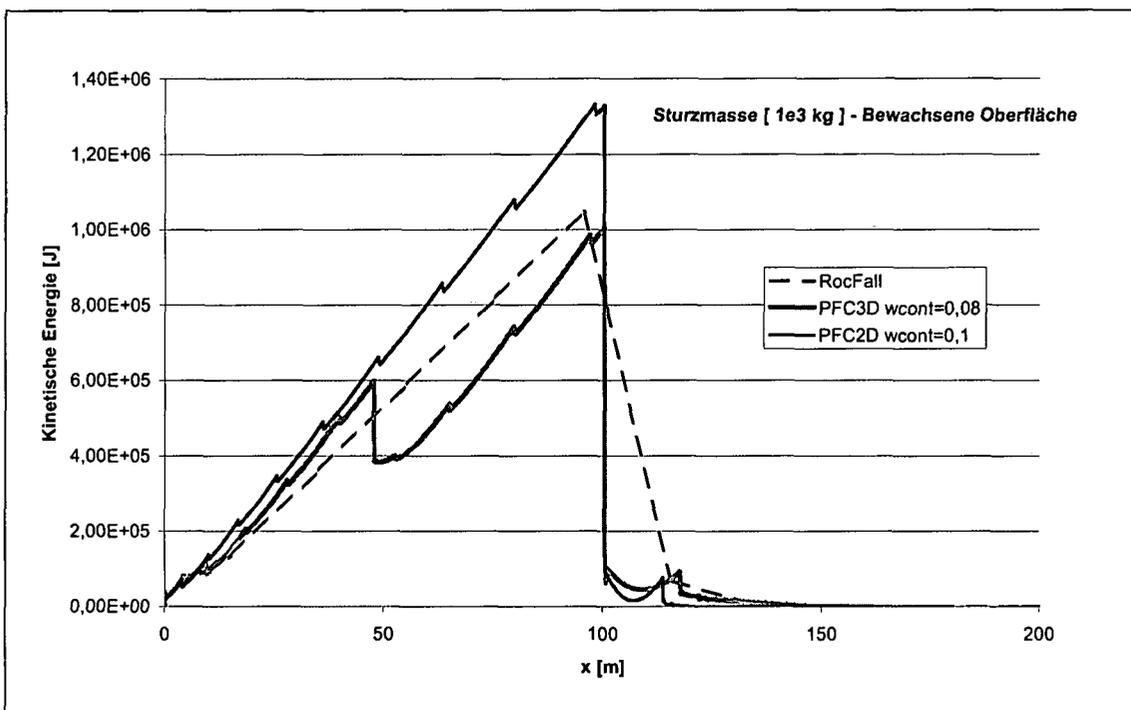


Abbildung 5.9: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Energieverlaufes bei einer bewachsenen Oberfläche aus der RocFall, der PFC^{2D} und der PFC^{3D} Berechnung.

Geschwindigkeit

Für die Beurteilung der Geschwindigkeiten bei einem Felssturz kann wie beim Betrachten der kinetischen Energie einerseits der Geschwindigkeitsverlauf - aufgetragen über die Zeit oder über den zurückgelegten Weg - und andererseits der Maximalwert der Geschwindigkeit betrachtet werden.

Die Ergebnisse für die Maximalwerte der Geschwindigkeit aus den PFC Berechnungen sowie aus der RocFall Berechnung für alle Vergleichsrechnungen sind in Tabelle 5.6 angegeben. Bei einer Sturzmasse von $1e3$ kg ergaben sich zufolge der unterschiedlichen nichtviskosen Dämpfungswerte, $w_{cont}= 0,08-0,3$, in den PFC Berechnungen Differenzen in den Maximalwerten der Geschwindigkeit für einen felsigen Untergrund von 20 %. Bei einem bewachsenen Untergrund ergaben sich Geschwindigkeitsdifferenzen in der PFC^{2D} Berechnung von 34 % und bei der PFC^{3D} Berechnung sogar von 53 %.

Bei einem felsigen Untergrund bzw. bei hohen Restitutionskoeffizienten sind die Geschwindigkeitswerte aus der PFC^{3D} Berechnung rund 5 % größer als die PFC^{2D} Ergebnisse. Bei niedrigen Restitutionskoeffizienten wie bei einem bewachsenen Untergrund hingegen liegen die Geschwindigkeitswerte aus der dreidimensionalen Berechnung unterhalb jenen aus der PFC^{2D} Berechnung. Diese Ergebnisse zeigen, wie bereits bei der kinetischen Energie beobachtet, dass bei einer kleinen Masse bzw. bei einem kleinen Volumen die nichtviskose Dämpfung einen wesentlichen Einfluss auf den Maximalwert der Geschwindigkeit besitzt.

Bei der Variante mit dem größeren Sturzblock ändert sich, wie beim Maximalwert der kinetischen Energie, auch der Maximalwert der Geschwindigkeit nicht. Ebenfalls wie bei der kinetischen Energie liegen die maximalen Geschwindigkeitswerte der RocFall Berechnung bei der größeren Masse über den maximalen Geschwindigkeitswerten der PFC Berechnungen. Dieser Unterschied liegt im Wesentlichen an der unterschiedlichen Behandlung der Masse in beiden Programmen. In RocFall wird die Masse als Massenpunkt in den Gleichungen behandelt. Im Gegensatz dazu wird die Masse in PFC als Starrkörper diskret modelliert und liefert daher eine genauere Betrachtung der Bewegungsbahn. Daher ist ein Vergleich mit RocFall hinsichtlich der maximalen Geschwindigkeitswerte nur bedingt möglich.

Generell kann man auch hier erkennen, dass abgesehen von den viskosen Dämpfungsfaktoren, geeignete Werte in PFC für die nichtviskose Dämpfung w_{cont} für felsigen und bewachsenen Untergrund von 0,08-0,1 zu wählen sind.

Tabelle 5.6: Gegenüberstellung der Maximalwerte der Geschwindigkeit für alle berechneten Varianten.

Geschwindigkeit v [m/s]		PFC ^{2D}	PFC ^{3D}	RocFall
Sturzmasse [1e3 kg]	wcont	Felsige Oberfläche		
	0,08	44,47	47,03	47,72
	0,1	43,59	46,44	
	0,2	38,99	39,06	
	0,3	35,17	37,94	
	wcont	Bewachsene Oberfläche		
	0,08	52,99	44,82	45,25
	0,1	51,59	25,76	
	0,2	36,81	33,65	
	0,3	34,62	20,99	
Sturzmasse [1,6e6 kg]	wcont	Felsige Oberfläche		
	0,08 – 0,3	25,32	25,05	47,72
	wcont	Bewachsene Oberfläche		
	0,08	23,49	25,05	45,25

Hinsichtlich der Geschwindigkeitsverläufe ist ähnlich wie bei der kinetischen Energie festzustellen, dass die Verläufe der Geschwindigkeiten bei den PFC Berechnungen und bei der RocFall Berechnung ähnliche Bilder liefern. Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 zeigen exemplarisch die Geschwindigkeitsverläufe bei felsigem und bewachsenem Untergrund bei einer gesetzten nichtviskosen Dämpfung $w_{cont}=0,1$.

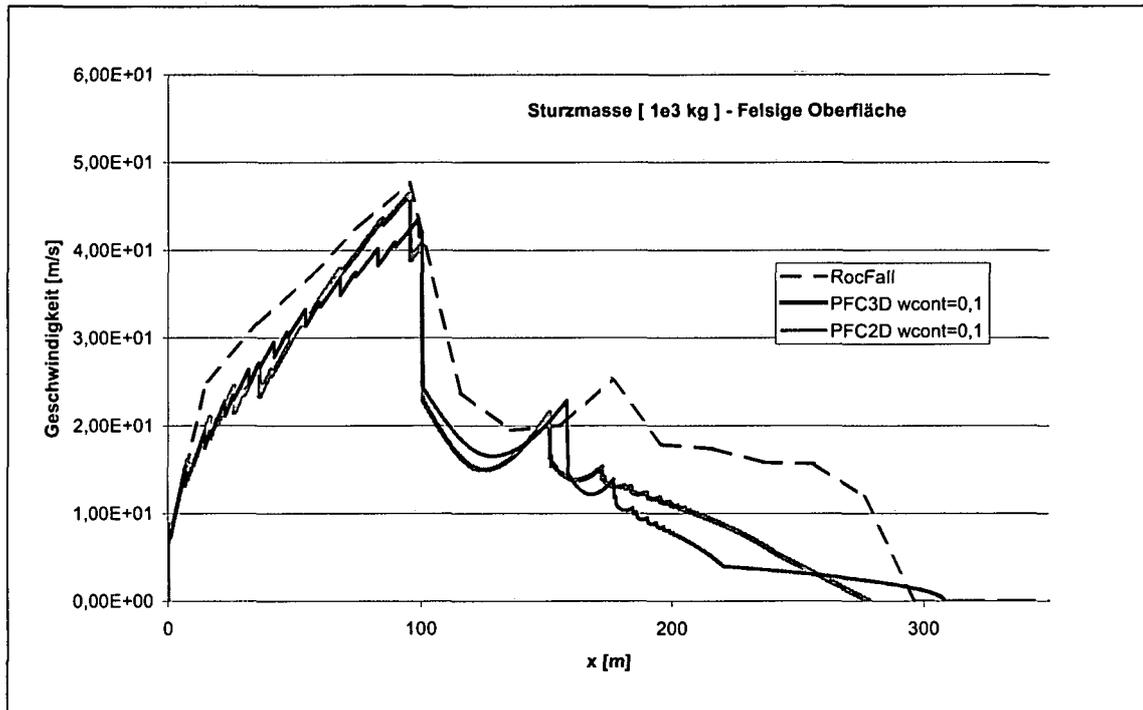


Abbildung 5.10: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Geschwindigkeitsverlaufes bei einer felsigen Oberfläche aus einer RocFall, einer PFC^{2D} und einer PFC^{3D} Berechnung.

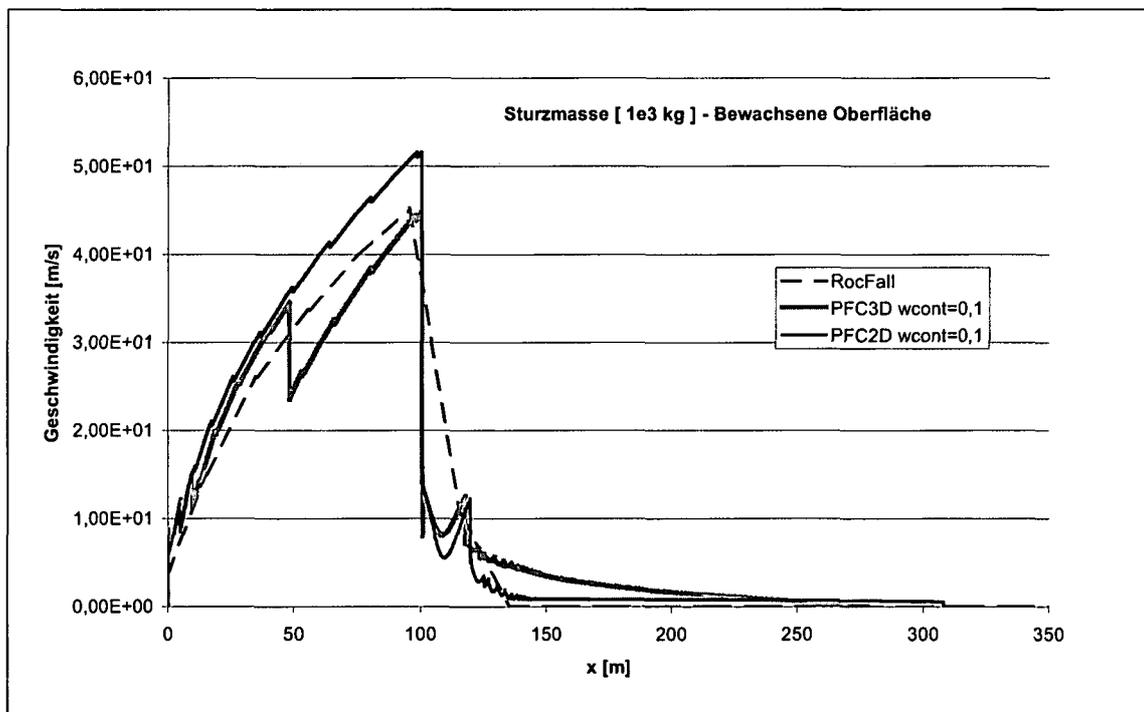


Abbildung 5.11: Gegenüberstellung der Ergebnisse des Geschwindigkeitsverlaufes bei einer bewachsenen Oberfläche aus einer RocFall, einer PFC^{2D} und einer PFC^{3D} Berechnung.

Bewegungsbahn

Unter der Bewegungsbahn versteht man den über den zurückgelegten Weg aufgetragenen Sprung-, Roll- und Gleitverlauf des bewegten Einzelblockes. Dabei werden nicht nur die Reichweiten in horizontaler Richtung sondern auch die Sprunghöhen verglichen. Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Bewegungsbahnen in PFC zufolge eines Aufpralls auf einer Felsoberfläche und einer bewachsenen Oberfläche. Die dargestellten Linien sind die Spur des Mittelpunktes des Sturzblockes. Es zeigt sich deutlich eine Ähnlichkeit in den Bewegungsbahnen sowohl bei felsigem als auch bei bewachsenem Untergrund.

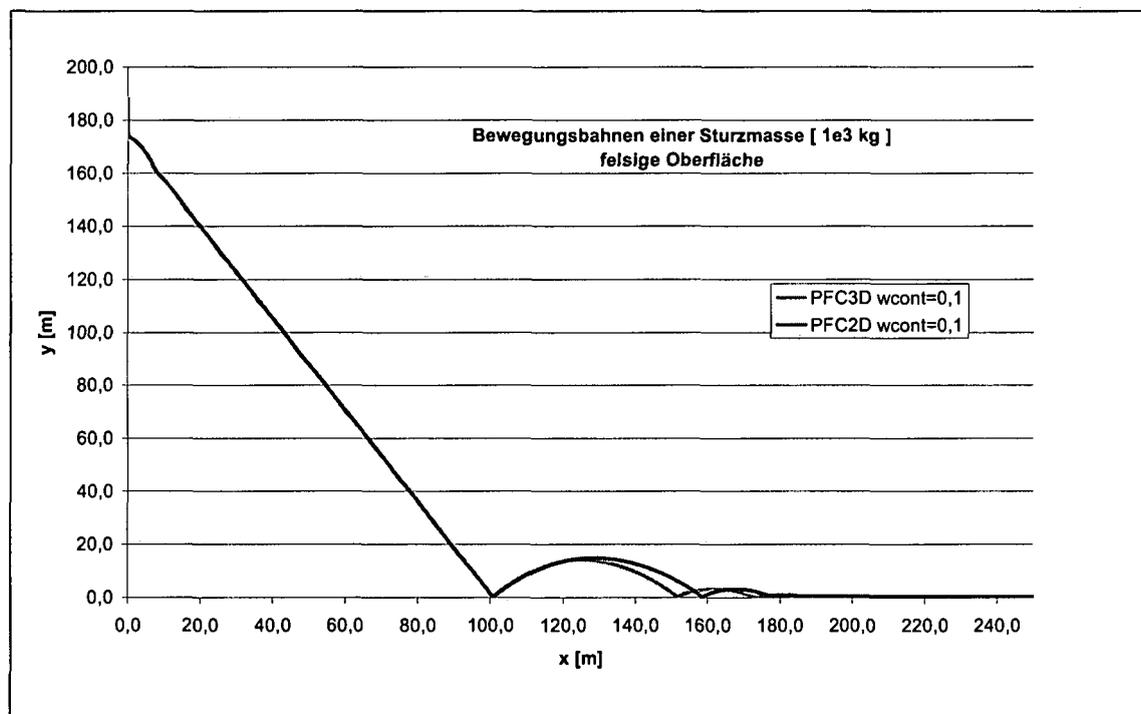


Abbildung 5.12: Vergleich der aus den PFC Berechnungen ermittelten Bewegungsbahnen eines Felssturzes bei einer felsigen Oberfläche.

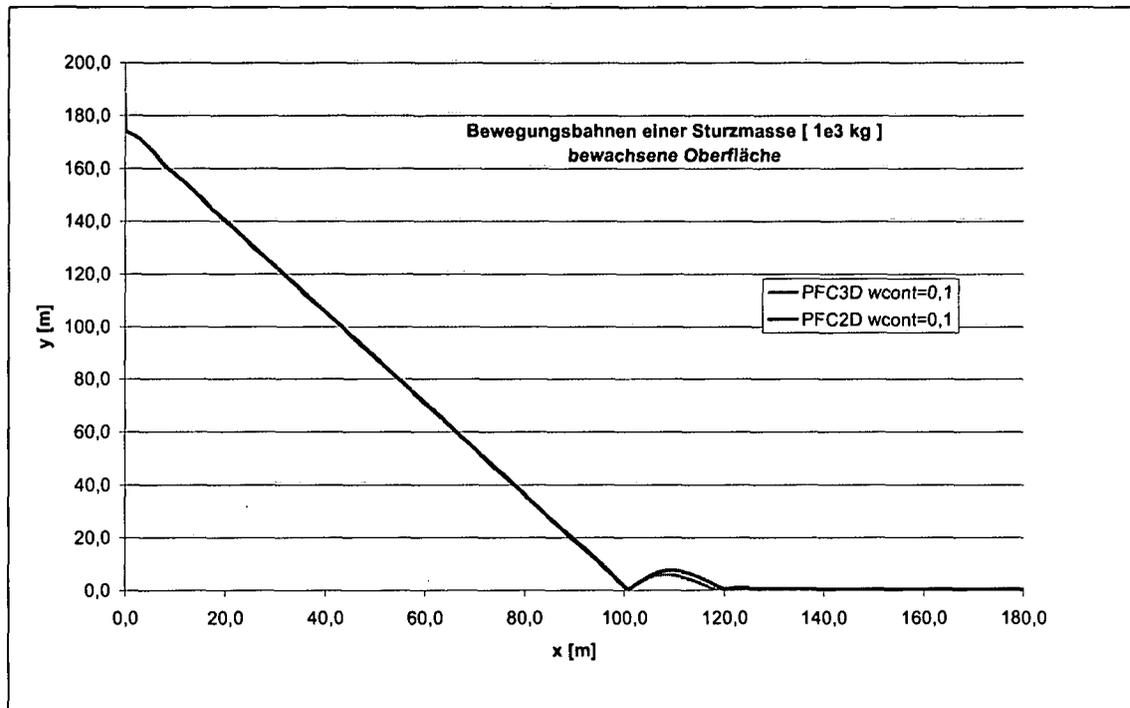


Abbildung 5.13: Vergleich der aus den PFC Berechnungen ermittelten Bewegungsbahnen eines Felssturzes bei einer bewachsenen Oberfläche.

Blockform

Der Einfluss der Blockform auf die Bewegungsbahn ist signifikant. Generell gilt, dass die Reichweite bei kantigen Blöcken geringer ist, und zwar aufgrund des größeren Rollwiderstandes als bei kugelförmigen Blöcken. Der Unterschied zwischen der Kugelform und der sechskantigen Blockform ist in Abbildung 5.14 mittels der Visualisierung der Bewegungsbahnen dargestellt.

Bei genügend hoher Rotationsgeschwindigkeit kann der Block aus dem „Rollen“ in ein „Springen“ übergehen, wie in Abbildung 5.14 am Verlauf der grün dargestellten Bewegungsbahn ersichtlich ist.

Aus den Berechnungen hat sich außerdem gezeigt, dass der Aufschlagwinkel des Sturzblockes beim ersten Aufprall auf die Geländeoberfläche einen wesentlichen Einfluss auf den gesamten Verlauf der Bewegungsbahn hat.

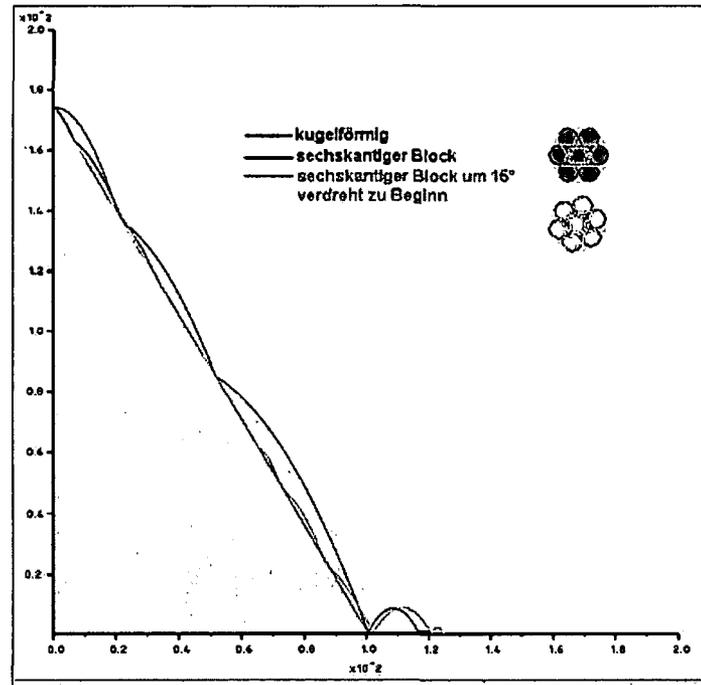


Abbildung 5.14: Gegenüberstellung der Bewegungsbahnen von kugelförmigen und kantigen Sturzblöcken (Clustern) mit einer PFC^{2D} Berechnung bei einem bewachsenem Untergrund ($w_{cont} = 0,08$; $m=1,0$ t).

Zerbrechen

Wie sich in Variationsrechnungen gezeigt hat, hat das Zerbrechen der Felsblöcke einen wesentlichen Einfluss auf die Reichweite eines Felssturzes.

Einzelkugeln können ohne zusätzliche Dämpfung weiter „Rollen“ als die kantigen Cluster. Zum Beispiel ergab eine Variationsrechnung an dem Beispiel des 60° stark geneigten Hanges, dass die 7 Einzelblöcke eines zerbrochenen Clusters verteilt mit einer maximalen Reichweite von 615 m und einer minimalen Reichweite von 166 m vom Auslösepunkt liegen bleiben. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die kinetische Energie ansteigt, wenn sich die Einzelkugeln aus dem Verband lösen und einzeln im freien Fall beschleunigen können. Im Vergleich dazu bewegt sich der gesamte Cluster in Geländenähe und wird durch die Oberflächeneigenschaften abgebremst.

Das Zerbrechen eines Clusters in Einzelkugeln in drei aufeinander folgenden Schritten ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Dabei wird die Simulation des Zerbrechens durch die Angabe einer entsprechenden Parallelbindungsfestigkeit ermöglicht.

Die kantige Blockform ermöglicht somit einen sehr realitätsnahen Bewegungsablauf.

Die Blöcke fangen aufgrund ihrer Form an zu „Springen“ und wechseln, je nach Aufschlagswinkel, in ein „Rollen“ über. Dies entspricht der Theorie eines Starrkörpermodells von Bozzolo (1987).

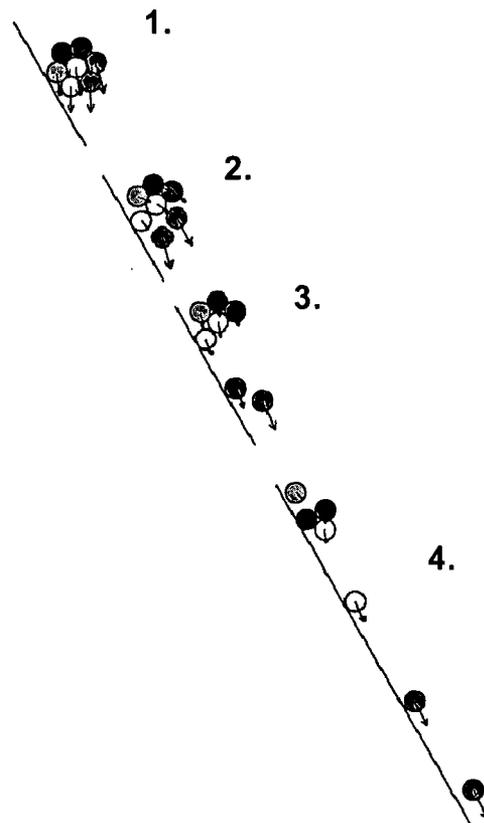


Abbildung 5.15: Aufbruch eines Clusters zufolge Überschreitung der Bindungsfestigkeiten.

Der Verlauf der kinetischen Energie, der sich zufolge des Zerbrechens ergibt, ist in Abbildung 5.16 über die Zeit aufgetragen. Der Block bricht auseinander, da jener Ball, der mit dem Gelände in Kontakt kommt, durch die Oberflächeneigenschaften stärker abgebremst wird als der Rest des Blockes.

Die Berücksichtigung der Blockform in einem gegebenen Fall setzt allerdings auch deren Kenntnis voraus. Diese ist aber in vielen Fällen nur ungenügend gegeben. Daher wurden in den PFC^{3D} Berechnungen keine Cluster verwendet sondern nur kugelförmige Partikel. Um jedoch zusätzlich bei den PFC^{3D} Berechnungen auch die Rollreibung zu berücksichtigen, wurde eine Rotationsdämpfung implementiert.

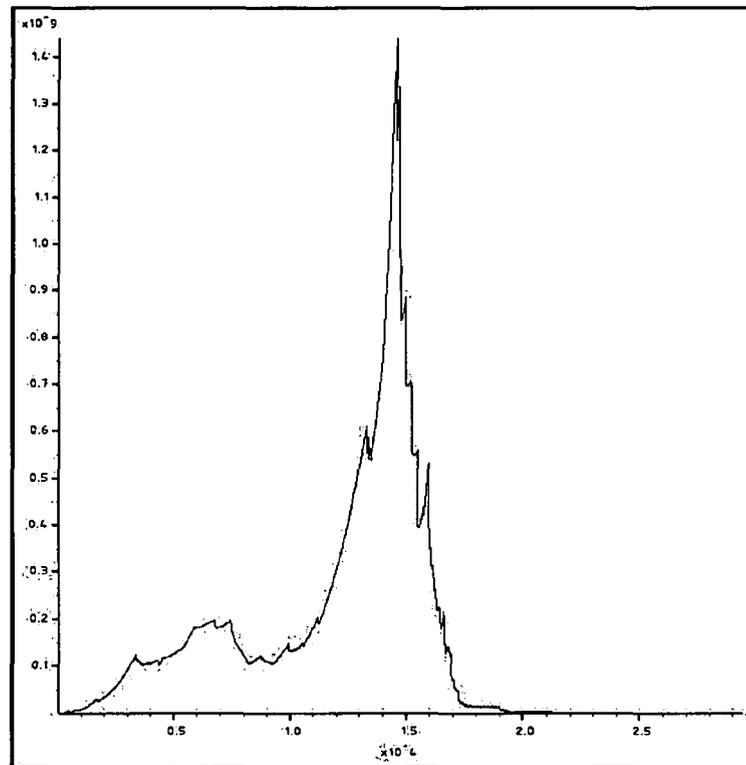


Abbildung 5.16: Die kinetische Energie beim Zerbrennen von Clustern.

5.5 Modellierung des Geländes

Im zweidimensionalen Fall werden die Geländeoberfläche und das nicht bewegte Ablösegebiet mittels zweidimensionaler Linienelemente generiert. Den einzelnen Liniensegmenten können die entsprechenden Oberflächeneigenschaften zugewiesen werden.

Um eine Geländeoberfläche in PFC^{3D} zu modellieren, wird die Geländeoberfläche trianguliert, und die einzelnen dreieckigen Flächen werden als eigene, ebene Teilflächen eingelesen. Jeder dreieckigen Fläche können dann, ebenfalls individuell, die entsprechenden Oberflächeneigenschaften zugeordnet werden. Zwei Methoden wurden für die Erstellung der Geländeoberfläche verwendet.

Bei der ersten Methode wird die Geländeoberfläche, die durch einen gleichmäßigen Punktraster gegeben ist, mithilfe eines eigens entwickelten Programms in dreieckige Flächen zerlegt, und jede Dreiecksfläche wird, in der für eine PFC Eingabe notwendigen Form in eine PFC-Skriptdatei ausgelesen. Mithilfe dieses Programms können einzelne Bereiche, denen gleiche Oberflächeneigenschaften zugewiesen werden sollen, ausgewählt und entsprechende

ID-Nummern zugewiesen werden (Abbildung 5.17). Die dreieckigen Wandelemente werden anschließend in PFC durch den Aufruf der mit diesem Programm erzeugten PFC-Skriptdatei geladen. Für das Einlesen der Wandelemente im nicht bewegten Ablösegebiet wird analog vorgegangen.

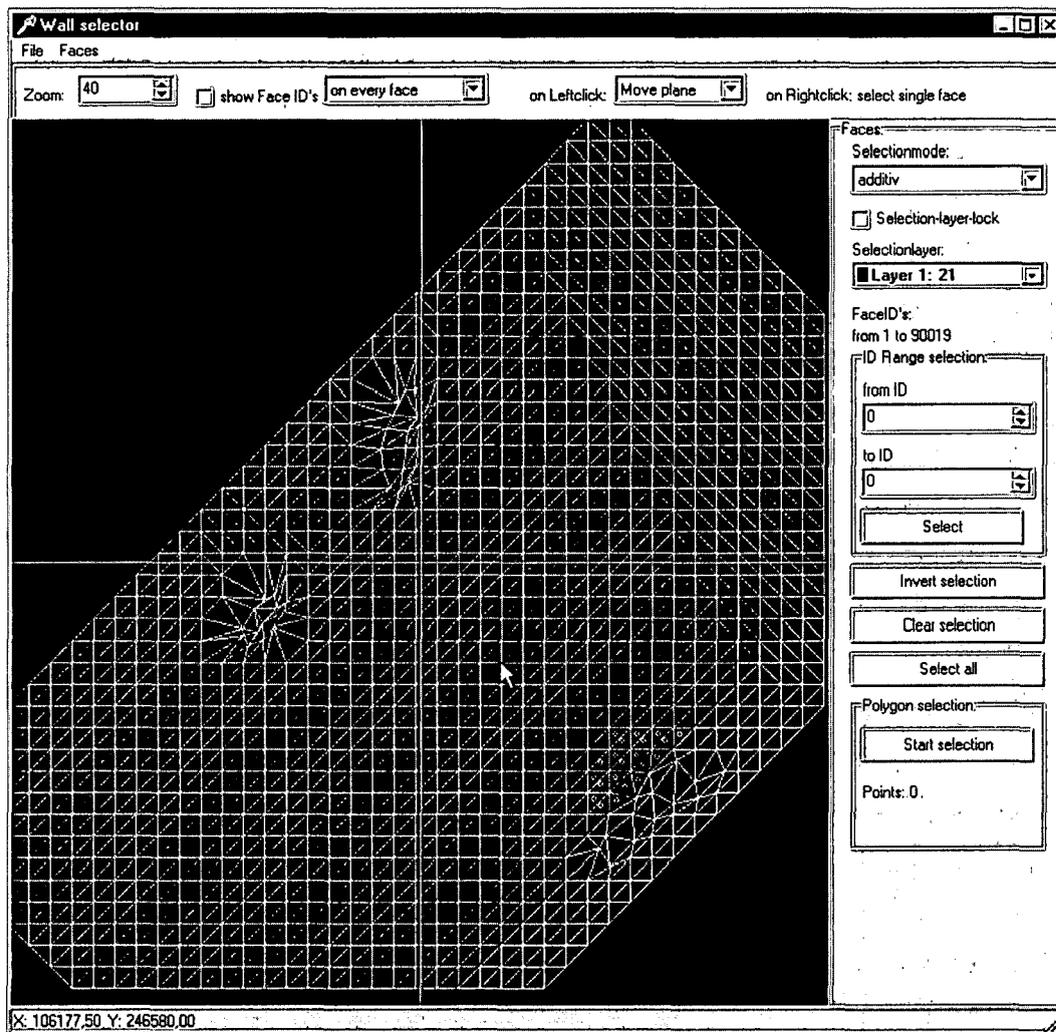


Abbildung 5.17: Triangulations- und Wandauswahlprogramm für PFC^{3D}.

Bei der zweiten Methode wird die Triangulation der Oberfläche mithilfe des Programms AutoCadLand durchgeführt. Unter Verwendung einer angeschlossenen Datenbank können die Dreiecksflächen in der für PFC notwendigen Form ausgelesen werden.

Jedem Wandelement wird eine eigene ID-Nummer zugewiesen, über die dem Wandelement die entsprechenden Eigenschaften zugeordnet werden können. Jedes Wandelement beansprucht allerdings auch einen gewissen Speicherplatz. Je kleiner die Dreiecksflächen gewählt werden, desto genauer können einzelnen Bereichen die entsprechenden Dämpfungsfaktoren zugeordnet werden. Allerdings steigt mit der Feinheit der Unterteilung

der Geländeoberfläche auch die Rechenzeit. Die optimale zu wählende Feinheit hängt von der jeweiligen Ausgangssituation bzw. Problemstellung ab.

5.6 Modellierung der Sturzmasse

Die Vorgehensweise für die Generierung des Ausgangszustandes vor der eigentlichen Berechnung des Sturzprozesses ist für PFC^{2D} und PFC^{3D} gleich:

Die Modellierung der Absturzmasse erfolgt mithilfe der Partikel. Im Ablösegebiet wird eine bereits desintegrierte Masse, bestehend aus Partikeln positioniert. Temporäre Hilfswände, die das Ablösegebiet begrenzen werden aufgestellt und verhindern ein vorzeitiges Abstürzen der Partikelansammlung.

Um zusätzlich größere Blöcke zu modellieren, können einzelne Bälle über die Anwendung von Parallelbindungen zu Clustern verbunden werden. Diese Bindungen können während des Sturzprozesses zufolge eines Aufpralles brechen.

In PFC^{3D} ist die Ballgenerierung nur innerhalb eines Quaders (Box) möglich, dessen Seitenflächen parallel zu der xy-, xz-, und yz-Ebene liegen müssen. Die Wandelemente in PFC^{3D} sind so definiert, dass es eine aktive und eine passive Seite gibt. Kreuzt ein Wandelement den für die Partikelgenerierung definierten Bereich (Box), so werden nur jene Partikel generiert die auf der aktiven Seite dieses Wandelementes liegen. Daher ist es ratsam eine Box für die Generierung der Partikel zu erzeugen, die innerhalb der Ablösefläche liegt.

Nach Konsolidierung der Partikelansammlung im Ablösegebiet wird durch Einschalten der Gravitation als äußere Belastung und Wegnahme der temporären Wandelemente unterhalb des Ablösegebietes der eigentliche Felsmassensturz ausgelöst.

6 Referenzbeispiel Bergsturz Frank Slide, Alberta, Kanada

Anhand der durchgeführten Aufschlagtests und des Vergleichs mit den Steinschlagsimulationsprogrammen können die Parameter für einen Sturz eines Einzelblockes abgeschätzt werden.

Um auch eine Aussage über den Einfluss der eingeführten Dämpfungsparameter für die Berechnung eines Felsmassensturzes zu treffen, wurde eine Rückrechnung des Bergsturzes Frank Slide in Alberta, Kanada mit PFC^{2D} durchgeführt (Eckel, 2000).

6.1 Problemstellung

Der Bergsturz Frank Slide ereignete sich am 29. April 1903 um 4:10 Uhr. Frank war eine Siedlung für die Beschäftigten eines Kohlebergwerks in der Gegend des Crowsnest Pass in Südwestalberta, Kanada. Die Stadt Frank lag etwa 21 km östlich von der Grenze zu British Columbia und 56 km nördlich von den Vereinigten Staaten, an den Ausläufern der kanadischen Rockies. Die heutige Stadt Frank liegt 2 km nördlich der alten ursprünglichen Stelle. Im Lageplan in Abbildung 6.1 ist die genaue Lage des Bergsturzes markiert.

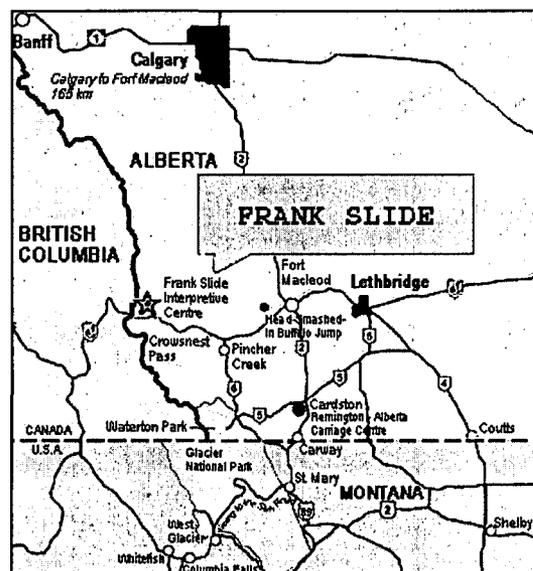


Abbildung 6.1: Lageplan (Frank Slide interpretive centre, 2003; verändert).

Beim Frank Slide - Ereignis handelte es sich um einen Bergsturz vom Turtle Mountain mit einem geschätzten Volumen von 30,5 Mio. m³. Der Oberrand des Ablösegebietes lag zwischen 2128 m ü.M. und 2200 m ü.M. Der nahezu ebene und breite Talboden lag auf 1250 m ü.M. Der für die PFC^{2D} Berechnung verwendete Schnitt durch den Bergsturz Frank ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Strichliert ist die mögliche Brandungsböschung eingezeichnet, die jedoch in der Berechnung nicht berücksichtigt wurde.

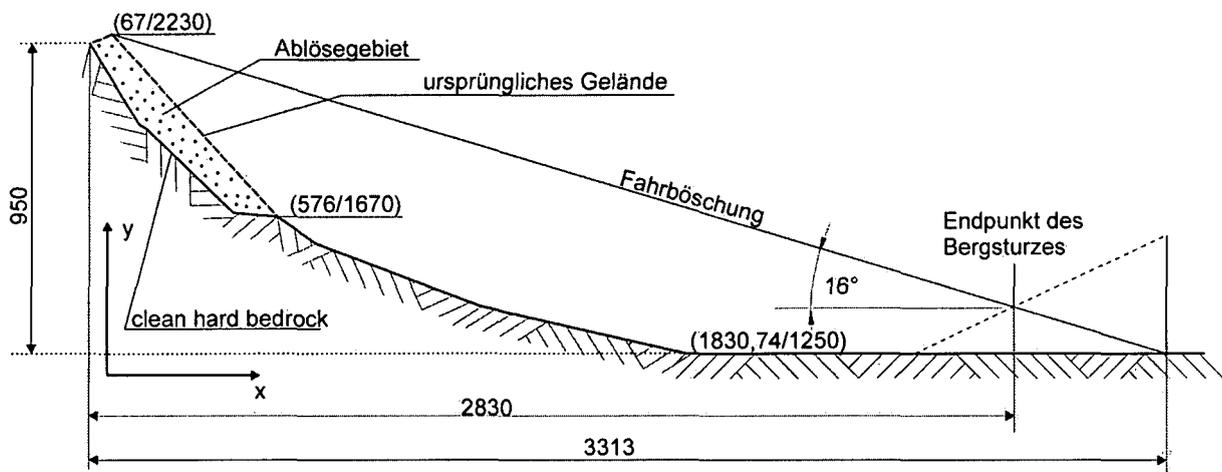


Abbildung 6.2: Längsschnitt A-A (Abbildung 6.4) durch den Bergsturz Frank.

Der Turtle Mountain gehört zu den Ausläufern der Rocky Mountains und besteht im Wesentlichen aus stark gefaltetem Kalkstein (Abbildung 6.3). Der Faltenbau des Turtle Mountain ist die Grundlage für die Ausbildung der Gleitfläche der Massenbewegung. Die Gleitfläche befindet sich in der Livingstone Formation und ist fundiert auf der Banff Formation. Aufgrund einer geologischen Störung im Fußpunkt der Ablösefläche und der Bildung eines Scherbruchs im Kammbereich der geologischen Falte kam es zum Gleiten auf einer polygonalen Gleitebene. Die Gleitfläche hat laut Cruden & Krahn (1978) einen minimalen Reibungswinkel von 15,6°.

Laut Augenzeugenberichten dauerte der Absturz ungefähr 100 Sekunden. Auf einer Breite von 1 km löste sich die Felsmasse, deren Dicke bis zu 150 m betrug, und breitete sich im Tal radial aus. Der Ausbreitungsradius ist laut Heim (1932) 1650 m. Die durchschnittliche Ablagerungsdicke beträgt laut McConnell und Brock (1904; in: Cruden & Krahn, 1978) 13,7 m auf einer Fläche von 2,67 km². Die Ausbreitung der Sturzmasse nach dem Bergsturz ist in der Luftaufnahme in Abbildung 6.4 deutlich erkennbar.

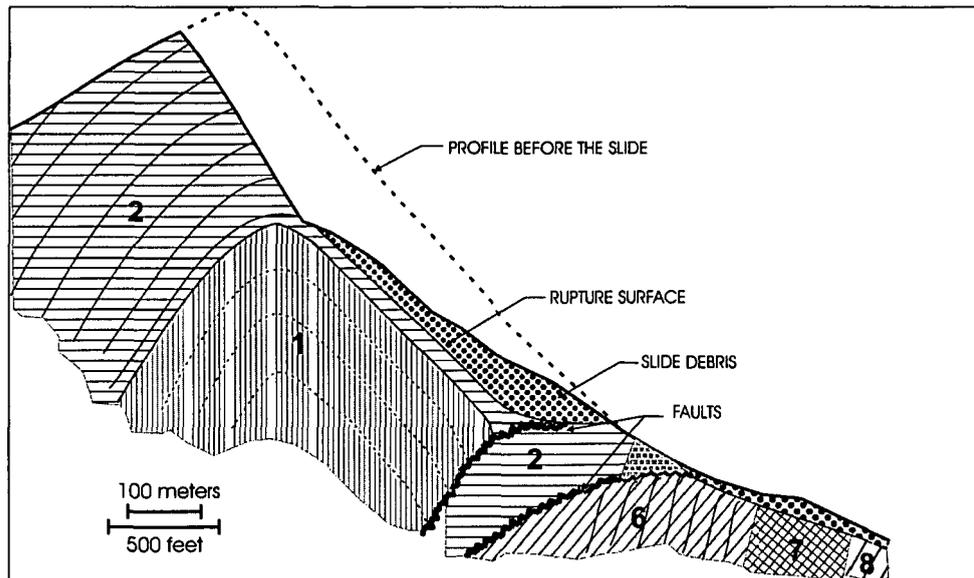


Abbildung 6.3: Schnitt A-A durch das Abrissgebiet des Frank Slide; geologische Klassifizierung: 1 = Banff Formation; 2 = Livingstone Formation; 6 = Fernie Group; 7 = Kootenay Formation; 8 = Blairmore Group (nach Cruden & Krahn, 1978; verändert).

Die abgefahrene Felsmasse hat einen Tiefstpunkt bei 1250 m ü.M. und brandete am Gegenhang 139 m hinauf. Unter Berücksichtigung der Brandung ergibt sich daraus eine Fahrböschung von 16° , mit einer Horizontalentfernung vom obersten Ablösepunkt von ungefähr 2830 m. Wird die Brandung vernachlässigt und durch einen horizontalen Auslauf ersetzt, ergibt sich bei einer Fahrböschung von 16° eine maximale Horizontalentfernung von 3313 m.

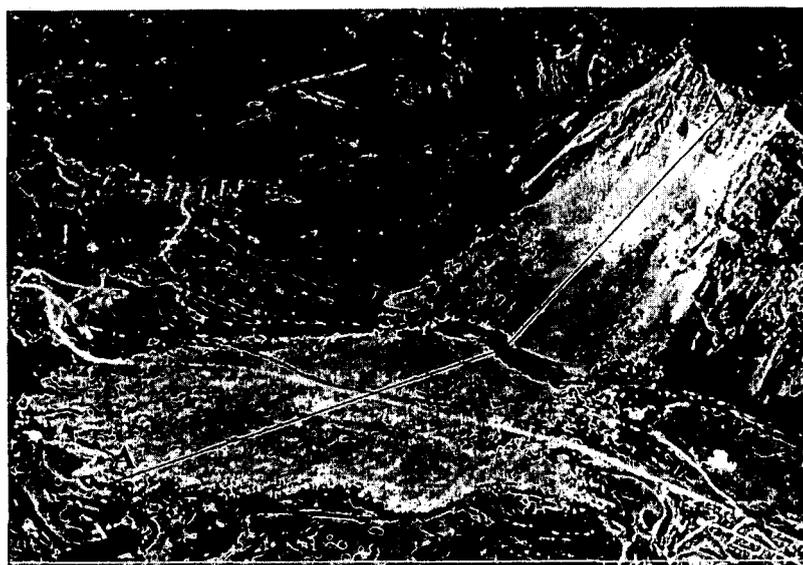


Abbildung 6.4: Ausbreitung des Frank Slide im Talboden; eingetragen ist die Schnittführung A-A (Cruden & Krahn 1978; verändert).

Während der Instandsetzungsarbeiten des Canadian Pacific Railway grub man einen 16 m tiefen Einschnitt durch die Bergsturزابlagerungen im Talboden. Dabei stellte man fest, dass sich das Material „invers“ abgelagert hat, d.h. die kleinsten Korngrößen befinden sich am tiefsten, und gegen die freie Oberfläche hin werden die Blockdurchmesser immer größer. Die Sturzmasse lagerte sich somit in einer verkehrt gradierter Schichtung ab (inverse Lagerung).

6.2 Modellierung

Für das PFC^{2D} Modell wurde der Längsschnitt in Abbildung 6.2 verwendet. Der Bergsturz vom Turtle Mountain hat ein geschätztes Absturzvolumen von 30 Mio. m³, das auf einer Breite von ungefähr 1000 m im Ablösegebiet verteilt ist. Für das zweidimensionale Modell wird ein Streifen mit einer Kubatur von 115.000 m³ betrachtet. Dies entspricht einer Masse von 310.000 t bei einer Dichte von 2700 kg/m³. Der Ablösebereich in der PFC^{2D} Berechnung ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Für die Erzeugung des Ausgangszustandes wurde die Felsmasse mit einer Dicke von 150 m innerhalb des Ablösegebietes generiert. Die dabei verwendete Partikelansammlung besteht aus kugelförmigen Einzelblöcken mit Balldurchmessern von 2 m und 4 m und aus Clustern, bestehend aus sieben mittels Parallelbindung verbundenen Partikel, mit einem Clusterdurchmesser von 8 m und 16 m (Abbildung 6.5).

Die Mikroparameter für die Modellierung der Sturzblockeigenschaften wurden in den Vergleichsrechnungen wie folgt variiert:

- Die Dichte der einzelnen Partikel wurde bei den 2 m und 4 m Blöcken mit 2700 kg/m³ angesetzt und bei den aus mehreren Bällen zusammengestellten Blöcken mit 8 m und 16 m Durchmesser (aufgrund der Hohlräume) mit 2870 kg/m³ angesetzt. Damit ergab sich für die „Cluster“-Blöcke eine Durchschnittsdichte von 2700 kg/m³. Für die gesamte modellierte Felsmasse ergab sich somit ein Sturzvolumen von 115.000 m³, bei einer Gesamtballanzahl von 8002 Bällen, bzw. eine Gesamtblockanzahl von etwa 3800 Stück.
- Der Reibungswinkel $\varphi_{b(all)}$ der Blöcke wurde in den Variationsrechnungen mit 2°, 5° und 30° angenommen.

- Die Bindungsfestigkeit der Parallelbindungen der zusammengesetzten Blöcke in normaler und tangentialer Richtung (pb_n/pb_s) wurde in den Berechnungen mit $1e9 \text{ N/m}^2$, $2e7 \text{ N/m}^2$ und $5e6 \text{ N/m}^2$ variiert.
- Der nichtviskose Dämpfungsfaktor $bcont$ wurde in den Variationsberechnungen mit 0,08 und 0,15 angenommen.

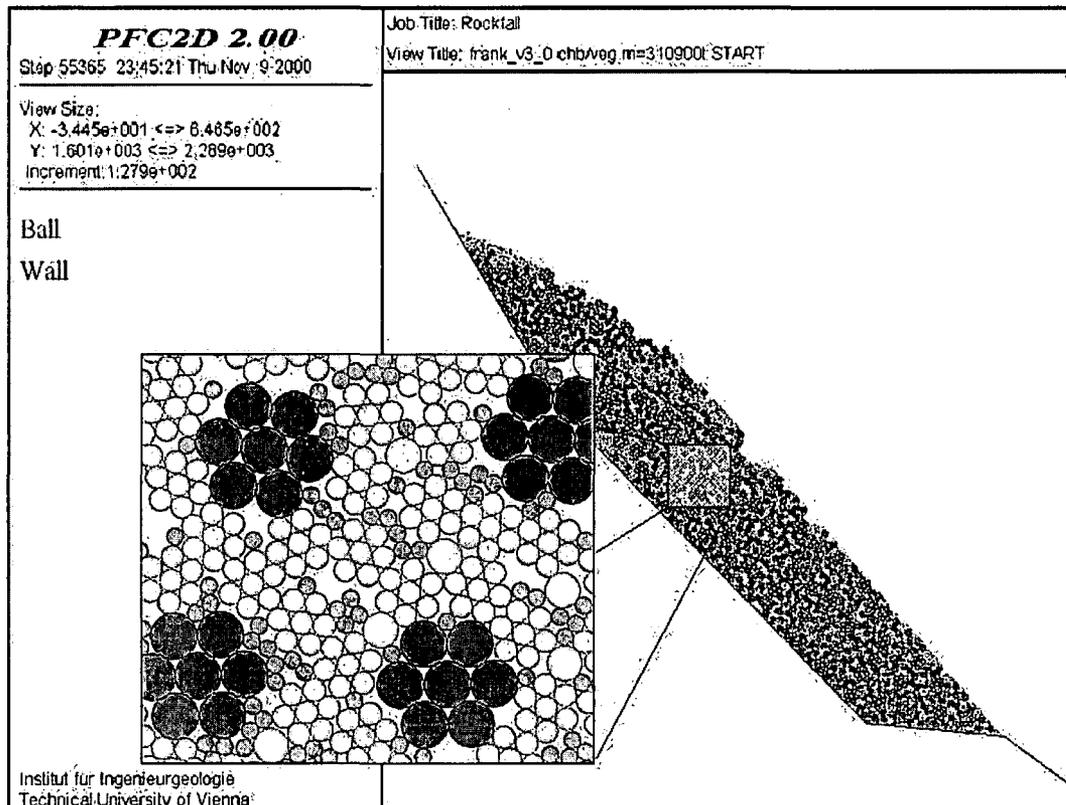


Abbildung 6.5: Kornverteilung in der Sturzmasse (rot= \varnothing 2 m; grün= \varnothing 4 m; cyan= \varnothing 8 m; blau= \varnothing 16 m), (Eckel, 2000).

Die Mikroparameter für die Modellierung des Verhaltens zwischen der Sturzmasse und der Geländeoberfläche wurden in den Vergleichsrechnungen wie folgt variiert.

- Für die viskosen Dämpfungsfaktoren R_T und R_N wurden Faktoren wie für einen felsigen Untergrund und wie für einen bewachsenen Untergrund angenommen.
- Die nichtviskose Dämpfung $wcont$ wurde zwischen 0,1-0,2 variiert.

- Der Wandreibungswinkel der Sturzbahn $\varphi_{w(all)}$ wurde mit 2° , 5° und 30° variiert. Im Ablösegebiet wurde der Wandreibungswinkel $\varphi_{w(all)}$ als blanker Fels mit $15,6^\circ$ angenommen.

6.3 Ergebnisse

Im Folgenden wird der Einfluss der gewählten Parameter auf die Fahrböschung und auf das Verhalten des Berg- bzw. Felssturzes beschrieben. Beim Vergleich der Variationsrechnungen wurde dabei immer die gesamte zusammengebliebene Masse betrachtet.

6.3.1 Ball-, Wandreibungswinkel

Der Einfluss des Wandreibungswinkels φ_w wurde bei der Variation zwischen 2° und 30° deutlich. Der Ballreibungswinkel wurde bei dieser Variationsrechnung auf $\varphi_b = 30^\circ$ gesetzt. Setzt man den Wandreibungswinkel auf $\varphi_w = 30^\circ$, so erhält man im Ablagerungsgebiet des Felsmassensturzes einen Böschungswinkel von $16,2^\circ$ (Abbildung 6.6). Wird der Wandreibungswinkel auf $\varphi_w = 2^\circ$ gesetzt, so ergibt sich ein Böschungswinkel im Ablagerungsgebiet von $5,6^\circ$. Die ganze Masse fährt bei dieser Variationsrechnung in den horizontalen Talboden ab (Abbildung 6.7).

Eine durchgeführte Variation des Ballreibungswinkels zeigt, dass bei einem kleineren Ballreibungswinkel φ_b die Böschungsoberfläche im Ablagerungsgebiet flacher und „glatter“ ist. Die jeweils ermittelte Ablagerung bei Berechnungen mit einem Ballreibungswinkel von $\varphi_b = 30^\circ$ und $\varphi_b = 5^\circ$ ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Mit einem größeren Ballreibungswinkel steigt die Porosität des abgelagerten Materials, und die Sturzmasse hat die Tendenz sich aufzutürmen. Mit einem kleineren Ballreibungswinkel sinkt die Porosität des Materials im Ablagerungsgebiet und die Böschungsoberfläche wird flacher, und die Ausbreitung der Sturzmasse vergrößert sich.

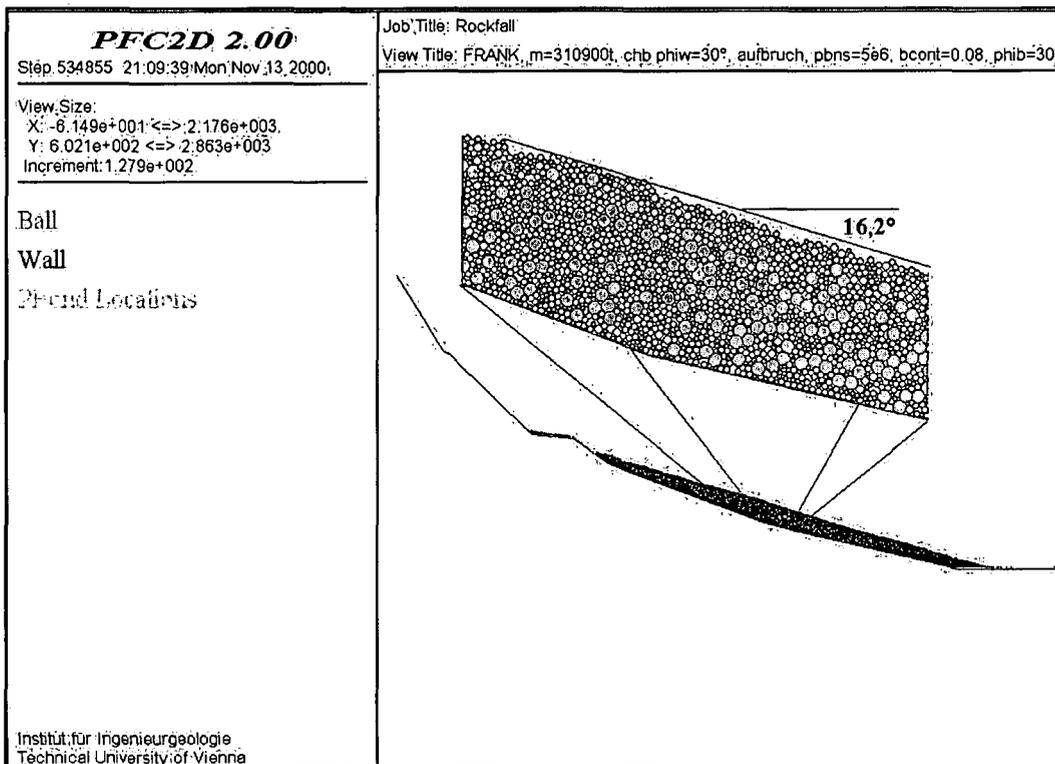


Abbildung 6.6: Böschungswinkel von 16,2° bei einem Ball- und Wandreibungswinkel $\phi_b = \phi_w = 30^\circ$, (Eckel, 2000).

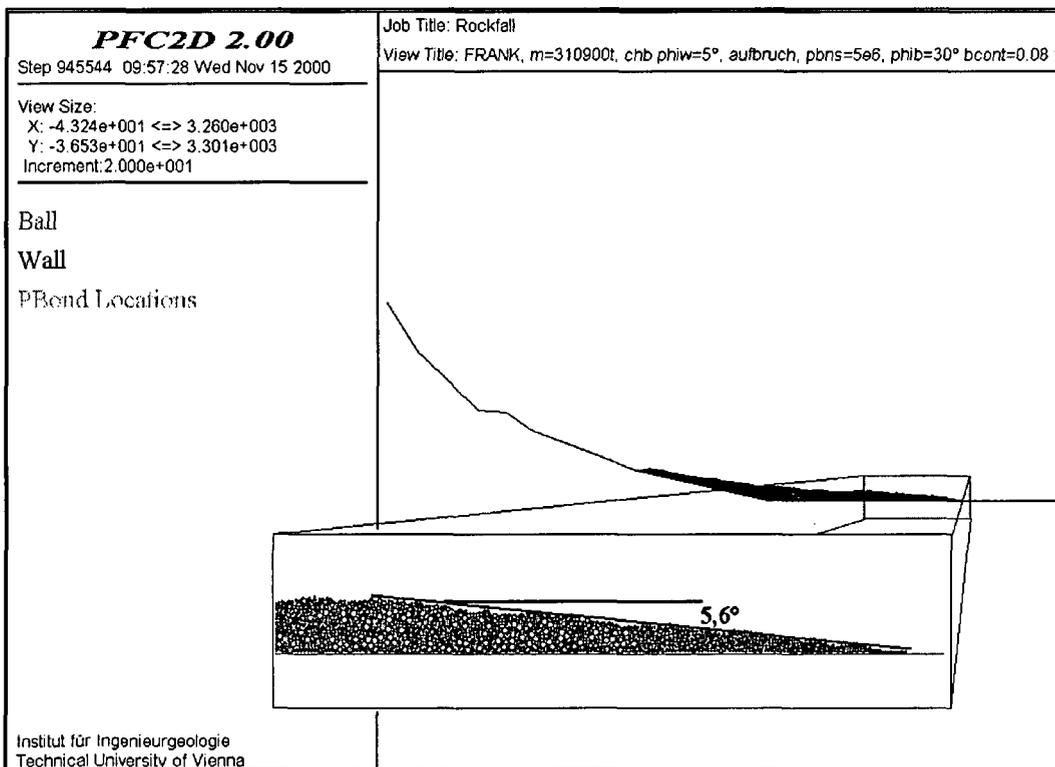


Abbildung 6.7: Böschungswinkel von 5,6° bei einem Ballreibungswinkel $\phi_b = 30^\circ$ und einem Wandreibungswinkel $\phi_w = 5^\circ$ (Eckel, 2000).

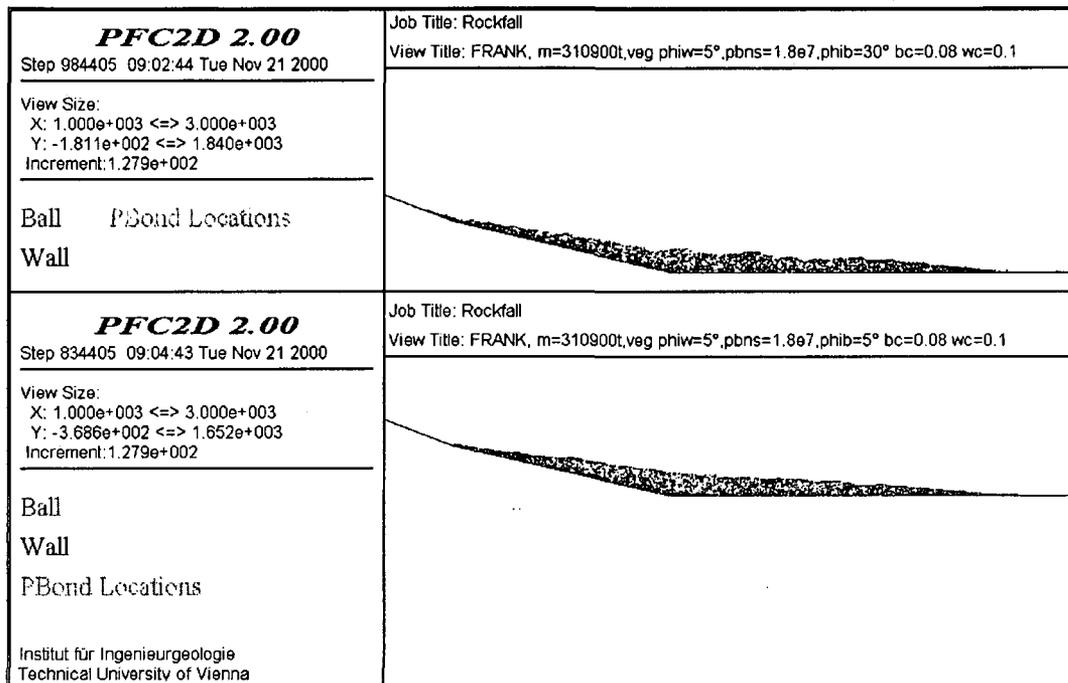


Abbildung 6.8: Unterschiede im Ablagerungsgebiet bei Variation des Ballreibungswinkels; oben: Ballreibungswinkel $\varphi_b = 30^\circ$, unten: Ballreibungswinkel $\varphi_b = 5^\circ$; (Eckel, 2000).

Die beste Übereinstimmung mit dem Bergsturz Frank Slide lieferten die Berechnungen mit einem Ballreibungswinkel $\varphi_b \sim 3^\circ$ und einem Wandreibungswinkel $\varphi_w \sim 30^\circ$. Die Verwendung eines niedrigen Reibungswinkels ist in guter Übereinstimmung mit der Theorie von Hsü (1975). Nach Hsü kann ein Bergsturz, dessen Absturzmasse aus einer trockenen Felsmasse besteht, mit dem Fließen einer Masse aus kohäsionslosen Partikeln in einem flüssigen Medium verglichen werden. Dabei erfolgt die Verflüssigung der trockenen Felsmasse durch die große Staubeentwicklung, die bei einem Felssturz entsteht. Der Reibungswiderstand bei einem solchen Partikelfluss ist dann geringer als beim Gleiten eines Festkörpers, da der Auftrieb zufolge der Flüssigkeit die Normalspannung der Partikel reduziert, und ergibt sich daher eine Reduktion der Scherfestigkeit. Die Reduktion der Scherfestigkeit bedeutet somit eine Reduktion des Reibungswinkels für die Felsmasse.

6.3.2 Viskose Dämpfungsfaktoren

Generell zeigen die Variationsrechnungen, dass bei der Berechnung eines Felsmassensturzes der Einfluss der viskosen Dämpfungsfaktoren auf die Reichweite bzw. die Ausbreitung gering ist.

Der Unterschied der Reichweite bei den durchgeführten Variationsrechnungen mit viskosen Dämpfungsfaktoren für eine felsige Geländeoberfläche ($R_T = 0,99$; $R_N = 0,53$) und mit viskosen Dämpfungsfaktoren für eine bewachsene Geländeoberfläche ($R_T = 0,8$; $R_N = 0,3$) betrug maximal 2 %. Der Grund für die geringe Beeinflussung durch viskose Dämpfungsfaktoren liegt darin, dass bei dem implementierten Algorithmus eine viskose Dämpfung nur beim Aufprall eines Partikels auf eine Wandoberfläche erfolgt. Bleibt die Absturzmasse jedoch ständig im Kontakt mit der Geländeoberfläche, so erfolgt die Dämpfung des Systems nur über den Reibungswinkel und den Rollwiderstand der kantigen Sturzblöcke. Bei der neuesten Version von PFC (PFC^{2D} 3.00) wird ein Materialmodell zur Verfügung gestellt, das neben einer viskosen Dämpfung bei einem Ball-Wand-Kontakt auch eine viskose Dämpfung bei einem Ball-Ball-Kontakt vorsieht.

6.3.3 Nichtviskose Dämpfungsfaktoren

Generell hat sich gezeigt, dass die nichtviskose Dämpfung des Systems niedrig gehalten werden muss, um den dynamischen Prozess eines Felsmassensturzes realistisch zu simulieren. Es hat sich gezeigt, dass für die Berechnung eines Felsmassensturzes, bei dem ein „Strömen“ der Sturzmasse simuliert werden soll, der nichtviskose Dämpfungsfaktor $bcont$ für den Ball-Ball-Kontakt auf einen Wert von 0,08 gesetzt werden muss. Für die Modellierung einzelner stürzender Blöcke, die nur selten in Kontakt mit anderen Blöcken sind, muss der nichtviskose Balldämpfungsfaktor $bcont$ erhöht werden (in der Größe von 0,15), um ein extremes „Aufspritzen“ der Partikel beim Aufprall zu verhindern.

Für die nichtviskose Dämpfung für den Ball-Wand-Kontakt $wcont$ hat sich gezeigt, dass der Wert für einen bewachsenen Untergrund zwischen 0,01 und 0,02 gewählt werden soll. Für einen felsigen Untergrund sollte der nichtviskose Wanddämpfungswert $wcont$ auf 0,1 gesetzt werden.

Die beste Übereinstimmung mit dem Bergsturz Frank Slide lieferten die Berechnungen bei einem nichtviskosen Wanddämpfungskoeffizienten $wcont = 0,1$ und einem nichtviskosen Balldämpfungskoeffizienten $bcont = 0,08$.

6.3.4 Lagerung, Zerbrecen der Blöcke

Beim Bergsturz Frank Slide wurde beobachtet, dass das Sturzmaterial in einer inversen Kornverteilung im Talboden abgelagert wurde. Das bedeutet, dass die kleinsten Sturzblöcke unterhalb der großen Sturzblöcke abgelagert wurden.

Dieses, auch bei anderen Bergstürzen beobachtete Erscheinungsbild der Ablagerung, konnte grundsätzlich auch bei den durchgeführten PFC Berechnungen beobachtet werden. Die beste Übereinstimmung mit der inversen Ablagerung in PFC erhält man, indem die Parallelbindungsfestigkeiten der Blöcke im untersten Bereich des Auslösegebietes so gesetzt werden, dass die Cluster schon bei der Generierung des Ausgangszustandes zerbrechen.

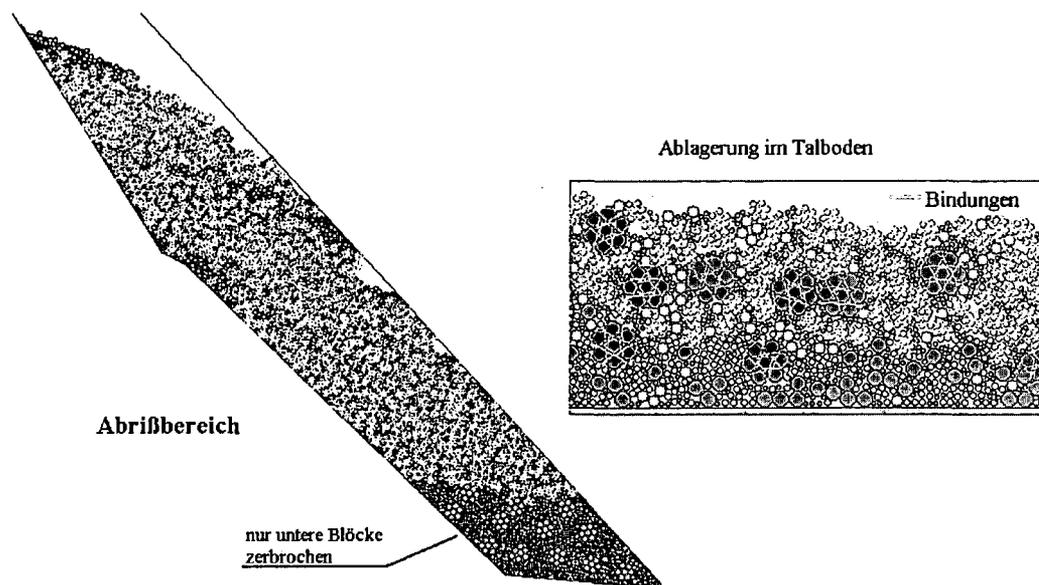


Abbildung 6.9: Inverse Ablagerung durch die Modellierung von zerbrochenen Sturzblöcken im unteren Teil des Ablösegebietes (Eckel, 2000).

Folgende Einflüsse der Parallelbindungsfestigkeiten konnten bei diesem Modell festgestellt werden:

Bei einer Parallelbindungsfestigkeit von $1e9 \text{ N/m}^2$ bleiben die Bindungen während des Sturzprozesses bestehen, bei einer Bindungsfestigkeit von $2e7 \text{ N/m}^2$ bleiben die Bindungen teilweise bestehen, und bei $5e6 \text{ N/m}^2$ brechen die Bindungen schon beim Auslösen des Massensturzes auf.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Reichweite des Bergsturzes in PFC^{2D} hat - wie sich aus den Berechnungen gezeigt hat - die Blockform. Eine Felsmasse rollt und rutscht wesentlich weiter, wenn die einzelnen Sturzblöcke eine Kugelform haben anstelle einer kantigen Blockform. Es hat sich gezeigt, dass eine Felsmasse, die teilweise zerbricht, zwar anfangs langsamer ist, aber dafür länger die Geschwindigkeit beibehält. Numerische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine teilweise zerbrochene Masse die größte Reichweite hat und zeitlich gesehen am längsten „fährt“.

7 Anwendungsbeispiele

Die im Anschluss angeführten Beispiele demonstrieren die Einsatzmöglichkeit der Methode bei der Abschätzung der Ausbreitung einer raschen sturzartigen Massenbewegung. Dabei werden die Erfahrungen, die zufolge der Aufschlagtests, dem Vergleich mit den Steinschlagsimulationsprogrammen und der Rückrechnung eines Bergsturzes gewonnen wurden, bei den folgenden Beispielen angewandt.

7.1 Anwendungsbeispiel - Eiblschrofen

7.1.1 Problemstellung

Am 10. Juli 1999 ereignete sich am Eiblschrofen der erste einer Reihe von Felsstürzen, die den Ortsteil Ried der Stadt Schwaz (Tirol, Österreich) gefährdeten. Der Dolomitzkörper des Eiblschrofen stellt ein Paket dar, das aus steil in den Hang einfallenden, plattenförmigen Großkluftkörpern aufgebaut ist. Der steil in den Hang einfallende Dolomitzkörper stützt sich talseitig auf Sandsteine mit Mergellagen, die ebenfalls steil in den Hang einfallen. Bergseitig werden die - wie Bücher im Regal kippenden - Dolomitblöcke von sackenden Schiefen überlagert und belastet. Die Komplexität der Situation wird zusätzlich durch bergmännische, etwa schichtflächenparallele Erzabbau, überwiegend aus dem Mittelalter, und unterirdische, kavernenartige Abbaue des Dolomitgesteins vergrößert (Abbildung 7.1).

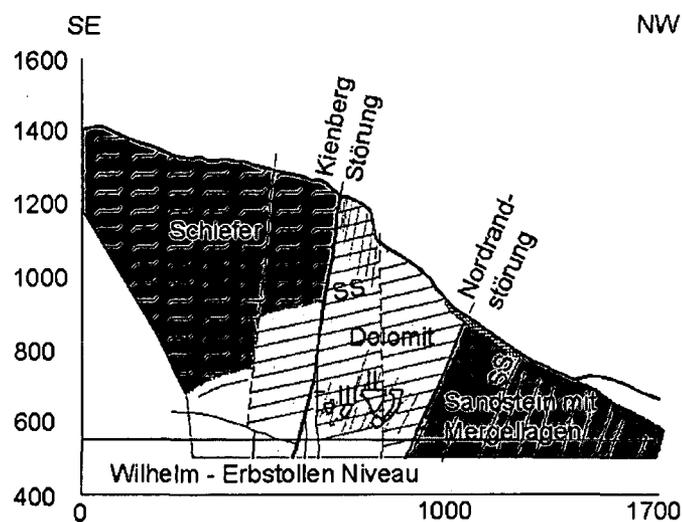


Abbildung 7.1: Schematisches Profil durch den Eiblschrofen (Brandner, 2000).

Wegen der Größe der absturzgefährdeten Felsmassen kamen als Schutzmaßnahmen nur zwei Dämme mit einer Kubatur von 130.000 m³ bzw. 50.000 m³ und mit einer Maximalhöhe von 25 m zur Schaffung von Auffangbecken in Frage. Zwecks Erzielung einer größtmöglichen Aufnahmekapazität wurde der größere Schutzdamm (Johannisdamm) am talseitigen Ende der Schutthalde situiert. Auf Grund der sehr lockeren Lagerung der anstehenden Anschüttung wurde es jedoch notwendig, den talseitigen Dammfuß etwa 30 m von der Böschungskante abzurücken (Abbildung 7.3 unten). Die Dammaufstandsfläche hatte eine Böschungsneigung von maximal 10 % in Richtung talauswärts. Der Damm hat eine bergseitige Neigung von 3:4 sowie eine talseitige Neigung von 2:3 (Abbildung 7.2).

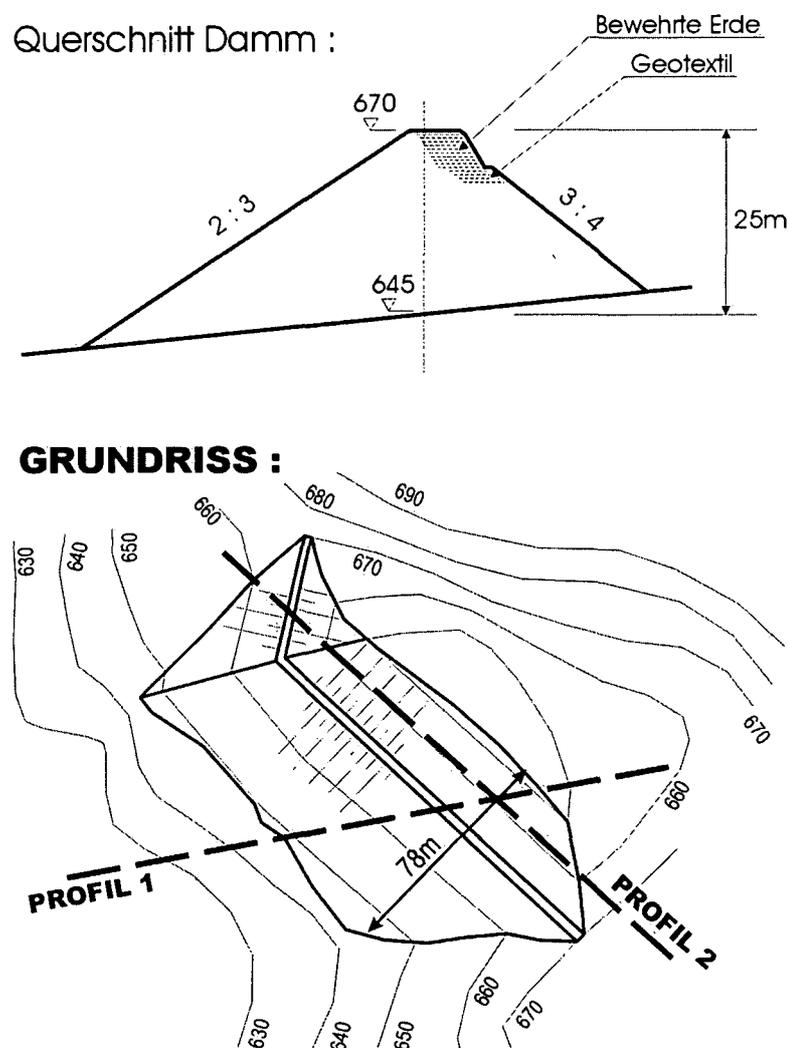


Abbildung 7.2: Johannisdamm; oben: Dammquerschnitt – Regelprofil; unten: Lageplan.

Gezielte Bodenerkundungen im Bereich der Dammaufstandsfläche ergaben sehr locker gelagertes Abraummateriale (nach der Korngrößenverteilung als Sande, Kiese und Steine zu

klassifizieren) bis in Tiefen von etwa 20 m. Die geophysikalischen Messungen mittels Reflexionsseismik bestätigten die Ergebnisse der Sondierungen mit der schweren Rammsonde (Abbildung 7.2).

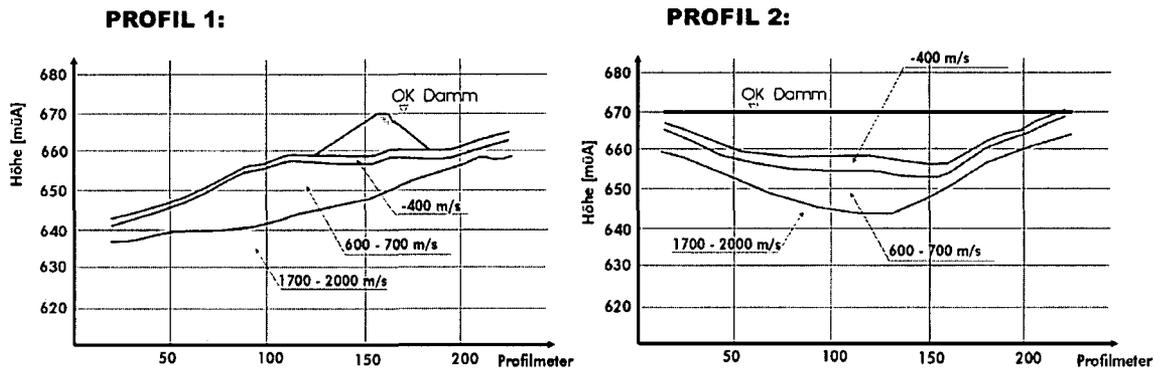


Abbildung 7.3: Seismische Profile durch die Aufstandsfläche des Johannisdamms.

7.1.2 Modellierung

Die in Kapitel 5 beschriebene Methode der Modellierung eines Felsmassensturzes mittels PFC^{3D} wurde auf den Eiblschrofen angewendet, um eine Ausbreitung der Felsmassen im Fall einer möglichen Felsablösung zu untersuchen (Roth et al., 2002). Das sich aus den derzeit am weitesten bergwärts gelegenen Rissen und dem derzeitigen Bewegungsmechanismus ergebende Ablöseszenario (Poisel et al., 2001) ergibt ein Volumen von $557 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (kompakt, d.h. ohne Auflockerungsfaktor). Dieses Ablöseszenario bildete die Grundlage der PFC^{3D} Untersuchung.

Ausgehend von einem Volumenmodell der Fa. Geobyte, in dem das Ablöseszenario und die beiden Dämme bereits lagerichtig im Raum festgelegt sind, wurden die Oberfläche sowie die Unterkante des Ablösegebietes trianguliert und in PFC eingelesen. Auch die Dämme wurden in dieser Untersuchung aus Wandelementen generiert. Die generierte Oberfläche, bestehend aus 2091 dreieckigen Wandelementen, wurde hinsichtlich der Dämpfung in 3 Bereiche unterteilt: Waldbereich (grün), Sturzbahn und Abrissgebiet (grau) sowie die Dämme (blau) (Abbildung 7.5).



Abbildung 7.4: Topographisch Übersicht des Gebiets Schwaz, Eiblschrofen. Der markierte (grün, grau) Bereich kennzeichnet das Untersuchungsgebiet.

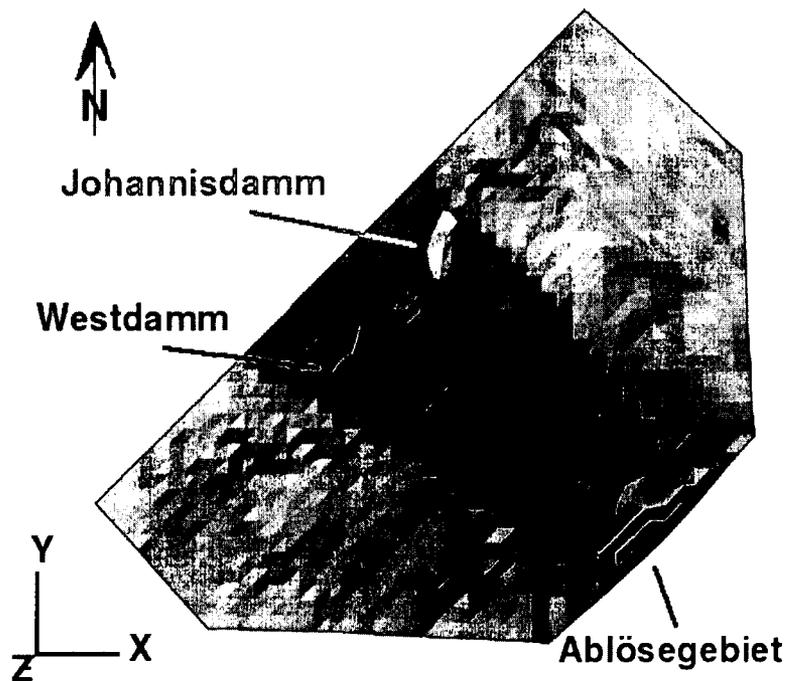


Abbildung 7.5: Grundriss des PFC^{3D} Untersuchungsgebietes: Waldbereich (grün), Sturzbahn und Ablösegebiet (grau, braun), Dämme (blau).

Eine Grundlage für die Wahl der geeigneten Dämpfungsfaktoren bildeten unter anderem die Ergebnisse der seismischen Untersuchungen der Dammaufstandsfläche.

Es wurden zwei Variationsrechnungen durchgeführt. Die gewählten Dämpfungsparameter für das Bewegungsverhalten zwischen der Sturzmasse und der Geländeoberfläche ist für Variante 1 in Tabelle 7.1, und für Variante 2 in Tabelle 7.2 angegeben.

Für die Dämpfung des Verhaltens der Sturzmasse selbst wurde in beiden Varianten $bcont=0,15$ gesetzt.

Tabelle 7.1: Gewählte Dämpfungsfaktoren für das Verhalten zwischen Sturzmasse und Geländeoberfläche; Variante 1.

Parameter	Wald	Sturzbahn	Dämme
R_T	0,8	0,9	0,85
R_N	0,3	0,53	0,4
μ_{wall}	0,839	0,15	0,75
$damp_r$	-	-	-
$wcont$	0,2	0,15	0,2

Tabelle 7.2: Gewählte Dämpfungsfaktoren für das Verhalten zwischen Sturzmasse und Geländeoberfläche; Variante 2.

Parameter	Wald	Sturzbahn	Dämme
R_T	0,8	0,9	0,85
R_N	0,3	0,53	0,4
μ_{wall}	0,839	0,577	0,75
$damp_r$	0,01	0,01	0,01
$wcont$	0,4	0,15	0,7

Die Abrissmasse wurde aus einer bereits desintegrierten Masse, bestehend aus 16900 Partikeln, modelliert. Die Ball- und Wandsteifigkeitsparameter (normal k^n , tangential k^s) wurden wie für ein „unbonded material“ mit $8e10$ Pa gewählt (Tabelle 7.3).

Die gewählten Partikelradien sind linear zwischen $R_{min}=0,5m$ und $R_{max}=3,5m$ verteilt und ergaben so Einzelblöcke (bei einer Dichte ρ von 2700 kg/m^3) zwischen 1,4 und 480 Tonnen.

Tabelle 7.3: Verwendete Mikroparameter für das Sturzmaterial

Parameter	Beschreibung	Wert
ρ	[kg/m ³] Partikeldichte	2700
μ	[-] Ballreibungskoeffizient	0,1
$b_{k_n} = b_{k_s}$	[Pa] Normale, tangentielle Ballsteifigkeiten	8,00E+10
$w_{k_n} = w_{k_s}$	[Pa] Normale, tangentielle Wandsteifigkeiten	8,00E+10

Der Ausgangszustand der Ablösemasse wurde für beide Varianten auf die folgende Art erzeugt. Um den in AutoCad festgelegten Bereich für das Ablöseszenario wurden vertikale Hilfswände generiert. In PFC^{3D} ist die Ballgenerierung nur innerhalb eines Quaders (Box) möglich, dessen Seitenflächen parallel zu der xy-, xz-, und yz-Ebene liegen müssen. Die Wandelemente in PFC^{3D} sind so definiert, dass es eine aktive und eine passive Seite gibt. Kreuzt ein Wandelement den für die Partikelgenerierung definierten Bereich (Box), so werden nur jene Partikel generiert die auf der aktiven Seite dieses Wandelementes liegen. Daher wurde eine Box für die Generierung der Partikel erzeugt, die innerhalb der Ablösefläche liegt. Nach Generierung der Partikel und unter Einwirkung der Gravitation wurden die Partikel auf die Ablösefläche fallen gelassen. Die vorhandenen Hilfswände verhindern dabei ein vorzeitiges Herabfallen der Partikelansammlung. Nach Konsolidierung der Partikel im Ablösebereich wird die restliche Geländeoberfläche durch Einlesen der Dreieckswandelemente geladen und die entsprechenden Wanddämpfungseigenschaften zugewiesen. Nach der Löschung der Hilfswände, die ein vorzeitiges Herabstürzen verhindern, beginnt die eigentliche Berechnung des Felsmassensturzes.

7.1.3 Ergebnisse

Die Abbildung 7.8 zeigt in einer Schrägansicht aus Norden die Ausbreitung der Felsmasse in der Mitte und gegen Ende des Sturzprozesses. Wie im unteren Bild ersichtlich, stürzt der Großteil der Felsmasse Richtung Johannisdamm und wird von diesem aufgehalten.

Die Rechendauer für die Variante 1 und für die Variante 2 betrug auf einem Pentium IV 1800 mit 1024MB Arbeitsspeicher 4 bzw. 3 Monate. Für eine Auswertung wurde jeweils nach einigen 10000 Berechnungsschritten Zwischenspeicherungen durchgeführt. Mithilfe dieser Zwischenspeicherungen wurde eine Auswertung jener Bälle durchgeführt, die über eine bestimmte definierte Grenze abfahren, und damit den Rinnenbereich bzw. den Auffangbereich verlassen (Abbildung 7.6). Diese durch Linien festgelegten Grenzen, dargestellt in Abbildung 7.6 sind:

- Grenze Dammbereich (P14 – P 15)
- Grenze zwischen Rinne und Wald im Osten (P12 – P13) - östliche Grenze zwischen Sturzbahn und Wald (P7 – P3) um 50 m nach Osten verschoben,
- Grenze zwischen Rinne und Wald im Westen (P2 – P8).

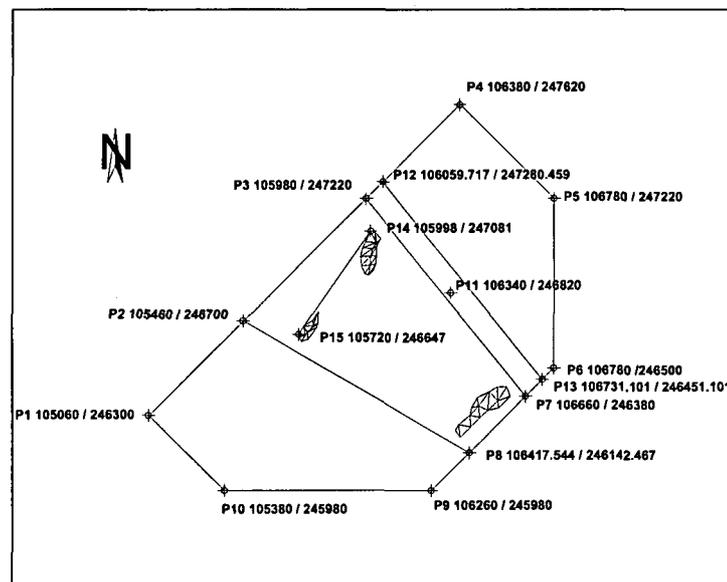


Abbildung 7.6: Grundriss des Berechnungsbereiches (inklusive koordinative Angabe der Modellgrenzen sowie der Grenzen zwischen den Homogenbereichen hinsichtlich der Oberflächendämpfung - Ablösebereich, Waldbereich, Rinnenbereich und Dammbereiche).

Jene Partikel, die die Modellgrenzen verlassen, werden nach ihrer Protokollierung automatisch gelöscht.

In Variante 1 werden 314 Sturzblöcke mit einem Gesamtvolumen von $\sim 13500 \text{ m}^3$ nördlich der Dammgrenze protokolliert. Ein Großteil dieser Masse überfährt diese Grenze zwischen den beiden Dammbereichen. 335 Sturzblöcke mit einem Gesamtvolumen von $\sim 11800 \text{ m}^3$ überfahren die Grenze im Osten. Davon verlassen 58 Sturzblöcke mit $\sim 2100 \text{ m}^3$ das Modell im Osten. Der Rest der Sturzblöcke (277 Stück) kehrt wieder in die Rinne oberhalb des Johannisdammes zurück. Im Westen verlassen 8 Sturzblöcke mit einem Volumen von $\sim 160 \text{ m}^3$ das Modell.

In Variante 2 bleibt fast die ganze Sturzmasse aufgrund der geänderten Dämpfung im Bereich der Sturzbahn liegen. Es werden 4 Sturzblöcke mit einem Volumen von 20 m^3 protokolliert, die das Modell zwischen den Dämmen verlassen.

Der Bereich zwischen den Dämmen der bei beiden Varianten von Sturzblöcken überfahren wird, ist dicht mit Wald bewachsen. Dieser Bewuchs konnte noch nicht mit entsprechenden Dämpfungsfaktoren berücksichtigt werden. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass bei Berücksichtigung dieses Waldbereiches keine Sturzblöcke die Dammgrenze überfahren werden.

Der Verlauf der kinetischen Energie der Sturzmasse ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Dabei wird in Variante 1 eine maximale kinetische Energie von 85 GJ erreicht. In Variante 2 stellt sich zufolge der größeren Dämpfung eine Reduktion der maximalen Energie um 55 % auf 47 GJ ein. Es zeigt sich somit, dass die Rotationsdämpfung, die bei Variante 2 verwendet wird, einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbreitung der Felsmasse hat.

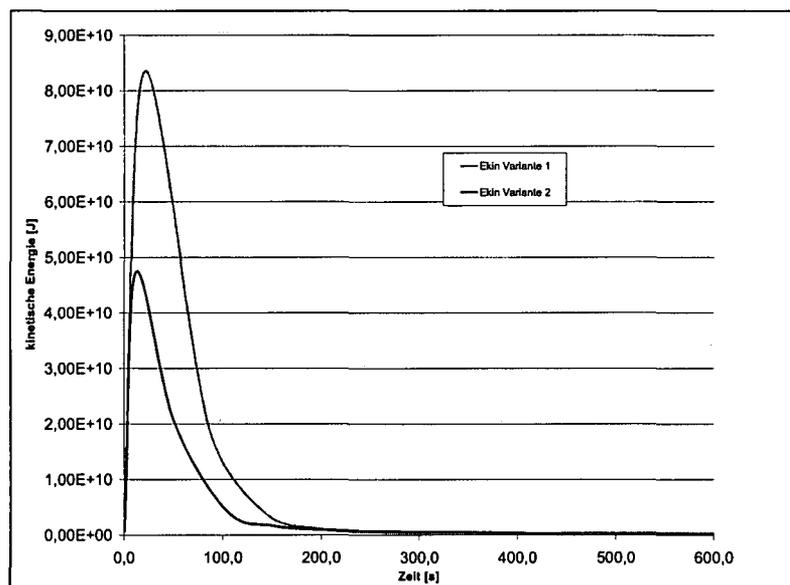


Abbildung 7.7: Verlauf der kinetischen Energie bei Variante 1 und Variante 2.

In Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 sind die Geschwindigkeitsvektoren nach einer rechnerisch ermittelten Sturzzeit von ca. 20 sec, ca. 200 sec und am Ende der Berechnung für die Variante 1 und Variante 2 dargestellt. Die angegebene Sturzzeit ist eine numerisch ermittelte Zeit und kann nicht direkt mit der tatsächlichen Dauer eines Bergsturzes verglichen werden. Sie kann jedoch verwendet werden, um die Momentaufnahmen von unterschiedlichen Berechnungen miteinander zu vergleichen. Die Sturzblöcke in der Berechnung Variante 1 erreichen die Auffangdämme mit Geschwindigkeiten von 15 - 25 m/s. Dies entspricht bei einer Masse von 240 t einer kinetischen Energie von $2,7e4$ - $7,5e4$ kJ. Im Vergleich dazu beträgt die Energie, die ein sehr gutes Steinschlagschutznetz ableiten kann etwa 2500 kJ.

In Variante 2 liegt die Geschwindigkeit jener Blöcke, die die Auffangdämme erreichen bei max. 15 m/s. Diese Angaben könnten die Grundlage für die Beurteilung des Verhaltens der Dämme bei einem Felsmassensturz sein.

Die Ergebnisse von Variante 1 und Variante 2 können aufgrund der Erkenntnisse der Parameterwahl aus vorangegangenen Untersuchungen als Grenzen betrachtet werden. Die Geschwindigkeit, die in Variante 1 für den Aufprall der Sturzblöcke auf die Dämme ermittelt wurde, kann als obere Grenze für eine Dammbelastung angenommen werden. Ebenso können die Maximalwerte für die kinetische Energie, die in Variante 1 und Variante 2 ermittelt wurden, als obere und untere Grenze gesehen werden. Unter Zugrundelegung dieser Grenzen zeigt die Analyse beider Varianten, dass die Hauptmasse der Absturzmasse beim untersuchten Ablöseszenario in Richtung des größeren Johannisdammes stürzt. Es zeigt sich, dass die Auffangbecken das Volumen der Sturzmasse aufnehmen können und die Schutzwirkung der Auffangdämme wird für dieses Ablöseszenario durch die PFC^{3D} Untersuchung bestätigt. Allerdings sind weiterführende Parametervariationen anzustreben, um noch einige Punkte abzuklären, die derzeit noch nicht näher untersucht werden konnten.

Ein Großteil der Masse überfährt in beiden Varianten die Rinnengrenze im Osten. Daher ist einerseits zu überprüfen, ob die gewählten Dämpfungsfaktoren die Auswirkung des Waldes hinreichend genau berücksichtigen, und andererseits ist zu überprüfen, ob die Schutzwirkung des Waldes in diesem Bereich ausreicht, oder ob in diesem Bereich zusätzliche Schutzmaßnahmen errichtet werden sollen.

Der Bereich zwischen den Dämmen wurde noch nicht mit den entsprechenden Dämpfungsfaktoren für einen Waldbereich modelliert. Bei Berücksichtigung des Waldes mit den entsprechenden Dämpfungsfaktoren sollte ein Überfahren dieses Bereiches durch einzelne Sturzblöcke nicht mehr auftreten. Da jedoch einige Blöcke in der Variante 1 diesen Bereich überfahren, bedeutet das, dass dieser Bereich höchstwahrscheinlich einer größeren Belastung durch einen Felsmassensturz ausgesetzt ist. Zusätzlich besteht die Möglichkeit des Überbordens im Westbereich des Johannisdammes durch einzelne Sturzblöcke. Daher sind auch für diesen Bereich Überlegungen hinsichtlich einer eventuellen Verstärkung der Schutzmaßnahmen (z.B. Errichtung von Schutznetzen) auf der Grundlage von weiterführenden Parametervariationen durchzuführen.

Diese Untersuchungen würden eine endgültige Beurteilung der Sicherheit der betroffenen Gebiete bei einem Felsmassensturz des untersuchten Ablöseszenarios ermöglichen.

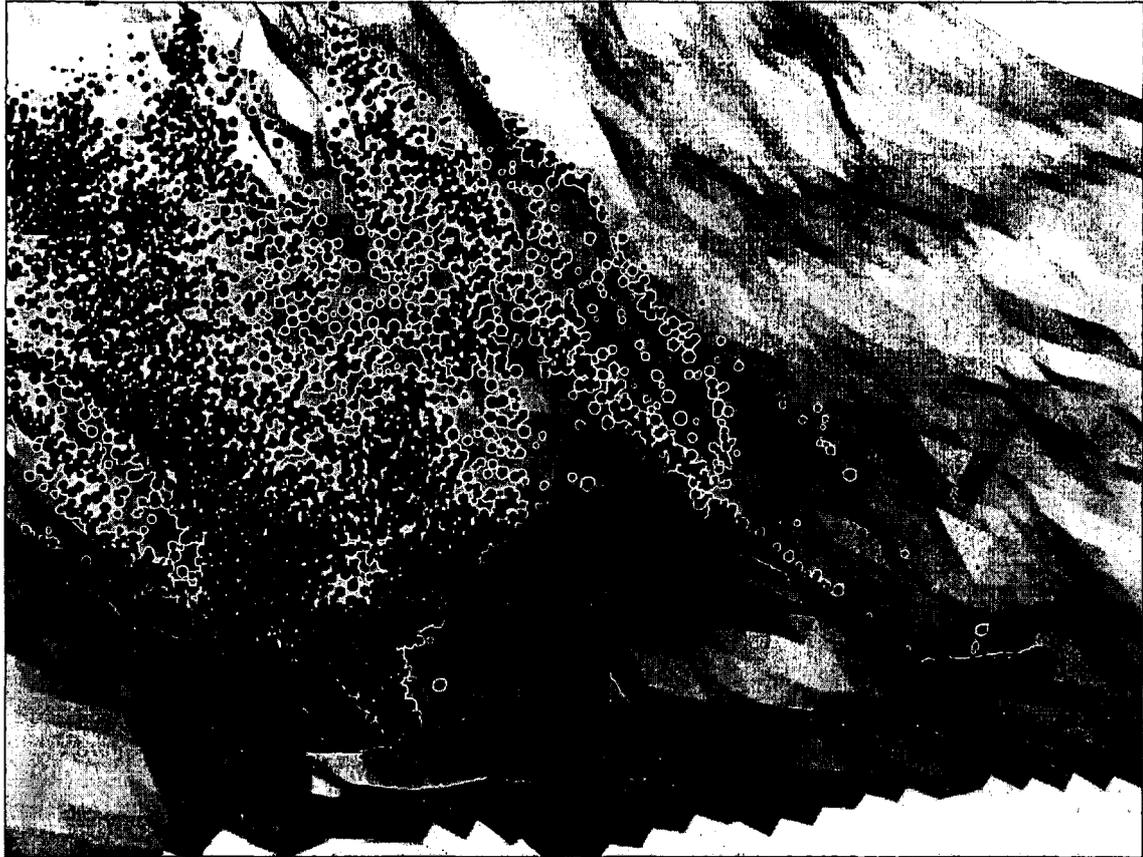


Abbildung 7.8: Ausbreitung des Felsmassensturzes während der Berechnung (Schrägansicht aus Norden); unten: Aufstau der Sturzmasse durch die Dämme.

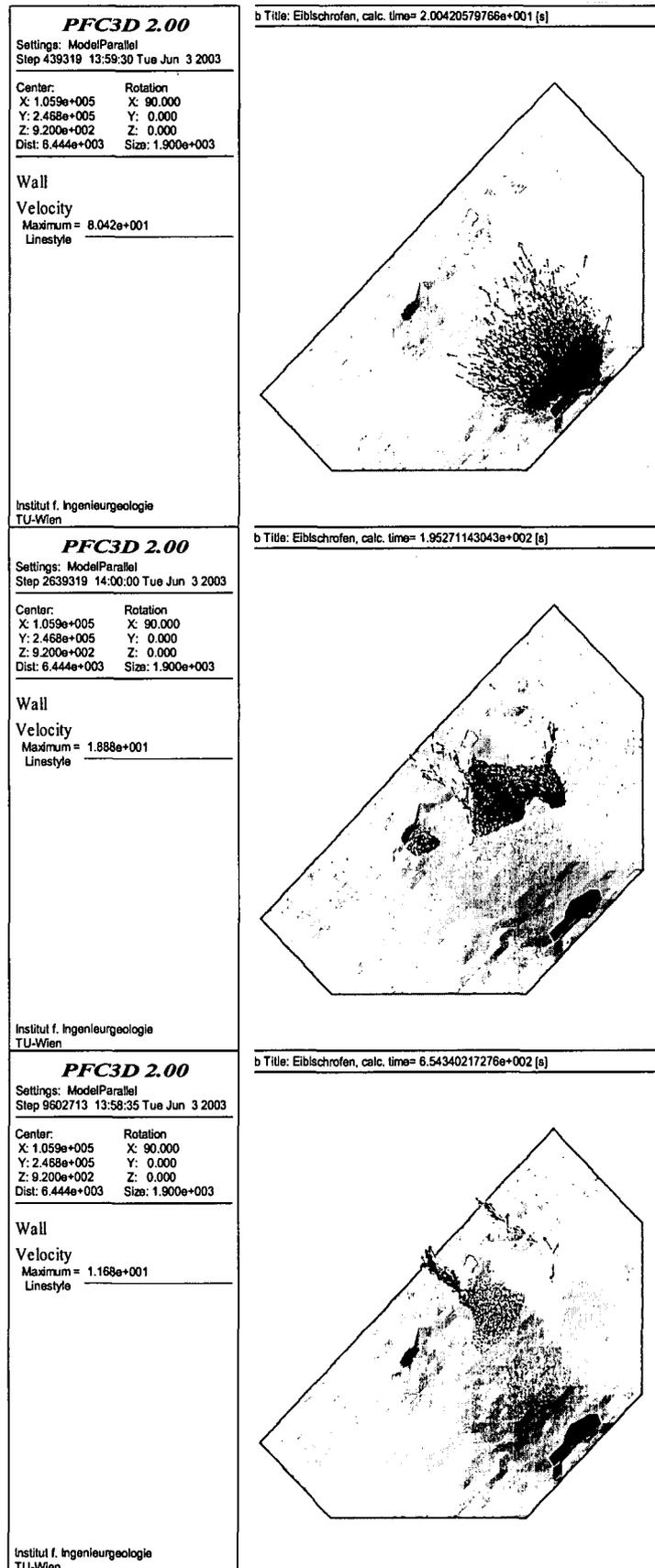


Abbildung 7.9: Geschwindigkeitsvektoren bei der Variante 1 nach 20 sec, 195 sec und 654 sec.

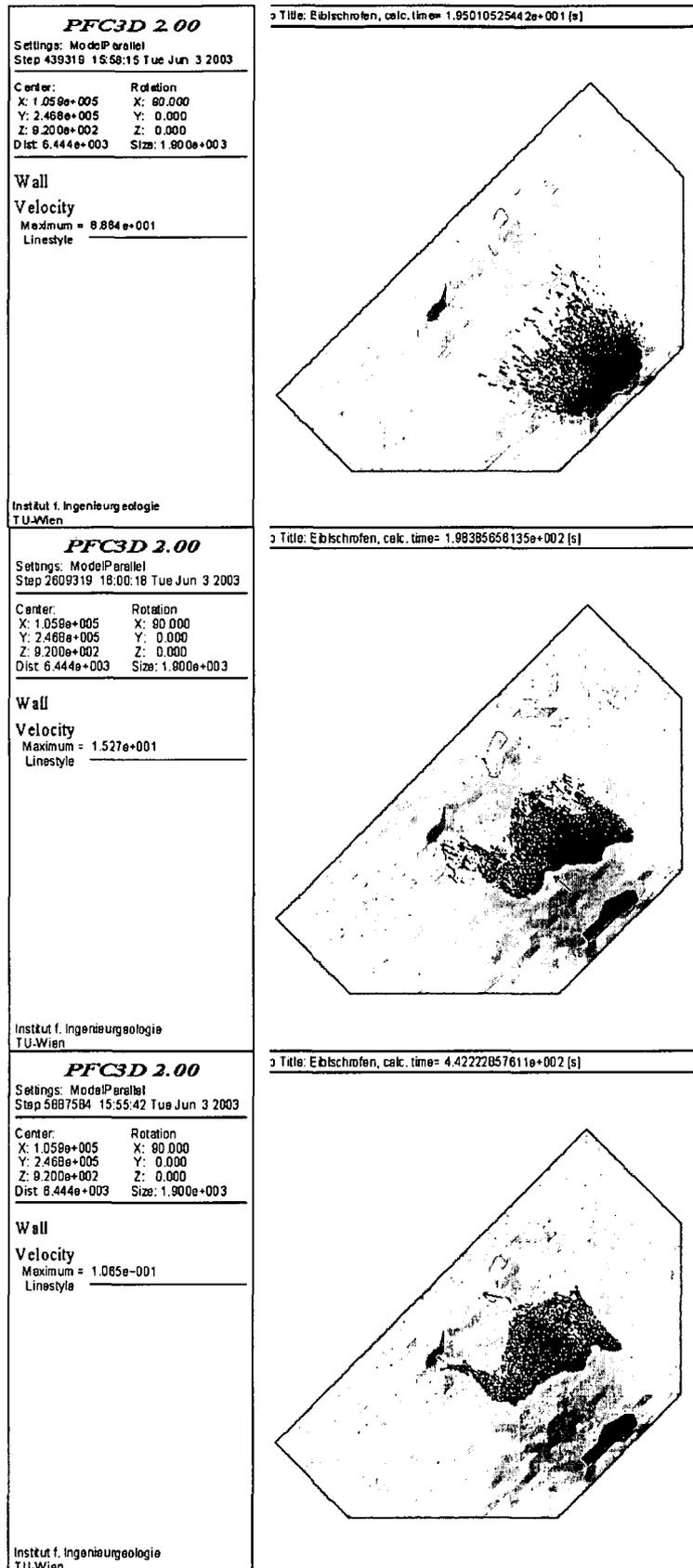


Abbildung 7.10: Geschwindigkeitsvektoren bei der Variante 2 nach 19,5 sec, 198 sec und 442 sec.

7.2 Anwendungsbeispiel - Massenbewegung Oselitzenbach

7.2.1 Problemstellung

Das Einzugsgebiet des Oselitzenbaches in Kärnten (Österreich) wird von zwei instabilen Talflanken (Reppwand-Gleitung, Schlanitzenalm-Gleitung) gefährdet. Besonders die Dynamik der Reppwand-Gleitung betrifft nicht nur die Baumaßnahmen der Wildbachverbauung, sondern auch die Sicherheit der Ortschaften Watschig und Tröpolach. Nach schweren Niederschlägen im September 1983 wurden mehrere Rutschungen im Bereich der Talzuschubstirn ausgelöst. Eine Verbauung des Baches konnte die Bewegungen im Bereich der Talzuschubstirn großteils verringern. Bewegungsmessungen im östlichen Teil des Talzschubes, die laufend durchgeführt werden, weisen noch immer auf eine Bewegung des Hanges hin. In Abbildung 7.11 ist der Lageplan des Gebietes des Oselitzenbaches und der untersuchte Bereich angegeben. Abbildung 7.13 zeigt die gemessenen Bewegungsraten im dem Zeitraum zwischen 07/1991 und 10/ 2000.

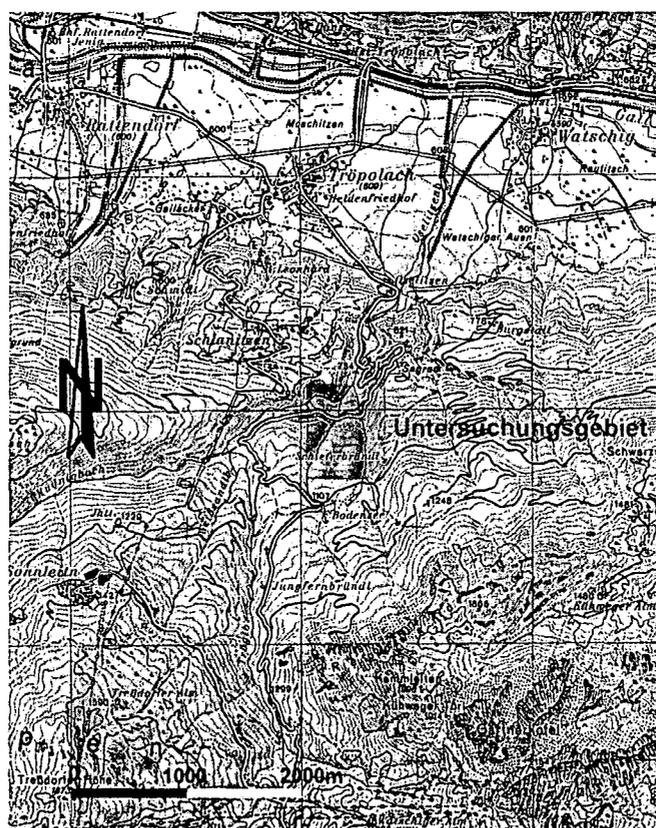


Abbildung 7.11: Topographische Übersicht des Gebietes Oselitzenbaches; der rote Bereich kennzeichnet das Untersuchungsgebiet.

Das untersuchte Gebiet besteht im Wesentlichen aus zwei Homogenbereichen: den Naßfeldschichten, die stark zerklüftet sind und aus Konglomeraten, Kalksteinen und Sandsteinen zusammengesetzt sind, und den Hochwipfelschichten, die eine höhere Festigkeit besitzen als die Naßfeldschichten und im Wesentlichen aus Sandstein mit tonigen Zwischenlagen bestehen.

Der Querschnitt der Refraktionsseismik durch das Untersuchungsgebiet zeigt einen dreischichtigen Aufbau der Naßfeldschichten (Weidner, 2000).

Der mittlere Bereich hat eine Mächtigkeit von etwa 15-30 m und ist nicht so stark zerklüftet wie die oberste Schicht. Die oberste Schicht hat eine Mächtigkeit von 10-15 m und ist stark zerklüftet. Die Festigkeit dieses Materials entspricht einem Lockergestein mit einer geringen Kohäsion. Die geringe Festigkeit dieser obersten Schicht dürfte die Hauptursache für die anhaltenden Bewegungen im Hangbereich sein (Weidner, 2000).

Aufgrund der andauernden Verschiebungen sollte ein angenommener plötzlicher Absturz der Felsmassen untersucht und die dadurch gefährdeten Bereiche abgeschätzt werden.

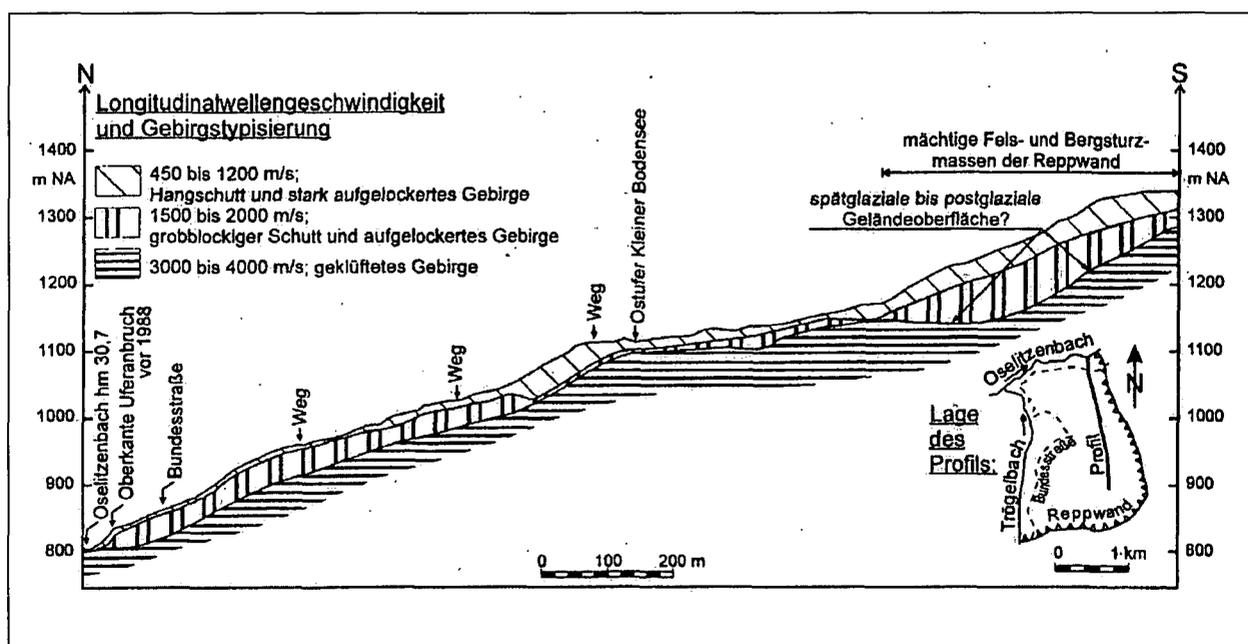


Abbildung 7.12: Schnitt der Refraktionsseismik durch das Untersuchungsgebiet (Weidner, 2000).

7.2.2 Modellierung

Für die Ermittlung des Auslösemechanismus und die Festlegung eines möglichen Absturzvolumens wurden numerische Untersuchungen mit dem kontinuumsmechanischen Finiten Differenzen Programm FLAC^{3D} (Itasca, 1997) durchgeführt. Dafür war es notwendig, den Grenzgleichgewichtszustand des Hanges mithilfe der Festigkeitsreduktionsmethode zu bestimmen (Roth, 1999). Basierend auf den Ergebnissen der FLAC^{3D} Untersuchungen, die mit den Verschiebungsdaten verglichen wurden (Abbildung 7.13), wurde

- ein charakteristisches Profil abgeleitet, in dem eine PFC^{2D} Berechnung durchgeführt wurde,
- die Grenzfläche des nicht bewegten Ablösegebietes für eine PFC^{3D} Untersuchung aus den Geschwindigkeitsverläufen der FLAC^{3D} Berechnungen abgeleitet. In den Geschwindigkeitsverläufen der FLAC^{3D} Berechnung konnte dabei eine deutliche Unterscheidung zwischen bewegttem und unbewegtem Material getroffen werden.

Die Abbildung 7.14 zeigt den Grundriss der größten Verschiebungen aus der FLAC^{3D} Berechnung und die Lage des gewählten PFC^{2D} Berechnungsquerschnittes. Der Verlauf der Verzerrungsgeschwindigkeiten („shear strain rate“) und der Verschiebungsvektoren in Abbildung 7.15 zeigt deutlich die Lage der Gleitfläche. Unterhalb dieser Gleitfläche sind die Verschiebungsvektoren 0. Bei einer Tiefenlage der Gleitfläche zwischen 25 und 30 m und einer ungefähren Grundrissfläche des bewegten Gebietes von ca. 47-52.000 m² konnte ein Absturzvolumen von ca. 450.000 m³ abgeschätzt werden. Dieses Volumen wurde als Grundlage für die PFC^{3D} Berechnung herangezogen.

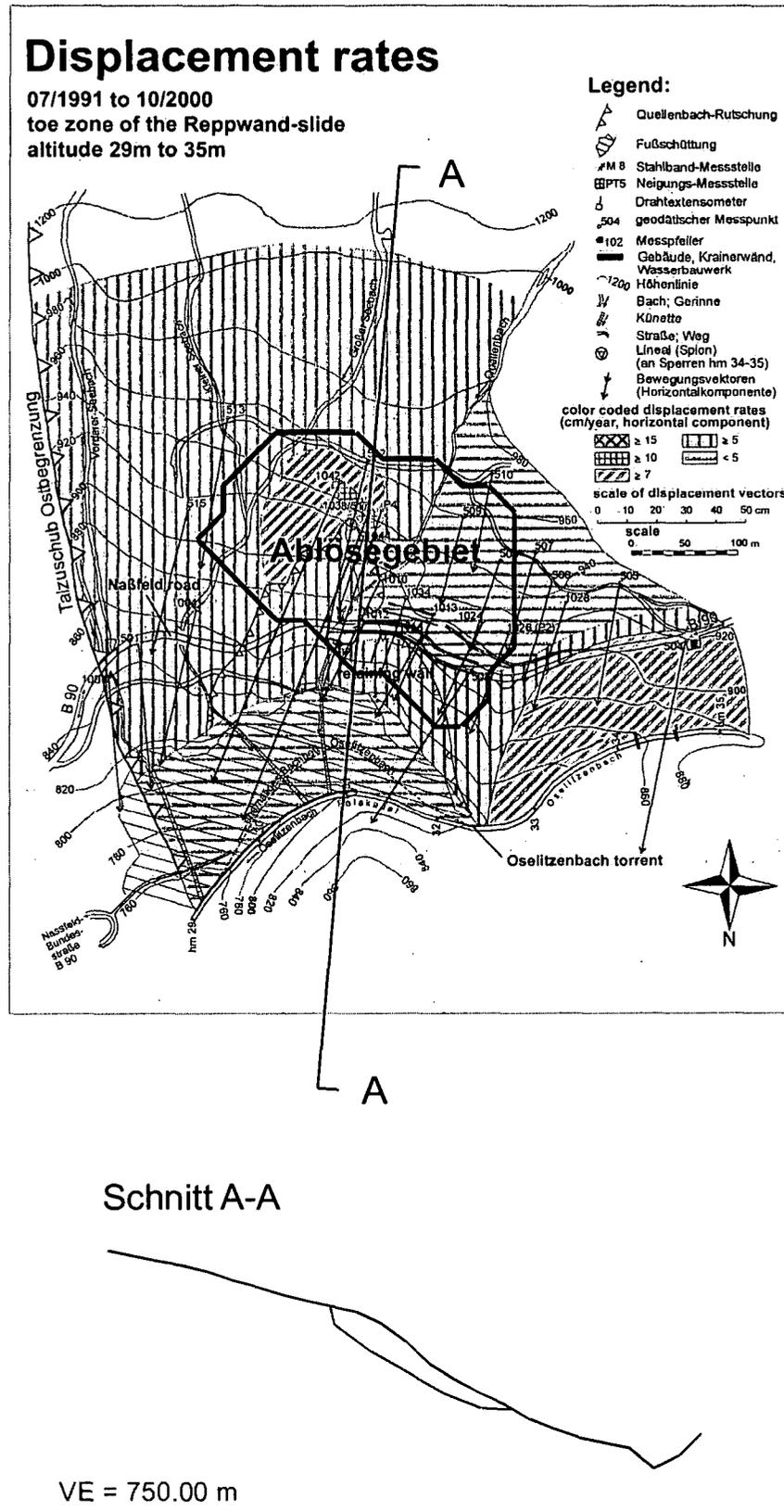


Abbildung 7.13: Gemessene Verschiebungsraten im Untersuchungsgebiet (Moser, 2001); Lage und Profil des gewählten Berechnungsquerschnittes (A-A).

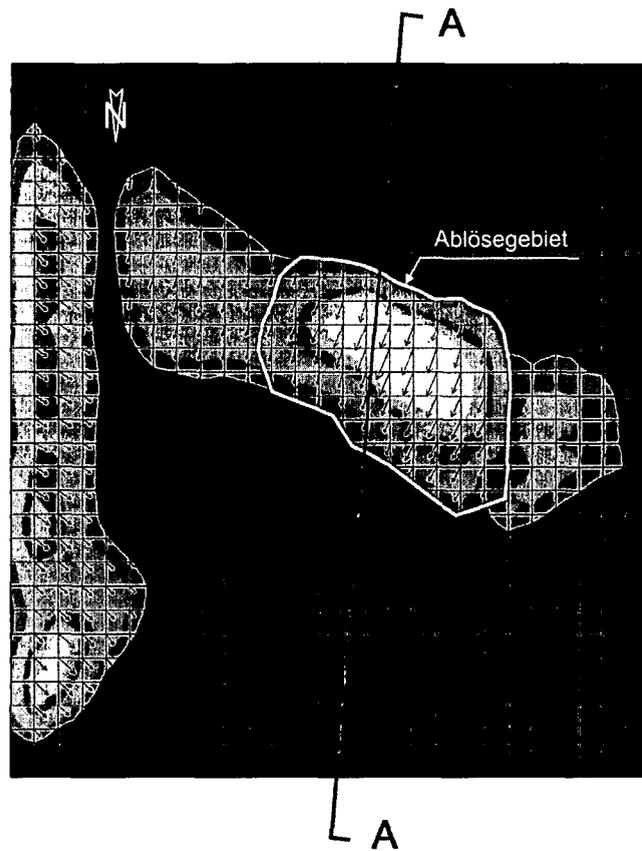


Abbildung 7.14: Grundrissplan der größten Verschiebungen in der FLAC^{3D} Berechnung; Schnitt A-A kennzeichnet die Lage des PFC^{2D} Berechnungsquerschnittes.

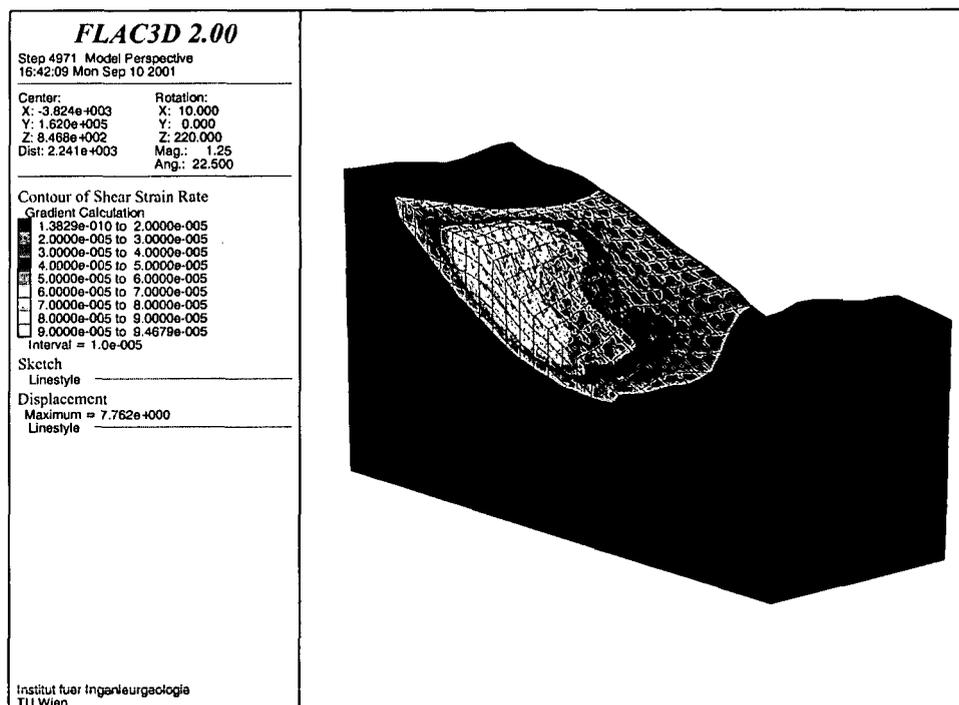


Abbildung 7.15: Verschiebungsvektoren und Verzerrungsgeschwindigkeiten der FLAC^{3D} Berechnung im Schnitt A-A.

7.2.3 PFC^{2D} Ergebnisse

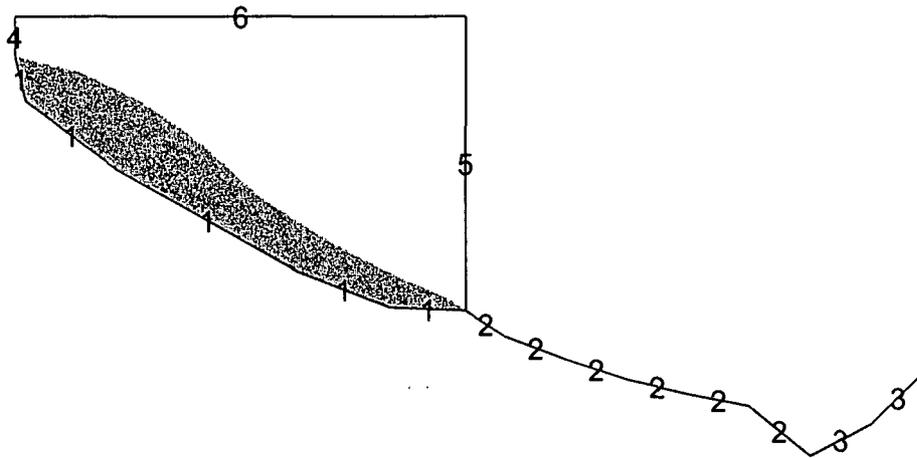


Abbildung 7.16: Ausgangszustand bei der PFC^{2D} Berechnung.

Abbildung 7.16 zeigt den Ausgangszustand der PFC^{2D} Berechnung. Die Wandelemente 1 in Abbildung 7.16 entsprechen der aus der FLAC^{3D} Berechnung abgeleiteten Gleitfläche. Die Wandelemente 2 und 3 entsprechen dem Profilverlauf der tatsächlichen Geländeoberfläche. Über diese Wandnummerierung wurden den Wandelementen die entsprechenden Oberflächendämpfungseigenschaften, wie sie in Tabelle 7.4 angegeben sind, zugewiesen. Die Oberflächeneigenschaften wurden dabei aufgrund der Erkenntnisse aus den Steinschlagtests und den bisher durchgeführten Berechnungen abgeschätzt. Eine Variation der Parameter konnte aufgrund der überaus langen Berechnungszeit nicht durchgeführt werden. Zur Generierung des Ausgangszustandes wurden zusätzliche Hilfswände (4, 5, 6) aufgestellt. Innerhalb der Box, die aus den Wandelementen 1, 4, 5 und 6 gebildet wird, wird eine Partikelansammlung generiert. Nach Konsolidierung der Partikel und Löschen der Bälle, die sich oberhalb der derzeit vorhandenen Geländeoberfläche befinden, und nach der Löschung der Hilfswände und Einschalten der Gravitation beginnt die eigentliche Felsmassensturz Berechnung unter Verwendung der implementierten Dämpfungsroutine für die viskose Dämpfung. Die Felsmasse besteht dabei aus ca. 6.900 Partikeln mit einer linearen Partikelverteilung mit einem minimalen Partikelradius von 0,25 m, einem maximalen Partikelradius von 0,5 m und einer Partikeldichte von 2.500 kg/m³.

Die Abbildung 7.17 zeigt den Endzustand der PFC^{2D} Berechnung. Die horizontale Ausbreitung der Masse beträgt 354 m. Der ursprüngliche Böschungswinkel ist 29-32°.

Tabelle 7.4: Für die PFC^{2D} Berechnung gewählten Dämpfungsparameter für die Oberflächeneigenschaften und die Sturzmasse.

Parameter	Ablösegebiet	Naßfeldschichten	Hochwipfelschichten
R_T	0,85	0,8	0,8
R_N	0,33	0,3	0,3
w_{cont}	0,15	0,2	0,2
μ_{wall}	0,1	0,364	0,364
b_{cont}	0,15	0,15	0,15
μ_{ball}	0,364	0,364	0,364

Nach der Felsmassensturzberechnung beträgt der Böschungswinkel 24° . Der Fahrböschungswinkel ist zufolge dieser Variation 23° . Die numerisch ermittelte Sturzdauer beträgt 209,05 sec. Abbildung 7.18 und Abbildung 7.19 zeigen den Zustand der Felsmasse nach einer Sturzdauer von 22,7 Sekunden und nach ca. 2 Minuten. Die angegebene Sturzzeit ist eine rein numerisch ermittelte Zeit und kann nicht direkt mit der tatsächlichen Dauer eines Bergsturzes verglichen werden. Sie kann jedoch verwendet werden, um die Momentaufnahmen von unterschiedlichen Berechnungen miteinander zu vergleichen. Die Ablagerung der Sturzmasse im Talbereich mit einer Ablagerungshöhe von ca. 14 m ist in Abbildung 7.20 dargestellt. Man erkennt ansatzweise an den verschütteten Talflanken wieder die in der Natur beobachtete inverse Lagerung des Sturzmaterials, bei der die kleinen Sturzblöcke unterhalb der großen Sturzblöcke abgelagert werden.

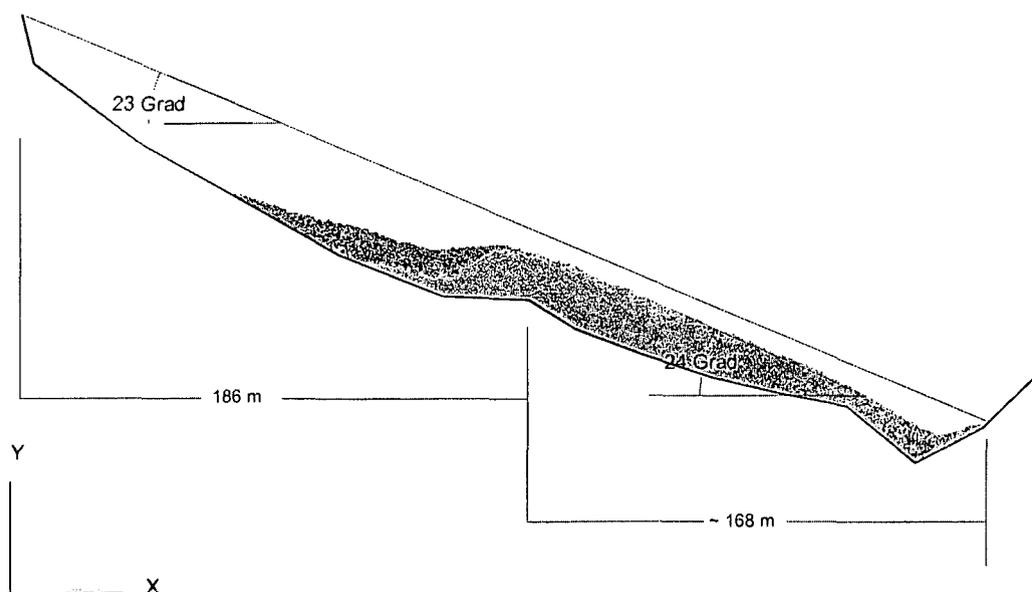


Abbildung 7.17: Endzustand der PFC^{2D} Berechnung.

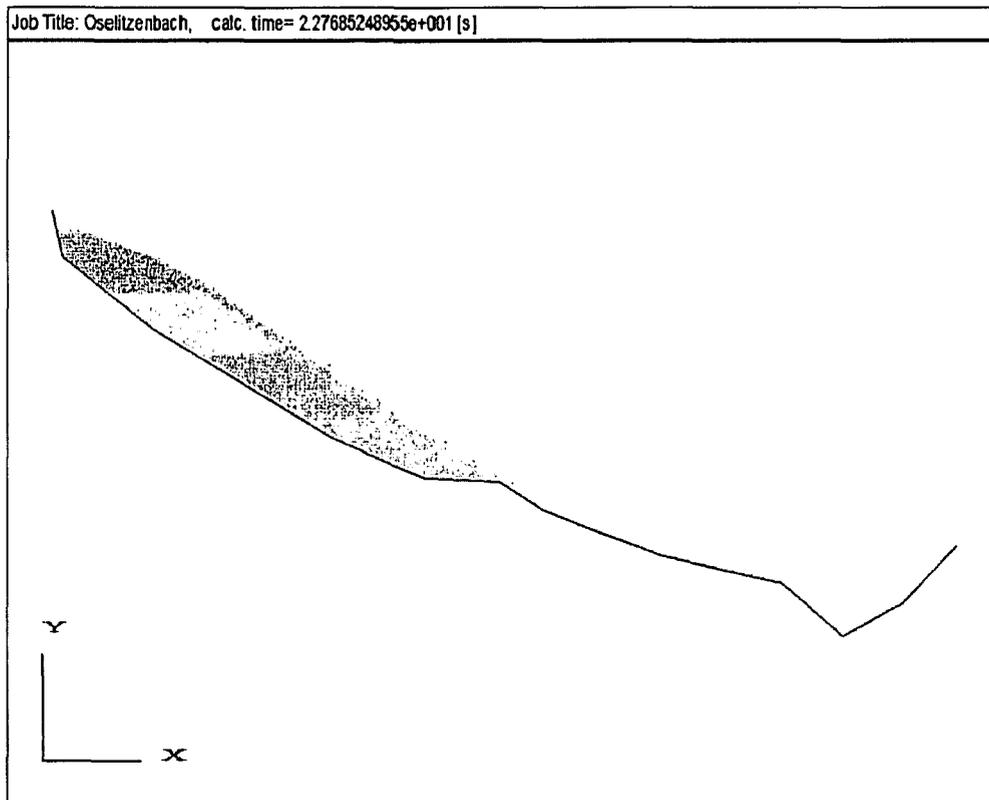


Abbildung 7.18: Felsmassensturzrechnung nach einer Berechnungszeit von 22,8 sec.

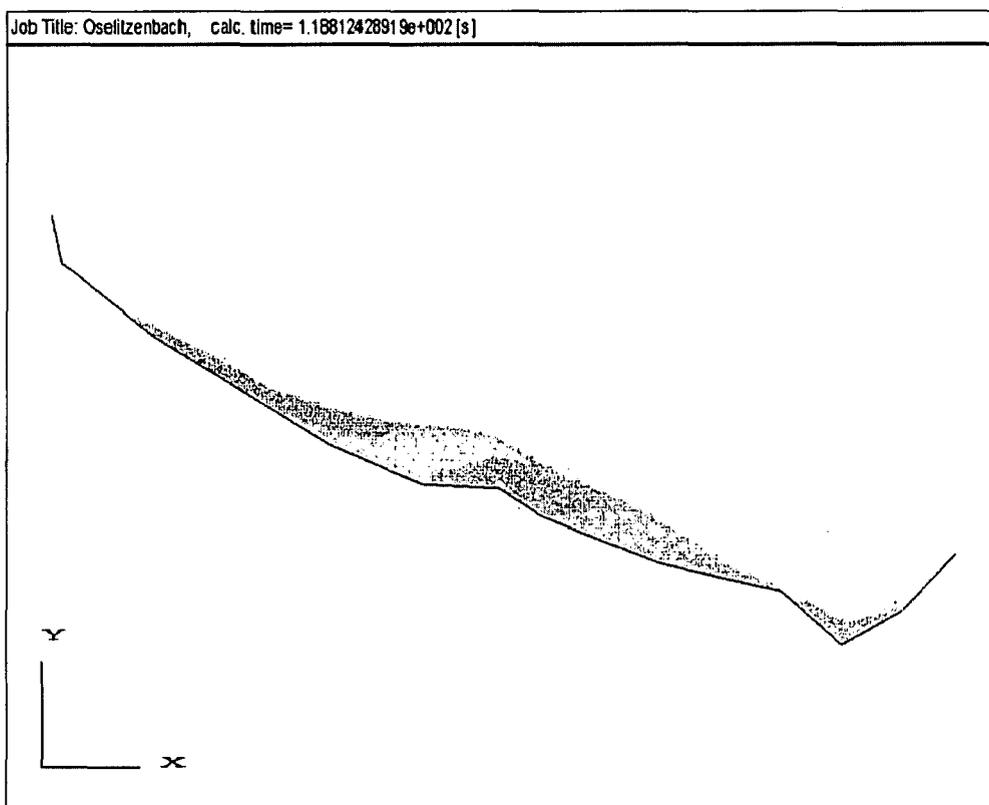


Abbildung 7.19: Felsmassensturzrechnung nach einer Berechnungszeit von 118,8 sec.

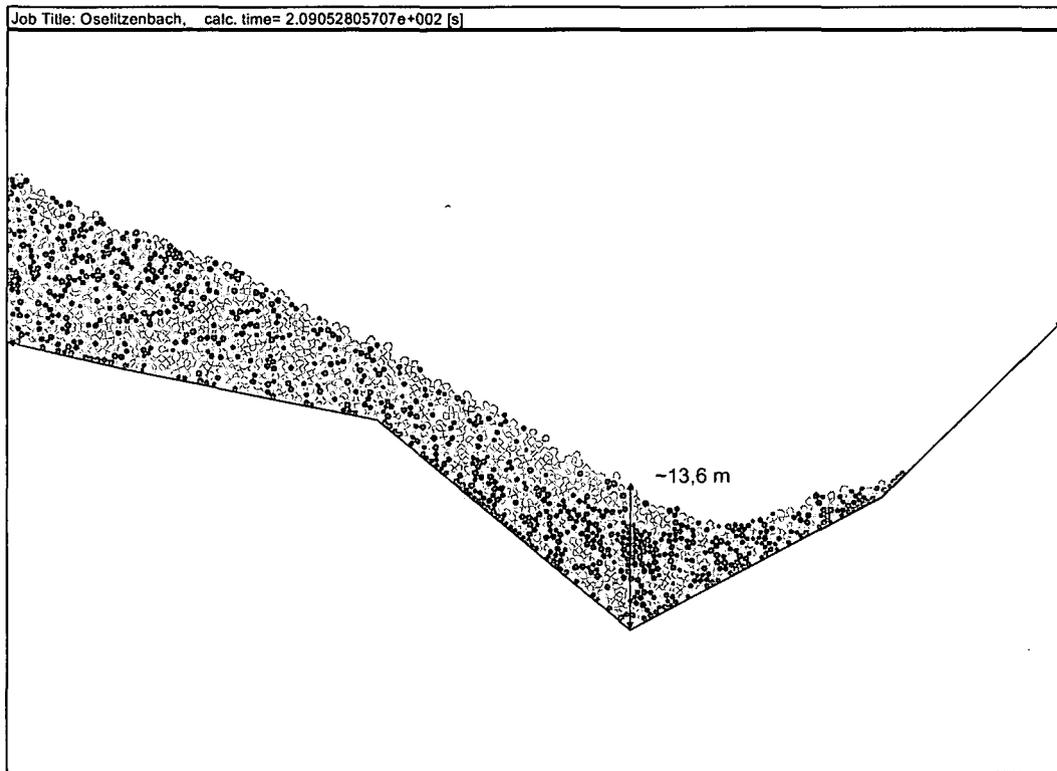


Abbildung 7.20: Ablagerung der Felsmassen im Talbereich.

7.2.4 PFC^{3D} Ergebnisse

Das Volumen der Absturzmasse wurde aus der FLAC^{3D} Berechnung mit ca. 450.000 m³ abgeschätzt. Die Grenzen des Ablösegebietes wurden ebenfalls aus der FLAC^{3D} Berechnung ermittelt und an den Rasterpunkten des FLAC^{3D} Netzes angegeben. Mithilfe eines Programms, das eine Oberfläche trianguliert, wurde eine PFC Skriptdatei erstellt, mit der die Wandelemente in PFC^{3D} geladen werden können. Allerdings müssen die Rasterdaten in einem regelmäßigen Abstand angegeben werden.

Wie in PFC^{2D}, wurden um das Ablösegebiet Hilfswände aufgestellt, die ein vorzeitiges Abstürzen der Felsmasse verhindern sollen. Innerhalb des Ablösegebietes wurde eine Partikelansammlung generiert. Die Felsmasse besteht dabei aus ca. 13.200 Partikeln mit einer linearen Partikelverteilung, einem minimalen Partikelradius von 0,5 m, einem maximalen Partikelradius von 3,0 m und einer Partikeldichte von 2.500 kg/m³. Nach Konsolidierung der Partikel, nach dem Löschen der Hilfswände und dem Einschalten der Gravitation beginnt die eigentliche Felsmassensturz Berechnung unter Verwendung der implementierten Dämpfungsroutine für die viskose Dämpfung.

Die Parameter für die verwendeten Oberflächeneigenschaften (Tabelle 7.5) wurden entsprechend den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Berechnungen abgeschätzt. Da die

Rechenzeit für eine dreidimensionale Felsmassensturzberechnung bis zu einigen Monaten betragen kann, konnten noch keine Variationsrechnungen durchgeführt werden.

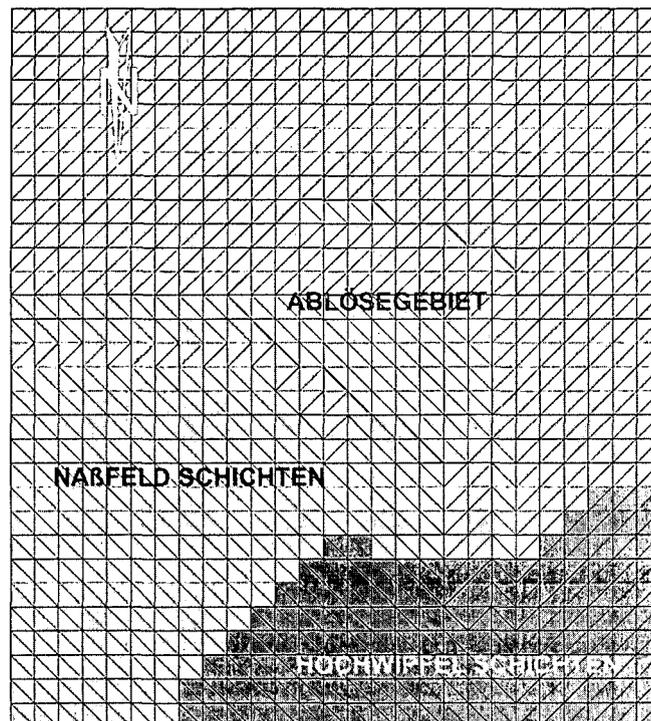


Abbildung 7.21: Grundrissplan der dreieckigen PFC^{3D} Wandelemente.

Tabelle 7.5: Für die PFC^{3D} Berechnung gewählten Dämpfungsparameter für die Oberflächeneigenschaften und die Sturzmasse.

Parameter	Ablösegebiet (wall id 1)	Naßfeld- schichten (wall id 2)	Hochwipfel- schichten (wall id 3)
R_T	0,85	0,8	0,8
R_N	0,33	0,35	0,3
$wcont$	0,1	0,2	0,2
μ_{wall}	0,1	0,364	0,364
$bcont$	0,15	0,15	0,15
μ_{ball}	0,364	0,364	0,364

Die maximale Geschwindigkeit, die sich zufolge der Felsmassensturzberechnung ergibt, beträgt ca. 25-29 m/sec. Die numerisch ermittelte Sturzdauer beträgt 240,0 sec (4 min). Die in PFC^{3D} ermittelte Sturzdauer liegt damit in etwa in dem Bereich der in PFC^{2D} ermittelten Sturzdauer von ~3,5 min. Abbildung 7.24 und Abbildung 7.25 zeigen den Zustand der Felsmasse nach einer Sturzdauer von 16,5 Sekunden und nach 1 Minute.

Abbildung 7.26 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren zu Beginn, in der Mitte und gegen Ende der Berechnung. Man erkennt aus der Analyse der Geschwindigkeitsvektoren, dass die Felsmasse zuerst direkt in nördlicher Richtung auf den Oselitzenbach und den Gegenhang zuströmt. Anschließend, nach dem Erreichen des Gegenhanges, beginnt die Felsmasse talauswärts zu strömen.

Die Ausbreitung der Felsmasse wurde für einige Richtungen (Abbildung 7.22) ermittelt und in Tabelle 7.6 angegeben. Die größte Reichweite der Felsmasse ergab sich dabei mit 573 m. Ein Vergleich der Ausbreitung aus der PFC^{3D} Berechnung mit der Ausbreitung aus einer dreidimensionalen Berechnung mittels des Steinschlagsimulationsprogrammes ROTOMAP (geo&soft, 2003) lieferte vergleichbare Ergebnisse (Abbildung 7.23). Die von der Felsmasse bedeckte Fläche kann zufolge PFC^{3D} mit ca. 127.000 m² abgeschätzt werden. Die mit ROTOMAP ermittelte, bedeckte Fläche liegt bei rund 135.000 m² und liegt damit im Bereich der von PFC^{3D} ermittelten Fläche. Ein weiterer Vergleich wurde mit dem Programm DAN (Hung, 1995) durchgeführt (Poisel et al., 2002). Das DAN Computermodell ist ein Programm, das einen Bergsturz mittels kontinuumsmechanischer Betrachtung auf der Basis der Lagrangschen Bewegungsgleichungen in 3 Dimensionen modelliert. Allerdings muss bei diesem Programm die seitliche Ausbreitung als Eingabegröße angegeben werden. Beim DAN-Programm besteht die Möglichkeit, dem Absturzmaterial unterschiedliche rheologische Modelle zuzuweisen. Ausgehend von der in ROTOMAP ermittelten seitlichen Ausbreitung und dem in FLAC^{3D} ermittelten Ablösevolumen lieferte der DAN Code – abhängig vom angenommenen Porenwasserdruck – vergleichbare Werte für die Reichweite des Felsmassensturzes. Die mittels DAN Code ermittelte Reichweite bei einem Faktor für den Porenwasserdruck von 0,1 betrug 597 m. Die ermittelte Maximalgeschwindigkeit in DAN lag mit 21 m/s unter dem Wert von 29 m/s, der von PFC für die maximale Geschwindigkeit ermittelt wurde.

Es ist daher davon auszugehen, dass bei einer Ablösung des derzeit am stärksten bewegten Bereiches die Naßeld – Bundesstraße auf eine Länge von 400 m zerstört bzw. bis zu 7 m verschüttet wird. Der Oselitzenbach wird auf einer Länge von 460 m bis zu 14 m hoch verschüttet und daher zurückgestaut. Dies würde die Gefahr eines Murenereignisses der Orte Tröpolach und Watschig einschließlich der landwirtschaftlich genutzten Flächen bedeuten. Generell liefert der Vergleich mit den Programmen DAN und ROTOMAP weitere Erkenntnisse über die Wahl von geeigneten Parametern für die Modellierung. Auch dieser

Vergleich zeigt somit, dass eine realistische Modellierung der Ausbreitung eines Felsmassensturzes mit PFC möglich ist.

Tabelle 7.6: Ermittelte Ausbreitung für die in Abbildung 7.22 angegebenen Strecken.

Messstrecke	Distanz [m]
D1	346
D2	397
D3	573
D4	556
W2	377

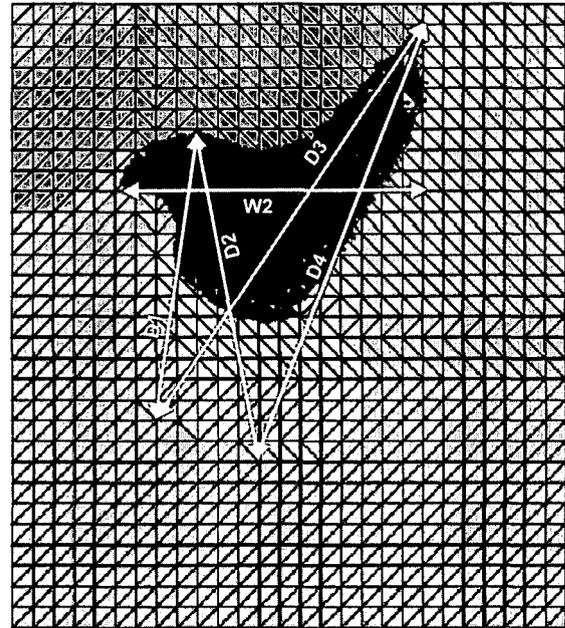


Abbildung 7.22: Messstrecken, für die die Reichweite des Felsmassensturzes bestimmt wurde.

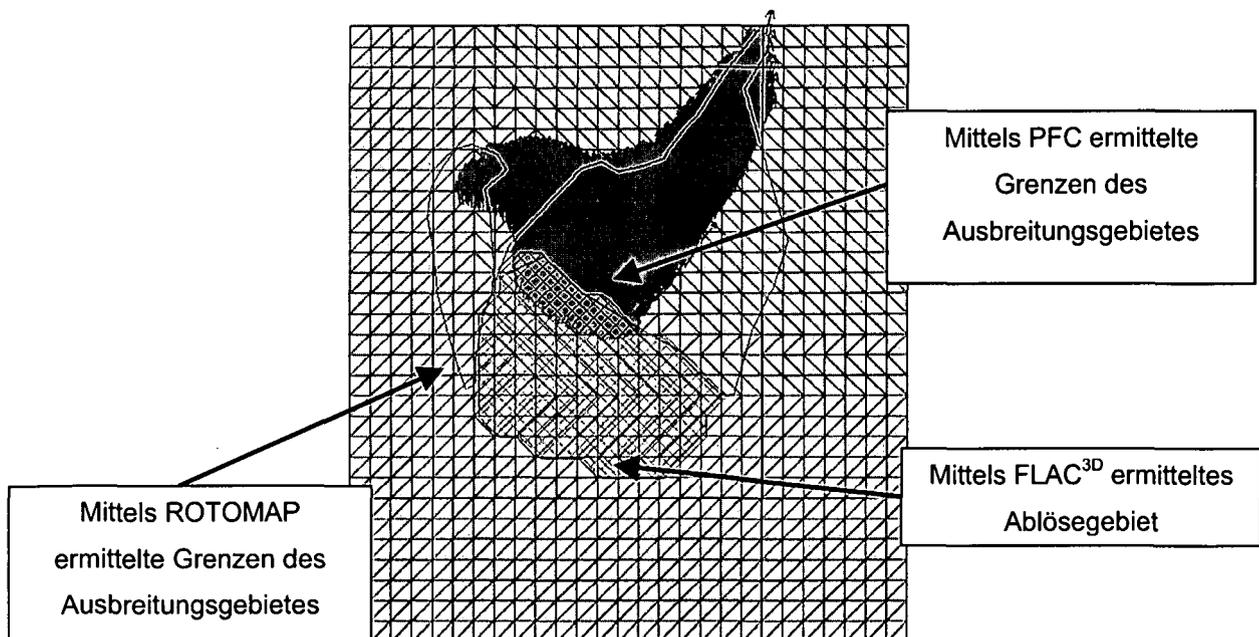


Abbildung 7.23: Vergleich der ermittelten Ausbreitung zwischen ROTOMAP und PFC^{3D}.

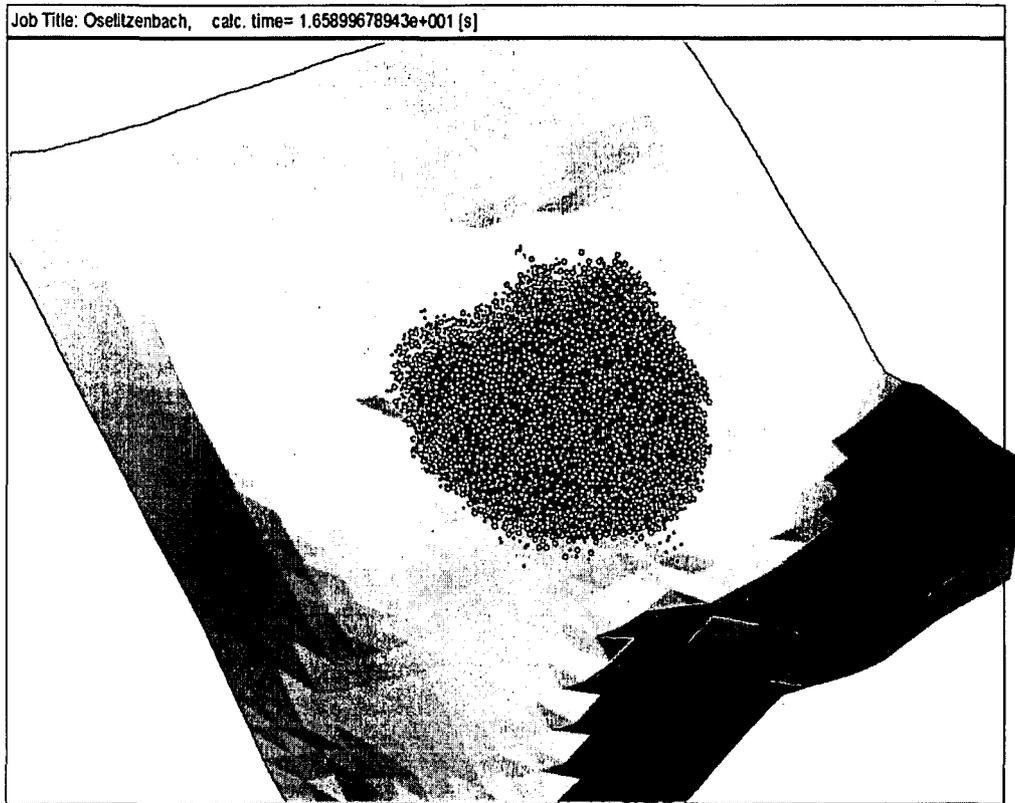


Abbildung 7.24: Felsmassensturzberechnung nach 16,5 sec.

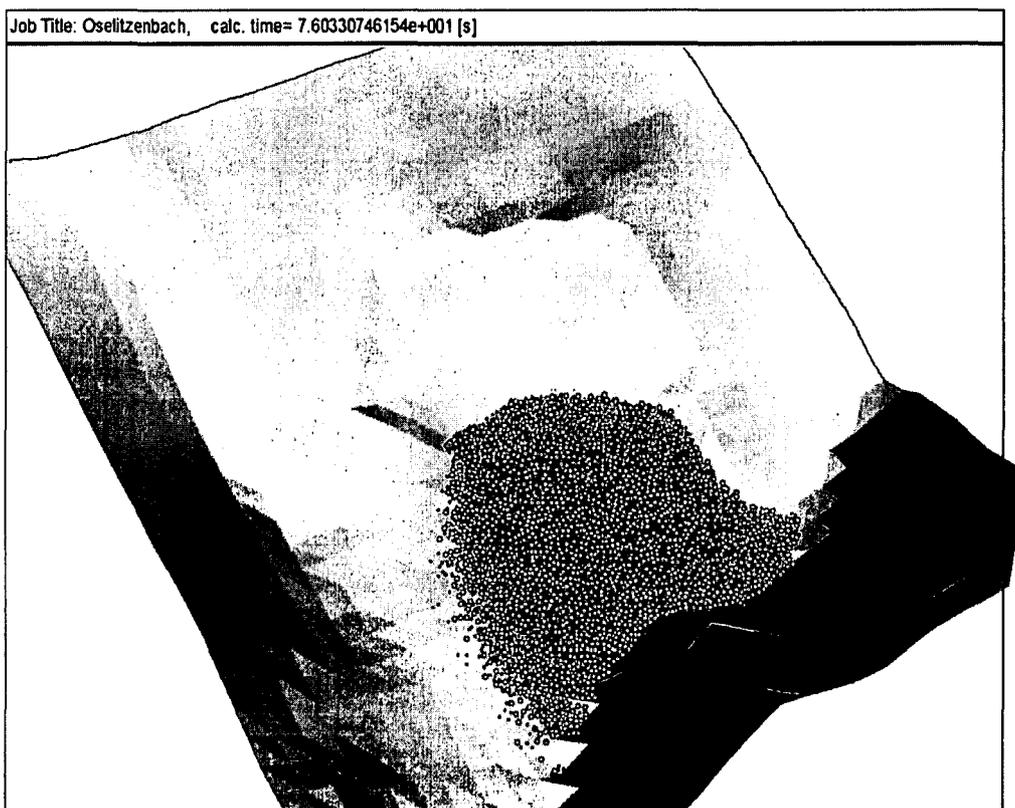


Abbildung 7.25: Felsmassensturzberechnung nach 76 sec.

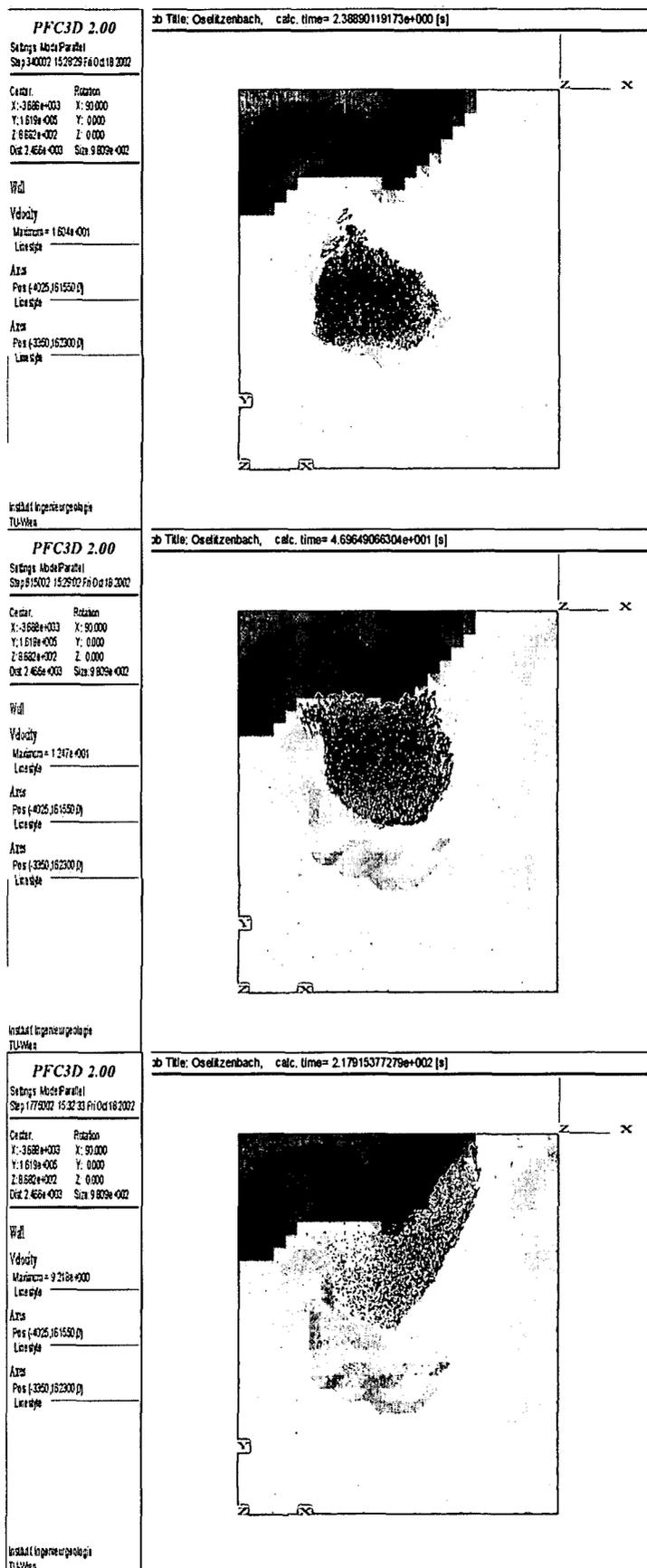


Abbildung 7.26: Geschwindigkeitsvektoren nach 2 sec, 46 sec und 217 sec.

8 Interpretation, Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Referenz- und Anwendungsbeispiele zeigen, dass PFC eine geeignete Methode ist, Felsmassenstürze zu modellieren. Anhand der durchgeführten Aufschlagtests und des Vergleichs mit den Steinschlagsimulationsprogrammen können die Parameter, die für eine realistische Modellierung eines Steinschlages notwendig sind, abgeschätzt werden. Für die Modellierung eines Felsmassensturzes liefern die Rückrechnung eines Bergsturzes und Anwendungsbeispiele wesentliche Erkenntnisse für die Wahl der Parameter, die für eine realistische Modellierung eines Felsmassensturzes notwendig sind.

Die bisherigen Berechnungen haben gezeigt, dass sich die in PFC^{2D} und PFC^{3D} für die Modellierung eines Felsmassensturzes notwendigen Parameter kaum voneinander unterscheiden. Weiterführende Untersuchungen, speziell Rückrechnungen, sind jedoch notwendig, um eine noch bessere Kalibrierung der Parameter zu erreichen und damit die Parameter für eine Prognose noch besser eingrenzen zu können. Generell können die Parameter und Faktoren, die für die Modellierung eines Felsmassensturzes entscheidend sind, wie folgt eingeteilt werden:

Parameter und Faktoren, die

- 1) das Verhalten zwischen den Blöcken und der Geländeoberfläche beeinflussen (Ball-Wand-Kontakt),
- 2) das Verhalten der Blöcke zueinander beeinflussen (Ball-Ball-Kontakt), und die
- 3) das Verhalten der Blöcke im freien Fall (in Form einer Wurfparabel) beeinflussen (kein Kontakt).

Parameter, die das Verhalten zwischen den Blöcken und der Geländeoberfläche beeinflussen, sind:

R_N	– Normaler viskoser Dämpfungsfaktor = normaler Restitutionskoeffizient
R_T	– Tangentialer viskoser Dämpfungsfaktor = tangentialer Restitutionskoeffizient
$wcont$	– Nichtviskoser Dämpfungsfaktor beim Ball-Wand-Kontakt

- φ_{wall} – Wandreibungswinkel
 $damp_r$ – Rotationsdämpfungsfaktor (in PFC^{3D})

Die viskosen Dämpfungsfaktoren R_T und R_N haben bei der Modellierung von Steinschlägen (Sturz von Einzelblöcken) einen wesentlichen Einfluss. Die Werte für R_T und R_N liegen dabei in der Größenordnung, wie sie auch bei Steinschlagsimulationsprogrammen zufolge der unterschiedlichen Geländeoberflächen verwendet werden ($R_T = 0,5-0,99$; $R_N = 0,3-0,5$). Im Gegensatz dazu haben die viskosen Dämpfungsfaktoren bei der Modellierung eines Felsmassensturzes nur einen geringen Einfluss auf die Reichweite der Massenbewegung. Die Faktoren, die einen großen Einfluss auf die Reichweite und den Energieverlauf eines mittels PFC modellierten Felsmassensturzes haben, sind der Reibungswinkel der Geländeoberfläche (φ_{wall}) und der nichtviskose Dämpfungsfaktor für den Ball-Wand-Kontakt ($wcont$). Für diesen Faktor sollten für die Modellierung von realistischen Bewegungsbahnen, abhängig von der Art der Geländeoberfläche (felsig bis bewachsen), Werte von 0,08-0,3 angesetzt werden. Die nichtviskose Dämpfung ($wcont$) dämpft eine beschleunigte Bewegung. Wird für $wcont$ ein Wert in der Größenordnung des default-Wertes von 0,7 angenommen, so erfährt der Sturzblock eine zu starke Dämpfung, sodass der Ball kaum von der Geländeoberfläche abspringt.

Die Berechnungen ergaben, dass für die Modellierung eines realistischen Fahrböschungswinkels, wie er bei Bergstürzen auftritt, ein niedriger Wandreibungswinkel von 2-10° anzusetzen ist. Die Verwendung eines niedrigen Reibungswinkels ist in guter Übereinstimmung mit der Theorie von Hsü (1975). Durch die große Staubentwicklung bei einem Felsmassensturz wird die Sturzmasse verflüssigt. Diese Verflüssigung des Felsmaterials durch den Staub verringert nach Hsü (1975) den Reibungswinkel. Dieser niedrige Reibungswinkel bewirkt jedoch in den PFC Berechnungen, dass die Masse nur wenig gebremst wird und somit langsam und lange weiterfährt. Ein abruptes Stehenbleiben der Felsmasse, wie es von Heim (1932) beschrieben wurde, ist auf diese Weise nicht modellierbar.

Mithilfe der in PFC^{3D} eingeführten Rotationsdämpfung kann ebenfalls die Reichweite der stürzenden Felsmasse gesteuert werden. Wie die Berechnungen gezeigt haben, sollte der Wert für die Rotationsdämpfung zwischen 0,01 und 0,001 gewählt werden, wobei die stärkere Rotationsdämpfung ($damp_r = 0,01$) bei bewachsenem Untergrund und die geringere Dämpfung bei felsigem Untergrund anzuwenden ist.

Parameter zur Modellierung des Verhaltens der Sturzmasse

<i>bcont</i>	– Nichtviskoser Dämpfungsfaktor (Ball-Ball-Kontakt)
φ_{ball}	– Ballreibungswinkel
<i>pb_n/s</i>	– Bindungsfestigkeiten
<i>clball</i>	– Blockform, Cluster

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Modellierung eines Felsmassensturzes, für einen Ball-Ball-Kontakt, die nichtviskose Dämpfung mittels der Angabe der Variablen (*bcont*) auf Werte zwischen 0,08 und 0,2 gesetzt werden muss, damit ein „im Strom“ Bleiben der Einzelblöcke möglich ist. Dabei verhindert ein größerer Wert ein „Aufspritzen“ von Einzelblöcken.

Die Sturzmasse nimmt direkt Einfluss auf den Bewegungsablauf des Sturzprozesses. Eine Sturzmasse mit wenigen Sturzblöcken bewegt sich hauptsächlich springend fort und weist nur geringe Interaktion zwischen den Blöcken auf. Eine Felsmasse, die aus vielen Sturzblöcken aufgebaut ist und die als Ganzes gleichzeitig losstürzt, strömt. Sie kommt damit dem von Heim (1932) beschriebenen Trümmerstrom gleich. Auch die Schichtung und die Dichte des im Talboden abgelagerten Sturzmaterials nach einer Felsmassensturzberechnung sind jenen in der Realität ähnlich.

Durch die Modellierung eines Auseinanderbrechens der Sturzblöcke, bei dem das Sturzmaterial zerbricht und zermahlen wird, kann über die Angabe der Parallelbindungsfestigkeiten (*pb_n*, *pb_s*) ein Felsmassensturz realistischer modelliert werden. Es hat sich gezeigt, dass mit der Modellierung von teilweise aufbrechenden Sturzblöcken die resultierende Fahrböschung flacher wird als bei einer Berechnung, bei der die Sturzblöcke nicht zerbrechen bzw. bei einer Berechnung, bei der die Sturzblöcke vollständig zerbrechen. Daher sollte für die Modellierung eines Felsmassensturzes mittels PFC die Anfälligkeit zum Zerbrechen einer absturzgefährdeten Felsmasse in Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad, der Verwitterung usw. berücksichtigt werden. Dies führt allerdings zu einer großen Anzahl von Partikeln und damit an die Grenzen der derzeitigen Möglichkeiten von Hard- und Software. Bei statischen und dynamischen Problemstellungen in der Geotechnik hat sich für die Modellierung eines realistischen Verhaltens die nichtviskose Dämpfung als sehr geeignet erwiesen. Es stellt sich allerdings die Frage, ob bei einem Sturzprozess nicht nur der Aufprall eines Partikels auf ein Wandelement viskos gedämpft

werden soll, sondern auch der Aufprall eines Partikels auf ein anderes Partikel viskos zu dämpfen ist.

In der PFC Version 2.0, mit der die Berechnungen und die beschriebenen Adaptionen durchgeführt wurden, war solch ein viskoses Kontaktmodell noch nicht implementiert. Erst in der neuen Beta Version von PFC 3.0 wurde ein solches Kontaktmodell implementiert, mit dem ein Ball-Ball-Kontakt viskos gedämpft werden kann. Erste Untersuchungen mit der viskosen Dämpfung zeigten, dass die Verwendung dieser viskosen Dämpfung im Ball-Ball-Kontakt bei langsamen Bewegungen ein flüssigkeitsähnliches Verhalten modelliert. Genaue Untersuchungen hinsichtlich des unterschiedlichen Verhaltens einer viskos gedämpften Felsmasse verglichen mit einer nichtviskos gedämpften Felsmasse sollten jedoch durchgeführt werden, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob diese Art der Dämpfung für die Modellierung eines raschen Felsmassensturzes geeigneter wäre.

Parameter für den freien Fall und für Springen in Form einer Wurfparabel

damp_1 – nichtviskose Dämpfung für den freien Fall

Befindet sich ein Partikel im freien Fall (in einer Wurfparabelbahn), wird also für das Partikel kein Kontakt identifiziert, so wird die lokale nichtviskose Dämpfung (*damp_1*) auf 0 gesetzt, um eine nahezu gleichförmig beschleunigte Bewegung zu erreichen.

Generierung der Wandelemente

Im zweidimensionalen Fall werden die Geländeoberfläche und das nicht bewegte Ablösegebiet mittels zweidimensionaler Linienelemente in dem zu untersuchenden Profilschnitt generiert. Den einzelnen Liniensegmenten können die entsprechenden Oberflächeneigenschaften zugewiesen werden.

Um eine Geländeoberfläche und das nicht bewegte Ablösegebiet in PFC^{3D} zu modellieren, wird die Geländeoberfläche trianguliert, und die einzelnen dreieckigen Flächen werden als eigene, ebene Teilflächen eingelesen. Jeder dreieckigen Fläche können dann, ebenfalls individuell, die entsprechenden Oberflächeneigenschaften zugeordnet werden. Zwei Methoden wurden für die Erstellung der Geländeoberfläche verwendet.

Bei der ersten Methode wird die Geländeoberfläche, die durch einen gleichmäßigen Punktraster gegeben ist, mithilfe eines eigens entwickelten Programms in dreieckige Flächen

zerlegt, und jede Dreiecksfläche wird in ein PFC Kommando umgewandelt und in PFC eingelesen.

Bei der zweiten Methode wird die Triangulation der Oberfläche mithilfe des Programms AutoCadLand durchgeführt. Unter Verwendung einer angeschlossenen Datenbank können die Dreiecksflächen in der für PFC notwendigen Form ausgelesen werden.

Jedem Wandelement wird eine eigene ID Nummer zugewiesen, über die dem Wandelement die entsprechenden Eigenschaften zugeordnet werden können. Je kleiner die Dreiecksflächen gewählt werden, desto genauer können einzelnen Bereichen die entsprechenden Dämpfungsfaktoren zugeordnet werden. Allerdings steigt mit der Feinheit der Unterteilung der Geländeoberfläche auch die Rechenzeit. Die optimale zu wählende Feinheit hängt somit von der jeweiligen Ausgangssituation bzw. Problemstellung ab. Es ergab sich zum Beispiel bei einer Berechnung von 2000 Wandelementen und 17000 Partikeln eine Rechenzeit von 3 Monaten.

Modellierung eines Ausgangszustandes

Die Vorgehensweise für die Generierung des Ausgangszustandes vor der eigentlichen Berechnung des Sturzprozesses ist für PFC^{2D} und PFC^{3D} gleich:

Die Modellierung der Absturzmasse erfolgt mithilfe der Partikel. Im Ablösegebiet wird eine bereits desintegrierte Masse positioniert. Temporäre Hilfswände, die das Ablösegebiet begrenzen, werden aufgestellt und verhindern ein vorzeitiges Abstürzen der Partikelansammlung. Um zusätzlich größere Blöcke zu modellieren, können einzelne Bälle über die Anwendung von Parallelbindungen zu Clustern verbunden werden. Diese Bindungen können während des Sturzprozesses zufolge eines Aufpralles brechen.

Nach der Konsolidierung der Partikelansammlung im Ablösegebiet wird durch Einschalten der Gravitation als äußere Belastung und durch Wegnahme der temporären Wandelemente unterhalb des Ablösegebietes der eigentliche Felsmassensturz ausgelöst.

Modellierung eines Felsmassensturzes

Generell kann festgestellt werden, dass die dreidimensionale Modellierung eines Felsmassensturzes mithilfe der Distinkten Elemente Methode PFC^{3D} möglich ist und für die

demonstrierten Beispiele sehr gute Ergebnisse liefert. Allerdings sind für eine weiterführende Beurteilung vor allem Kalibrierungen der Dämpfungsfaktoren aus Rückrechnungen und Parametervariationen anzustreben. Aufgrund der langen Rechenzeiten ist eine Parametervariation derzeit noch besonders aufwendig. Die rasche Entwicklung der Hard- und Software (z.B. parallelgeschaltete PCs) lässt jedoch erwarten, dass bei den gegenständlichen Untersuchungen Rechenzeiten und Kapazität bald kein Problem mehr darstellen werden und der Zeitaufwand für die für eine zielführende Untersuchung unbedingt erforderlichen Parametervariationen auf ein vertretbares Ausmaß sinken wird.

9 Zusammenfassung

Massenbewegungen in alpinen Gebieten stellen häufig direkt oder indirekt eine Gefährdung von besiedeltem Gebiet, Infrastruktureinrichtungen usw. dar. In der Geotechnik werden Massenbewegungen unterschiedlich definiert bzw. gegeneinander abgegrenzt. Dabei stellen die in verschiedenen Klassifizierungen aufgezählten Typen von Massenbewegungen größtenteils eine Kombination von Bewegungsarten bzw. Abfolgen von Bewegungsmechanismen dar.

Aus geomechanischer und felsmechanischer Sicht erscheint es daher im Hinblick auf die Modellierbarkeit sinnvoll, im Gegensatz zu den aufgezeigten Klassifizierungen.

Massenbewegungen in den Auslöse- oder Versagensmechanismus und den eigentlichen Sturzprozess zu unterteilen. Für eine Einteilung bzw. Unterscheidung von Sturzprozessen werden im geotechnischen Sprachgebrauch die Begriffe Bergsturz, Felssturz und Steinschlag verwendet. Während als Steinschlag meist nur der Sturz von Einzelblöcken bezeichnet wird, sind die Kriterien für die Unterscheidung der Begriffe Berg- und Felssturz im Wesentlichen das Volumen und der Bewegungsmechanismus der Absturzmasse. Heim (1932) erklärt im Zusammenhang mit der stürzenden Talfahrt der Felsstürze das Phänomen der Trümmerströme und bezeichnet diese als „Sturzströme“. Heim (1932) beschreibt die allgemeine Erscheinung der Sturzströme mit der Bewegung einzelner Blöcke, die aneinander schlagen. Dabei bleiben die Blöcke während des Sturzvorganges zusammen, und es entsteht eine einheitliche Summenbewegung, ein gemeinsames „Fließen“ bzw. „Strömen“ der Masse.

Im Gegensatz zu den Begriffen Felssturz und Bergsturz wird in der Arbeit der Begriff des Felsmassensturzes eingeführt. Dieser Begriff soll, im Gegensatz zu den verwendeten Bezeichnungen Felssturz bzw. Bergsturz, als eine allgemeine Bezeichnung für eine rasche, sturzartige Massenbewegung verstanden werden, bei der eine Felsmasse bestehend aus diskreten Einzelblöcken durch gravitative Kräfte bewegt wird. Die Interaktion zwischen den Blöcken sowie ein Zerbrechen der Blöcke zufolge eines Aufschlages beeinflusst dabei maßgeblich die Bewegung der Masse hinsichtlich der Ausbreitung des Felsmassensturzes.

Zur Abschätzung der Gefährdung durch Massenbewegungen, die rasch und plötzlich erfolgen, gibt es Abschätzverfahren (statistische Untersuchungen abgegangener Felsmassenstürze) bzw. Berechnungsmethoden, um die Reichweite bzw. die Ausbreitung und damit den

Gefährdungsbereich zu ermitteln. Ein Großteil der Methoden versucht, zufolge des Vergleichs der Bewegung eines Bergsturzes mit dem Fließen oder Strömen einer Masse, mittels einer kontinuumsmechanisch verschmierten Betrachtung oder mittels eines Vergleichs mit einem Gleitblock die Ausbreitung des Felsmassensturzes zu ermitteln. Auch granulare Methoden, bei denen die Sturzmasse aus diskreten Einzelblöcken aufgebaut ist, werden verwendet, um Felsmassenstürze zu modellieren. Diese Untersuchungen erfolgten bisher allerdings nur in einem zweidimensionalen Profil.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Felsmassenstürze im dreidimensionalen Raum unter Zugrundelegung realer physikalischer Zusammenhänge zu modellieren. Daher wurde für die numerische Untersuchung von Felsmassenstürzen das kommerzielle diskontinuumsmechanische Programm PFC - Particle Flow Code - herangezogen. Die Grundelemente von PFC sind kugelförmige Partikel, die sich beliebig anordnen und zu größeren Einheiten verbinden lassen, sowie ein- bzw. zweidimensionale Wandelemente. PFC besitzt neben den Bewegungs- und Kontaktgesetzen für einzelne Blöcke auch eine Routine für die Ermittlung jener Blöcke (Partikel), die miteinander oder mit der Geländeoberfläche (Wandelemente) in Kontakt treten. Die Partikel können an ihren Kontaktpunkten miteinander verbunden werden, und diese Bindungen können infolge einer zu großen Belastung wieder brechen.

Bei der Modellierung eines Felsmassensturzes mittels PFC wurden zuerst die Geländeoberfläche und die Unterkante des Ablösegebietes aus Wandelementen und die Sturzmasse aus Partikeln generiert. Der Vorteil dieser Methode besteht daher darin, dass das PFC-Modell für den Fall, dass nur der Absturz einzelner, unzerbrechlicher Sturzblöcke betrachtet wird, mit konventionellen Steinschlagsimulationsprogrammen hinsichtlich der Methodik vergleichbar ist und dadurch die Möglichkeit einer Kalibrierung besteht. Ein weiterer Vorteil gegenüber der Methode, den ganzen Hang aus Partikeln aufzubauen, ist, dass nur die Sturzmasse aus Partikeln aufgebaut wird. Daher steht für die Modellierung der Sturzmasse die Maximalanzahl von Partikeln zur Verfügung, deren Bewegung dadurch genauer untersucht werden kann.

Für eine realistische Modellierung des Sturzprozesses waren einige Adaptionen notwendig, die mittels der in PFC vorhandenen Programmiersprache FISH umgesetzt wurden. Neben der bestehenden nichtviskosen Dämpfung, die entsprechend der Kontaktart (Ball-Wand, Ball-Ball, kein Kontakt) variiert wurde, wurde auch eine viskose Dämpfung beim Aufprall eines

Blockes auf die Geländeoberfläche eingeführt. Die Bewegungsarten Springen, Gleiten und Rollen, die bei einem Sturz eines Einzelblockes unterschieden werden, beruhen auf einer Interaktion zwischen dem Sturzblock und der Geländeoberfläche und konnten somit in PFC realistisch modelliert werden. Im Fall eines Felsmassensturzes, bei dem es zum Absturz einer größeren Felsmasse kommt, wird in PFC automatisch die Interaktion zwischen den Blöcken ermittelt. Numerische Aufschlagtests auf eine horizontale Fläche sowie ein Vergleich mit einem Steinschlagsimulationsprogramm lieferten wesentliche Erkenntnisse für die Wahl geeigneter Dämpfungsfaktoren. Die Rückrechnung des Bergsturzes Frank Slide (Kanada) lieferte zusätzliche Erkenntnisse für die Wahl geeigneter Dämpfungsfaktoren für die Modellierung von Felsmassenstürzen.

Eine dreidimensionale Modellierung eines Felsmassensturzes wurde für die Massenbewegung Oselitzenbach (Kärnten, Österreich) durchgeführt. Ein Vergleich dieser Untersuchung mit einem dreidimensionalen Steinschlagsimulationsprogramm sowie mit dem dreidimensionalen kontinuumsmechanischen Programm DAN (Hungr, 1995) lieferten hinsichtlich der ermittelten Ausbreitung sehr gute Ergebnisse. Die dreidimensionale Modellierung eines Felsmassensturzes im Fall des Eiblschrofen (Tirol, Österreich) lieferte wichtige Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Bewegungsbahnen der Sturzblöcke und hinsichtlich der Schutzwirkung der Dämme.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine realistische dreidimensionale Modellierung eines Felsmassensturzes mit PFC unter Verwendung der durchgeführten Adaptionen möglich ist und für die Beurteilung und Abschätzung von Gefährdungsbereichen und Dimensionierung von Schutzmaßnahmen herangezogen werden kann. Allerdings sind für eine weiterführende Beurteilung vor allem Kalibrierungen der Dämpfungsfaktoren aus Rückrechnungen und Parametervariationen anzustreben. Aufgrund der langen Rechenzeiten ist eine Parametervariation derzeit noch besonders aufwändig. Die rasche Entwicklung der Hard- und Software lässt jedoch erwarten, dass der Zeitaufwand für die für eine zielführende Untersuchung notwendigen Parametervariationen bald auf ein vertretbares Ausmaß sinken wird.

10 Literaturverzeichnis

- ABELE, G.: Bergstürze in den Alpen. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte 25, München (1974).
- AZZONI, A., BARBERA, G. & ZANIETTI, A.: Analysis and Prediction of Rockfalls Using a Mathematical Model. *Int. Journal of Rock Mechanics, Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 32, No. 7, pp. 709-724 (1995).
- BAGNOLD, R. A.: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *R. Soc. London, Proc.* 225, pp. 49-63 (1954).
- BATHE, K. J. & WILSON, E. L.: *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Englewood, Cliffs, Prentice-Hall (1976).
- BAYER, H., GSELL, A., HAMMER, H., SAUERMOSE, S. & SCHEIBER, M.: Planning of Mitigation Measures regarding the Aggravated Risk imposed by Rockfall. - *Felsbau* 18, S. 30-35 (2000).
- BENITEZ, M. A., BOLLO, M. F. & RODRIGUEZ, M. P.: Bodies Falling Down on Different Slopes – Dynamic Study. *Proc. IX International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), Tokyo*, Vol. 2, pp. 91-94 (1977).
- BOZZOLO, D.: Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag. *Dissertation Nr.8490 an der ETH Zürich* (1987).
- BOZZOLO, D. & PAMINI, R.: *Modello matematico per lo studio della caduta dei massi*. Dipartimento della pubblica educatione, Lab. Fis. Terrestre, Lugano, pp. 1-80 (1982).
- BRANDNER, R. & REITER, F.: *Strukturgeologische Untersuchungen und Erläuterungen zur geologischen Kartierung des Eiblschrofen*. - Unveröffentlichter Bericht an den Forsttechn. Dienst f. Wildbach- und Lawinenverbauung, BMLFUW (2000).
- BROILI, L.: Ein Felssturz im Großversuch. *Rock Mechanics, Suppl.* 3, S. 69-78 (1974).
- CAMPBELL, C.S.: Self-lubrication for long runout landslides. *Journal of Geology*, Vol. 97, No. 6, pp. 653- 665 (1989).
- CAMPBELL, C.S.: Rapid granular flows. *Annual review of fluid mechanics*, Vol. 22, pp. 57-92 (1990).

- CAMPBELL, C.S., CLEARY, P.W. & HOPKINS, M.: Large-scale landslide simulations: Global deformation, velocities and basal friction. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B5, pp. 8267-8283 (1995).
- CANNON, S.H. & SAVAGE, W.Z.: A mass-change model for the estimation of debris flow runout. *Journal of Geology*, Vol. 96, pp. 221- 227 (1988).
- CAO, J., AHMADI, G. & MASSOUDI, M.: Gravity granular flows of slightly frictional particles down an inclined bumpy chute. *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 316, pp.197-221 (1996).
- CHAU, K. T., WONG, R. H. C. & WU, J. J.: Coefficient of restitution an rotational motions of rockfall impacts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39, pp. 69-77 (2002).
- CUNDALL, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems. *Proc. Symp. Rock Fracture, Nancy*, pap. II-8 (1971).
- CUNDALL, P.A.: Distinct Element Models of Rock and Soil Structure. In: Brown, E. T. (Ed.), *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, Ch. 4., Allen & Unwin, London, pp. 129-163 (1987).
- CUNDALL, P.A.: Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model – Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks. *Int. Journal of Rock Mechanics, Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25(3), pp.107-116 (1988).
- CUNDALL, P. A., KONIETZKY, H. & POTYONDY, D.: PFC - Ein neues Werkzeug für numerische Modellierungen. – *Bautechnik* 73, S. 492-500 (1996).
- CRUDEN, D.M. & KRAHN, J.: Frank Slide, Alberta, Canada, Chapter 2. In: Voight, B. (Ed.), *Rockslides and Avalanches, Volume 1*, Elsevier, Amsterdam (1978).
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D.J.: Landslide Types and Processes. In: Turner A. K., Schuster R. L. (Eds.), *Landslides Investigation and mitigation*, Nat. Acad. Sciences, Transportation Research Board, Special Report 247, Washington D.C., pp. 36-75 (1996).
- DAVIES, T. R. H.: Spreading of Rock Avalanche Debris by Mechanical Fluidization. *Rock Mechanics* 15, pp. 9-24 (1982).

- DESCOEUDRES, F. & ZIMMERMANN, TH.: Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. Proc. 6th Int. Congr. Rock Mechanics, Montreal, pp. 337-342 (1987).
- ECKEL, B.: Numerische Modellierung von Fels- und Bergstürzen als Mehrblocksysteme mittels der Methode der diskreten Elemente (PFC^{2D}). Diplomarbeit an der TU Wien, (2000).
- EGGER, P.: Bergsturz und Steinschlag. Sturzbahnsimulation mit dem Computer. In: Oddson, B. (Ed.), Instabile Hänge und andere risikorelevante Prozesse, Birkhäuser V., Basel, S. 227 - 236 (1996).
- ERISMANN, T. H.: Mechanism of large landslides. Rock Mechanics 12, pp. 15-46 (1979).
- EVANS, S. G. & HUNGR, O.: The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, pp. 620-636 (1993).
- EVANS, S. G., HUNGR, O. & CLAGUE, J. J.: Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada; implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes. Engineering Geology 61, pp. 29-51 (2001).
- FRANK SLIDE INTERPRETIVE CENTRE: Information & Location. URL: <http://www.frankslide.com/info.html> (2003).
- VAN GASSEN, W. & CRUDEN, D. M.: Momentum transfer and friction in the debris of rock avalanches. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, No. 4, pp. 623-628 (1989).
- GERBER, E. & SCHEIDEGGER, A. E.: On the dynamic of Scree Slopes. Rock Mechanics 6, pp. 25-38 (1974).
- GEO&SOFT: ISOMAP & ROTOMAP for windows (3D Surface Modelling & Rockfall Analysis). Users Guide (2003).
- GOLDER ASSOCIATES: Rockfal3: A Program for Conducting Rockfall Simulations. Manual (1997).
- HABIB, P.: Production of gaseous pore pressure during rock slides. Rock Mechanics 7, pp. 193-197 (1975).
- HAINBÜCHNER, E.: Vergleich von analytischen Berechnungsverfahren mit den Verfahren der Distinkten Element Methode bei geotechnischen Anwendungen. Diplomarbeit an der Universität Essen (2001).

- HART, R. D.: An Introduction to Distinct Element Modelling for Rock Engineering. In: Hudson (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon Press, London, Vol.2, pp. 245-262, (1996).
- HEIM, A.: *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wassermuth, Zürich (1932).
- HOEK, E.: *Rockfall – A program in basic for the analysis of rockfalls from slopes*. Dept. Civil Eng., University of Toronto, Toronto (1987).
- HSÜ, K. J.: Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 86, pp. 129-140 (1975).
- HUNGR, O.: *Mobility of Rock Avalanches*. National Research Institute for Earth Science and Disaster prevention, No. 46, Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan, pp. 11-20 (1990).
- HUNGR, O.: A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 610-623 (1995).
- HUNGR, O. & EVANS, S. G.: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, pp. 685-690 (1988).
- HUNGR, O., EVANS, S. G., BOVIS, M. J. & HUTCHINSON, J. N.: A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. VII, No. 3, pp. 221-238 (2001).
- VAN HUSEN, D.: *Mündliche Mitteilung* (2000).
- VAN HUSEN, D.: Zur Fazies und Stratigraphie der jungpleistozänen Ablagerungen im Trauntal. *Jahrbuch d. Geologischen Bundesanstalt, Wien*, 120, S.1-130 (1977).
- HUTCHINSON, J. N.: A sliding - consolidation model for flow slides. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.23, pp. 115-126 (1986).
- HUTTER, K. & SAVAGE, S. B.: The motion of a finite mass of gravel down a mountain side. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, Vol. I, pp. 691-697 (1988).
- ITASCA: *FLAC^{3D} - Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Version 2.0 User's Manual. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis (1997).
- ITASCA: *PFC^{2D} (Particle Flow Code in 2 Dimensions)*, Version 2.0 User's Manual. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis (1999a).

- ITASCA: PFC^{3D} (Particle Flow Code in 3 Dimensions), Version 2.0. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis (1999b).
- ITASCA: Soft Spot Volume 7 Number 2. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis (1999c).
- JOHN, K.W. & SPANG, R.M.: Steinschläge und Felsstürze –Voraussetzungen - Mechanismen - Sicherung. UIC – Tagung, Schutz der Bahnanlagen gegen Steinschlag und Felssturz, Kandersteg (1979).
- JENKINS, J. T. & SAVAGE, S. B.: A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic, spherical particles. *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 130, pp. 187-202 (1983).
- KENT, P.E.: The transport mechanism in catastrophic rock falls. *Journal of Geology*. Vol.74, pp. 79-83 (1966).
- KIENHOLZ, H., ZEILSTRA, P. & HOLLENSTEIN, K.: Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko, Arbeitspapier. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidg. Forstdirektion, Bern (1998).
- KIRKBY, M.J. & STATHAM, I.: Surface stone movement and scree formation. *Journal of Geology*, Vol. 83, pp. 349-362 (1975).
- KLENGEL, K. J. & PAŠEK, J.: Zur Terminologie von Hangbewegungen. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, Bd.20, Heft 3, S. 128-132 (1974).
- KOBAYASHI, Y., HARP, E. L. & KAGAWA, T.: Simulation of Rockfalls Triggered by Earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 23, pp. 1-20 (1990).
- KOERNER, H. J.: Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fließschneelawinen. *Rock Mechanics* 8, pp. 225-256 (1976).
- KONIETZKY, H., HART, R. & BILLAUX, D.: Mathematische Modellierung von geklüftetem Fels. – *Felsbau* 12, S. 395-400 (1994).
- KONIETZKY, H.: Numerische Simulation in der Geomechanik mittels expliziter Verfahren. – Itasca Consultant GmbH, Gelsenkirchen (2000).
- KRAUTER, E.: Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. *Grundbau-Taschenbuch*, Teil 1, Sechste Auflage, Smolczyk, U. (Hrsg.), Berlin, Ernst & Sohn, S. 613-665 (2001).

- LEE, K. & ELLIOT, G. M.: Rockfall: application of Computer Simulation to Design of Preventive Measures. Proc. Planning, Design and Implementation of Debris Flow and Rockfall Hazards Mitigation Measures, The Association of Geotechnical Specialists (Hong Kong) Limited, pp. 47-65 (1998).
- LEGROS, F.: The mobility of long-runout landslides. *Engineering Geology* 63, pp. 301-331 (2002).
- LI, T.: A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 24, S. 473-482 (1983).
- MEIBL, G.: Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Selbstverlag des Institutes für Geographie der Universität Innsbruck (1998).
- MELOSH, H. J.: Acoustic fluidization: a new geologic process? *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, pp. 7513-7520 (1979).
- MOSER, M.: Talzuschub Reppwand-Gleitung, Geologisch-geotechnischer Bericht für 2000 unter besonderer Berücksichtigung der Bewegungsmessungen (Periode 14-15, Juni 99 bis Oktober 2000). Bericht WLW (2001).
- NEMČOK, A., PAŠEK, J. & RYBÁŘ, J.: Classification of Landslides and Other Mass Movements. *Rock Mechanics* 4, pp. 71-78 (1972).
- NOREM, H., LOCAT, J. & SCHIEDROP, B.: An approach o the physics and the modeling of submarine flowslide. *Maine Geotechnology*, Vol. 9, pp. 93-111 (1990).
- OBONI, F. & EGGER, P.: A probabilistic analysis of the Vaiont landslide. Proc. 5. Intern. Kongr. Numer. Methoden in der Geomechanik, Nagoya, pp. 1013-1018 (1985).
- O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y. & FULLERTON, W. T.: Two-Dimensional Water Flood and Mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 244-261 (1993).
- ONOFRI, R. & CANDIAN, C.: Indagine sui limiti di massima invasione dei blocchi rocciosi franati durante il sisma del Friuli del 1976. Considerazioni sulle opere di difesa. Regione autonoma Friuli-Venezia-Giulia, Università degli Studi di Trieste (1979).
- PFEIFFER, T. J. & BOWEN, T. D.: Computer Simulation of Rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. XXVI, No.1, pp. 135-146 (1989).

- PIRULLI, M., PREH, A., ROTH, W., SCAVIA, C. & POISEL, R.: ISRM 2003, Technology road map for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy (in print, 2003).
- PITEAU, D. R. & PECKOVER, F.L.: Engineering of Rock Slopes. In: Schuster, R. L., Krizek, R. J. (Eds.), Landslides, Analysis and Control, Nat. Acad. Sciences, Transportation Research Board, Special Report 176, Washington D.C., pp. 193-228 (1978).
- POISEL, R., LEITHNER, W., PREH, A. & ROTH, W.: Monitoring Eiblschrofen – Ablöszenarien – Unveröffentlichter Bericht an den Forsttechn. Dienst f. Wildbach- und Lawinenverbauung, BMLF (2001).
- POISEL, R., TENTSCHERT, E., ROTH, W. & PREH, A.: Workpackage 4 - Establishment of scenarios on the basis of mechanical run-out modelling: application of numerical methods. Bericht für EU-Projekt, Impact of Large Landslides in the Mountain Environment: Identification and Mitigation of Risk-Imiriland (2002).
- POISEL, R.: Catalogue of rock slope failure mechanisms and their mechanical control. Schwerpunktseminar Felsmechanik – Theorie und Praxis, Institut für Ingenieurgeologie, TU-Wien (im Druck, 2003).
- PREH, A.: Modellierung der Versagensmechanismen von Felsböschungen mithilfe des Particle Flow Codes (PFC). Dissertation an der TU Wien (in Ausarbeitung, 2003).
- RITCHIE, A. M: Evaluation of Rockfall and Its Control. Highway research record, 17, pp. 13-28 (1963).
- ROCHET, L.: Développement des modèles numériques dans l'analyse de la propagation des éboulements rocheux. Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, Montreal, Vol. I, pp. 479-484 (1987).
- ROTH, W.: Ermittlung von Sicherheitsfaktoren mittels des kontinuumsmechanischen Finiten Differenzen – Codes FLAC. Diplomarbeit an der TU-Wien (1999).
- ROTH, W., PREH, A., POISEL, R., HOFMANN, R. & SAUERMOSE S.: Numerische Modellierung von Felsmassenstürzen am Beispiel der Schutzdämme Eiblschrofen. Felsbau 20, Nr. 5, S. 179-187 (2002).
- MCSAVENEY, M. J.: Sherman Glacier rock avalanche, Alaska, U.S.A., Chapter 6. In: Voight, B. (Ed.), Rockslides and Avalanches, Volume 1, Elsevier, Amsterdam (1978).

- SCHEIDEGGER, A. E.: On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. *Rock Mechanics* 5, pp. 231-236 (1973).
- SOUSA, J. & VOIGHT, B.: Continuum simulation of flow failures. *Géotechnique*, Vol.41, No.4, pp. 515-538 (1991).
- SPANG, R.M. & RAUTENSTRAUCH, R.W.: Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Vol. II*, pp. 1237-1243 (1988).
- SPANG, R. M. & SÖNSER, T.: Optimized Rockfall Protection by „Rockfall“. *Proc. 8th Int. Rock Mech., Tokyo, Vol. III*, pp. 1233-1242 (1995).
- SASSA, K.: Special lecture: Geotechnical model for the motion of landslides. *Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Vol. 1*, pp. 37-55 (1988).
- SAVAGE, S. B. & HUTTER, K.: The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid mechanics*, Vol. 199, pp. 177-215 (1989).
- SHREVE, R. L.: Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 79, pp. 653-658 (1968).
- STEVENS, W. D.: Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Master thesis, University of Toronto (1998).
- STRAUB, S.: Self-organization in the rapid flow of granular material: evidence for a major flow mechanism. *Geol. Rundsch.* 85, pp. 85-91 (1996).
- STRAUB, S.: Predictability of long runout landslide motion: implications from granular flow mechanics. *Geol. Rundsch.* 86, pp. 415-425 (1997).
- TAKAHASHI, T., NAKAGAWA, H., HARADA, T. & YAMASHIKI, Y.: Routing Debris flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 11, pp. 1490-1507 (1992).
- TERZAGHI, K.: Mechanism of Landslides. *Geological Society of America, Engineering Geology (Berkey) Volume*, pp. 83-123 (1950).
- TERZAGHI, K.: Stability of steep slopes on hard unweathered rock. *Géotechnique*, Vol.12, pp. 251-270 (1962).

- VARNES, D. J.: Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R. L., Krizek, R. J. (Eds.), Landslides, Analysis and Control, Nat. Acad. Sciences, Transportation Research Board, Special Report 176, Washington D.C., pp. 11-33 (1978).
- VOELLMY, A.: Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung 73, Heft Nr. 12, S. 159-165, 212-217, 246- 249, 280-285 (1955).
- VOIGHT, B. & PARISEAU, W. G.: Rockslides and avalanches: an introduction. In: Voight, B. (Ed.), Rockslides and Avalanches, Volume 1, Elsevier, Amsterdam (1978).
- WILL, J.: Die Diskrete Elemente Methode (DEM) und ihre Anwendung in der Felsmechanik. Mitteilungen des Institutes für Strukturmechanik, Festschrift Prof. Harald Zrost, pp: 11.1-11.13. Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar (1995).
- WEIDNER, S.: Kinematik und Mechanismus alpiner Hangdeformationen unter bes. Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse. Dissertation Universität Erlangen (2000).
- WILL, J. & KONIETZKY, H.: Neue Techniken der Numerik zur Berechnung von Felsböschungen. Felsbau 16, S. 155-167 (1998).
- WP/LI - THE INTERNATIONAL GEOTECHNICAL SOCIETIES' UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY: Multilingual Landslide Glossary. The Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers Ltd. (1993).

Lebenslauf

Name: Werner Roth

Geburtsdatum: 21. 11. 1968

Geburtsort: Wien

Wohnort: 1160 Wien, Friedmanngasse 6 / 14

Ausbildungsweg:

1975-1979 Volksschule, Wien 8, Pfeilgasse
1979-1987 Bundesgymnasium Wien III, realistischer Zweig
1987-1999 Studium des Bauingenieurwesens,
Technische Universität Wien
6/1999 Diplomprüfung (Diplomarbeit: Ermittlung von Sicherheitsfaktoren
mittels des kontinuumsmechanischen Finiten Differenzen-Codes
FLAC)
1999-laufend Doktoratsstudium, Institut für Ingenieurgeologie,
Technische Universität Wien

Praxis:

7/1990 Ferialpraxis bei der Firma Johann Buhl-Bauunternehmung
7/1991 Ferialpraxis bei der Vindobona Privat-Bank A.G.
7/1992 Ferialpraxis bei der Firma A. Porr Aktiengesellschaft
2/1994 – 6/99 Mitarbeiter bei VIE, Flughafen Wien, geringfügig beschäftigt
10/1997 – 6/99 Freier Mitarbeiter bei der Firma Geoconsult Wien
7/1999-laufend Universitäts-Assistent, Institut für Ingenieurgeologie,
Technische Universität Wien

Lehrtätigkeit: Seminar „Finite Difference Models in Geoengineering“ und Mitarbeit
an den Pflichtübungen und Pflichtexkursionen für Bauingenieure an der
Technischen Universität Wien

Sonstiges: Förderpreis der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (2000)
Sprengbefugnis