



DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Die Modellierung großer Felsgleitungen mittels 3DEC

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

a.o. Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rainer Poisel

E220 - Institut für Geotechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Nikolaus Hödlmoser

0840522

Habsburgerstraße 84/1/4
2500 Baden

Wien, am 20.11.2016

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt dabei Herrn Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rainer Poisel für die Betreuung dieser Arbeit. Neben den wissenschaftlichen Ratschlägen und der konstruktiven Kritik, möchte ich mich vor allem dafür bedanken, dass - trotz weit ungleicher Expertise und Erfahrung - Gespräche und Diskussionen stets auf Augenhöhe stattfanden.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeiter/innen des Instituts für Geotechnik. Dabei möchte ich vor allem Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Preh erwähnen, der mir einige Fragen bezüglich 3DEC beantwortete, sowie Manolis Fleris, MSc, der mir unaufgefordert seine Hilfe bei einigen Fragestellungen anbot. Generell herrschte am Institut eine angenehme Arbeitsatmosphäre. In Verbindung mit dem für Diplomanden uneingeschränkten Zugang zur Kaffeemaschine konnte man hier sehr konzentriert und produktiv arbeiten.

Ebenfalls danken möchte ich meiner Freundin Laura, die besonders während unergiebigster Phasen immer aufbauende Worte gefunden hat.

Mein letzter und zugleich größter Dank gilt meinen Eltern. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit bzw. der Abschluss meines Studiums nicht möglich gewesen. Danke, dass ihr mir das ermöglicht habt.

Kurzfassung

Im Steinbruch bei Spitz an der Donau kam es in der Vergangenheit immer wieder zu Felsstürzen unterschiedlicher Größenordnungen. Beim letzten großen Ereignis glitt im Jahr 2002 ein Felsvolumen zwischen 60.000 und 85.000 m³ ab. Abschätzungen haben ergeben, dass Maßnahmen zur Reduzierung der vom Steinbruch ausgehenden Gefahr vor allem für die im Vorland verlaufenden Verkehrswege mehrere Millionen Euro kosten würden. Es wurde daher beschlossen, das Risiko möglicher zukünftiger Ablöseszenarien genauer zu untersuchen. In einer ersten Phase wurde die Wiederkehrperiode von Ereignissen ähnlich jenem von 2002 bestimmt sowie die Größen und Lagen von zwei möglichen zukünftigen Ablösungen festgelegt. Die vorliegenden Untersuchungen hatten zum Ziel, die Ausbreitung der Ablösungen bei deren Abgang zu ermitteln, um daraus mögliche direkte und indirekte Schäden ableiten zu können. Für diese Untersuchungen wurde das diskontinuumsmechanische Berechnungsprogramm 3DEC gewählt.

Um Modellbedingungen zu erhalten, welche zu einem realistischen Verhalten der modellierten Ablöseszenarien führen, wurde zuerst das oben genannte Ereignis des Jahres 2002 nachgebildet. Die Dokumentation des Ereignisses von 2002 und Vermessungsdaten vor und nach dem Ereignis wurden dabei verwendet, um zu erfassende Randbedingungen zu definieren.

Parameter, welche zu einer realitätsnahen Modellierung des Ereignisses 2002 führten, wurden danach herangezogen, um die Abgänge der beiden Ablöseszenarien zu simulieren. Um den Einfluss maßgeblicher Modellparameter zu untersuchen, wurden mehrere Berechnungsversionen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Die Reichweiten der berechneten Felsgleitungen, sowie die Geschwindigkeiten und Verschiebungen ausgewählter Blöcke, wurden für jede Version festgehalten.

Wie die Berechnungen zeigten, konnte das Ereignis 2002 mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Die Simulationen der Ablöseszenarien ergaben, dass die Topographie des Steinbruchs - in Verbindung mit der Halde des Ereignisses 2002 - dazu führte, dass große Teile der Gleitmassen aufgefangen und am weiteren Abgleiten gehindert wurden. Bei diesem Bremsvorgang kam es zu einer Verschiebung der Halde 2002 gegen den bestehenden Damm, der in weiterer Folge beschädigt werden könnte.

Eine Untersuchung der Standsicherheit des Damms auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist daher durchzuführen. Ein gegen den Schub der Gleitmassen sicherer Damm würde - abgesehen von Einzelblöcken - eine großflächige Gefährdung der dahinter verlaufenden Verkehrswege verhindern.

Abstract

In the past rockslides of different size have occurred in the quarry next to Spitz, the last big one in 2002, where a rockvolume between 60.000 and 85.000 m³ sled down. Assessments of possible measures reducing the danger of future rockfalls especially affecting the infrastructure have come up to several million euros. Therefore, risk evaluation of future detachment scenarios has been investigated. In phase one return periods of similar events to the one in 2002 as well as size and positions of two future detachments were defined. The investigations in this thesis aim at defining the run-out of these detachments to assess possible direct and indirect damages. For the calculations the discontinuum mechanics code 3DEC was used.

In order to receive model conditions, which mirror a realistic behavior of the modelled scenarios, the rockslide of 2002 was simulated first. The documentation of the event and the surveying data of the 2002 rockslide were used to define boundary conditions.

The parameters for a model of the event 2002 close to reality were then used to simulate both run-out scenarios. In order to analyse the influence of model parameters various calculations with different parameters were carried out. The run-out distance of the rock slides calculated as well as the velocity and displacements of specific blocks of each version were documented.

The simulations of the future scenarios showed that the topography of the quarry, in combination with the deposit of 2002, decelerated huge parts of the sliding rock mass and prevented it from sliding down to the base of the quarry. During the deceleration of the rockslide the deposit of 2002 was displaced until it reached an existing protection embankment which in sequence might be damaged. Consequently, the stability of the protection embankment has to be investigated. A protection embankment resisting the thrust of the sliding masses would - apart from individual blocks - prevent hazards of the infrastructure behind it over large areas.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Allgemein	1
1.2	Aufgabenstellung	2
1.3	Frühere Felssturzereignisse.....	3
1.3.1	Übersicht.....	3
1.3.2	Ereignis 1961.....	4
1.3.3	Ereignis 1984.....	5
1.3.4	Ereignis 2002.....	7
1.4	Geologische Gegebenheiten.....	7
1.4.1	Verfaltungen.....	9
1.4.2	Raumstellung der Hauptschieferung.....	10
1.4.3	Wichtigste Trennflächensysteme.....	11
1.4.3.1	Gleitebene 2002.....	11
1.4.3.2	Seitliche Begrenzung 2002.....	12
1.4.3.3	Oberste Abbauwand.....	12
2	Ereignis 2002.....	14
2.1	Beschreibung des Felssturzes 2002.....	15
2.2	Analyse der Ablagerungsform.....	17
2.2.1	Blockgröße.....	17
2.2.2	Vertikal- und Quererstreckung	17
2.2.3	Längserstreckung der Halde	18
2.2.4	Einfluss der Halde von 1984	19
2.2.5	Zusammenfassung der Ablagerungsmerkmale	21
3	Mögliche Ablöseszenarien	22
3.1	Delphi Panel	22
3.2	Ereignis 1	22
3.3	Ereignis 2	23

4	3DEC Berechnungen.....	25
4.1	Allgemein	25
4.1.1	Beschreibung von Starrkörperbewegungen in 3DEC	25
4.2	Modellaufbau.....	29
4.2.1	Modellgeometrie	29
4.2.1.1	Geländeoberfläche	29
4.2.1.2	Trennflächen	32
4.2.1.3	Vergleiche der geometrischen Modelle.....	34
4.2.2	Dämpfung.....	36
4.2.3	Klufteigenschaften.....	40
4.2.3.1	Kluftsteifigkeiten.....	41
4.2.3.2	Reibungswinkel.....	42
4.2.4	Oberfläche.....	46
4.2.5	Reibung zwischen den Kluftkörpern	46
4.2.6	Sonstige Modellparameter	46
4.3	Berechnungsergebnisse.....	47
4.3.1	Version 1.....	52
4.3.2	Version 2.....	53
4.3.2.1	Version 2.1	58
4.3.2.2	Version 2.2	62
4.3.2.3	Version 2.3	63
4.3.3	Version 3.....	67
4.3.4	Version 4.....	68
4.3.5	Version 5.....	68
4.3.6	Version 6.....	69
5	Interpretationen und Schlussfolgerung.....	70
5.1	Interpretation der Simulation des Ereignisses 2002.....	70
5.2	Interpretation der Simulation des Ablöseszenarios 1.....	73

5.3	Interpretation der Simulation des Ablöseszenarios 2.....	76
5.4	Schlussfolgerungen.....	83
6	Zusammenfassung.....	85
7	Literaturverzeichnis.....	88
8	Abbildungsverzeichnis.....	89

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Im Steinbruch bei Spitz an der Donau kam es seit den frühen sechziger Jahren immer wieder zu Steinschlag- und Felssturzereignissen unterschiedlichen Ausmaßes. Die Volumina der Felsstürze betrafen dabei Größenordnungen von wenigen tausend Kubikmetern bis hin zu großflächigen Felsgleitungen von ca. 80.000 m³. So löste sich zum Beispiel der Felssturz vom 11.10.2002 mit einem Felsvolumen zwischen 60.000 und 85.000 m³. Dessen Halde prägt das heutige Bild des Steinbruchs. (Poisel, 2016)



Abbildung 1: Ansicht des Steinbruchs vom östlichen Donauufer (Foto: Rainer Poisel)

Das Steinbruchareal liegt ca. einen Kilometer südlich der Ortschaft Spitz, unmittelbar am westlichen Donauufer. Einige Zehner-Meter entfernt von den weitesten Ausläufern der Sturzhalde von 2002 liegen mehrere Verkehrswege: eine Eisenbahnlinie, ein Radweg sowie eine Bundesstraße. Um einen besseren Eindruck über die Größenverhältnisse des Steinbruchareals

zu bekommen sind in Abbildung 2 die wesentlichsten Abmessungen eingezeichnet, zudem ist die Lage der Verkehrswege und eines Steinschlagschutzdamms ersichtlich.

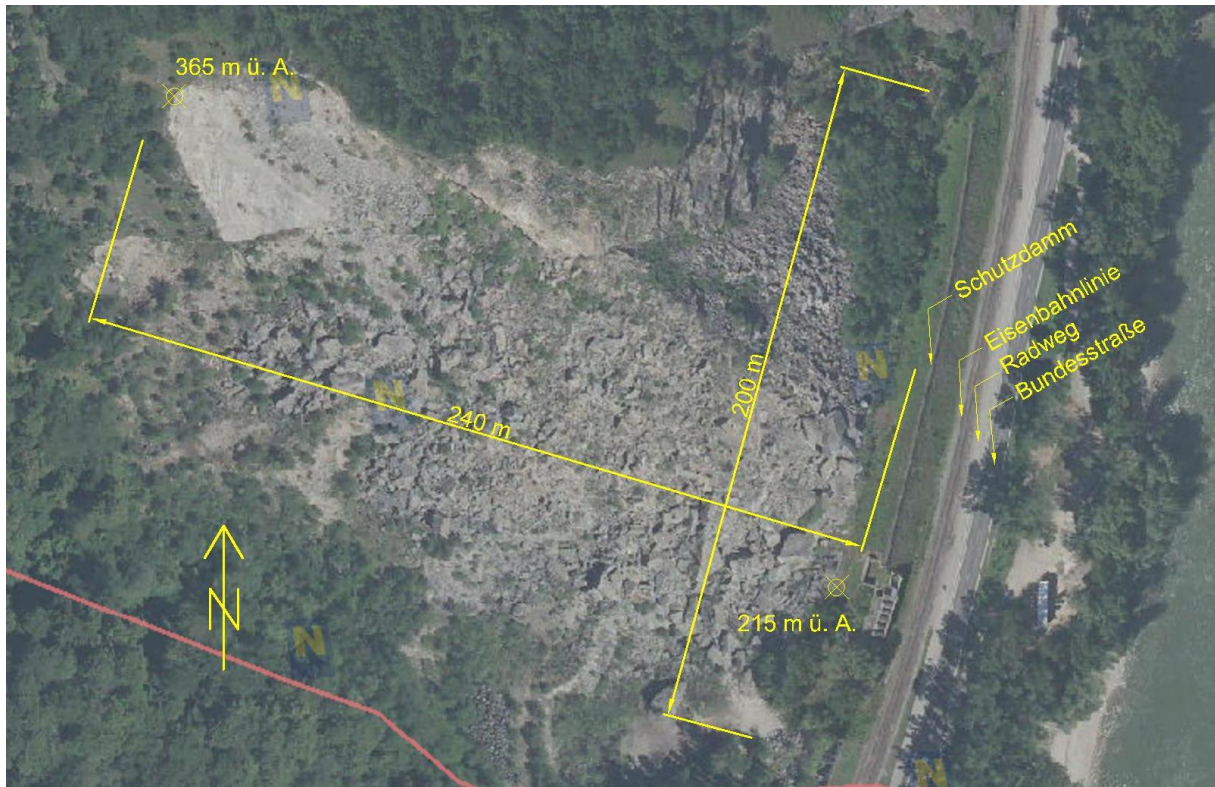


Abbildung 2: Abmessungen des Steinbruchs (Fotounterlage: NÖ-Luftbildatlas 2014)

1.2 Aufgabenstellung

Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass es in Zukunft zu weiteren Felsstürzen kommt, wurde beschlossen, die vom Steinbruch ausgehende Gefahr - vor allem in Bezug auf die Gefährdung der Verkehrswege - intensiv zu untersuchen.

Ergebnis der bisher vorliegenden Betrachtungen ist unter anderem der ‚Bericht über Untersuchungen der vom ehemaligen Tagbau Fehring in Spitz an der Donau ausgehenden Gefahr durch Felsstürze‘. (Poisel, 2016) Das Wort „Gefahr“ wird vom Fachbereich Ingenieurgeologie der geologischen Bundesanstalt folgendermaßen definiert:

„Eine Gefahr beschreibt den Umstand, dass aus einem Prozess ein Schaden für Personen und / oder Sachgüter resultieren kann. Die Gefahrenbeurteilung erfolgt prozessgruppen oder prozessartspezifisch unter Einbeziehung der Intensität und der Eintrittswahrscheinlichkeit.“ (Geologische Bundesanstalt, 2013)

Im Rahmen des Berichts wurden zwei mögliche zukünftige Ablöseszenarien beschrieben, für welche Abschätzungen bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeiten in Form von Wiederkehrperioden angegeben wurden. Da jedoch keine objektiven Grundlagen zur Bewertung

einer Intensität zukünftiger Ereignisse – z. B. in Form von möglichen Reichweiten – vorlagen, war die Einschätzung einer Gefahr nach der oben angeführten Definition nicht möglich.

Ziel der gegenständlichen Arbeit war - ergänzend zu den Ergebnissen des Berichts - die zwei definierten Ablöseszenarien mithilfe des diskontinuumsmechanischen Berechnungsprogramms 3DEC (Itasca, 2013)¹ zu simulieren. Diese numerischen Berechnungen der Szenarien sollten Erkenntnisse über die Reichweite der Ereignisse liefern und somit eine objektive Einschätzung der durch den Steinbruch ausgehenden Gefahr ermöglichen.

Neben der Klärung des Gefährdungspotentials wirft der Fall Spitz die Frage auf, inwiefern bauliche Maßnahmen – die nur mit erheblichem Kostenaufwand realisierbar wären – zu einer Verbesserung der Situation beitragen können bzw. ob die Reichweiten der Ablöseszenarien für eine Durchführung baulicher Maßnahmen sprechen, vor allem unter den Aspekten von Kosten-Nutzen-Betrachtungen. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen sollen dabei als Hilfestellung für weitere Überlegungen dienen.

1.3 Frühere Felssturzereignisse

1.3.1 Übersicht

Poisel fasste in seinem Bericht alle Ereignisdokumentationen der nennenswerten Felsstürze zusammen. Da im weiteren Verlauf Bezug zu einzelnen Ereignissen genommen wird, werden die tabellarische Zusammenfassung und die Beschreibung der relevanten Einzelereignisse hier unverändert wiedergegeben²:

Datum	Volumen [m ³]	Wettereinfluss	Quelle
12.03.1961	70.000	nein	Schwenk (1992)
1975	viele Blöcke (geschätzt 1.000 m ³)	ja	Schwenk (1992)
04.10.1984	10.000	nein	Eppensteiner & Poisel
23.04.1996	100	?	Bertagnoli 160303
11.10.2002	60.000 - 85.000	ja	Bertagnoli 160225
16.04.2006	2.500 - 5.000	nein	Scheikl (2006)
2012-2015	mehrmals einige m ³	?	Bericht BD3

Tabelle 1: Felssturzereignisse im Steinbruch Spitz an der Donau (Poisel, 2016)

¹ Alle folgenden Erwähnungen des Berechnungsprogramms 3DEC beziehen sich auf die im Literaturverzeichnis genannte Version (Itasca, 2013). Die Quelle wird dabei nicht erneut angegeben.

² Direkt aus Quellen übernommene Textpassagen sind im weiteren Verlauf der Arbeit kursiv geschrieben und unter Anführungszeichen angeführt.

Der Fokus der 3DEC Simulationen lag auf der Untersuchung der Gefährdung durch große Ereignisse, deshalb werden die Ereignisse 1961, 1984 und 2002 kurz genauer beschrieben:

1.3.2 Ereignis 1961

„Infolge des intensiven Abbaus bis zum Jahr 1961 gegen die Einfallsrichtung der Schieferung des Silikatmarmors entstand eine 180 m lange, etwa 60 bis 70 m hohe, mit 50° bis 60° steile Abbauwand, die parallel zur Gleisanlage der ÖBB verlief und die die Schieferung stark unterschneidete (Schwenk 1992). Am 12.3.1961 um 7,00 Uhr früh lösten sich etwa 70.000 m³ entlang einer Schieferungsfläche mit einer Mächtigkeit von etwa 10 m, stürzten auf die Bruchsohle ab und verschütteten diese bis fast zum Damm der Gleisanlage [...]. Werkstätte, Büro und Wohngebäude wurden schwer beschädigt. Die darin befindlichen Personen kamen nicht zu Schaden. Etwa 2/3 der Gesamtmasse stürzten über die Bruchwand ab, der Rest blieb nach einer kurzen Gleitbewegung in den Mulden der Gleitfläche mehrere Jahre liegen. Brecheranlage, Sortierung, Werkstätte sowie das Wohn- und Bürogebäude wurden schwer beschädigt. Der Besitzer (Dr. Prager) flüchtete mit seiner Familie aus den im Stock gelegenen Schlafräumen über den Balkon ins Freie.“

Ein auslösendes Moment konnte nicht eindeutig festgestellt werden.“ (Poisel, 2016)

Die folgenden Abbildungen 3 und 4 zeigen die Situation nach dem Felssturz.

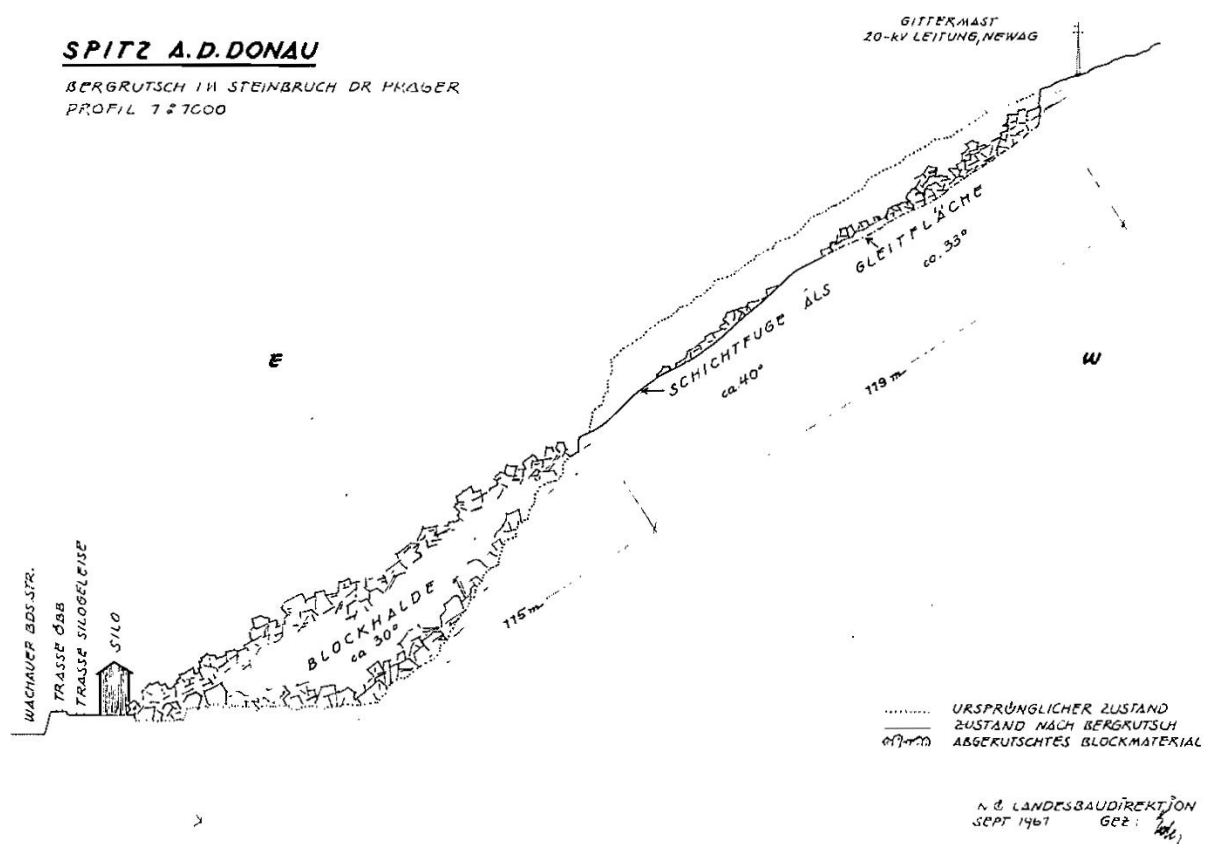


Abbildung 3: Profilschnitt durch die Sturzhalde von 1961 (Schwenk, 1992)



Abbildung 4: Ansicht des Steinbruchs nach dem Ereignis 1961 (Schwenk, 1992)

1.3.3 Ereignis 1984

„Zur Vermeidung des weiteren Unterschneidens der Schieferung wurde die Abbaurichtung geändert. Der Abbau erfolgte nun vom Graben südlich des Bruchgeländes aus nach Norden [...]. Dabei wurde das südliche Widerlager des Gewölbes, das sich beim früheren Abbau nach Westen gebildet hatte [...] so stark aufgelockert und geschwächt, dass sich vorerst ein den NW – SE streichenden, steil stehenden Trennflächen folgender Riss [...] bildete und am 4.10.1984 die dadurch losgelösten Massen abstürzten. Die Sturzmassen erreichten die Tankstelle und beschädigten sie leicht, ein Block ($< 0,5 \text{ m}^3$) durchschlug das Geländer der Gleisanlage und blieb auf der Bundesstraße liegen [...].“ (Poisel, 2016)



Abbildung 5: Ereignis 1984 - Blick nach oben (Poisel, 2016)



Abbildung 6: Ereignis 1984 - Blick nach unten (Poisel, 2016)

1.3.4 Ereignis 2002

„Am 11.10.2002 ereignete sich jener Felssturz, der das heutige Bild des ehemaligen Tagbaugeländes prägt. Die auslösende Gleitbewegung erfolgte mit hoher Wahrscheinlichkeit auf derselben Schieferungsfläche, auf der bereits die Felsmassen des Ereignisses 1984 abglitten. Die Bewegung erfolgte überwiegend in Form eines Gleitens, weshalb der Hauptteil der Felsmasse nicht die Bahngleise erreichte.“ (Poisel, 2016)

Eine Ansicht der Sturzhalde des Ereignisses 2002 zeigen Abbildung 7 (Blick nach unten) und Abbildung 1 (Blick vom gegenüberliegenden Donauufer). Aufgrund der besonderen Stellung dieses Ereignisses folgt eine detailliertere Beschreibung in Kapitel 2.



Abbildung 7: Ereignis 2002 - Blick nach unten (Poisel, 2016)

1.4 Geologische Gegebenheiten

Zur Beurteilung der geologischen Bedingungen stand neben den Berichten diverser Begehungen - (Grasemann, 2016) (Mali, 2006) (Wagner, 2006) - ein mittels Drohnenbefliegung erstelltes dreidimensionales Modell der Firma 3GSM GmbH zur Verfügung. Die Besonderheit dieses Modells ist seine fotorealistische Oberfläche, die durch ein spezielles Verfahren aus überlappenden, georeferenzierten Fotos zusammengesetzt ist. Aufgrund der Erkennbarkeit von geologischen Strukturen auf der räumlich richtigen und nachvollziehbaren Position, erlaubt das

so erstellte Modell Untersuchungen geologischer Merkmale in schwer zugänglichen Bereichen. (Poisel, 2016)

Das vorliegende Gestein ist ein grauer, grobkristalliner Marmor und wird auch Wachauer- oder Spitzer-Marmor genannt. Ursprünglich wurde der Steinbruch vermutlich im Zuge der Errichtung der Donauuferbahn erschlossen, später wurde das Gestein vor allem im Straßen- und Wasserbau verwendet. (Schwenk, 1992) Um das immer wiederkehrende Auftreten der Felsstürze zu verstehen, sind vor allem zwei geologische Merkmale von Bedeutung: die Raumstellung des Trennflächengefüges und die Scherparameter der verschiedenen Gesteinslagen.

Die Gesteinsschichten haben ein durchschnittliches Einfallen von 120/40, was etwa einem Einfallen parallel zum Einfallen des Hanges in Richtung Donauufer entspricht. (Grasemann, 2016) Eine derartige Raumstellung führt nicht zwangsläufig zu problematischen Verhältnissen, da bei einem ungestörten Zustand der Gesteinspakete diese auf der Basis aufstehen würden und so nach rein kinematischen Überlegungen keine Bewegungen möglich wären. Erst durch den fortschreitenden Abbau wurden die Gesteinspakete entlang der Basis des Steinbruchs soweit unterschritten, bis die Bewegungsvorgänge ermöglicht wurden.

Einen weiteren wesentlichen Beitrag zur Absturzgefahr liefern die zentimeter- bis meterdicken Amphibolitlagen zwischen den Marmorpaketen. Diese bilden aufgrund ihrer niedrigeren Scherfestigkeit im Vergleich zu dem kompakten Marmor natürlich entstandene Schwachstellen, mit einem Reibungswinkel der vermutlich sehr nahe am kritischen Reibungswinkel für ein Grenzgleichgewicht liegt. (Wagner, 2006) Alle größeren Bewegungen fanden entlang dieser Horizonte statt. (Grasemann, 2016) Zudem wirken diese Schichten als Wasserstauer, wodurch bei größeren Niederschlagsereignissen die Stabilität zusätzlich negativ beeinflusst werden kann. (Mali, 2006)

Aus strukturgeologischer Sicht kann das Steinbruchareal in drei Gebiete eingeteilt werden, welche in Abbildung 8 zu sehen sind. Bezogen auf die gegenständliche Arbeit sind vor allem die Unterschiede zwischen Gebiet 1 und 2 von Interesse, da sie eine Erklärung liefern können, warum das Ereignis des Jahres 2002 nicht auch die weiter nördlich unterschrittenen Bereiche betroffen hat. Die maßgeblichen Unterscheidungsmerkmale werden in den folgenden Kapiteln kurz zusammengefasst.

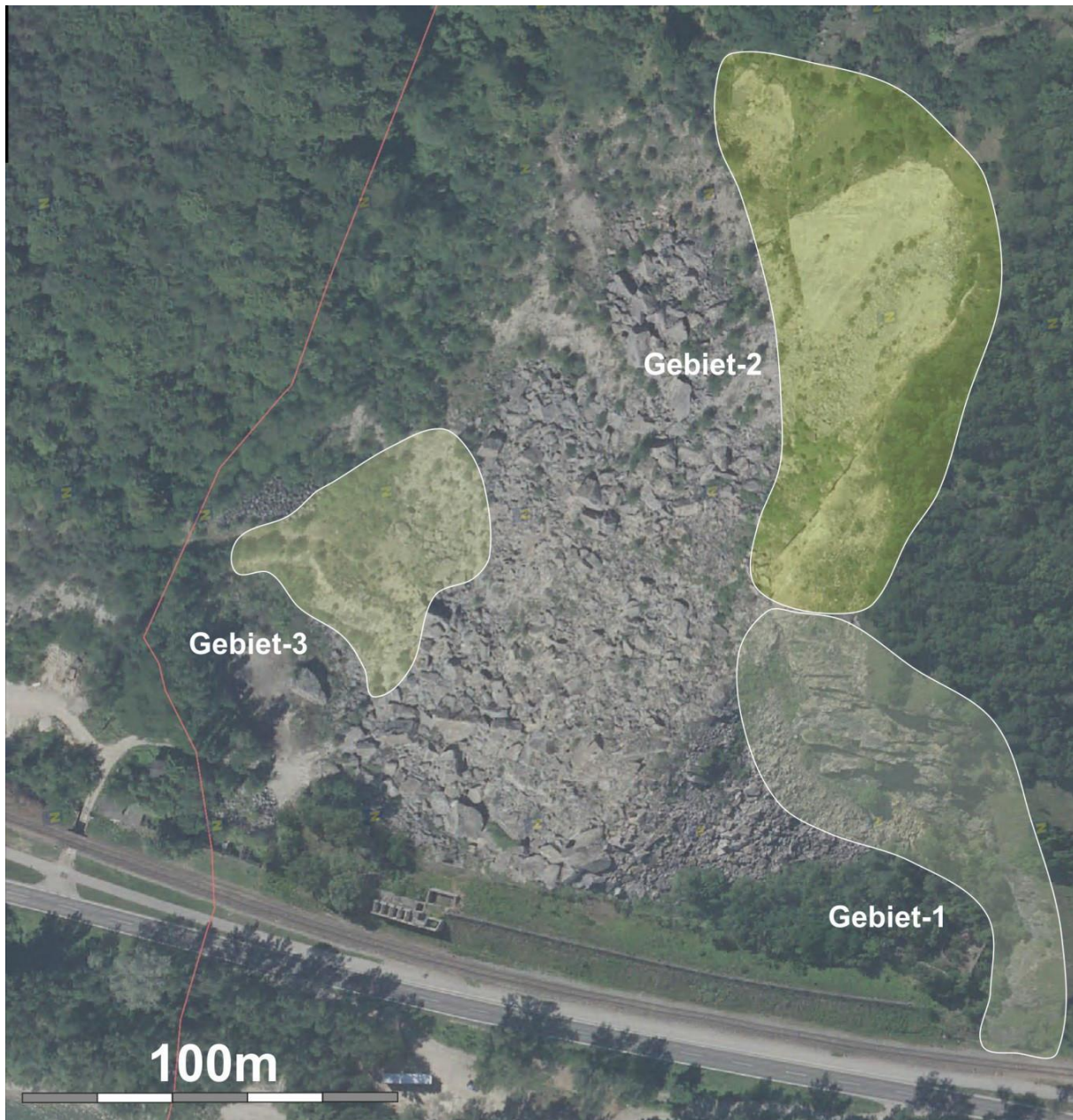


Abbildung 8: Struktureologische Gebiete (Grasemann, 2016)

1.4.1 Verfaltungen

Während die Hauptschieferung in Gebiet 2 - in dem sich auch der Felssturz von 2002 ereignete - vorwiegend planare Trennflächen aufweist, ist das Gebiet 1 durch eine unterschiedlich starke Verfaltung gekennzeichnet. Abbildung 9 zeigt eine Ansicht dieser Falten mit Blickrichtung nach Nordosten. Durch das flachere Einfallen der annähernd horizontalen Faltenschenkel kann in den Verfaltungen ein höherer Scherwiderstand aktiviert werden als auf einer planaren Gleitfläche. Die Falten wirken daher wie eine Verdübelung der Basis der darüber liegenden Schichten. (Poisel, 2016)

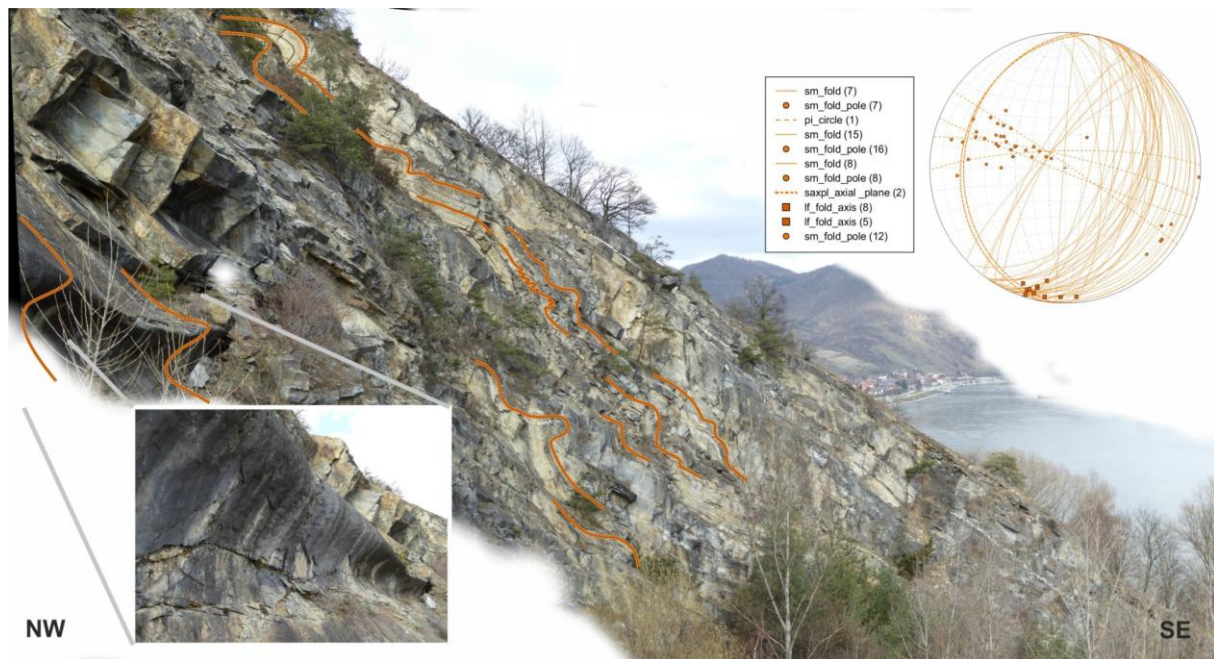


Abbildung 9: Verfallung im Gebiet 1 (Grasemann, 2016)

1.4.2 Raumstellung der Hauptschieferung

Die Fallrichtung in Gebiet 1 ist etwas mehr gegen den Uhrzeigersinn gedreht als die durchschnittliche Fallrichtung in Gebiet 2, was dazu führt, dass mit zunehmender nördlicher Richtung die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Gleiten auf zwei Ebenen stattfindet. (Poisel, 2016) Ansatzweise erkennbar wird dies durch einen Blick auf die Strukturplots der Gebiete 1 und 2 (Abbildung 10). Die blauen Großkreise zeigen dabei die Hauptschieferung. Die nordöstliche Begrenzung der Bewegung 2002 (auch seitliche Begrenzung 2002 genannt) ist in den annähernd senkrecht stehenden braunen Großkreisen zu erkennen (zur besseren Erkennbarkeit mit einer strichlierten Linie hervorgehoben). Hier wird sichtbar, dass der Fallpfeil der Hauptschieferung in Gebiet 1 tendenziell mehr in die seitliche Begrenzung zeigt als in Gebiet 2. Poisel hat in seinem Bericht zusätzlich auf Basis der Auswertung der Drohnenbefliegung mit statistischen Methoden gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Gleitens auf zwei Ebenen in Gebiet 1 höher als in Gebiet 2 ist. (Poisel, 2016)

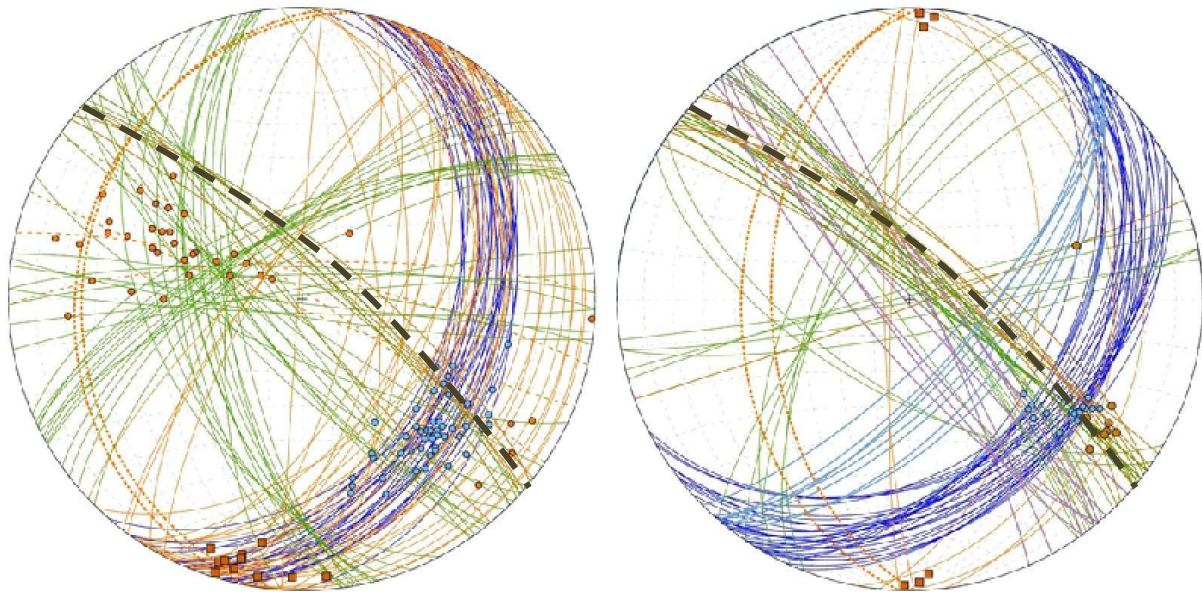


Abbildung 10: Strukturplots der Gebiete 1 (links) und 2 (rechts) (Grasemann, 2016)

Die Verfallung im Basisbereich, sowie die möglicherweise höhere Sicherheit durch einen steigenden Keilfaktor, können eine Erklärung liefern, warum der Gleitkörper des Absturzes 2002 nicht über die seitliche Begrenzungsfläche hinaus ging.

1.4.3 Wichtigste Trennflächensysteme

Im folgenden Abschnitt werden die (bezogen auf die weitere Bearbeitung) wichtigsten Trennflächen beschrieben.

1.4.3.1 Gleitebene 2002

Die Versagensfläche des Ereignisses von 2002 entspricht mit einer Raumstellung von 120/35 etwa dem im vorigen Abschnitt beschriebenen durchschnittlichen Einfallen der Hauptschieferung, wobei sie sich im oberen Bereich auf ca. 38° aufsteilt. Abbildung 11 zeigt die räumliche Lage der Gleitfläche 2002, wobei die Fläche ausgehend von der freigelegten Gleitfläche 2002 (blau markiert) in alle Richtungen extrapoliert wurde. Aufgrund verschiedener geometrischer Überlegungen schließt Poisel in seinem Bericht darauf, dass das Ereignis 1984 auf derselben Gleitfläche abgeglitten ist. Es ist deutlich zu sehen, dass große Teile des Steinbruchs nach wie vor an ihrer Basis unterschritten sind und somit – rein kinematisch – Bewegungen möglich sind. Die durch den Absturz 2002 frei gelegte Fläche wird auch Pultfläche genannt.

1.4.3.2 Seitliche Begrenzung 2002

Die nordöstliche Begrenzung des Ereignisses von 2002 ist eine annähernd senkrecht stehende Trennfläche mit der Raumstellung 034/90. Es wurde angenommen, dass sich ähnliche Klüfte in nicht näher definierten Abständen wiederfinden könnten, die Orientierung dieser Fläche lieferte somit auch die Basis für die seitlichen Begrenzungen der zukünftigen Ereignisse (siehe 3.2).

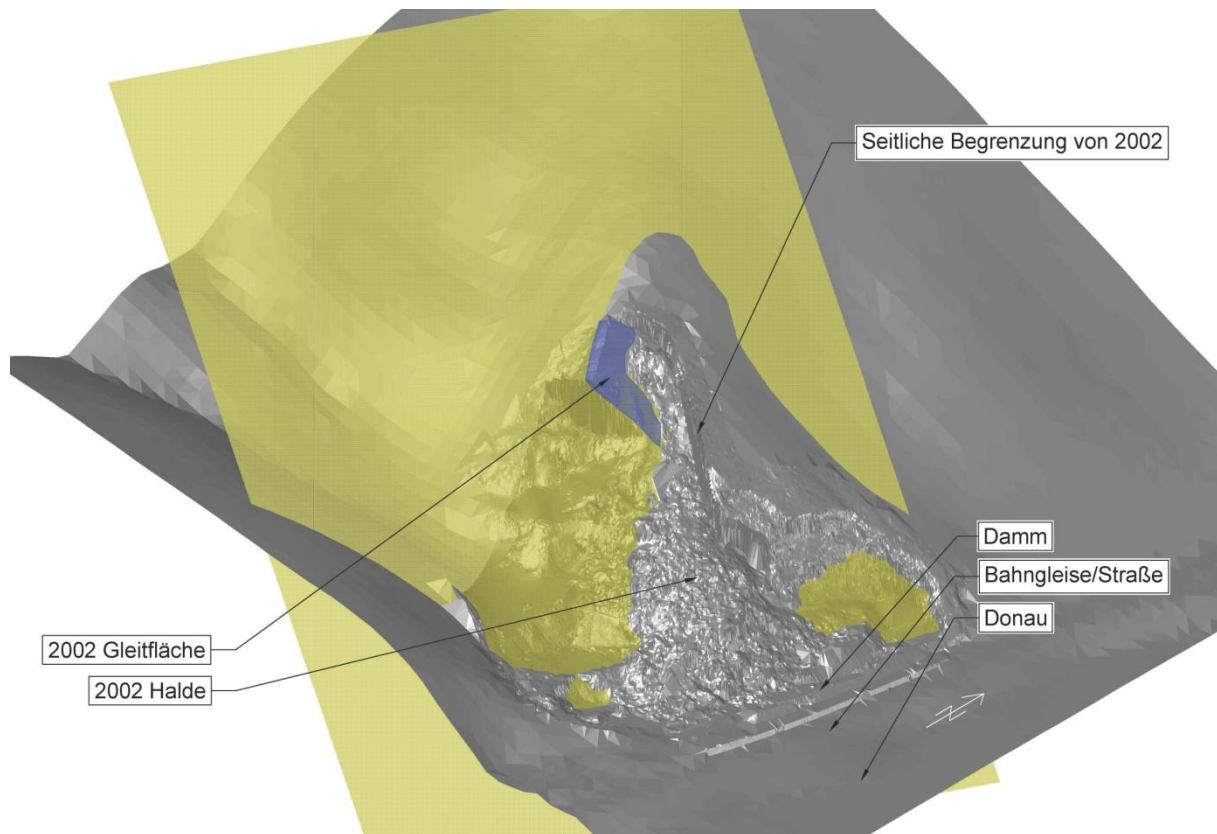


Abbildung 11: Extrapolation der Gleitfläche 2002 (Digitales Geländemodell: Wagner, 2006)

1.4.3.3 Oberste Abbauwand

Die Oberste Abbauwand ist eine durch den Abbau freigelegte senkrechte Trennfläche mit einer Fallrichtung von annähernd 180°. Die Abbauwand erlaubt eine Einsicht in den Aufbau der Schichtpakete mit den versagensanfälligen Amphibolitlagen zwischen den Marmorlagen. Sie findet vor allem im Zusammenhang mit den möglichen Zukunftsszenarien Erwähnung. Abbildung 12 zeigt den oberen Bereich des Steinbruchs mit der Pultfläche, der Obersten Abbauwand und der seitlichen Begrenzung von 2002 (Blickrichtung Norden).



Abbildung 12: Oberer Bereich des Steinbruchs (Foto: Rainer Poisel)

2 Ereignis 2002

Die Berechnung des Abgangs zukünftiger Ablöseszenarien erfolgte in zwei Phasen: in einer ersten Phase wurde das Ereignis 2002 nachgebildet. Sobald wesentliche, vorab definierte Merkmale der Ablagerung von 2002 simuliert werden konnten, wurden mit den dafür erforderlichen Modellparametern in einer zweiten Phase die möglichen Ablöseszenarien zum Abgleiten gebracht. Um das Modellverhalten der ersten Phase bewerten zu können, musste zuerst der Vorgang des Jahres 2002 analysiert und verstanden werden. Deshalb wird er im Folgenden genauer beschrieben.

Die Felsgleitung von 2002 wurde in mehreren Quellen genau dokumentiert. Im Zuge seiner Untersuchungen zu einer Sanierungsmöglichkeit (Wagner, 2006) verwendete Wagner drei digitale Geländemodelle, welche von Wagner zur Bearbeitung der vorliegenden Diplomarbeit zur Verfügung gestellt wurden. Die Modelle beziehen sich dabei auf folgende Daten und werden im weiteren Verlauf wie folgt genannt:

- Modell 1997: Oberflächenmodell auf Basis von Vermessungsdaten mit Stand 1997
- Modell 2006_A: Oberflächenmodell auf Basis eines Laserscans mit Stand 2006 (inkl. der Sturzhalde 2002)
- Modell 2006_B: Oberflächenmodell exklusive Gleitkörper und Halde 2002, erarbeitet auf Basis der Modelle 1997 und 2006_A, sowie Vermessungsdaten der näheren Umgebung. Dieses Modell bildet, mit Ausnahme eines Teilbereichs³, die derzeitige unbewegliche Oberfläche ab.

Die jeweils abgebildeten Modellbereiche sind in Abbildung 13 farblich hervorgehoben.

³ Die Halde des Ereignisses 1984 ist Bestandteil der Oberfläche des Modells 2006-B. Näheres dazu siehe Abschnitt 2.2.4

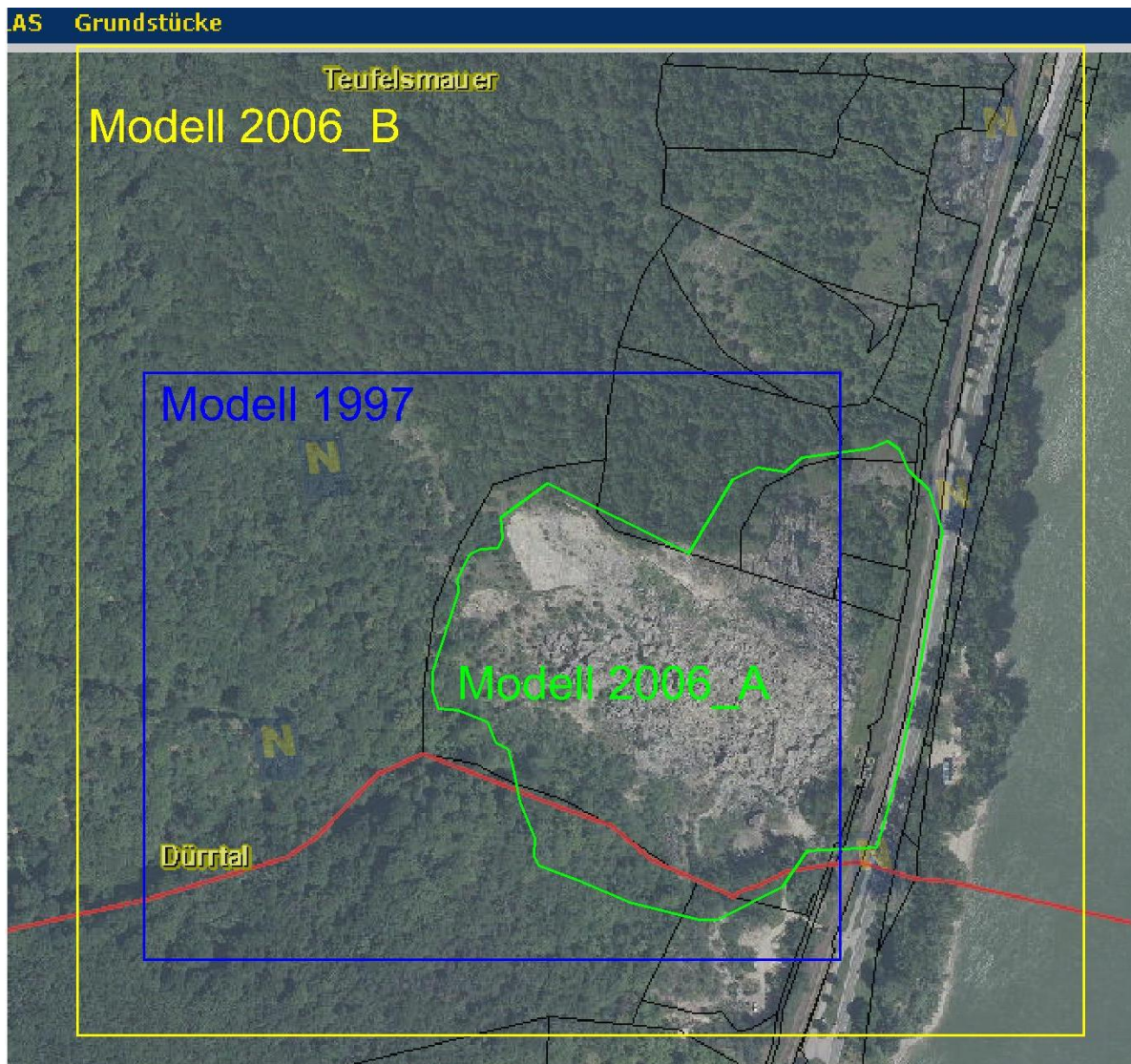


Abbildung 13: Modellbereiche (Fotounterlage: NÖ Atlas 2014)

2.1 Beschreibung des Felssturzes 2002

Eine Überlagerung der Modelle 1997 und 2006_B erlaubt eine deutliche Darstellung des Gleitkörpers 2002, in der auch die bereits angesprochene Unterschneidungsproblematik gut zu erkennen ist (Abbildung 14).

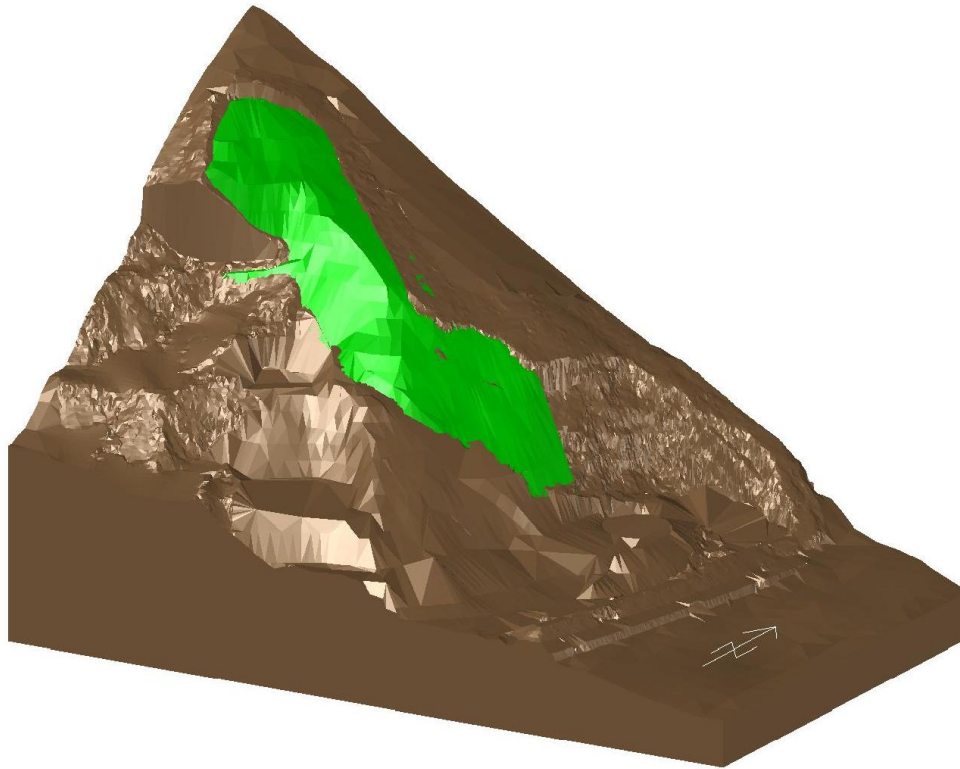


Abbildung 14: Gleitkörper 2002

Am 11.10.2002 löste sich der farblich hervorgehobene Gleitkörper und glitt entlang einer der Amphibolitlagen in Richtung Donauufer, bis er einige Meter vor den Bahngleisen zu liegen kam, was ungefähr der Lage des heutigen Dammfußes entspricht. Während des Bewegungsvorgangs wurden die ca. 70.000 m³ Felsvolumen in eine kegelförmige Sturzhalde mit ca. 115.000 m³ zerlegt. (Wagner, 2006) Die Halde ist - besonders im unteren Bereich - durch eine sehr grobblockige Beschaffenheit gekennzeichnet, die Kantenlängen der Einzelblöcke betragen bis zu 15 m und mehr.

Ein Blick auf den Profilschnitt (Abbildung 15) zeigt, dass der Gleitkörper zwar unterschritten war, jedoch nicht im freien Fall nach unten gestürzt sein kann, da der Gleitkörper - bis auf einen Teilbereich der über die oberste Abbauwand Richtung Süden stürzte - aufgrund der Geländeform ständigen Kontakt zur Oberfläche gehabt haben muss.

Die geringe Reichweite, die grobblockige Beschaffenheit, die vertikale Erstreckung der Halde und der kontinuierliche Oberflächenkontakt lassen den Rückschluss zu, dass der Sturzprozess hauptsächlich als Gleitvorgang mit relativ niedriger Geschwindigkeit erfolgte. Der untere Bereich des Gleitkörpers konnte keine großen Distanzen zurücklegen bis er von der ebenen Steinbruchbasis abgebremst wurde. Sobald der untere, grobblockige Bereich der Halde einen

entsprechenden Widerstand aufbauen konnte, kamen die Einzelblöcke des durch den Bewegungsvorgang zerlegten Gleitkörpers zu stehen.

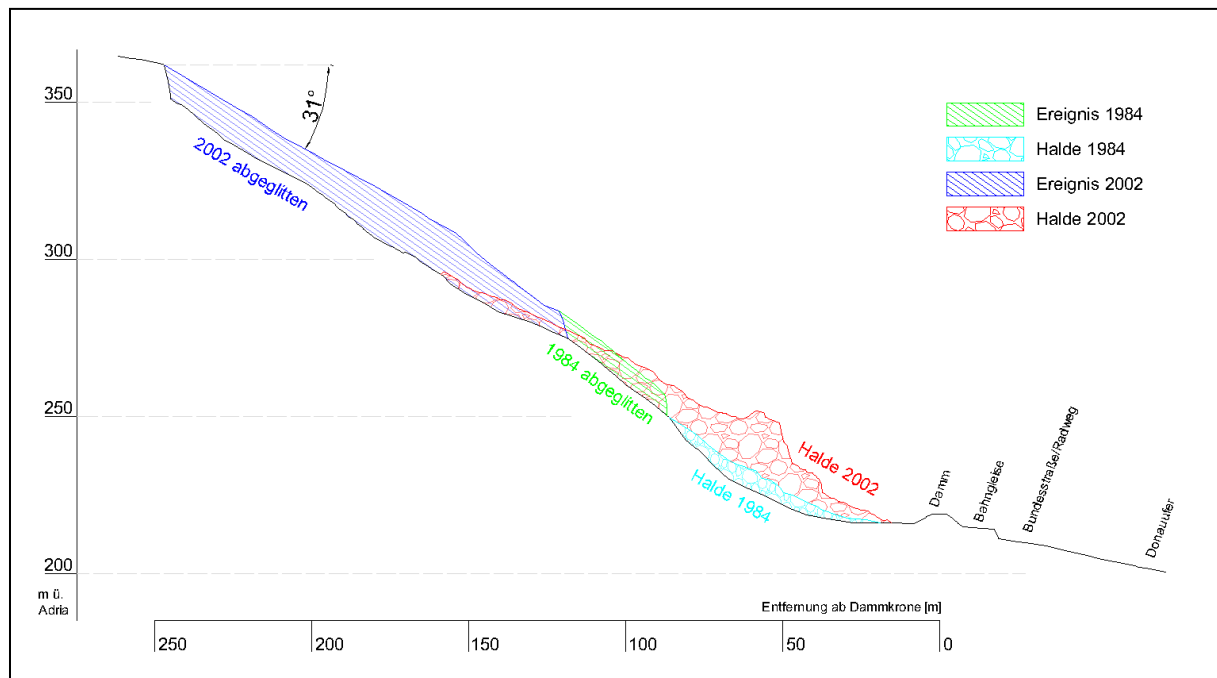


Abbildung 15: Profilschnitt der Halden 1984 und 2002 (Poisel, 2016)

2.2 Analyse der Ablagerungsform

Um eine Ablagerung der Gleitmasse entsprechend den natürlichen Verhältnissen abzubilden, musste definiert werden, welche Merkmale nach einer Simulation erkennbar sein müssen. Dafür soll im folgenden Abschnitt die Halde des Ereignisses von 2002 beschrieben werden, um danach die wesentlichsten Merkmale abzuleiten. Den folgenden Eigenschaften wurde dabei eine Bedeutung eingeräumt:

2.2.1 Blockgröße

Die Halde besteht zu einem Großteil aus groben Blöcken mit Kantenlängen von bis zu 15 m. Wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, kamen die größten Blöcke im zentralen Teil und im unteren Bereich der Halde zu liegen, hier hat sie vermutlich die größte Mächtigkeit (siehe auch Abbildung 15).

2.2.2 Vertikal- und Quererstreckung

Die Halde lagerte sich in Form eines Kegels ab, wobei die oberen Bereiche nicht die Steinbruchbasis erreichten, sondern auf der Gleitfläche liegen blieben. Die gesamte Halde ist an

der Basis ca. doppelt so breit wie im oberen Bereich, wobei die Grabenstruktur im Nordosten hauptsächlich mit kleineren Bruchstücken aufgefüllt ist.



Abbildung 16: Abmessungen der Halde 2002 (Fotounterlage: NÖ Atlas 2014)

2.2.3 Längserstreckung der Halde

Der Fahrböschungswinkel einer Massenbewegung bezeichnet den Winkel zwischen der Horizontalen und der Verbindungsgeraden vom obersten Ablösepunkt bis zum entferntesten Endpunkt der Ablagerungen. Im Fall Spitz entspricht dies im Wesentlichen der Geländeneigung von ca. 30°. Ersichtlich wird dies durch einen Blick auf den Profilschnitt durch die Halde von 2002 (Abbildung 15). Der Endpunkt der Halde fällt etwa mit einer Verlängerung der Geländeoberkante zusammen. Die Ereignisdokumentation von 1961 zeigt eine ähnliche Ablagerungsform, auch hier entspricht der Fahrböschungswinkel ca. der Geländeneigung (siehe Abbildung 3).

2.2.4 Einfluss der Halde von 1984

Die Sturzhalde des Ereignisses 1984 wurde nicht vollständig beräumt und ist somit Bestandteil des jetzigen Haldenkörpers (siehe Abbildung 15). Die folgenden Darstellungen zeigen die Abrissstrukturen im Orthofoto des Jahres 2002 (vor dem Ereignis 2002), sowie eine Ansicht der Halde mit markiertem Gleitkörper des Ereignisses 2002.



Abbildung 17: Strukturen der Ereignisse 1984 und 2002 (Poisel, 2016)



Abbildung 18: Ansicht der Halde von 1984 und hervorgehobener Gleitkörper von 2002 (Poisel et al., 2016)

Es muss daher berücksichtigt werden, dass die Oberfläche des Modells 1997 im südlichen Basisbereich die Halde von 1984 beinhaltet. Eine Überlagerung der Modelle 1997 und 2006_A⁴ erlaubt eine Darstellung bzw. in weiterer Folge einen Schnitt durch die Halde in diesem Bereich. Der Schnitt zeigt, dass hier die Oberflächen der beiden Modelle - bezogen auf die größten Blockabmessungen - nah beieinanderliegen, was darauf schließen lässt, dass hauptsächlich die großen Blöcke von 1984 durch kleinere Bruchstücke eingeschüttet wurden.

⁴ Anmerkung: Oberfläche inklusive der Halde 2002

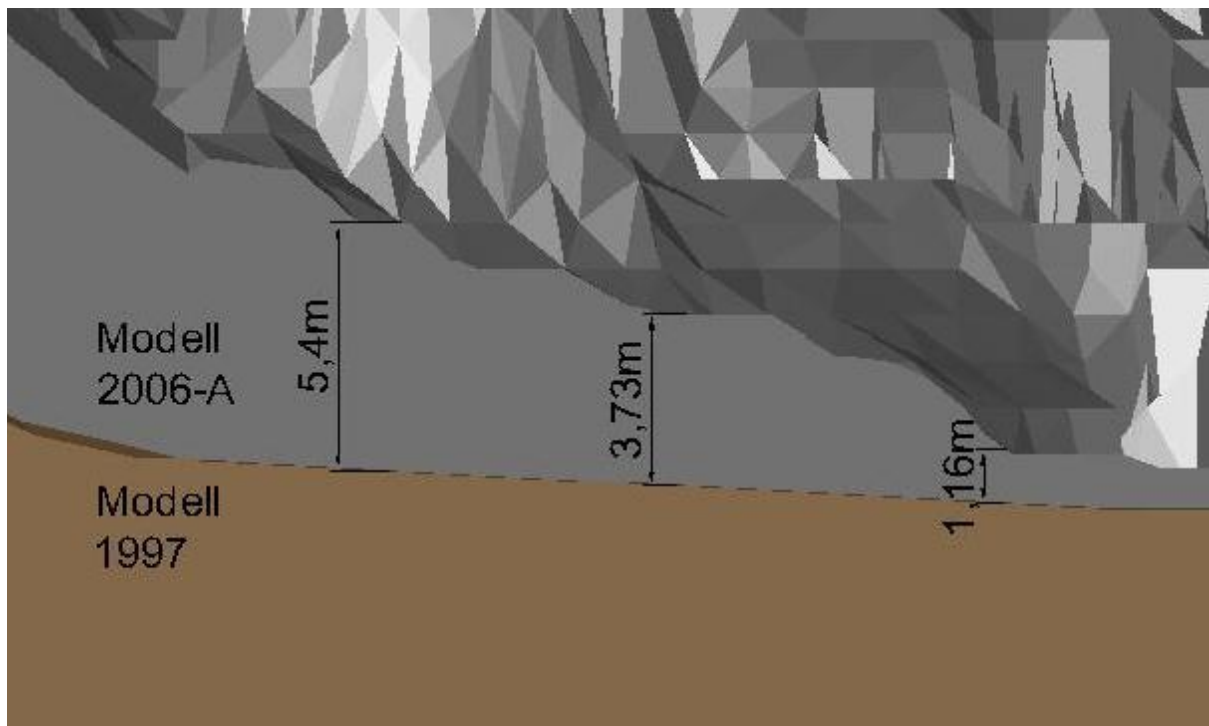


Abbildung 19: Schnitt durch den südlichen Basisbereich

2.2.5 Zusammenfassung der Ablagerungsmerkmale

Im Folgenden werden die wesentlichsten, bei den Simulationen zu erfassenden Ablagerungsmerkmale zusammengefasst:

1. Der Fahrböschungswinkel muss etwa der Geländeneigung von ca. 30° entsprechen.
2. Die Sturzhalde darf maximal bis zum Dammfuß vordringen.
3. Nicht die gesamte Gleitmasse soll die Steinbruchbasis erreichen, obere Bereiche sollen auf der Gleitfläche liegen bleiben.
4. Die Halde soll kegelförmig zu liegen kommen.

3 Mögliche Ablöseszenarien

3.1 Delphi Panel

Die Gegebenheiten im Steinbruch machen eine Einschätzung bezüglich möglicher zukünftiger Ablöseszenarien schwierig. Während die unterschnittenen Bereiche zwar durch geometrische Überlegungen lokalisiert werden können, ist eine Aussage, welche konkreten Schichtpakete als nächstes abgleiten könnten, nur schwer zu treffen. Es gibt keine Hinweise auf Ablösungen, wie z. B. offene Klüfte, Absetzungen usw. Poisel hat daher im Rahmen seiner Untersuchungen ein so genanntes Delphi-Panel abgehalten. In seinem Bericht hält er fest:

„Wenn eine Größe oder ein Szenario auf Grund fehlender Daten nicht festgelegt werden kann, besteht die Möglichkeit, einer Gruppe von Experten (Expertenpanel, Delphi Panel), die über dasselbe Wissen verfügen bzw. die ein bestimmtes Problem bereits einmal bearbeitet haben, konkrete Fragen zu stellen. Nach der schriftlichen Beantwortung einer Frage durch jeden einzelnen Experten in anonymer und unabhängiger Form werden die Antworten zur Einsichtnahme aufgelegt. Daran anschließend hat jeder Experte die Möglichkeit, seine Stellungnahme auf Basis der anderen Antworten zu überdenken und es erfolgt neuerlich eine schriftliche Beantwortung der Frage durch jeden einzelnen Experten in anonymer und unabhängiger Form. Nach mehreren Runden dieses Prozesses kann meistens eine Angleichung der Meinungen erreicht werden, die die gesuchte Größe oder das gesuchte Szenario mit der größten Zutreffenswahrscheinlichkeit repräsentiert.

Für die Festlegung der nächsten, größeren Ablöseszenarien im ehemaligen Tagbau Spitz a.d. Donau gibt es zwar die oben beschriebenen Anhaltspunkte, ihre eindeutige, objektive Festlegung ist aber nicht möglich. Es wurden daher Experten, die bereits einmal mit dem ehemaligen Tagbau Spitz a.d. Donau befasst waren, zu einem Delphi Panel eingeladen. Diese Vorgangsweise sollte auch sicherstellen, dass jede vorhandene Information so weit wie möglich in die Festlegung möglicher Ablöseszenarien einfließt.“ (Poisel, 2016)

Das Ergebnis dieses Expertengremiums sind die Ablöseszenarien mit den Bezeichnungen ‚Ereignis 1‘ und ‚Ereignis 2‘.

3.2 Ereignis 1

Das erste Ablöseszenario betrifft ein Schichtpaket quer durch die oberste Abbauwand. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Schicht parallel zur Gleitfläche 2002 die Basis des Ereignisses 1 bildet. Weitere Begrenzungsflächen werden durch eine Fläche parallel zur

seitlichen Begrenzung von 2002 und den Zentralspalt⁵ gebildet. Der so entstehende Gleitkörper hat ein Volumen von ca. 15.000 m³ und ist in Abbildung 20 dargestellt.

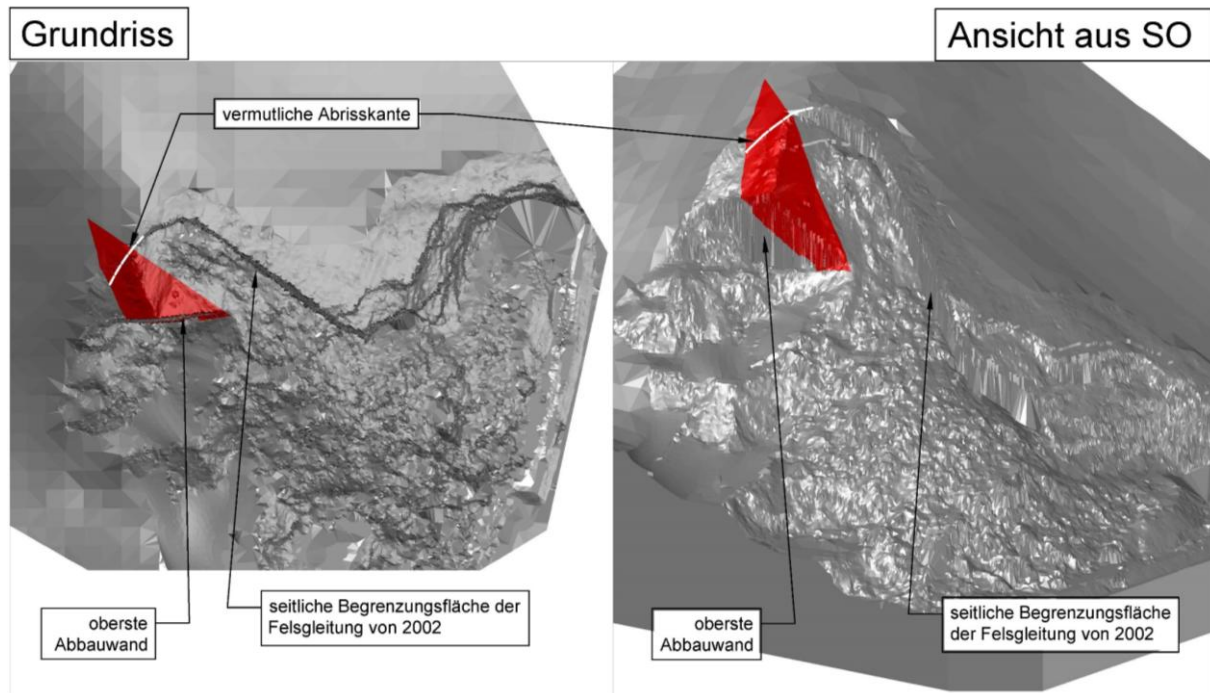


Abbildung 20: Ablöseszenario 'Ereignis 1' (Poisel, 2016)

Der Fußpunkt des Gleitkörpers steht dabei in der Halde von 2002 auf. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass diese Halde nicht genügend Widerstand aufbauen kann, um den Gleitkörper im Fall eines Loslösens aus dem Gesteinsverband an einer Bewegung zu hindern.

3.3 Ereignis 2

Das zweite Ablöseszenario betrifft ein weiteres unterschrittenes Gesteinspaket auf der Gleitfläche 2002. Eine seitliche Begrenzung Richtung Nordosten wird durch eine Fläche parallel zur seitlichen Begrenzung 2002 gebildet. Bei Eintreffen dieses Szenarios wären ca. 80.000 m³ betroffen. Abbildung 21 zeigt das Ereignis 2.

⁵ Der Zentralspalt ist eine offene Karstspalte in der Pultfläche (Gleitfläche 2002), wobei die genaue Ausrichtung bzw. der Verlauf dieser Trennfläche nicht exakt bekannt ist.

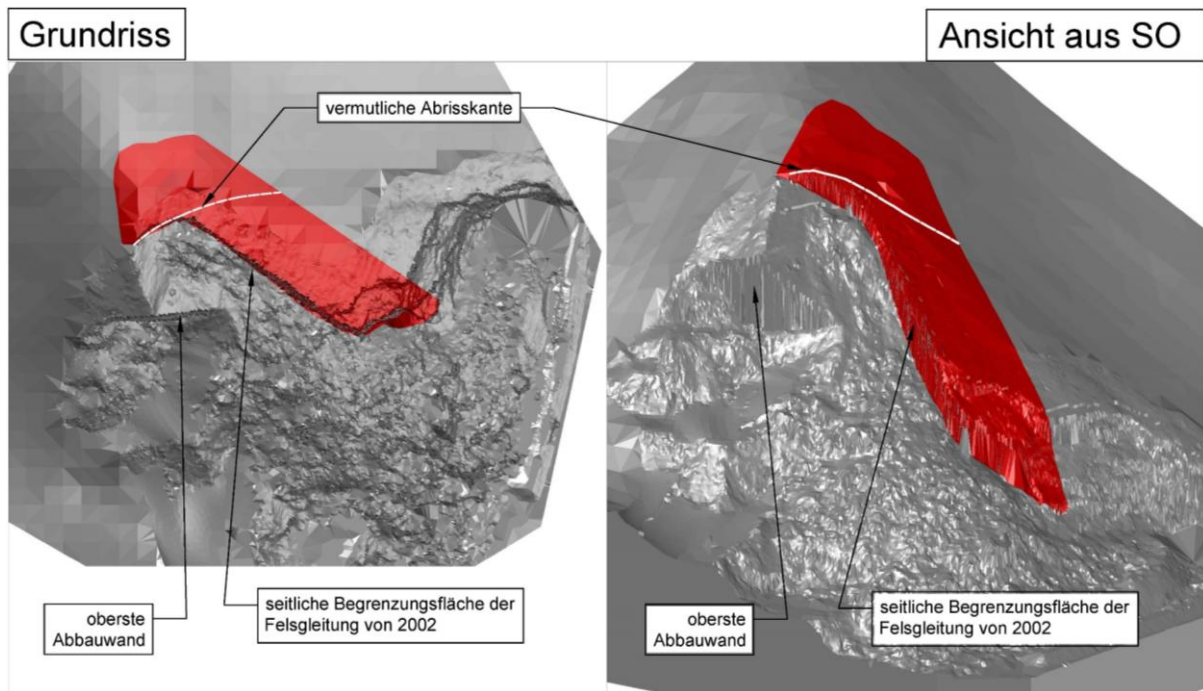


Abbildung 21: Ablöseszenario 'Ereignis 2' (Poisel, 2016)

4 3DEC Berechnungen

4.1 Allgemein

Hein-Stumpp beschäftigte sich intensiv mit 3DEC und dem darin verwendeten Berechnungsverfahren. Er fasste zusammen:

„Die Distinkte Elemente Methode ist ein von Cundall (1971) entwickeltes numerisches Verfahren, welches in die Gruppe der Diskreten Elemente Verfahren (Discrete Element Method – DEM) einzuordnen ist. Diese Methode findet Anwendung bei der Lösung felsmechanischer Problemstellungen und dient als Grundlage für die von der Itasca Consulting Group, Inc. angebotenen Programme UDEC, 3DEC und PFC.“

„Der 3 Dimensional Distinct Element Code (3DEC) ist ein numerisches Modellierungsverfahren basierend auf der Methode der Distinkten Elemente. Dieses Verfahren kann den diskontinuumsmechanischen Berechnungsverfahren zugeordnet werden.

In der numerischen Formulierung wird sowohl der diskrete Körper als auch dessen Kontakt zu den angrenzenden Blöcken berücksichtigt. Diese Modellierung ermöglicht es, dass sich einzelne Kluftkörper aus dem Verband lösen und Spalten (Klüfte) sich öffnen können.

3DEC ermöglicht es, beliebig viele Trennflächen zu modellieren und diesen Kluftigenschaften (Kluftnormal-, Kluftparallelsteifigkeit, Kohäsion und Reibungswinkel) zuzuordnen. Die Kluftkörper lassen sich sowohl als starre als auch als deformierbare Blöcke beschreiben. Eine Verwendung von starren Kluftkörpern empfiehlt sich, wenn die in dem Modell auftretenden Verschiebungen größtenteils durch Bewegungen in den Kontaktflächen erzeugt werden.“ (Hein-Stumpp, 2008)

In einer ersten Phase wurde 3DEC verwendet, um den Sturzvorgang von 2002 nachzubilden. Die dabei variablen Modellparameter wurden - ausgehend von vorab bestimmten Startwerten - variiert, bis definierte Eigenschaften des Ereignisses 2002 zufriedenstellend abgebildet werden konnten.

Die so ermittelten Modellparameter wurden in einer zweiten Phase zur Berechnung möglicher zukünftiger Ereignisse herangezogen.

4.1.1 Beschreibung von Starrkörperbewegungen in 3DEC

Im folgenden Kapitel wird der Formalismus für die Berechnung der Bewegungsvorgänge von Starrkörpern in 3DEC beschrieben. (Itasca Consulting Group Inc., 2013)

Bei den zu simulierenden Felsgleitungen soll das Berechnungsergebnis die Endlage der abgeglittenen Blöcke darstellen, man spricht auch von Runout-Berechnungen. Die Deformationen der Blöcke sind dabei von untergeordneter Bedeutung und können vernachlässigt werden. Die Klufkörper der jeweiligen Gleitkörper wurden daher als starre Einzelblöcke modelliert, die sich unabhängig voneinander bewegen können. Die translatorische Bewegung eines Blocks kann beschrieben werden durch

$$\ddot{x}_i + \alpha \dot{x}_i = \frac{F_i}{m} + g_i \quad (\text{Gl. 1})$$

mit:

- \ddot{x}_i ... Beschleunigung des Blockmittelpunkts
- \dot{x}_i ... Geschwindigkeit des Blockmittelpunkts
- α ... viskose Dämpfungskonstante (massenabhängig)
- F_i ... Summe der auf den Block einwirkenden Kräfte
- m ... Blockmasse
- g_i ... Vektor der Erdbeschleunigung

Die Rotationsbewegung eines starren Körpers, dessen Bewegung nicht gedämpft wird, kann durch die Euler'schen Gleichungen beschrieben werden:

$$\begin{aligned} I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 &= M_1 \\ I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 &= M_2 \\ I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 &= M_3 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

- I_1, I_2, I_3 ... Hauptträgheitsmomente des Blocks
- $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_3$... Winkelbeschleunigung um die Hauptträgheitsachsen
- $\omega_1, \omega_2, \omega_3$... Winkelgeschwindigkeit um die Hauptträgheitsachsen
- M_1, M_2, M_3 ... auf den Block wirkende Drehmomente

Aufgrund der üblicherweise geringen Geschwindigkeiten der Rotationen können die nichtlinearen Terme in (Gl. 2) vernachlässigt werden, wodurch die Gleichungen entkoppelt werden. Zudem sind die auftretenden Trägheitskräfte gering im Vergleich zu den auf den Block wirkenden Gesamtkräften, eine genaue Bestimmung der Hauptträgheitsachsen ist daher nicht

notwendig. 3DEC verwendet für die Berechnungen stets globale Achsen. Unter diesen Vereinfachungen und Einführung einer viskosen Dämpfungskonstante α erhält man

$$\dot{\omega}_i + \alpha\omega_i = \frac{M_i}{I} \quad (\text{Gl. 3})$$

wobei sich die Geschwindigkeit ω_i , und das Drehmoment M_i auf die globalen Achsen beziehen. Die Bewegungsgleichungen (Gl. 1) und (Gl. 3) werden nun mithilfe einer zentralen Finite-Differenzen-Berechnung integriert. Für den Zeitpunkt t gilt dadurch für die Geschwindigkeiten

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= \frac{1}{2} \left[\dot{x}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \dot{x}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \\ \dot{\omega}_i(t) &= \frac{1}{2} \left[\dot{\omega}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \dot{\omega}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{Gl. 4})$$

und die Beschleunigungen

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i(t) &= \frac{1}{\Delta t} \left[\dot{x}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{x}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \\ \ddot{\omega}_i(t) &= \frac{1}{\Delta t} \left[\dot{\omega}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{\omega}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{Gl. 5})$$

Wenn man diese Ausdrücke in die Bewegungsgleichungen (Gl. 1) und (Gl. 3) einsetzt und die Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt $t + \frac{\Delta t}{2}$ auswertet erhält man

$$\begin{aligned} \dot{x}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) &= \left[D_i \dot{x}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \left(\frac{F_i(t)}{m} + g_i \right) \Delta t \right] D_2 \\ \dot{\omega}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) &= \left[D_i \dot{\omega}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \left(\frac{M_i(t)}{m} \Delta t \right) \right] D_2 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 6})$$

mit

$$D_i = 1 - \left(\alpha \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (\text{Gl. 7})$$

$$D_2 = \frac{1}{1 + \left(\alpha \frac{\Delta t}{2}\right)} \quad (\text{Gl. 8})$$

Die Translationszunahme Δx_i und die Rotationszunahme $\Delta \theta_i$ betragen

$$\Delta x_i = \dot{x}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \Delta t \quad (\text{Gl. 9})$$

$$\Delta \theta_i = \omega_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \Delta t$$

Die Lage des Blockschwerpunktes wird durch

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta x_i \quad (\text{Gl. 10})$$

aktualisiert.

3DEC führt eine vom Nutzer definierte Anzahl an Berechnungsschritten nach dem in Abbildung 22 gezeigten Schema aus. Die Bewegungsgleichungen werden dabei nach einem aufwändigen Algorithmus nacheinander für alle Blöcke gelöst.

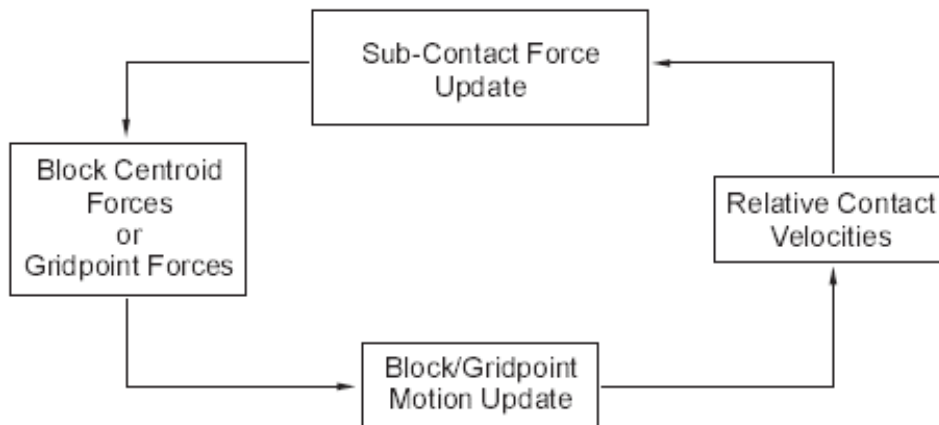


Abbildung 22: Schematischer Berechnungsablauf (Itasca Consulting Group Inc., 2013)

Um numerische Stabilität zu gewährleisten errechnet 3DEC auf Basis von Masse- und Steifigkeitseigenschaften des Modells einen kritischen Zeitschritt Δt . Dieser limitiert die während eines Zeitschritts auftretenden Verschiebungen der Blöcke ineinander.

Bei Rechnungen mit starren Blöcken beträgt der kritische Zeitschritt

$$\Delta t = (frac) 2 \left(\frac{M_{min}}{K_{max}} \right)^{1/2} \quad (\text{Gl. 11})$$

mit

- M_{min} : *Masse des kleinsten Blocks*
- K_{max} : *maximale Kontaktsteifigkeit*

Der Term $(frac)$ steht für einen benutzerdefinierten Wert, der eine Manipulation des Zeitschritts erlaubt. Per Standardeinstellung liegt dieser Wert bei 0,1.

Für deformierbare Blöcke kommen andere Bewegungsgleichungen zum Einsatz, auf die nicht eingegangen wird, da bei den gegenständlichen Untersuchungen die Blöcke stets als starr angenommen wurden. Die in 3DEC implementierten Dämpfungsmodelle werden unter Punkt 4.2.2 gesondert betrachtet.

4.2 Modellaufbau

4.2.1 Modellgeometrie

4.2.1.1 Geländeoberfläche

3DEC bietet nur wenige Methoden, um eine Geometrie bzw. Geländemodelle aufzubauen. Es besteht keine Möglichkeit, digitale Geländemodelle direkt in 3DEC zu öffnen und weiter zu bearbeiten. Im Wesentlichen beschränken sich die Befehle zur Modellerstellung darauf, geometrische Formen (z.B. Würfel, Prismen, Zylinder) zu erzeugen, um diese in weiterer Folge zu bearbeiten. So lassen sich auf Umwegen auch komplexe Geländemodelle konstruieren.

Im Fall Spitz standen zur Erstellung des Modells die bereits im Abschnitt 2 genannten digitalen Geländemodelle zur Verfügung. Ziel war es, die Oberfläche des Modells 1997 in 3DEC zu übertragen, um danach die Gleitkörper des Ereignisses 2002 sowie die vorab definierten Ablöseszenarien zu modellieren.

Da das Modell 1997 einen zu kleinen Bereich abdeckt (siehe Abbildung 13) und die Grabenstrukturen im Nordosten sowie den Damm und die Verkehrswege nicht abbildet, wurde zunächst mittels AutoCAD (Autodesk, 2015) das Modell 1997 mit den zusätzlich erforderlichen

Bereichen des Modells 2006_B zusammengefügt⁶. Anschließend wurden mithilfe des Oberflächenmodellierungsprogramms Surfer insgesamt 24 vertikale Schnitte von West nach Ost im Abstand von 10 m gelegt. Der so erfasste Modellbereich ist (inklusive der Schnittgeraden) in Abbildung 23 zu sehen.

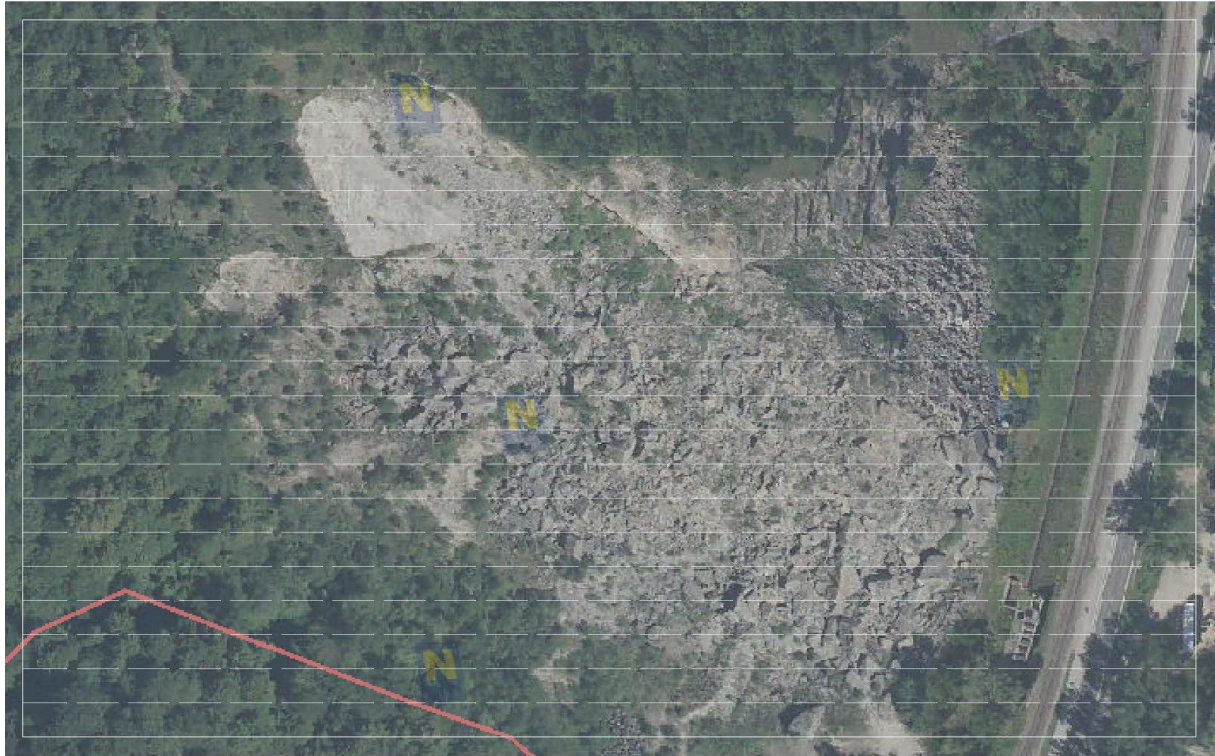


Abbildung 23: Modellbereich in 3DEC (Fotounterlage: NÖ Luftbildatlas 2014)

Surfer erlaubt einen Export dieser Schnitte in Form von Tabellen, welche die räumlichen Positionen der geschnittenen Oberflächenpunkte liefern. Ein Umweg über Surfer hat den wesentlichen Vorteil, dass alle Schnittdateien die gleiche Anzahl an Punkten enthalten, da vor dem Schneiden ein regelmäßiges Netz über die Oberfläche gelegt wird. Diese regelmäßige Anordnung der Punkte wurde verwendet, um in 3DEC regelmäßig angeordnete Prismen zu erstellen. Dabei wurden stets Dreiecke gebildet, welche mit der Projektion des Dreiecks auf den unteren Horizont des Modells ein Prisma bildet. Die einzelnen Prismen wurden dann zu einem gemeinsamen Modell zusammengefügt. Die Prismen wurden dabei so erstellt, dass sie zunächst um einen definierten Vertikalabstand über die reale Oberfläche hinausragten. Anschließend wurde für jedes Einzelprisma eine Trennfläche eingeführt, welche der zu erzielenden Oberfläche entsprach. Der Überstand wurde gelöscht. Diese Vorgangsweise war notwendig, um der

⁶ Anmerkung: Der Dammbau wurde erst als Reaktion auf das Ereignis 2002 errichtet. Nachdem keine entsprechenden Daten zur Verfügung standen, und eine Entfernung des Damms nur mit unverhältnismäßigem Aufwand möglich gewesen wäre, wurde der Damm im Modell belassen. Zudem wurde in den zu erfassenden Bedingungen festgehalten, dass die Halde den Damm nicht erreichen darf, er stellt somit einen guten Referenzpunkt zur Bewertung der berechneten Endzustände dar.

Oberfläche Reibungsparameter zuordnen zu können, da dies nur für benutzerdefinierte Klüfte möglich ist. In Abbildung 24 ist der Vorgang zur Modellerstellung exemplarisch dargestellt.

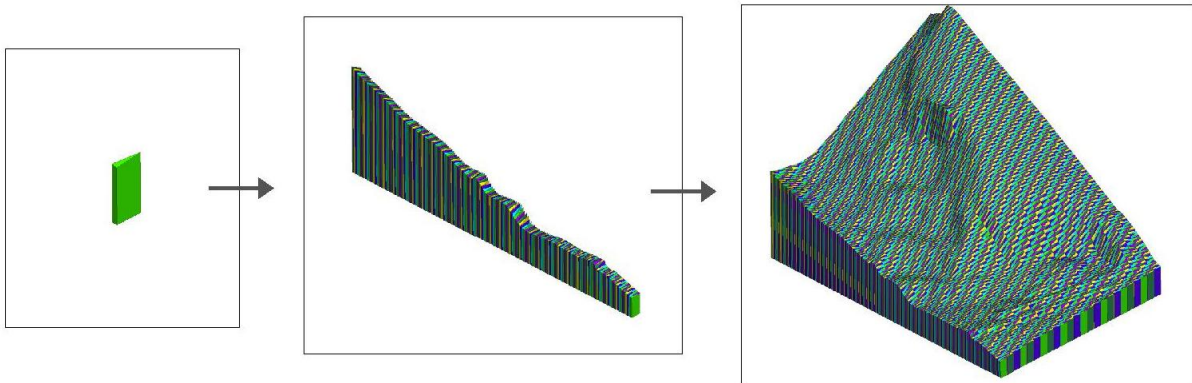


Abbildung 24: Modellerstellung (schematisch)

Der Vergleich mit der Oberfläche in AutoCAD (Autodesk, 2015) (Abbildung 25) zeigt, dass im so erhaltenen Geländemodell (Abbildung 26) alle wesentlichen Merkmale wie die Etagen, die Abbruchwände und der Dammbau eindeutig zu erkennen sind. Trotz einer gewissen Unschärfe aufgrund der zum Originalmodell vergleichsweise niedrigen Punktdichte, wurde das 3DEC Modell als ausreichend genau betrachtet.

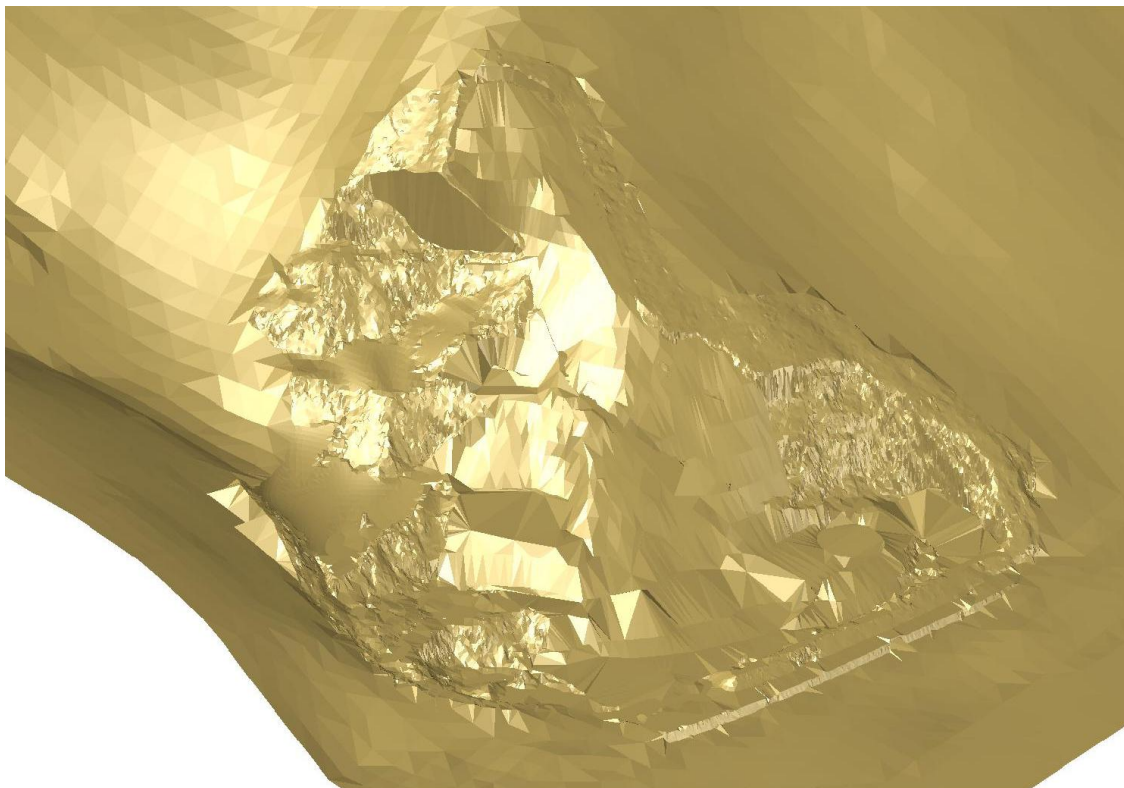


Abbildung 25: Geländeoberfläche in AutoCAD

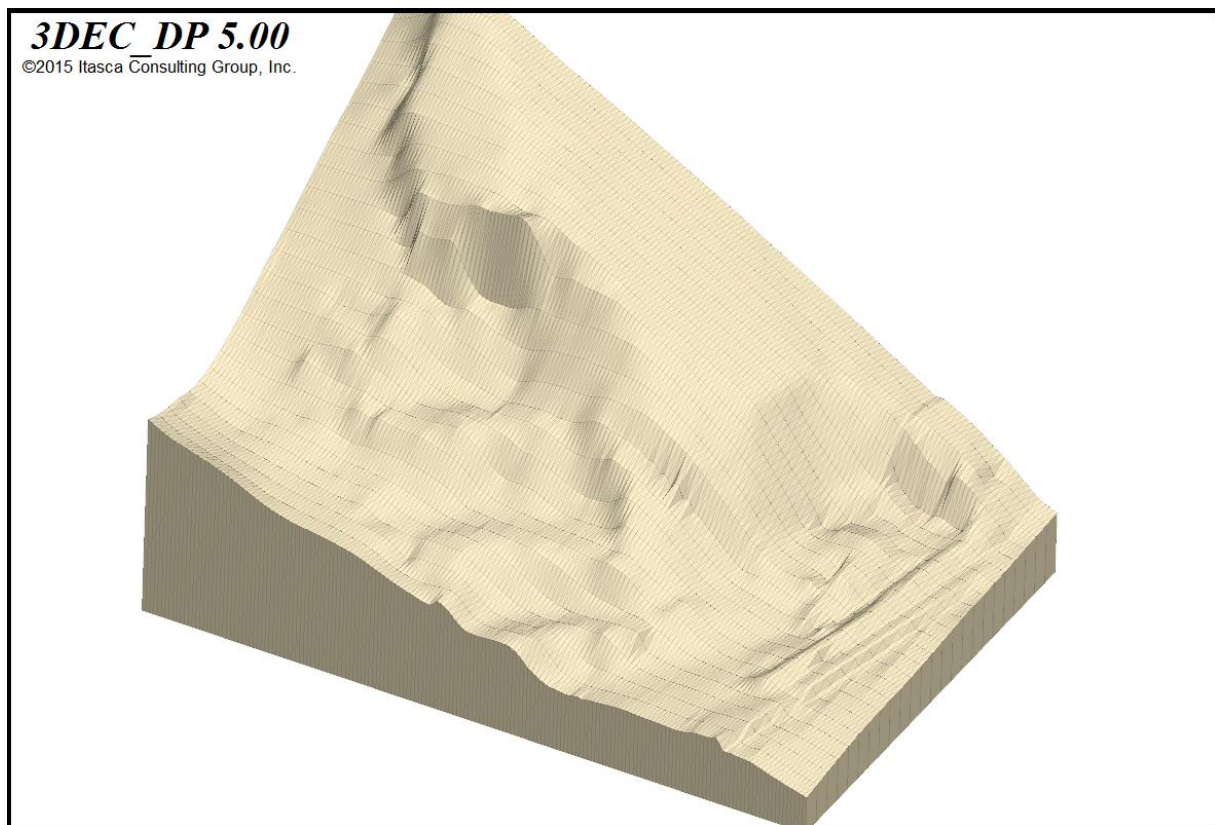


Abbildung 26: Geländeoberfläche in 3DEC

4.2.1.2 Trennflächen

Nach Modellierung der Geländeoberfläche konnten die Gleitkörper der einzelnen Ereignisse „herausgeschnitten“ werden. Um die Gleitkörper der zu berechnenden Ereignisse zu modellieren mussten die Raumstellungen und Ursprungspunkte folgender Trennflächen festgelegt bzw. abgeleitet werden:

- Gleitfläche 2002
- Vordere Abrissfläche 2002 (heutige freie Oberfläche)
- Seitliche Begrenzung 2002
- Gleitfläche Ereignis 1
- Seitliche Begrenzung Ereignis 1
- Zentralspalt
- Gleitfläche Ereignis 2 (entspricht der Gleitfläche 2002)
- Seitliche Begrenzung Ereignis 2
- Trennflächengefüge innerhalb der Gleitkörper

Die räumlichen Orientierungen dieser Trennflächen waren durch die vorliegenden strukturgeologischen Beschreibungen und durch die geometrischen Modellierungen mittels Block Theory (Poisel, 2016) gegeben. Um diese Flächen in das 3DEC Modell zu übertragen wurden mithilfe der Modelle 1997 und 2006-A charakteristische Punkte (z. B. Abbruchkanten, Schnittkanten, Geländestrukturen) lokalisiert, welche als Ursprungspunkte für die Lage innerhalb des 3DEC Modells dienten.

Um die Geometrie der jeweiligen Ereignisse abzubilden, mussten die Raumstellungen der Trennflächen wie in Tabelle 2 zusammengefasst festgelegt werden. Wie unter Punkt 3.2 beschrieben, befindet sich beim Ablöseszenario 1 der Fußpunkt des Gleitkörpers in der Halde von 2002. Der betreffende Bereich wurde jedoch durch die geglättete Oberfläche im 3DEC Modell so abgebildet, dass Bewegungen des modellierten Gleitkörpers nicht möglich gewesen wären. Der Modellbereich vor dem Fußpunkt des Gleitkörpers musste daher entfernt werden.

Die für den Ausgangszustand der Berechnungen implementierten Trennflächen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Trennflächenbezeichnung	Fallrichtung [°]	Fallwinkel [°]
Gleitfläche 2002	110	35
Gleitfläche 2002, oberer Bereich	120	38
Vordere Abrissfläche 2002	155	72
Seitliche Begrenzung 2002	34	90
Gleitfläche Ereignis 1	120	38
Seitliche Begrenzung Ereignis 1	34	90
Basisfläche Schutthalde	125	18
Oberste Abbauwand	180	90
Zentralspalt	190	90
Gleitfläche Ereignis 2	110	35
Seitliche Begrenzung Ereignis 2	34	90

Tabelle 2: In die Berechnungen mittels 3DEC importierte Trennflächensysteme

Diese Raumstellungen weichen teilweise geringfügig von den in diversen Quellen beschriebenen Raumstellungen ab, allerdings konnten nur durch diese Abweichungen vergleichbare Gleitkörper modelliert werden.

Neben der Vorgabe der Raumstellungen waren die Größenordnungen der Volumina aller Gleitkörper gegeben:

- Ereignis 2002: ca. 70.000 m³
- Ereignis 1: ca. 15.000 m³
- Ereignis 2: ca. 80.000 m³

3DEC erlaubt einen Export der Volumina aller Einzelblöcke, durch Addition der jeweiligen Regionen wurden folgende Gesamtvolumina ermittelt:

- Ereignis 2002: ca. 47.600 m³
- Ereignis 1: ca. 14.000 m³
- Ereignis 2: ca. 72.000 m³

Während die Ablöseszenarien nahe an den angegebenen Volumina liegen, fällt auf, dass der Gleitkörper 2002 des Modells in 3DEC kleiner ist als der in den Ereignisdokumentationen beschriebene. Da eine Volumenmessung des Gleitkörpers in AutoCAD (Autodesk, 2015) auf Basis der Verschneidung der Modelle 1997 und 2006-A (siehe Abbildung 14) einen ähnlichen Wert von ca. 52.200 m³ ergab, wurde die Abweichung auf mögliche Unterschiede bei der Vorgangsweise zur Volumenermittlung zurückgeführt. Eine Erhöhung des Volumens war aufgrund der optisch und geometrisch vorgegebenen Merkmale nicht möglich. Zudem kann in diesem Zusammenhang die Genauigkeit der jeweiligen Modelle infrage gestellt werden, woraus ebenfalls Abweichungen resultieren können.

Es wurde davon ausgegangen, dass eine Variation der maßgeblichen Raumstellungen eher zu einem fehlerhaften Modellverhalten führen als die Diskrepanz der Volumenermittlung, deshalb wurde der Unterschied in Kauf genommen.

Um die Gleitkörper in einzelne Blöcke zu zerteilen, wurde in 3DEC ein regelmäßig angeordnetes Trennflächensystem innerhalb der Gleitkörper eingeführt. Dabei wurden die Begrenzungsflächen der Gleitkörper in definierten Abständen parallel versetzt und durch Trennflächen normal auf diese ergänzt. Dadurch ergibt sich eine räumliche, rasterförmige Anordnung der Trennflächen. Die Raumstellungen der Trennflächen entsprechen daher denen der Gleitflächen und seitlichen Begrenzungen bzw. ergeben sich durch diese. Über den Normalabstand zwischen den Flächen können gewählte Blockgrößen der Einzelblöcke modelliert werden. Die Ursprungspunkte der Trennflächensysteme wurden stets an den Unterkanten der Gleitkörper gewählt, so ergab sich aus der unregelmäßigen Oberfläche automatisch eine gewisse Streuung der Blockgrößen.

4.2.1.3 Vergleiche der geometrischen Modelle

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen Gegenüberstellungen des in 3DEC erstellten Modells zu den Vorlagen in AutoCAD (Autodesk, 2015). Um die Ablöseszenarien 1 und 2 besser vergleichen zu können, wurden die Modelle zusätzlich exklusive des Gleitkörpers 2002 dargestellt.

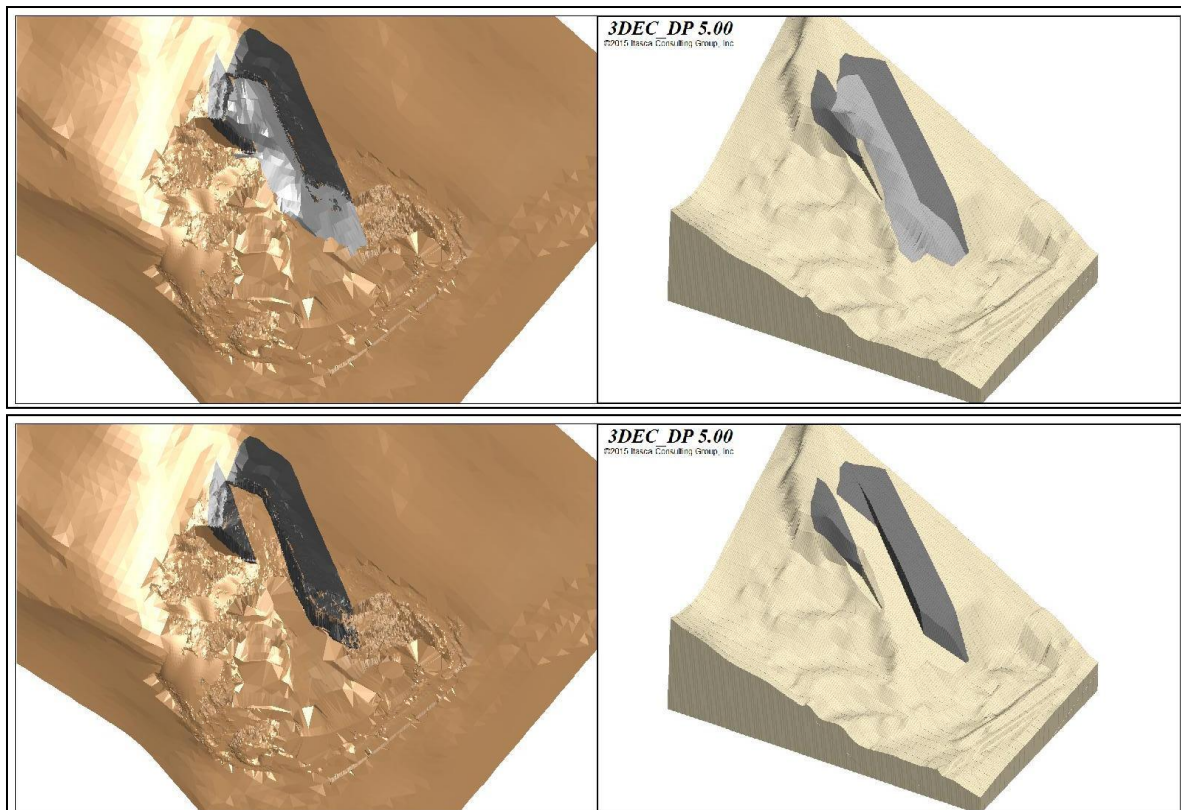


Abbildung 27: Modellvergleiche, Ansichten; Digitales Geländemodell (Wagner, 2006) links, 3DEC Modell rechts

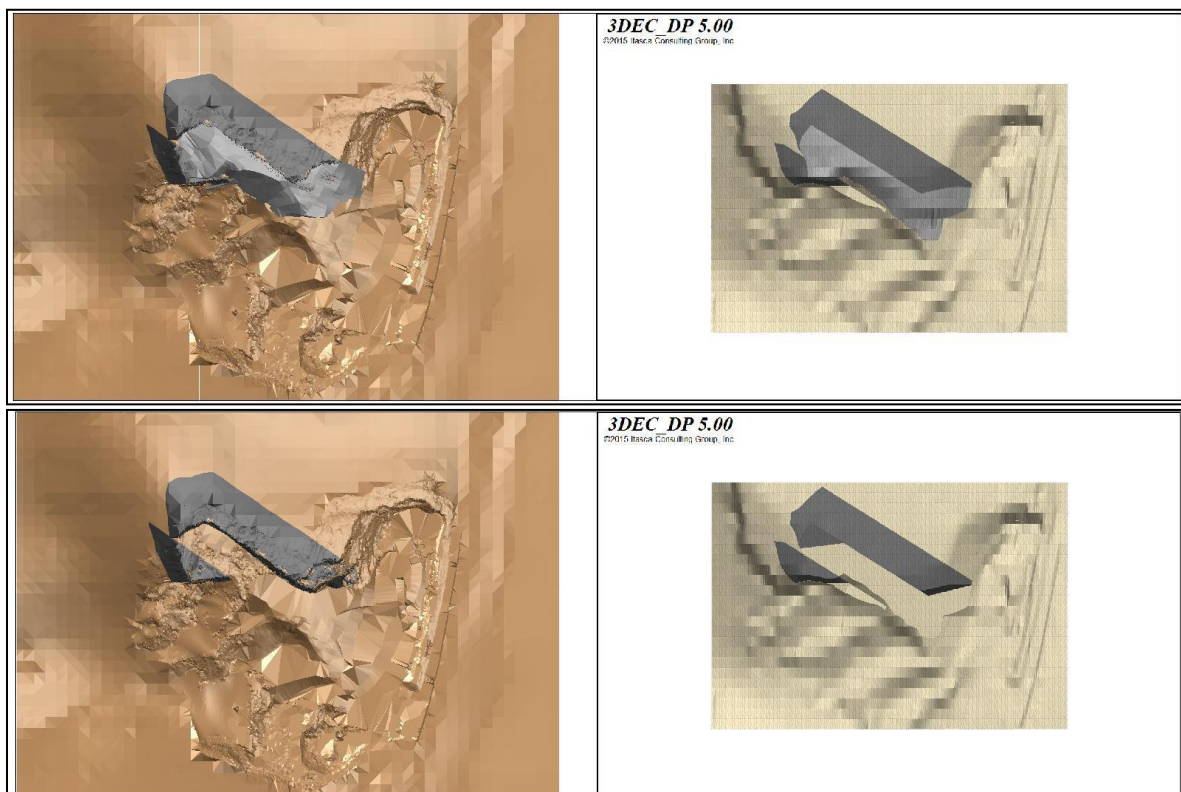


Abbildung 28: Modellvergleiche, Grundrisse; Digitales Geländemodell (Wagner, 2006) links, 3DEC Modell rechts

4.2.2 Dämpfung

3DEC kennt mehrere Varianten - bzw. Kombinationen davon - um die bei realen Systemen auftretende Energieumwandlung durch Dämpfungseffekte zu berücksichtigen:

- Globale Dämpfung
- Lokale Dämpfung
- Rayleigh Dämpfung
- Kontaktdämpfung

Um die Berechnungszeiten kurz zu halten, soll bei (quasi-) statischen Problemen durch einen globalen Dämpfungsfaktor möglichst schnell ein Gleichgewichtszustand erreicht werden. Diese geschwindigkeitsabhängige Form der Dämpfung führt allerdings zu drei Problemen:

1. Durch die Dämpfung werden Volumenkräfte eingeführt, die zu fehlerhaften Einflüssen führen können und mitunter auch den Versagensmechanismus betreffen.
2. Die für die Beschleunigung der Rechenzeit optimale Proportionalitätskonstante ist vom Eigenwert der Steifigkeitsmatrix abhängig. Bei manchen Systemen kann die Eigenwertberechnung allerdings nur unter Einsatz hoher Rechenkapazitäten ermittelt werden, was wiederum zu längeren Berechnungszeiten führt.
3. Es gibt nur einen globalen, konstanten Dämpfungsfaktor, welcher für das gesamte Modell zum Einsatz kommt. Bei manchen Berechnungen können sich verschiedene Regionen des Modells unterschiedlich verhalten, z. B. könnte ein Bereich stabil sein während ein anderer versagt. In solchen Fällen könnte eine verschieden große Dämpfung für die jeweiligen Bereiche sinnvoll sein.

Einen Dämpfungsansatz, der diese Probleme löst, liefert 3DEC mit der lokalen Dämpfung. Dabei wird eine Dämpfungskraft proportional zur ‚unausgeglichenen Kraft‘ eingeführt. Die unausgeglichene Kraft eines Einzelblocks ist jene fiktive Kraft, die, einwirkend auf den Schwerpunkt des Blocks, zu einem momentanen Gleichgewicht führen würde. Die Dämpfungskraft wird dabei so angesetzt, dass Energie stets dissipiert. Für starre Blöcke werden dafür die Bewegungsgleichungen (Gl. 6) ersetzt durch

$$\begin{aligned} \dot{x}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) &= \dot{x}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \left(\sum F_i(t) - (F_d)_i \right) \frac{\Delta t}{m} \\ \omega_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) &= \omega_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \left(\sum M_i(t) - (M_d)_i \right) \frac{\Delta t}{m} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 12})$$

mit

$$(F_d)_i = \alpha \left| \sum F_i(t) \right| \operatorname{sgn} \left[\dot{x}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \quad (\text{Gl. 13})$$

$$(M_d)_i = \alpha \left| \sum M_i(t) \right| \operatorname{sgn} \left[\omega_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right]$$

α ist ein benutzerdefinierter Dämpfungsfaktor mit einer Voreinstellung von $\alpha = 0,8$.

Die lokale Dämpfung löst die vorhin angesprochenen Probleme: bei Gleichgewichtszuständen verschwinden die Volumenkräfte, der Dämpfungsfaktor ist dimensionslos und unabhängig von anderen Modellparametern und die Größe der Dämpfung ist durch die Proportionalität zur unausgeglichenen Kraft für jeden Block verschieden. (Itasca Consulting Group Inc., 2013)

Diese Variante ist dennoch nicht die von Itasca vorgeschlagene Methode für dynamische Berechnungen, da sie das Problem aufwirft, dass nicht nur Blöcke im Kontakt mit der Oberfläche, sondern auch jene im freien Fall gedämpft werden. Im Fall Spitz wurde dieser Fehler bewusst in Kauf genommen, da aufgrund der unter Punkt 2.1 angeführten Überlegungen davon ausgegangen wurde, dass Sturzvorgänge im freien Fall eine untergeordnete Rolle spielten. Auch Kalenchuk (2010) hat den „Downie Slide“ - eine großflächige, langsame Gleitbewegung eines Hangs in British Columbia - unter Einsatz der lokalen Dämpfung simuliert.

Eine von 3DEC für derartige Probleme vorgeschlagene Dämpfungsvariante, die Rayleigh-Dämpfung, wurde zufolge einfacher Voruntersuchungen nicht angewendet, da sie zu sehr langen Rechenzeiten führte. Die Kontaktdämpfung wurde aufgrund der fehlenden theoretischen Grundlagen - im Manual (Itasca Consulting Group Inc., 2013) befinden sich keine Angaben dazu - und der nicht interpretierbaren Modellreaktionen in den Voruntersuchungen verworfen.

(Die Voruntersuchungen zu den Dämpfungseinstellungen basierten auf dem in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Berechnungsmodell (Version 1). Aufgrund der mitunter langen Rechenzeiten, die zur Untersuchung der Dämpfungsmodelle notwendig waren, wurden sie parallel zu den Ermittlungen der restlichen Modellparameter durchgeführt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte griffen somit ineinander. Da die Berechnungsversion 1 auch für andere Untersuchungen - z. B. Steifigkeit, Blockgrößen - herangezogen wurde, folgt eine genauere Beschreibung aus Gründen der Übersicht erst in Abschnitt 4.3. Es wird jedoch festgehalten, dass dieses Modell bereits vor Festlegung aller Modellparameter verwendet wurde, um den Einfluss diverser Einstellungen zu untersuchen.)

Der lokale Dämpfungsfaktor α musste so gewählt werden, dass die Geschwindigkeiten der lokal gedämpften Blöcke denen realer Gleitbewegungen entsprachen. Während bei Standsicherheitsuntersuchungen die Reibungsparameter nicht beliebig angenommen werden

können, war bei den vorliegenden Berechnungen auch eine Variation der Reibungsparameter erforderlich, um Gleitbewegungen mit realen Geschwindigkeiten und der damit verbundenen realen Reichweite zu simulieren.

Um den Einfluss des in Kauf genommenen Fehlers gering zu halten, wurde zuerst ein möglichst niedriger Dämpfungsfaktor ermittelt. Dazu wurde vorab ein aus Beobachtungen realer Vorgänge abgeleiteter Restitutionskoeffizient von $k = 0,5$ festgelegt.

Bei einem Aufprall einer Masse auf starrem Untergrund gilt (Gross et al, 2010)

$$k = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (\text{Gl. 14})$$

- h : Fallhöhe
- h' : Rückprallhöhe

Eine Forderung von $k = 0,5$ verlangt, dass $h' = 0,25 \cdot h$ sein muss:

$$0,5 = \sqrt{\frac{0,25 \cdot h}{h}} \quad (\text{Gl. 15})$$

Ein lokaler Dämpfungsfaktor α der zu dem gesuchten Restitutionskoeffizienten führt, wurde mit einem 3DEC Modell bei dem ein einzelner Block mit 10 m Kantenlänge auf eine starre Ebene fällt ermittelt (siehe Abbildung 29).

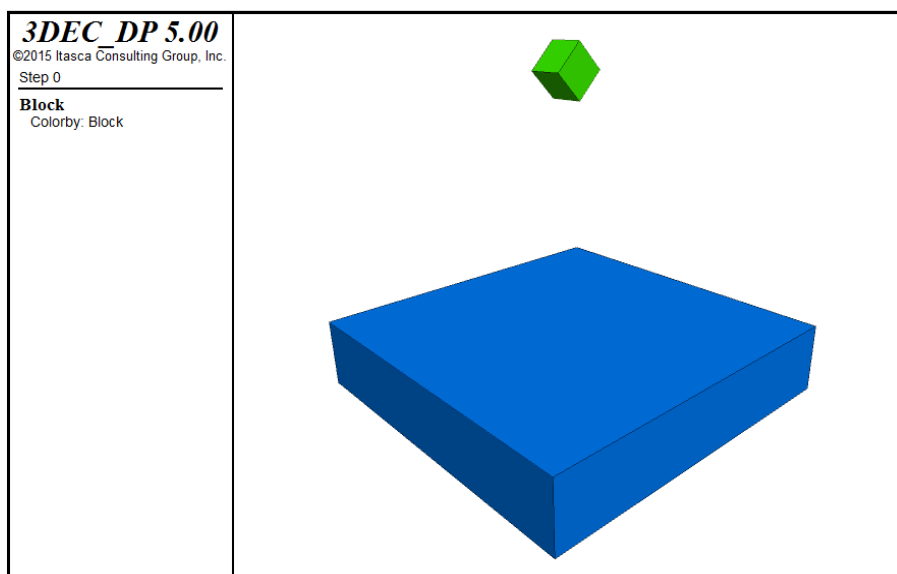


Abbildung 29: Modell zur Kalibrierung der Dämpfung

Durch Beobachtung der z-Verschiebung (entspricht der Fallrichtung) des Blocks während der Berechnung lässt sich die Rückprallhöhe und somit der Restitutionskoeffizient für die verwendeten Modellparameter bestimmen. Wie Abbildung 30 zeigt, ergab das 3DEC Modell mit einer lokalen Dämpfung von $\alpha = 0,35$ bei einer Fallhöhe von $h = 34 \text{ m}$ eine Rückprallhöhe von $h' = 9 \text{ m}$ ⁷. Daraus folgt:

$$k = \sqrt{\frac{9}{34}} = 0,514 \quad (\text{Gl. 16})$$

Der Dämpfungsfaktor von $\alpha = 0,35$ wurde somit als Ausgangswert für die Berechnungen festgelegt.

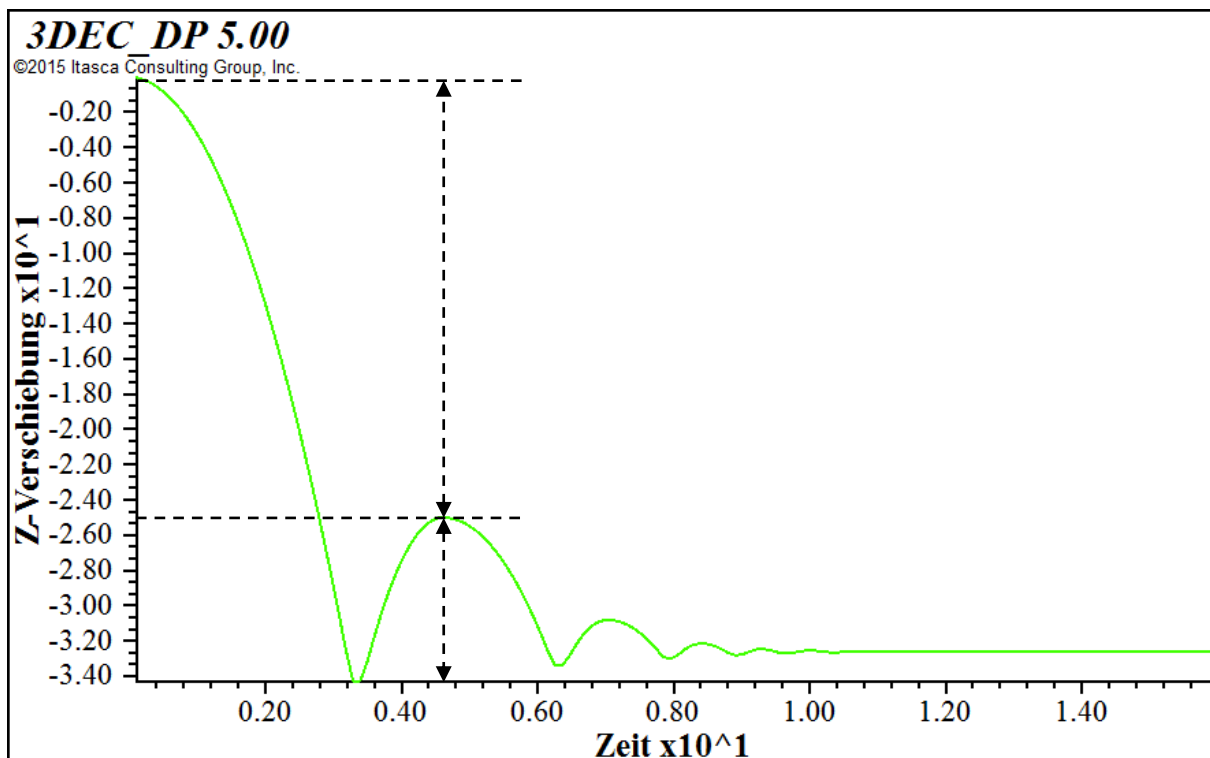


Abbildung 30: Verlauf der Rückprallhöhe

⁷ Da es sich um Kalibrierungsmodelle handelt, die lediglich zu Größenordnungen der Startwerte führen sollten, wurde auf eine genaue, rechnerische Auswertung der Funktionen verzichtet. Dieses und das folgende Kalibrierungsmodell wurden daher nur graphisch mit den in 3DEC erarbeiteten Diagrammen ausgewertet.

4.2.3 Klufteigenschaften

Das hauptsächlich zur Anwendung kommende Modell zur Beschreibung der Klufteigenschaften ist das ‚Coulomb-Slip Joint Model‘. Dieses auf dem Coulombschen Schergesetz basierende Modell kann bei starren und deformierbaren Blöcken eingesetzt werden.

Ein weiteres zur Verfügung stehendes Modell – das ‚Continuously Yielding Joint Model‘ - erlaubt die Berücksichtigung einer Abnahme der Scherparameter mit zunehmender Verformung. Dieses Modell ist ein Spezialfall für besondere Anforderungen und wurde im Fall Spitz nicht verwendet.

Das ‚Coulomb-Slip Joint Model‘ berücksichtigt Scher- und Zugversagen, sowie das Dilatanzverhalten einer Kluft. Im elastischen Verformungsbereich wird das Kluftverhalten durch eine Kluftnormalsteifigkeit K_n und eine Kluftschersteifigkeit K_s beschrieben.

Für intakte Klüfte wird die Zugkraft (normal auf die Kluftfläche) begrenzt mit

$$T_{max} = -TA_c \quad (\text{Gl. 17})$$

mit:

- T ... Zugkraft
- A_c ... *Flächeninhalt der Kluftfläche*

Die maximal zulässige Scherkraft beträgt

$$F_{max}^s = cA_c + F^n \tan \varphi \quad (\text{Gl. 18})$$

mit:

- c ... *Kohäsion*
- F^n ... *Normalkraft auf die Kluft*
- φ ... *Reibungswinkel*

Sobald 3DEC ein Versagen (eine Überschreitung der maximal zulässigen Scherkraft) innerhalb einer Kluft feststellt, werden die Zugkraft T_{max} und der Kohäsionsterm cA_c nicht mehr berücksichtigt. Ab diesem Zeitpunkt gilt

$$T_{max} = 0 \quad (\text{Gl. 19})$$

$$F_{max}^s = F^n \tan \varphi \quad (\text{Gl. 20})$$

Wenn es in einer Kluft zu weiteren Gleitbewegungen kommt wird von 3DEC zusätzlich der Einfluss eines Dilatanzwinkels ψ berücksichtigt. Dabei wird in Abhängigkeit der Scherverschiebung die Kluftnormalkraft korrigiert durch

$$F^n = F^n + K_n A_c \Delta U^s \tan \psi \quad (\text{Gl. 21})$$

mit

- ΔU^s ... Inkrement der Scherverschiebung

(Itasca Consulting Group Inc., 2013)

Da bei großen Verschiebungen (im dynamischen Fall) die Kohäsion c und der Dilatanzwinkel ψ keine Rolle spielen, wurden sie in den Simulationen nicht berücksichtigt. Zudem werden diese Parameter (wie beschrieben) ab Erreichen gewisser Verschiebungen automatisch auf null gesetzt, was im vorliegenden Beispiel aufgrund der großen Verschiebungen ohnehin eintreffen würde.

4.2.3.1 Kluftsteifigkeiten

Die Kluftsteifigkeiten sollten im Bereich realistischer Schranken liegen. Trotzdem kann eine Reduktion sinnvoll sein, da sich die Steifigkeiten auf die Berechnungszeit auswirken und zudem den Versagensmechanismus beeinflussen können. Elastische Kluftverformungen können z. B. dazu führen, dass sich zwei Blöcke ineinander verhaken und damit ein Abgleiten eines der beiden verhindert wird.

(Gl. 11) zeigt den Einfluss der Steifigkeiten auf den kritischen Zeitschritt: mit zunehmender Steifigkeit wird Δt kleiner, was zu längeren Rechenzeiten führt.

Bedingt durch die komplexe Geometrie, die Blockanzahl des Modells und die großen zu berechnenden Verschiebungen, wurden die Steifigkeiten möglichst gering gehalten, um die Berechnungszeiten zu verkürzen. Um den Einfluss der Steifigkeiten auf die Rechenzeit und das Gleitverhalten der Blöcke zu untersuchen wurden diese im Rahmen der bereits erwähnten Voruntersuchungen (Berechnungsversion 1) variiert. Die dabei festgelegten Werte betragen

$$K_n = K_s = 10^7 \text{ Pa/m}$$

Wobei die Schersteifigkeiten einzelner vertikaler Klüfte auf

$$K_s' = 10^6 \text{ Pa/m}$$

reduziert wurden. Die Hintergründe für diese Reduktion werden in Abschnitt 4.3.1 erläutert.

4.2.3.2 Reibungswinkel

Die Reibung in der Gleitfläche musste so gewählt werden, dass sie in Kombination mit der festgelegten Dämpfungskonstante von $\alpha = 0,35$ zu realistischen Geschwindigkeiten und einer gleichförmig beschleunigten Bewegung führte.

Zur Ermittlung einer entsprechenden Reibung wurde das Heimsche Schlittenmodell herangezogen. (Körner, 1976) Dabei werden die Relativbewegungen innerhalb der Gleitmasse ignoriert, es wird lediglich ein ‚Schlitten‘ auf einer Gleitbahn betrachtet. Das Modell basiert auf einer Energiebilanz, mittels der die Geschwindigkeit eines Blocks unter Berücksichtigung der Energieverluste entlang des Weges auf der Gleitbahn berechnet werden kann. Im Wesentlichen entspricht die Geschwindigkeit derjenigen nach der Ausflussformel nach Toricelli, allerdings mit einer durch die Reibungsverluste verringerten Energiehöhe h_v . Abbildung 31 zeigt eine Darstellung dieses Schlittenmodells mit den im weiteren Verlauf verwendeten Abmessungen.

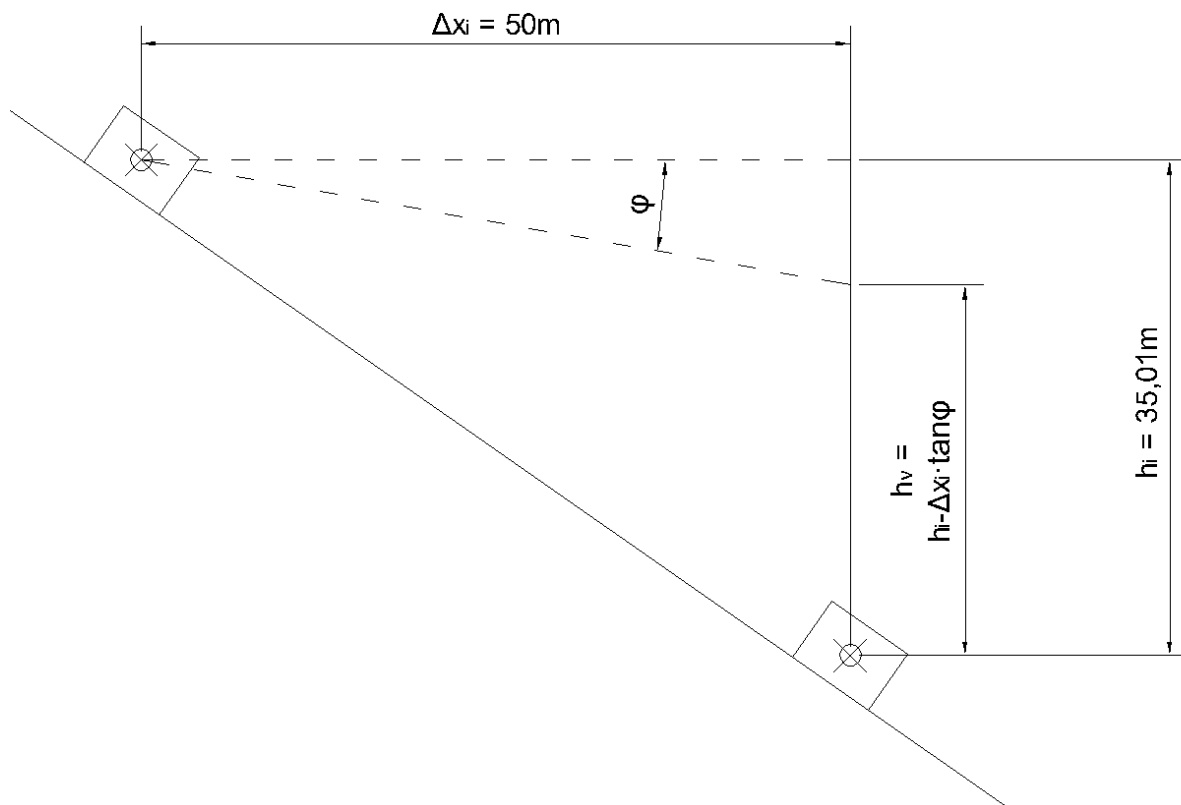


Abbildung 31: Heimsches Schlittenmodell

Die Geschwindigkeit des Blocks im beliebigen Punkt i entlang der Bahnlinie beträgt:

$$v_i = \sqrt{2gh_v} \quad (\text{Gl. 22})$$

$$h_v = h_i - \Delta x_i \cdot \tan \varphi \quad (\text{Gl. 23})$$

Diese Gleichungen geben eine Größenordnung für die Geschwindigkeit vor, die für einen einzelnen Block erreicht werden soll. Der Reibungswinkel beim Schlittenmodell muss kleiner sein als die Geländeneigung, da die Höhe h_v andernfalls negativ wird und der Block nicht abgleitet. Um auszuschließen, dass die Geschwindigkeiten bereits im Vorfeld zu gering angenommen werden, wurde dem Schlittenmodell ein Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$ zugrunde gelegt. Die Geschwindigkeit v_i nach einer zurückgelegten horizontalen Wegstrecke von 50 m beträgt somit:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (35,01 \cdot \tan 30)} = 10,98 \text{ m/s} \quad (\text{Gl. 24})$$

Um in 3DEC einen entsprechenden Wert für die Reibung zu ermitteln, der in Kombination mit dem definierten Dämpfungsfaktor zu dieser Geschwindigkeit führt, wurde ein Modell mit den Abmessungen laut Abbildung 31 erstellt. 3DEC erlaubt eine Aufzeichnung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verschiebung in x-Richtung. Somit kann verglichen werden, ob die vorgegebene Geschwindigkeit erreicht wird.

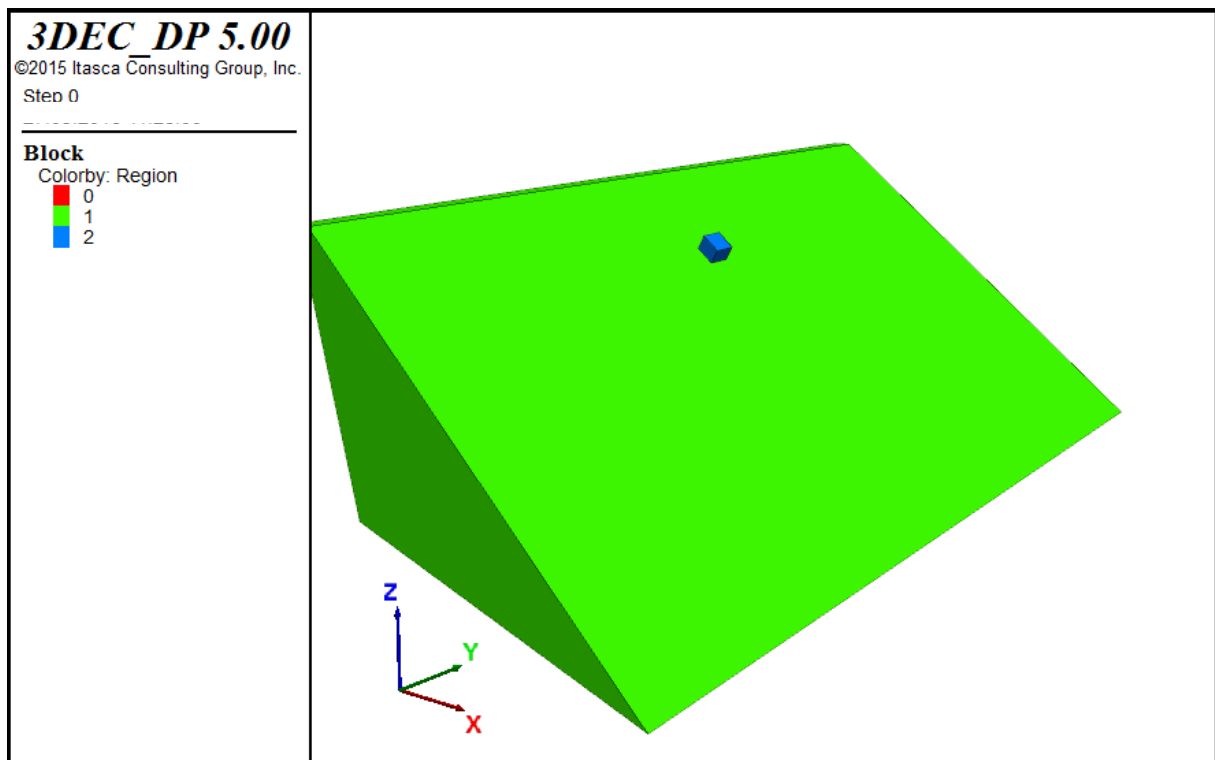


Abbildung 32: Modell zur Kalibrierung der Reibung

Abbildung 33 zeigt, dass bei einer Reibung von $\varphi = 26^\circ$ und bei einer lokalen Dämpfung von $\alpha = 0,35$ die Geschwindigkeit mit ca. 11 m/s der mittels Schlittenmodell berechneten Geschwindigkeit von 10,98 m/s nach (Gl. 24) entspricht.

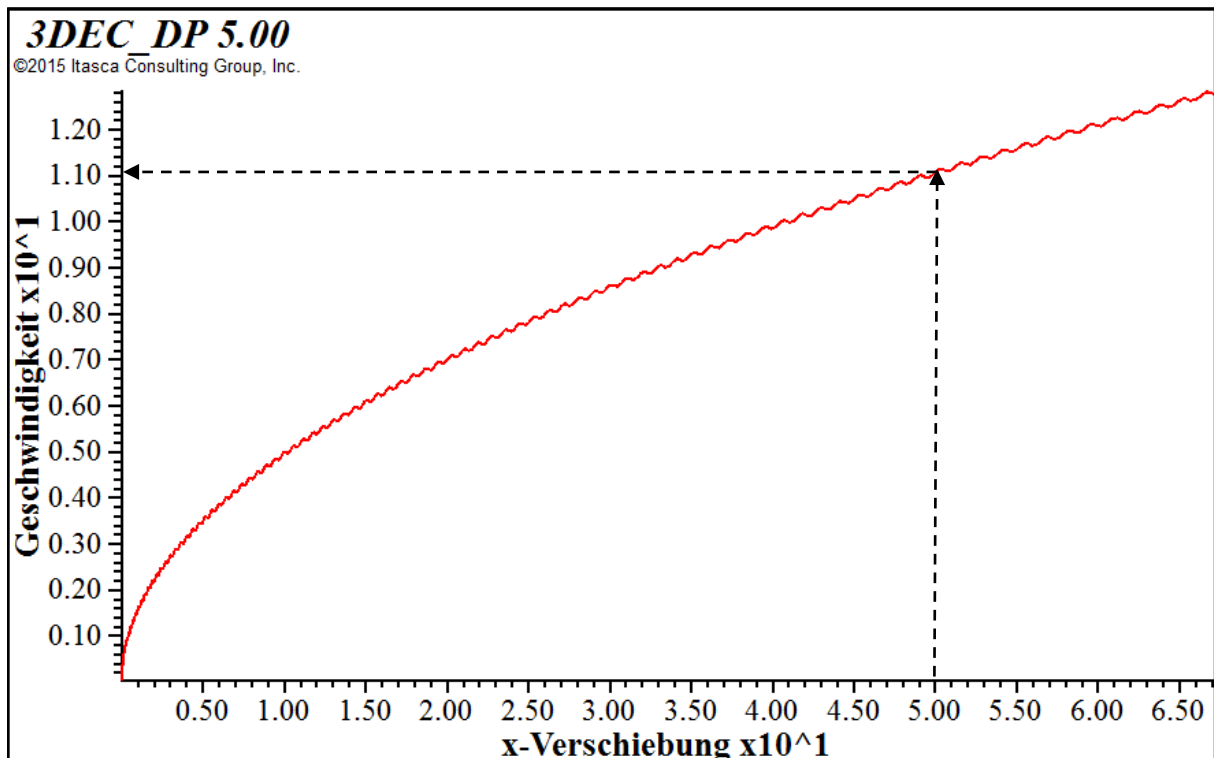


Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Wegstrecke in x-Richtung

Dasselbe Modell wurde verwendet, um zu untersuchen, ob eine Gleitbewegung mit den gegebenen Modellparametern einer gleichförmig beschleunigten Bewegung entspricht. In Abbildung 34 ist die Geschwindigkeit des Blocks in Abhängigkeit der Zeit zu sehen. Der lineare Verlauf zeigt, dass der Block während des Gleitvorgangs gleichförmig beschleunigt.

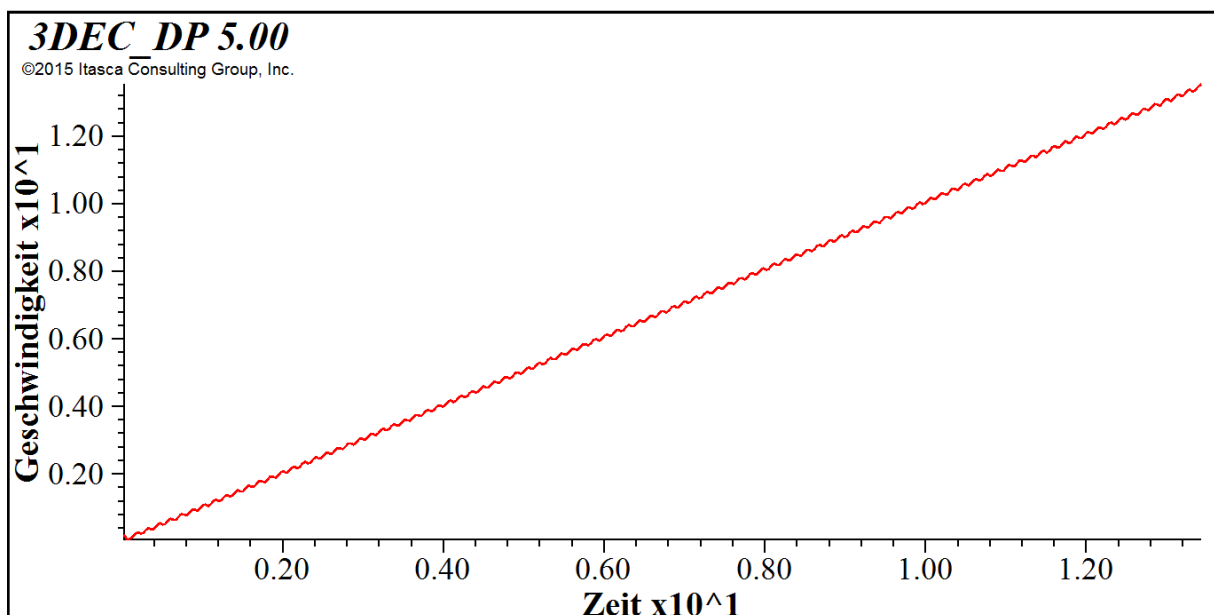


Abbildung 34: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit

Das Wertepaar

- $\alpha = 0,35$
- $\varphi = 26^\circ$

liefert somit einen physikalisch plausiblen, gleichförmig beschleunigten Gleitvorgang eines Einzelblocks. Die Berechnungen mittels 3DEC wurden daher mit diesen Werten begonnen.

Da der oben genannte Reibungswinkel nur in der Gleitfläche angesetzt wurde, wird er im Weiteren mit φ_G bezeichnet.

4.2.4 Oberfläche

Damit die Blöcke, die die Geländeoberfläche berühren, abgebremst werden, mussten der Modelloberfläche ebenfalls Reibungs- und Steifigkeitseigenschaften zugewiesen werden. Die Werte betragen:

- $\varphi_O = 40^\circ$
- $K_n = K_s = 10^7 \text{ Pa/m}$

4.2.5 Reibung zwischen den Klufkörpern

Im Rahmen seiner Untersuchung zum Einfluss der in Abschnitt 1.4.1 beschriebenen Verfaltungen wählte Poisel aufgrund einer Rückrechnung einen Reibungswinkel von $\varphi_K = 42^\circ$ für die Kontaktflächen zwischen den Klufkörpern. (Poisel, 2016) Dieser Reibungswinkel wurde für die 3DEC Berechnungen übernommen, die Steifigkeiten entsprechen denen des restlichen Modells. Die Werte betragen somit:

- $\varphi_K = 42^\circ$
- $K_n = K_s = 10^7 \text{ Pa/m}$

4.2.6 Sonstige Modellparameter

- Gesteinsdichte $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
- Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

4.3 Berechnungsergebnisse

Zusammenfassend wurden die Berechnungen mit folgenden Parametern gestartet:

- Dämpfungsfaktor der lokalen Dämpfung	$\alpha = 0,35$
- Reibungswinkel der Gleitflächen	$\varphi_G = 26^\circ$
- Reibungswinkel der Oberfläche	$\varphi_O = 40^\circ$
- Reibungswinkel zwischen den Klufkörpern	$\varphi_K = 42^\circ$
- Kluftnormalsteifigkeit	$K_n = 10^7 \text{ Pa/m}$
- Kluftschersteifigkeit	$K_s = 10^7 \text{ Pa/m}$
- Kluftschersteifigkeit für ausgewählte Klüfte ⁸	$K_s' = 10^6 \text{ Pa/m}$
- Dichte	$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
- Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Ausgehend von diesen Modellparametern wurden mehrere Berechnungen durchgeführt. Um die unterschiedlichen Einflüsse zu untersuchen, wurden Kluftsteifigkeiten, Reibungsparameter, Blockgrößen und die Dämpfungseinstellungen variiert. Abbildung 35 zeigt den Ausgangszustand der Modellgeometrie. Da im weiteren Verlauf Bezug auf die Etagen und den Damm genommen wird, sind diese in der Abbildung zusätzlich eingezeichnet.

⁸ Siehe Abschnitt 4.3.1

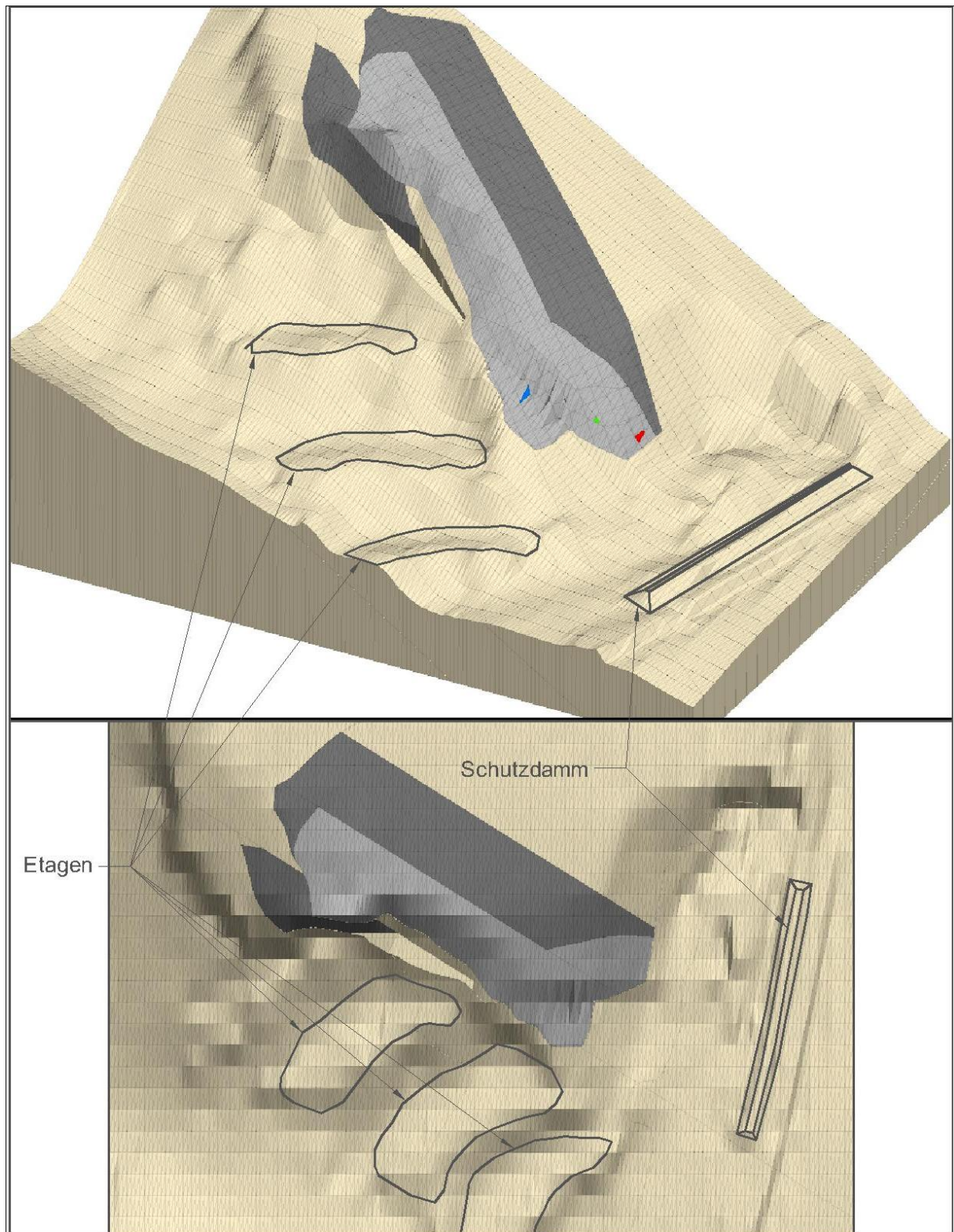


Abbildung 35: Ausgangszustand der Modellgeometrie mit charakteristischen Merkmalen

Für alle durchgeführten Berechnungen wurden die Endpositionen der Blöcke in Form von Grundrissen und Ansichten festgehalten. Da der Einfluss des Ablöseszenarios 2 auf die Halde des Ereignisses 2002 aus diesen Grundrissen und Ansichten nur eingeschränkt beurteilt werden

konnte, wurde die Dokumentation für die Berechnungen des Ablöseszenarios 2 durch weitere Betrachtungen ergänzt. Dafür wurden im unteren Bereich des Gleitkörpers 2002 die Geschwindigkeit ausgewählter Blöcke aufgezeichnet (siehe markierte Blöcke in Abbildung 36).

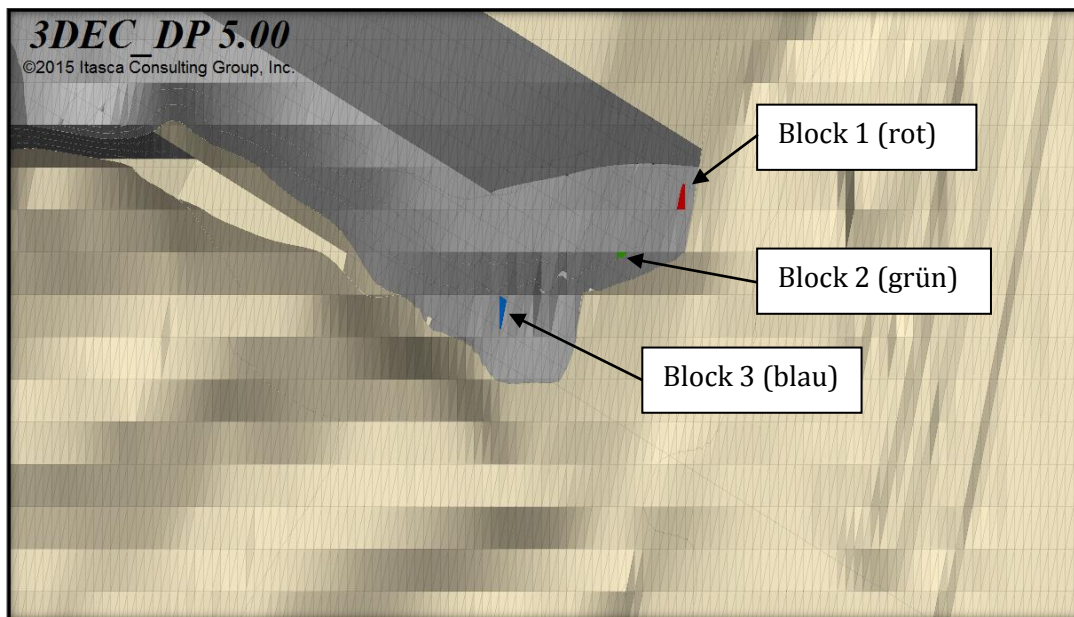


Abbildung 36: Markierte Blöcke 1-3

Die Geschwindigkeitsverläufe wurden dabei für jeden Block einzeln in Abhängigkeit ihrer Verschiebung in x-Richtung (entspricht einer Verschiebung nach Osten) und für alle drei Blöcke in Abhängigkeit der Berechnungsschritte dokumentiert. Die strichlierten Linien in den Geschwindigkeitsdiagrammen markieren stets die Trennung zwischen Ereignis 2002 und Ablöseszenario 2. Dadurch wird sichtbar, welcher Verschiebungsanteil der markierten Blöcke (Richtung Osten) dem Einfluss des Ablöseszenarios 2 zuzuordnen ist. Zu den Geschwindigkeitsverläufen wurden im Bereich vor dem Schutzdamm zusätzliche Ansichten (vor und nach Ablöseszenario 2) dargestellt.

Nachdem das Ablöseszenario 1 die Halde des Ereignisses 2002 nicht beeinflusste, wurden die Geschwindigkeitsprofile sowie die zusätzlichen Ansichten im Basisbereich für die Berechnungen des Ablöseszenarios 1 nicht dokumentiert.

Die Geschwindigkeit beim Auftreffen der markierten Blöcke auf der Steinbruchbasis können relativ genau in den jeweiligen Geschwindigkeitsdiagrammen abgelesen werden. Bis zum Auftreffen steigt die Geschwindigkeit stetig an, danach sind in allen Diagrammen Schwankungen zu sehen. Die Geschwindigkeiten, mit denen die vordersten Blöcke im Fall des Ablöseszenarios 2 gegen den Damm geschoben werden, wurden nicht direkt aufgezeichnet, da die markierten Blöcke während des Gleitprozesses von anderen überlagert wurden und somit nicht gegen den Damm geprallt sind. Unter der Annahme, dass die gesamte Halde mit einer ähnlichen

Geschwindigkeit verschoben wird, können die aufgezeichneten Geschwindigkeiten jedoch als Größenordnung für die gesamte Halde angenommen werden.

Die bei den jeweiligen Berechnungsversionen variierten Parameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Von den Ausgangswerten abweichende Werte sind fett abgedruckt, zudem sind in der Tabelle Anmerkungen zu den Berechnungen zu finden. Bei Versionsbezeichnungen ohne Unterpunkte (1-4) wurden vor der Berechnung des Ereignisses 2002 neue Parameter eingeführt, Versionsbezeichnungen mit Unterpunkten basieren auf einer bereits durchgeführten Rechnung des Ereignisses 2002, beinhalten aber eine untersuchte Parametervariation.

In den Anmerkungen zu den jeweiligen Versionen wurde festgehalten, welche der drei Felsgleitungen (Ereignis 2002, Ablöseszenario 1 und 2) mit den angeführten Parametern berechnet wurden. Zusätzlich finden sich Informationen zu sonstigen Variationen (z.B. Steifigkeiten, Raumstellungen von Trennflächen) und zur generellen Motivation der Parametervariation.

Da Version 1 vor Festlegung der Ausgangswerte verwendet wurde, und teilweise auch zur Ermittlung dieser diente, wurde sie in der Tabelle vor den Ausgangswerten angeschrieben. Eine Angabe der Modellparameter entfällt, da für Version 1 keine konkreten Berechnungsergebnisse, sondern generelle Modellreaktionen festgehalten wurden (siehe Abschnitt 4.3.1).

Die Tabelle dient lediglich einem Überblick über die durchgeführten Berechnungen und der Beziehungen der Versionen zueinander. Detailliertere Beschreibungen und Ergebnisse (Endzustände, Geschwindigkeitsverläufe, Detailansichten) sind in den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.5 für jede Berechnungsversion separat zusammengefasst.

Version	α	φ_G	φ_O	Blockgröße	Anmerkung
1	-	-	-	-	Berechnungsversion für die Voruntersuchungen betreffend Dämpfungsmodell, Blockgröße, Steifigkeitseinstellungen
-	0,35	26	40	6,5 x 6,5 x 6,5	Für die weiteren Berechnungen festgelegten Startwerte
2	0,35	22	40	6,5 x 6,5 x 4,5	Berechnung aller Ereignisse: Beste Übereinstimmung der Simulation des Ereignisses 2002 mit den vorab definierten Ablagerungsmerkmalen
2.1	0,35	11	20	6,5 x 6,5 x 4,5	Berechnung der Ablöseszenarien 1 und 2: Untersuchung des Einflusses der Reibungsparameter (Gleitfläche und Oberfläche) auf die Reichweite
2.2	0,35	11	20	6,5 x 6,5 x 4,5	Berechnung des Ablöseszenarios 1: Reduktion der Steifigkeit in der seitlichen Begrenzung des Ablöseszenarios 1, um eine bestimmte Modellreaktion zu untersuchen (siehe Abschnitt 4.3.2.2)
2.3	0,175	11	20	6,5 x 6,5 x 4,5	Berechnung der Ablöseszenarien 1 und 2: Untersuchung des Einflusses des Dämpfungsfaktors auf die Reichweite
3	0,35	21	40	6,5 x 6,5 x 6,5	Berechnung des Ereignisses 2002: Keine zufriedenstellende Simulation, zu große Reichweite der Halde 2002
4	0,35	22	40	6,5 x 6,5 x 6,5	Berechnung des Ereignisses 2002: Übereinstimmung der Simulation mit den definierten Ablagerungsmerkmalen, allerdings kein vollständiges Abgleiten von Ablöseszenario 2
5	0,35	21	40	6,5 x 6,5 x 6,5	Berechnung des Ereignisses 2002: Untersuchung des Einflusses der Raumstellungen der Trennflächen innerhalb des Gleitkörpers 2002 auf die Ablagerungsform der Halde 2002
6	0,35	22	40	6,5 x 6,5 x 4,5	Berechnung des Ablöseszenarios 2: Erneute Berechnung des zweiten Ablöseszenarios (Modellparametern wie in Version 2) zur Aufzeichnung eines Zeit-Geschwindigkeit-Verlaufs

Tabelle 3: Berechnungsversionen

4.3.1 Version 1

Berechnungsversion 1 ist als Sammelbegriff für diverse Voruntersuchungen zu verstehen. Die diesen Berechnungen zugrunde gelegten Modellparameter werden nicht aufgelistet, da sie parallel zum Arbeitsfortschritt laufend geändert wurden. Sobald erkannt wurde, ob gewisse Ansätze verfolgt oder verworfen werden, wurden die Berechnungen abgebrochen. Da wesentliche Modellreaktionen mithilfe dieser Version untersucht wurden, wird sie trotz nicht dokumentierter Endergebnisse als eigene Berechnungsversion angeführt.

Wie in den betreffenden Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3.1 erwähnt, wurde diese Version vor bzw. während der Festlegung aller Modellparameter verwendet, um mit verschiedenen Dämpfungs- und Steifigkeitseinstellungen zu experimentieren. Nach Festlegung des Dämpfungsmodells und der Steifigkeiten wurde mit Version 1 der Einfluss der Blockgröße auf das Modellverhalten untersucht. Dabei wurde beobachtet, dass einige Blöcke des Ereignisses 2002 nicht abglitten, sondern sich an der seitlichen Begrenzung abstützten.

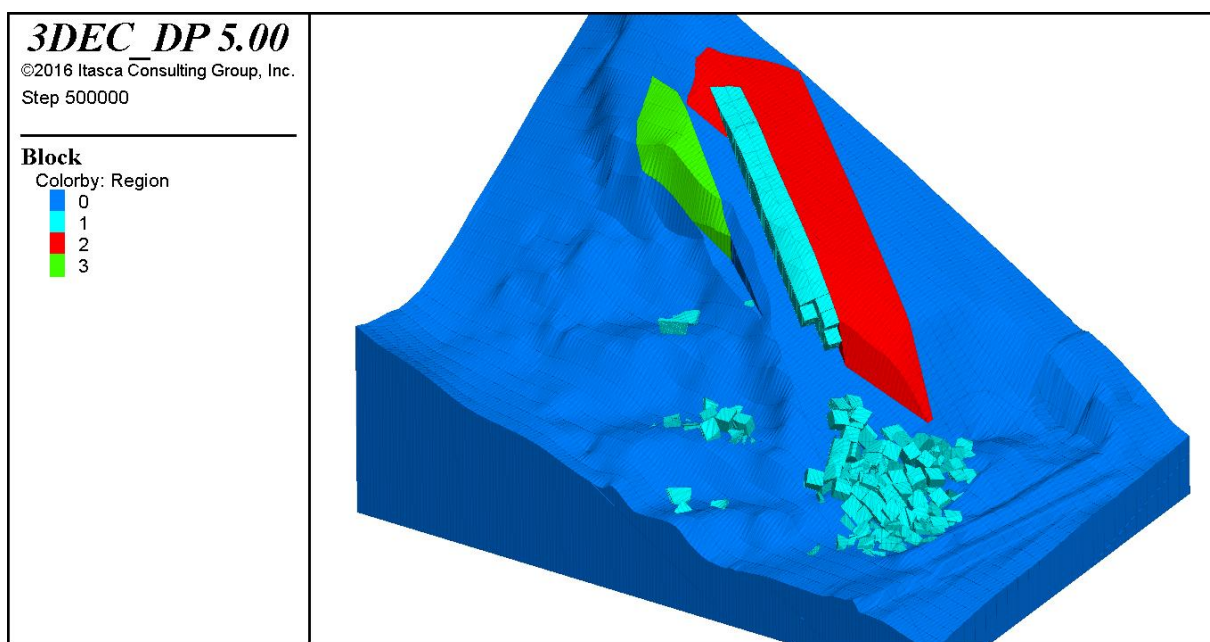


Abbildung 37: Version 1

Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die Spannungen in den betroffenen Trennflächen nicht groß genug waren, um das elastische Verformungsvermögen (welches durch die Kluffsteifigkeiten beschrieben wird) auszuschöpfen. Daher wurde beschlossen, die Schersteifigkeit in den seitlichen Begrenzungen des Ereignisses 2002 und des Ablöseszenarios 2 um eine Zehnerpotenz auf $K_s' = 10^6 \text{ Pa/m}$ zu reduzieren. Nach dieser Reduktion zeigte das Modell das gewünschte gleichzeitige Abgleiten aller Blöcke (zu erkennen an der ähnlichen Intensität der Geschwindigkeitsvektoren in Abbildung 38).

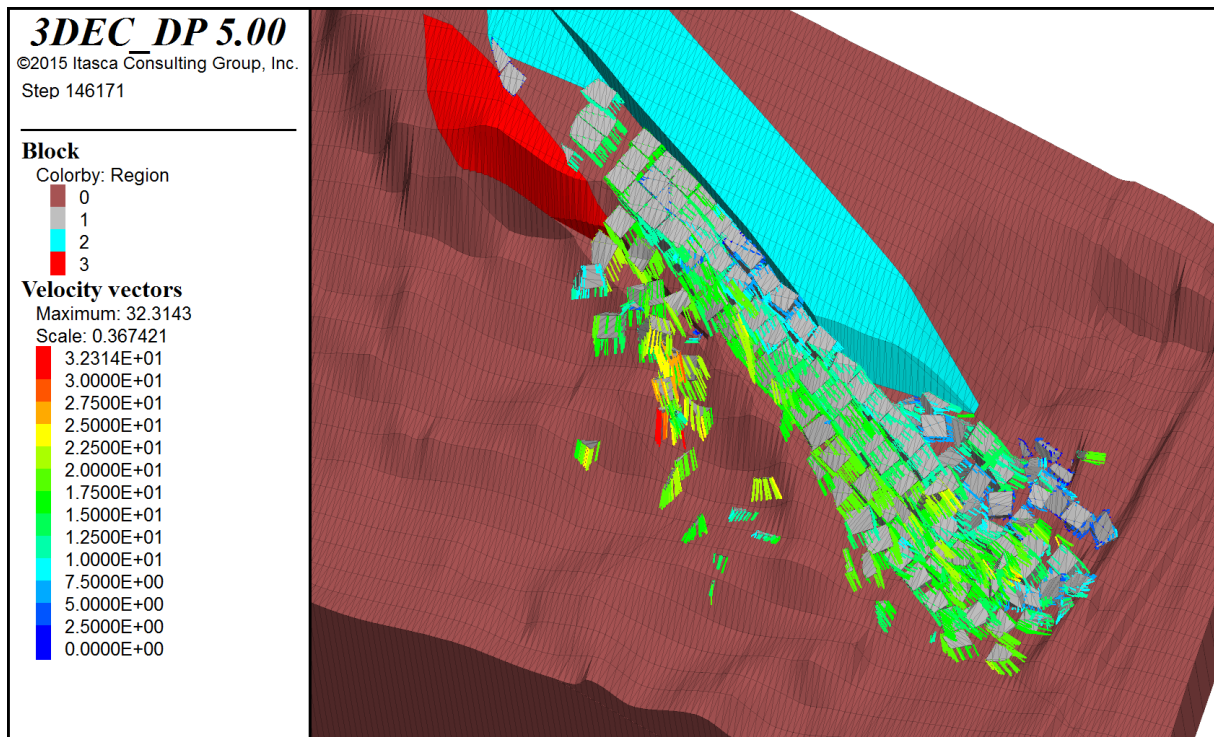


Abbildung 38: Gleichzeitiges Abgleiten der Blöcke

Nach Erreichen eines einheitlichen Abgleitens wurde beobachtet, dass mit zunehmenden Abmessungen der Blöcke eine kegelförmige Ablagerung der Halde nicht mehr gegeben war, da die Blöcke reihenweise abglitten ohne sich voneinander zu entkoppeln. Für die weiteren Berechnungen wurde daher als Ausgangswert für die Blockgeometrie die Kantenlänge mit 6,5 m limitiert.

Als Reaktion aus den Erkenntnissen aus Version 1 wurden somit für alle folgenden Versionen zusätzliche Startparameter definiert:

- Herabsetzung der Kluftschersteifigkeit der seitlichen Begrenzungsflächen von Ereignis 2002 und Ablöseszenario 2 auf $K_s' = 10^6 \text{ Pa/m}$
- Festlegung der maximalen Kantenlänge der Kluftkörper mit 6,5 m

4.3.2 Version 2

Um der Halde des Ereignisses 2002 zusätzliche Ausbreitungsmöglichkeiten zu geben wurde in Version 2 die Höhe der Kluftkörper auf 4,5 m reduziert. Dadurch entstand eine zusätzliche Trennfläche im Gleitkörper 2002, was zu einer höheren Blockanzahl führte.

Da mit dem wie oben beschrieben festgelegten Reibungswinkel $\varphi_G = 26^\circ$ kein vollständiges Abgleiten erfolgte, wurde der Reibungswinkel so lange reduziert bzw. wieder angehoben, bis

einerseits der gesamte Gleitkörper in Bewegung kam und andererseits alle Blöcke vor dem Damm zu liegen kamen. Dies geschah bei einem Reibungswinkel von $\varphi_G = 22^\circ$. Die in 4.2.4 beschriebenen Oberflächenparameter wurden nicht verändert.

Diese Modellparameter führten zur Simulation des Ereignisses 2002, welche alle geforderten Merkmale der Halde beinhaltet. Mit denselben Parametern wurden daher auch die Ablöseszenarien 1 und 2 berechnet. Abbildung 39 zeigt die daraus resultierenden Endzustände der jeweiligen Ereignisse.

Die Berechnung von Ablöseszenario 1 zeigte, dass ein überwiegender Teil der Kluffkörper bereits auf der obersten Etage zu liegen kam, nur vereinzelte Blöcke fielen auf die mittlere Etage. Ein an der seitlichen Begrenzung liegender Teil der Gleitmasse blieb auf der Gleitfläche liegen. Unter den gegebenen Modellparametern erreichte kein Block den Basisbereich des Steinbruchs.

Die Blöcke des Ablöseszenarios 2 wurden nach kurzer Distanz von der Halde des Ereignisses 2002 aufgefangen und füllten Teile der Grabenstrukturen im Nordosten des Steinbruchs auf. Kein Kluffkörper des Ablöseszenarios 2 erreichte den Damm, allerdings wurden Blöcke der Halde 2002 soweit verschoben, dass sie den Damm erreichten. Abbildung 40 zeigt den Zustand des Bereichs der Halde angrenzend zum Damm vor und nach dem Ablöseszenario 2. Nur die vordersten Blockreihen wurden gegen den Damm geschoben.

Die Geschwindigkeitsverläufe⁹ in Abbildung 41 zeigen, dass die markierten Blöcke eine Geschwindigkeit von ca. 7 bis 9 m/s erreichten (je nach Block), bevor sie auf der Steinbruchbasis auftrafen. Im Vergleich dazu ist die durch Ablöseszenario 2 hervorgerufene Geschwindigkeit der markierten Blöcke sehr gering. Die Werte steigen nur selten über 1 m/s an. Die kurzfristige Beschleunigung des Blocks 1 auf über 4 m/s ist vermutlich auf eine lokale Bewegung (z.B. Kippen des Blocks innerhalb der Halde) zurückzuführen und sollte nicht als ruckartige Beschleunigung der gesamten Halde interpretiert werden. Wie in Abbildung 42 ersichtlich, ist die langsame Geschwindigkeit der markierten Blöcke, mit Ausnahme kurzfristiger lokaler Beschleunigungen, ab Beginn des Abgleitens von Ablöseszenario 2 (relativ) konstant. Die Verschiebung der Halde 2002 erfolgte demnach nicht ruckartig, sondern mit langsamer Geschwindigkeit über einen längeren Zeitraum.

⁹ In allen folgenden Geschwindigkeitsdiagrammen ist mit einer strichlierten Linie eine Trennung zwischen Ereignis 2002 und Ablöseszenario 2 eingezeichnet. Während in den Berechnungen das Ablöseszenario 2 nahtlos an das Ereignis 2002 anschließt, liegt in der Realität ein unbekanntes Zeitintervall zwischen den Ereignissen. Die strichlierte Linie ist demnach auch als nicht näher definiertes Zeitintervall zu verstehen.

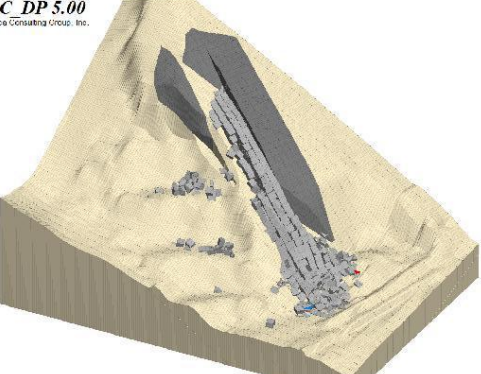

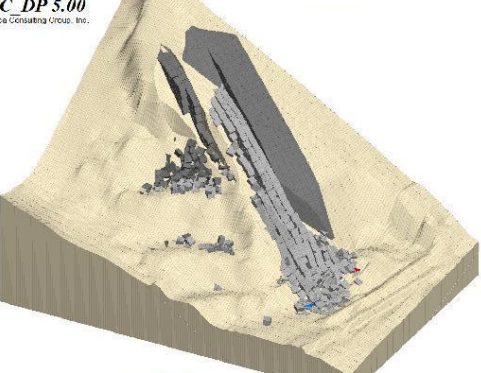
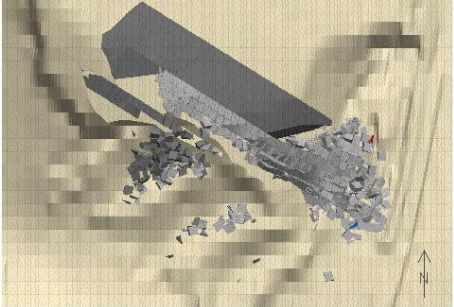
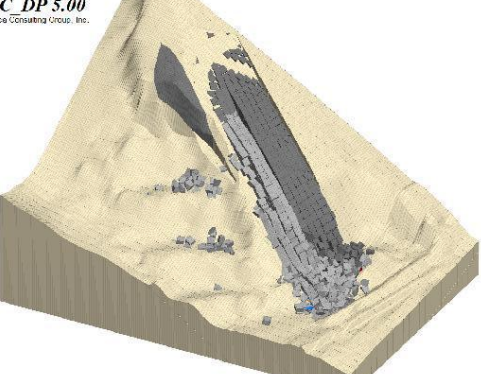
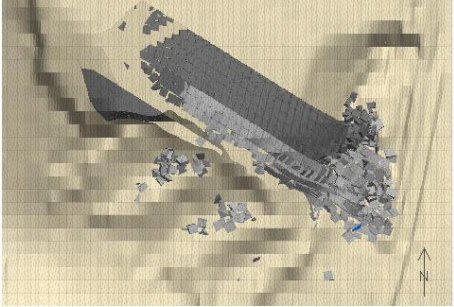
V2	Ansicht aus SO	Grundriss
Ereignis 2002	<p><i>3DEC DP 5.00</i> ©2010 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 	<p><i>3DEC DP 5.00</i> ©2010 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 
Ablöseszenario 1	<p><i>3DEC DP 5.00</i> ©2010 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 	<p><i>3DEC DP 5.00</i> ©2010 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 
Ablöseszenario 2	<p><i>3DEC DP 5.00</i> ©2010 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 	<p><i>3DEC DP 5.00</i> ©2010 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 

Abbildung 39: Version 2 - Endzustände

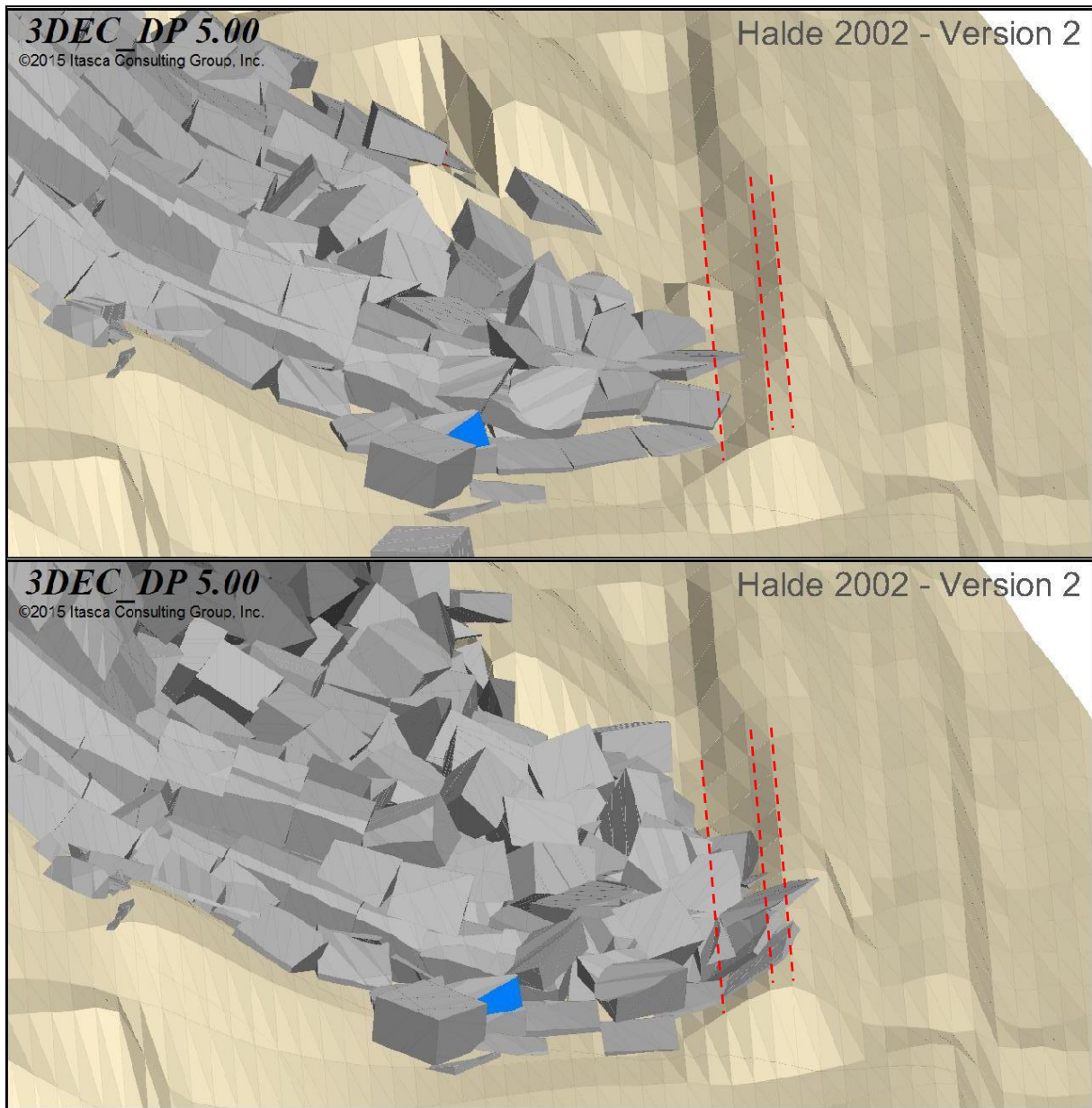


Abbildung 40: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone

Die Ansicht entspricht einem Blick entlang des Steinschlagschutzdamms, ausgehend von der südlichen Steinbruchbasis. In dieser - und den folgenden Abbildungen aus dieser Perspektive - ist der Steinschlagschutzdamm an der Schattierung rechts von der Halde zu erkennen. Unmittelbar dahinter (weiter rechts im Bild) befinden sich die Verkehrswege.

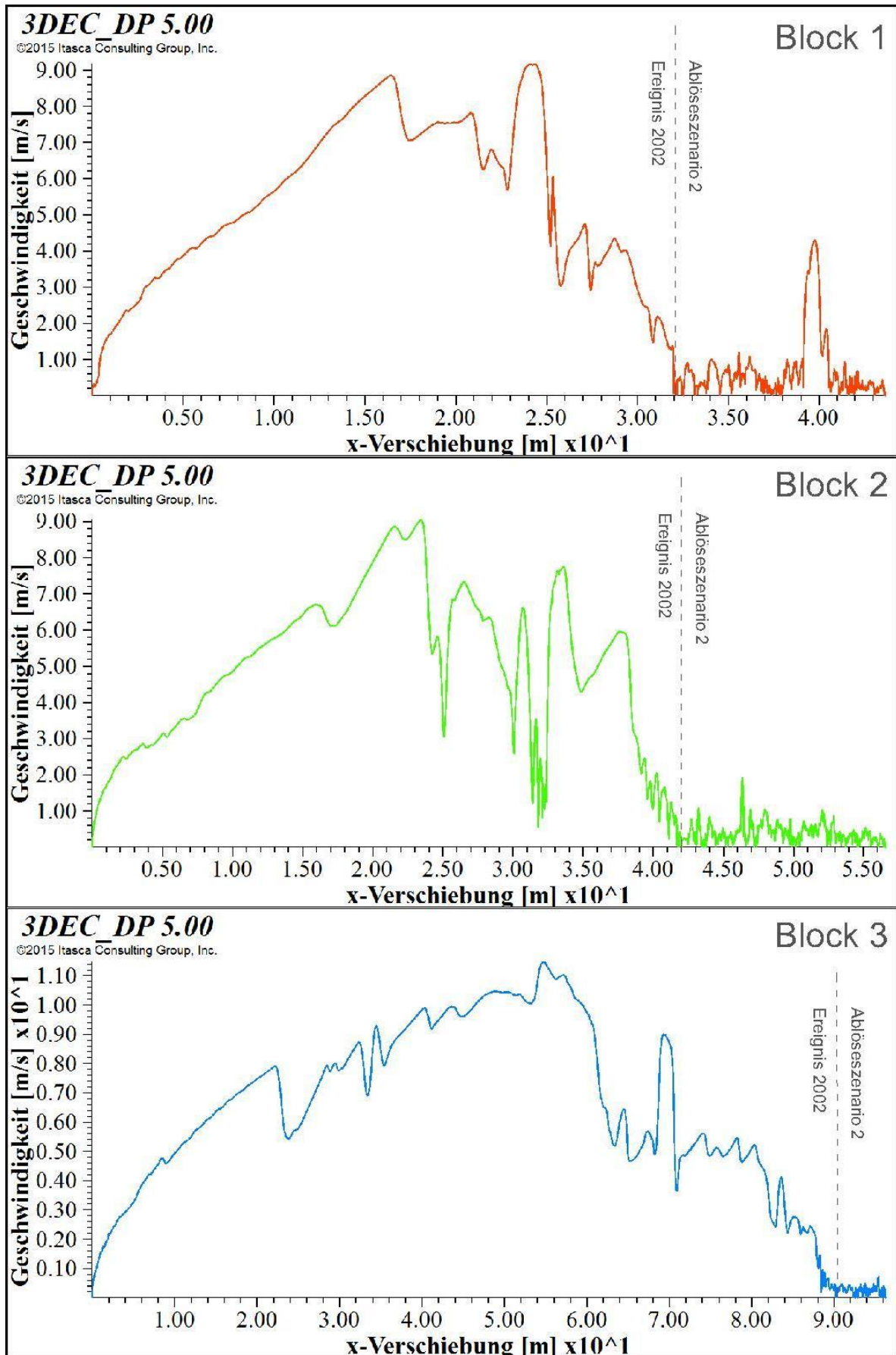


Abbildung 41: Version 2 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der x-Verschiebungen

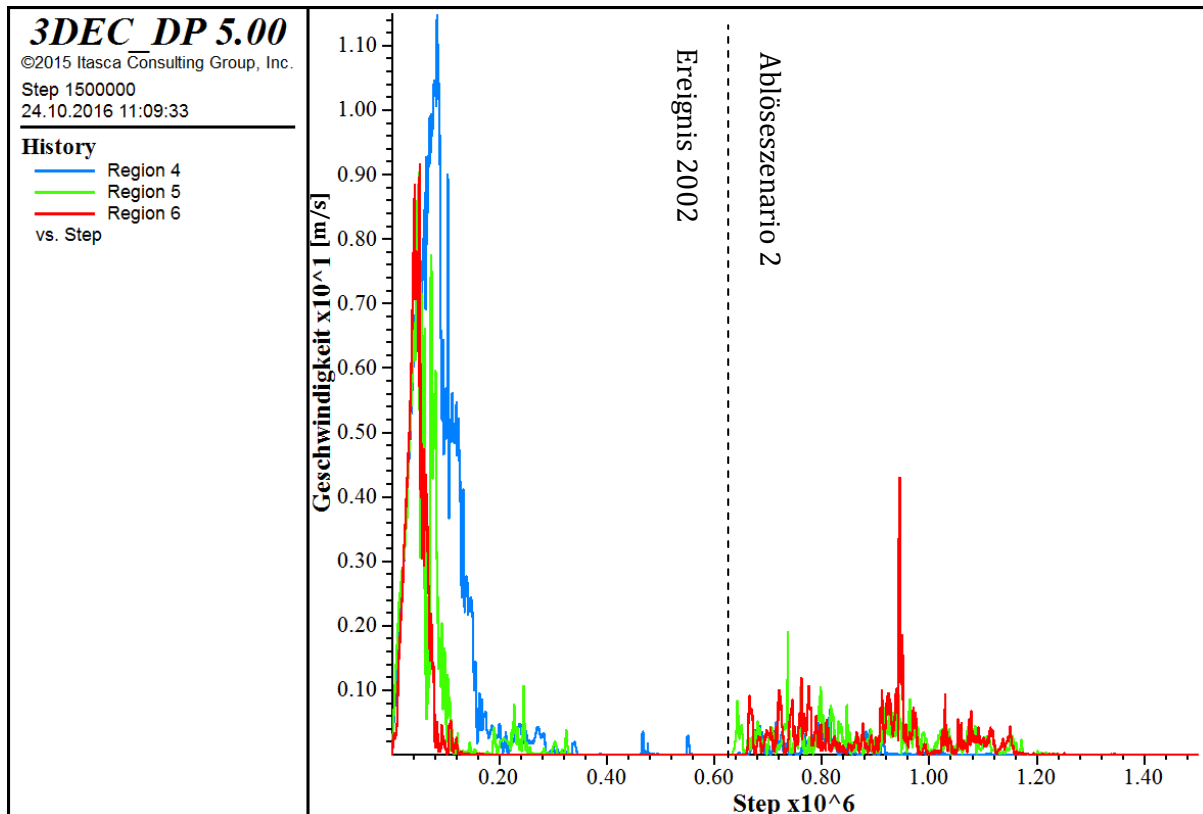


Abbildung 42: Version 2 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeitschritte

4.3.2.1 Version 2.1

Um den Einfluss der Reibung auf die Reichweite der Ablöseszenarien zu untersuchen, wurden in Version 2.1 für die Berechnung der Ablöseszenarien 1 und 2 die Reibungswinkel der Gleitfläche und der Oberfläche halbiert. Sie betragen somit:

- Reibungswinkel der Gleitflächen $\varphi_G = 11^\circ$
- Reibungswinkel der Oberfläche $\varphi_O = 20^\circ$

Die berechneten Endzustände für die beiden Ablöseszenarien sind in Abbildung 43 zu sehen.

Die Berechnung des Ablöseszenarios 1 zeigte ähnliche Ergebnisse wie in Berechnungsversion 2. Der Anteil der abgeglittenen Blöcke war aufgrund der herabgesetzten Reibung zwar höher, dennoch erreichte auch hier kein Block die Steinbruchbasis. Die meisten Blöcke blieben auf der obersten Etage hängen.

Ablöseszenario 2 verhielt sich ebenfalls ähnlich wie in Berechnungsversion 2, jedoch war der Einfluss auf die Halde des Ereignisses 2002 größer. Die Blöcke der Halde 2002 wurden durch die geringere Reibung weiter verschoben, dadurch erreichten mehr Blöcke den Damm (siehe Abbildung 44). Der generelle Ablauf des Gleitprozesses des Ablöseszenarios 2 unterschied sich jedoch nicht von Version 2. Die Blöcke des Ablöseszenarios wurden auch hier abgefangen und

füllten Bereiche der Grabenstruktur auf, bis die dadurch gebildete Basis genügend Widerstand aufbauen konnte um den Gleitvorgang zu stoppen.

Wie in den Geschwindigkeitsverläufen in Abbildung 45 zu sehen ist, wurden die Blöcke schneller verschoben als bei Version 2, vor allem je näher sie dem Gleitkörper des Ablöseszenarios 2 waren. Während die Geschwindigkeit des Blocks 1 deutlich höher ausfiel als bei Version 2, ist der Einfluss bei Block 2 wesentlich weniger prägnant (vergleiche Abbildung 41 mit Abbildung 45).

Trotz der höheren Reichweite und Geschwindigkeit der Verschiebung der Halde 2002 erreichte kein Block die Verkehrswege, der Damm wurde jedoch durch einen großen Teil des vorderen Haldenbereichs von 2002 erreicht.

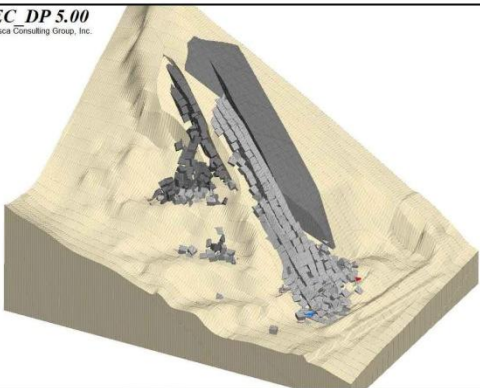
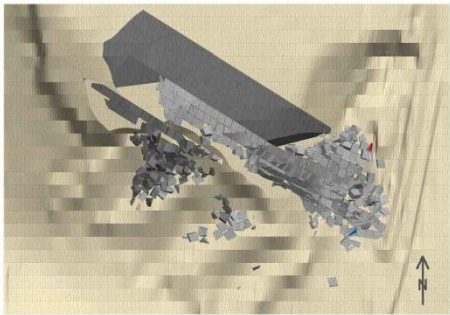
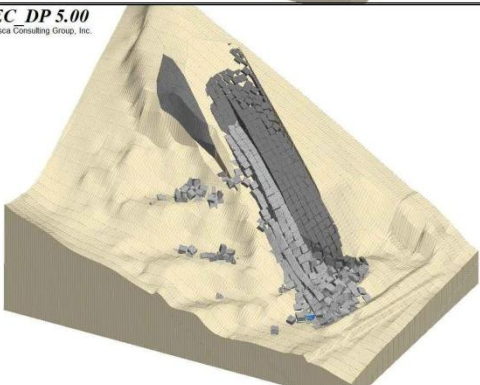
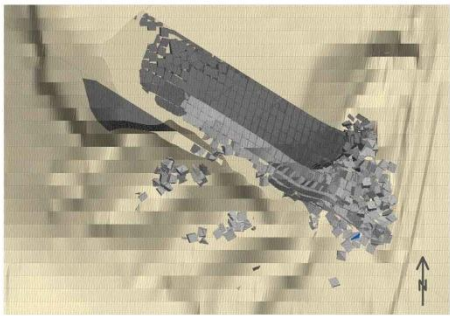
V2-1	Ansicht aus SO	Grundriss
Ablöseszenario 1	 <p>3DEC DP 5.00 ©2015 Rasca Consulting Group, Inc.</p>	 <p>3DEC DP 5.00 ©2015 Rasca Consulting Group, Inc.</p>
Ablöseszenario 2	 <p>3DEC DP 5.00 ©2015 Rasca Consulting Group, Inc.</p>	 <p>3DEC DP 5.00 ©2015 Rasca Consulting Group, Inc.</p>

Abbildung 43: Version 2.1 - Endzustände

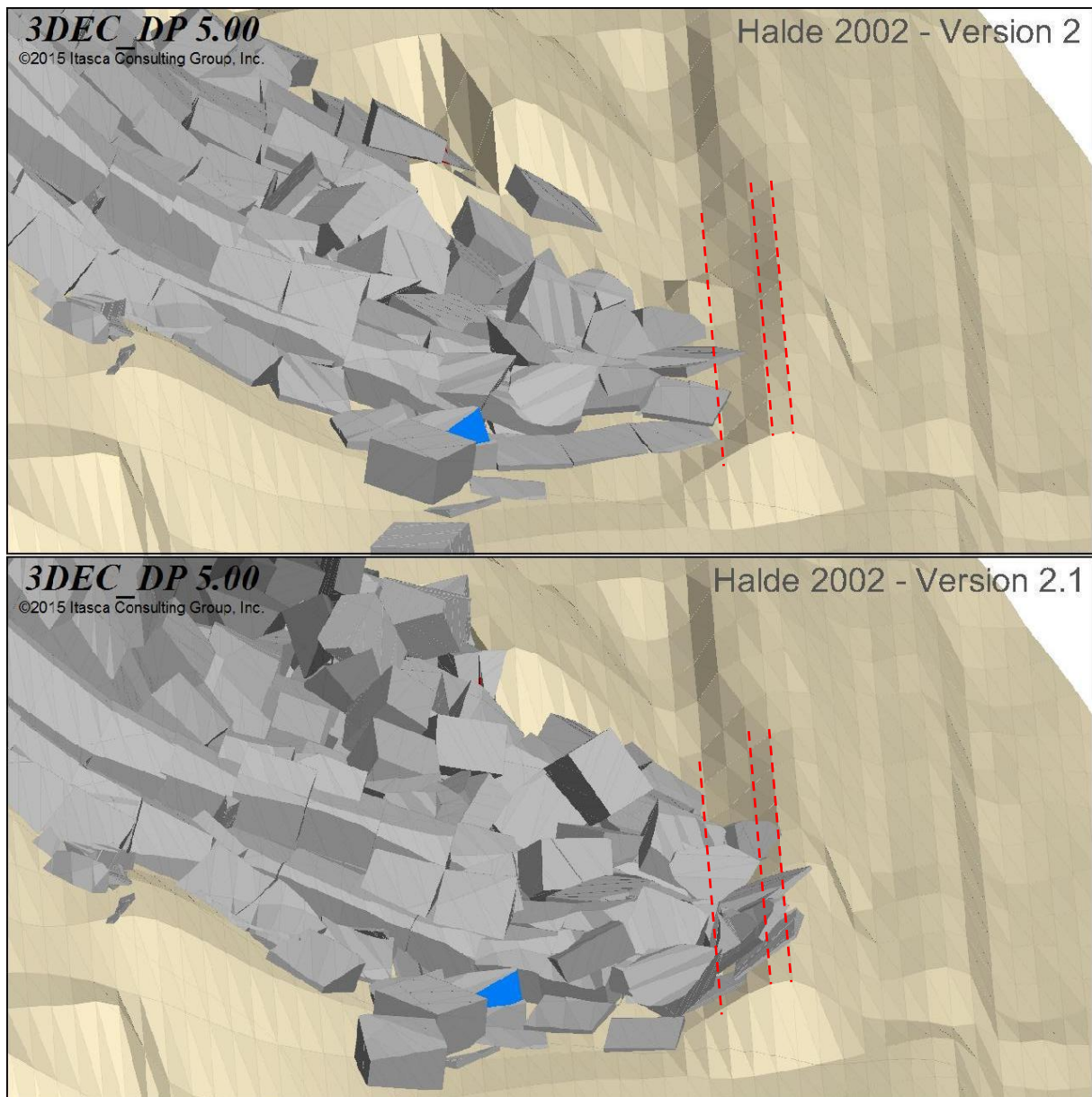


Abbildung 44: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2.1), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone

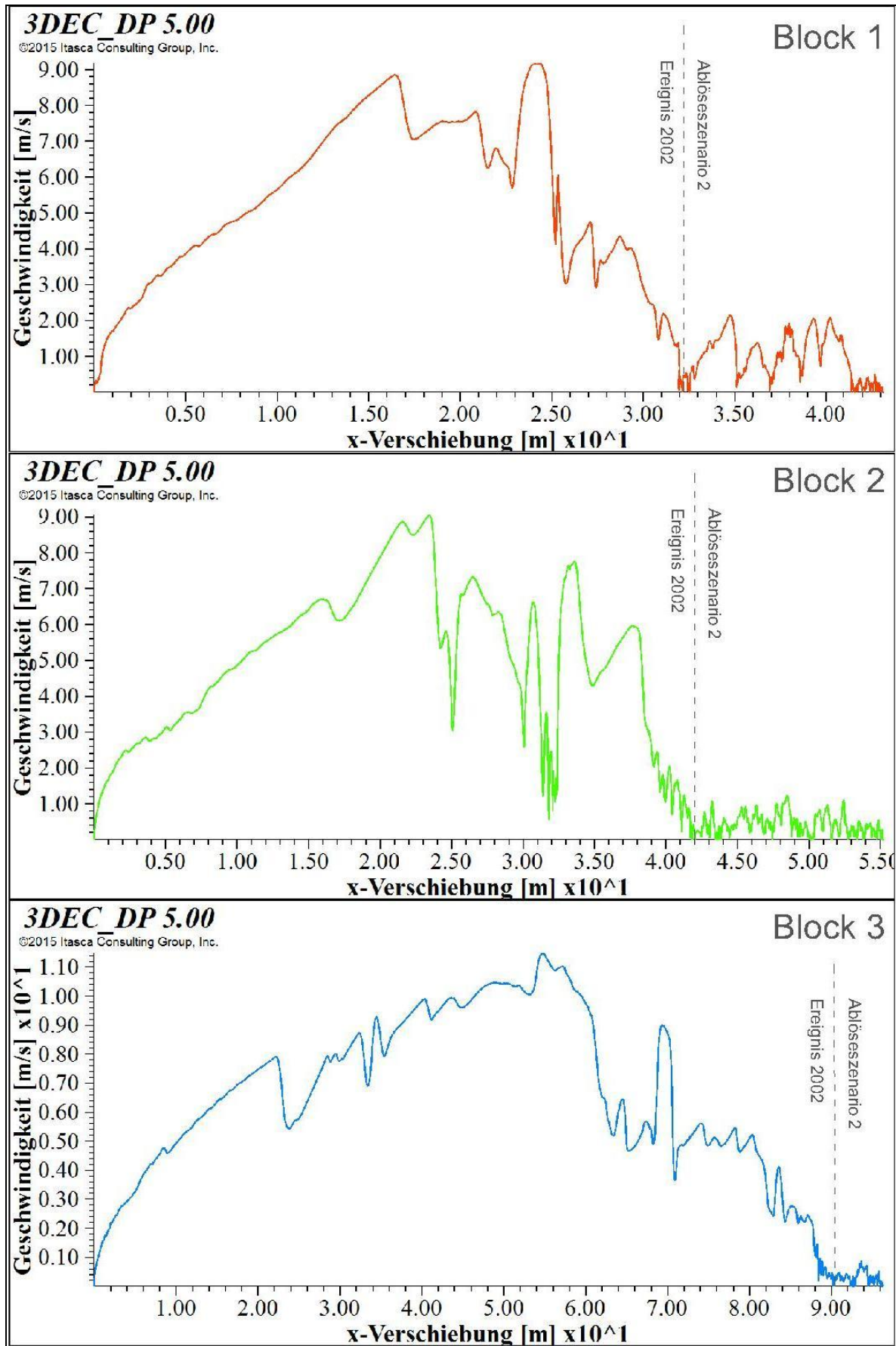


Abbildung 45: Version 2.1 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der x-Verschiebungen

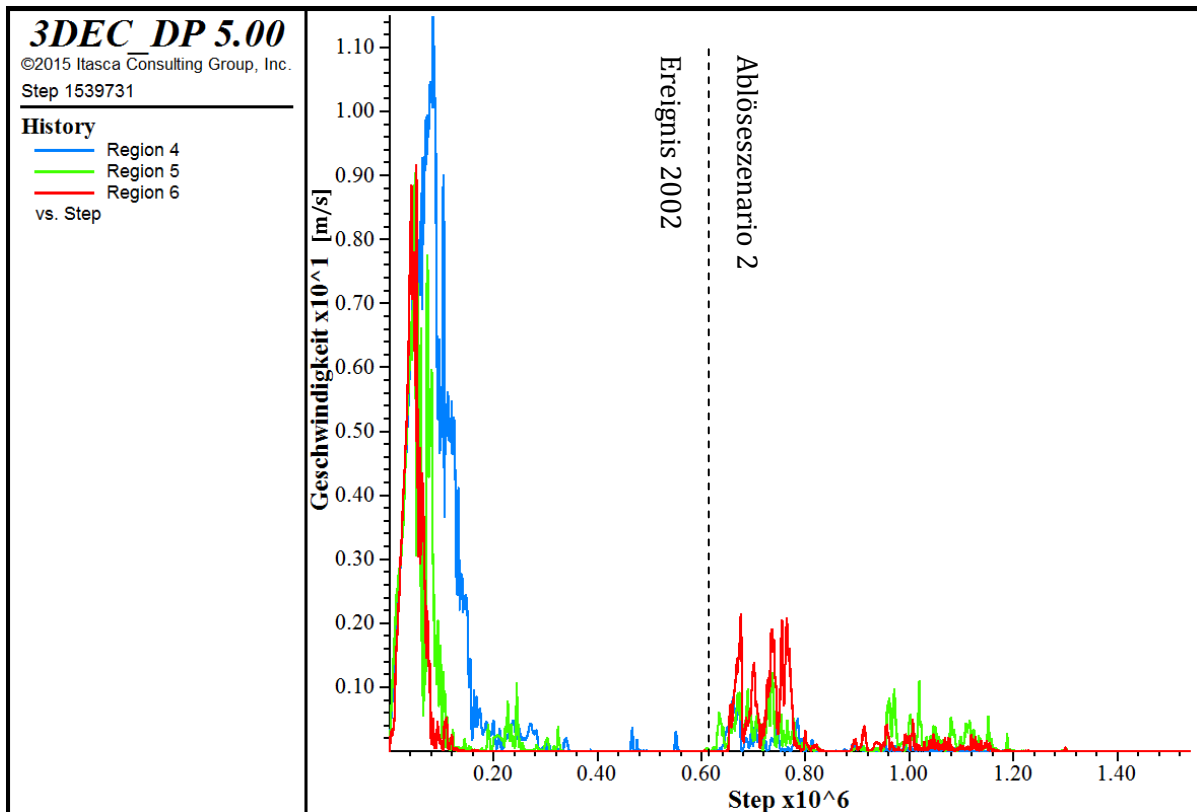


Abbildung 46: Version 2.1 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeitschritte

4.3.2.2 Version 2.2

Da in den Versionen 2 und 2.1 beobachtet wurde, dass bei Ablöseszenario 1 einige Blöcke angrenzend an die seitliche Begrenzung nicht abglitten, wurden die Kluftsteifigkeit in dieser Fläche auf $K_s' = 10^6 Pa/m$ reduziert. Die restlichen Modellparameter entsprachen der Version 2.1. Die Reduktion der Kluftsteifigkeit führte wie in Abbildung 47 zu sehen, zu keiner anderen Modellreaktion als in Version 2.1, die untersuchte Parametervariation wurde somit nicht weiterverfolgt.

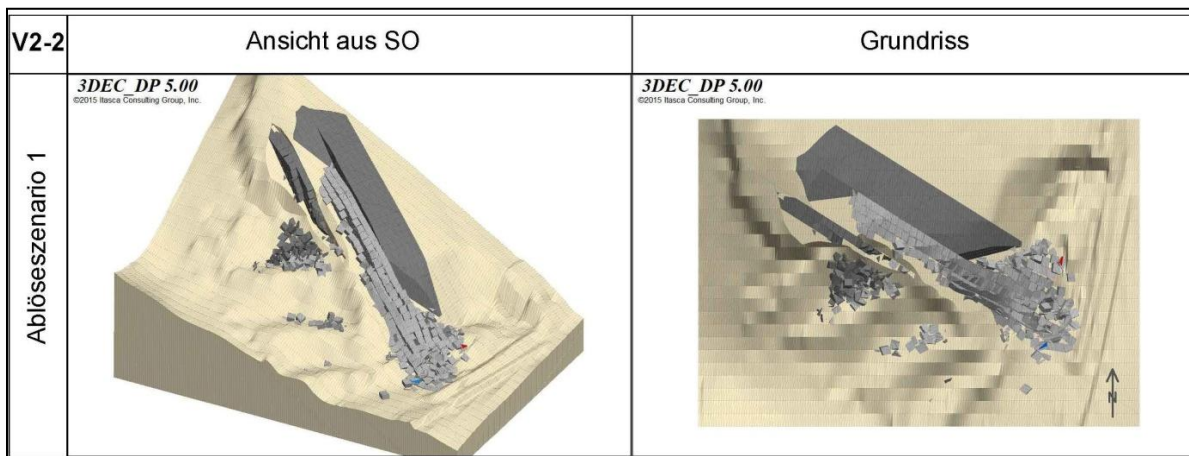


Abbildung 47: Version 2.2 - Endzustand

4.3.2.3 Version 2.3

Um den Einfluss der Dämpfung zu untersuchen wurde in Version 2.3 zusätzlich zur Reibung die Dämpfung halbiert. Die von den Ausgangswerten abweichenden Parameter waren somit:

- Reibungswinkel der Gleitflächen $\varphi_G = 11^\circ$
- Reibungswinkel der Oberfläche $\varphi_O = 20^\circ$
- Dämpfungsfaktor $\alpha = 0,175$

Die Endzustände in Abbildung 48 machen sichtbar, dass die Größe des Dämpfungsfaktors einen hohen Einfluss auf die Reichweiten der Szenarien hat.

Während bei den Versionen 2, 2.1 und 2.2 bei den Berechnungen des Ablöseszenarios 1 nur vereinzelte Blöcke die mittlere Etage erreichten, waren es bei Version 2.3 deutlich mehr. Zudem kam ein Block ins Rollen und verließ den Modellbereich auf Höhe der untersten Etage in Richtung Süden.

Der Endzustand in Abbildung 48 und der Blick auf den Basisbereich in Abbildung 49 zeigen, dass bei dieser Berechnung große Bereiche gegen den Damm geschoben wurden. Zudem wurden einige Blöcke über den Damm hinausgeschoben und erreichten die Verkehrswege.

Auch an den Geschwindigkeitsverläufen in Abbildung 50 und Abbildung 51 kann man erkennen, dass Ablöseszenario 2 wesentlich größere Auswirkungen auf die Halde des Ereignisses 2002 hatte als in vorhergehenden Berechnungen. Die markierten Blöcke wurden weit verschoben, und das mit signifikant höheren Geschwindigkeiten (z. B. Block 1 mit längerfristig anhaltenden Spitzen von bis zu 5 m/s).

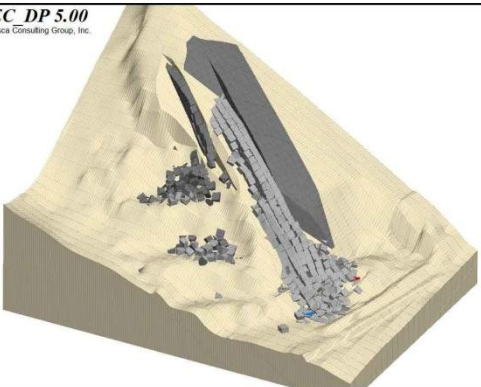
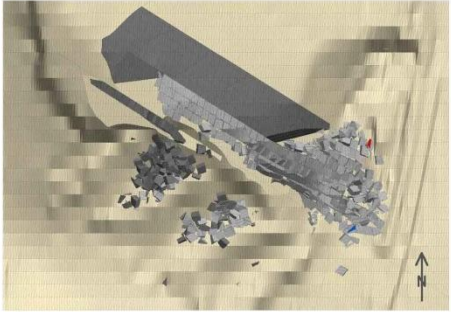
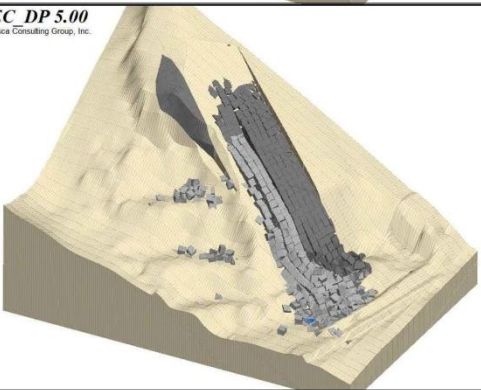
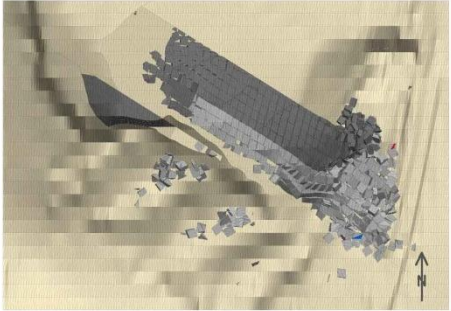
V2-3	Ansicht aus SO	Grundriss
Ablösezenario 1	<p>3DEC DP 5.00 ©2015 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 	<p>3DEC DP 5.00 ©2015 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 
Ablösezenario 2	<p>3DEC DP 5.00 ©2015 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 	<p>3DEC DP 5.00 ©2015 Itasca Consulting Group, Inc.</p> 

Abbildung 48: Version 2.3 - Endzustände

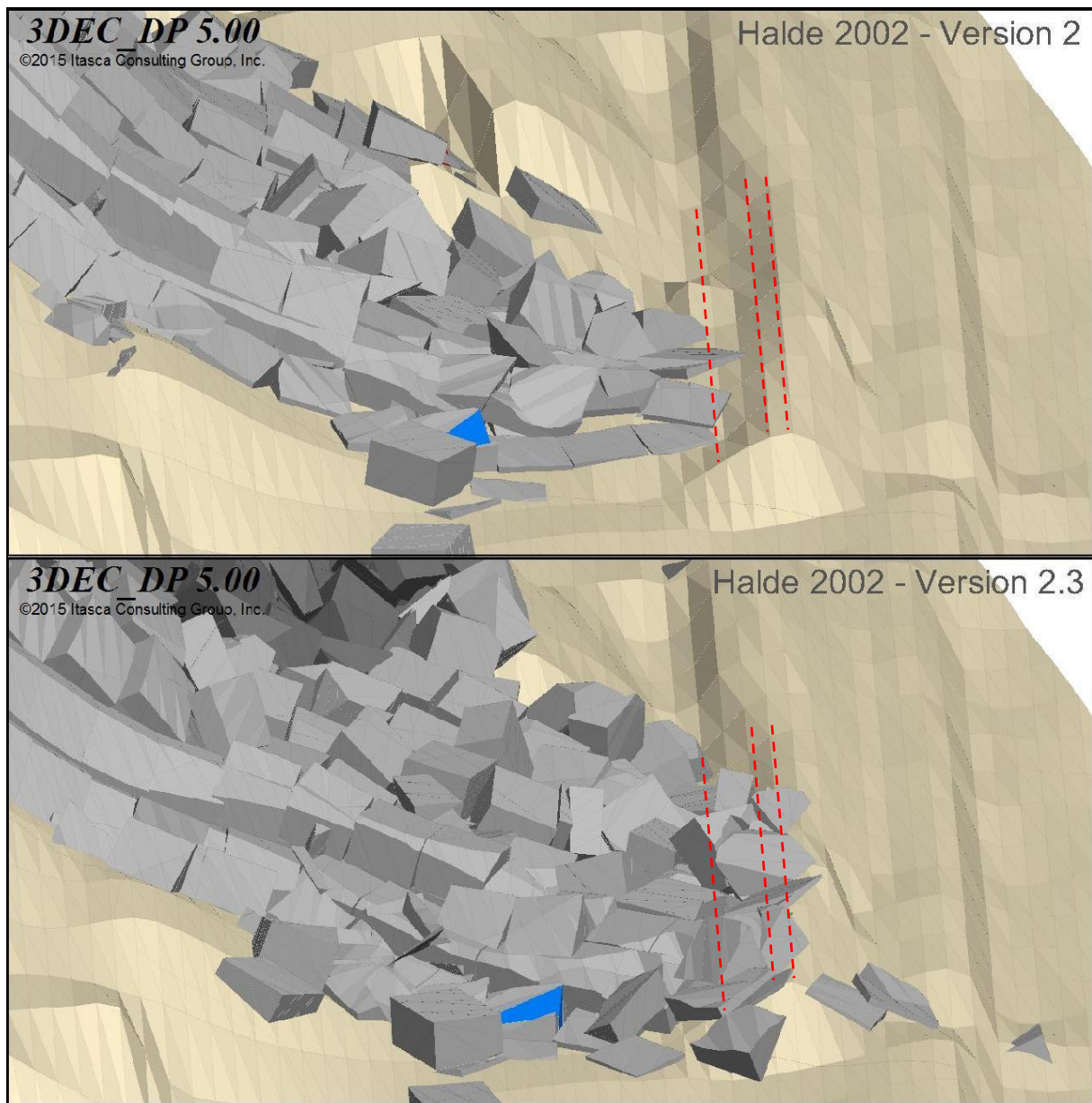


Abbildung 49: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2.3), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone

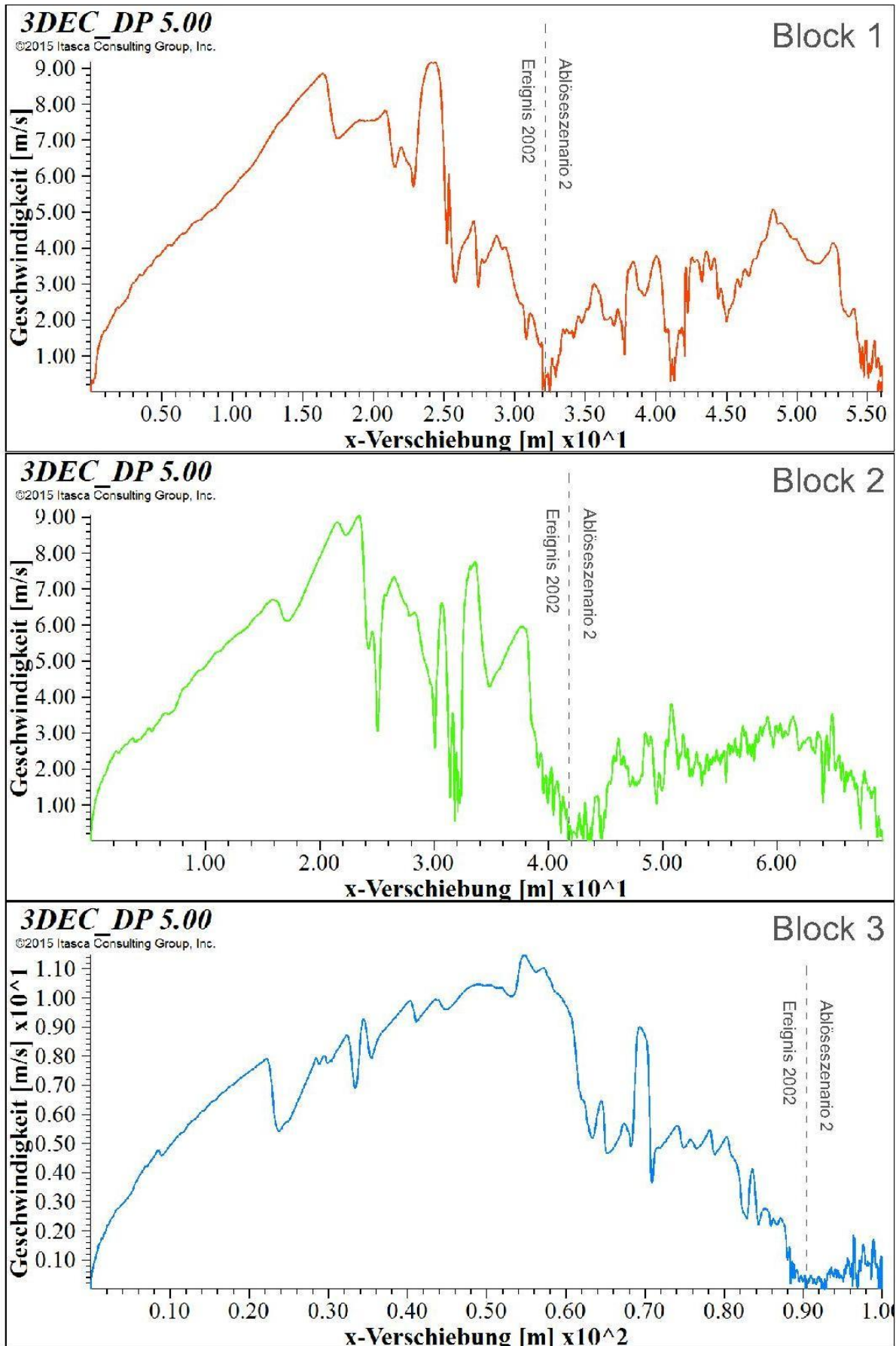


Abbildung 50: Version 2.3 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der x-Verschiebungen

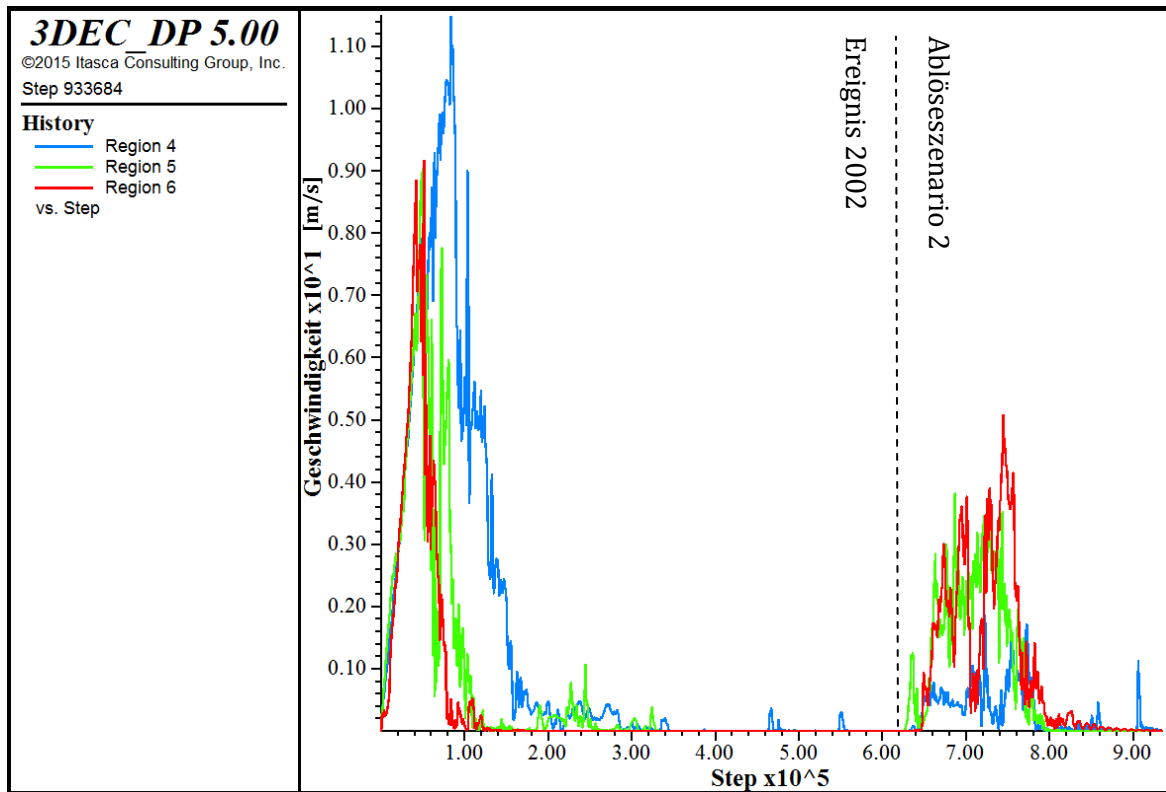


Abbildung 51: Version 2.3 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeitschritte

4.3.3 Version 3

Bei Version 3 wurden alle Abmessungen der Blöcke mit 6,5 m begrenzt, zudem wurde der Reibungswinkel der Gleitfläche auf $\varphi_G = 21^\circ$ reduziert. Da bei dieser Version mehrere Blöcke des Ereignisses 2002 den Damm erreichen, wurden diese Modellparameter nicht weiterverfolgt.

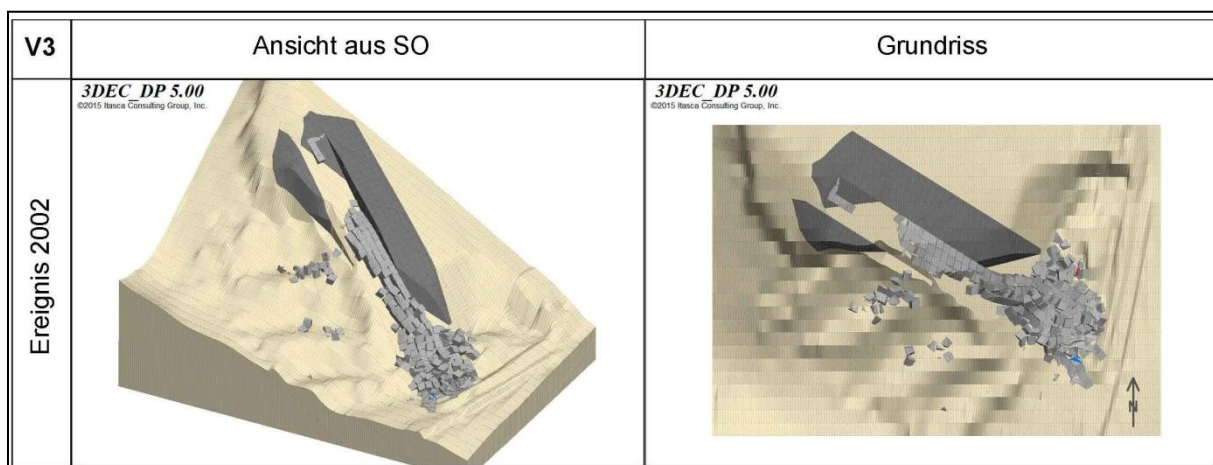


Abbildung 52: Version 3 - Endzustand

4.3.4 Version 4

Version 4 entspricht der Blockgeometrie nach Version 3, allerdings wurde die Reibung auf $\varphi_G = 22^\circ$ erhöht, um eine langsamere Gleitgeschwindigkeit zu erreichen. Die Reichweite der Halde 2002 entsprach dadurch den Anforderungen, allerdings glitt der Gleitkörper des Ablöseszenarios 2 unter der gegebenen Reibung nicht ab.

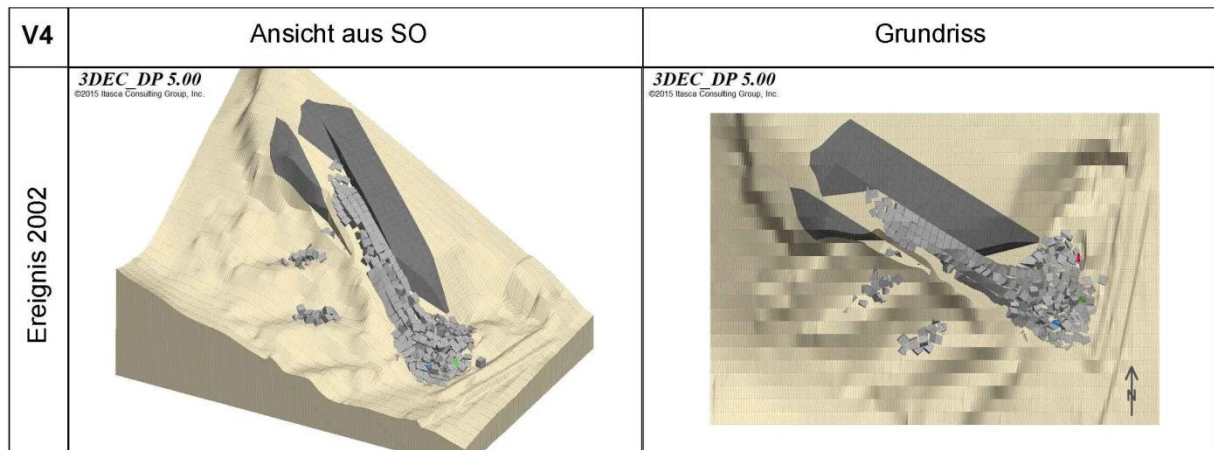


Abbildung 53: Version 4 - Endzustand

4.3.5 Version 5

Bei Version 5 wurden die Raumstellungen der Trennflächen normal auf die Gleitfläche variiert, um zu untersuchen, ob sich die Ablagerungsform der Halde von 2002 dadurch beeinflussen lässt. Nachdem kein maßgeblicher Unterschied festgestellt werden konnte und die Reichweite der Halde nicht den Anforderungen entsprach, wurde eine Variation der Trennflächenorientierung nicht weiterverfolgt.

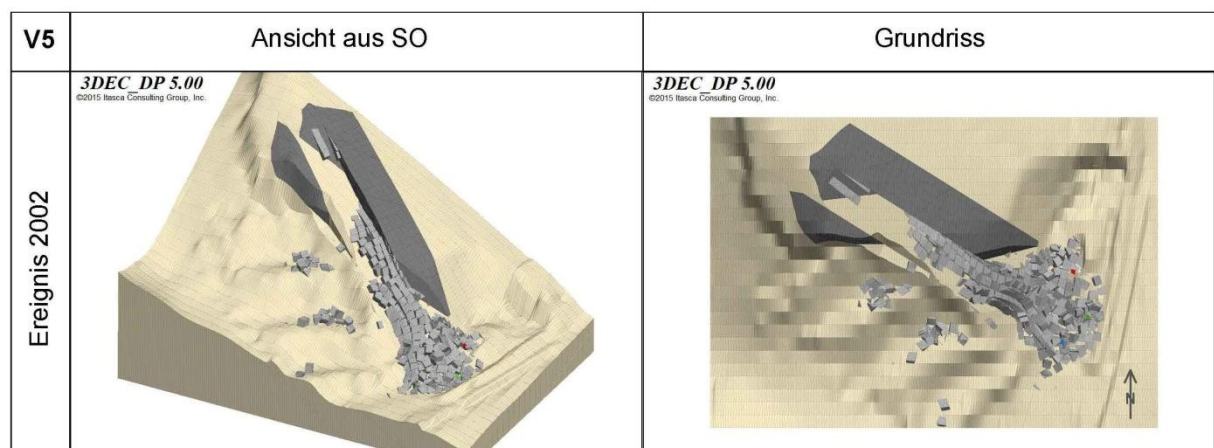


Abbildung 54: Version 5 - Endzustand

4.3.6 Version 6

Version 6 ist eine nachträglich durchgeführte Berechnung mit den Parametern entsprechend Version 2. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, in welchem Zeitraum das zweite Ablöseszenario abgeleitet, wurde während dieser Berechnung die Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet. Abbildung 55 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf für die Blöcke 1 bis 3.

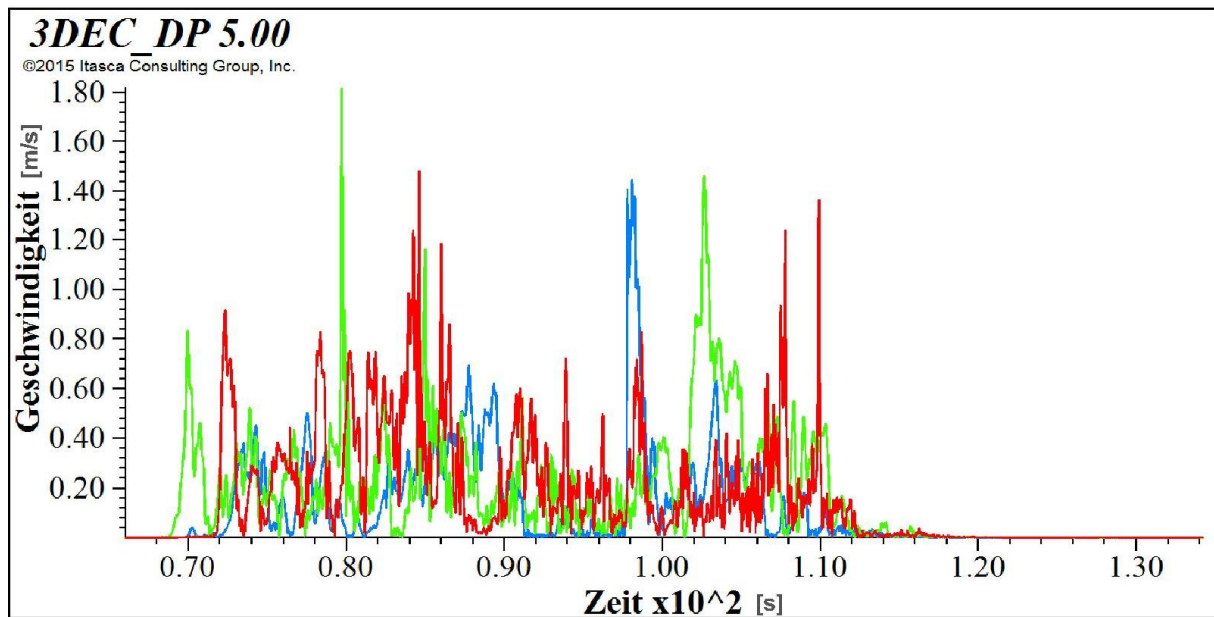


Abbildung 55: Version 6 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeit

Wie die Abbildung zeigt, dauerte der Gleitvorgang des Ablöseszenarios 2 etwa 40 Sekunden bis alle drei Blöcke zum Stillstand gekommen sind.

Obwohl Version 6 mit denselben Parametern wie Version 2 berechnet wurde, können die Geschwindigkeitsverläufe der beiden Versionen nicht direkt miteinander verglichen werden, da komplexe Berechnungen in 3DEC auch immer einer gewissen Zufälligkeit unterliegen. Die übergeordneten Ergebnisse, wie im Fall Spitz die Reichweiten, unterscheiden sich dabei nur unwesentlich voneinander. Punktuelle Ergebnisse, wie die Geschwindigkeitsverläufe der Einzelblöcke, können sich jedoch voneinander unterscheiden.

5 Interpretationen und Schlussfolgerung

5.1 Interpretation der Simulation des Ereignisses 2002

Wie in Punkt 2.2.5 beschrieben, wurden die folgenden Ablagerungsmerkmale der Halde des Ereignisses 2002, die die Geometrie der Halde am besten beschreiben, ausgewählt:

1. Der Fahrböschungswinkel muss etwa der Geländeneigung von ca. 30° entsprechen.
2. Die Sturzhalde darf maximal bis zum Dammfuß vordringen.
3. Nicht die gesamte Gleitmasse soll die Steinbruchbasis erreichen, obere Bereiche sollen auf der Gleitfläche liegen bleiben.
4. Die Halde soll kegelförmig zu liegen kommen.

Nachdem im Zuge der Berechnungsversionen 3, 4 und 5 erkannt wurde, dass Version 2 die realen Verhältnisse am besten abbilden konnte, beschränken sich die Interpretationen der Simulationen auf Version 2 und den darauf basierenden Parametervariationen. Abbildung 56 zeigt den Grundriss nach der Simulation.

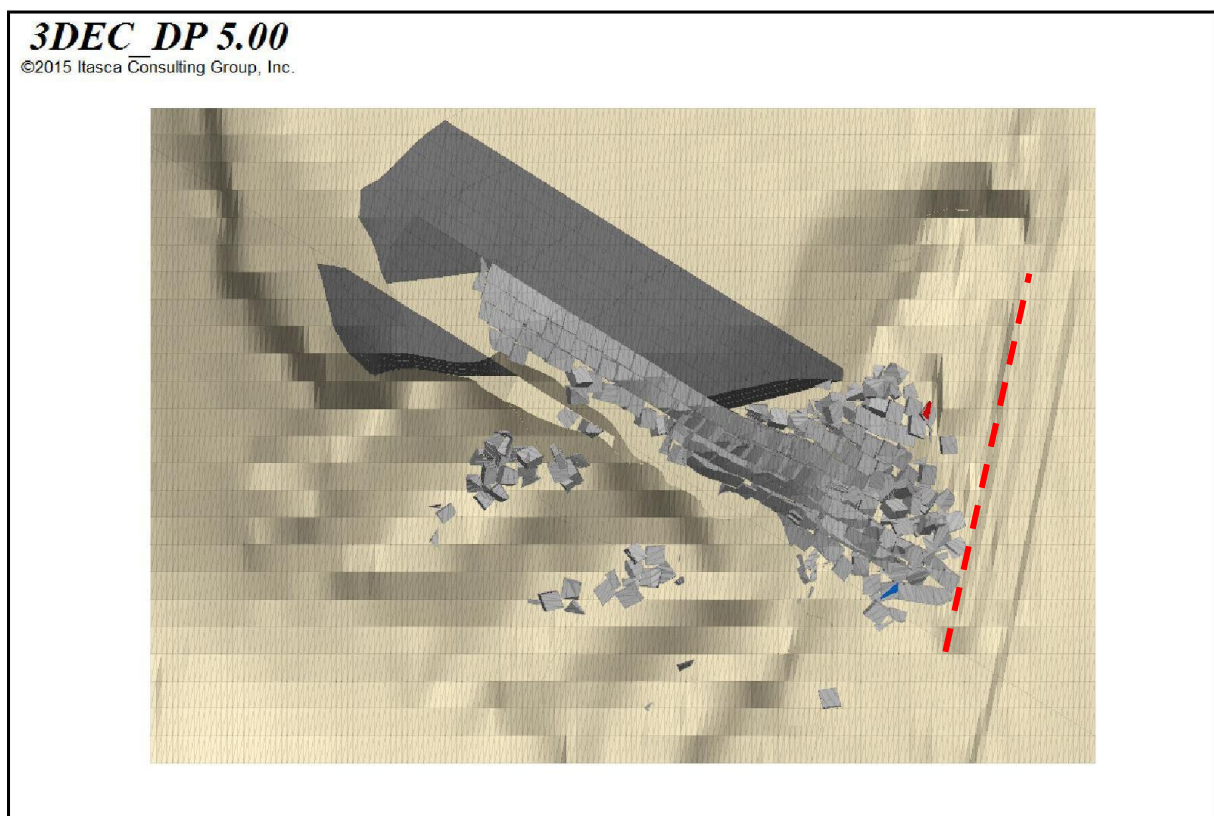


Abbildung 56: Ereignis 2002 - Version 2, strichlierte rote Linie: Dammfuß

Wie die Ereignisdokumentation (Punkt 2, Abbildung 15) zeigt, ist ein Fahrböschungswinkel ähnlich der Geländeneigung durch eine Haldenreichweite bis knapp vor den Dammfuß automatisch gegeben. Die Halde erstreckt sich von der Steinbruchbasis bis zum oberen Bereich der Gleitfläche. Die Bedingungen 1, 2 und 3 konnten somit erfüllt werden.

Die Bedingung 4 konnte simuliert werden, allerdings nicht in der real vorkommenden Ausprägung. Die Halde hat eine deutlich erkennbare Kegelform, jedoch nicht im räumlichen Ausmaß der natürlichen Verhältnisse. Dies ist auf die generalisierte Blockgröße zurückzuführen. Während bei dem realen Gleitvorgang das Gestein in Kluftkörper und Bruchstücke unterschiedlicher Größe zerlegt wurde (wenige Zentimeter bis über 15 m), musste für die Simulation eine mittlere Blockgröße gewählt werden. Der fehlende Anteil an kleineren Bruchstücken führte dazu, dass eine signifikante Umlagerung der Blöcke hauptsächlich im unteren Teil der Halde stattfand. Dies wirkte sich auch auf die Quererstreckung aus, da die seitlichen Ausläufer, bestehend aus den kleineren Bruchstücken, unter den Modellbedingungen nicht zustande kamen. Eine differenziertere Zerlegung des Gleitkörpers könnte vermutlich zu exakteren Ergebnissen führen, wurde aber aufgrund der mit der Blockanzahl steigenden Rechenzeit nicht durchgeführt. Mit den in Abschnitt 4.3 angeführten Modellparametern betrug die Rechenzeit für Version 2 (Ereignis 2002 und Ablöseszenario 2) vier bis fünf Tage.

In diesem Zusammenhang darf auch der bereits erwähnte Einfluss der Halde von 1984 nicht vergessen werden. Diese ist Teil der Modelloberfläche und wurde vermutlich im Zuge des Ereignisses 2002 von kleineren Bruchstücken eingeschüttet. Eine fehlende Ausprägung der Halde im südlichen Basisbereich des Steinbruchs scheint daher bei der in der Simulation gegebenen Blockgröße plausibel.

Die Analyse der Geschwindigkeitsverläufe kann Erkenntnisse über den Gleitvorgang liefern. Repräsentativ dafür ist in Abbildung 57 der kommentierte Geschwindigkeitsverlauf des Blocks 1 für die Berechnung der Version 2 zu sehen.

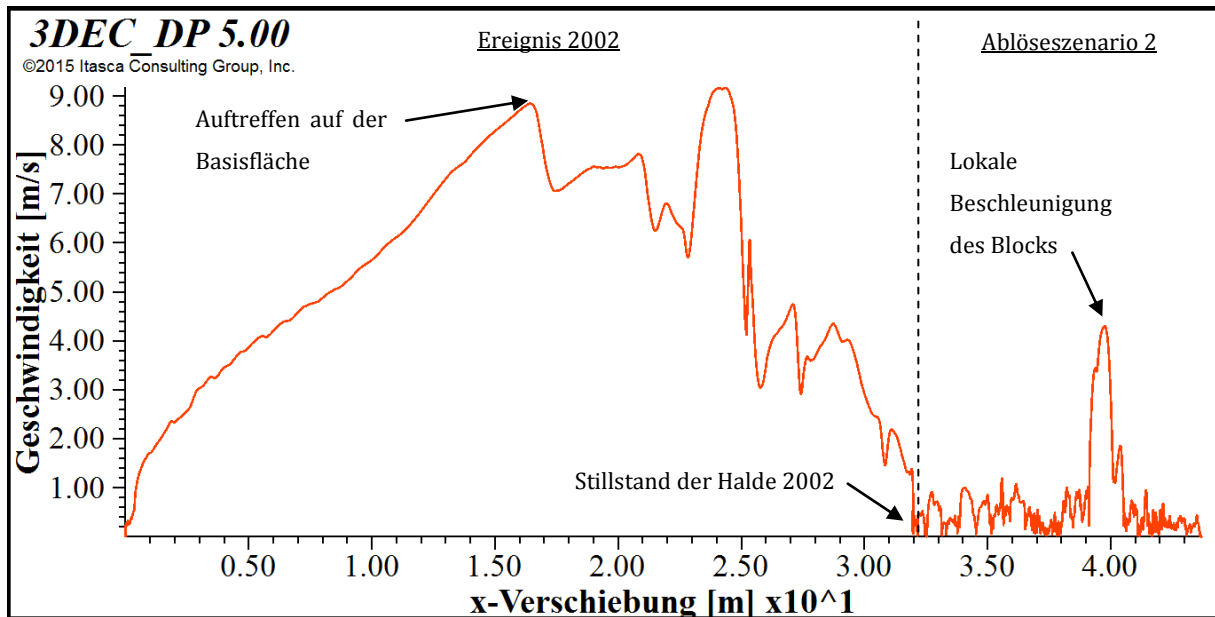


Abbildung 57: Version 2 - Geschwindigkeit Block 1

Über eine horizontale Distanz von ca. 16 m nahm die Geschwindigkeit kontinuierlich zu, bis der Block auf der Basisfläche des Steinbruchs auftraf¹⁰. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Geschwindigkeit ab, wobei der Block durch die auf ihn auftreffenden Blöcke immer wieder kurzzeitig beschleunigt. Nach ca. 32 m kam Block 1 zum Stillstand. Durch den Druck des Ablöseszenarios 2 wurde der Block um ca. weitere 12 m verschoben. Die Beschleunigung auf über 4 m/s ist vermutlich auf eine lokale Bewegung (z.B. Kippen des Blocks innerhalb der Halde) zurückzuführen und sollte nicht als ruckartige Beschleunigung der gesamten Halde interpretiert werden.

Der Geschwindigkeitsverlauf zeigt, dass der Block nach dem Aufprall auf die Basis nach ca. weiteren 16 m zum Stillstand kam. Dies entspricht auch den im Vorfeld getroffenen Annahmen bezüglich des Gleitprozesses. Der untere Bereich der bewegten Masse konnte nur innerhalb einer kurzen Distanz beschleunigen.

Aufgrund der deutlich erkennbaren Ablagerungsmerkmale und des nachvollziehbaren Gleitprozesses, wurde davon ausgegangen, dass die Reichweite einer Felsgleitung wie im Fall Spitz mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden kann. Gleichzeitig muss eingeräumt werden, dass die Ergebnisse der Simulationen nicht als exakte Endlage realer Szenarien betrachtet werden dürfen, da vor allem mit der einheitlichen Blockgröße eine Vereinfachung der realen Bedingungen erfolgte.

¹⁰ Die Verschiebungen in x-Richtung entsprechen dem Verschiebungsanteil Richtung Osten. Nachdem die Fallrichtung der Gleitfläche 2002 in 3DEC mit 110° modelliert wurde, ist die Gesamtverschiebung des Blocks größer als die hier angegebene.

Zusätzlich muss ausdrücklich festgehalten werden, dass die gewählte Vorgangsweise bezüglich der lokalen Dämpfung nur unter bestimmten Voraussetzungen erfolgen sollte. Wenn davon ausgegangen werden muss, dass Sturzprozesse im freien Fall keine untergeordnete Stellung mehr einnehmen, scheint eine Verwendung der für die Simulationen angesetzten Dämpfungsvariante nicht mehr zulässig.

5.2 Interpretation der Simulation des Ablöseszenarios 1

Während der Berechnungen des Ablöseszenarios 1 wurden keine Geschwindigkeiten aufgezeichnet, die Bewertung des Endzustandes erfolgte daher nur auf Basis der Darstellungen des Endzustandes. Eine Detailansicht des Endzustandes des Ablöseszenarios 1 der Version 2 (Abbildung 58) zeigt, dass die Reichweite des Ablöseszenarios 1 für einzelne Blöcke bis zur mittleren Etage und für den Großteil der Gleitmasse nur bis zur oberen Etage ging. Darüber hinaus blieb ein beträchtlicher Teil auf der Gleitfläche liegen. Dies kann möglicherweise durch das im Vergleich zum Ereignis 2002 geringe Volumen erklärt werden. Da das Volumen bei größer werdenden Gleitkörpern ungleich schneller ansteigt als die zugehörige Gleitfläche, wächst auch die Volumenkraft ungleich schneller als die Reibungskraft in der Gleitfläche. Der größere Gleitkörper ist daher (bei ähnlichen Geometrieverhältnissen) immer derjenige mit der geringeren Standsicherheit. Modellparameter, welche Ereignis 2002 und Ablöseszenario 2 zum Abgleiten bringen, können demnach dazu führen, dass kleinere Szenarien nicht vollständig abgleiten.

Um pessimistische Annahmen zu untersuchen, wurden wie beschrieben im Rahmen der Version 2.3 die Reibungswinkel der Gleitfläche und der Oberfläche sowie der Dämpfungsfaktor der Version 2 halbiert. Der dazugehörige Endzustand für das Ablöseszenario 1 ist in Abbildung 59 zu sehen.

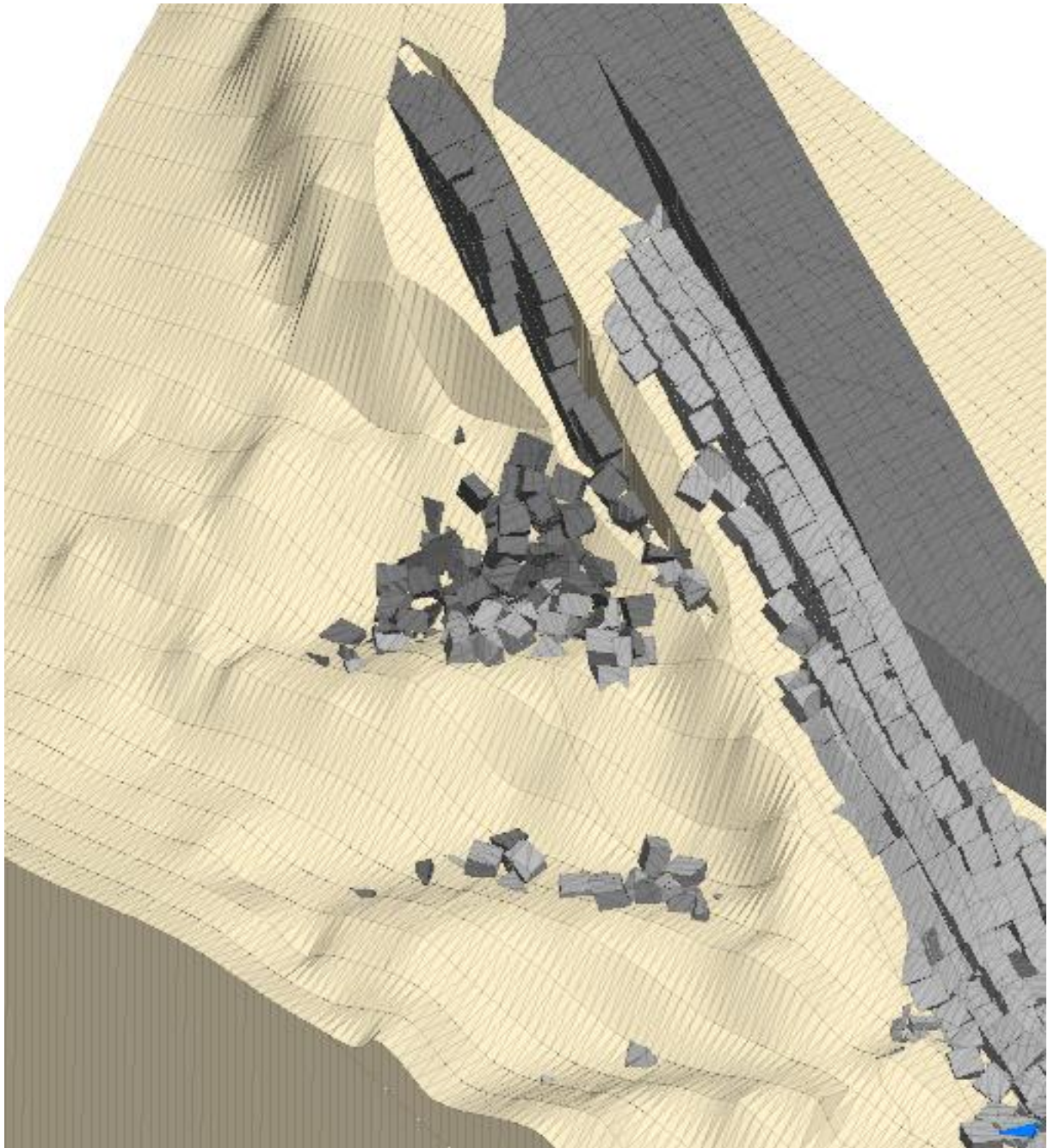


Abbildung 58: Detailansicht Ablöseszenario 1 - Version 2

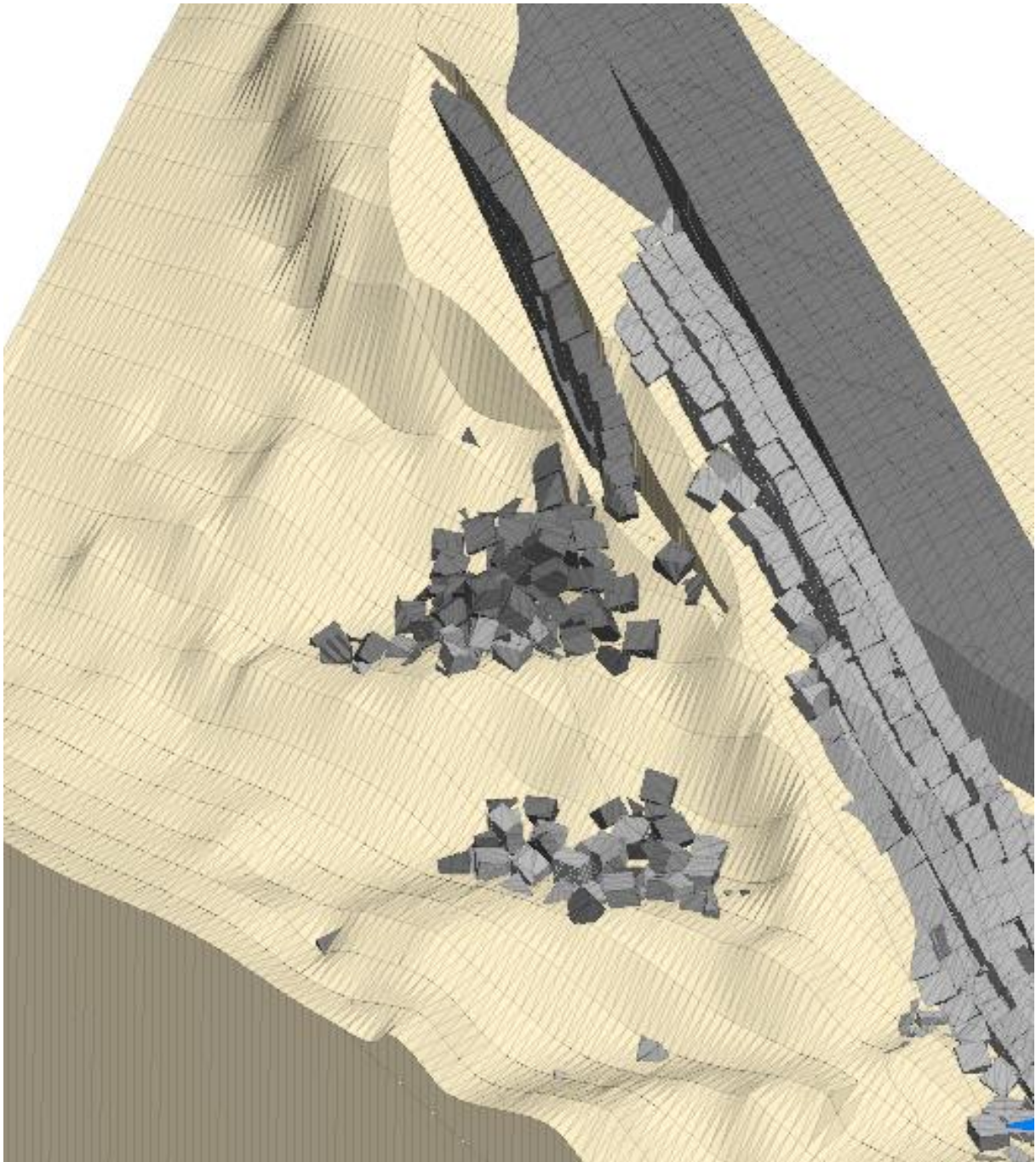


Abbildung 59: Detailansicht Ablöseszenario 1 - Version 2.3

Im Vergleich zu Version 2 fällt auf, dass weniger Blöcke auf der Gleitfläche liegen blieben und deutlich mehr Blöcke auf der mittleren Etage zu liegen kamen. Zusätzlich kam ein Block ins Rollen und verließ den erfassten Modellbereich in Richtung Süden auf Höhe der untersten der drei Etagen (unterer Bildrand in Abbildung 59). Auch bei Version 2.3 erreichte kein Block die Basis des Steinbruchs.

Alle Simulationen des Ablöseszenarios 1 hatten gemeinsam, dass der größte Anteil der in Bewegung gekommenen Blöcke bereits auf der obersten Etage hängen blieb. Die waagrechten

Etagen in Kombination mit den darauf liegenden Blöcken des Ereignisses 2002 führten dazu, dass die beschleunigten Blöcke schnell abgebremst wurden.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass in Form einer Kettenreaktion Blöcke verdrängt wurden und auf die jeweils unterhalb liegende Etage fielen. Nachdem sich in der realen Halde in diesen Bereichen mehrere Blöcke unterschiedlicher Größe befinden, könnte sich eine derartige Reaktion bis zur Steinbruchbasis fortsetzen. Auch der ins Rollen gekommene Block, welcher den Modellbereich Richtung Süden verlassen hat, kann ein Indiz dafür sein, dass einzelne Blöcke bzw. Bruchstücke möglicherweise bis zur Steinbruchbasis vordringen. Ein weitläufiges Abgleiten der gesamten Masse des Ablöseszenarios 1 konnte jedoch nicht beobachtet werden.

5.3 Interpretation der Simulation des Ablöseszenarios 2

Abbildung 60 zeigt den Endzustand der Berechnung des zweiten Ablöseszenarios (Version 2).

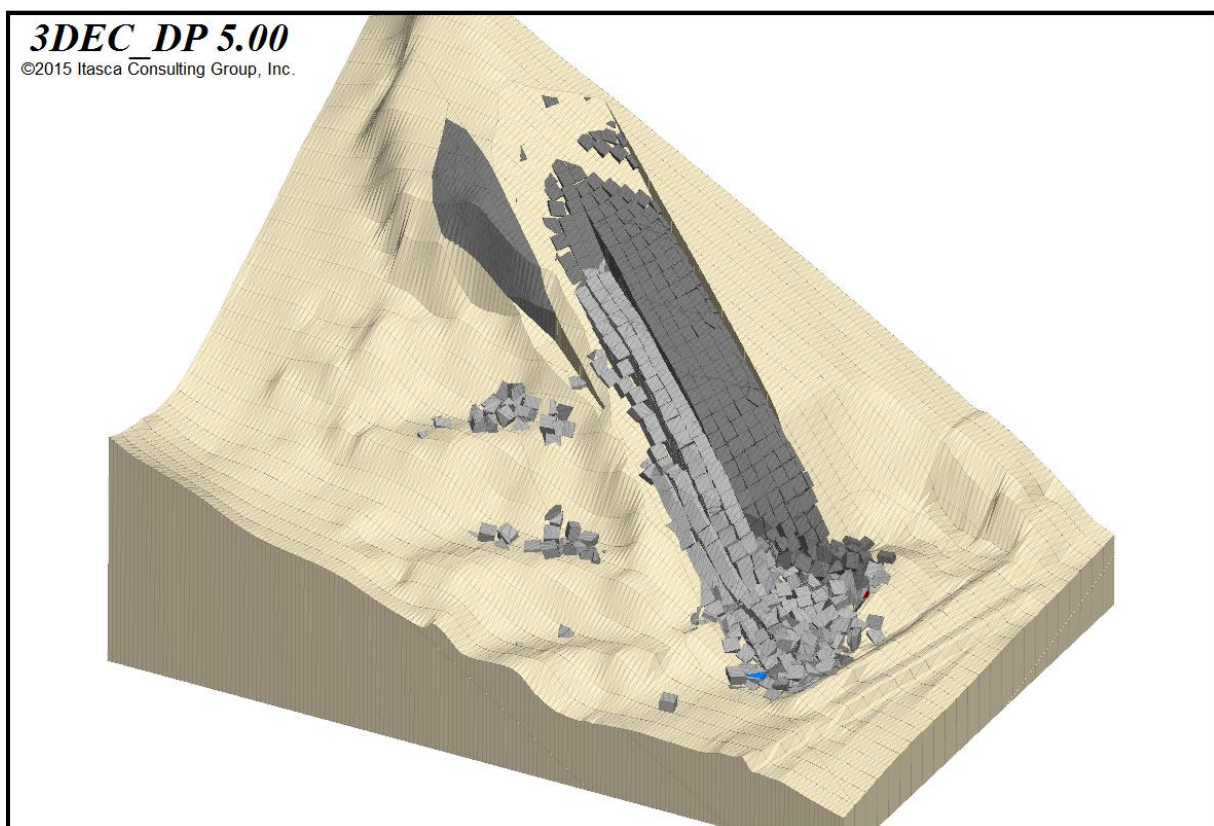


Abbildung 60: Ablöseszenario 2 - Version 2

In dieser Simulation erreichte kein Block des Ablöseszenarios 2 den Damm, der überwiegende Teil der abgeglittenen Massen blieb auf der Gleitfläche liegen. Die durch die Bewegung freigesetzte Energie reichte aber aus, um die Halde 2002 soweit zu verschieben, dass die

vordersten Blöcke der Halde 2002 gegen den Damm geschoben wurden. Abbildung 61 zeigt einen Vergleich der Grundrisse vor und nach dem Abgleiten des Ablöseszenarios. Als Ergänzung ist in Abbildung 62 der Blick entlang der Dammkrone nach Berechnung der Version 2 nochmals dargestellt (entspricht Abbildung 40). Der bei Version 6 berechnete Geschwindigkeitsverlauf (Abbildung 55) sowie der bereits diskutierte Geschwindigkeitsverlauf der Version 2 (Abbildung 57) zeigen, dass die Halde dabei kontinuierlich mit einer niedrigen Geschwindigkeit verschoben wurde.

Wie erkennbar haben die vordersten Blöcke des Ablöseszenarios 2 nur einen geringen Abstand zur Halde 2002. Dadurch konnten die Blöcke nur wenig Geschwindigkeit aufnehmen bis sie von der Halde abgebremst wurden. Während die vordersten Blöcke noch umgelagert wurden und einen Ausläufer in Richtung der nördlichen Grabenstruktur bildeten, blieb ein Großteil der Blöcke schichtförmig auf der Gleitfläche liegen. Die Blöcke der Halde 2002 bildeten in Kombination mit den vorderen Reihen des Ablöseszenarios eine derart solide Basis, dass der Bewegungsprozess schnell abgebremst wurde. Eine weitere Verschiebung und Verkeilung dieser Basis führte zu einem vollständigen Stillstand.

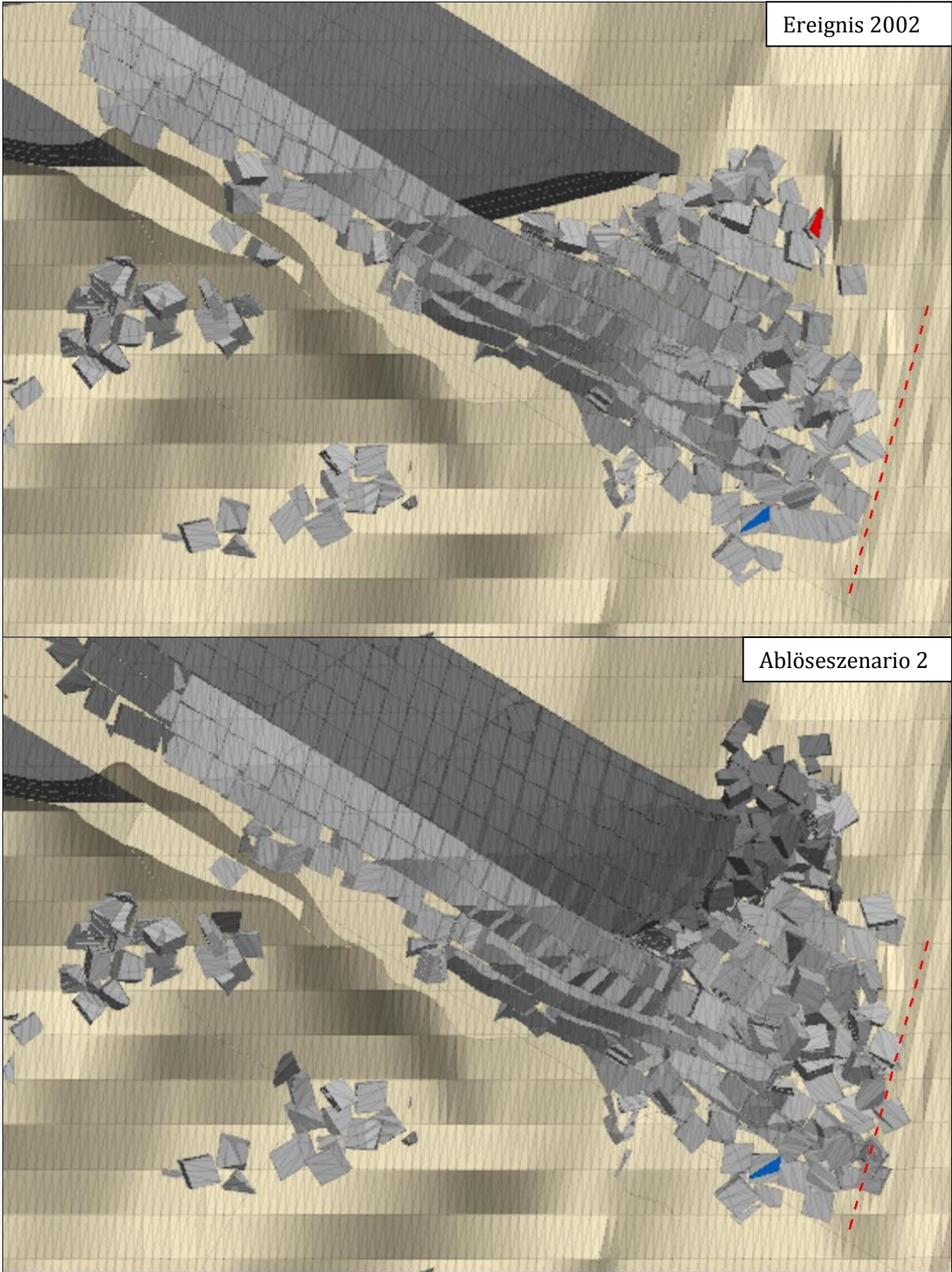


Abbildung 61: Vergleich der Grundrisse – Version 2, strichlierte rote Linie: Dammfuß

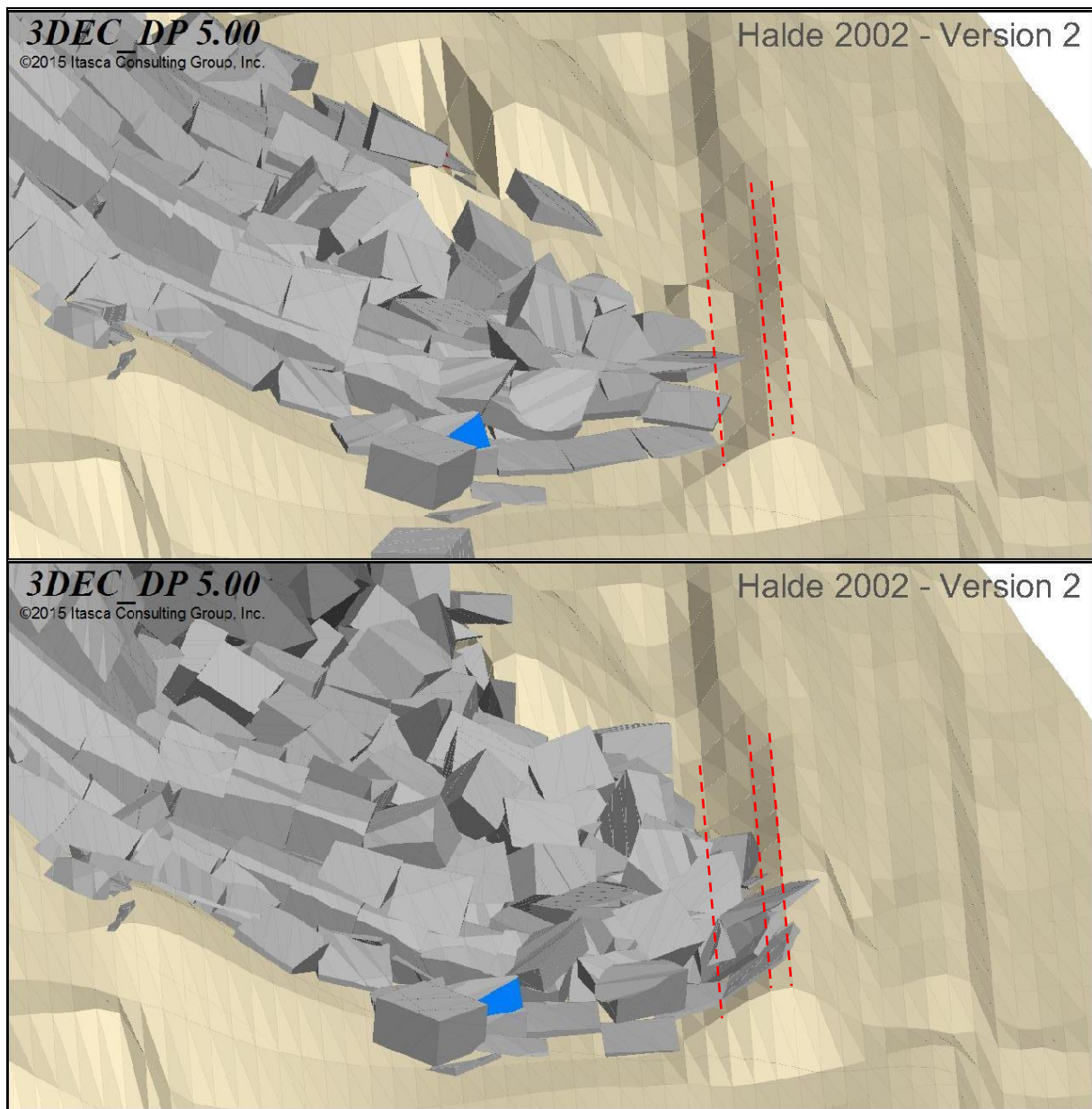


Abbildung 62: Blick entlang der Dammkronenlinie (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkronenlinie

Die Halbierung der Reibungs- und Dämpfungsparameter (Version 2.3) führte dazu, dass die Verschiebungen der Blöcke gegen den Damm deutlich schneller und weiter ausfielen, einige Blöcke überschritten dabei die Dammkronenlinie und kamen auf den Verkehrswegen zu liegen (Abbildung 63 und Abbildung 64). Im Vergleich zu Version 2 ist zudem ein wesentlich längerer Dammabschnitt betroffen (zu erkennen im unteren Grundriss in Abbildung 63).

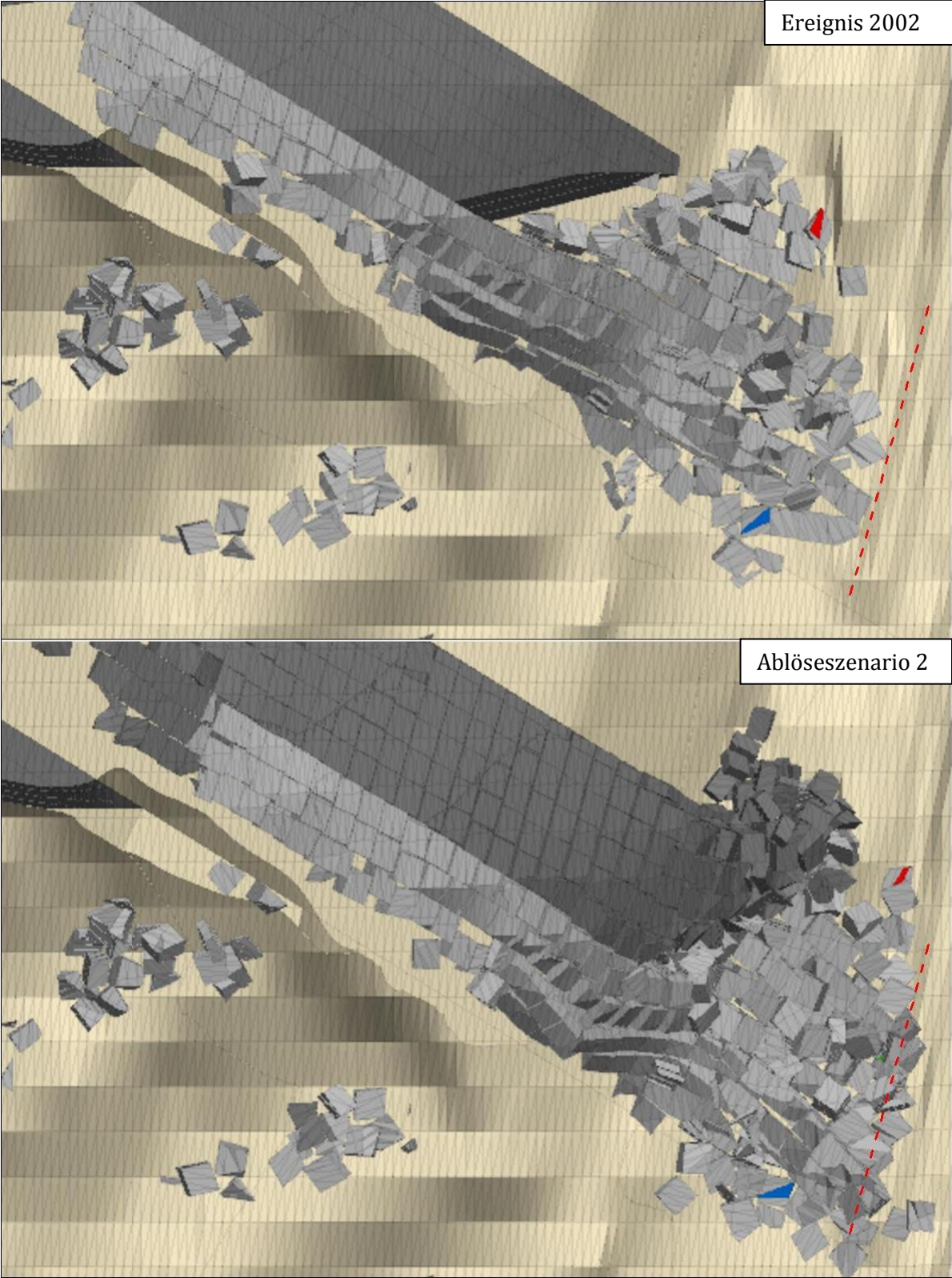


Abbildung 63: Vergleich der Grundrisse - Version 2.3, strichlierte rote Linie: Dammfuß

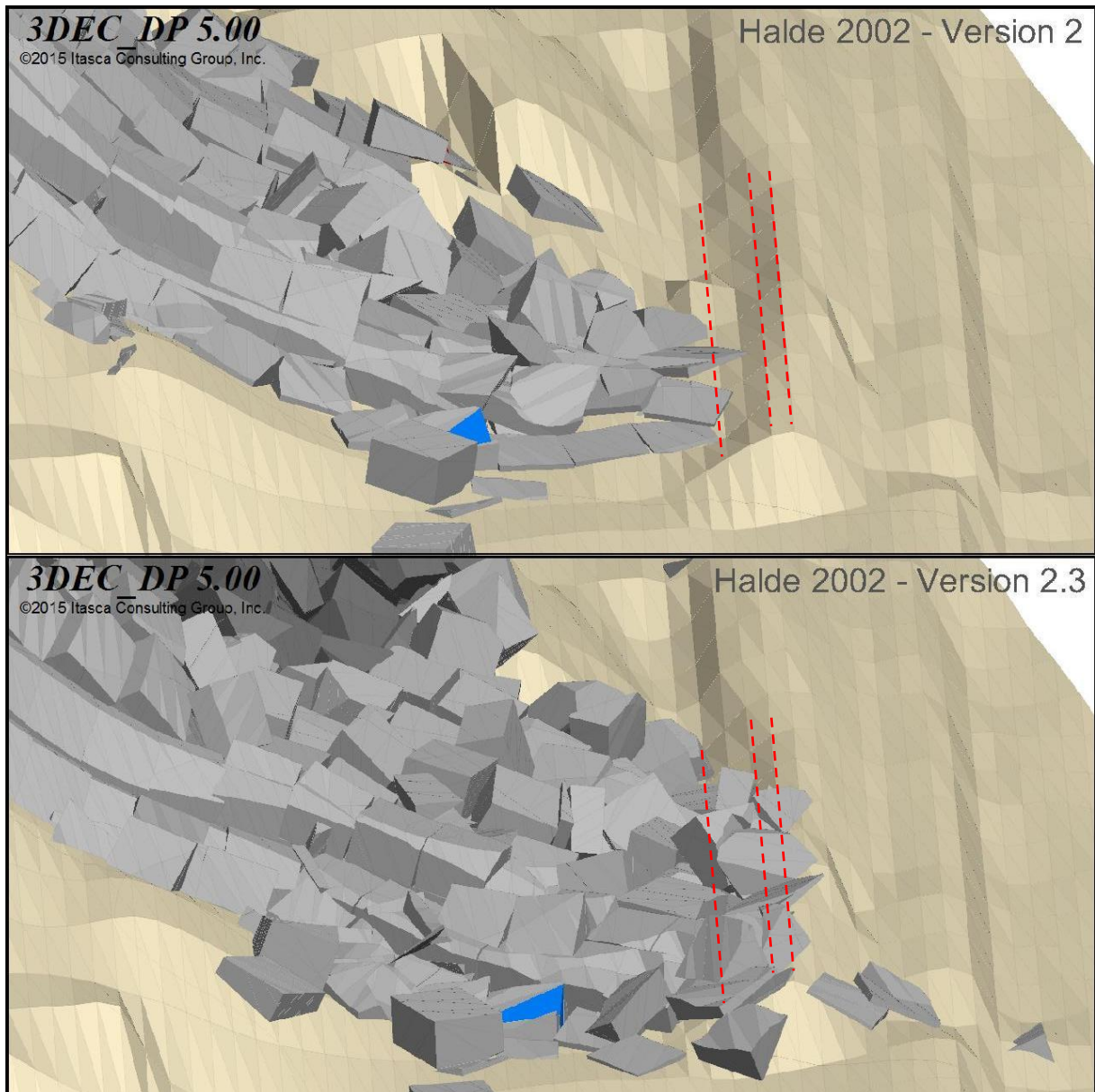


Abbildung 64: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2.3), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone

Das Geschwindigkeitsdiagramm des Blocks 1 der Berechnungsversion 2.3 (Abbildung 65) zeigt die durch die herabgesetzten Modellparameter schneller ablaufenden Verschiebungen. Während bei Version 2 die Geschwindigkeit nur selten über 1 m/s liegt (mit Ausnahme der kurzzeitigen Beschleunigung) erreicht Block 1 bei Version 2.3 wesentlich höhere Werte mit länger anhaltenden Spitzen von 4 bis 5 m/s. Nachdem diese Geschwindigkeiten auf sehr pessimistischen Annahmen beruhen, sind sie nur als Anhaltspunkt zu verstehen, inwiefern sich die Geschwindigkeiten bei wesentlich schlechteren Dämpfungs- und Reibungseigenschaften verändern bzw. wo obere Schranken für Geschwindigkeiten liegen können. Trotz der sehr

pessimistischen Annahmen kommt es jedenfalls nicht dazu, dass bedeutende Gesteinsmengen den Damm überqueren und sich eine Halde bis über die Straße ausbildet.

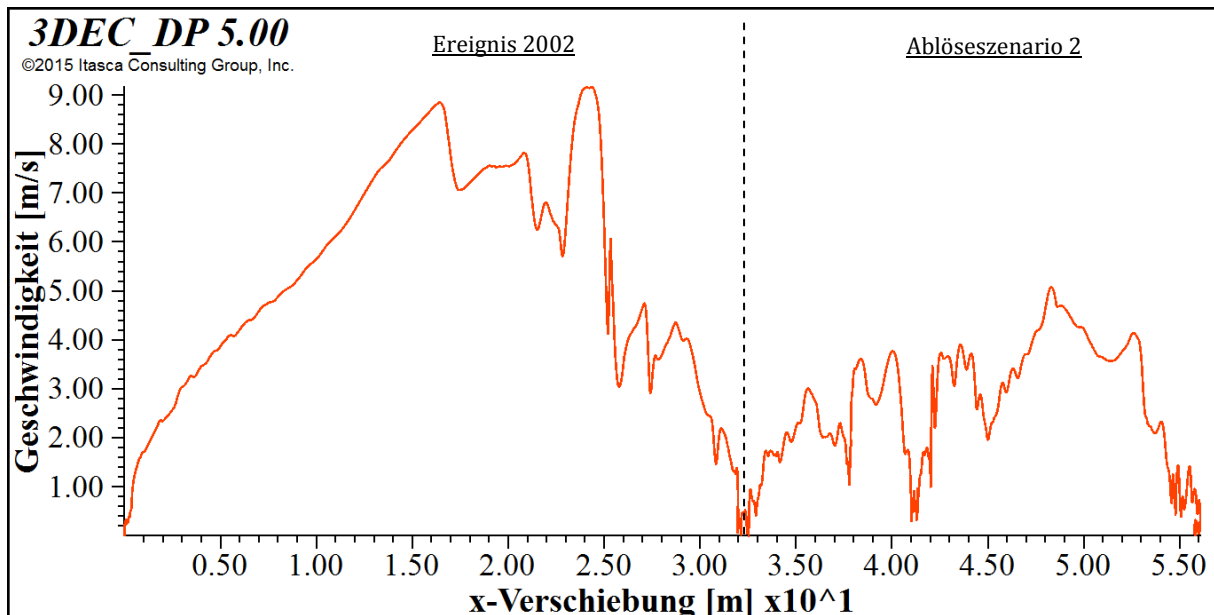


Abbildung 65: Version 2.3 - Geschwindigkeit Block 1

Wie gezeigt unterschieden sich die Berechnungsversionen des Ablöseszenarios 2 wesentlich bezüglich ihrer Reichweite und der Länge des Dammschnitts, der durch die Verschiebung der Halde 2002 in Kontakt mit den Blöcken kommt. Prinzipiell war jedoch bei allen Berechnungsversionen das gleiche Muster zu erkennen. Die vordersten Blockreihen des Ablöseszenarios 2 wurden nach einer kurzen Gleitphase von der Halde des Ereignisses 2002 abgelenkt, wodurch ein Teil der nördlichen Grabenstruktur aufgefüllt wurde. Die aus Halde 2002 und aufgefüllter Grabenstruktur bestehende Basis verschob und verkeilte sich soweit ineinander, bis sie in der Lage war einen Großteil der Kluftkörper abzufangen, bevor diese die Steinbruchbasis oder den Graben erreichten.

Durch die Verschiebung der Halde 2002 konnte auch bei Ablöseszenario 2 beobachtet werden, dass fallende Blöcke eine Kettenreaktion über die Etagen auslösen könnten. Eine größere Reichweite einzelner Blöcke kann somit auch im Fall des Ablöseszenarios 2 nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Das beobachtete Aufgleiten der Blöcke auf den Damm muss unter realen Bedingungen als Beschädigung des Damms im betroffenen Bereich interpretiert werden, da der Damm im Modell ein starres, unbewegliches Objekt darstellt, in der Realität jedoch vermutlich lokal versagen würde.

5.4 Schlussfolgerungen

- Die definierten Ablagerungsmerkmale konnten zufriedenstellend simuliert werden. Obwohl die gewählte Dämpfungseinstellung nicht zur Berechnung dynamischer Vorgänge empfohlen wird, kann sie unter bestimmten Voraussetzungen zu plausiblen Ergebnissen führen.
- Die Simulationen des Ablöseszenarios 1 ergaben durch die Bremswirkung der Etagen durchwegs geringe Reichweiten. Nur unter Annahme besonders ungünstiger Reibungs- und Dämpfungseigenschaften erzielten einzelne Blöcke größere Reichweiten. Die Beobachtung der beschriebenen Kettenreaktion entlang der Etagen zeigte, dass Ablöseszenario 1 indirekt zu größeren Reichweiten führen könnte. Ein weitläufiges Abgleiten der gesamten Gleitmasse, bzw. größerer Bereiche des Gleitkörpers, bis zur Steinbruchbasis scheint jedoch aufgrund der Beobachtungen unwahrscheinlich.
- Die Halde des Ereignisses 2002 war bei allen Simulationen in der Lage, wenn auch mit verschiedenen langen Bremswegen, die abgleitenden Blöcke des Ablöseszenarios 2 aufzufangen und abzubremsen. Die Auffüllung der Grabenstruktur leistet dabei ebenso einen Beitrag, der Graben bietet genug Raum zur Anhäufung einer soliden Basis. Ein Abgleiten der gesamten mobilisierten Gesteinspakete bis in die Steinbruchbasis scheint daher auch bei Ablöseszenario 2 aufgrund der in den Simulationen beobachteten Reaktionen unwahrscheinlich.
- Die bei Ablöseszenario 1 beobachteten Kettenreaktionen entlang der Etagen konnten durch die Beeinflussung der Halde auch bei Ablöseszenario 2 beobachtet werden. Größere Reichweiten einzelner Blöcke können somit auch bei Ablöseszenario 2 nicht ausgeschlossen werden.
- Je nach Modellparametern fiel der Einfluss auf den Schutzdamm unterschiedlich hoch aus. Da ein Kontakt aber bei allen Simulationen stattfand, kann davon ausgegangen werden, dass Teile des Damms bei Ablöseszenario 2 zu Schaden kommen. Die Halde wird dabei mit einer kontinuierlich langsamen Geschwindigkeit (maximal 5 m/s Spitzengeschwindigkeit unter den ungünstigsten Annahmen) gegen den Damm geschoben. Während der Damm im 3DEC Modell ein starres Hindernis darstellt, auf dem die Blöcke aufgleiten können, könnte es in der Realität zu schweren Beschädigungen des Damms kommen, was wiederum zu einer Beeinträchtigung der Verkehrswege führen könnte. Inwiefern der bestehende Damm den auftretenden Belastungen standhalten könnte bzw. die Bemessung eines Schutzdamms, war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Abschließend wird festgehalten, dass die berechneten Reichweiten beider Ablöseszenarien zwar sprechen dafür, dass große Teile der Ablöseszenarien durch die Gegebenheiten im Steinbruch

(Etagen, Grabenstrukturen, Halde 2002) abgefangen werden können bevor sie die Steinbruchbasis erreichen. Die beobachtete Kettenreaktion entlang der Etagen und vor allem die Verschiebung der Halde des Ereignisses 2002 durch das Ablöseszenario 2, mit der daraus resultierenden möglichen Beschädigung des Damms, erlauben jedoch nicht, eine Gefährdung der Verkehrswege auszuschließen.

6 Zusammenfassung

Im Steinbruch südlich der Ortschaft Spitz kam es in der Vergangenheit immer wieder zu Felsstürzen unterschiedlichen Ausmaßes. Das letzte große Ereignis fand am 11.10.2002 statt, wobei sich ein Felsvolumen zwischen 60.000 und 85.000 m³ löste und abglitt. Da entlang der Basis des Steinbruchs mehrere Verkehrswege (eine Eisenbahnlinie, ein Radweg, eine Bundesstraße) liegen, und Maßnahmen zur Verringerung der Gefahr mehrere Millionen Euro kosten würden, wurde beschlossen, die vom Steinbruch Spitz ausgehende Gefahr intensiv zu untersuchen. Ergebnisse der ersten Phase dieser Untersuchungen waren die Wiederkehrperioden von Ereignissen ähnlich jenem von 2002 sowie Größe und Lage zweier möglicher zukünftiger Ablöseszenarien. Ziel der vorliegenden Arbeit war, die Abgänge dieser Ablöseszenarien mithilfe des diskontinuumsmechanischen Berechnungsprogramms 3DEC zu simulieren und damit Grundlagen für die Beurteilung möglicher Schäden zu schaffen.

Die seit 1961 stattgefundenen Felsstürze lassen sich durch die geologischen Gegebenheiten, verbunden mit den Abbautätigkeiten in der Vergangenheit sowie mit außergewöhnlichen Wetterverhältnissen erklären. Das vorliegende Gestein ist ein grauer, grobkristalliner Marmor. Die Gesteinslagen fallen parallel zum Hang ein, wobei die massigen Marmorpakete durch zentimeter- bis meterdicke glimmerreiche Amphibolitlagen getrennt werden, die in der Vergangenheit die Gleitbahnen der Felsstürze bildeten. Unterschneidungen solcher Amphibolitlagen lassen auch heute noch große Bereiche des Steinbruchs als potentiell absturzgefährdet erscheinen.

Um Modellparameter für die realistische Simulation zukünftiger Szenarien zu finden, wurde zuerst das Ereignis des Jahres 2002 nachgebildet. Auf Basis der Dokumentationen des Ereignisses 2002 und anderer Informationen (z.B. Luftbilder) ließen sich mehrere Ablagerungsmerkmale der Halde von 2002 definieren, welche eine Simulation mittels 3DEC zeigen muss. Neben vertikaler Erstreckung, Quererstreckung und Ablagerungsform der Halde, war das wichtigste Merkmal die Reichweite des Ereignisses. Modellparameter, die diese Merkmale bei einer Simulation des Ereignisses 2002 erzeugen, sollten auch zu realistischen Ergebnissen für die beiden definierten Ablöseszenarien führen.

Während früherer Bearbeitungen und Dokumentationen des Ereignisses 2002 wurden digitale Geländemodelle erstellt, welche für diese Arbeit zur Verfügung standen. Diese erlaubten es, ein Geländemodell des Zustands vor dem Ereignis 2002 einschließlich des 2002 abgegangenen Gleitkörpers und der oben erwähnten zwei möglichen Ablöseszenarien zu erzeugen. Auf Grund der Zerlegung früherer Gleitmassen in quaderförmige Teilkörper wurde beschlossen, die Abgänge des Ereignisses 2002 und der möglichen Ablöseszenarien mittels 3DEC zu modellieren.

3DEC ist ein auf der Methode der Distinkten Elemente basierendes numerisches Berechnungsprogramm. Dabei können diskrete Körper und deren Kontakte mit ihrer Umgebung auch bei großen Verschiebungen modelliert werden. 3DEC löst dabei die die Translation und Rotation beschreibenden Bewegungsgleichungen unter Beachtung der Kontakte mit anderen Körpern für eine definierte Anzahl von Zeitschritten.

3DEC bietet nur wenige Möglichkeiten zur Modellerstellung des unbewegten Untergrunds und der Teilkörper, deren Bewegungen simuliert werden sollen. Um die digitalen Geländemodelle in das Berechnungsprogramm zu übertragen, wurden die vorliegenden Geländedaten dahingehend vereinfacht, dass die Oberfläche aus regelmäßig angeordneten Punkten bestand. Diese Anordnung kann verwendet werden, um aus Dreiecken einzelne Prismen zu erstellen, welche wiederum zu einem Gesamtmodell zusammengesetzt werden können. Vergleiche der geometrischen Modelle in AutoCAD und 3DEC zeigten, dass trotz der Vereinfachung durch diesen Vorgang alle wesentlichen Merkmale der Geometrie des Steinbruchs im 3DEC Modell abgebildet werden konnten. Das Modell wurde daher als ausreichend genau betrachtet.

3DEC bietet mehrere Dämpfungsmodelle, mit welchen im Rahmen einfacher Voruntersuchungen experimentiert wurde. Obwohl die lokale Dämpfung zwar auch die Beschleunigung von Körpern im freien Fall verringert, haben diese Voruntersuchungen gezeigt, dass die lokale Dämpfung aus mehreren Gründen (u.a. Rechenzeit) am besten geeignet ist, die Vorgänge im Steinbruch Spitz zu simulieren. Die Analyse des Ereignisses von 2002 hat gezeigt, dass Blöcke im freien Fall nur eine untergeordnete Rolle spielten.

Die Größe der lokalen Dämpfung sollte so gewählt werden, dass sie einerseits möglichst niedrig ist und andererseits in Kombination mit einem ebenfalls zu findenden Reibungswinkel in der Gleitfläche zu einem realistischen, gleichförmig beschleunigten Gleitvorgang führt.

Um dies zu gewährleisten, wurden zwei Kalibrierungsmodelle erstellt. Das erste wurde verwendet, um einen möglichst niedrigen lokalen Dämpfungsfaktor zu ermitteln. Das zweite Modell sollte, bei gegebener lokaler Dämpfung, zu einem Reibungswinkel führen, bei dem ein Einzelblock während eines Gleitvorgangs eine vorab bestimmte Geschwindigkeit erreicht. Das so ermittelte Wertepaar von lokalem Dämpfungsfaktor und Reibungswinkel in der Gleitfläche führte zu einem physikalisch plausiblen, gleichförmig beschleunigten Gleitvorgang und wurde somit als Ausgangswert für die Berechnungen in 3DEC definiert. Die restlichen für eine Berechnung notwendigen Modellparameter wurden anhand anderer Quellen oder beobachteter Modellreaktionen festgelegt.

Nach Bestimmung der Ausgangswerte für die 3DEC Simulationen wurden mehrere Berechnungsversionen des Ereignisses 2002 durchgeführt. Dabei wurden Eigenschaften wie Reibungswinkel, Kluftsteifigkeit und Blockgröße so lange variiert, bis die definierten

Ablagerungsmerkmale zufriedenstellend simuliert wurden. Ausgehend von den so ermittelten Modellparametern wurden die beiden Ablöseszenarien berechnet. Um den Einfluss der verschiedenen Modellparameter zu untersuchen, wurden in mehreren Versionen Parameter variiert. Für die verschiedenen Berechnungsversionen wurden jeweils die Endzustände der Blöcke, die Situation im Basisbereich des Steinbruchs sowie die Geschwindigkeitsverläufe einzelner Blöcke festgehalten.

Wie die Simulationen zeigten, konnte das Ereignis des Jahres 2002 mit ausreichender Genauigkeit nachgerechnet werden. Die Berechnungen der Ablöseszenarien ergaben, dass die Topographie des Steinbruchs in Kombination mit der Halde des Ereignisses 2002 in der Lage war, große Teile der Ablöseszenarien nicht bis zum entlang der Steinbruchbasis verlaufenden Damm vordringen zu lassen. Die freigesetzte Energie reichte jedoch aus, um vordere Bereiche der Halde von 2002 gegen den Damm zu schieben. Diese Verschiebung erfolgte mit einer weitestgehend konstanten langsamen Geschwindigkeit, wodurch eine Beschädigung des Damms möglich scheint. Eine Untersuchung der Standsicherheit des Damms auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist daher durchzuführen. Ein gegen den Schub der Gleitmassen sicherer Damm würde eine großflächige Gefährdung der dahinter verlaufenden Verkehrswege verhindern. Zudem wurden bei beiden Ablöseszenarien Vorgänge beobachtet, die zu einer höheren Reichweite einzelner Blöcke führen können.

7 Literaturverzeichnis

Autodesk Inc. (2015): AutoCAD 2016 - Studentenversion

Geologische Bundesanstalt (2013): Definitionen seitens der Fachabteilung Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt. Wien.

Grasemann, B. (2016): Strukturgeologische Geländeaufnahme und Beobachtungen im ehem. Steinbruch Spitz/Donau. Wien.

Gross, D., Hauger, W., Schröder, J., Wall, W. (2010): Technische Mechanik 3: Kinetik. Berlin

Hein-Stumpp, M. (2008): Vergleichende Standsicherheitsuntersuchungen von Kavernen in geklüftetem Fels mittels Blocktheorie und 3DEC. Diplomarbeit an der technischen Universität Wien.

Itasca Consulting Group Inc. (2013): 3DEC Version 5.0 - 3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide (for 3DEC Version 5.0). Minneapolis, USA.

Kalenchuk, K. (2010): Multi-Dimensional Analysis of Large, Complex Slope Instability. Ontario.

Körner, H. J. (1976): Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fließlawinen. Rock Mechanics 8. S. 225-256.

Mali, H. (2006): Geotechnische Beurteilung des Marmorsteinbruches Spitz a. d. Donau. Leoben.

Poisel, R. (2016): Bericht über Untersuchungen der vom ehemaligen Tagbau Fehring in Spitz an der Donau ausgehenden Gefahr durch Felsstürze an die Niederösterreichische Umweltschutzbehörde.

Poisel, R., Kolenprat, B., Bertagnoli, M., Ahmadabadi, M., Grasemann, B., Hödlmoser, N. (2016): Die Felssturzgefahr im ehemaligen Tagebau Spitz a. d. Donau und dessen Vorland. Geomechanics and Tunneling 9. S.497-507.

Schwenk, H. (Mai 1992): Massenbewegungen in Niederösterreich 1953-1990. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt. Band 135. Heft 2. S. 609-619.

Wagner, H. (2006): Sanierungskonzept für den Steinbruch Fehring in Spitz an der Donau. Leoben.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansicht des Steinbruchs vom östlichen Donauufer (Foto: Rainer Poisel)	1
Abbildung 2: Abmessungen des Steinbruchs (Fotounterlage: NÖ-Luftbildatlas 2014)	2
Abbildung 3: Profilschnitt durch die Sturzhalde von 1961 (Schwenk, 1992)	4
Abbildung 4: Ansicht des Steinbruchs nach dem Ereignis 1961 (Schwenk, 1992)	5
Abbildung 5: Ereignis 1984 - Blick nach oben (Poisel, 2016)	6
Abbildung 6: Ereignis 1984 - Blick nach unten (Poisel, 2016)	6
Abbildung 7: Ereignis 2002 - Blick nach unten (Poisel, 2016)	7
Abbildung 8: Strukturgeologische Gebiete (Grasemann, 2016)	9
Abbildung 9: Verfallung im Gebiet 1 (Grasemann, 2016)	10
Abbildung 10: Strukturplots der Gebiete 1 (links) und 2 (rechts) (Grasemann, 2016)	11
Abbildung 11: Extrapolation der Gleitfläche 2002 (Digitales Geländemodell: Wagner, 2006)	12
Abbildung 12: Oberer Bereich des Steinbruchs (Foto: Rainer Poisel)	13
Abbildung 13: Modellbereiche (Fotounterlage: NÖ Atlas 2014)	15
Abbildung 14: Gleitkörper 2002	16
Abbildung 15: Profilschnitt der Halden 1984 und 2002 (Poisel, 2016)	17
Abbildung 16: Abmessungen der Halde 2002 (Fotounterlage: NÖ Atlas 2014)	18
Abbildung 17: Strukturen der Ereignisse 1984 und 2002 (Poisel, 2016)	19
Abbildung 18: Ansicht der Halde von 1984 und hervorgehobener Gleitkörper von 2002 (Poisel et al., 2016)	20
Abbildung 19: Schnitt durch den südlichen Basisbereich	21
Abbildung 20: Ablöseszenario 'Ereignis 1' (Poisel, 2016)	23
Abbildung 21: Ablöseszenario 'Ereignis 2' (Poisel, 2016)	24
Abbildung 22: Schematischer Berechnungsablauf (Itasca Consulting Group Inc., 2013)	28
Abbildung 23: Modellbereich in 3DEC (Fotounterlage: NÖ Luftbildatlas 2014)	30
Abbildung 24: Modellerstellung (schematisch)	31
Abbildung 25: Geländeoberfläche in AutoCAD	31
Abbildung 26: Geländeoberfläche in 3DEC	32
Abbildung 27: Modellvergleiche, Ansichten; Digitales Geländemodell (Wagner, 2006) links, 3DEC Modell rechts	35
Abbildung 28: Modellvergleiche, Grundrisse; Digitales Geländemodell (Wagner, 2006) links, 3DEC Modell rechts	35
Abbildung 29: Modell zur Kalibrierung der Dämpfung	38
Abbildung 30: Verlauf der Rückprallhöhe	39
Abbildung 31: Heimsches Schlittenmodell	42

Abbildung 32: Modell zur Kalibrierung der Reibung.....	44
Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Wegstrecke in x-Richtung.....	45
Abbildung 34: Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit der Zeit.....	45
Abbildung 35: Ausgangszustand der Modellgeometrie mit charakteristischen Merkmalen.....	48
Abbildung 36: Markierte Blöcke 1-3.....	49
Abbildung 37: Version 1.....	52
Abbildung 38: Gleichzeitiges Abgleiten der Blöcke.....	53
Abbildung 39: Version 2 - Endzustände.....	55
Abbildung 40: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone.....	56
Abbildung 41: Version 2 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der x-Verschiebungen.....	57
Abbildung 42: Version 2 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeitschritte.....	58
Abbildung 43: Version 2.1 - Endzustände.....	59
Abbildung 44: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2.1), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone.....	60
Abbildung 45: Version 2.1 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der x-Verschiebungen.....	61
Abbildung 46: Version 2.1 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeitschritte.....	62
Abbildung 47: Version 2.2 - Endzustand.....	62
Abbildung 48: Version 2.3 - Endzustände.....	64
Abbildung 49: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2.3), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone.....	65
Abbildung 50: Version 2.3 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der x-Verschiebungen.....	66
Abbildung 51: Version 2.3 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeitschritte.....	67
Abbildung 52: Version 3 - Endzustand.....	67
Abbildung 53: Version 4 - Endzustand.....	68
Abbildung 54: Version 5 - Endzustand.....	68
Abbildung 55: Version 6 - Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Zeit.....	69
Abbildung 56: Ereignis 2002 - Version 2, strichlierte rote Linie: Dammfuß.....	70
Abbildung 57: Version 2 - Geschwindigkeit Block 1.....	72
Abbildung 58: Detailansicht Ablöseszenario 1 - Version 2.....	74
Abbildung 59: Detailansicht Ablöseszenario 1 - Version 2.3.....	75
Abbildung 60: Ablöseszenario 2 - Version 2.....	76
Abbildung 61: Vergleich der Grundrisse – Version 2, strichlierte rote Linie: Dammfuß.....	78
Abbildung 62: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone.....	79
Abbildung 63: Vergleich der Grundrisse - Version 2.3, strichlierte rote Linie: Dammfuß.....	80

Abbildung 64: Blick entlang der Dammkrone (NNO) vor und nach Ablöseszenario 2 (Version 2.3), strichlierte rote Linien: Dammfuß und Dammkrone.....	81
Abbildung 65: Version 2.3 - Geschwindigkeit Block 1.....	82