



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Kontinuumsmechanische Analyse von schnellen
Massenbewegungen in zwei und drei Dimensionen mit Hilfe des
DAN Codes**

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

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel

E220 Institut für Ingenieurgeologie

und

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh

E220 Institut für Ingenieurgeologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Brack Fernand BSc

0427795

An der Gaass 12
9150 Eschdorf, Luxemburg

Wien, im März 2012

Danksagung

Ich möchte mich bei Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh bedanken, der sich stets Zeit nahm um über Probleme und deren Lösung zu diskutieren. Des Weiteren möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Poisel bedanken, der die Arbeit überwachte und wertvolle Anregungen lieferte.

Ein spezieller Dank geht an Martin, mit dem ich viele Prüfungen und Übungen zusammen bestritten habe und der meine Diplomarbeit korrekturgelesen hat.

Einen sehr großen Dank geht auch an meine Freundin Céline. Sie stand mir in allen Höhen und Tiefen meines Studiums zur Seite und hat mir vor wichtigen Prüfungen den Rücken freigehalten.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, durch deren moralische und finanzielle Unterstützung mein Studium erst ermöglicht wurde.

Abstract

Mass falls are a constant threat in concerned areas. Better calculation programs are developed to estimate mass falls before they happen and to be able to take preventive measures and to expel safety zones in order to save lives and prevent damage. With the two continuum mechanical programs DAN-2D and DAN-3D, which were specifically developed to calculate fast mass falls, five case studies with different properties are calculated. The aim of this work is to visualize the results of these calculations and to compare and control the accuracy of the calculated runout. The results of the programs are based on the same assumptions, as well as the calculation parameters, flow resistance and pressure. These parameters are discussed in the theoretical part of this work. With a sensitivity analysis of a first case study, it is possible to draw conclusions about the influence of different rheological parameters and on the calculation results of both programs DAN-2D and DAN-3D. The runout length and the maximum velocity of four further case studies are calculated and compared in both programs. In two of the investigated case studies, the width of the outflow has been changed for the 2,5D calculation in the DAN-2D program. Thus, the influence of an over- or underestimated outflow width on the runout length was determined. Afterwards the possible variation of the block orientation was examined with the results of DAN-2D.

The visualization provides an accurate chart of the results, which allows to make a statement about the accuracy of both calculation programs. The programs calculate the same runout length for each case study, except for a negligible difference. This agreement results from the fact that all calculations are based on the same data and the same geomechanical basics as well. Due to the results of the studies, we can say that the program DAN-2D is suitable for additional examinations of well documented events that already happened. DAN-2D can also be used for a brief determination of the rheological parameters used to make a precisely DAN-3D calculation of the mass fall. DAN-3D calculates the way and the width of the runout using digital terrain models. Forecasts about the endangered area and the dimensions of the mass fall can be made on these results.

Kurzfassung

Massenstürze stellen in betroffenen Gebieten eine ständige Bedrohung dar. Um die Massenstürze besser abschätzen zu können, um vorbeugende Maßnahmen ergreifen zu können und Sicherheitszonen ausweisen zu können, wird versucht, mittels immer präziserer Berechnungsprogramme Abschätzungen über den Verlauf von Massenstürzen zu treffen. Mit den beiden speziell zur Berechnung schneller Massenstürze entwickelten kontinuumsmechanischen Programmen DAN-2D und DAN-3D wurden verschiedene Fallbeispiele mit unterschiedlichen Eigenschaften durchgerechnet. Ziel der Arbeit war es, die Ergebnisse dieser Berechnungen zu visualisieren und die Genauigkeit der errechneten Auslauflängen zu vergleichen. Um die Ergebnisse besser verstehen zu können, wurden zuerst die kontinuumsmechanischen Annahmen sowie die wichtigsten Berechnungsparameter erläutert. Mit Hilfe der Sensibilitätsanalyse können Aussagen über die unterschiedlichen Rheologieparameter getroffen, sowie ihr Einfluss auf die Berechnungsergebnisse der Programme DAN-2D und DAN-3D untersucht werden. Die Auslauflängen und die Abflussgeschwindigkeiten weiterer vier Fallbeispiele wurden in beiden Programmen berechnet und miteinander verglichen. In zwei der untersuchten Fallbeispiele wurde die Abflussbreite bei der in DAN-2D durchgeführten 2,5D Berechnung variiert. So wurde der bei einer Über- oder Unterschätzung auftretende Einfluss der Abflussbreite auf die Auslauflänge ermittelt. Anschließend wurde in DAN-2D untersucht, welchen Einfluss die unterschiedliche Blockorientierung auf die Berechnungsergebnisse hat.

Mittels beider Programme wurden die Reichweiten der Massenstürze in jedem Fallbeispiel berechnet. Abgesehen von einer vernachlässigbaren Differenz lieferten beide Programme das gleiche Ergebnis. Diese Übereinstimmung ergibt sich dadurch, dass alle Ergebnisse auf den gleichen Ausgangsdaten und denselben physikalisch-mechanischen Grundlagen basieren. Auf Grund der Ergebnisse der Untersuchungen wurde festgestellt, dass DAN-2D sich zur nachträglichen Untersuchung stattgefundenen, gut dokumentierter Ereignisse eignet. Zusätzlich können die in DAN-3D zur Berechnung eines Massensturzes verwendeten Rheologieparameter mit Hilfe einer schnellen DAN-2D Berechnung ermittelt werden. Mittels DAN-3D können anschließend der Weg und die Breite der Massenstürze anhand von Geländemodellen (DHM) berechnet werden. So lassen sich Prognosen über das Ausmaß von Massesstürzen und das von ihnen gefährdete Gebiet treffen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Kurzfassung	II
1) Einleitung	1
2) Schnelle Massenbewegungen	2
2.1) Klassifizierungen (O. Lateltin, 1997).....	3
2.1.1) <i>Versagensmechanismen</i>	4
2.1.2) <i>Sturzprozesse</i>	7
2.2) Beschreibung der Reichweite.....	9
2.2.1) <i>Geometrisches Gefälle</i>	9
2.2.2) <i>Schwerpunktgefälle</i>	10
2.2.3) <i>Fahrböschung</i>	10
3) Berechnungsansätze	11
3.1) Empirische Methoden	11
3.2) Analytische Methoden (Pirulli, 2005).....	12
3.3) Numerische Methoden	14
3.3.1) <i>DAN (Hungr, 1995)</i>	15
3.4) Numerisches Modell (Hungr, 1995).....	16
3.4.1) <i>Der Strömungswiderstand, T</i>	18
3.4.2) <i>Der Druck, P</i>	18
4) Modellaufbau	19
4.1) DAN-2D	19
4.2) DAN-3D	25
5) Untersuchte Fallbeispiele	27
<i>Fallbeispiel A: Kanal (vgl. Pichler, 2011)</i>	28
<i>Fallbeispiel B: Punta Thurwieser (vgl. R. Poisel/A. Preh/ O. Hungr, 2008)</i>	30
<i>Fallbeispiel C: Frank Slide (vgl. R. Poisel/A. Preh/ O. Hungr, 2008)</i>	33
<i>Fallbeispiel D: Seefeldbach (vgl. Pichler, 2011)</i>	36
<i>Fallbeispiel E: Tates Cairn (J. Cepeda, 2007)</i>	39

6) Vergleichsrechnungen	41
6.1) Fallbeispiel A	41
6.1.1) <i>Verwendete Parameter</i>	41
6.1.2) <i>Ergebnisse</i>	44
6.2) Fallbeispiel B:	51
6.2.1) <i>Verwendete Parameter</i>	51
6.2.2) <i>Ergebnisse</i>	53
6.3) Fallbeispiel C:	55
6.3.1) <i>Verwendete Parameter</i>	55
6.3.2) <i>Ergebnisse</i>	57
6.4) Fallbeispiel D:	59
6.4.1) <i>Verwendete Parameter</i>	59
6.4.2) <i>Ergebnisse</i>	61
6.5) Fallbeispiel E:.....	63
6.5.1) <i>Verwendete Parameter</i>	63
6.5.2) <i>Ergebnisse</i>	64
7) Gegenüberstellung der Ergebnisse	67
7.1) Vergleich der Auslauflängen.....	67
7.2) Vergleich der maximalen Geschwindigkeit	68
7.3) Einfluss der Breite	69
7.4) Einfluss der Blockorientierung.....	70
8) Interpretation und Schlussfolgerung	73
9) Zusammenfassung.....	74
Literaturverzeichnis.....	77
Internetverzeichnis.....	79
Abbildungsverzeichnis	80
Tabellenverzeichnis	83

1) Einleitung

Massenstürze (Fels- und Bergstürze) treten regelmäßig auf und stellen eine ständige Bedrohung für Mensch und Umwelt in alpinen Gebieten dar. In der Vergangenheit kam es immer wieder zu Massenstürzen, bei denen Menschen getötet oder Gebäude zerstört wurden. Das enorme Gefahrenpotential liegt in der Unvorhersehbarkeit solcher Ereignisse. Um potentielle Gefahrenzonen besser abgrenzen zu können, wird immer hochwertigere Software entwickelt, mit deren Hilfe die Berechnung dieser Massenstürze möglich ist. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Programme DAN-2D und 3D können Massenstürze mittels Geländemodellen und geologischen Parametern annähernd genau erfassen und ihre Reichweite bestimmen. Die ermittelten Daten werden als Grundlage für das Errichten von Sicherheitszonen und -maßnahmen, sowie Evakuierungspläne für den Ernstfall herangezogen. Um Menschenleben retten und Infrastrukturen bewahren zu können, ist eine stetige Weiterentwicklung von Programmen zur Berechnung von Massenstürzen sehr wichtig.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, die Programme DAN 2D und 3D hinsichtlich ihrer Berechnungsgenauigkeit zu untersuchen und zu vergleichen. Hauptgegenstand der Untersuchung ist die Berechnungsgenauigkeit der Auslauflängen, anhand stattgefundenener und genau dokumentierter Massenstürze. Da beide Programme auf den gleichen numerischen Modellen basieren, sollten die 2D und 3D Berechnung annähernd die gleichen Ergebnisse liefern. Der wichtigste Vergleichsparameter ist die, durch die beiden Programme prognostizierte Reichweite des Massensturzes.

2) Schnelle Massenbewegungen

In der geotechnischen Fachliteratur wird der Begriff Massenbewegungen unterschiedlich definiert. Laut Lateltin (1997) handelt es sich bei Massenbewegungen um eine bruchhafte oder bruchlose, unter der Wirkung der Schwerkraft hangabwärts gleitende Verlagerung von Fest- (Fels) und/oder Lockergesteinen (inklusive Bodenmaterial und Wasser). Die Bewegungen können schnell und plötzlich (Stein- und Blockschlag, Fels- und Bergsturz, spontane Rutschungen, Hangmuren und Einsturzphänomene) oder langsam (Hangkriechen, kontinuierliche Rutschungen) erfolgen.

Die Entstehung von Massenbewegungen ist sehr komplex und beruht selten auf nur einer Ursache. Geologische Verhältnisse, Relief und Exposition sind grundlegende Parameter, welche die Grunddisposition zur Hanginstabilität bestimmen (Lateltin, 1997). Vor allem die Eiszeiten haben einen hohen Einfluss auf die heute stattfindenden Massenbewegungen. Die Alpentäler wurden durch verschiedene Gletschervorstöße trogförmig ausgeschliffen und nach dem Zurückschmelzen des stützenden Eises blieben meist übersteilte und instabile Talflanken zurück.

Bei einer Massenbewegung werden Fest- und Lockergesteinsmassen gravitativ aus einer labilen in eine stabile Position umgelagert. Eine labile Lagerung tritt ein, wenn die Beanspruchungen die Festigkeiten überschreiten und sich kein Kräftegleichgewicht mehr einstellen kann. Dies kann beispielsweise durch langfristig wirksame Verwitterungsprozesse (Verminderung der Festigkeit), durch Strömungsdruck oder erhöhte Auflast (Erhöhung der Beanspruchung) geschehen. Eine Massenbewegung dauert so lange an, bis die Beanspruchung wieder kleiner als die Festigkeit ist und die Masse eine stabile Lage einnimmt (K. Mair am Tinkhof, 2007).

2.1) Klassifizierungen (O. Lateltin, 1997)

Basierend auf Kriterien wie Bewegungsmechanismen, Materialzusammensetzung, Geschwindigkeit der Prozesse oder Auslösemechanismen bestehen zahlreiche Modelle zur Klassifizierung von Massenbewegungen.

Zur Übersicht und zur Vermeidung von Verwechslungen können die wichtigsten Grundtypen der Massenbewegungen gemäß dem „Multilingual Landslide Glossary“ (WP/WLI, 1997) wie folgt charakterisiert werden:

- - **Fallen (Sturzprozess):** Ablösen von Fest- und/oder Lockergestein in einem steilen Hang entlang einer Fläche, auf welcher nur geringe oder keine Scherbewegungen stattfinden. Das Material stürzt größtenteils frei fallend, springend und/oder rollend ab.
- - **Gleiten (Rutschprozess):** Hangabwärts gerichtete Bewegung von Fest- und/oder Lockergestein entlang von Gleitflächen oder entlang von verhältnismäßig dünnen Zonen intensiver Scherverformung.
- - **Fließen (Fließprozesse):** Räumliche, kontinuierliche Bewegung, bei der Scherflächen nur kurzzeitig ausgebildet, dicht angeordnet und gewöhnlich nicht erhalten sind. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht der einer viskosen Flüssigkeit.

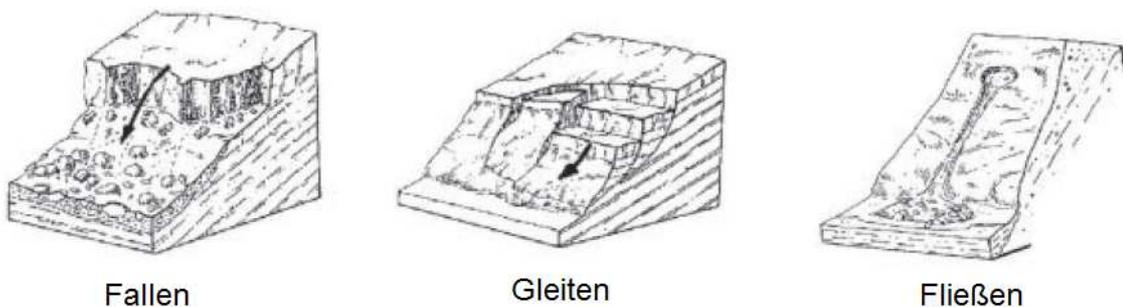


Abb. 1: Grundtypen von Massenbewegungen gemäß dem Multilingual Landslide Glossary (Lateltin, 1997)

Da sich mit dieser Einteilung nicht alle Einzelheiten einer Massenbewegung beschreiben lassen, werden die oben angeführten Bewegungstypen noch weiter unterteilt, worauf in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird. Die oben genannten Klassifizierungen lassen jedoch keine Aussagen über das eigentliche mechanische Verhalten zu.

2.1.1) Versagensmechanismen

Bei der Auslösung eines Sturzprozesses können verschiedene Versagensmechanismen der Felsböschung unterschieden werden.

Massenstürze die in einem kleineren Maßstab ablaufen werden meistens durch die folgenden, in Abbildung 2-3 dargestellten, Versagensmechanismen ausgelöst:

- a) Fallen von Kluftkörpern
- b) Gleiten eines Kluftkörpers auf einer oder zwei Trennflächen
- g) Rotation einzelner Kluftkörper
- h) Knicken von Säulen- bzw. tafelförmigen Kluftkörpern

Bei Massenstürzen in einem größeren Maßstab befinden sich meist Felsblöcke in einer aufgelockerten Massenbewegung und lösen so an ihrem vorderen Ende Massenstürze aus. Solche Massenstürze werden durch die folgenden, in Abbildung 2-3, dargestellten Versagensmechanismen ausgelöst:

- c) Gleiten mehrerer Teilkörper auf einer polygonalen Gleitfläche
- d) Rückwärtsrotation von Kluftkörpern
- e) Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen, neugebildeten Gleitfläche
- f) Abfahren, Abgleiten oder Kippen turmartiger bzw. plattenförmiger Kluftkörper am Rand eines kompetenten Felskörpers auf einem inkompetenten Sockel
- k) Hangkriechen
- g) Knickbandsackung

Diese Versagensmechanismen werden größtenteils durch Reduktion der Festigkeit (z.B. durch Verwitterung), Rotation der Felsmasse, Temperaturveränderungen, Wasser- und Eisdruck oder durch Vibrationen (z.B. Erdbeben) ausgelöst.

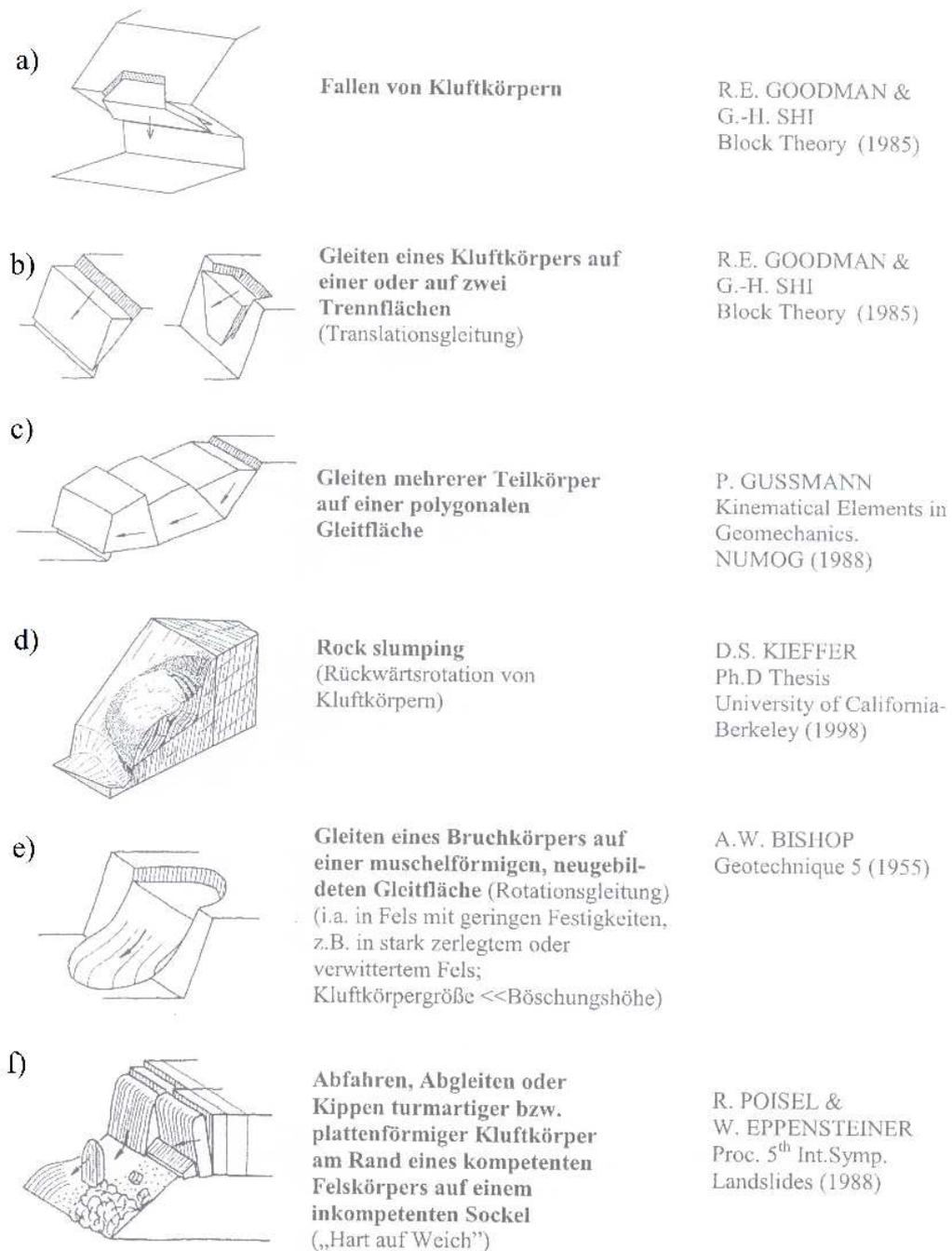


Abb. 2: Versagensmechanismen von Talflanken und Felsböschungen und deren mechanische Modelle, Teil 1
(Poisel & Preh, 2004)

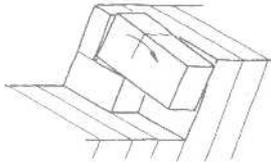
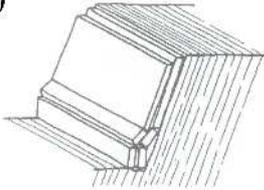
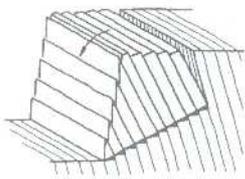
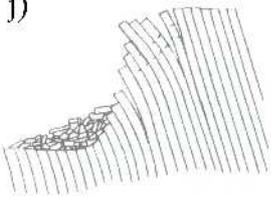
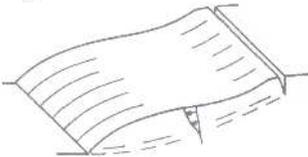
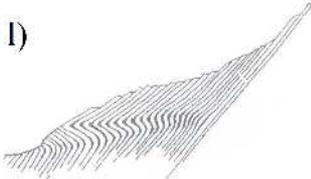
- g)  **Rotation einzelner Kluffkörper (Torsionsbruch)**
(z.B. Rotation eines Kluffkörpers auf einer Trennfläche zufolge außermittiger bzw. teilweiser nachgebender Auflagerung)
- h)  **Knicken von säulen- bzw. tafelförmigen Kluffkörpern**
(Säulen- bzw. Plattendicke \ll Böschungshöhe)
- i)  **Kippen von säulen- bzw. tafelförmigen Kluffkörpern**
(Vorwärtsrotation; ähnlich wie Dominosteine; tritt i.a. bei niedriger Trennflächen- und hoher Gesteinsfestigkeit auf)
- j)  **Biegekippen**
- k)  **Hangkriechen (früher: Sacken)**
Mit zunehmender Tiefe kontinuierlich abnehmendes Hangabwärtskriechen von Fels (i.a. in Fels mit geringer Festigkeit, z.B. in Phyllit)
- l)  **Kink band slumping, Knickbandsackung**
- W. WITTKE
Rock Mechanics.
Springer (1990)
- D. S. CAVERS
Rock Mechanics 14
(1981)
- R.E GOODMAN &
J.W. BRAY
Proc. Conf. Rock Eng.
for Foundations
and Slopes (1976)
- M. HITTINGER &
R.E GOODMAN
Report, University of
California, Berkeley
(1978)
- O.C. ZIENKIEWICZ,
C. HUMPHESON &
R.W. LEWIS
Geotechnique 25 (1975)
- A. PREH
Dissertation an der
TU Wien (2004)

Abb. 3: Versagensmechanismen von Talflanken und Felsböschungen und deren mechanische Modelle, Teil 2
(Poisel & Preh, 2004)

2.1.2) Sturzprozesse

Sturzprozesse sind schnelle Massenbewegungen, bei denen das Abbruchmaterial den größten Teil des Weges in der Luft zurücklegt (Lateltin, 1997). Sie können generell in die drei in Abbildung 4 dargestellten Teilbereiche unterteilt werden:

- 1) Abbruchgebiet
- 2) Sturzbahn
- 3) Ablagerungsgebiet.

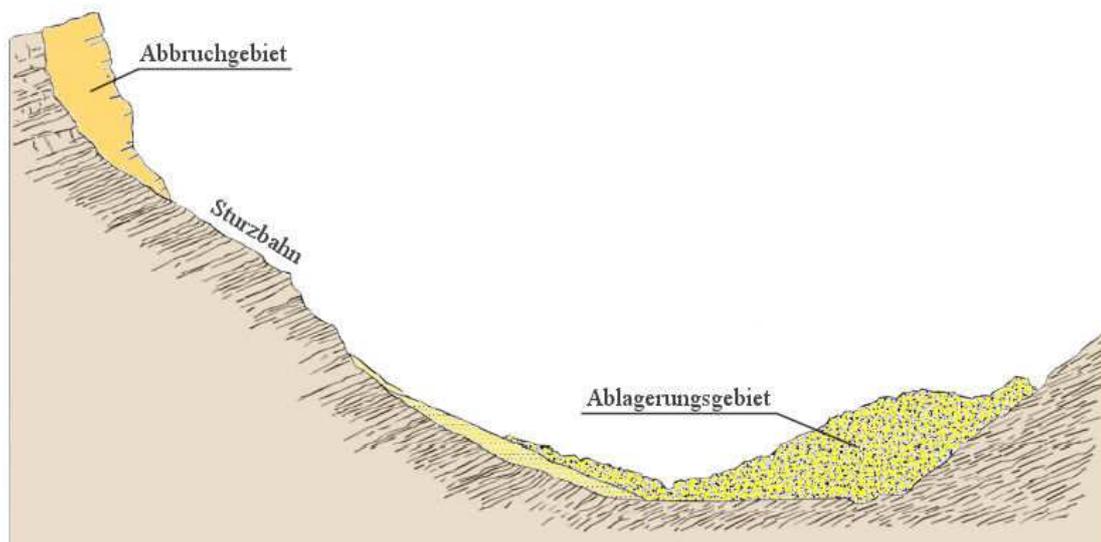


Abb. 4: Teilbereiche eines Sturzprozesses (nach Heim, 1932)

Die Sturzprozesse werden je nach Bewegungsmechanismus und Sturzvolumen in unterschiedliche Kategorien unterteilt. Die in dieser Arbeit untersuchten Kategorien werden in folgenden Kapiteln näher erläutert und deren Abgrenzungen definiert.

2.1.2.1) Felssturz

Ein Felssturz ist der Sturz einer Felsmasse, die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine fraktioniert wird. Die Interaktion zwischen den Komponenten hat keinen maßgebenden Einfluss auf die Dynamik des Prozesses. Der Verlagerungsmechanismus ist ähnlich dem Sturz von isolierten Steinen oder Blöcken. Ablagerungsbereiche sind im allgemeinen Schuttkegel mit flächenmäßig geringer Ausdehnung. Größere Gesamtvolumina sammeln sich dann an, wenn Felsstürze an derselben Stelle wiederholt stattfinden (Kienholz, Zeilstra & Hollenstein, 1993).

Für Felsstürze liegt das Materialvolumen im Allgemeinen zwischen 100 bis 100.000 m³ und es wird eine Verlagerungsgeschwindigkeit zwischen 10 und 40 m/s angenommen.

2.1.2.2) Bergsturz

Als Bergsturz wird der Absturz sehr großer, im ursprünglichen Felsverband mehr oder weniger kohärenter Felsmassen unter Erreichung hoher Geschwindigkeiten bezeichnet. Im Initialstadium ist die Bewegung oft eine Felsrutschung. Der Verlagerungsmechanismus ist gekennzeichnet durch eine starke Wechselwirkung zwischen den Komponenten (Sturzstrom). Dadurch kann das Material bis zu feinstem Gesteinsmehl zerrieben oder gar aufgeschmolzen werden. Die Verlagerungsdistanzen sind auch bei geringem Gefälle wesentlich größer als bei Felsstürzen. Der Hauptprozess erfolgt als einzelnes Ereignis. Kleinere Vor- oder Nachstürze (Felssturz oder Stein- und Blockschlag) sind häufig (Kienholz, Zeilstra & Hollenstein, 1993).

Ereignisse mit einem Volumen von über einer Million Kubikmeter bzw. einer Ablagerungsfläche von über 0,1 Quadratkilometer sowie einer hohen Sturzgeschwindigkeit von über 40 m/s sind kennzeichnend für Bergstürze.

Aufgrund der enormen Sturzmassen wird die Landschaft durch Bergstürze nachhaltig verändert. In Gebirgstälern führt dies oft zu einem Aufstau von Bächen und Flüssen, verbunden mit der Gefahr eines unter Umständen katastrophalen Wasserausbruchs und der Überflutung der talabwärts liegenden Gebiete (Lateltin, 1997).

2.1.2.3) Muren

Muren sind extrem schnelle Fließbewegungen, die nach starken Regenfällen oder zur Zeit der Schneeschmelze auftreten können. Eine Mure ist ein breiiges Gemisch aus Wasser, Erde, Schutt, großen Gesteinsbrocken und sonstigem mitgerissenem Material wie Sträuchern und Baumstämmen. Ihr Wasseranteil übersteigt den Feststoffgehalt. Seine Geschiebefracht erhält ein Murgang hauptsächlich aus sehr schuttreichen Einzugsgebieten mit fehlender Vegetationsbedeckung. Muren folgen in der Regel dem Verlauf von Hangfurchen oder Wildbachbetten. Sie können einige hunderttausend Kubikmeter Material transportieren. Die meist klar ausgeprägte Front kann eine Geschwindigkeit von bis zu 16 m/s erreichen und mit ihrer Energie große Verwüstungen anrichten.

2.2) Beschreibung der Reichweite

Die Reichweite eines Massensturzes hängt mit der Sturzmasse, der Absturzhöhe und der Regelmäßigkeit der Fahrbahn zusammen (Heim, 1932). Sie wird häufig mittels Angabe des zurückgelegten Höhenunterschiedes und der zurückgelegten Grundrisslänge beschrieben. Wie man in Abbildung 5 sieht, kann die Grundrisslänge dabei unterschiedlich definiert werden (Meißl, 1998).

Um die Reichweite anhand eines charakteristischen Maßes leichter abschätzen zu können wurden verschiedene Gefälle- und Böschungslinien definiert, die man Längsprofilen von Felsmassenstürzen entnehmen kann.

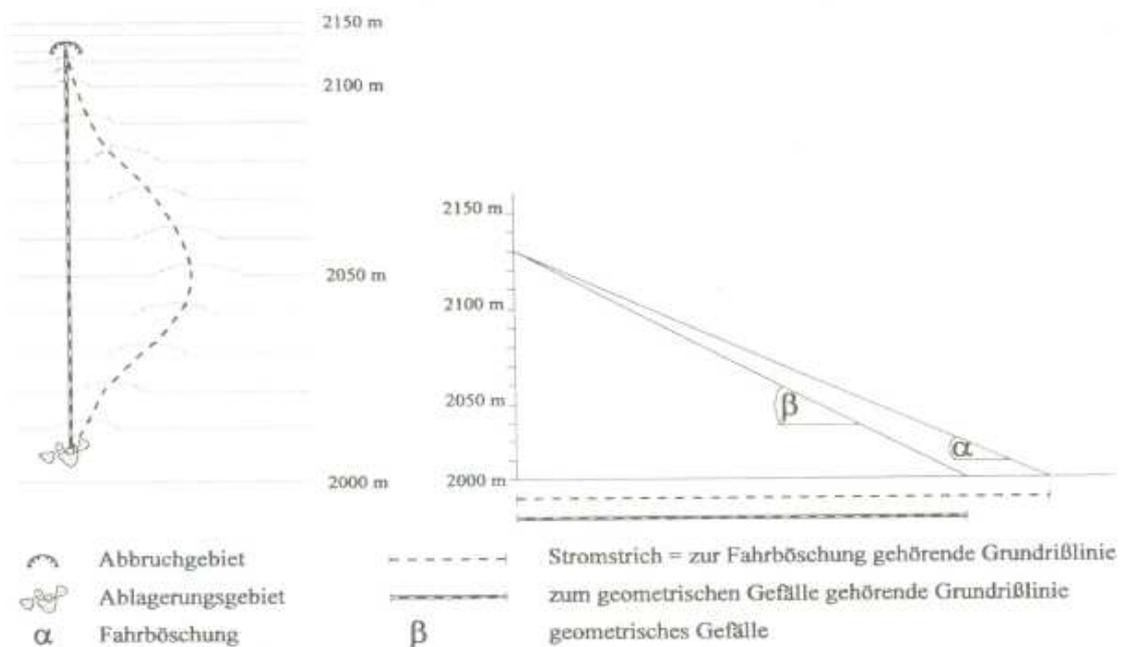


Abb. 5: Gegenüberstellung geometrisches Gefälle – Fahrböschung (Meißl, 1998)

2.2.1) Geometrisches Gefälle

Das geometrische Gefälle ist die Steigung jener Geraden, die die kürzeste Verbindung zwischen dem obersten Anrißpunkt im Abrißgebiet und dem tiefsten Punkt der Ablagerung, also dem Anfangs- und Schlusspunkt der Bewegung darstellt.

Das geometrische Gefälle kann leicht bestimmt werden, hängt aber, wie anhand von Abbildung 5 nachvollzogen werden kann sehr stark von zufälligen Unregelmäßigkeiten und Krümmungen der Fahrbahn ab (Heim, 1932).

2.2.2) Schwerpunktgefälle

Der Winkel zwischen der Geraden vom Schwerpunkt des Ablagerungsgebietes und dem Schwerpunkt des Abrissgebietes mit der Horizontalen wird als Schwerpunktgefälle bezeichnet. Das Schwerpunktgefälle ist jedoch sehr schwer zu messen, da es oft schwierig ist, die Lage des Schwerpunktes im Ablagerungsgebiet oder im Abrissgebiet zu bestimmen. Die praktische Bedeutung dieses Gefälles ist eher gering, da es wichtiger ist zu wissen, wie weit die maximale Ausdehnung der Gefahrenzone eines Bergsturzes reicht, als die Lage des Schwerpunktes der Trümmernasse zu kennen (Roth, 2003).

Hungr (1981) bezeichnete das Schwerpunktgefälle als „travel angle“ und beschrieb ihn als vertikalen Winkel zwischen den Schwerpunkten der Masse in der Anfangs- und Endlage.

2.2.3) Fahrböschung

Die Fahrböschung bezeichnet ebenfalls die Neigung einer Verbindungslinie zwischen dem obersten Abrißrand und dem tiefsten bzw. fernsten Endpunkt der Ablagerung. Allerdings wird die Verbindung dabei nicht auf dem kürzesten Weg gesucht, sondern sie stellt die Grundrißlinie des zur Geraden gestreckten Stromstrichs dar.

Die Fahrböschung ist immer flacher als das geometrische Gefälle, wobei die Unterschiede umso geringer werden, je geradliniger die Sturzbahn ist (Meißl, 1998). Die Reichweite eines Massensturzes wird in der Regel mit der Fahrböschung angegeben, da diese die größte Aussagekraft besitzt.

Heim und Müller haben festgestellt, dass der Reibungskoeffizient theoretisch $\tan\alpha$ entspricht. Deshalb wird die Fahrböschung auch manchmal als „Durchschnittsreibungswinkel“ des gesamten Massensturzes bezeichnet.

3) Berechnungsansätze

3.1) Empirische Methoden

Anhand statistischer Analysen der Daten von Massenbewegungen wurden empirische Methoden entwickelt. Der Grundgedanke dieser Methode ist, eine Vorhersage über die Ausbreitung bzw. die Reichweite der Massenbewegung zu treffen, wenn man das Volumen der erwarteten Massenbewegung abschätzen kann (Roth, 2003).

Um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wird mit großen Datenbanken gearbeitet. Nicht alle Massenstürze lassen sich mit dieser Methode untersuchen, da nicht immer die passenden Vergleichsdaten für jedes Fallbeispiel vorhanden sind.

Mit Hilfe empirischer Methoden können keine Aussagen über die Verteilung der Ablagerungen von Massenstürzen gegeben werden. Sie sind deshalb nicht zur Planung von Schutzmaßnahmen geeignet.

Scheidegger (1973) griff die von Heim beschriebene Verbindung zwischen dem Volumen des Massensturzes, zum Verhältnis zwischen der gesamten Fallhöhe (H) und der zurückgelegten Strecke (L) auf, welche auf 33 historischen und prähistorischen Massenstürzen basiert und entwickelte mit deren Hilfe eine Gerade (Abb. 6). Unter Zuhilfenahme dieser Geraden kann durch einfaches Einsetzen der entsprechenden Werte sofort erkannt werden, ob das Verhältnis H/L stimmt (Pirulli, 2005).

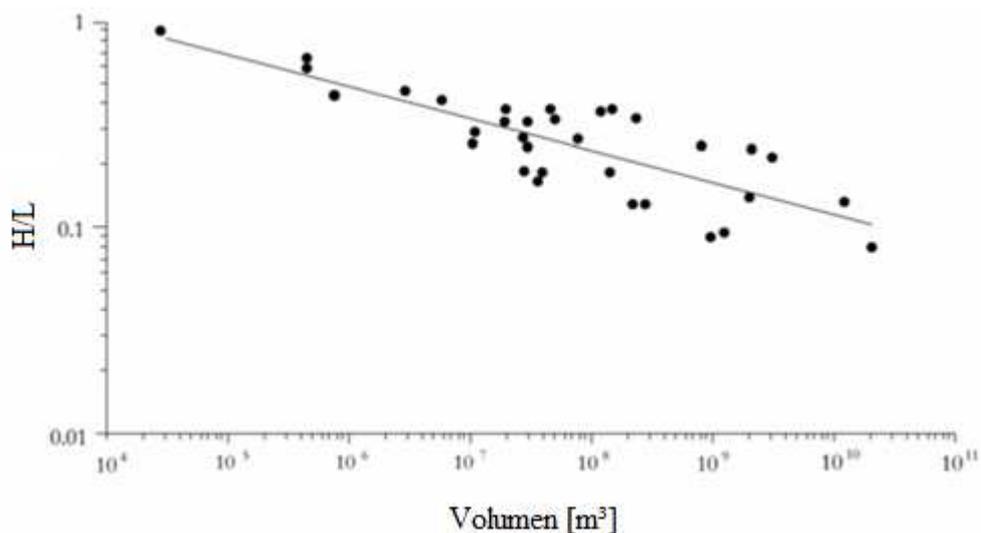


Abb. 6: Beziehung zwischen Bergsturzvolumen und der Tangente des Fahrböschungswinkels (Scheidegger, 1973)

3.2) Analytische Methoden (Pirulli, 2005)

Im Gegensatz zu den empirischen, basieren die analytischen Methoden auf mechanischen Grundlagen. Analytische Modelle können individuell an jede neue Anforderung angepasst werden, indem man die Werte des Untergrundes oder des Massensturzes passend verändert.

Am einfachsten lässt sich das analytische Prinzip mit dem klassischen Modell eines rutschenden Blocks auf einer schiefen Ebene erklären. Dieses Modell basiert auf dem Arbeit-Energie-Modell das 1988 von K. Sassa erstellt wurde. In dieser Theorie werden interne Deformationen, sowie die damit einhergehenden Energieverluste, vernachlässigt und die ganze Masse als homogen angesehen.

Der Block bleibt so lange liegen, bis ein kritischer Winkel erreicht wird, bei dem die Reibung zwischen Untergrund und Block nicht mehr ausreicht und dieser anfängt zu rutschen. Die Geschwindigkeit des Blockes verzögert sich erst, wenn die Neigung der Rutschebene wieder unter derer des kritischen Winkels liegt.

Besitzt eine Masse die potentielle Energie h und bewegt sich über eine Strecke x , ist der Energieverlust während der Bewegung (E_f).

$$E_f = \int_0^x m g \cos \psi \tan \delta_a \frac{dx}{\cos \psi} = m g x \tan \delta_a$$

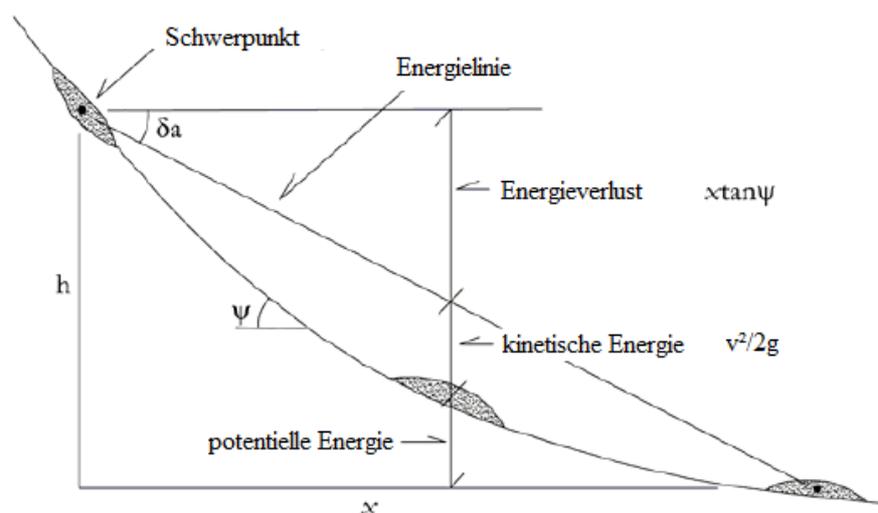


Abb. 7: Energieerhaltungslinie (nach Sassa, 1988)

Die in der Abbildung 7 dargestellte Energielinie zeigt die Gesamtenergie der Masse an. Die Gesamtenergie setzt sich aus potentieller und kinetischer Energie zusammen. Die kinetische Energie ($v^2/2g$) entspricht der Höhendifferenz zwischen der Energielinie und der sich bewegenden Masse. Die potentielle Energie ist die Energie die noch freigesetzt wird bis die sich noch in Bewegung befindende Masse ihre Endlage erreicht hat. Bei bekanntem Gradienten der Energielinie (δ_a) kann die Fließlänge und die Geschwindigkeit der Masse durch einzeichnen der Energielinie eingeschätzt werden.

3.3) Numerische Methoden

Um Massenbewegungen zu untersuchen kommen zwei verschiedene numerische Modelle zum Einsatz. Es wird zwischen Kontinuumsmechanik und Diskontinuumsmechanik unterschieden (Abb. 8). In der Kontinuumsmechanik bleibt der Zusammenhalt der Gesamtstruktur bei der Formänderung erhalten. Die Verschiebungskomponenten müssen kontinuierliche Funktionen des Raumes sein. In der Diskontinuumsmechanik wird demgegenüber kein Zusammenhalt der Gesamtstruktur bei der Formänderung vorausgesetzt. Die diskreten Elemente/Körper können sich frei bewegen. In Abhängigkeit von der Wahl der mechanischen Formulierung werden zur Beschreibung von geklüftetem Fels in der Kontinuumsmechanik verschmierte Materialmodelle in FEM- oder FDM-Programmen, sowie in der Diskontinuumsmechanik diskrete Materialmodelle in DEM-Programmen stark favorisiert (Will, 1999).

Die in der Arbeit verwendeten Programme DAN-2D und DAN-3D rechnen beide mit kontinuumsmechanischen Modellen, weshalb diese auch näher erläutert werden.

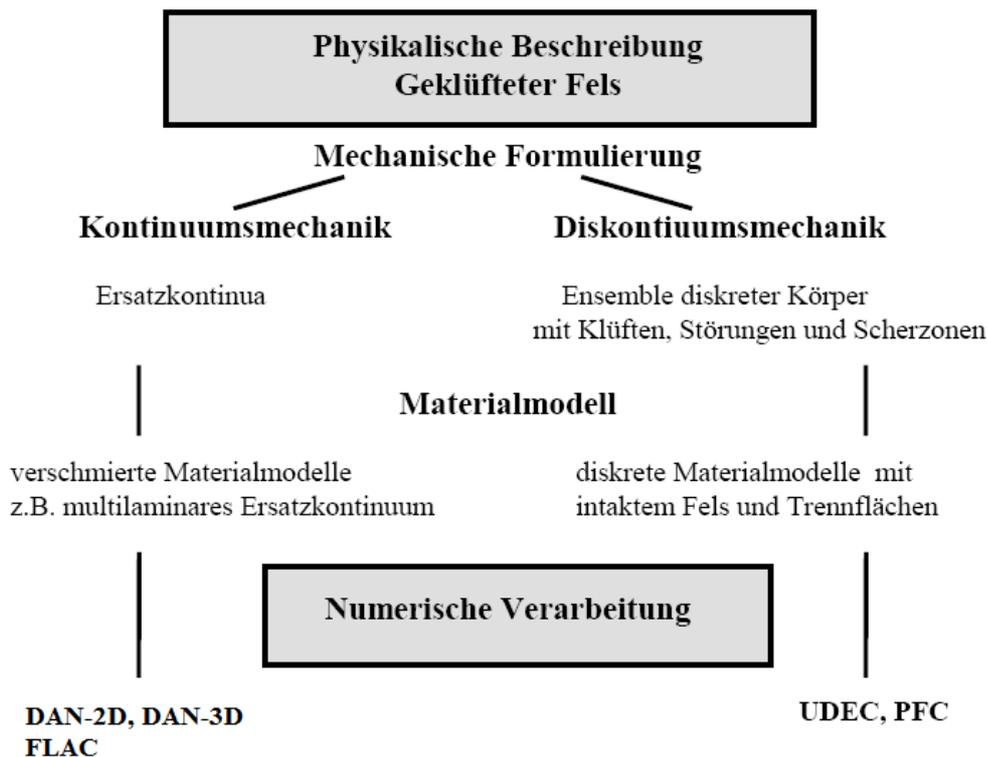


Abb. 8: Flußdiagramm üblicher mechanischer Formulierungen und Materialmodelle des geklüfteten Gebirges sowie ihre numerische Umsetzung (nach Will, 1999)

3.3.1) DAN (Hungar, 1995)

Die, auf dem DAN Code basierenden Programme DAN-2D und DAN-3D wurden zur Berechnung von schnellen Massenbewegungen entwickelt. Sie basieren auf kontinuumsmechanischen Modellen die für Flüssigkeiten in offenen Kanälen entwickelten wurden. Auch bei sehr feinem Erdmaterial mit hoher Wassersättigung, bestehen immer noch Unterschiede zwischen Erdmaterial und Flüssigkeit. Darüber hinaus, unterscheiden sich die Neigung und die Beschaffenheit des Untergrundes von denen der meisten Flüssigkeitskanäle. Diese Unterschiede machen die Analyse der Massenstürze komplex.

Obwohl das Erdmaterial ein Granulat ist, wird es in diesem Ansatz als Flüssigkeit betrachtet (Abb. 9). Die Betrachtungsart setzt voraus, dass der betrachtete Fließkörper erheblich größere Abmessungen aufweist als die einzelnen Teilchen.

Es ist wichtig, eine „scheinbare“ Flüssigkeit zu finden, die den rheologischen Eigenschaften einer tatsächlichen Massenbewegung nahezu entspricht.

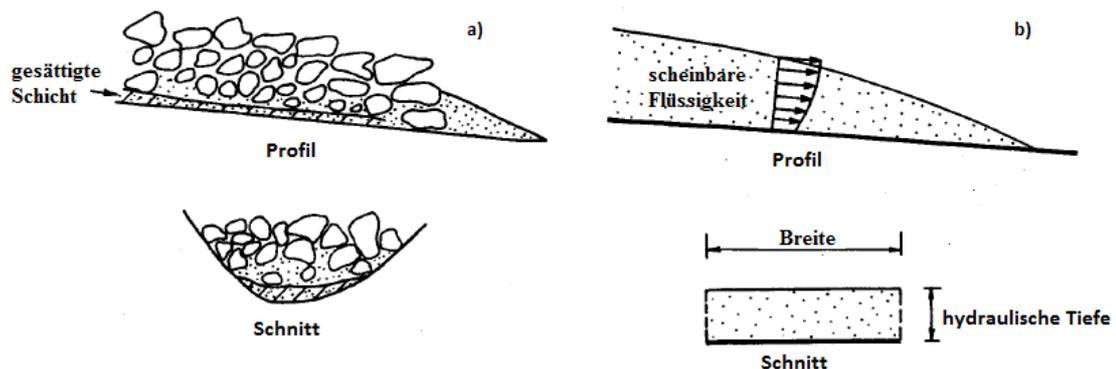


Abb. 9: a) Prototyp einer heterogenen sich bewegenden Masse; b) Modell einer homogenen „scheinbar flüssigen“ Masse (nach Hungar, 1995)

Ein vielversprechender Ansatz für die Beschreibung unsicherer und nicht gleichmäßiger Strömungen in einer komplexen Geometrie ist der über die Tiefe gemittelter Saint Venant Ansatz. In diesem Ansatz, ist die Dicke des Massensturzes sehr viel kleiner als seine Ausdehnung parallel zur Rutschebene, was oft bei geophysikalischen Strömungen der Fall ist. Das Material wird als inkompressibel angenommen, die Massen- und Impulsgleichung wird als Mittelwert angeschrieben.

Durchschnittliche Tiefenermittlung erlaubt es, eine aufwendige dreidimensionale Beschreibung der Strömung zu vermeiden. Die komplexe Rheologie des Granulats ist in

einem einzigen Begriff zusammengefasst, der die sich zwischen dem fließenden Material und der rauen Oberfläche befindende Reibungskraft beschreibt.

Savage und Hutter (1989) führten im Rahmen der granularen Strömung die tiefengemittelten Strömungen ein. In ihrem Modell wird angenommen, dass das Volumen der sich bewegenden Masse gleich bleibt, kohäsionslos ist und den Mohr-Coulomb Fließbedingungen sowohl innerhalb der verformten Masse, als auch denen an der Gleitfläche entsprechen. Dies allerdings mit unterschiedlichem inneren- (Φ_i) und Oberflächenreibungswinkel (δ) .

Hungr (1995) entwickelte ausgehend vom Ansatz von Savage und Hutter (1989), ein auf Lagrange basierendes Modell. In diesem Modell ist eine Vielzahl von verschiedenen Materialrheologien möglich, die sich entlang der Gleitbahn mit der Masse fortbewegen und anpassen.

3.4) Numerisches Modell (Hungr, 1995)

Der Massensturz wird durch eine gewisse Anzahl sich berührender Blöcke definiert. Wenn die Blöcke den Hang hinuntergleiten, können sie sich frei verformen, behalten dabei aber immer ihr Ausgangsvolumen.

Die Lagrange-Finite-Differenzen-Lösung der hydrodynamischen Gleichungen ist auf die gekrümmten Koordinaten bezogen und bildet ein sich bewegendes Netz.

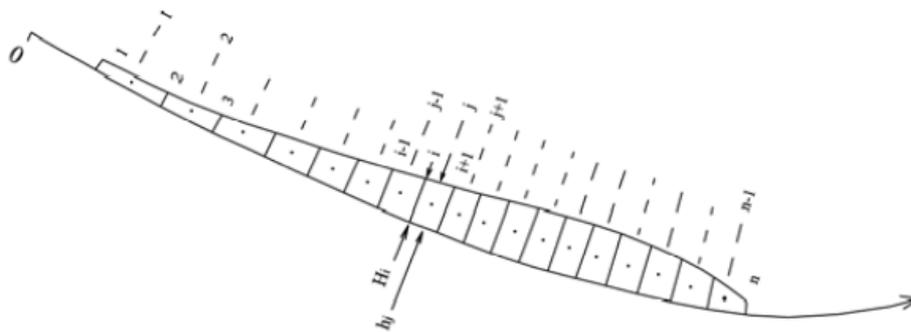


Abb. 10: Lagranges Netz in gekrümmten Koordinaten (Hungr, 1995)

Die vertikal integrierte Impulsgleichung wird auf schmale Spalten der Strömung („boundary blocks“) angewendet. Diese Randblöcke (boundary blocks) sind wie in der Abbildung 10 dargestellt von $i = 1$ bis n durchnummeriert. Anschließend wird die

Kontinuitätsgleichung auf die mit einem festen Volumen festgelegten „Massenblöcke“ angewendet. Sie trennen die Randblöcke und sind von $j = 1$ bis $n - 1$ durchnummeriert.

Höhe (H_i) und die Breite (B_i) der Randblöcke werden senkrecht zur Fließrichtung gemessen.

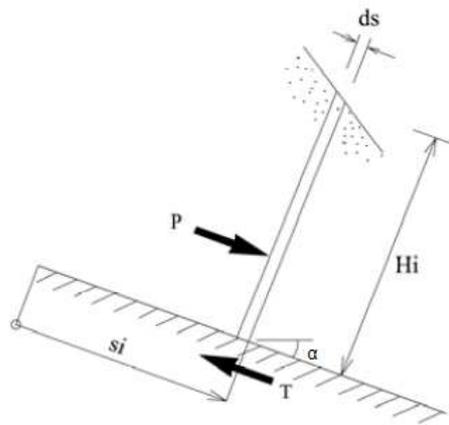


Abb. 11: Randblock mit den ihn angreifenden Kräften (Hungri, 1995)

Die treibende an jedem Randblock angreifende Kraft F setzt sich aus den tangentialen Komponenten Gewicht, der Basiswiderstandskraft T und aus dem resultierenden tangentialen Innendruck P zusammen (Abb. 11). Die Länge (ds) vom Randblock, die mit den gekrümmten Lagrange-Koordinaten bestimmt wird, verschwindet aus der Gleichung, sobald alle Kräfte aufgetragen sind.

$$F = \gamma H_i B_i \sin \alpha + P - T$$

Eine Ablagerung oder Mitnahme von Material an der Sohle oder am Rand des Massensturzes, kann durch eine Volumenänderung der betreffenden Rand- und Massenblöcke simuliert werden. Um dies zu erreichen, wird zu jedem Zeitschritt den Blöcken ein vorgegebenes, sich proportional zur zurückgelegten Strecke verhaltendes Volumen zu- oder abgezählt.

3.4.1) Der Strömungswiderstand, T

Die Strömungswiderstandskraft T, hängt von der Materialrheologie ab und setzt sich aus den verschiedenen bekannten Parametern der Strömung zusammen. Die Zusammenhänge zwischen T und den anderen Parametern basieren auf der Annahme, dass die Scherbeanspruchung auf tangentialer Ebene linear zur Normalabflusstiefe ansteigt.

Dies, zusammen mit einem gegebenen rheologischen Stoffgesetz, ergibt ein Geschwindigkeits-Tiefenverteilungsprofil und eine Gleichung für T. In DAN stehen verschiedene alternative Rheologien zur Verfügung und das Material kann entlang der Strecke oder in der Gleitmasse selbst variieren.

Die 2 wichtigsten Rheologien werden kurz erläutert.

Friction flow: diese Strömung tritt auf, wenn T eine Reibung der effektiven Normalspannung auf die Basis der Strömung ist. Diese Spannung hängt ab von der Wassertiefe, dem spezifischen Gewicht γ , und dem Porendruck.

$$T = A_i \gamma H_i \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) (1 - r_u) \tan \Phi$$

A_i = Grundfläche vom i ten Element; H_i = Höhe vom i ten Element; α = Böschungswinkel; Φ = Reibungswinkel;
 $a_c = v_i^2/R$; r_u = Porendruck Koeffizient

Voellmy fluid: dieses Modell wurde von Voellmy (1955) zur Berechnung von Schneelawinen eingeführt. Es enthält einen Reibungs- und Turbulenzterm.

$$T = A_i \left[\gamma H_i \left(\cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) \tan \Phi + \gamma \frac{v_i^2}{\xi} \right]$$

v_i = Geschwindigkeit; $\xi = C^2$ (C = Chézy Rauigkeitskoeffizient)

3.4.2) Der Druck, P

Die Längs-Druckdifferenz über alle Randblöcke basiert auf der Annahme, dass die Strömungslinien in etwa parallel mit der Sohle verlaufen und der Druck parallel zur Bahn linear mit der Tiefe ansteigt.

$$P = -k\gamma \frac{dh}{ds} \left(1 + \frac{a_c}{g} \right) H_i B_i \cos \alpha ds$$

4) Modellaufbau

4.1) DAN-2D

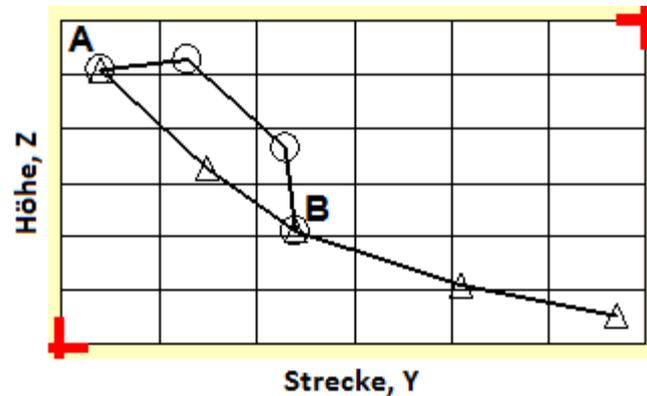


Abb. 12: Festzulegende Geländekubatur und Abbruchmasse (DAN-W Manual)

Die Geländekontur, die Abbruchfläche und die Abbruchmasse werden in der Achse der festgelegten Sturzbahn definiert (Abb. 12). Die Berechnung kann zweidimensional oder 2,5-dimensional erfolgen. Bei der in DAN-2D als dreidimensional bezeichnete 2,5D Berechnung wird der Einfluss der seitlichen Ausbreitung der Massenbewegung berücksichtigt.

Zur Erstellung der Geländekubatur und der Abbruchmasse der untersuchten Fallbeispiele, wird die mit DAN-3D ermittelte Sturzbahn, die überstrichene Fläche, die Ausbreitung und die Ablagerungen in ein digitales Höhenmodell (DHM) übertragen. In diesem DHM, das mit Hilfe des 3D Visualisierungsprogramms Surfer dargestellt werden kann, wurde der Schnittverlauf für die DAN-2D Analyse festgelegt. So wird eine optimale Vergleichbarkeit der Methoden erzielt. Die zur Eingabe der Geländekubatur und der Abbruchmasse benötigten Koordinaten, können im Surfer entlang des vorher festgelegten Schnittverlaufes, in Form von Tabellen exportiert werden. Die exportierten Y Koordinaten beziehen sich auf das digitale Höhenmodell und müssen vor der Eingabe ins DAN-2D abgewickelt werden.

Da angenommen wird, dass die Ausbreitung der Masse der 2D und der 3D Rechnung identisch sind, kann sie an verschiedenen Stellen entlang der Schnittlinie aus der 3D Berechnung gemessen werden. Die anschließend in die 2D Rechnung übertragene Ausbreitung bleibt über die gesamte Berechnungszeit und die gesamte Masse an jeder Stelle gleich.

In den Fällen, wo eine schnelle Berechnung ohne oder mit unzureichend bekannten Breiten erforderlich ist, kann dies in DAN-2D mit Hilfe einer reinen 2D Rechnung erfolgen.

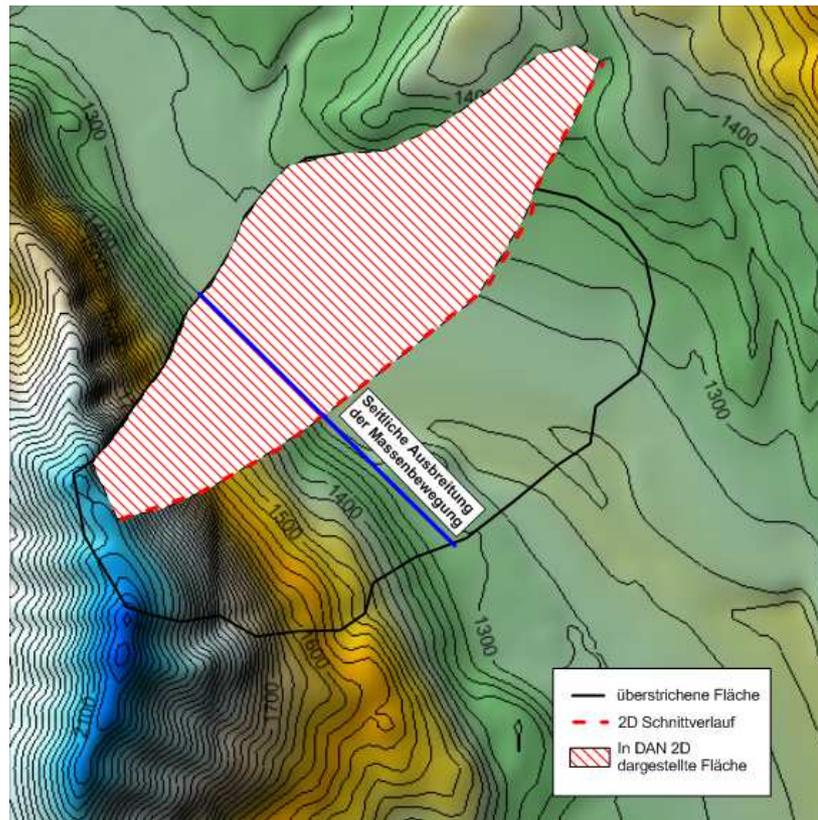


Abb. 13: Darstellung der Ausbreitung der Massenbewegung und der in DAN-2D dargestellten Fläche

Die Massenbewegung wird standardmäßig in einer isometrischen Ansicht dargestellt (Abb. 14). Die Ansicht zeigt die Hälfte des eingegebenen Geländemodells und dies von der Mittelachse bis zur linken Grenze der festgelegten Ausbreitung. Die in der Darstellung angegebenen Abmessungen beziehen sich auf die Mittelachse. Somit wird nur der in Abbildung 13 rot schraffierte Bereich in DAN-2D dargestellt. Die Randblöcke des Massensturzes sind normalerweise schwarz und bei Druck rot dargestellt. An den verschiedenen Farben der Mittel- und Außenlinie ist die den verschiedenen Streckenabschnitten zugeordnete Rheologie gut zu erkennen.

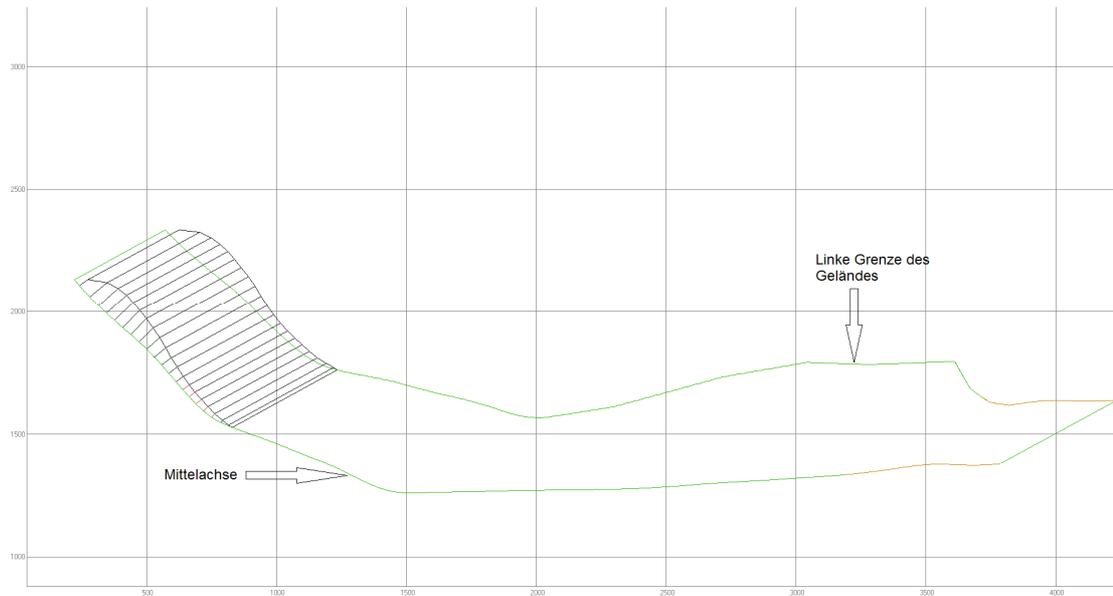


Abb. 14: Isometrische Darstellung in DAN-2D

In DAN-2D können zusätzliche Einstellungen mit den Kontrollparametern vorgenommen werden. Es lässt sich hier die Anzahl der verwendeten Rheologien (von 1 bis 20) vorbestimmen, sowie die Anzahl, der zur Berechnung verwendeten Randblöcke (von 1 bis 59) festlegen.

DAN2D setzt standardmäßig einen rechteckigen Querschnitt der Sturzmasse voraus. Mit Hilfe vom „cross-section shape factor“ lässt sich bei bekannter maximaler Dicke (D_{\max}) und bekannter Breite (B) ein nicht rechteckiger Abbruchkörper in einen rechteckigen Körper umwandeln (Abb. 15). Bei diesem Prozess wird die angegebene Breite (B) weiterhin als Breite der umgewandelten Masse verwendet.

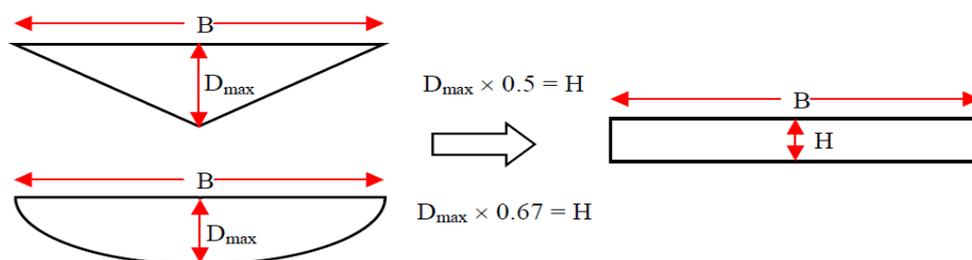


Abb. 15: Illustration der Funktionsweise vom „cross-section shape factor“ (DAN-W Manual)

Es kann zwischen den verschiedenen Materialrheologien (Frictional; Voellmy) ausgewählt werden. Für die ausgewählte Rheologie können nun die erforderlichen Werte in den dafür vorgesehenen und blau markierten Feldern eingetragen werden.

Da alle in der vorliegenden Arbeit behandelten Fallbeispiele mit der Voellmy Rheologie gerechnet wurden, sind die benötigten Materialparameter die Wichte γ [KN/m³], die Reibungskoeffizienten f [-], die Turbulenzkoeffizienten ξ [m/s²] und die inneren Reibungswinkel Φ_i [°].

In diesem Fenster (Abb. 16) wird bei DAN-2D zusätzlich zu den Rheologiewerten die Erosionstiefe t [m] festgelegt.

Colour:	Material 1	Material 2	Material 3	
Material Type >	Voellmy	Voellmy	Voellmy	Frictional
Material:	Ablösung	Gletscher	Fels	
Unit Weight:	20.00	20.00	20.00	
Shear Strength:	0.00	0.00	0.00	
Friction Angle:	0.00	0.00	0.00	
Pore-pressure Coeff. Ru:	0.00	0.00	0.00	
Viscosity:	0.00	0.00	0.00	
Friction Coefficient:	0.45	0.10	0.45	
Turbulence Coeff.:	2000.00	1000.00	2000.00	
Power Law Exponent:	0.00	0.00	0.00	
Erosion Depth:	0.00	0.00	0.00	
Internal Friction Angle:	35.00	35.00	35.00	

Abb. 16: Eingabefenster der Materialeigenschaften (Material Editor)

Werden bei einer Berechnung mehrere Rheologien verwendet, kann anschließend noch in dem „Material Locations“ Editor angegeben werden, ab welchen Koordinaten die verschiedenen Rheologien zur Berechnung verwendet werden sollen. Die unterschiedlichen Rheologien sind durch die im Material Editor zugewiesenen Farben in der Darstellung zu erkennen.

In DAN-2D können im Optionseditor die einzelnen Randblöcke diskretisiert und ihre Ausrichtung zum Längsprofil kann Normal oder Vertikal angenommen werden (Abb. 17). Eine normale Ausrichtung der Blöcke kann für stark gekrümmte Wegprofile zu sich überschneidenden Blöcken führen. Eine vertikale Ausrichtung der Blöcke ist bei

steilen Wegprofilen nicht zu empfehlen, da dies zu einer sehr langgestreckten Geometrie der Blöcke führt. Als Standardeinstellung sind die Blöcke in DAN-2D genauso wie in DAN-3D normal zum Wegprofil ausgerichtet.

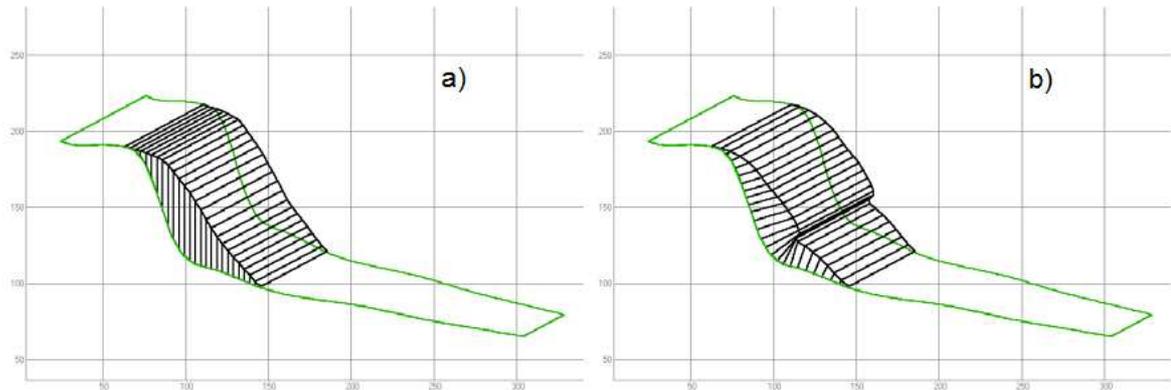


Abb. 17: a) Vertikale Blöcke b) Normale Blöcke die sich beim gleichen Wegprofil überschneiden (DAN-W Manual)

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit ist das in der Abbildung 18 dargestellte zweidimensionale Tiefenprofil des Massensturzes. Es besteht aus zwei Diagrammen, die übereinander angeordnet sind. Das obere Diagramm zeigt die aktuelle, sowie die vordere und hintere Fließgeschwindigkeit des Massensturzes für jeden Zeitschritt an. Das untere Diagramm zeigt die Profildicke und die aktuelle Lage aller Randblöcke des Massensturzes an. Zusätzlich wird das derzeitige Erosions- oder Ablagerungsprofil in der entsprechenden Materialfarbe angezeigt.

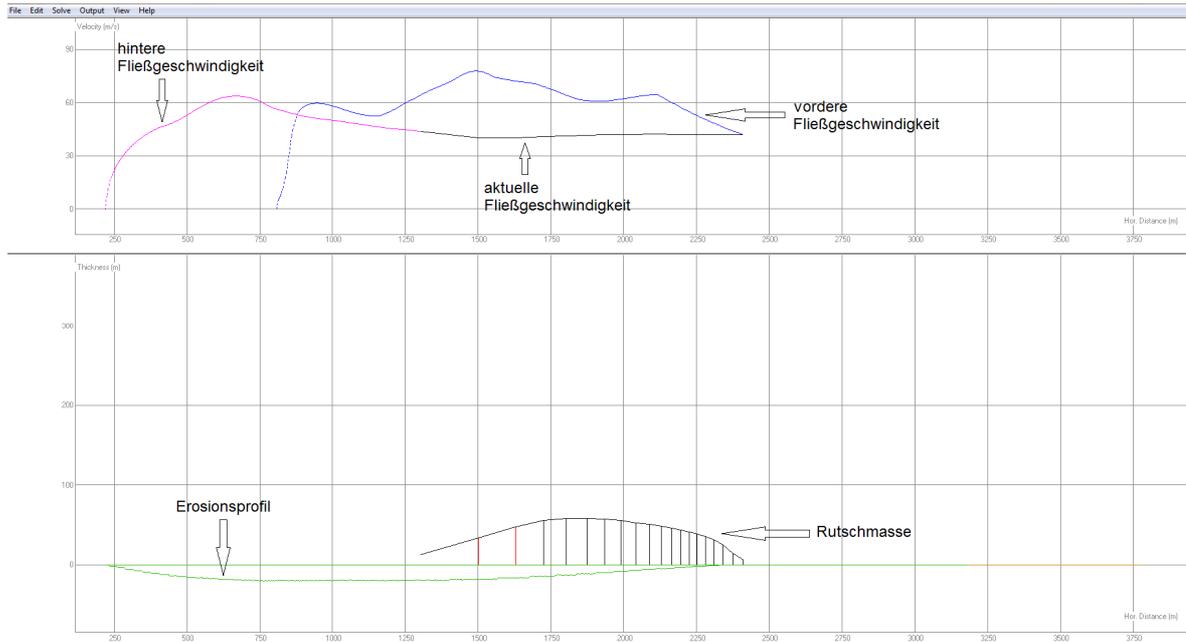


Abb. 18: Zweidimensionales Tiefenprofil

Während der Rechnung kann zwischen den beiden Darstellungsmöglichkeiten gewechselt werden. Um die Darstellung zu wechseln muss zuerst die Rechnung gestoppt und kann anschließend wieder fortgesetzt werden.

4.2) DAN-3D

DAN-3D ist eine Erweiterung des kontinuumsmechanischen Programmes DAN-2D. Es entspricht weitgehend dem zweidimensionalen Berechnungsansatz, erfüllt aber zusätzlich die Notwendigkeit der Berücksichtigung komplexer Topographien. Durch die Berücksichtigung der Topographie kann mit Hilfe des 3D-Modells die räumliche Ausbreitung des Massensturzes besser abgeschätzt werden.

Die Eingabe des Geländes und der Abbruchmasse erfolgt mit Hilfe digitaler Höhenmodelle (DHM) mit einer regelmäßigen gitterförmigen Anordnung der Stützpunkte (Grid-File). Diese Grid-Files können beispielsweise mit dem Programm ArcMap2010 aus Luftbildern erstellt werden.

DAN-3D benötigt für den Modellaufbau drei Grid-Files:

- 1) **PATH:** Dieses DHM beinhaltet die Geländeoberfläche und die offengelegte Abbruchfläche des zu untersuchenden Bereiches, exklusive der Abbruchmasse.
- 2) **SOURCE:** Dieses Grid-File stellt den Unterschied der Höhenlage des DHM vor und nach dem Abbruchvorgang da. An Stellen ohne Abbruchmasse ist es Null und kann nie negative Werte annehmen.
- 3) **EROSION:** Falls keine Erosion angegeben wird, ist dies ein Null-Grid. Ansonsten wird die Erosionstiefe angegeben die an den verschiedenen Stellen der Geländeoberfläche zu berücksichtigen ist. Die Berücksichtigung der Erosion erfolgt nur, wenn die Abbruchmasse diese Bereiche überquert.

Die drei Grid-Files müssen die gleichen Koordinaten haben, da sie sonst nicht von DAN-3D verarbeitet werden können.

Wie im 2D Model müssen auch bei der 3D Variante die Materialrheologien eingetragen werden. In dem dafür verwendeten Fenster sind die gleichen Werte einzutragen, wie beim 2D Model mit Ausnahme der Erosionstiefe, die bereits durch das dafür vorgesehene Grid-File (Erosionsfläche) bestimmt wurde. In diesem Grid-File kann sich die Erosion, anders als im 2D Modell, auch über die Abflussbreite verändern und stellt eine maximale Erosionstiefe dar. Zusätzlich zur Erosionsfläche muss in DAN-3D noch eine Erosionsrate $[E_s]$ angegeben werden. Diese Erosionsrate setzt sich aus dem geschätzten in die Zone eindringendem Volumen (V_0), dem geschätzten die Zone verlassendem Volumen (V_f) und der Zonenlänge (S) zusammen. Sie wird bei den Kontrollparametren angegeben.

$$E_s = \frac{\ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right)}{S}$$

Die Erosionsrate bestimmt somit während des Rechenganges die für jeden Punkt des Geländes auftretende Materialauf- oder Abgabnahme. Die Materialaufnahme kann dabei maximal bis zu der vorher durch das Grid-File bestimmten maximalen Erosionsfläche erfolgen.

Die Ausgabe der Berechnungsdaten erfolgt in selbst festlegbaren Zeitschritten in Form von Grid-Files. Sie enthalten aktuelle Daten über die Ablagerungshöhe der sich bewegenden Masse, die aktuellen Geschwindigkeitswerte sowie die maximale Geschwindigkeit und die maximale Ablagerungshöhe.

Die Nachbearbeitung und Aufbereitung der Ergebnisse der Computersimulation (postprocessing) erfolgte in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe des Programms Surfer (Golden Software).

In Surfer, wird mit dem DHM eine dreidimensionale Karte des untersuchten Geländes erstellt. In dieser Karte können die in DAN-3D ermittelten Daten visualisiert werden. So werden beispielsweise die Ablagerungshöhe und die Verteilung der maximalen Geschwindigkeit der Sturzmasse, sowie der Ablauf des Sturzprozesses und dessen Sturzpfad visualisiert (Abb. 19).

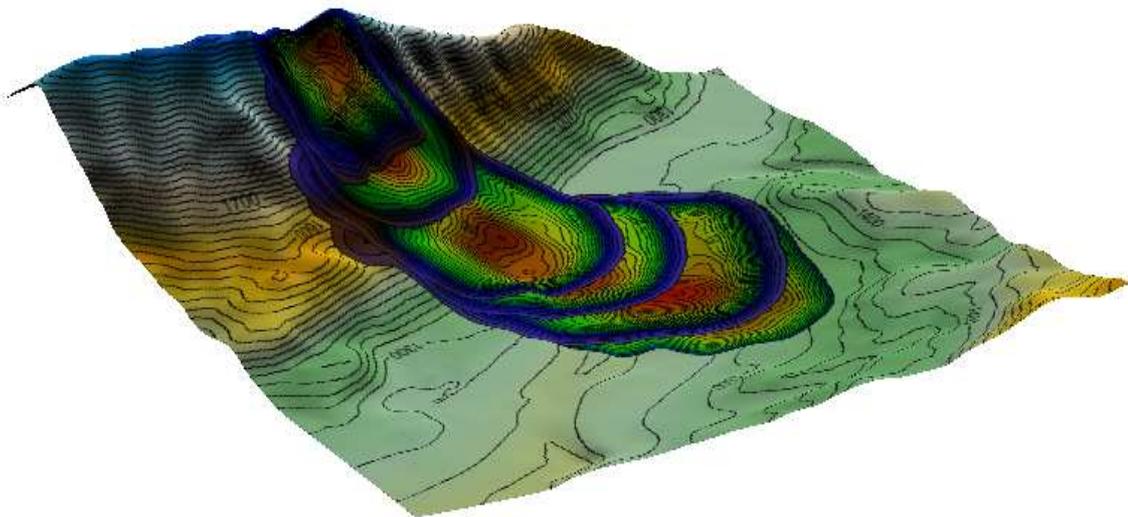


Abb. 19: Darstellung der Ablagerungshöhe zu verschiedenen Zeitschritten in Surfer

5) Untersuchte Fallbeispiele

Es wurden 5 Fallbeispiele gewählt um die beiden Programme miteinander zu vergleichen.

Jedes der gewählten Beispiele hat eine besondere Eigenschaft die es für einen Vergleich der beiden DAN Programme interessant macht (Tab. 1).

Fallbeispiel	Name	Typ	Interessante Eigenschaften
A	Kanal	Mure	Benchmark
B	Punta Thurwieser	Bergsturz	Turbulent, mehrere Pfade
C	Frank Slide	Bergsturz	Zusammenhängende Masse, gut reproduzierbar in 2D
D	Seefeldbach	Mure	Weitläufiges Einzugsgebiet, mehrere Pfade
E	Tates Cairn	Mure	Prognose

Tab. 1: Aufzählung der untersuchten Fallbeispiele und ihre interessanten Eigenschaften

Fallbeispiel A: Kanal (vgl. Pichler, 2011)

DAN-2D muss genauso wie DAN-3D durch verschiedene, für den Sturzprozess relevante Parameter kalibriert werden. Deshalb ist es wichtig zu wissen, welchen Einfluss die verschiedenen Parameter auf das Ergebnis haben. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wurde der von L. Pichler in seiner Diplomarbeit (2011) mit DAN-3D modellierte Kanal auch mittels DAN-2D analysiert. Der Kanal hat eine Länge von 1455 m und ein konstantes Gefälle von 1:1,63, am Ende des Kanals schließt eine Ebene mit einem Gefälle von 1:10 an, auf der die sich die Mure unter einem Winkel von ca. 45° ausgebreitet hat (siehe Abb. 20-21).

Durch das Variieren der verschiedenen Rheologieparameter kann deren Einfluss auf die Ablagerungshöhe, die Auslauflänge, die bedeckte Fläche, das Volumen und die maximale Fließgeschwindigkeit ermittelt werden. Mit der Auswertung dieser Ergebnisse, lassen sich Rückschlüsse über den Einfluss der einzelnen Rheologieparameter gewinnen.

Für die Sensibilitätsanalyse werden 6 Variablen und deren Ausgangswerte bestimmt (Tab. 2). Für jede Variable wird eine Bandbreite von Werten, die sich um den Ausgangswert verteilen festgelegt. Jetzt wird jeweils eine Variable verändert, wobei die anderen Variablen ihren Ausgangswert beibehalten. So kann der Einfluss jeder Variable auf das Ergebnis ermittelt werden.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wird für die Modellrechnungen eine konstante Berechnungsdauer von 240 Sekunden festgelegt. Nach dieser Zeit treten nur noch marginale Veränderungen auf die für die Analyse nicht berücksichtigt werden.

Υ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
18	0,12	500	18	0,00064	2250

Tab. 2: Ausgangswerte der Sensibilitätsanalyse

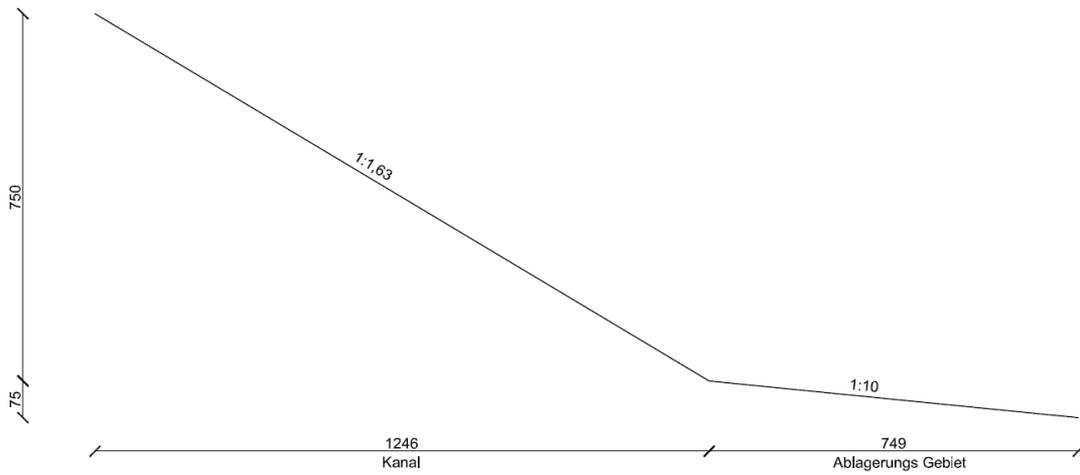


Abb. 20: Schnitt durch das Modell



Abb. 21: Isometrische Darstellung des Kanals (halbes System) in DAN-2D

Fallbeispiel B: Punta Thurwieser (vgl. R. Poisel/A. Preh/ O. Hungr, 2008)

Der Thurwieser Bergsturz ereignete sich am 18. September 2004 um 13.41 Uhr an der südlichen Flanke der Punta Thurwieser (3.657,6 m ü.NN). Sie befindet sich im Zebrù Tal, in den zentralen italienischen Alpen. Das Tal folgt der Zebrù Linie, welche die Campo Decke im Süden von der Ortler Decke im Norden trennt. Es ist nach S - SW orientiert, hat seinen Ursprung in der Eiszeit und eine Länge von 10 km. Die Ortler Decke besteht aus gefaltetem und gestörtem Dolomitgestein mit Einlagerungen von Kalkstein und ist lokal durch tertiäre Intrusionen durchzogen. Der Talboden liegt in einer Höhe von 1.350 m bis 2.500 m und hat Talflanken, die bis in eine Höhe von 3.859 m (Gran Zebrù) herausragen. Die Morphologie des Tales entstand durch Gletscher und hydraulische Prozesse. Der in der Ortler Decke oberhalb der Zebrù Linie initiierte Bergsturz hatte eine Größe von ungefähr 2,2 Millionen m³ und bestand hauptsächlich aus Dolomitstein. Nach dem Abbruch bewegte sich der Erdrutsch innerhalb von 75 bis 80 Sekunden 2,9 km entlang des Marè Tals. Der obere Teil der Talsohle ist vom Gletschereis (d.h. Zebrù Gletscher) bedeckt und erstreckt sich über 600 – 650 m mit einer Neigung von 8 – 10°. Anschließend liegt freigelegter Fels mit einer Länge von ungefähr 500 m und einer Neigung von 28 – 30° vor, gefolgt von eiszeitlichen Ablagerungen mit einer Länge von 1000 m und einer Neigung von 14 – 16° (Abb. 22).

Der Bergsturz ist gut dokumentiert, da er auf Videos und Fotos zweier Alpinistengruppen und durch seismische Stationen in der Region aufgezeichnet wurde. Die eine Gruppe befand sich 7,8 km SO, die andere 4,8 km SW der Punta Thurwieser. Diese Aufnahmen können verwendet werden um die Gesamtdauer des Bergsturzes zu ermitteln und ihn so rekonstruieren zu können (Abb. 23).



Abb. 22: Luftbild des vom Bergsturzes Punta Thurwieser betroffenen Gebietes. (Sosio, Crosta, Hungr, 2008)

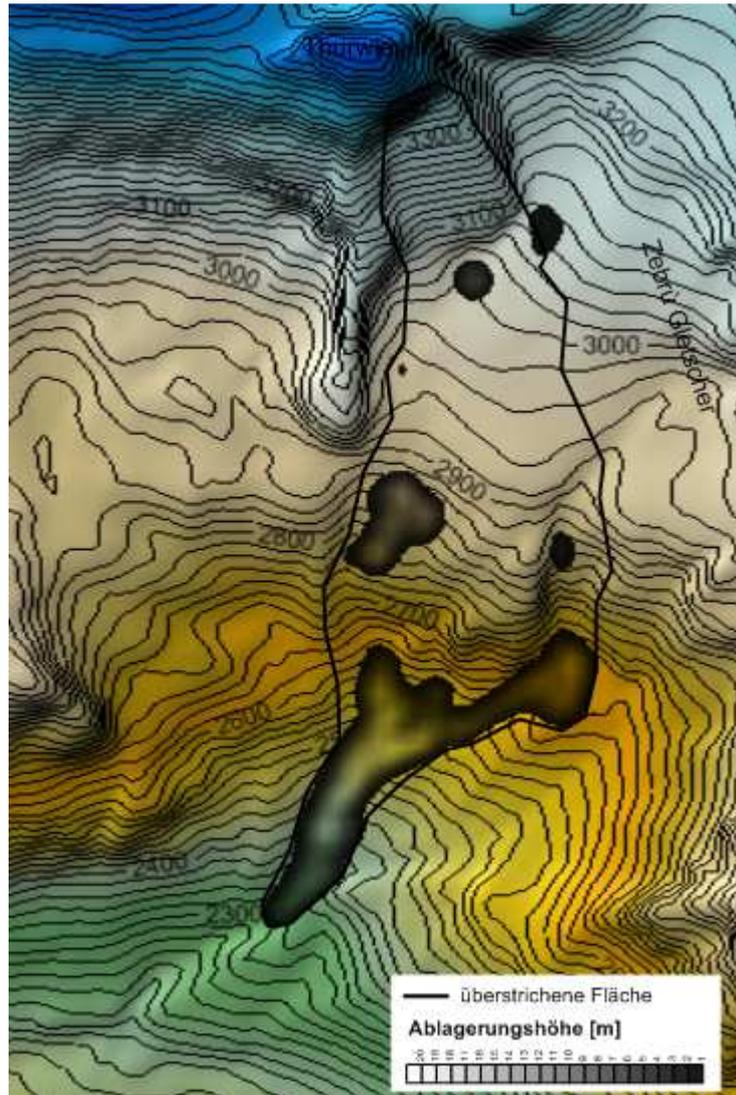


Abb. 23: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche des Bergsturzes Punta Thurwieser

Fallbeispiel C: Frank Slide (vgl. R. Poisel/A. Preh/ O. Hungr, 2008)

Bereits 1901 wurde eine Kohlestollengrube tief in den Turtle Mountain nahe dem kleinen Dorf Frank in der Provinz Alberta im Westen von Kanada in den Rocky Mountains getrieben. Es wurden große Strossen angelegt und bereits im Oktober 1902 erstreckten sie sich über 700 m entlang der östlichen Kohleader. Kleine Erdbeben wurden zu einem regelmäßigen Ereignis in den Minen und ereigneten sich vor allem in den frühen Morgenstunden. Die Eingeborenen bezeichneten den Turtle Mountain als „mountain that walked“.

Am 29 April 1903 gegen 04.10 Uhr kam es zu einem Bergsturz der ein Teil des Dorfes Frank mit seinen etwa 600 Einwohnern bedeckte. Der Frank Slide ist ein typischer Bergsturz mit ca. 36 Millionen m³ fragmentiertem Kalkfelsen. Er war der tödlichste Bergsturz in der kanadischen Geschichte und forderte rund 70 Menschenleben. Der Fels löste sich aus dem Berggrat vom „Turtle Mountain“ auf einer Breite von 700 m, zerfiel in kleinere Teile und rutschte den 800 m hohen Hang hinunter. Anschließend durchbrach er einen Felsschuttabschnitt, sowie eine eiszeitliche Terrasse und bedeckte die Flussauen vom Crowsnest Fluss und den gegenüberliegenden Hang mit einer Ablagerung (Abb. 24). Diese Ablagerung hatte eine Breite von 1,7 km, war annähernd 2 km Lang und hatte eine durchschnittliche Dicke von 18 m. Es liegt eine gute Abstufung der Korngrößen vor, wo ein Sand-Kies Gemisch mit mittlerer Korngröße die Basis bildet und größere Felsblöcke von bis zu 1 m Durchmesser an der Oberfläche zu finden sind. Beim Frank Slide liegen leider keine Aufzeichnungen über die Bewegungsgeschwindigkeit vor. Sich auf Zeitzeugen basierende Aussagen gehen von einer Bewegungsdauer von weniger als 100 Sekunden aus, was eine durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit von mehr als 23 m/s bedeuten würde. Anhand dieser Aussagen und der vor Ort ermittelnden Daten, lässt sich der Bergsturz wie in Abbildung 25 dargestellt rekonstruieren.

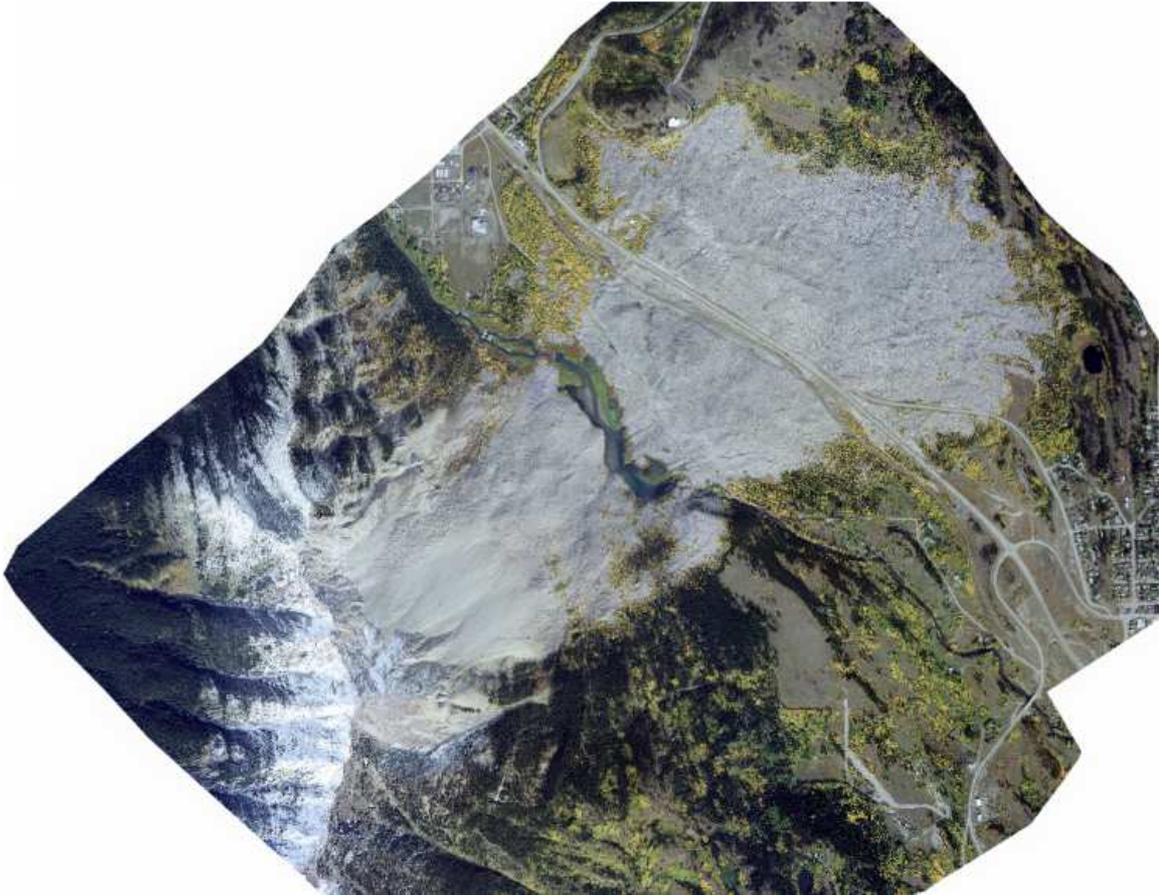


Abb. 24: Orthofoto des Bergsturzes Frank Slide

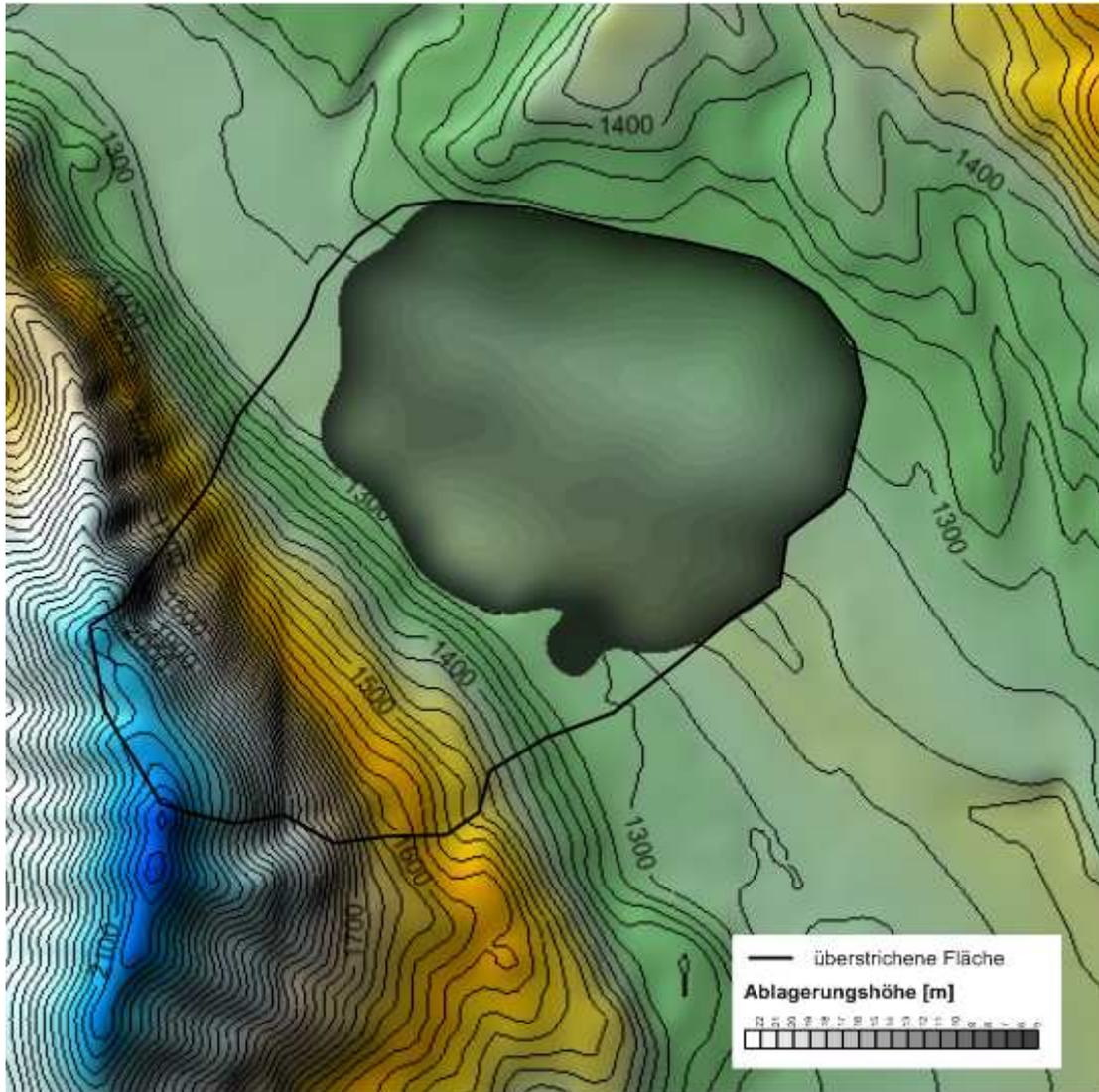


Abb. 25: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche des Bergsturzes Frank Slide

Fallbeispiel D: Seefeldbach (vgl. Pichler, 2011)

Die Mure Seefeldbach ist am 13. Juli 2002 in der Nähe des Dorfes Mühlwald, welches sich im nordöstlichen Teil von Südtirol (Italien) befindet abgegangen. Mühlwald befindet sich im Mühlwaldtal, einem Seitental des Ahrntals, welches wiederum ein Seitental des Pustertals ist. Das Mühlwaldtal ist ein enges mit hohen und steilen Bergen umgebenes Tal. Das Seefeldbachtal reicht von etwa 1300 m bis in eine Höhe von 2100 m. Die Steigung des Hanges variiert zwischen 50 % und 60 %, die des Ablagerungsgebietes liegt bei etwa 15 %. Wie in den Abbildungen 26 - 27 dargestellt, bewegte sich die Mure von Einzugsgebiet entlang des Hundsbaches bis zum Ablagerungsgebiet in der Nähe vom Wassermannhof.

Geologisch liegt das Mühlwaldtal im Altkristallin. Altkristallin beschreibt eine Gesteinseigenschaft die hauptsächlich aus Paragneisen, Glimmerschiefern, Amphiboliten, Kalkmarmoren, Muskowitpegmatiten und aus verhältnismäßig wenig Granitgneis aufgebaut ist.

Schwere Regenfälle lösten die Mure aus, die den Fluss im Tal erreichte und ihn wahrscheinlich an seiner östlichen Seite überfloss. Es wird davon ausgegangen, dass das Material aus den Ablagerungen einer verwitterten Moräne stammt. Infrastruktur und Häuser entlang der Ablagerung wurden schwer beschädigt.



Abb. 26: Orthofoto des untersuchten Gebietes Seefeldbach

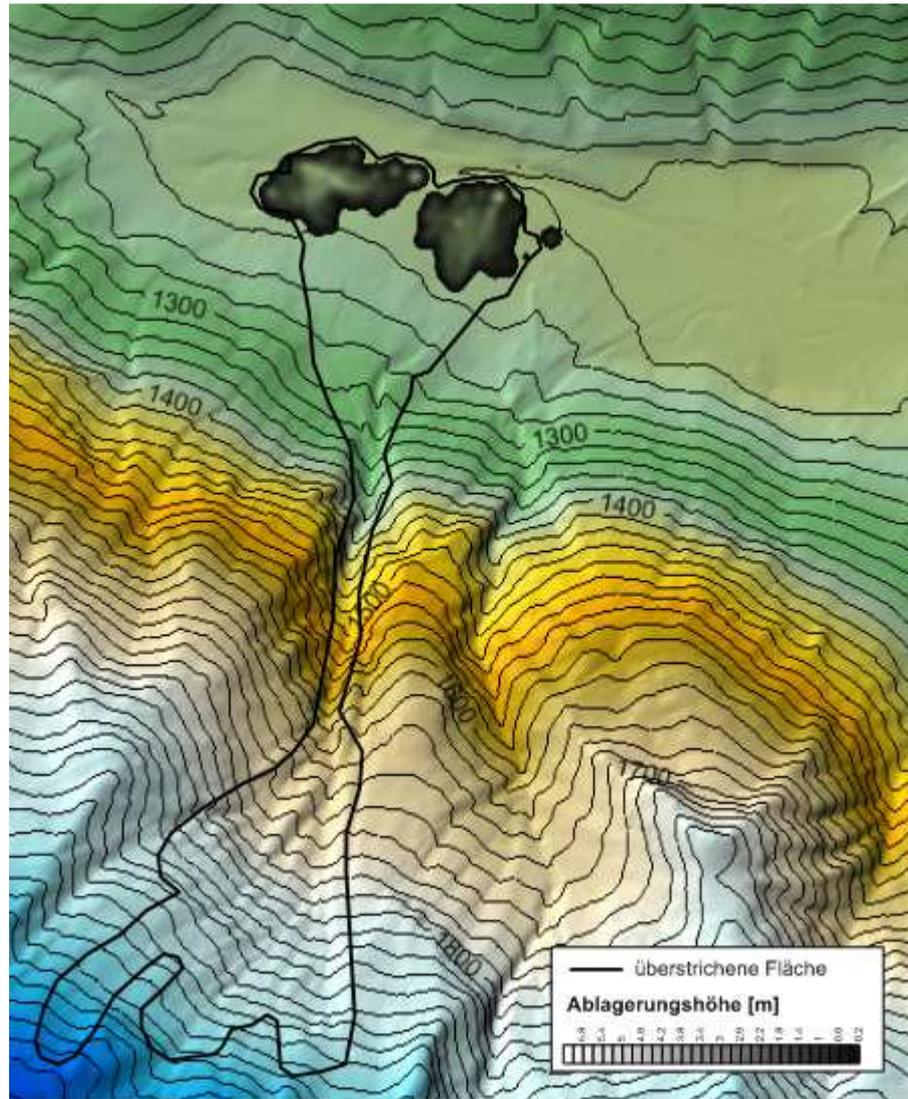


Abb. 27: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche der Mure Seefeldbach

Fallbeispiel E: Tates Cairn (J. Cepeda, 2007)

Im August 2005 stoppte in Tates Cairn (Hong Kong) eine 1000 m³ große Mure 200 m oberhalb der Kwun Ping Straße und zwischen den Wohngebieten Kwun Yam Shan und Kwun Yam Fa. Was diese Mure interessant macht, ist der sich hinter der bereits gerutschten Masse befindende zehnmal größere Abbruchkörper. Diese Masse besteht aus dem gleichen Material und nimmt falls sie abgleitet denselben Weg wie die bereits 2005 gerutschte Masse (Abb. 30). Diese Tatsache macht den Tates Cairn zu einem idealen Beispiel in dem eine Rückrechnung mit einer Prognose verbunden werden kann. Durch die mit Hilfe einer Rückrechnung (Abb. 28) exakt festgelegten Rheologieeigenschaften, lässt sich anschließend mit den auf das Material zutreffenden Werten eine gute Prognose für den zweiten Abbruchkörper treffen (Abb. 29).



Abb. 28: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche der Mure Tates Cairn



Abb. 29: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche der prognostizierten Mure Tates Cairn



Abb. 30: Luftbild der Mure Tates Cairn (Landslide Study report, 2007)

6) Vergleichsrechnungen

6.1) Fallbeispiel A

Um den Kanal zu berechnen, werden die Ausgangswerte als Mittelwerte angenommen und der sich ändernde Wert wird in einer gewissen Bandbreite um den Mittelwert verteilt. Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, werden die selben Werte wie in der Diplomarbeit von L. Pichler (2011) verwendet. Nur die Erosionstiefe in DAN-2D ist nicht mit der in DAN-3D vergleichbar, da in DAN-3D zusätzlich zur eingegebenen Erosionsfläche eine Erosionsrate benötigt wird. Die Materialaufnahme wird durch die Erosionsrate bestimmt und kann maximal bis zur Erosionsfläche erfolgen. In DAN-2D wird lediglich eine Erosionstiefe angegeben, die an der angegebenen Stelle auch vollständig abgetragen wird. In den folgenden Tabellen 3 - 8 werden die analysierten Werte dargestellt.

6.1.1) Verwendete Parameter

γ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
13	0,12	500	18	0,00064	2250
14	0,12	500	18	0,00064	2250
15	0,12	500	18	0,00064	2250
16	0,12	500	18	0,00064	2250
17	0,12	500	18	0,00064	2250
18	0,12	500	18	0,00064	2250
19	0,12	500	18	0,00064	2250
20	0,12	500	18	0,00064	2250
21	0,12	500	18	0,00064	2250
22	0,12	500	18	0,00064	2250
23	0,12	500	18	0,00064	2250

Tab. 3: Materialparameter, Variation der Wichte γ [kN/m³]

Y [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
18	0,08	500	18	0,00064	2250
18	0,09	500	18	0,00064	2250
18	0,10	500	18	0,00064	2250
18	0,11	500	18	0,00064	2250
18	<i>0,12</i>	500	18	<i>0,00064</i>	2250
18	0,13	500	18	0,00064	2250
18	0,14	500	18	0,00064	2250
18	0,15	500	18	0,00064	2250
18	0,16	500	18	0,00064	2250

Tab. 4: Materialparameter, Variation vom Reibungskoeffizienten f [-]

Y [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
18	0,12	100	18	0,00064	2250
18	0,12	200	18	0,00064	2250
18	0,12	300	18	0,00064	2250
18	0,12	400	18	0,00064	2250
18	<i>0,12</i>	500	18	<i>0,00064</i>	2250
18	0,12	600	18	0,00064	2250
18	0,12	700	18	0,00064	2250
18	0,12	800	18	0,00064	2250
18	0,12	900	18	0,00064	2250
18	0,12	1000	18	0,00064	2250

Tab. 5: Materialparameter, Variation vom Turbulenzkoeffizienten ξ [m/s²]

Y [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
18	0,12	500	10	0,00064	2250
18	0,12	500	12	0,00064	2250
18	0,12	500	14	0,00064	2250
18	0,12	500	16	0,00064	2250
18	<i>0,12</i>	500	18	<i>0,00064</i>	2250
18	0,12	500	20	0,00064	2250
18	0,12	500	22	0,00064	2250
18	0,12	500	24	0,00064	2250
18	0,12	500	26	0,00064	2250
18	0,12	500	28	0,00064	2250
18	0,12	500	30	0,00064	2250

Tab. 6: Materialparameter, Variation des inneren Reibungswinkels Φ_i [°]

Υ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
18	0,12	500	18	0,0	2250
18	0,12	500	18	0,1	2250
18	0,12	500	18	0,2	2250
18	0,12	500	18	0,3	2250
18	0,12	500	18	0,4	2250
18	0,12	500	18	0,5	2250
18	0,12	500	18	0,6	2250
18	0,12	500	18	0,7	2250
18	0,12	500	18	0,8	2250
18	0,12	500	18	0,9	2250

Tab. 7: Materialparameter, Variation der Erosionstiefe t [m]

Υ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]	\mathcal{V} [m ³]
18	0,12	500	18	0,00064	750
18	0,12	500	18	0,00064	1125
18	0,12	500	18	0,00064	1500
18	0,12	500	18	0,00064	1875
18	0,12	500	18	0,00064	2250
18	0,12	500	18	0,00064	2625
18	0,12	500	18	0,00064	3000
18	0,12	500	18	0,00064	3375
18	0,12	500	18	0,00064	3750
18	0,12	500	18	0,00064	4125
18	0,12	500	18	0,00064	4500

Tab. 8: Materialparameter, Variation vom Volumens \mathcal{V} [m³]

Die für jeden Materialparameter aufgelisteten Werte werden analysiert und die wichtigsten Ergebnisse in Form von Diagrammen dargestellt. Es sollen Aussagen über die Auslauflänge, die Ablagerungshöhe, die bedeckte Fläche, das gerutschte Volumen und die maximale Fließgeschwindigkeit der Masse getroffen werden. Jeder dieser Werte wird durch eine Kurve dargestellt, die anschließend linearisiert wird. Anhand der Steigung der linearisierten Kurve kann der Einfluss des veränderten Wertes auf die untersuchten Ergebnisse abgelesen werden.

6.1.2) Ergebnisse

In den folgenden Tabellen 31 – 36, wird die Variation der wichtigsten Ergebnisse aus den DAN-2D Berechnungen dargestellt und die größten Veränderungen kurz erläutert.

a) Wichte

Die Veränderung der Wichte hat fast keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Die maximale Ablagerungshöhe und das Volumen sind die einzigen Werte, die sich ändern und dies auch nur in einem zu vernachlässigenden Bereich.

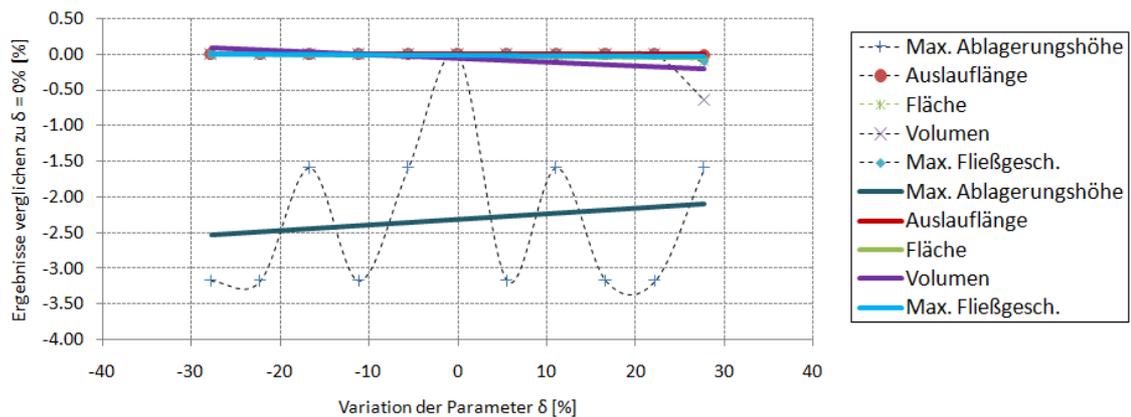


Abb. 31: Variation der Wichte: 13 - 23 kN/m³

b) Reibungskoeffizient

Durch den Reibungskoeffizienten ändern sich hauptsächlich die bedeckte Fläche und die maximale Ablagerungshöhe. Die Auslauflänge ändert sich auf die gesamte Länge des Massensturzes betrachtet um 6,81 %, was einen Unterschied von 101,49 m ergibt. Die bedeckte Fläche und die Auslauflänge nehmen mit steigendem Reibungskoeffizienten ab, die maximale Ablagerungshöhe hingegen nimmt zu.

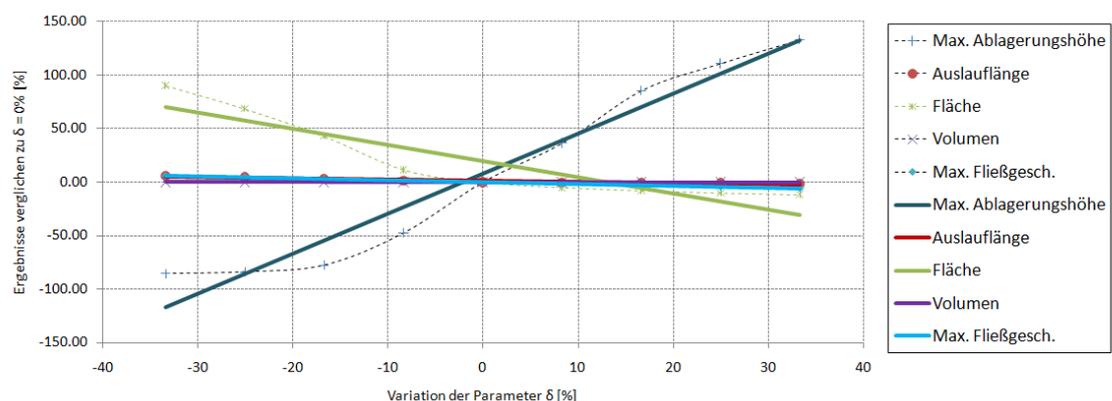


Abb. 32: Variation des Reibungskoeffizienten: 0,08 – 0,16

c) Turbulenzkoeffizient

Ansteigen des Turbulenzkoeffizienten löst ebenfalls einen Anstieg aller betrachteten Faktoren aus. Das ist damit zu erklären, dass in der Formel vom Basiswiderstand durch den Turbulenzkoeffizient geteilt wird und somit mit steigendem Turbulenzkoeffizient der Widerstand geringer wird. Das heißt mit einem größeren Turbulenzkoeffizienten bewegt sich der Massensturz schneller und kann sich über ein größeres Gebiet ausbreiten. Das ist auch in der Darstellung zu sehen, wo maximale Fließgeschwindigkeit und maximale Ablagerungshöhe prozentuell am meisten zulegen.

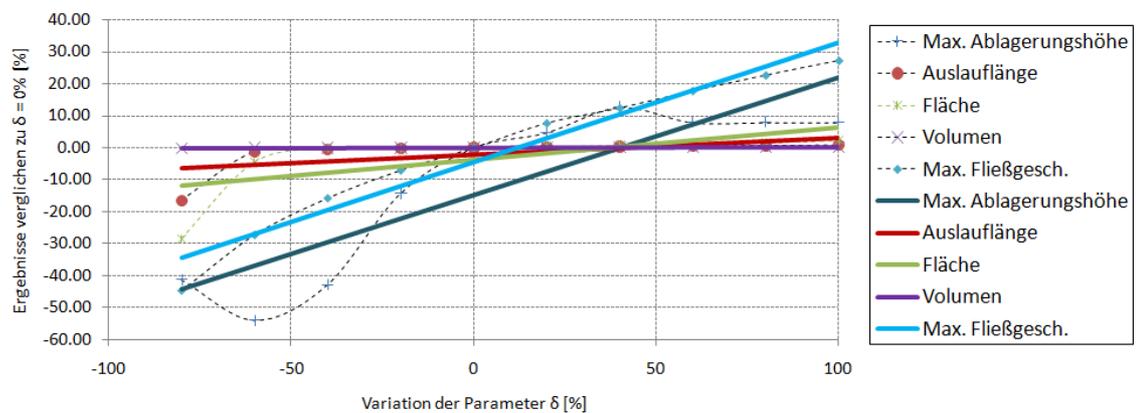


Abb. 33: Variation des Turbulenzkoeffizienten: 100 – 1000 m/s²

d) Innerer Reibungswinkel

Mit steigendem innerem Reibungswinkel nehmen die maximale Fließgeschwindigkeit und die bedeckte Fläche zu. Die Auslauflänge weist eine zu vernachlässigende Zunahme auf. Die maximale Ablagerungshöhe hingegen nimmt stark mit steigendem innerem Reibungswinkel ab, was zu einer flacheren Ablagerung führt.

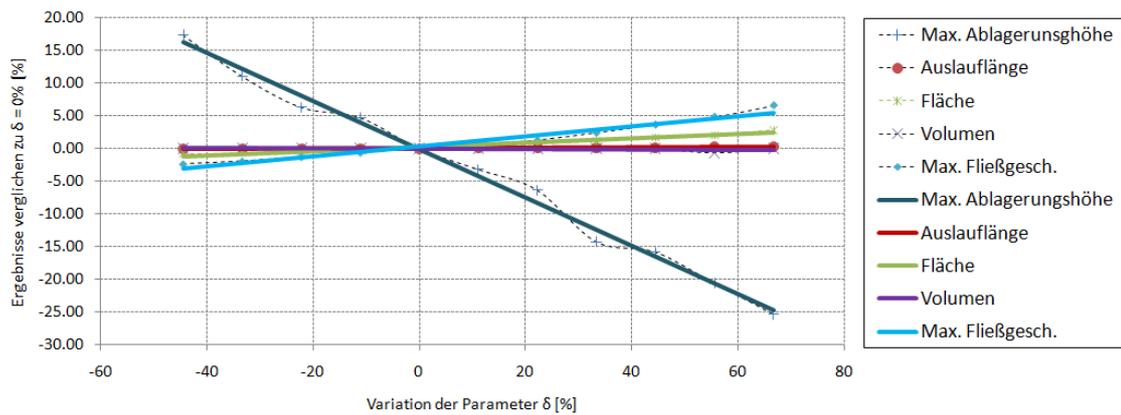


Abb. 34: Variation des inneren Reibungswinkels: $10^\circ - 30^\circ$

e) Erosionstiefe

Alle Ergebnisse nehmen mit steigender Erosionstiefe linear zu, wobei das Volumen den größten Zuwachs zu verzeichnen hat. Die große Volumensteigerung ist auf die konstante Aufnahme von Material längs der überstrichenen Fläche zurückzuführen.

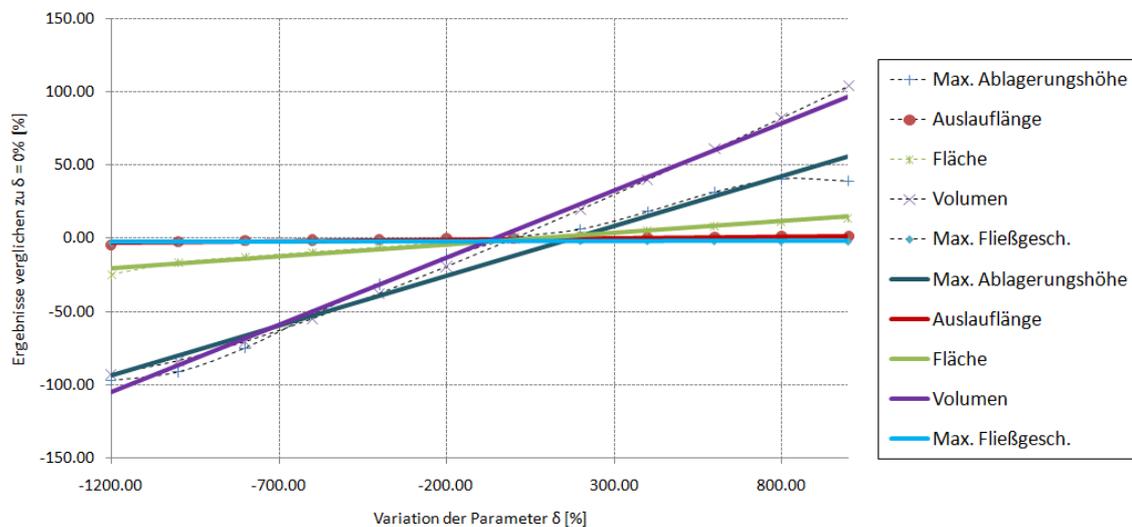


Abb. 35: Variation der Erosionstiefe: 0 – 0,9 m

f) Ausgangsvolumen

Die Variation des Ausgangsvolumens führt zu einer Steigerung fast aller Ergebnisse. Nur die Auslauflänge bleibt überraschenderweise nahezu unverändert. Volumen und maximale Ablagerungshöhe nehmen am stärksten zu

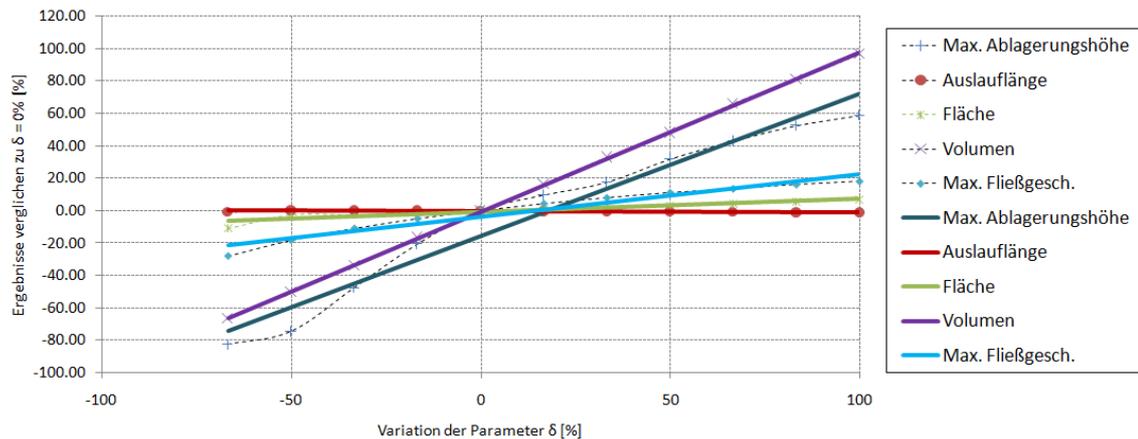


Abb. 36: Variation des Ausgangsvolumens: 750 – 4500 m³

Die Sensibilität von DAN-2D kann auch anhand der Gradienten (Abb. 37) betrachtet werden die aus den linearisierten Darstellungen gewonnen werden können. Mit Hilfe der Gradienten lässt sich schneller ein Überblick der verschiedenen Einflussfaktoren gewinnen und besser erkennen, welchen Einfluss sie auf die Ergebnisse haben. Es ist zu erkennen, dass der Reibungskoeffizient einen sehr großen Einfluss auf die maximale Ablagerungshöhe und die bedeckte Fläche hat. Er kann somit zur groben Einstellung der Berechnungsparameter verwendet werden. Mit dem Turbulenzkoeffizienten und dem inneren Reibungswinkel lassen sich kleine Korrekturen an der Berechnung vornehmen, da sie nicht so sensibel reagieren. Das Volumen ändert sich nur, wenn sich das Ausgangsvolumen ändert, sowie wenn durch die Erosion Material aufgenommen oder abgelagert wird. Trotz der für die Erosion in DAN-2D und DAN-3D unterschiedlichen Eingabeparameter, weisen die ermittelten Ergebnisse die selben Einflüsse bei einer Steigerung oder Verminderung des Erosionsparameters auf.

Die geringe Veränderung bei der Auslauflänge ist darauf zurückzuführen, dass sich die Abbruchmasse in DAN-2D gleichmäßig über die gesamte Abflussbreite verteilt, d.h. für einen bestimmten Zeitpunkt ist die Abflusshöhe für jede Y-Koordinate über die gesamte Breite des Abflusses gleich. Somit wird das sich in einem Winkel von 45° erweiternde Ablagerungsgebiet immer größer und die Masse kommt schneller zum Stillstand,

wodurch sich die Auslauflänge kaum verändert. Dies ist bei DAN-3D nicht der Fall, da sich die Masse frei über die gesamte Fläche ausbreiten kann. So hat der Massestrom in der Mitte eine größere Ablagerungshöhe und ist zu den Seiten hin abgeflacht.

Der direkte Vergleich mit den Ergebnissen aus der DAN-3D Rechnung (Abb. 38) zeigt, dass die beiden Programme annähernd die gleichen Veränderungen bei gleicher Variation der Rheologieparameter aufweisen. Wobei in DAN-2D die Veränderungen geringer ausfallen als in DAN-3D. Als einziger Wert hat der Turbulenzkoeffizient bei der maximalen Ablagerungshöhe in DAN-2D ein anderes Vorzeichen als in DAN-3D.

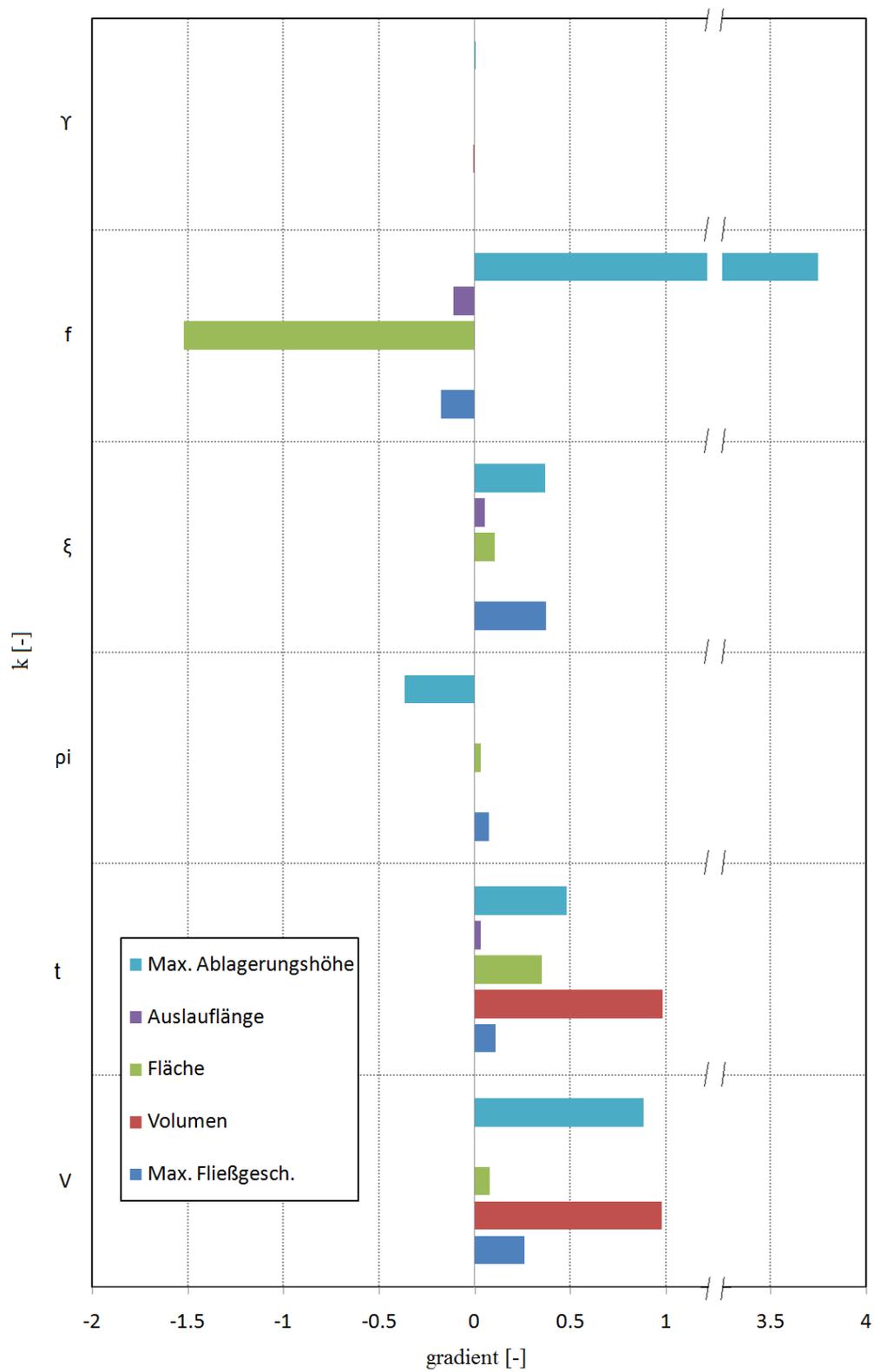


Abb. 37: Gradienten der Regressionsgeraden für DAN-2D

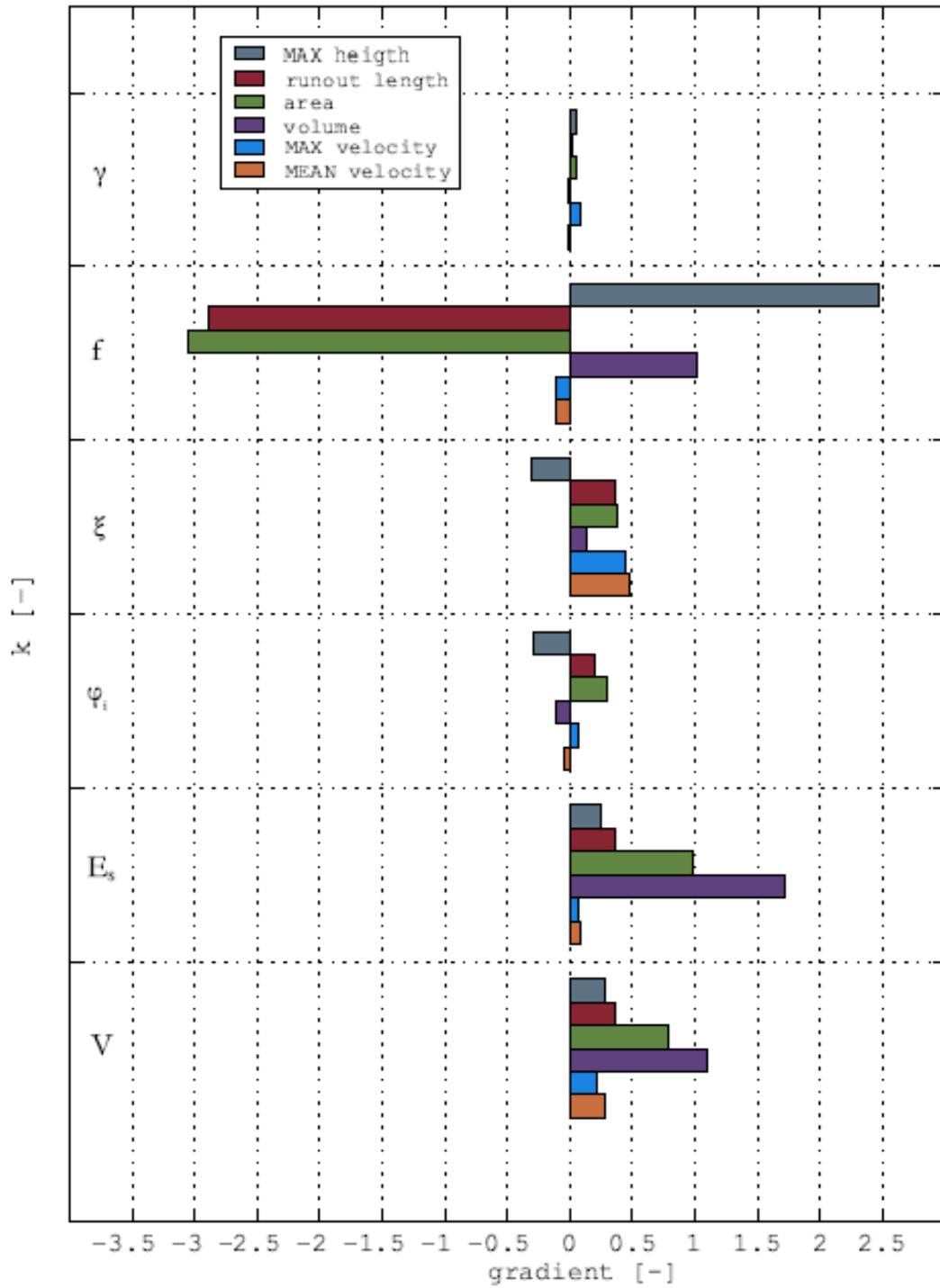


Abb. 38: Gradienten der Regressionsgeraden für DAN-3D (L. Pichler, 2011)

6.2) Fallbeispiel B:

Der Bergsturz Punta Thurwieser überströmt drei verschiedene Materialien. Das bedeutet, dass bei den Materialeigenschaften die drei Materialien angegeben und die jeweils zutreffenden Rheologien eingetragen werden müssen. Außerdem ist die Thurwieser ein sehr turbulenter Bergsturz, was durch die hohen Turbulenzfaktoren verdeutlicht wird. Die Voellmyparameter, die am besten mit dem tatsächlichen Ereignis übereinstimmen, wurden in der Publikation von R. Poisel/A. Preh/ O. Hungr, 2008 erläutert und werden ebenfalls für dieses Fallbeispiel verwendet (Tab. 9).

Eine weitere interessante Eigenschaft der Thurwieser ist ihr Massenstrom, der sich im Laufe der Massenbewegung aufteilt, um sich gegen Ende des Massensturzes wieder zu vereinen (Abb. 39). Diese Tatsache stellt die 2D Rechnung vor eine Herausforderung, da dort nur ein durchgehender Massenstrom betrachtet werden kann.

Um dieses Problem zu lösen, wurde für den Abschnitt in dem sich die Masse aufteilt, die vom Massensturz überstrichene Fläche betrachtet und die beiden Pfade addiert. So erhält man eine realistische Breite mit der anschließend in DAN-2D weitergerechnet werden kann. Um die Geländekubatur für die Berechnung in DAN-2D zu erhalten, wurde der Schnitt in dem Pfad gewählt, in dem der Großteil der Abbruchmasse entlang gleitet.

6.2.1) Verwendete Parameter

	Υ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]
Ablösung	20	0,45	2000	35	0
Gletscher	20	0,10	1000	35	0
Fels	20	0,45	2000	35	0

Tab. 9: Materialparameter Punta Thurwieser

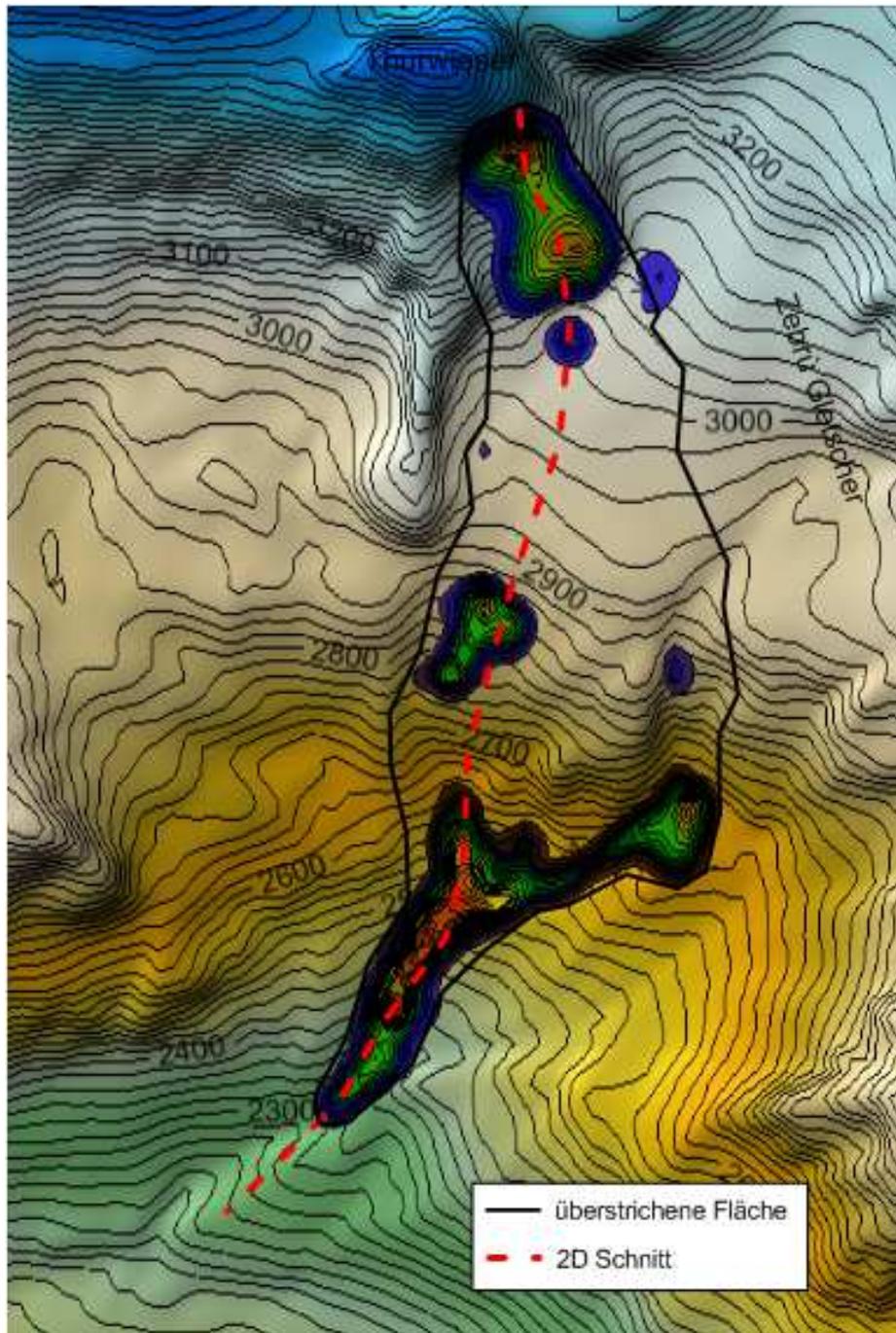


Abb. 39: Ausgangs- und Endlage des Bergsturzes Punta Thurwieser

6.2.2) Ergebnisse

Die für die Punta Thurwieser ermittelten Fahrböschungen, die Energielinien sowie das sich aus der DAN-3D Berechnung ergebende Ende des Bergsturzes werden in Abbildung 40 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Berechnung mit DAN-3D die geringste Auslauflänge (2361,74 m) aufweist. Die mit DAN-2D durchgeführte 2,5D Berechnung weist eine Auslauflänge von 2457,26 m und die 2D Rechnung eine Auslauflänge von 2711,57 m auf. Aus den immer größer werdenden Auslauflängen, ergeben sich immer flachere Fahrböschungswinkel, die in der 3D Rechnung bei $26,54^\circ$, in der 2,5D Rechnung bei $26,27^\circ$ und in der 2D Rechnung noch bei $25,23^\circ$ liegen. Die Winkel der Energielinie nehmen ebenfalls ab. In der 2,5D Rechnung liegt er bei $26,02^\circ$ und in der 2D Rechnung noch bei $25,14^\circ$.

Auch die maximale Geschwindigkeit liegt mit 52,81 m/s in DAN-2D und 58,42 m/s in DAN-3D in der gleichen Größenordnung.

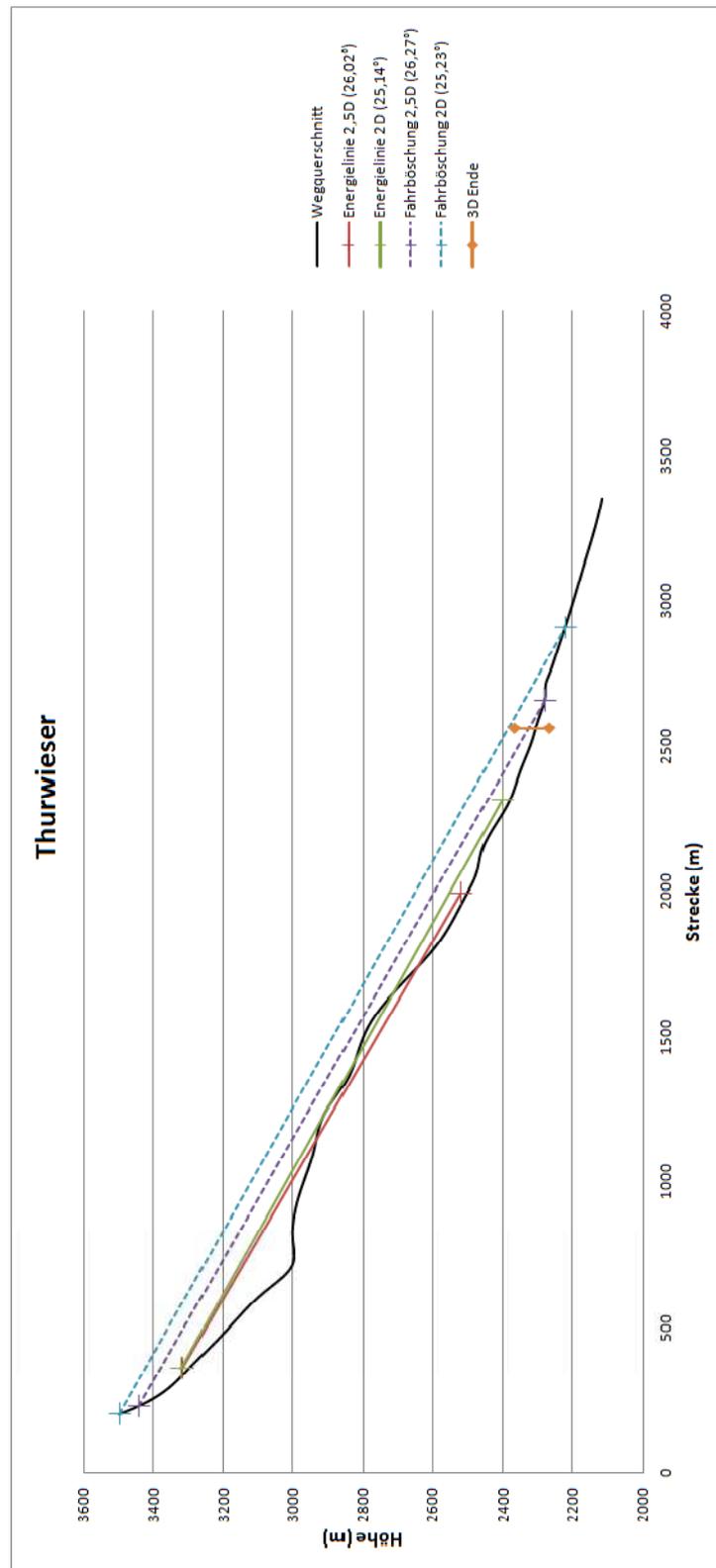


Abb. 40: Fahrböschung und Energelinie Fallbeispiel B

6.3) Fallbeispiel C:

Beim Frank Slide handelt es sich um einen häufig untersuchten Bergsturz, für den die am besten mit dem tatsächlichen Ereignis übereinstimmenden Voellmyparameter aus der Publikation von Oldrich Hungr 2008 übernommen wurden (Tab. 10).

Der Frank Slide ist ein homogener Bergsturz der in einer geraden Linie den Hang hinuntergleitet. So lässt sich der Schnittverlauf zwischen Ausgangs- und Endlage vom Frank Slide einfach festlegen (Abb. 41). Der Turbulenz- (ξ) und den Reibungskoeffizient (f) sind die von Hungr für die erste Prognose von Bergstürzen abgeleiteten Werte. Mit diesen Voraussetzungen bietet er sich zu einem Vergleich zwischen der 2D und 3D Rechnung an.

Des Weiteren wird er anschließend noch zur Untersuchung des Einflusses der Breite auf die Auslauflänge verwendet. Bei diesem Versuch wird die Breite des Abflusskanals über- und unterschätzt. Anschließend werden die Ausflusslängen gemessen und der Einfluss der Breite analysiert.

6.3.1) Verwendete Parameter

γ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]
20	0,1	500	30	0

Tab. 10: Materialparameter Frank Slide

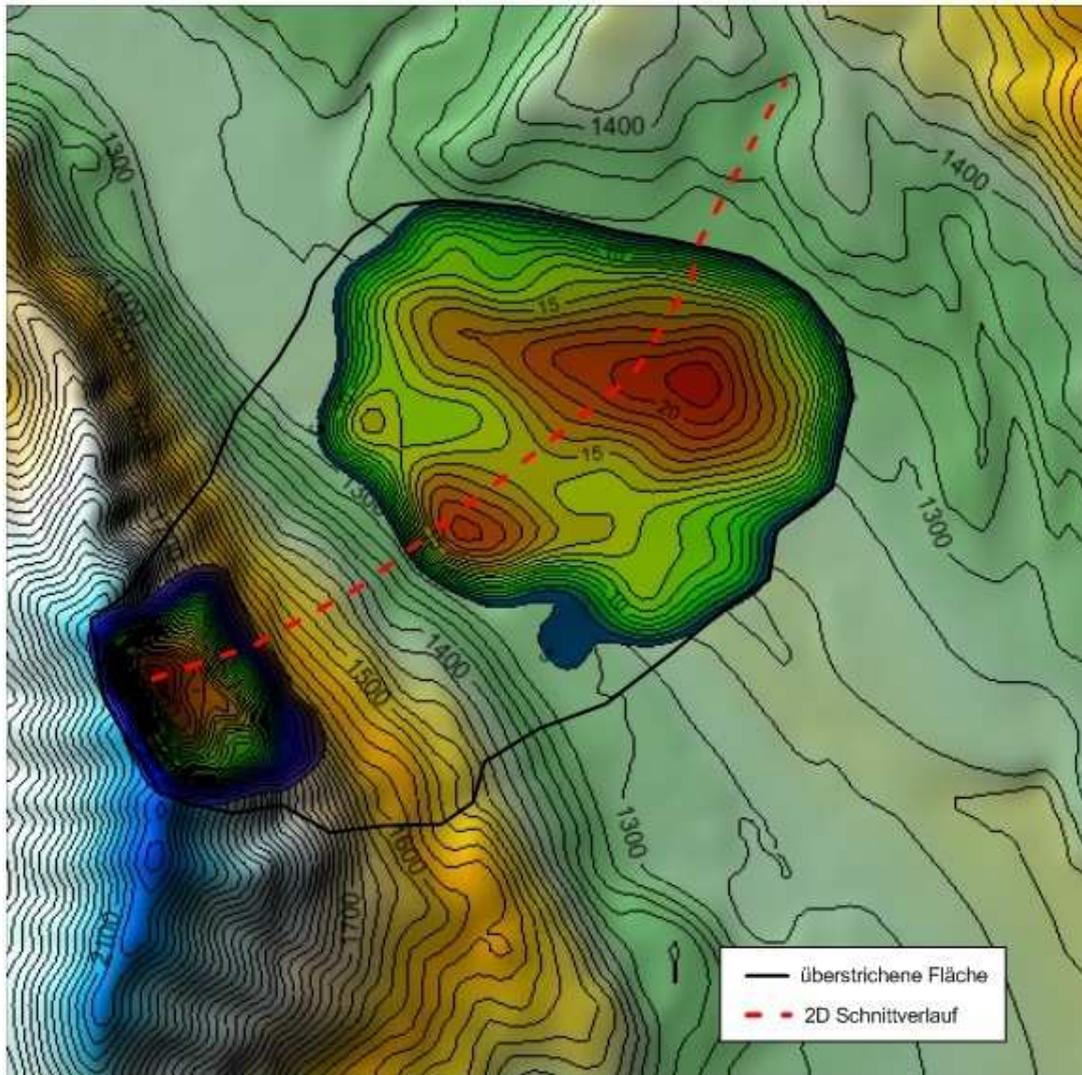


Abb. 41: Ausgangs- und Endlage des Bergsturzes Frank Slide

6.3.2) Ergebnisse

Die, für den Bergsturz Frank Slide ermittelten Fahrböschungen, Energielinien sowie das mit Hilfe von DAN-3D ermittelte Ende der Massenbewegung, werden in der Abbildung 42 dargestellt. Anhand dieser graphischen Darstellung lässt sich die Auslauflänge der beiden DAN-Programme vergleichen. Sie liegt für die 3D Rechnung bei 2970,94 m, für die 2,5D Rechnung bei 2910,82 m und für die 2D Rechnung bei 3387,6 m. Beim Frank Slide erkennt man, dass bei der 2,5D Rechnung die Auslauflänge 60 m geringer ist als für die 3D Rechnung. Die Fahrböschungswinkel bestätigen die Ergebnisse der Auslauflängen und liegen für die 3D Rechnung bei $15,04^\circ$, für die 2,5D Rechnung bei $15,43^\circ$ und für die 2D Rechnung bei $12,60^\circ$. Auch die Winkel der Energielinien nehmen mit steigender Auslauflänge ab. Er liegt in der 2,5D Rechnung bei $18,16^\circ$ und in der 2D Rechnung bei $15,55^\circ$. In der Abbildung 42 sind ebenfalls die Energielinie und die Fahrböschung für die Berechnung mit konstanter Abflussbreite eingetragen. Sie liegen mit den Winkeln von $16,00^\circ$ und $13,12^\circ$ zwischen denen der 2,5D und der 2D Berechnung.

Bei der mit DAN-2D durchgeführten Rechnung ist die maximale Geschwindigkeit mit $87,43 \text{ m/s}$ um $18,07 \text{ m/s}$ langsamer als in der mit DAN-3D durchgeführten Berechnung ($105,5 \text{ m/s}$).

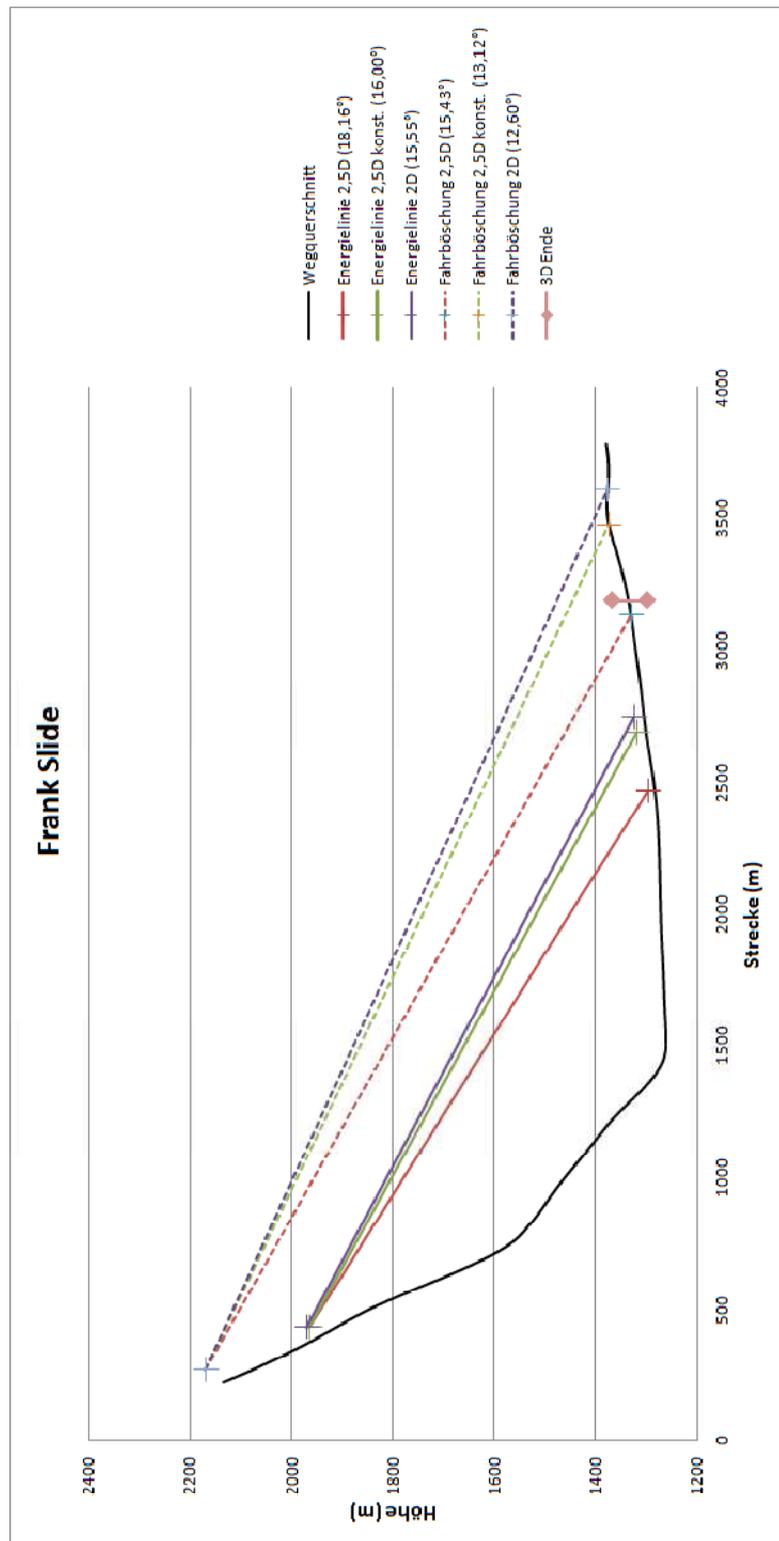


Abb. 42: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel C

6.4) Fallbeispiel D:

In Seefeldbach liefen zwei Murengänge mit zusammenhängenden Ablagerungsbereichen gleichzeitig ab. Um das Modell zu vereinfachen und sich auf das wesentliche zu konzentrieren, wurde nur der längere Murgang betrachtet und dafür das Ausgangsvolumen angepasst.

An diesem Beispiel ist das weitläufige Einzugsgebiet und der sehr flache Abbruchkörper (max. 0,6 m), der sich zum Schluss der Bewegung in zwei Massenströme aufteilt, interessant. Diese Eigenschaften erfordern ebenso wie in Fallbeispiel C das Abmessen und Addieren der überstrichenen Fläche, um eine 2D Rechnung möglichst genau anzupassen. Die Geländekubatur wird auch hier durch einen Schnitt entlang des Pfades mit dem größten Abfluss gewählt (Abb.43). Es muss darauf geachtet werden, das weitläufige Einzugsgebiet möglichst realitätsnah im 2D Modell darzustellen. Zur Berechnung des Seefeldbaches werden die Voellmyparameter verwendet, die in der Diplomarbeit von L. Pichler das beste Ergebnis geliefert haben (Tab. 11).

6.4.1) Verwendete Parameter

γ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]
18	0,1	500	18	0

Tab. 11: Materialparameter Seefeldbach

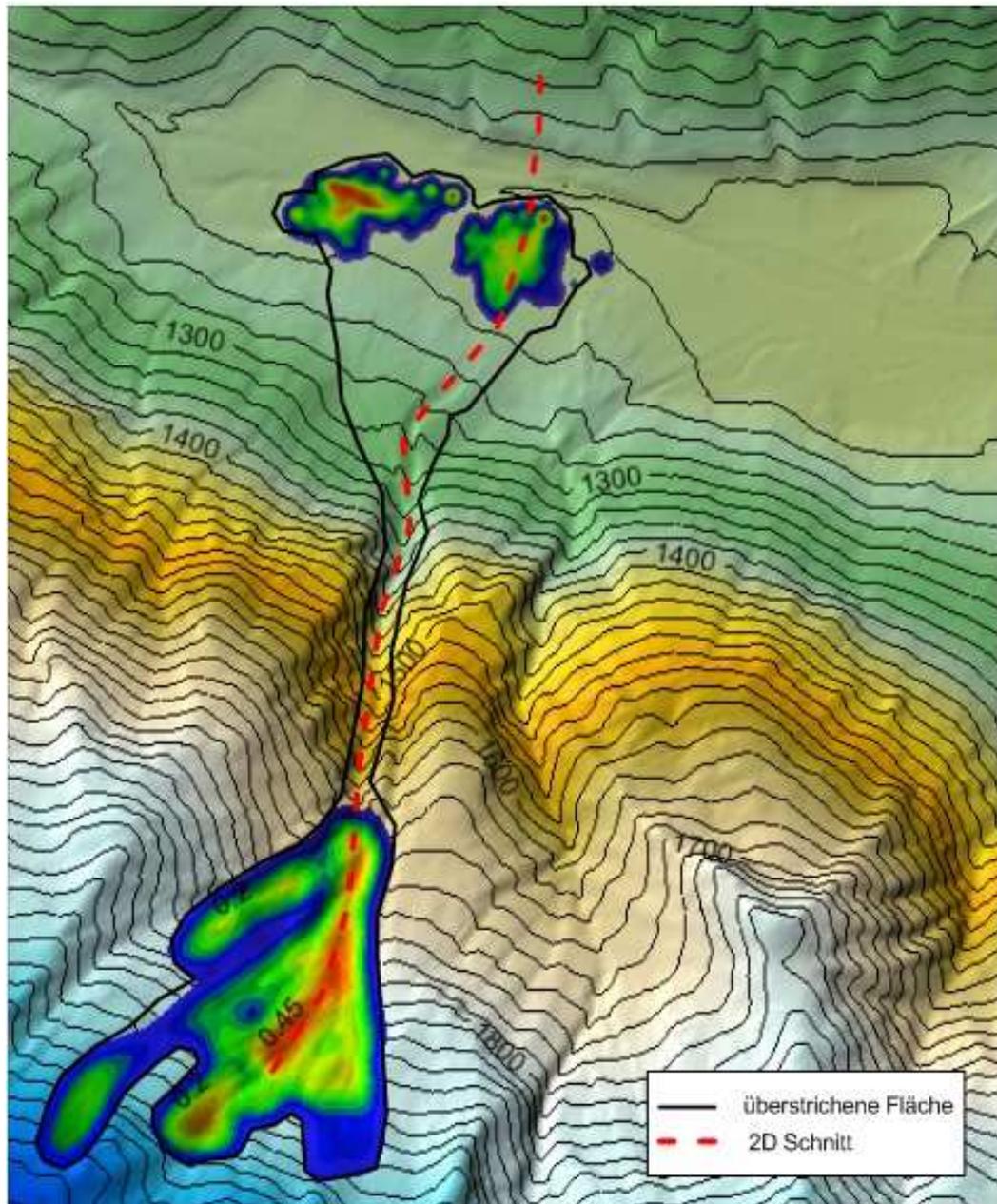


Abb. 43: Anfangs- und Endlage der Mure Seefeldbach

6.4.2) Ergebnisse

Die für die Mure Seefeldbach ermittelten Fahrböschungen, Energielinien, sowie das aus der Berechnung mit DAN-3D stammende Ende der Massenbewegung werden in der Abbildung 44 dargestellt. Mit Hilfe dieser Abbildung lassen sich die berechneten Auslauflängen vergleichen. Sie betragen für die 3D Rechnung 1326,16 m, für die 2,5D Rechnung 1331,94 m und für die 2D Rechnung 1329 m. Mit einem maximalen Unterschied von 5,78 m liefern die drei Berechnungsvarianten annähernd die gleichen Ergebnisse. Die, sich daraus ergebenden Fahrböschungswinkel sind ebenfalls annähernd identisch. Sie betragen für die 3D Rechnung $26,54^\circ$, für die 2,5D Rechnung $26,68^\circ$ und für die 2D Rechnung $26,73^\circ$. Auch die Energielinien liegen mit Winkeln von $27,20^\circ$ für die 3D Rechnung und $27,28^\circ$ für die 2D Rechnung vernachlässigbar nahe zusammen.

Die DAN-2D Berechnung mit 27,16 m/s hat im Vergleich zur DAN-3D mit 38,42 m/s eine um 11,26 m/s langsamere maximale Abflussgeschwindigkeit.

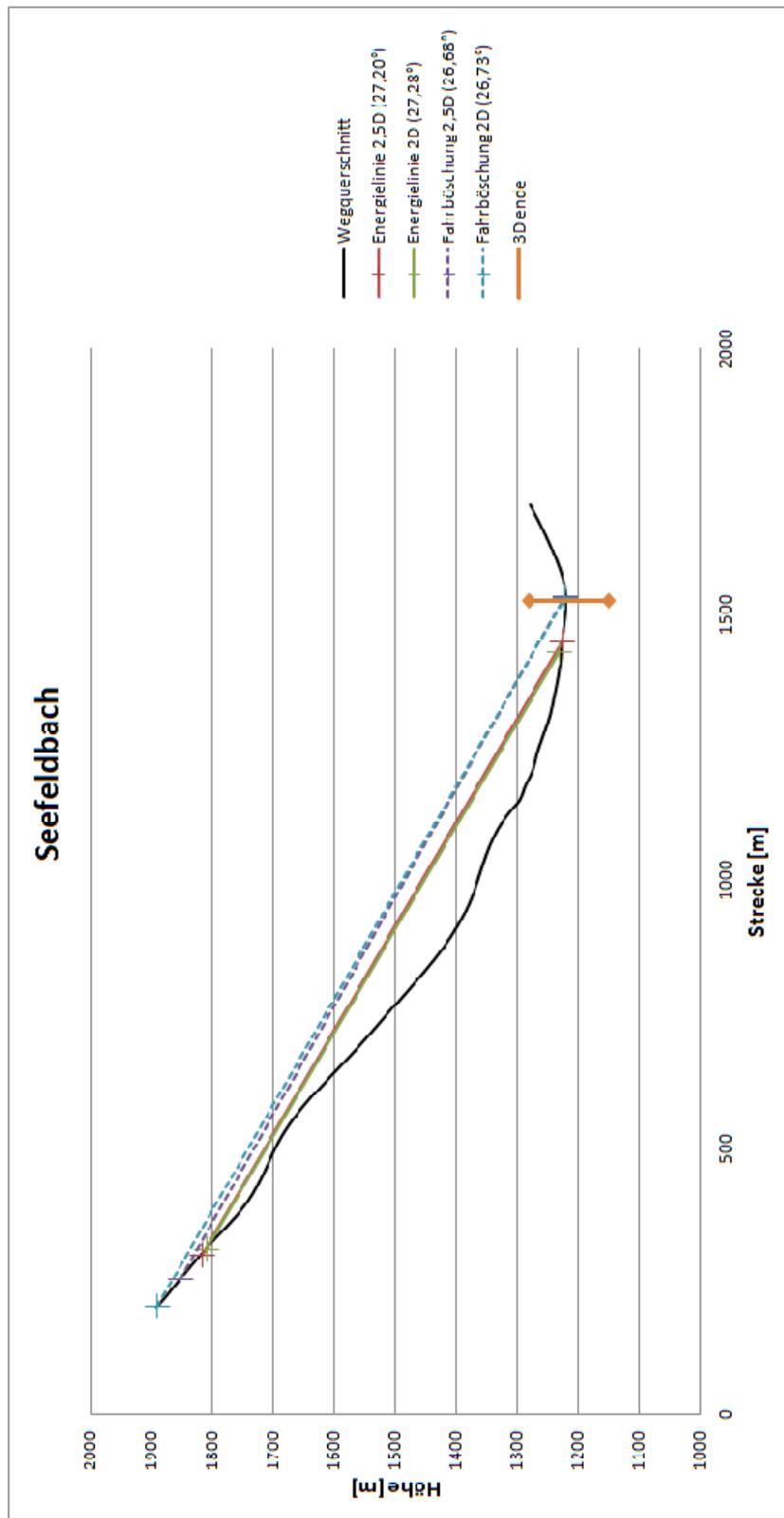


Abb. 44: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel D

6.5) Fallbeispiel E:

Tates Cairn ist ein interessantes Beispiel, da hinter der mit 1000 m^3 eher kleinen und bereits 2005 abgebrochenen Masse eine mit 10000 m^3 zehnmal so große Masse abbruchgefährdet ist. Diese besteht aus dem gleichen Material und wird voraussichtlich auch denselben Weg talwärts nehmen, wie die kleinere bereits gerutschte Masse. Anhand der ersten Masse können jetzt die für das Material besten Rheologieparameter ermittelt werden, um sie anschließend auf die abbruchgefährdete Masse anzuwenden. So lässt sich mit Hilfe der rückgerechneten Werte eine gute Prognose für die neuerliche Rutschung abliefern. Die Prognose kann nun dazu verwendet werden Sicherheitsmaßnahmen auszuarbeiten, damit bei dem 10000 m^2 Massensturz keine größeren Schäden entstehen.

Die Materialparameter wurden aus dem Vortrag von José Cepeda vom „International Forum on Landslide Disaster Management 2007“ (Tab. 12) entnommen, in dem eine Berechnung des Bates Cairn mit DAN-3D vorgestellt wurde.

Um die Geländekubatur für die 2D Berechnung zu erhalten, wurde auch hier für den Massensturz und die Prognose ein Schnitt entlang der durch die Abbruchmasse überstrichenen Fläche gelegt (Abb. 45 – 46).

6.5.1) Verwendete Parameter

γ [kN/m ³]	f [-]	ξ [m/s ²]	Φ_i [°]	t [m]
20	0,27	1000	35	0

Tab. 12: Materialparameter Bates Cairn



Abb. 45: Ausgangs- und Endlage der Bates Cairn Mure (Abbruch)

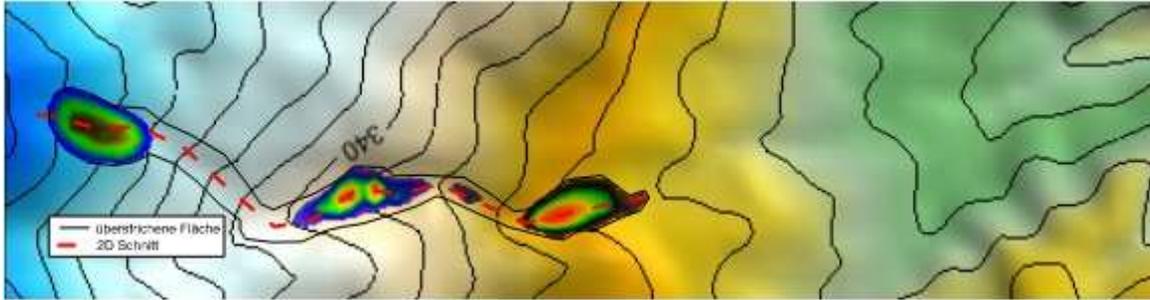


Abb. 46: Ausgangs- und Endlage der Tates Cairn Mure (Prognose)

6.5.2) Ergebnisse

Die ermittelten Fahrböschungen, die Energielinien, sowie die mit DAN-3D ermittelte größte Ausdehnung der Mure Tates Cairn, werden in den Abbildungen 47 - 48 dargestellt. Durch diese graphischen Darstellungen, lassen sich die Auslauflängen von DAN-2D und DAN-3D vergleichen.

Die für den Fall Abbruch berechneten Auslauflängen liegen für 3D bei 306,41 m, für 2,5D bei 306,18 m und für 2D bei 306,22 m. Der Unterschied dieser drei Auslauflängen ist mit 0,23 m vernachlässigbar. Der Fahrböschungswinkel ist für die drei Berechnungsvarianten mit $23,55^\circ$ identisch. Der Winkel der Energielinie ist mit $24,03^\circ$ für die 2,5D Rechnung und $23,96^\circ$ für die 2D Rechnung nahezu gleich.

Die maximale Geschwindigkeit ist für die 2D Rechnung 11,28 m/s und für die 3D Rechnung 13,12 m/s. Die Abweichung der beiden Berechnungsvarianten liegt bei 1,84 m/s.

Bei der Prognose liegt der maximale Auslauflängenunterschied bei 39,23 m, wobei für dieses Beispiel die Auslauflänge in der 3D Berechnung mit 592 m am größten ist. Die 2,5D Rechnung liefert eine Auslauflänge von 559,08 m und die 2D Rechnung eine von 552,77 m. Der Fahrböschungswinkel steigt mit abnehmender Auslauflänge und beträgt für die 3D Rechnung $20,42^\circ$, für die 2,5D Rechnung $20,87^\circ$ und für die 2D Rechnung $21,02^\circ$. Der Winkel der Energielinie ist mit $23,37^\circ$ bei der 2,5D Rechnung und $23,18^\circ$ für die 2D Rechnung nahezu identisch.

Die Berechnung mit DAN-2D weist eine maximale Geschwindigkeit von 17,63 m/s auf. Im Vergleich zur DAN-3D Berechnung mit einer maximalen Geschwindigkeit von 21,19 m/s, hat die 2D Rechnung eine um 3,56 m/s geringere maximale Geschwindigkeit.

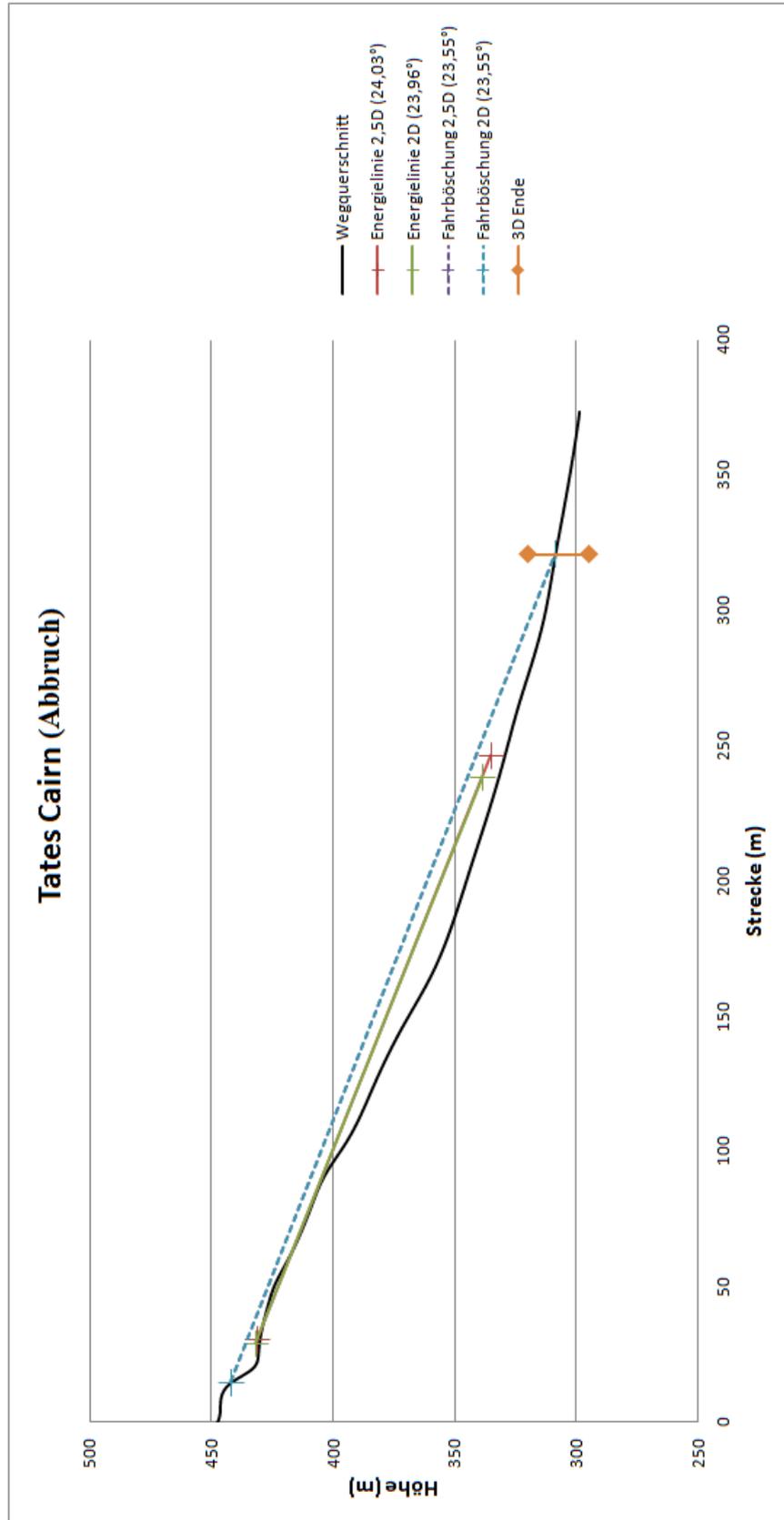


Abb. 47: Fahrböschung und Energierlinie Fallbeispiel E (Abbruch)

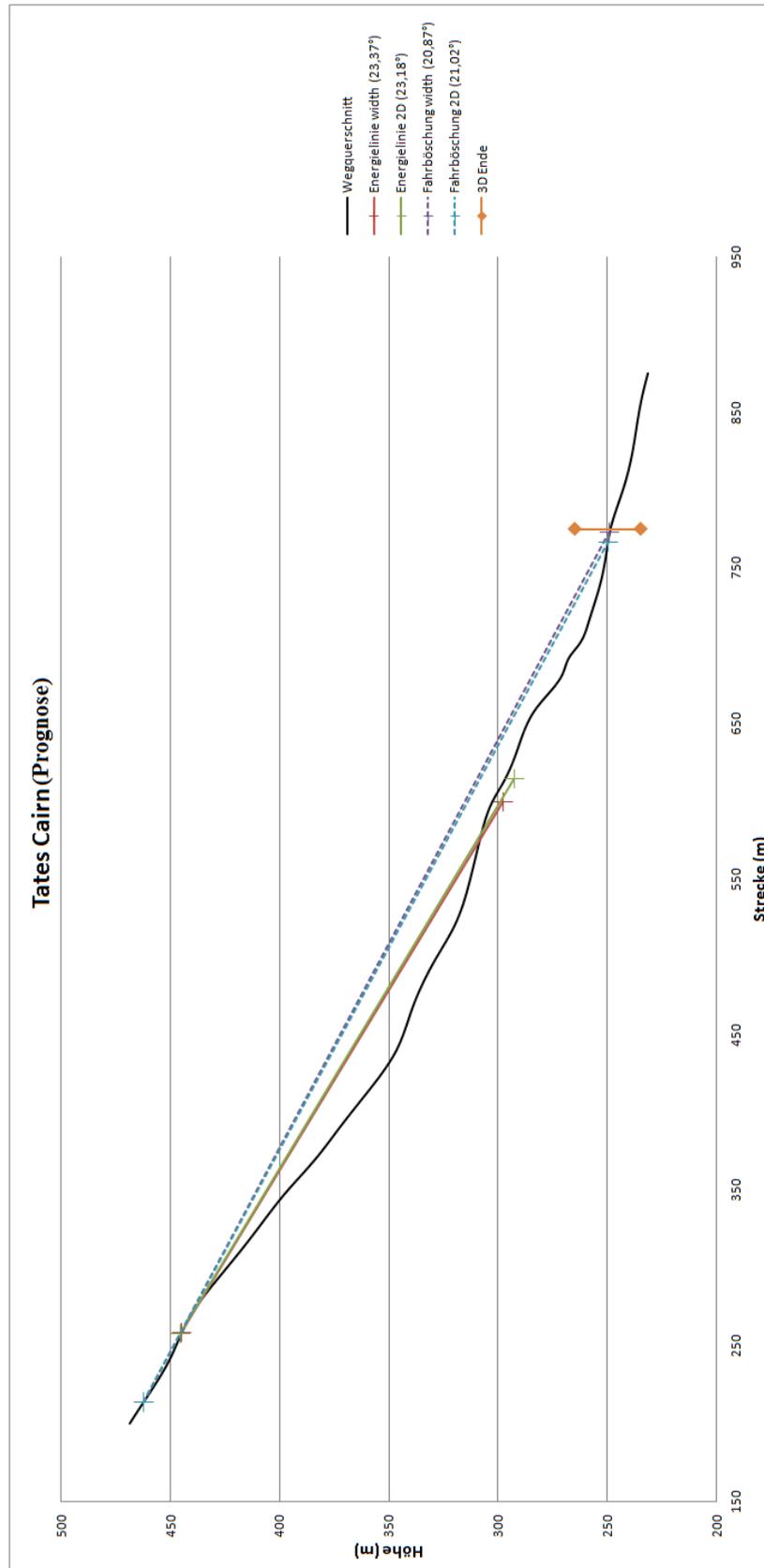


Abb. 48: Fahrböschung und Energienlinie Fallbeispiel E (Prognose)

7) Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die in DAN-2D durch Exceltabellen und in DAN-3D durch digitale Höhenmodelle ausgegebenen Ergebnisse, werden mit Hilfe von Abbildungen und Tabellen so dargestellt, dass die Ergebnisse verglichen werden können.

7.1) Vergleich der Auslauflängen

Die Auslauflänge ist das wichtigste Ergebnis, das mit Hilfe von DAN-2D und DAN-3D ermittelt werden kann. Im Rahmen der Diplomarbeit wurden anhand von vier Beispielen die Ergebnisse der beiden Programme ermittelt, um sie anschließend zu vergleichen.

In DAN-2D kann durch Angabe der Breite in einer als 2,5D bezeichneten Konfiguration gerechnet werden. Oft ist die Breite der Auslaufstrecke nur schwer oder nicht zu ermitteln. In einem solchen Fall kann in einer reinen 2D Konfiguration gerechnet werden. Die in den gewählten Beispielen ermittelten Breiten entsprechen denen aus den vorhergehenden 3D Berechnungen. Somit sollten die erhaltenen Auslauflängen der 3D und der 2,5D Rechnung nahezu identisch sein.

In den Abbildungen 40, 42, 44, 47, 48 wurden die für jedes Beispiel ermittelten Fahrböschungen und Energielinien graphisch dargestellt. Die Fahrböschung stellt, wie bereits vorher beschrieben, das oberste und unterste Ende des Massensturzes dar, die Energielinie den obersten und untersten Punkt des Massenschwerpunktes. Die Fahrböschung wird verwendet, um Auslauflängen zu vergleichen. Zusätzlich wurde das sich aus der 3D Rechnung ergebende, unterste Ende der Masse in die Abbildung eingetragen. Die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsansätze werden mittels der Abbildungen verglichen.

Wie erwartet liegen die Auslauflängen der 3D und der 2,5D Rechnung mit den gleichen Breiten nahe zusammen. Die größte Abweichung von rund 100 m ist bei der Thurwieser festzustellen. Diese Abweichung ist nicht überraschend und lässt sich mit der Spaltung und anschließenden Wiedervereinigung des Massestroms erklären. Beim Auftreten solcher Ereignisse ist die 3D Rechnung klar im Vorteil, da sie ihre Berechnung auf genaue Lagekoordinaten stützen kann, wo hingegen der 2,5D Rechnung nur ein Geländeschnitt und eine abgemessene oder geschätzte Breite zur Verfügung stehen.

Um nicht auf unbekannte oder ungenau bestimmte Breiten angewiesen zu sein, kann in DAN-2D auch in der reinen 2D Konfiguration gerechnet werden. Hier wird die Massenbewegung ohne Angabe der Breite berechnet. Wie aus den Abbildungen

ersichtlich, ist die 2D Rechnung für den Tates Cairn und den Seefeldbach sehr nah oder sogar identisch mit der 2,5D Rechnung. Die anderen beiden Beispiele Thurwieser und Frank Slide werden durch die 2D Rechnung überschätzt. Man kann also sagen, dass die 2D Rechnung der 2,5D Rechnung entspricht, oder auf der sicheren Seite liegt.

Zusätzlich wurde beim Frank Slide eine Zwischenlösung ausprobiert. Die Abbruchmasse wurde mit seiner vorherbestimmten Masse und Breite eingegeben und die Breite am unteren Ende der Abbruchmasse wurde als konstante Breite für die restliche überstrichene Fläche festgelegt. Wie zu erwarten, lag das Ergebnis dieser Anordnung zwischen dem 2,5D und 2D Ergebnissen. Diese Berechnungsmöglichkeit bietet sich bei Massen wie dem Frank Slide an, die geradlinig den Berg hinuntergleiten und sich nicht in zwei Masseströme aufteilen.

7.2) Vergleich der maximalen Geschwindigkeit

In allen vier Fallbeispielen ist die maximale Geschwindigkeit für die DAN-3D Rechnung größer als für die DAN-2D Rechnung. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Ergebnissen aus DAN-2D und DAN-3D, ist mit 10% für das Fallbeispiel B Punta Thurwieser am geringsten und für das Fallbeispiel D Seefeldbach mit 29% am größten. Dies kann damit erklärt werden, dass sich die Abbruchmasse in der DAN-2D Rechnung über die gesamte Breite gleichmäßig ausbreitet und somit die Front eine gleichmäßige Ablagerungshöhe und Abflussgeschwindigkeit aufweist. In DAN-3D kann sich die Masse frei über die gesamte Fläche ausbreiten, wodurch der Massestrom in der Mitte eine größere Ablagerungshöhe und eine höhere Geschwindigkeit aufweist.

7.3) Einfluss der Breite

Da sich die Breite für die 2,5D Rechnung nicht immer einfach prognostizieren lässt, besteht die Gefahr einer falschen Annahme. Um den Einfluss der Breite auf die Auslauflänge besser abschätzen zu können wurde an den Fallbeispielen C und D eine Über- und Unterschätzung der Abflussbreiten untersucht. Dafür wurde die Breite der überstrichenen Fläche von -20% bis +20% verändert und untersucht, welchen Einfluss die Veränderung auf die Auslauflänge ausübt (Tab. 13).

Breitenveränderung	Frank Slide	Seefeldbach
-20 %	+7,32 %	+0,36 %
-10 %	+3,53 %	+0,17 %
0 %	0 %	0 %
+10 %	-3,25 %	-0,15 %
+20 %	-6,09 %	-0,27 %

Tab. 13: Prozentuale Auslauflängenveränderung in Abhängigkeit der Abflussbreite

An den Ergebnissen ist ersichtlich, dass sich bei einer Überschätzung der Abflussbreite die Auslauflänge verringert und es bei einer Unterschätzung der Abflussbreite zur Überschätzung der Auslauflänge kommt.

Die geringere Auslauflänge ist durch die größere Fläche zu erklären, die der Masse durch die vergrößerte Abflussbreite zur Verfügung steht. Auf dieser zusätzlichen Fläche kann sich das Material ausdehnen und seine Energie schneller abbauen. Bei einer Verringerung der Abflussbreite ist das Gegenteil der Fall.

Die bis zu siebenmal größere Abflussbreite vom Frank Slide im Vergleich zum Seefeldbach und den damit verbundenen größeren Breitenänderungen können als Grund für die Unterschiede der prozentualen Auslauflängenveränderung angesehen werden.

7.4) Einfluss der Blockorientierung

In DAN-2D besteht die Möglichkeit zwischen einer normalen (Standardeinstellung) und einer vertikalen Blockorientierung. Um den Einfluss der verschiedenen Blockorientierungen zu ermitteln, wurde für jedes Fallbeispiel in ihren Basiseinstellungen eine zusätzliche Berechnung mit vertikaler Blockorientierung durchgeführt. In diesen Berechnungen wurden die bereits im Fallbeispiel A für die Sensibilitätsanalyse verwendeten wichtigsten Ergebnisse für den Vergleich zwischen den beiden Orientierungsarten verwendet. Die Ergebnisse der betrachteten Werte werden in Tabellen aufgelistet und miteinander verglichen.

So kann eine Tendenz ermittelt werden, die angibt, wie sich die Ergebnisse der Berechnung mit vertikaler im Vergleich zur normalen Blockorientierung verändern

Auslauflänge

Die Auslauflänge stellt eines der wichtigsten Berechnungsergebnisse dar. Umso interessanter ist es zu sehen, dass die beiden Blockorientierungen bei den Fallbeispielen A, D und E annähernd identische Ergebnisse liefern. Nur bei den Beispielen B und C mit der größten Auslauflänge und der höchsten Geschwindigkeit kommt es zu einer Abweichung von ungefähr sechs Prozent (Tab. 14).

Fallbeispiel	Normal	Vertikal	Tendenz
A	1489,82	1493,74	↑
B	2249,55	2121,88	↓
C	2381,21	2241,62	↓
D	1286,57	1285,54	↓
E	295,89	295,92	↑

Tab. 14: Gegenüberstellung der Auslauflängen [m] bei normaler und vertikaler Blockorientierung

Maximale Geschwindigkeit

Die aus den Berechnungen hervorgehende maximale Geschwindigkeit nimmt mit der vertikalen Orientierung der Blöcke in allen Fallbeispielen ab (Tab. 15).

Fallbeispiel	Normal	Vertikal	Tendenz
A	21,46	19,88	↓
B	52,81	49,19	↓
C	87,43	81,26	↓
D	27,16	25,82	↓
E	11,27	11,20	↓

Tab. 15: Gegenüberstellung der maximalen Geschwindigkeit [m/s] bei normaler und vertikaler Blockorientierung

Volumen

Das Volumen der Masse nimmt beim Umstellen von normaler auf vertikale Ausrichtung der Blöcke in den untersuchten Fallbeispielen A, B und D ab. Nur in den Beispielen C und E gibt es eine Zunahme von 0,7 % bzw. von 0,8 % (Tab 16).

Fallbeispiel	Normal	Vertikal	Tendenz
A	2263,26	2146,6	↓
B	1826214	1756856	↓
C	36048740	36302260	↑
D	45017,95	41917,04	↓
E	1110,12	1119,04	↑

Tab. 16: Gegenüberstellung des Volumens [m³] bei normaler und vertikaler Blockorientierung

Fläche

Die am Ende des Massensturzes bedeckte Fläche nimmt für alle Fallbeispiele mit Ausnahme vom Fallbeispiel B zu (Tab. 17). Beim Fallbeispiel D kommt es gegen Ende der Rechnung zu einem Geometriefehler, wodurch sie vorzeitig abgebrochen werden musste. So konnte der letzte Block nicht bis nach unten rutschen und die bedeckte Fläche ist nicht aussagekräftig.

Fallbeispiel	Normal	Vertikal	Tendenz
A	21388,04	25384,08	↑
B	926518,8	915382,4	↓
C	2394915	2451966	↑
D	34230,81	-	-
E	5210,91	5835,74	↑

Tab. 17: Gegenüberstellung der Fläche [m²] bei normaler und vertikaler Blockorientierung

Maximale Ablagerungshöhe

Die maximale Ablagerungshöhe nimmt bei vertikaler Blockausrichtung für jedes Fallbeispiel mit Ausnahme des Beispiels B, wo es in etwa gleich bleibt, ab (Tab. 18). Die geringere Dicke kann durch die größere bedeckte Fläche erklärt werden, auf der sich die Masse besser verteilen kann.

Fallbeispiel	Normal	Vertikal	Tendenz
A	0,62	0,47	↓
B	10,54	9,99	↓
C	24,60	24,37	↓
D	1,85	1,87	↑
E	1,83	1,57	↓

Tab. 18: Gegenüberstellung der maximalen Ablagerungshöhe [m] bei normaler und vertikaler Blockorientierung

8) Interpretation und Schlussfolgerung

Die Untersuchungen haben ergeben, dass beide Programme mit der Eingabe gleicher Ausgangswerte annähernd die gleichen Ergebnisse liefern, da beide Programme die gleichen Berechnungsansätze haben. Somit bietet sich, wie auch in verschiedenen Veröffentlichungen (R.Sosia, G.B. Crosta, O. Hungr, 2008; O. Hungr, S. MCDougall, 2009) beschrieben, DAN-2D an, um bei Rückrechnungen schnell und ohne großen Aufwand die Rheologieparameter festzulegen. Anschließend wird mit den aus digitalen Geländemodellen gewonnenen Gelände- und Abbruchkörper-Grid-Files eine präzisere DAN-3D Rechnung durchgeführt.

Desweiteren lässt sich mit Hilfe von DAN-2D auch bei unbekannter Ausbreitung der Masse eine reine 2D Rechnung durchführen. Die Auslauflänge der 2D Rechnung liegt in der Nähe der 2,5D und 3D Rechnung oder überschätzt diese. So kann die 2D Rechnung zur schnellen Erstberechnung verwendet werden, um eine Gefahrenzone festzulegen, ohne befürchten zu müssen, die Auslauflänge grob zu unterschätzen.

Die Einstellmöglichkeit einer Laufzeitbeschränkung in DAN-2D, so wie sie bereits in DAN-3D vorhanden ist, wäre eine Erleichterung. Aber noch besser wäre eine Einstellmöglichkeit, mit der festlegbar ist, ab welcher Geschwindigkeitsuntergrenze der Rechenvorgang gestoppt wird. Mit dieser Möglichkeit könnten die in beiden Programmen noch zum Schluss sehr langsam gleitenden Körper, die einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das Gesamtergebnis haben, unterbunden werden.

Durch die verschiedenen Einstellmöglichkeiten und die unterschiedlichen Rheologien lässt sich DAN gut an alle behandelten Fallbeispiele anpassen und liefert nach der Feineinstellung für die rückgerechneten Fallbeispiele realitätsnahe Ergebnisse. Es lässt sich mit DAN-3D für Abbruchkörper, deren Eigenschaften und Volumen bekannt sind, eine annähernd genaue Prognose über die Auslauflänge, die bedeckte Fläche und die Ablagerungshöhe abgeben. DAN-2D liefert im 2,5D Modell annähernd die gleichen Ergebnisse wie DAN-3D. Es besteht aber für eine Prognose die Schwierigkeit der Breitenabschätzung des Abflussweges.

Alle in dieser Arbeit gerechneten Fallbeispiele wurden mit der Standardausrichtung der Blöcke normal zum Wegprofil gerechnet. Beim Versuch, sie mit einer vertikalen Ausrichtung der Blöcke zu rechnen, kam es gegen Ende der Rechnung bei einigen Beispielen zu Geometriefehlern. Diese Geometriefehler sind aller Wahrscheinlichkeit nach auf zu lang gestreckte Blöcke zurückzuführen.

9) Zusammenfassung

Massenstürze treten immer wieder unvorhergesehen auf und stellen eine ständige Bedrohung für Mensch und Umwelt in alpinen Gebieten dar. Um potentielle Gefahrenzonen besser abgrenzen zu können, wird mit immer hochwertigeren Berechnungsprogrammen versucht, Massenbewegungen zu prognostizieren, um Sicherungsmaßnahmen für die gefährdeten Gebiete auszuarbeiten. In dieser Arbeit wurden fünf unterschiedliche Fallbeispiele mit den Programmen DAN-2D und DAN-3D durchgerechnet und analysiert.

Zur Ermittlung des Einflusses der Rheologieparameter wurden die Untersuchungen des Abgangs einer Massenbewegung in einem Kanal (Pichler, 2011) mit DAN-2D durchgeführt und die Ergebnisse wurden mit jenen von Pichler (2011), der die Untersuchungen mit DAN-3D durchführte, verglichen. Der Vergleich zeigte, dass DAN-2D und DAN-3D im Wesentlichen gleiche Ergebnisse liefern. Durch das Variieren der Eingabeparameter wurde die Sensibilität von DAN-2D bezogen auf die Auslauflänge, die maximale Geschwindigkeit, die maximale Ablagerungshöhe der Masse in ihrer Endlage und die am Schluss bedeckte Fläche bestimmt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die Eingabeparameter Reibungskoeffizient, Turbulenzkoeffizient und innerer Reibungswinkel einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Den größten Einfluss auf die Ergebnisse hat der Reibungskoeffizient. Eine Änderung des Reibungskoeffizienten beeinflusst dabei alle untersuchten Ergebnisse (Auslauflänge, max. Geschwindigkeit, max. Ablagerungshöhe und die am Schluss bedeckte Fläche). Je höher der Reibungskoeffizient ist,

- umso kürzer ist die Auslauflänge,
- umso geringer sind die maximale Geschwindigkeit und die von der gerutschten Masse bedeckte Fläche und
- umso größer ist die maximale Ablagerungshöhe.

Je höher der Turbulenzkoeffizient ist, umso höher werden

- die maximale Ablagerungshöhe,
- die Auslauflänge,
- die bedeckte Fläche und
- die maximale Fließgeschwindigkeit.

Mit Erhöhung des inneren Reibungswinkels

- nimmt die maximale Ablagerungshöhe ab und

- die bedeckte Fläche sowie die maximale Fließgeschwindigkeit nehmen zu.

Die Auslauflänge wird vom inneren Reibungswinkel nicht beeinflusst. Somit kann der Reibungskoeffizient zur groben, der Turbulenzkoeffizient und der innere Reibungswinkel für feinere Festlegungen der Abmessungen des runouts verwendet werden. Sowohl in DAN-2D als auch in DAN-3D kann simuliert werden, dass die abgehende Masse Material aus dem Untergrund aufnehmen kann (entrainment). Dieser Vorgang erfolgt in DAN-2D durch die Angabe eines Erosionsprofils, bis zu dem die Materialaufnahme beim Überfahren vollständig stattfindet. In DAN-3D wird die mögliche Materialaufnahme durch eine Erosionsfläche (DHM) und einen Aufnahmekoeffizienten gesteuert. Die Materialaufnahme kann dabei maximal bis zur Erosionsfläche erfolgen. Bei Berücksichtigung einer Materialaufnahme können daher die Ergebnisse von DAN-2D und DAN-3D Berechnungen nicht verglichen werden. Die Abschätzung bzw. Bestimmung der jeweiligen Parameter muss daher für beide Versionen getrennt durchgeführt werden.

Für weitere 4 Fallbeispiele, die auf rückgerechneten, historischen Ereignissen basieren und die mit DAN-2D und DAN-3D berechnet wurden, wurden die Auslauflängen verglichen. Die zur Berechnung benötigten Rheologieparameter stammten aus bereits veröffentlichten Rückrechnungen dieser Fallbeispiele. Die Berechnungen zeigten, dass die mittels 2D und 2,5D Simulationen (DAN-2D) bestimmten Auslauflängen nahezu identisch oder bei schnellen Abgängen größer als jene mit DAN-3D bestimmten sind. Die mittels 2,5D Simulationen berechneten Auslauflängen sind dabei maximal um 4% größer als jene mittels DAN-3D bestimmten. Dies gilt allerdings nur für jene Fälle, bei denen in 2,5D die Abflussbreite entweder realitätsnah abgeschätzt oder einer DAN-3D Berechnung entnommen wurde. Die mittels 2D Simulationen berechneten Auslauflängen können bei schnellen Abgängen um maximal 13% größer als jene mittels DAN-3D bestimmten sein.

Die mittels DAN-2D ermittelte, maximale Abflussgeschwindigkeit ist bei allen Fallbeispielen geringer als die mittels DAN-3D berechnete.

Um den Einfluss der Abflussbreite auf die Auslauflänge besser abschätzen zu können, wurde die Abflussbreite in zwei Beispielen verändert und die Auswirkungen auf die Auslauflänge untersucht. Wie zu erwarten verringert sich die Auslauflänge bei einer Überschätzung der Abflussbreite und sie erhöht sich bei einer Unterschätzung der Abflussbreite.

Anschließend wurden die in DAN-2D zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der normalen und der vertikalen Blockorientierung untersucht. Es wurde untersucht, wie sich

die Ergebnisse bei vertikaler Blockorientierung zur Standard-Blockorientierung (Blöcke stehen normal auf die Auslaufbahn) verhalten. Allgemein kann die Aussage gemacht werden, dass die Auslauflängen für die beiden Varianten gleich sind. Die maximale Geschwindigkeit, das Volumen und die maximale Ablagerungshöhe verringern sich jedoch. Die bedeckte Fläche nimmt durch die vertikalen, länger gestreckten Blöcke zu.

Werden in DAN-2D und DAN-3D Simulationen dieselben Materialparameter verwendet, liefern die Untersuchungen annähernd die gleichen Ergebnisse. Zuzufolge der unterschiedlichen Formulierungen in DAN-2D und DAN-3D können die Berechnungen, die eine Materialaufnahme aus dem Untergrund berücksichtigen, nicht verglichen werden.

DAN-2D und DAN-3D ergänzen einander sinnvoll, wenn mittels DAN-2D Untersuchungen die Materialparameter grob abgeschätzt werden und anschließend eine Berechnung mittels DAN-3D durchgeführt wird, die auf digitalen Höhenmodellen basiert und tatsächliche Auslaufbreiten liefert.

Literaturverzeichnis

J. Cepeda, *THE 2005 TATE'S CAIRN DEBRIS FLOW: BACK-ANALYSIS, FORWARD PREDICTIONS AND A SENSITIVITY ANALYSIS*. The 2007 International Forum on Landslide Disaster Management, Ho & Li (Eds.), 813 – 833.

O. Hungr. *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches*. Canadian Geotechnical Journal, 32: 610 – 622, 1995

O. Hungr. *DAN-W DYNAMIC ANALYSIS OF LANDSLIDES; USER'S MANUAL*. 2004.

O. Hungr. *DAN3D Interim instructions*, 2006. DAN3D package.

O. Hungr, S.G. Evans. *Rock avalanche runout prediction using a dynamic model*. Landslides, Senneset (ed), Balkema, Rotterdam: 233 – 238, 1996.

O. Hungr, S. McDougall. *Two numerical models for landslide dynamic analysis*. Computers & Geosciences, 35: 978 – 992, 2009.

O. Hungr, S. McDougall. *The Frank Slide, Alberta, Canada*. Corey Froese, Alberta Geological Survey, Edmond.

O. Hungr. *Numerical Modelling of the Dynamics of Debris Flows and Rock Avalanches*. Geomechanik und Tunnelbau 1, Heft 2, 112 – 119, 2008.

O. Lateltin. *Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. BRP, BWW, BUWAL, Bern, 1997.

G. Meißl. *Modellierung der Reichweite von FELSSTÜRZEN*. Druck- und Verlagshaus Thaur GmbH, 1998.

K. Mair an Tinkhof. *Numerische Untersuchung von Felsmassenstürzen vom Roten Kögele am Hallstätter Salzberg mittels PFC^{3D}*. Diplomarbeit, TU Wien, 2007.

L. Pichler. *UNTERSUCHUNGEN ZUR MODELLIERUNG VON MURENGÄNGEN MITTELS DAN3D*. Diplomarbeit, TU Wien, 2011.

M. Pirulli. *Numerical Modelling of Landslide Runout, A continuum mechanics approach*. PhD thesis, Politecnico di Torino, Italy, 2005.

R. Poisel, A. Preh, O. Hungr. *Run Out of Landslides – Continuum Mechanics versus Discontinuum Mechanics Models*. Geomechanik und Tunnelbau 1, Heft 5, 358 – 365, 2008.

R. Poisel, A. Preh. *ROCK FALL DETECHMENT MECHANISMS*. Interdisciplinary Rockfall Workshop, Innsbruck 2011.

W. Roth. *Dreidimensionale numerische Simulation von Felsmassenstürzen mittels der Methode der Distinkten Elemente (PFC)*, Dissertation an der TU Wien, 2003.

R. Sosio, G.B. Crosta, and O. Hungr. *Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps)*. Engineering Geology, 100: 11 - 26, 2008.

J. Will. *Beitrag zur Standsicherheitsberechnung im geklüfteten Fels in der Kontinuums- und Diskontinuumsmechanik unter Verwendung impliziter und expliziter Berechnungsstrategien*. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar, 1999.

Internetverzeichnis

<http://www.frankslide.com>

<http://www3.sympatico.ca/goweezer/canada/frank.htm>

http://turtle.ags.gov.ab.ca/Turtle_Mountain/Site/

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Grundtypen von Massenbewegungen gemäß dem Multilingual Landslide Glossary (Lateltin, 1997)	3
Abb. 2: Versagensmechanismen von Talflanken und Felsböschungen und deren mechanische Modelle, Teil 1 (Poisel & Preh, 2004)	5
Abb. 3: Versagensmechanismen von Talflanken und Felsböschungen und deren mechanische Modelle, Teil 2 (Poisel & Preh, 2004)	6
Abb. 4: Teilbereiche eines Sturzprozesses (nach Heim, 1932)	7
Abb. 5: Gegenüberstellung geometrisches Gefälle – Fahrböschung (Meißl, 1998).....	9
Abb. 6: Beziehung zwischen Bergsturzvolumen und der Tangente des Fahrböschungswinkels (Scheidegger,1973)	11
Abb. 7: Energielinie (nach Sassa, 1988).....	12
Abb. 8: Flußdiagramm üblicher mechanischer Formulierungen und Materialmodelle ...	14
Abb. 9: a) Prototyp einer heterogenen sich bewegenden Masse; b) Modell einer homogenen „scheinbar flüssigen“ Masse (nach Hungr, 1995).....	15
Abb. 10: Langranges Netz in gekrümmten Koordinaten (Hungr, 1995).....	16
Abb. 11: Randblock mit den ihn angreifenden Kräften (Hungr, 1995).....	17
Abb. 12: Festzulegende Geländekubatur und Abbruchmasse (DAN-W Manual)	19
Abb. 13: Darstellung der Ausbreitung der Massenbewegung und der in DAN-2D dargestellten Fläche	20
Abb. 14: Isometrische Darstellung in DAN-2D	21
Abb. 15: Illustration der Funktionsweise vom „cross-section shape factor“ (DAN-W Manual).....	21
Abb. 16: Eingabefenster der Materialeigenschaften (Material Editor)	22
Abb. 17: a) Vertikale Blöcke b) Normale Blöcke die sich beim gleichen Wegprofil überschneiden (DAN-W Manual).....	23
Abb. 18: Zweidimensionales Tiefenprofil.....	24
Abb. 19: Darstellung der Ablagerungshöhe zu verschiedenen Zeitschritten in Surfer	26
Abb. 20: Schnitt durch das Modell.....	29

Abb. 21: Isometrische Darstellung des Kanals (halbes System) in DAN-2D	29
Abb. 22: Luftbild des vom Bergsturzes Punta Thurwieser betroffenen Gebietes. (Sosio, Crosta, Hungr, 2008)	31
Abb. 23: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche des Bergsturzes Punta Thurwieser	32
Abb. 24: Orthofoto des Bergsturzes Frank Slide.....	34
Abb. 25: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche des Bergsturzes Frank Slide	35
Abb. 26: Orthofoto des untersuchten Gebietes Seefeldbach	37
Abb. 27: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche der Mure Seefeldbach.....	38
Abb. 28: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche der Mure Tates Cairn	39
Abb. 29: Ablagerungshöhe und überstrichene Fläche der prognostizierten Mure Tates Cairn	39
Abb. 30: Luftbild der Mure Tates Cairn (Landslide Study report, 2007).....	40
Abb. 31: Variation der Wichte: 13 - 23 kN/m ³	44
Abb. 32: Variation des Reibungskoeffizienten: 0,08 – 0,16.....	44
Abb. 33: Variation des Turbulenzkoeffizienten: 100 – 1000 m/s ²	45
Abb. 34: Variation des inneren Reibungswinkels: 10° - 30°	46
Abb. 35: Variation der Erosionstiefe: 0 – 0,9 m.....	46
Abb. 36: Variation des Ausgangsvolumens: 750 – 4500 m ³	47
Abb. 37: Gradienten der Regressionsgeraden für DAN-2D	49
Abb. 38: Gradienten der Regressionsgeraden für DAN-3D (L. Pichler, 2011)	50
Abb. 39: Ausgangs- und Endlage des Bergsturzes Punta Thurwieser.....	52
Abb. 40: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel B.....	54
Abb. 41: Ausgangs- und Endlage des Bergsturzes Frank Slide	56
Abb. 42: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel C.....	58
Abb. 43: Anfangs- und Endlage der Mure Seefeldbach.....	60
Abb. 44: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel D.....	62
Abb. 45: Ausgangs- und Endlage der Tates Cairn Mure (Abbruch)	63

Abb. 46: Ausgangs- und Endlage der Tates Cairn Mure (Prognose) 64
Abb. 47: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel E (Abbruch) 65
Abb. 48: Fahrböschung und Energielinie Fallbeispiel E (Prognose) 66

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aufzählung der untersuchten Fallbeispiele und ihre interessanten Eigenschaften	27
Tab. 2: Ausgangswerte der Sensibilitätsanalyse.....	28
Tab. 3: Materialparameter, Variation der Wichte γ [kN/m ³].....	41
Tab. 4: Materialparameter, Variation vom Reibungskoeffizienten f [-]	42
Tab. 5: Materialparameter, Variation vom Turbulenzkoeffizienten ξ [m/s ²]	42
Tab. 6: Materialparameter, Variation des inneren Reibungswinkels Φ_i [°].....	42
Tab. 7: Materialparameter, Variation der Erosionstiefe t [m].....	43
Tab. 8: Materialparameter, Variation vom Volumens V [m ³]	43
Tab. 9: Materialparameter Punta Thurwieser	51
Tab. 10: Materialparameter Frank Slide	55
Tab. 11: Materialparameter Seefeldbach.....	59
Tab. 12: Materialparameter Tates Cairn	63
Tab. 13: Prozentuale Auslauflängenveränderung in Abhängigkeit der Abflussbreite	69
Tab. 14: Gegenüberstellung der Auslauflängen [m] bei normaler und vertikaler Blockorientierung	70
Tab. 15: Gegenüberstellung der maximalen Geschwindigkeit [m/s] bei normaler und vertikaler Blockorientierung	71
Tab. 16: Gegenüberstellung des Volumens [m ³] bei normaler und vertikaler Blockorientierung	71
Tab. 17: Gegenüberstellung der Fläche [m ²] bei normaler und vertikaler Blockorientierung	72
Tab. 18: Gegenüberstellung der maximalen Ablagerungshöhe [m] bei normaler und vertikaler Blockorientierung.....	72