

Diploma Thesis

# Analysis of rock avalanches Frank Slide and Vals using the computer code r.avaflow

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Diplomarbeit

## Analyse der Felslawinen Frank Slide und Vals mit Hilfe des Computercodes r.avaflow

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Simon Hartl, BEng**

Matr.Nr.: 01528402

unter der Anleitung von

Priv.-Doz. DI Dr.techn. **Alexander Preh**

Institut für Geotechnik  
Forschungsbereich Ingenieurgeologie  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/220-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Oktober 2019

---



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kurzfassung

Die Masterarbeit beschäftigt sich mit der numerischen Modellierung von Felsstürzen und Felslawinen mit Hilfe der Software „r.avaflow“. Eine möglichst genaue Modellierung der Ausbreitung schneller gravitativer Massenbewegungen (Massenströmen) wie Felslawinen mithilfe numerischer Rechenverfahren ist bei der Bestimmung der von diesen Prozessen ausgehenden Gefahr und des Risikos für Infrastruktur und Menschenleben von großer Bedeutung.

Zur Zeit gibt es zwei unterschiedliche Ansätze zur Berechnung solcher Massenbewegungen: zum einen stehen kontinuumsmechanische bzw. flüssigkeitsäquivalente Berechnungsverfahren (hierzu zählen beispielsweise DAN, RAMMS, r.avaflow) und zum anderen diskontinuumsmechanische Berechnungsverfahren (zum Beispiel das DEM-Verfahren) zur Verfügung. Die meisten Fallstudien sowie Rückrechnungen basieren auf kontinuumsmechanischen Ansätzen unter Anwendung der Voellmy Rheologie zur Beschreibung des Bewegungsprozesses. Für diese Kombination existieren Vorhersageparameter zur Abschätzung der Reichweiten von Massenströmen.

r.avaflow wurde im Rahmen eines durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Österreichischen Forschungsfond (FWF) geförderten Forschungsprojekts entwickelt und ist ein neuer umfassender kontinuumsmechanischer Ansatz, der eine automatisierte Methode zur Rückrechnung von Ereignissen und der Evaluation der Berechnungsergebnisse anhand von Beurteilungskennwerten beinhaltet. r.avaflow kann im Zuge des Berechnungsvorgangs entweder die Voellmy-Salm Rheologie oder das Zweiphasen-Massenstrommodell nach Pudasaini anwenden. Zur Bewertung der erreichten Modellgenauigkeit werden unter anderem Indizes wie True Positive, True Negative, CSI (Critical Success Index) und AUROC (Area under ROC curve), die vorwiegend bei der Analyse statistischer Verteilungen eingesetzt werden, verwendet.

Ziel der Arbeit ist erstens zu evaluieren, inwiefern es möglich ist, mit r.avaflow und der inkludierten Voellmy-Salm Rheologie Felsstürze und Felslawinen zu reproduzieren und zweitens, inwieweit die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen des kontinuumsmechanischen Ansatzes DAN und der Voellmy Rheologie übereinstimmen. Zu diesem Zweck wurden zwei ausgezeichnet dokumentierte Ereignisse, die Felslawine „Frank Slide“ (Alberta, Kanada, 1903) sowie der Felssturz „Vals“ (Valsertal, Tirol, 2017), rückgerechnet und mit DAN verglichen.

Im Zuge der Fallstudie Frank Slide konnte zwischen Simulation und der Aufzeichnung der Ablagerungen des Ereignisses eine sehr große Übereinstimmung erzielt werden. Eine Rückrechnung des Bergsturzes mit den Voellyparametern  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$  erzielte hierbei die besten Ergebnisse. Im Zuge der Analyse der modellierten Ablagerungen konnte festgestellt werden, dass die Reichweite verglichen mit den Beobachtungen etwas unterschätzt und die seitliche Ausbreitung leicht überschätzt wurde. Die hohe erreichte Genauigkeit des r.avaflow-Modells mit Voellmy-Salm Rheologie spiegelte sich unter anderem in den Kennwerten CSI und AUROC wider.

Der Felssturz Vals weist im Vergleich zur Felslawine Frank Slide eine deutlich kleinere Dimension hinsichtlich des untersuchten Bereiches, des Sturzvolumens und der Höhenunterschiede auf. Deshalb wurde der Einfluss der Auflösung des digitalen Höhenmodells in Z-Richtung auf die Berechnungsergebnisse untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden bei der Rückrechnung zwei unterschiedliche Höhenmodelle der basalen Topographie verwendet: in einer ersten Modellvariante wurde das zur Verfügung gestellte Höhenmodell mit einer Auflösung von 1 m in Z-Richtung, in einer zweiten Modellvariante ein durch das Verfahren der Interpolation geglättetes Höhenmodell verwendet. Die Untersuchungsergebnisse der Fallstudie Vals lieferten in beiden Modellvarianten

nur eine geringe Übereinstimmung der simulierten mit den beobachteten Ablagerungen. Zudem unterschieden sich die beiden Modellvarianten jeweils stark in den Voellmyparametern, mit denen die beste Übereinstimmung erreicht wurde.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen legen nahe, dass r.avaflo gut geeignet ist, um große Felslawinen wie den Frank Slide rückzurechnen. Bei kleineren Abbruchvolumen, wie dies beim Felssturz Vals der Fall ist, sind die Ergebnisse hinsichtlich der rückgerechneten Voellmyparameter sowie der modellierten Ablagerungen hingegen nicht eindeutig. Mit DAN ermittelte Vorhersageparameter gleicher Rheologie sind nur bedingt als Eingangsparameter für die Kalibrierung des Modells in r.avaflo nutzbar.

# Abstract

The master thesis deals with the numerical modeling of rock falls and rock avalanches by means of the software "r.avafLOW". The most accurate possible modelling of the spreading of rapid flow-like landslides (mass flows) such as rock avalanches using numerical methods is of great importance in determining the hazard and the risk to infrastructure and human life.

At present, there are two different approaches for the calculation of such flow-like landslides: on the one hand, continuum mechanics or equivalent fluid methods (e.g. DAN, RAMMS, r.avafLOW) and on the other hand discontinuum mechanics methods (for example, the DEM method) are available. Most case studies as well as back calculations are based on continuum mechanics approaches and the Voellmy rheology to describe the runout processes of landslides. Prediction parameters for estimating the runout of landslides exist for this combination.

Developed as part of a research project funded by the German Research Foundation (DFG) and the Austrian Research Fund (FWF), r.avafLOW is a new comprehensive continuum-mechanical approach that includes an automated methodology for back-calculating events and evaluating computational results against observations. r.avafLOW can use either the Voellmy-Salm rheology or the Pudasaini two-phase mass flow model as part of the calculation process. Indices such as True Positive, True Negative, CSI (Critical Success Index) and AUROC (Area Under ROC Curve), which are mainly used in the analysis of statistical distributions, are used to evaluate the achieved model accuracy.

The aim of the work is first to evaluate to what extent it is possible to reproduce rockfalls and rock avalanches with r.avafLOW using the implemented Voellmy-Salm rheology and secondly, to what extent the results of the computation agree with the results of the continuum mechanics code DAN and the Voellmy rheology. For this purpose, two well-documented events, the rock avalanche "Frank Slide" (Alberta, Canada, 1903) and the rockfall "Vals" (Valsertal, Tyrol, 2017), are back-calculated and compared with DAN.

In the course of the case study Frank Slide, a very close match could be achieved between simulation and the observations of the deposits of the event. A recalculation of the landslide with the parameters of the Voellmy-Salm rheology  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$  gives the best results. In the course of the analysis of the modeled deposits, it can be stated that the runout distance was somewhat underestimated compared to observations and the lateral spread was slightly overestimated. The high accuracy of the r.avafLOW model with Voellmy-Salm rheology is reflected in the characteristics CSI and AUROC.

The rockfall Vals has a much smaller dimension in terms of the impacted area, the detached rock volume and the differences in elevation than the rock avalanche Frank Slide. Therefore, the influence of the resolution of the digital elevation model in the Z-direction on the calculation results was investigated. For this purpose, two different elevation models of the basal topography were used for the back-calculation: in a first model variant, the elevation model provided was used with a resolution of 1 m in the Z-direction, in a second model variant a elevation model smoothed by the method of interpolation was used. The results of the case study Vals showed in both model variants only limited agreement of simulation and observation regarding the modeled deposits. In addition, the two model variants each differ in the parameters of the Voellmy-Salm rheology.

The results of the investigations carried out suggest that r.avaflow is well suited for the back-calculation of large rock avalanches such as the Frank Slide. For smaller volumes, as in the case Vals, the results with regard to the back-calculated Voellmy parameters and the modeled deposits are not clear. Prediction parameters of the same rheology determined with DAN can only be used to a limited extent as input parameters for the calibration of the model in r.avaflow.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Felslawinen</b>	<b>11</b>
2.1	Klassifizierung von Massenbewegungen . . . . .	11
2.1.1	Varnes (1978) . . . . .	12
2.1.2	Cruden und Varnes (1996) . . . . .	15
2.1.3	Hungr et al. (2001) . . . . .	19
2.1.4	Hungr et al. (2014) . . . . .	22
2.1.5	Sturzprozesse ausgehend von Felsböschungen . . . . .	23
2.2	Versagensmechanismen des Abbruchs . . . . .	24
2.3	Bestimmung der Ausbreitung von Felslawinen . . . . .	27
2.3.1	Experimenteller Ansatz . . . . .	27
2.3.2	Empirische Methoden . . . . .	28
2.3.3	Dynamische Methoden . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Numerische Simulation von Felslawinen mittels r.avaflow</b>	<b>35</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	35
3.1.1	Projekt . . . . .	35
3.1.2	Funktionen . . . . .	36
3.1.3	Programmversionen . . . . .	36
3.2	Verwendete Materialmodelle zur Simulation von Massenbewegungen . . . . .	37
3.2.1	Voellmy-Salm Modell . . . . .	37
3.2.2	Zweiphasen-Massenstrommodell nach Pudasaini . . . . .	42
3.3	Modellparameter zur Durchführung der Modellsimulation . . . . .	45
3.3.1	Zwingend erforderliche Inputparameter . . . . .	45
3.3.2	Berechnungskript und Modellparameter . . . . .	45
3.4	Möglichkeiten der Parameterkalibrierung und Visualisierung der Ergebnisse . . . . .	49
3.4.1	Parameterkalibrierung . . . . .	49
3.4.2	Ergebnisvisualisierung . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Fallstudie Frank Slide</b>	<b>55</b>
4.1	Einleitung . . . . .	55
4.2	Modellaufbau . . . . .	59
4.2.1	Input-Rasterkarten . . . . .	59
4.2.2	Materialkennwerte . . . . .	59
4.2.3	Modellparameter und Programmcode . . . . .	60
4.3	Kalibrierung der Modellparameter . . . . .	62
4.3.1	Kennwerte . . . . .	62
4.3.2	Auswertung . . . . .	63
4.4	Ergebnisse . . . . .	65
4.4.1	Parameterkalibrierung . . . . .	65
4.4.2	Fließhöhen, Ablagerungshöhen und Fließgeschwindigkeiten . . . . .	69

4.5	Resümee . . . . .	72
4.5.1	Modellgenauigkeit . . . . .	72
4.5.2	Vergleichsbetrachtung . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Fallstudie Vals</b>	<b>75</b>
5.1	Einleitung . . . . .	75
5.2	Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017: Modellvarianten . . . . .	78
5.3	Modell A . . . . .	78
5.3.1	Modellaufbau . . . . .	78
5.3.2	Kalibrierung der Modellparameter . . . . .	80
5.3.3	Ergebnisse . . . . .	82
5.4	Modell B . . . . .	90
5.4.1	Modellaufbau . . . . .	90
5.4.2	Kalibrierung der Modellparameter . . . . .	92
5.4.3	Ergebnisse . . . . .	94
5.5	Resümee . . . . .	102
5.5.1	Modellgenauigkeit . . . . .	102
5.5.2	Gegenüberstellung der Modelle . . . . .	103
5.5.3	Vergleichsbetrachtung . . . . .	104
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussbetrachtung</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>110</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>114</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>119</b>

# Kapitel 1

## Problemstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der numerischen Modellierung und Simulation von Felsstürzen und Felslawinen unter Verwendung des Programms `r.avaflow`, welches im Rahmen eines transnationalen Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Österreichischen Forschungsfonds (FWF) entwickelt wurde. `r.avaflow` ist ein neuer umfassender kontinuumsmechanischer Ansatz, mit dem eine automatisierte Rückrechnung von Ereignissen und die Evaluation der Berechnungsergebnisse anhand von Beurteilungskennwerten möglich ist.

In vielen Teilen der Welt und im speziellen in alpinen Bergregionen kommt es immer wieder zu fatalen Felsstürzen und Felslawinen. Die Ausmaße reichen von im besten Fall keiner gegenseitigen Beeinflussung der Massenbewegung mit umliegenden Liegenschaften, Infrastruktur oder Menschen bis hin zu katastrophalen Auswirkungen in Form von überschütteten oder zerstörten Gebäuden mit Todesopfern. Eine möglichst genaue Modellierung der Ausbreitung schneller gravitativer Massenbewegungen (Massenströmen) wie Felslawinen mithilfe numerischer Rechenverfahren ist bei der Bestimmung der von diesen Prozessen ausgehenden Gefahr und des Risikos für Infrastruktur und Menschenleben von besonders großem Interesse.

Rückrechnungen von Sturzereignissen leisten einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis der Bewegungsprozesse von gravitativen Massenbewegungen. In aktuellen Fallstudien werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Berechnung eingesetzt, wobei im Groben kontinuumsmechanische bzw. flüssigkeitsäquivalente Berechnungsverfahren und diskontinuumsmechanische Berechnungsverfahren zur Verfügung stehen. Zur ersten Gruppe zählen unter anderem die Programme DAN, RAMMS und das in dieser Arbeit vorgestellte `r.avaflow`.

Die meisten Fallstudien sowie Rückrechnungen basieren auf kontinuumsmechanischen Ansätzen unter Anwendung der Voellmy Rheologie zur Beschreibung des Bewegungsprozesses. Für diese Kombination existieren Vorhersageparameter zur Abschätzung der Reichweiten von Massenströmen.

Ziel der Arbeit ist zum einen die Beantwortung der Frage, inwiefern Felsstürze und Felslawinen mittels `r.avaflow` und der inkludierten Voellmy-Salm Rheologie reproduziert werden können und zum anderen, inwieweit die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen des kontinuumsmechanischen Ansatzes DAN und der Voellmy Rheologie übereinstimmen. Zu diesem Zweck wurden zwei Sturzereignisse in `r.avaflow` rückgerechnet und mit DAN verglichen. Hierbei handelt es sich um die Felslawine „Frank Slide“ (Alberta, Kanada, 1903) und um den Felssturz „Vals“ (Valsertal, Tirol, 2017).

Die Arbeit strukturiert sich wie folgt: in einem allgemeinen Kapitel werden Felslawinen diskutiert, indem auf unterschiedliche Begriffsbestimmungen und Versuche zur einheitlichen Klassifizierung eingegangen wird. Anschließend wird ein Überblick über verschiedene Versagensmechanismen des Abbruchs gegeben. Darauf folgend werden unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Ausbreitung von Felslawinen vorgestellt.

Im zweiten Kapitel wird das Programm `r.avaflow` vorgestellt. Die zugrunde liegenden physikalischen (Material-) Modelle und die verschiedenen Modellparameter, welche zur Durchführung der

Simulation notwendig sind, werden erläutert. Es besteht die Möglichkeit, die Modellparameter der verwendeten Rheologie anhand von Beobachtungen zu kalibrieren und zudem durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Geländemodellen nach dem Sturzereignis die Simulationsergebnisse anhand von Kennwerten zu verifizieren und die Resultate aus den Berechnungsdurchgängen grafisch darzustellen.

Im anschließenden Kapitel wird die Felslawine Frank Slide, welche sich 1903 in Kanada ereignete und rund 70 Menschen das Leben kostete, erläutert. Zunächst wird auf das Ereignis an sich und die geologische Situation eingegangen. Anschließend wird die Simulation mittels *r.avaflo* vorgestellt und eine Kalibrierung der Parameter des Voellmy-Salm Modells durchgeführt. Mit den so ermittelten best-fit Parametern werden die Ablagerungen modelliert. Abschließend werden die Ergebnisse der Fallstudie Frank Slide mit Berechnungen in DAN hinsichtlich der best-fit Parameter des rheologischen Modells, der Verteilung der Ablagerungen und der Fließgeschwindigkeiten gegenübergestellt.

Darauf folgend wird der Felssturz Vals, welcher sich an Weihnachten 2017 im Valsertal in Tirol in Österreich ereignete, beschrieben. Nach ähnlicher Vorgehensweise wie bei der Felslawine Frank Slide wird zuerst das Ereignis besprochen und auf die geologische Situation eingegangen. Anschließend wird die Simulation mittels *r.avaflo* erläutert und die Parameter des Voellmy-Salm Modells kalibriert. Mit den so ermittelten best-fit Parametern werden die Ablagerungen modelliert. Abschließend in diesem Kapitel werden die Berechnungsergebnisse diskutiert und mit einer Rückrechnung in DAN verglichen.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Zusammenfassung und Schlussbetrachtung der gewonnenen Erkenntnisse aus den Rückrechnungen der beiden Sturzereignisse mit *r.avaflo*. Die Erkenntnisse werden in einer Schlussfolgerung zusammengefasst.

# Kapitel 2

## Felslawinen

### 2.1 Klassifizierung von Massenbewegungen

In der Fachliteratur wurden viele Versuche zur Klassifizierung von Massenbewegungen in alpinen Gebieten unternommen, wobei sich nicht nur Differenzen bei der einheitlichen Nomenklatur, sondern auch bei der Typisierung dieser Ereignisse ergaben. Einen ersten Ansatz zur Beschreibung alpiner Massenbewegungen in Europa lieferte Heim (1932).

Im Laufe der Zeit wurden vor allem die Klassifizierungssysteme von Varnes (1958, 1978) und Hutchinson (1988) weithin angenommen und akzeptiert. Cruden und Varnes (1996) überarbeiteten die Ausarbeitungen von Varnes (1978) und verfeinerten so die Möglichkeiten zur Differenzierung gravitativer Massenbewegungen, indem sie Erkenntnisse aus Publikationen aus vergangenen Jahren einfließen ließen, die mitunter im Rahmen der Proceedings of the International Symposium on Landslides entwickelt worden sind (vgl. Hutchinson, 1988). Hieraus entstand das Multilingual Landslide Glossary, das einen zentralen Katalog zur Beschreibung von Massenbewegungen darstellt. Hungr et al. (2001) fassen die Vorschläge von Varnes (1978), Hutchinson (1988) und Cruden und Varnes (1996) in „A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type“ zusammen und erarbeiten eine Klassifizierung von Massenbewegungen mit fließähnlichem Verhalten (*flow-like landslides*).

Im Folgenden werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie die jeweiligen Besonderheiten der Möglichkeiten der Klassifizierung von Massenbewegungen diskutiert. Im Abschnitt 2.1.1 wird das System zur Charakterisierung von gravitativen Massenbewegungen von Varnes (1978), im Abschnitt 2.1.2 das System von Cruden und Varnes (1996) und im Abschnitt 2.1.3 das Verfahren von Hungr et al. (2001) vorgestellt. Die Klassifizierung von Massenbewegungen auf Basis des Fließtyps von Hungr et al. (2001) wurde von Hungr et al. (2014) in „The Varnes classification of landslide types, an update“ überarbeitet. Diese Erweiterung wird kurz in Abschnitt 2.1.4 thematisiert. Abschließend werden in Abschnitt 2.1.5 Sturzprozesse ausgehend von Felsböschungen erläutert.

### 2.1.1 Varnes (1978)

#### Entwicklung und Überblick

Varnes erweitert seine Klassifikation von 1958 in Varnes (1978) aufgrund zahlreicher Erkenntnisse aus verschiedenen Publikationen, die seit der Veröffentlichung von 1958 Massenbewegungen betreffend gewonnen wurden. Varnes verfeinert die Klassifikation unter anderem dadurch, dass nun extrem langsame Hangbewegungen aus Fels- und Bodenmaterial mitberücksichtigt werden, die in anderen Abhandlungen als Kriechen (*creep*) bezeichnet werden. Eine weitere Änderung besteht in der Terminologie: anstatt den Begriff *Landslide* zu verwenden, wird nun der Begriff *slope movement* eingeführt. Dadurch wird vermieden, dass durch die Bezeichnung *slide* die Bewegungsart Rutschen bzw. Gleiten impliziert wird.

Grundsätzlich besteht die Charakterisierung und damit die Beschreibung von Massenbewegungen aus zwei Termen, die jeweils miteinander kombiniert werden können. Varnes hält dazu fest („Slope Movement Types and Processes“, 1978, S. 11):

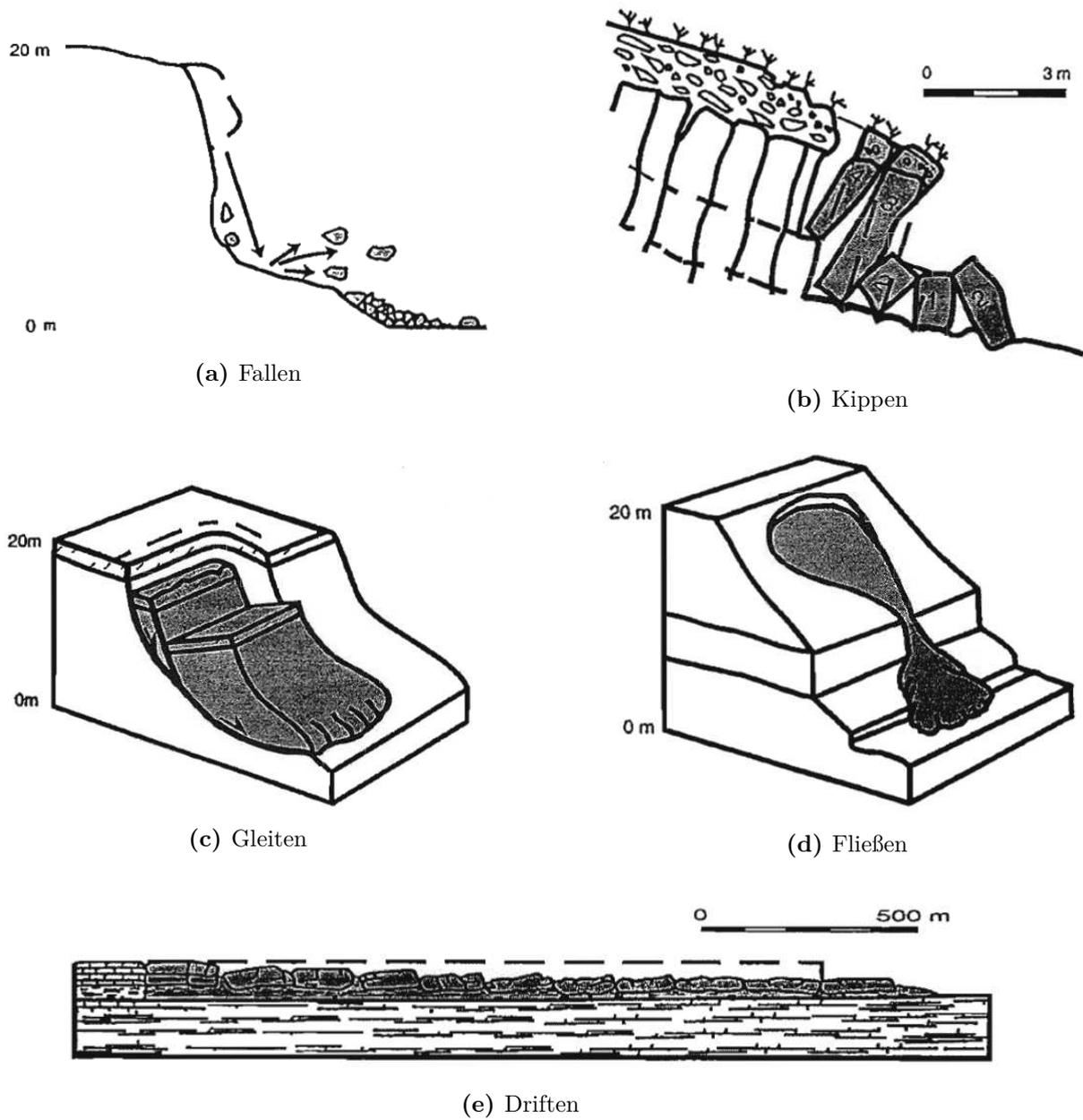
„Slope movements may be classified in many ways, each having some usefulness in emphasizing features pertinent to recognition, avoidance, control, correction, or other purpose for the classification. Among the attributes that have been used as criteria for identification and classification are type of movement, kind of material, rate of movement, geometry of the area of failure and the resulting deposit, age, causes, degree of disruption of the displaced mass, relation or lack of relation of slide geometry to geologic structure, degree of development, geographic location of type examples, and state of activity.“

#### Bewegungsart

Nach Varnes (1978) werden die beiden Hauptkriterien zur Typisierung von Massenbewegungen in Anlehnung an Varnes (1958) festgelegt. Das primäre Kriterium ist die Bewegungsart (*type of movement*), welche in sechs Kategorien differenziert wird:

1. Fallen (*fall*): Die Bewegung beginnt mit dem Lösen von Boden- oder Felsmaterial in einem steilen Hang entlang einer Fläche auf der geringe oder keine Scherbewegungen stattfinden. Das Material stürzt dann größtenteils frei fallend, springend oder rollend ab (siehe Abbildung 2.1a).
2. Kippen (*topple*): Kippen ist eine vorwärts gerichtete Rotation von Blöcken aus kohäsiem Bodenmaterial oder Felsmaterial aus dem Hang heraus. Diese Vorwärtsrotation geschieht um einen Punkt oder eine Achse unterhalb ihres Schwerpunktes (siehe Abbildung 2.1b).
3. Gleiten (*slide*): Als Gleiten wird eine hangabwärts gerichtete Bewegung von Boden- oder Felsmassen auf Gleitflächen oder auf verhältnismäßig dünnen Zonen intensiver Scherverformung verstanden (siehe Abbildung 2.1c).
4. Driften (*spread*): Eine laterale Bewegung von kohäsiem Bodenmaterial oder Felsmaterial bei einem gleichzeitigen Einsinken in die liegenden weniger kompetenten Schichten wird als Driften bezeichnet, wobei eine intensive Scherung auf Gleitflächen in der Regel nicht stattfindet. Driften kann durch Verflüssigung oder Fließen (und Extrusion) des liegenden weniger kompetenten Materials entstehen (siehe Abbildung 2.1e).
5. Fließen (*flow*): „Fließen ist eine räumliche, kontinuierliche Bewegung bei der Scherflächen nur kurzzeitig vorhanden, dicht angeordnet und gewöhnlich nicht erhalten sind. Die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse gleicht der einer viskosen Flüssigkeit.“ (Cruden et al., 1993, S. 6-2, siehe Abbildung 2.1d).

6. Komplex (*complex*): In einer sechsten Bewegungsart fasst Varnes Massenbewegungen zusammen, bei denen zwei oder mehr der fünf bereits genannten Bewegungsarten auftreten.



**Abb. 2.1:** Rutschungstypen bzw. Bewegungstypen nach den Definitionen des Multilingual Landslide Glossary (WP/WLI, Cruden et al., 1993, S. 6-1, verändert).

### Materialart

Das sekundäre Kriterium spiegelt das Material bzw. die Materialart (*type of material*) wider. Es werden zwei Klassen unterschieden: Fels (*rock*) und Boden (*engineering soil*), wobei letztere in Geröll bzw. Schutt (*debris*) und Erde (*earth*) unterteilt wird. Bei der Definition der Materialklasse Fels wird das Grundgestein als intakter, harter und fester Fels an seinem natürlichen Ort vor dem Beginn der Bewegung beschrieben. Unter *engineering soil* werden lose und nicht verfestigte Teilchen natürlicher mineralischer, gesteинlicher oder anorganischer Zusammensetzung mit eventuellen gasförmigen oder flüssigen Einschlüssen verstanden. Bei der Konkretisierung der Begriffe *debris* und *earth* folgt Varnes der Abhandlung von Schroder (1971), der *debris* als Boden, der in der Regel in der oberflächlichen Zone einen erheblichen Anteil an groben Material aufweist (20–80 % der Fragmente > 2 mm), definiert. Als *earth* wird in Varnes (1978) nach Schroder (1971) dagegen Material, das über einen Korndurchmesser < 2 mm bei mehr als 80 % der Fragmente verfügt, bezeichnet.

### Systematik

Aus der Kombination der beiden erklärten Kriterien entsteht somit die Bezeichnung einer Massenbewegung, so z.B. *rock fall*, *rock topple*, *debris slide*, *debris flow*, *earth slide*, *earth flow* usw.

Das erläuterte System zur Klassifizierung nach Varnes (1978) ist in nachstehender Abbildung 2.2 zusammengefasst und wird als Basis für das Multilingual Landslide Glossary (WP/WLI, Cruden et al., 1993) verstanden.

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS		Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow	Earth flow (soil creep)
COMPLEX		Combination of two or more principal types of movement		

**Abb. 2.2:** Klassifizierungssystem nach Varnes (1978). Quelle: Highland (2004). U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey: Landslide Types and Processes (Fact Sheet 2004-3072).

## 2.1.2 Cruden und Varnes (1996)

### Entwicklung und Überblick

Die Kriterien, welche im Zuge der Klassifizierung und Benennung von Hangbewegungen bzw. Rutschungen nach Cruden und Varnes (1996) verwendet werden, folgen im Allgemeinen den Ausführungen in Varnes (1978). Die Strukturierung zur Bezeichnung von Massenbewegungen wird von Cruden und Varnes in „Landslide Types and Processes“, 1996, S. 5 folgendermaßen vorgegeben:

„The name of a landslide can become more elaborate as more information about the movement becomes available. Adjectives can be added in front of the noun string defining the type of landslide to build up the description of the movement. It is useful to have a preferred sequence of terms in naming the movement. We suggest a sequence which indicates a progressive narrowing of the focus of the descriptions, first in time, then in space, from a view of the whole landslide to parts of the movement and to the materials involved. The recommended sequence is Activity, Rate of Movement, Moisture Content, Material, Type of Movement [...]“

### Aktivität

In Cruden und Varnes (1996) werden zur Formulierung der Aktivität die Begrifflichkeiten des Multilingual Landslide Glossary (WP/WLI, Cruden et al., 1993) verwendet.

Es werden unterschiedliche Stufen des Aktivitätsgrades von einer aktiven bis hin zu einer inaktiven Massenbewegung unterschieden. Als aktiv wird eine Massenbewegung definiert, die gegenwärtig in Bewegung ist. Eine inaktive Massenbewegung war innerhalb der letzten 12 Monate nicht aktiv und wird weiter in eine latente, eine abgeschlossene, eine stabilisierte sowie eine fossile Massenbewegung differenziert. Latent bedeutet eine inaktive Massenbewegung, die durch ihre ursprünglichen Ursachen wieder reaktiviert werden kann. Ist dies nicht der Fall, so handelt es sich um eine abgeschlossene Massenbewegung. Sind Bewegungen des Hanges durch geeignete Sanierungsmaßnahmen nicht mehr möglich, handelt es sich um eine stabilisierte Massenbewegung. Eine fossile Massenbewegung entwickelte sich aufgrund deutlich unterschiedlicher klimatischer sowie geomorphologischer Bedingungen im Vergleich zur Gegenwart.

Bei einer fortschreitenden Massenbewegung breitet sich die Gleitfläche in Bewegungsrichtung aus, bei einer rückschreitenden hingegen entgegen der Bewegungsrichtung des verlagerten Materials. Zudem wird eine sich vergrößernde Bewegung, bei der sich die Gleitfläche in mindestens zwei Richtungen ausbreitet, von einer sich ausweitenden Massenbewegung, bei welcher sich die Gleitfläche in nur einer oder in beiden Flanken der Bewegung ausbreitet, unterschieden. Eine sich verkleinernde Massenbewegung liegt vor, wenn sich das Volumen des abgelagerten Materials verringert. Bei einer beschränkt ausgebildeten Massenbewegung existiert zwar ein Abriss, allerdings bildet sich keine Gleitfläche am Fuß aus. Der Fuß ist der untere Teil der gesamten Bewegungsmasse, auch als Zunge bezeichnet, welcher oberhalb der ursprünglichen Geländeoberfläche liegt und sich über die Gleitfläche hinaus bildet. Nach der Definition des Multilingual Landslide Glossary handelt es sich um eine sich fortsetzende Massenbewegung, sobald sich die bewegte Masse ohne nennenswerten Änderungen des Volumens des abgelagerten Materials und der Gleitfläche bewegt.

Ergänzend wird in eine komplexe Massenbewegung, bei der mindestens zwei Bewegungsarten in Folge auftreten, und in eine zusammengesetzte Massenbewegung, bei der mindestens zwei Bewegungsarten gleichzeitig an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Bewegung erscheinen, unterteilt. Bei einer sukzessiven Massenbewegung weißt die aktuelle Bewegung dieselbe Bewegungsart einer benachbarten älteren Massenbewegung auf, wobei die beiden Ereignisse hinsichtlich ihrer Gleitflächen und verlagerten Materialien voneinander getrennt sind. Zusätzlich wird in eine

Einzelbewegung, bei der nur eine Bewegungsart, und eine Mehrfachbewegung, bei der die gleiche Bewegungsart mehrfach auftritt, differenziert.

### Geschwindigkeit

Zur Formulierung der *Rate of Movement* wird die Geschwindigkeit der Massenbewegung in sieben Klassen untergliedert, wobei in nachfolgender Tabelle jeweils die unteren Grenzen der Geschwindigkeiten angegeben sind:

**Tab. 2.1:** Geschwindigkeitsklassen (*velocity classes*) nach Cruden und Varnes (1996).

Klasse	Beschreibung	Geschwindigkeit [m/s]	typische Geschwindigkeit
7	Extrem schnell	5	5 m/s
6	Sehr schnell	0,05	3 m/min
5	Schnell	$5 \cdot 10^{-4}$	1,8 m/h
4	Moderat	$5 \cdot 10^{-6}$	13 m/Monat
3	Langsam	$5 \cdot 10^{-8}$	1,6 m/Jahr
2	Sehr langsam	$5 \cdot 10^{-10}$	16 mm/Jahr
1	Extrem langsam	-	-

### Wassergehalt

In Cruden und Varnes (1996) wird zur Beschreibung des Feuchte- bzw. Wassergehalts folgende Terminologie verwendet:

1. Trocken: keine Materialfeuchte erkennbar.
2. Feucht: geringer Wassergehalt, plastisches Materialverhalten möglich.
3. Nass: Teile des Materials enthalten genug Wasser, sodass sich das Material wie eine Flüssigkeit verhält.
4. Sehr nass: flüssigkeitsäquivalenter Materialfluss sogar in Bereichen geringer Oberflächenneigung möglich.

### Materialart

Die Einteilung des Materials erfolgt nach Varnes (1978) in *Rock* und *Soil (Debris, Earth)*. Die Differenzierung des Materials ist in Abschnitt 2.1.1 erläutert.

### Bewegungsart

Die Bewegungsarten (*type of movements*) werden nach Varnes (1978) in Fallen, Kippen, Gleiten, Driften und Fließen gegliedert, wobei der Typ *complex* entfällt. Die Bewegungsarten sind in Abschnitt 2.1.1 erklärt.

### Systematik

Nach dem System zur Klassifizierung von Massenbewegungen von Cruden und Varnes (1996) wird z.B. der in dieser Arbeit in Kapitel 4 vorgestellte Frank Slide (Alberta, Kanada, 1903) von Cruden und Varnes in „Landslide Types and Processes“, 1996, S. 5 in folgender Weise ausgedrückt:

„The Frank Slide, for instance, was a complex, extremely rapid, dry rock-fall debris flow [...]“

### Schadenspotential

Cruden und Varnes stellen außerdem eine Korrelation zwischen dem Schadenspotential (*vulnerability*, Tabelle 2.2) und der Geschwindigkeit der Rutschung (*landslide velocity*, Tabelle 2.1 und Abbildung 2.3) her. Das Schadenspotential wird hierbei qualitativ in sieben Kategorien unterteilt:

**Tab. 2.2:** Schadenskategorien (*vulnerability categories*) nach Cruden und Varnes (1996).

Kategorie	Qualitative Beschreibung der Schadenskategorie
7	Katastrophe von großem Ausmaß. Gebäude durch abgegangenes Material zerstört, viele Todesopfer, Entkommen unwahrscheinlich.
6	Einige Todesopfer. Geschwindigkeit der Rutschung zu hoch, als dass alle betroffenen Personen entkommen können.
5	Evakuierung und Flucht möglich. Infrastruktur, Besitz und Ausrüstung zerstört.
4	Einige temporäre und unempfindliche Gebäude bzw. Infrastruktur können betrieben und aufrecht erhalten bleiben.
3	Sanierungsmaßnahmen können während der Massenbewegung durchgeführt werden. Unempfindliche Gebäude bzw. Infrastrukturen können durch Wartung und Instandhaltung benutzt werden, wenn die Bewegungsgeschwindigkeit entsprechend gering ist.
2	Dauerhafte Strukturen und Infrastruktur werden durch das Ereignis nicht beschädigt.
1	Ohne Instrumente und Aufzeichnungen nicht bemerkbar. Baumaßnahmen mit geeigneter Schadensvorsorge möglich.

Velocity class	Example Number
7	1. <u>Elm</u> , Heim (1932), 70 m/sec, 115 deaths.
	2. <u>Goldau</u> , Heim (1932), 70 m/sec, 457 deaths.
	3. <u>Jupille</u> , Bishop (1973), 31 m/sec, 11 deaths, houses destroyed.
	4. <u>Frank</u> , McConnell and Brock (1904), 28 m/sec, 70 deaths.
	5. <u>Vajont</u> , Mueller (1964), 25 m/sec, 1900 deaths by indirect damage.
	6. <u>Ikuta</u> , Engineering News Record (1971), 18 m/sec, 15 deaths, equipment destroyed.
	7. <u>St. Jean Vianney</u> , Tavenas et al. (1971), 7 m/sec, 14 deaths, structures destroyed.
6	8. <u>Aberfan</u> , Bishop (1973), 4.5 m/sec, 144 lives, some buildings damaged.
5	9. <u>Panama Canal</u> , Cross (1924), 1m/minute, equipment trapped, people escaped.
4	10. <u>Handlova</u> , Zaruba and Mencl (1969), 6 m/day, 150 houses destroyed, complete evacuation.
3	11. <u>Schuders</u> , Huder (1976), 10 m/year, road maintained with difficulty.
	12. <u>Wind Mountain</u> , Palmer (1977), 10 m/year, road and railway require frequent maintenance, buildings adjusted periodically.
2	13. <u>Lugnez</u> , Huder (1976), 0.37 m/year, six villages on slope undisturbed.
	14. <u>Little Smoky</u> , Thomson and Hayley (1975), 0.25 m/year, bridge protected by a slip joint.
	15. <u>Klosters</u> , Haefeli (1965), 0.02 m/year, tunnel maintained, bridge protected by a slip joint.
	16. <u>Ft Peck Spillway</u> , Wilson (1970), 0.02 m/year, movements unacceptable, slope flattened.

Abb. 2.3: Beispiele von Massenbewegungen mit Angabe von Literaturverweisen, der Rutschungsgeschwindigkeiten und dem herbeigeführten Schaden sowie deren Einteilung in Geschwindigkeitsklassen. Quelle: Cruden und Varnes (1996), S. 59, Tabelle 3.4.

### 2.1.3 Hungr et al. (2001)

Hungr et al. (2001) erarbeiten auf Basis von Varnes (1978), Hutchinson (1988) und Cruden und Varnes (1996) ein verbessertes System zur Einteilung und Klassifikation von Massenbewegungen. Der Grund hierfür ist, dass Ausdrücke wie *Slide* oder *Flow* zur Definition der Bewegungsart die Kenntnis des Bewegungsmechanismus und des kinematischen Modells unterstellen. Zwar werden weiterhin Begriffe wie *Slide* oder *Flow* verwendet, allerdings entgegen den Ausführungen in Varnes (1978) nur zur Beschreibung und nicht zur alleinigen Definition von Bewegungstypen.

Hungr et al. (2001) unterscheiden daher insgesamt zehn Kategorien bzw. Klassen, in die Massenbewegungen des Bewegungstyps „Fließen“ unterteilt werden können (nach der in Hungr et al., 2001, verwendeten englischen Terminologie):

1. *Dry (or Non-Liquefied) Sand (Silt, Gravel, Debris) Flow*: Hierunter wird eine fließähnliche Bewegung von trockenen bzw. feuchten grobkörnigen Materialien ohne signifikanten Porenwasserdruck verstanden. Ein Versagen tritt zumeist durch ein Abrutschen bzw. -gleiten in teilweise flachem Gefälle auf, zumeist aber bei einem Böschungswinkel kurz oberhalb des natürlichen Reibungswinkels des jeweiligen Materials. Kennzeichnend für diese Kategorie der Massenbewegungen ist ein geringes Volumen und eine begrenzte Rutschungsgeschwindigkeit. Ein typisches Beispiel hierfür sind Rutschungen von Sandkörnern in Dünenhängen.
2. *Sand (Silt, Debris, Weak Rock) Flow Slide*: In diese Kategorie werden sehr rasche bis extrem schnelle Rutschungen von granularen bzw. körnigen Materialien (mit Porenwasserüberdruck) in moderatem Gefälle eingeordnet, wobei das Material durch teilweise oder vollständige Wassersättigung flüssigkeitsäquivalentes Verhalten aufweisen kann. Die Rutschung tritt im Allgemeinen durch ein strukturelles Versagen des Korngerüsts auf, ausgelöst durch beispielsweise eine Deformation oder seismische Aktivitäten. Hierbei erfährt ein Teil des Materials durch einen hohen Grad an Wassersättigung eine Verflüssigung und bedingt damit den Zusammenbruch des Korngerüsts und in weiterer Folge eine deutliche Reduzierung der Festigkeiten.
3. *Clay Flow Slide*: Hierin wird sehr bis extrem schnelles Fließen von verflüssigten und strukturempfindlichen Tonen und Mergeln nahe des natürlichen Wassergehaltes eingeteilt. Die Tone bzw. tonigen Schluffe liegen oftmals überkonsolidiert vor, sodass sie im intakten Zustand eine hohe undrainierte Scherfestigkeit aufweisen können. Während des Versagens wird diese Festigkeit aufgrund der Auflösung des Korngerüsts deutlich reduziert, sodass das Material viskoses Verhalten annehmen kann.
4. *Peat Flow*: Unter Peat Flow werden langsame bis sehr schnelle fließähnliche Bewegungsarten von gesättigtem Torf mit hohem Porenwasserdruck definiert. Das Versagen kann z.B. durch externe Auflasten hervorgerufen werden.
5. *Earth Flow*: Hierunter werden sehr langsame bis schnelle fließähnliche mitunter periodische Bewegungen von toniger/tonhaltiger Erde mit plastischem Materialverhalten eingeordnet. Hierbei kann die Bewegung über lange Zeit und weite Distanzen aufgrund anhaltender und wiederkehrender plastischer Deformationen in Kombination mit Kriechprozessen der Materialmasse andauern. Typischerweise weisen überkonsolidierte Tone, Lehme und Mergel sowie verwitterte Gesteine geringer Festigkeit ein solches rheologisches Verhalten auf.
6. *Debris Flow*: Hierunter wird das sehr bis extrem schnelle Strömen bzw. Fließen von Schutt und Geröll (Materialien von Ton bis große Gesteinsblöcke von mehreren Metern Durchmesser, Plastizitätszahl  $< 5\%$ ) in einer steil abfallenden Fahrrinne eingeordnet. Das

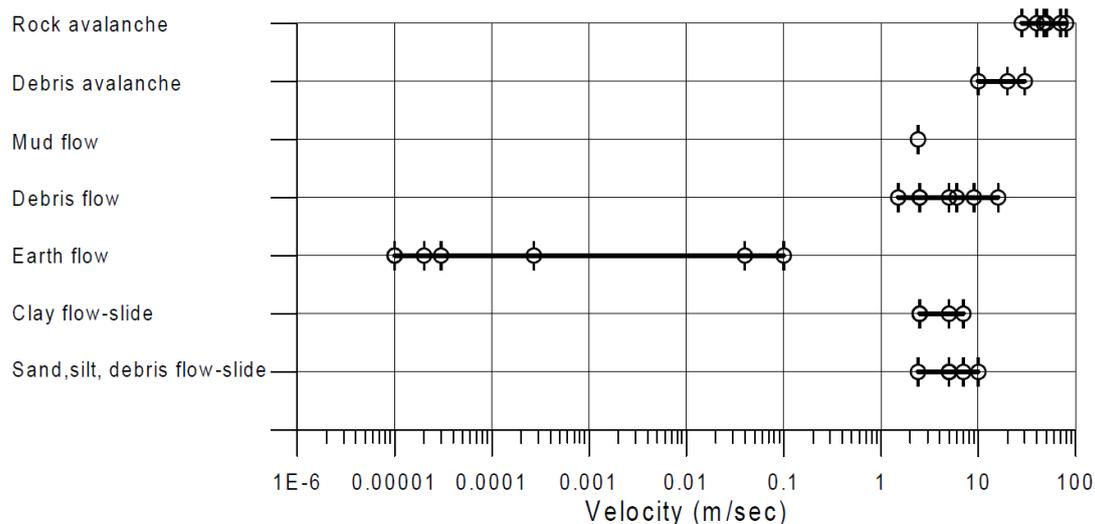
Vorhandensein einer in der Regel seitlich begrenzten Fahrrinne, welche sich oftmals schon vor dem eigentlichen Ereignis ausgebildet hat, ist ein typisches Charakteristikum von Schuttströmen. Das Erkennen einer Rinne oder Mulde, in welcher sich ein Schuttstrom ausbilden kann, ist hinsichtlich der Risikobewertung sowie der Definition von Gefahrenzonen und in weiterer Folge der Errichtung geeigneter Sicherungssysteme von wesentlicher Bedeutung. Aufgrund der Ausbreitungscharakteristik von Strömen dieser Art weisen *Debris Flows* ein hohes Schadenspotential auf. Der Bereich der Ablagerungen weist zumeist eher dickere Zonen auf, die teilweise auch zu Haufen aufgeschoben werden können.

7. *Mud Flow*: Es handelt sich hierbei um ein sehr bis extrem schnelles Strömen bzw. Fließen von sich plastisch verhaltenden Bodenmaterialien (beispielsweise plastische Tone), allerdings weist ein *Mud Flow* im Gegensatz zum *Debris Flow* einen deutlich höheren Wasseranteil des transportierten Materials auf.
8. *Debris Flood*: In diese Kategorie wird sehr schnelles Fließen von Wasser mit einem erheblichen Anteil an Geröll und Schutt in einer steilen Fahrrinne eingeordnet. Hierbei werden große Mengen an Sedimenten transportiert, wobei die Fließgeschwindigkeit der von Wasser ähnelt. Zur Differenzierung von *Debris Flow* und *Debris Flood* kann das Durchflussmaximum herangezogen werden, welches im Falle einer *Debris Flood* in etwa dem einer Überschwemmung gleicht. Der Durchfluss eines *Debris Flows* kann dagegen mehr als das Zehnfache einer großen Überschwemmung bzw. Flut betragen. Die Ablagerungen bilden im Unterschied zu einer *Debris Flow* relativ dünne, dafür aber weit auslaufende Bereiche.
9. *Debris Avalanche*: Eine Schuttlawine wird als sehr bis extrem schnelles Fließen von Geröll in steilem Gelände definiert, die sich allerdings nicht in einer Mulde oder Rinne fortbewegt. Den Ursprung der Bewegung bildet zumeist ein strukturelles Versagen nahe der Geländeoberfläche an einem Hang, im weiteren Verlauf nimmt die Bewegung dann fließähnlichen Charakter mit Geschwindigkeiten, die oberhalb denen einer *Debris Flow* liegen, an. Hutchinson (1988) verwendet anstelle des Begriffs *Debris Avalanche* den Term *hillslope (unchannelized) debris flow*, was mit Hangmure übersetzt werden kann.
10. *Rock Avalanche*: Eine Felslawine – von Heim (1932) und Hutchinson (1988) als Sturzstrom bezeichnet – ist eine extrem schnelle fließähnliche Bewegung von geklüfteten und zerlegten Gesteinen, die überwiegend aus großen Felsstürzen (*rock fall, rock slide*) entsteht. Unveröffentlichten Daten von Hungr und Evans zufolge treten im Gegensatz zu festen bzw. harten Gesteinen bei weichen Gesteinen eher langsamere Bewegungsgeschwindigkeiten auf.

Hungr et al. (2001, S. 235) halten hinsichtlich des Bewegungsmomentums folgendes fest:

„Large rock avalanches tend to exhibit much greater mobility than could be predicted using frictional models appropriate for dry broken rock.“

Ein Grund hierfür kann die bei Felslawinen auftretende Erosion des Bodens im Bereich der basalen Topographie sein, der dann durch z.B. Verflüssigung eine Art Gleitfläche ausbildet, auf der sich die Felsmassen schneller und weiter fortbewegen können. Hierbei spielt der Wassergehalt des erodierten Bodenmaterials eine entscheidende Rolle.



**Abb. 2.4:** Zusammenstellung von Geschwindigkeitswerten einiger fließähnlicher Massenbewegungen (*flow-like landslides*) nach Hungr et al. (2001). Quelle: Fell et al. (2000).

In oben stehender Abbildung sind Bandbreiten von Bewegungsgeschwindigkeiten einiger Kategorien entsprechend der erläuterten Benennung dargestellt. Man erkennt die große Spannbreite der Bewegungsgeschwindigkeit der Kategorie *Earth Flow*, die in Bereichen von  $10^{-5}$  m/s bis 0,1 m/s liegt. Fließbewegungen, die in die Kategorien *Sand*, *Silt*, *Debris* und *Clay Flow Slide* eingeteilt werden können, weisen Geschwindigkeiten von bis zu 10 m/s auf. Im Gegensatz hierzu können Schuttströme Fließgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s, lawinenartige Bewegungen von Schutt und Geröll sogar bis zu 30 m/s erreichen. Eine Felslawine (*Rock Avalanche*) hebt sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/s deutlich von denen anderer Kategorien ab.

Die Zusammenstellung von Geschwindigkeitswerten nach Abbildung 2.4 lässt zumindest eine Trennung von extrem schnellen Fels- sowie Bergstürzen und langsamen fließähnlichen Bewegungen zu, stellt aber keinesfalls eine grundsätzliche Einteilung der Massenbewegungen in die Kategorien nach Hungr et al. (2001) allein zufolge der Geschwindigkeit dar.

Nach dem System zur Typisierung der Massenbewegungen von Hungr et al. (2001) kann der in Kapitel 4 beschriebene Frank Slide (Alberta, Kanada, 1903) als *Rock Avalanche* bezeichnet werden (Hungr et al., 2001, S. 235, Abbildung 17).

### 2.1.4 Hungr et al. (2014)

In „The Varnes classification of landslide types, an update“ erweitern Hungr et al. (2014) den in Hungr et al. (2001) erarbeiteten und auf den Ausführungen von Varnes (1978), Hutchinson (1988) und Cruden und Varnes (1996) basierenden Katalog zur Typisierung und Beschreibung von Massenbewegungen (*landslide types*). Die im vorherigen Abschnitt 2.1.3 erklärten Klassen werden weiter ergänzt, sodass das aktualisierte Klassifizierungssystem insgesamt 32 Kategorien zur Beschreibung gravitativer Massenbewegungen enthält. Diese sind in nachstehender Grafik aufgelistet:

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice</i> fall <sup>a</sup>	2. <i>Boulder/debris/silt</i> fall <sup>a</sup>
Topple	3. <i>Rock block</i> topple <sup>a</sup>	5. <i>Gravel/sand/silt</i> topple <sup>a</sup>
	4. <i>Rock flexural</i> topple	
Slide	6. <i>Rock rotational</i> slide	11. <i>Clay/silt</i> rotational slide
	7. <i>Rock planar</i> slide <sup>a</sup>	12. <i>Clay/silt</i> planar slide
	8. <i>Rock wedge</i> slide <sup>a</sup>	13. <i>Gravel/sand/debris</i> slide <sup>a</sup>
	9. <i>Rock compound</i> slide	14. <i>Clay/silt</i> compound slide
	10. <i>Rock irregular</i> slide <sup>a</sup>	
Spread	15. <i>Rock slope</i> spread	16. <i>Sand/silt</i> liquefaction spread <sup>a</sup>
		17. <i>Sensitive clay</i> spread <sup>a</sup>
Flow	18. <i>Rock/ice</i> avalanche <sup>a</sup>	19. <i>Sand/silt/debris</i> dry flow
		20. <i>Sand/silt/debris</i> flowslide <sup>a</sup>
		21. <i>Sensitive clay</i> flowslide <sup>a</sup>
		22. <i>Debris</i> flow <sup>a</sup>
		23. <i>Mud</i> flow <sup>a</sup>
		24. <i>Debris</i> flood
		25. <i>Debris</i> avalanche <sup>a</sup>
		26. <i>Earthflow</i>
Slope deformation	28. <i>Mountain slope</i> deformation	30. <i>Soil slope</i> deformation
		31. <i>Soil</i> creep
	29. <i>Rock slope</i> deformation	32. <i>Solifluction</i>

**Abb. 2.5:** Übersicht über das 32 Kategorien umfassende Klassifizierungssystem. Mit einem hochgestellten <sup>a</sup> gekennzeichnete Klassen erreichen für gewöhnlich extrem schnelle Fließgeschwindigkeiten nach den Bezeichnungen in den Ausführungen in Cruden und Varnes (1996). Quelle: Hungr et al. (2014), verändert.

Die in Abschnitt 2.1.3 aufgezeigte Charakterisierung von Massenbewegungen des Bewegungstyps „Fließen“ wird von Hungr et al. (2014) übernommen (vgl. Abbildung 2.5). Zusätzlich werden die Bewegungstypen nach Varnes (1978) sowie Cruden und Varnes (1996) in die Kategorien Fallen (*fall*), Kippen (*topple*), Gleiten (*slide*), Driften (*spread*) differenziert und um den Typ Hangdeformation (*slope deformation*) erweitert. Das Material wird nach Varnes (1978) in *Rock* und *Soil* untergliedert.

An dieser Stelle wird auf eine Erläuterung der einzelnen Kategorien aufgrund des den Rahmen sprengenden Umfangs verzichtet. Eine detaillierte Definition der unterschiedlichen Klassen mit ergänzenden Diskussionen und Beispielen ist in Hungr et al. (2014) enthalten.

### 2.1.5 Sturzprozesse ausgehend von Felsböschungen

Ausgehend von Felsböschungen können unterschiedliche Sturzprozesse eingeteilt werden, wobei die verschiedenen Ausdrücke vorwiegend zur Unterscheidung des Ausmaßes der Massenbewegung gebraucht werden. Als Kriterien, welche zur Abgrenzung der Begriffe herangezogen werden, dienen der Bewegungsmechanismus und das Abbruch- bzw. Sturzvolumen. Letzteres kann relativ leicht ermittelt werden, die Feststellung des Bewegungsmechanismus erfordert allerdings eine genaue Kenntnis nicht nur der geologischen Verhältnisse und der rheologischer Eigenschaften beteiligter Böden und Gesteine, sondern auch ein Verständnis für den Versagensmechanismus des Abbruchs (siehe Abschnitt 2.2) und in weiterer Folge des kinematischen Modells.

Im Allgemeinen lassen sich Sturzprozesse in Einzelabstürze (hierbei handelt es sich um einen Steinschlag bzw. einen Blockschlag) und Massenstürze (Felssturz bzw. Bergsturz) untergliedern. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal ist im Falle von Massenstürzen das Ablösen von zusammenhängenden Felsmassen, die sich im Laufe des Ablöse- und Sturzprozesses in zahlreiche Blöcke fraktionieren. Bei größeren Felsstürzen und Bergstürzen (Felslawinen) beeinflusst die Wechselwirkung der einzelnen Komponenten untereinander maßgeblich den Transportmechanismus und den Bewegungsprozess der Sturzmasse. Die starke Interaktion einzelner Komponenten wurde von Heim (1932) durch den Begriff Sturzstrom beschrieben. Der Übergang vom Fels- zum Bergsturz ist fließend und vom Sturzvolumen, vom Abbruch- bzw. Versagensmechanismus und von der Sturzbahn abhängig.

#### Steinschlag/Blockschlag

Unter einem Steinschlag (*rock fall*) wird im Allgemeinen der Absturz (Fallen, Stürzen) eines einzelnen Blockes aus einer Felsböschung heraus verstanden. Krauter (2001) gibt die Kubatur eines Einzelblockes mit bis zu  $0,3 \text{ m}^3$  und das Gesamtvolumen mit bis zu  $5 \text{ m}^3$  an. Kienholz et al. (1998) definieren einen Steinschlag bzw. Blockschlag als das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen mit einem Durchmesser  $< 50 \text{ cm}$  bzw. Blöcken mit Durchmessern  $> 50 \text{ cm}$ .

#### Felssturz

Ein Felssturz (*rock mass fall*) ist nach Krauter (2001) durch das Volumen eines Einzelblockes ab  $0,3 \text{ m}^3$  und durch ein Gesamtvolumen ab  $5 \text{ m}^3$  gekennzeichnet. Nach Kienholz et al. (1998) erfolgt die Definition eines Felssturzes als „Sturz einer Felsmasse, die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine fraktioniert wird, wobei die Interaktionen zwischen den Komponenten keinen maßgebenden Einfluss auf die Dynamik des Prozesses haben.“ (Kienholz et al., 1998, S. 37)

#### Bergsturz/Felslawine

Als Bergsturz (*rock avalanche*) bezeichnet Krauter (2001) Abstürze mit einem Gesamtvolumen ab  $10000 \text{ m}^3$ . Kienholz et al. (1998) hingegen definieren einen Bergsturz als „Absturz sehr großer, im ursprünglichen Felsverband mehr oder weniger kohärenter Felsmassen unter Erreichung hoher Geschwindigkeiten, wobei der Transportmechanismus durch eine starke Wechselwirkung zwischen den Komponenten (Sturzstrom) gekennzeichnet ist.“ (Kienholz et al., 1998, S. 37)

**Tab. 2.3:** Einteilung von Fall- und Sturzmassen in Steinschlag, Fels- und Bergsturz (nach Krauter, 2001, S. 640, Tabelle 7).

Bezeichnung	Volumen Einzelblock	Gesamtvolumen
Steinschlag	$< 0,3 \text{ m}^3$	$< 5 \text{ m}^3$
Felssturz	$> 0,3 \text{ m}^3$	$> 5 \text{ m}^3$
Bergsturz	-	$> 10000 \text{ m}^3$

## 2.2 Versagensmechanismen des Abbruchs

Eine Massenbewegung ist eine talabwärts gerichtete gravitative Verlagerung von Gebirgsmassen (Fest- und Lockergestein, Bodenmaterial und Wasser), die entsprechenden Mechanismen unterliegt. Die so transportierten Materialien werden von einer labilen Position in eine stabile Position umgelagert. Diese Bewegung wird in der Regel dann eingeleitet, wenn die Materialfestigkeiten durch äußere oder innere Beanspruchung überschritten werden und sich kein Gleichgewicht aus rückhaltenden und antreibenden Kräften ausbilden kann (Genske, 2014). Nach Genske (2017) bewegt sich das ableitende Material entlang einer natürlichen Böschung eines Hanges entsprechend der äußeren Geometrie (Geomorphologie) und seines inneren Aufbaus (Geologie).

Das Gleichgewicht der angesprochenen Kräfte wird durch ein auslösendes Ereignis (Trigger) gestört und ermöglicht dadurch einen Initialmechanismus, der zum Versagen der Felsböschung führen kann (dies wird als Versagensmechanismus des Abbruchs bezeichnet). In weiterer Folge kommt es dann zum Sturzprozess.

Im Festgestein wird der Versagensmechanismus überwiegend von Diskontinuitäten – beispielsweise dem Trennflächengefüge, der Schichtung und den Schieferungsflächen – festgelegt. Die im Festgestein ausgebildeten Diskontinuitäten können sich bei Spannungsänderungen weiter ausbreiten. Im Lockergestein kann vor allem ein Schichtwechsel von unterschiedlichen Bodenarten mit verschiedenen Eigenschaften (beispielsweise Scherfestigkeit, Wassergehalt, usw.) den Versagensmechanismus beeinflussen. Eine Erläuterung zu bewegungsauslösenden Faktoren sowie deren Ursachen und Auswirkungen auf das Hangsystem bzw. das Böschungssystem geben Reuter et al. (1992). Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass Veränderungen der Hanggeometrie, der Bergwasserverhältnisse, der Belastung und der Festigkeitseigenschaften zu den entscheidenden bewegungsauslösenden Faktoren zählen.

Dem ursprünglichem Versagensmechanismus des Abbruchs können weitere Bewegungsprozesse folgen, die sich mitunter vom Initialmechanismus gänzlich unterscheiden (Post-Failure-Mechanismus). Eine Kombination aus den verschiedenen Prozesstypen (Typen von Massenbewegungen), die in den vorherigen Abschnitten erläutert wurden, führt fallweise zu sehr komplexen Prozesskaskaden, für welche es von besonderer Schwierigkeit ist, ein geeignetes analytisches bzw. numerisches Berechnungsverfahren zu identifizieren und anzuwenden. Es gibt nämlich kein geeignetes Modell, das alle möglichen Versagens-, Sturz- und Fließprozesse abbilden kann.

Eine detaillierte Zusammenstellung und Beschreibung möglicher Abbruchmechanismen (Versagensmechanismen des Abbruchs) von Felsböschungen und Talflanken unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse, der Hanggeometrie, des Trennflächengefüges, des Aufbaus und des Verhaltens des Kluftkörpers sowie des mechanischen Verhaltens der Gesteine und des Gebirges (Formänderungs- und Festigkeitsverhalten) ist in Poisel und Preh (2004) gegeben und kann den Abbildungen 2.6 und 2.7 entnommen werden.

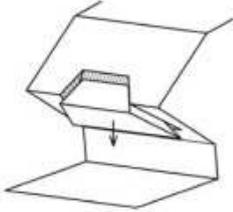
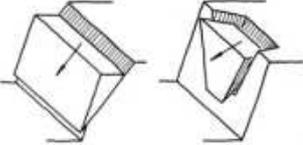
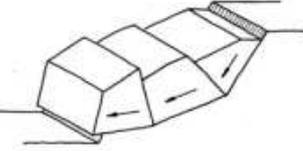
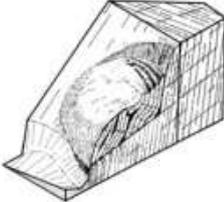
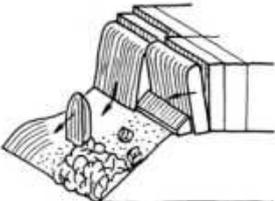
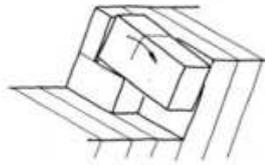
	<b>Falling of rock blocks</b>	R.E. GOODMAN & G.-H. SHI Block Theory (1985)
	<b>Sliding of a rock block on a single or on two discontinuities</b> (translational sliding)	R.E. GOODMAN & G.-H. SHI Block Theory (1985)
	<b>Sliding of several rock blocks on a polygonal sliding plane</b>	P. GUSSMANN Kinematical Elements in Geomechanics. NUMOG (1988)
	<b>Rock slumping</b> (backward rotation of rock blocks)	D.S. KIEFFER Ph.D Thesis University of California- Berkeley (1998)
	<b>Sliding of a fractional body on a shelly, newly formed sliding surface</b> (rotational sliding) (mainly in rock masses of low strength, e.g. heavily fractured rock; block dimensions $\ll$ slope height)	A.W. BISHOP Geotechnique 5 (1955)
	<b>Translational or rotational descent of tower- or slab-shaped blocks of competent rock upon an incompetent base</b> ("Hard on soft")	R. POISEL & W. EPPENSTEINER Proc. 5 <sup>th</sup> Int.Symp. Landslides (1988)

Abb. 2.6: Beispiele von Versagensmechanismen von Felsböschungen und ihre jeweiligen Berechnungsansätze - Teil 1 (Poisel und Preh, 2004).



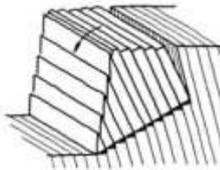
**Rotation of single rock blocks**  
(e. g. rotation of a rock block on a discontinuity due to eccentric bearing or partial yielding of bearing, slumping of one single rock block)

W. WITTKÉ  
Rock Mechanics,  
Springer (1990)



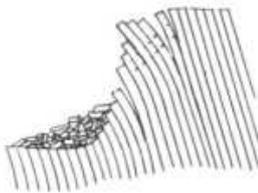
**Buckling of column- or slab-shaped rock blocks**  
(column- or slab thickness  $\ll$  slope height)

D. S. CAVERS  
Rock Mechanics 14  
(1981)



**Toppling of column- or slab-shaped rock blocks**  
(forward rotation similar to dominos; mainly when joint strength is low and rock block strength is high)

R.E GOODMAN &  
J.W. BRAY  
Proc. Conf. Rock Eng.  
for Foundations  
and Slopes (1976)



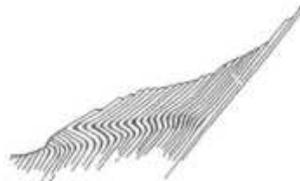
**Flexural toppling**  
bending of column- or slab  
shaped rock blocks like  
cantilever beams

M. HITTINGER &  
R.E GOODMAN  
Report, University of  
California, Berkeley  
(1978)



**Slope creep**  
Continuously decreasing creep of  
rock mass downslope with  
increasing depth  
(mainly in rock masses of low  
strength, e.g. shales, phyllites)

O.C. ZIENKIEWICZ,  
C. HUMPHESON &  
R.W. LEWIS  
Geotechnique 25 (1975)



**Kink band slumping**  
S-shaped deformation of rock  
lamellae due to slope creep

A. PREH  
PhD Dissertation,  
Vienna University of  
Technology (2004)

Abb. 2.7: Beispiele von Versagensmechanismen von Felsböschungen und ihre jeweiligen Berechnungsansätze - Teil 2 (Poisel und Preh, 2004).

## 2.3 Bestimmung der Ausbreitung von Felslawinen

Die Bestimmung der Ausbreitung von Massenströmen (Felslawinen) ist aufgrund der hiervon ausgehenden großen Gefährdung für Gebäude, Infrastruktur und Menschenleben von zentraler Bedeutung. Durch eine akkurate Abschätzung der Reichweite von Felslawinen können Gefährdungsbereiche identifiziert und geeignete Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Grundsätzlich lassen sich unterschiedliche Vorgehensweisen zur Bestimmung der Ausbreitung von Massenbewegungen voneinander abgrenzen, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

### 2.3.1 Experimenteller Ansatz

Da sich Feldbeobachtungen zur Verifizierung von mechanischen und theoretischen Modellen nur bedingt eignen, können zur Untersuchung der Versagensmechanismen und Versagenscharakteristika von Felsböschungen Laborversuche mit kontrollierbaren und reproduzierbaren Bedingungen herangezogen werden. So führten z.B. Chen und Liu (2007) auf Basis des Tilting Box Tests (TBT) in Kombination mit DEM Berechnungen eine experimentelle Studie zu Hangsicherungsmaßnahmen durch.

Versuche zur Bestimmung der Ausbreitung von Massenbewegungen liefern wertvolle Ergebnisse und helfen das rheologische Verhalten von Felslawinen besser zu verstehen. Durch experimentelle Studien kann der Einfluss unterschiedlicher Materialien sowie Beimengungen von Trümmersteinen, Schutt und organischen Bestandteilen, der Hanggeometrie, der Böschungsneigung, der Oberflächenrauigkeit, des Wassergehalts und anderer Faktoren auf das Bewegungsverhalten von Massenbewegungen analysiert werden.

Das U.S. Geological Survey (USGS) führte eine Serie von insgesamt 163 Feldversuchen im Zeitraum von 1992 bis 2017 in einer eigens dafür errichteten 95 m langen, 2 m breiten und 1,2 m hohen Rinne (USGS Debris-Flow Flume) mit einer Neigung von  $31^\circ$  durch (Iverson et al., 1992). Ziel dieser Untersuchungen war zum einen bestehende mathematische Modelle zur Beschreibung von Massenbewegungen zu überprüfen und auf Basis von Beobachtungen und gewonnenen Erkenntnissen verbesserte bzw. neue Modelle zur Berechnung von solchen Ereignissen (Rückrechnung, Interpretation und Vorhersage) zu entwickeln und zum anderen geeignete Maßnahmen zur Reduzierung des Schadenspotentials von Hangrutschungen zu evaluieren (Iverson et al., 1992). Eine ausführliche Dokumentation der Studie ist in Iverson et al. (2018) einsehbar.

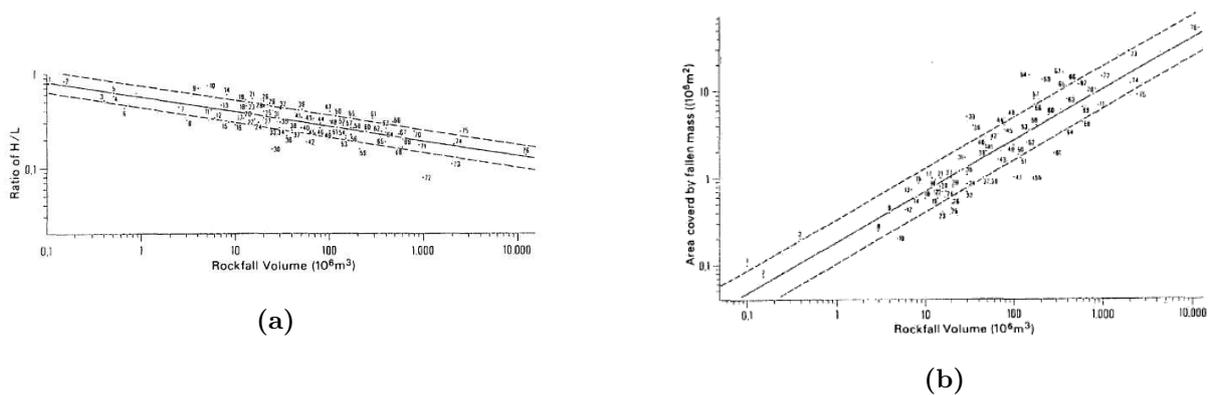


Abb. 2.8: Simulation von Sturzprozessen in der USGS Debris-Flow Flume (Iverson et al., 2018).

### 2.3.2 Empirische Methoden

Durch Auswertungen und statistische Analysen von Daten, die im Rahmen von Massenbewegungen aufgezeichnet wurden, ist die Angabe von Zusammenhängen aus beispielsweise Sturzhöhe, zurückgelegter Distanz und Sturzvolumen möglich (Heim, 1932; Scheidegger, 1973; Li, 1983). Eine Auflistung zahlreicher *Empirical-Statistical Methods* ist in Scheidl et al. (2013) aufgeführt.

Ein wesentlicher Zusammenhang besteht zwischen der Höhe  $H$  (Höhendifferenz zwischen dem obersten Punkt des Abbruchs und dem tiefstem Punkt der Ablagerungen), der entsprechenden horizontal projizierten Länge  $L$  und dem Sturzvolumen  $V$ . Das Verhältnis aus Höhendendifferenz  $H$  und Länge  $L$  entspricht dem Tangens der Fahrböschung ( $\tan \beta$ ) und kann gegenüber dem Sturzvolumen  $V$  in einer logarithmischen Skalierung dargestellt werden. Es lässt sich unter Annahme einer konstanten Höhendendifferenz  $H$  erkennen, dass die Länge  $L$  mit zunehmendem Volumen  $V$  größer wird, da der Quotient  $H/L$  abnimmt (siehe Abbildung 2.9a). Heim (1932) führte bereits aus, dass die Distanz, die das Material bei einer Hangrutschung zurücklegt, umso weiter ist, je größer das Volumen der abgleitenden Felsmassen ist. Eine weitere Korrelation besteht zwischen der vom abgelagerten Material bedeckten Fläche  $A$  und dem Sturzvolumen  $V$ . Es zeigt sich, dass bei zunehmendem Volumen die bedeckte Fläche ebenfalls zunimmt (vgl. Abbildung 2.9b).



**Abb. 2.9:** (a) Zusammenhang zwischen dem Sturzvolumen  $V$  und dem Verhältnis aus Höhendendifferenz  $H$  und Länge  $L$ . (b) Zusammenhang zwischen dem Sturzvolumen  $V$  und der von den Ablagerungen bedeckten Fläche  $A$ . Quelle: Li (1983).

In der Literatur wurden außerdem empirische Gleichungen zur Abschätzung der Gesamtlänge der Rutschung (*total travel distance*) und der Ausbreitung bzw. der Reichweite einer Rutschung (*runout length*) entwickelt (Corominas, 1996; Rickenmann, 1999, 2005).

Im Rahmen einer Analyse von insgesamt 204 Massenbewegungen wurden diese in unterschiedliche Kategorien entsprechend der bereits angesprochenen Klassifizierungen von Massenbewegungen unterteilt und Gleichungen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen  $H/L$  und  $V$  entwickelt (Corominas, 1996). Hierbei wird zwischen den Gruppen *Rockfall*, *Debris Flow*, *Earth Flow* und *Translational Slide* untergliedert. Für die Typen *Rockfall* (Gleichung 2.1) und *Debris Flow* (Gleichung 2.2) gibt Corominas (1996) folgende Beziehungen an:

$$\log \frac{H}{L} = -0,109 \cdot \log V + 0,210 \quad (2.1)$$

$$\log \frac{H}{L} = -0,105 \cdot \log V - 0,012 \quad (2.2)$$

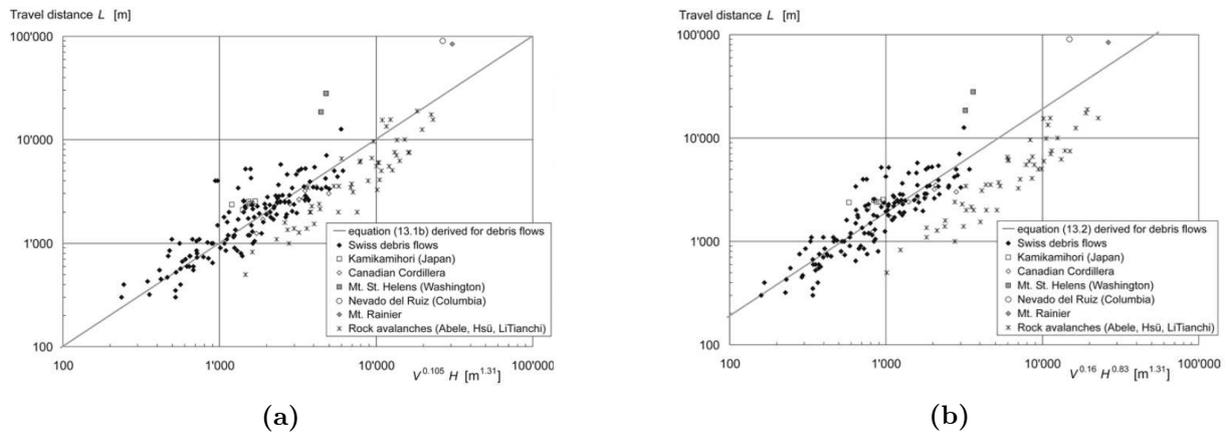
Gleichung 2.2 für den Bewegungstyp *Debris Flow* kann für  $L$  umgeformt werden zu

$$L = 1,03V^{0,105} \cdot H \quad (2.3)$$

und mit der Beziehung von Rickenmann (1999), der Daten von insgesamt 160 Schuttströmen in der Schweiz analysierte, gegenübergestellt werden:

$$L = 1,9V^{0,16} \cdot H^{0,83} \quad (2.4)$$

Ein Vergleich der Gleichungen (2.3) und (2.4) mit den in den Abbildungen 2.10a und 2.10b aufgezeigten Korrelationen zeigt eine ähnliche Verteilung der Daten und der Ergebnisgeraden beider Gleichungen (Rickenmann, 2005). Bei Daten von Felslawinen (Symbol  $\times$  in Abbildung 2.10) kann ein ähnlicher Trend festgehalten werden, allerdings weisen diese im Gegensatz zu Schuttströmen eine geringere Rutschungslänge auf (vgl. Abbildung 2.10). Dies wird durch einen niedrigeren Wassergehalt des Fließmaterials erklärt (Rickenmann, 2005).

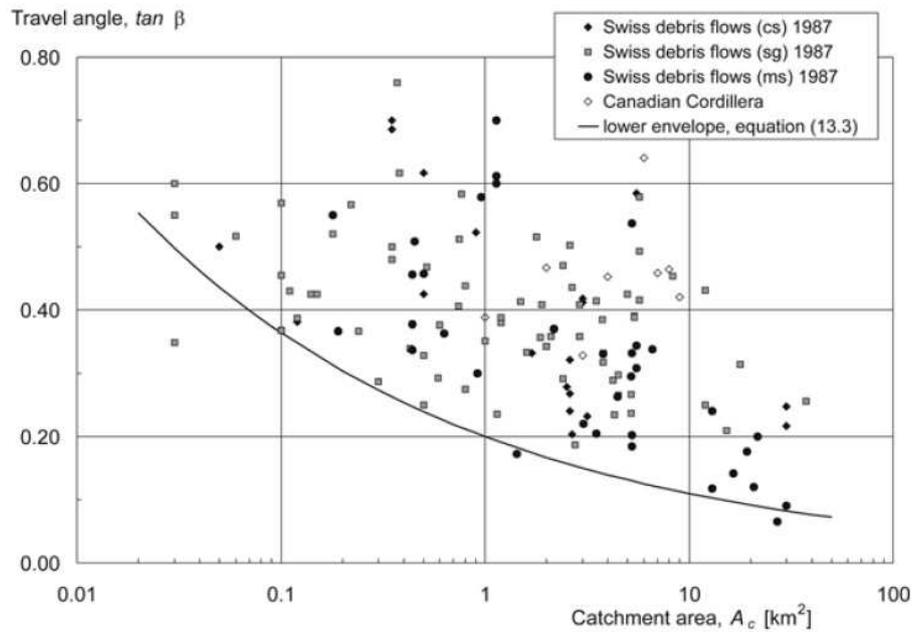


**Abb. 2.10:** (a) Darstellung von beobachteten Rutschungslängen  $L$  (*travel distance*) von Schuttströmen und Felslawinen im Vergleich mit berechneten Rutschungslängen nach Gleichung 2.3. (b) Darstellung von beobachteten Rutschungslängen  $L$  (*travel distance*) von Schuttströmen und Felslawinen im Vergleich mit berechneten Rutschungslängen nach Gleichung 2.4. Quelle: Rickenmann (2005).

Der Einzugsbereich der Massenbewegung  $A_c$  kann nach Zimmermann et al. (1997) entsprechend folgendem Zusammenhang geschätzt werden:

$$\tan \beta_{min} = 0,20 \cdot A_c^{-0,26} \quad (2.5)$$

Das Verhältnis von  $H/L$  (entspricht  $\tan \beta$ ) und  $A_c$ , welches nach Zimmermann et al. (1997) durch Gleichung 2.5 beschrieben wird, ist in Abbildung 2.11 gezeigt.

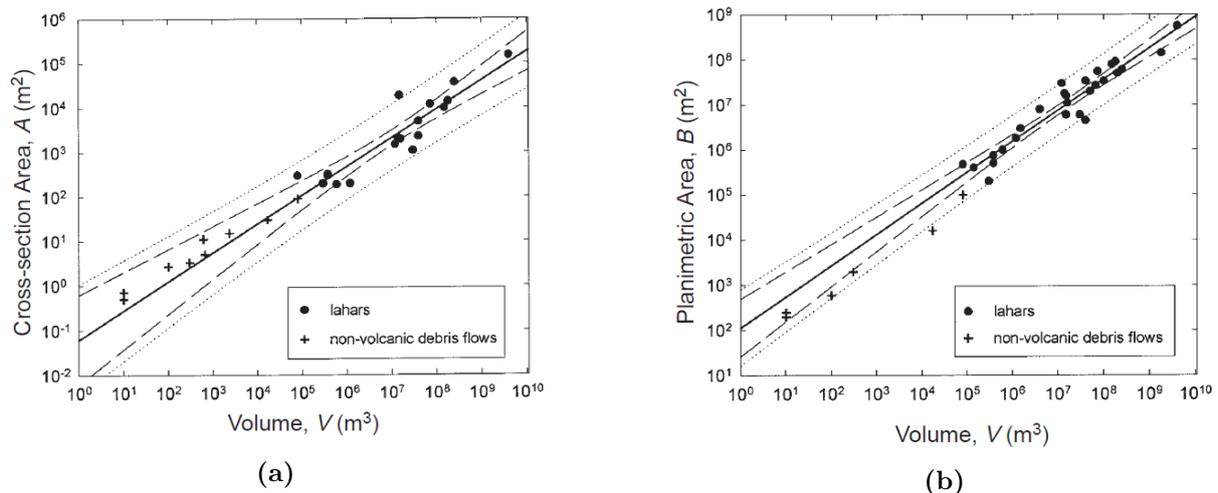


**Abb. 2.11:** Gegenüberstellung des Tangens der Fahrböschung und des Einzugsgebietes  $A_c$  ausgewählter Massenbewegungen (Rickenmann, 2005).

Iverson et al. (1998) stellen durch Auswertung von Daten aus Murenabgängen eine Korrelation zwischen der Querschnittsfläche  $A$  der Ablagerungen sowie der Grundrissfläche  $B$  der Ablagerungen und dem Volumen  $V$  einer Massenbewegung her (vgl. Abbildung 2.12):

$$A = 0,05V^{\frac{2}{3}} \quad (2.6)$$

$$B = 200V^{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$



**Abb. 2.12:** (a) Korrelation von Volumen  $V$  und der Querschnittsfläche  $A$  der Ablagerungen. (b) Korrelation von Volumen  $V$  und der Fläche im Grundriss  $B$  der Ablagerungen. Quelle: Iverson et al. (1998).

### 2.3.3 Dynamische Methoden

Dynamische Methoden umfassen sowohl analytische als auch numerische Verfahren, wobei die Lösung einer Bestimmungsgleichung nach analytischem Lösungsverfahren mathematisch exakt ist (Roth, 2003; Scheidl et al., 2013). Die Angabe einer exakten Lösung ist bei numerischen Rechenverfahren nicht möglich, weshalb mittels anderen Ansätzen versucht wird, eine näherungsweise Lösung zu berechnen.

#### 2.3.3.1 Analytik

##### Schlittenmodell nach Heim (1932)

Mit Hilfe mathematischer Modelle können alpine Massenbewegungen analytisch exakt beschrieben werden. Das sogenannte Schlittenmodell nach Heim (1932) ist das einfachste Modell zur Abschätzung der Reichweite und des Geschwindigkeitsverlaufes von Massenbewegungen, wobei der Grundgedanke dieser Methodik darin besteht, die Sturzmasse als starren und undeformierbaren zusammenhängenden Gleitkörper zu betrachten. Dieser Gleitkörper wird als Schlitten bezeichnet. Um die Reichweite einer Massenbewegung abzuschätzen, wird der Schwerpunkt des Abbruchvolumens mit dem Schwerpunkt des abgelagerten Volumens verbunden und die daraus erhaltene Energielinie als Pauschalgefälle bezeichnet. Die Fahrböschung ist die Verbindungslinie zwischen dem obersten Rand des Ausbruchsbereiches und dem untersten Endpunkt der Ablagerungen. Durch die Anwendung des Energieerhaltungsgesetzes aus kinetischer und potentieller Energie kann der Geschwindigkeitsverlauf errechnet und so die Reichweite der Massenbewegung abgeschätzt werden. Die grafische Anwendung des Schlittenmodells ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

$$E_{kin} = E_{pot} \Leftrightarrow \frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (2.8)$$

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad v = \sqrt{2gh} \quad (2.9)$$

##### Hungr et al. (1984)

Zur Berechnung der Sturzweite (*runout*) entwickelten z.B. Hungr et al. (1984) auf Basis einer Momentenbetrachtung von Schuttströmen folgendes mathematische Modell, für das die Angabe einer exakten Lösung möglich ist (Rickenmann, 2005):

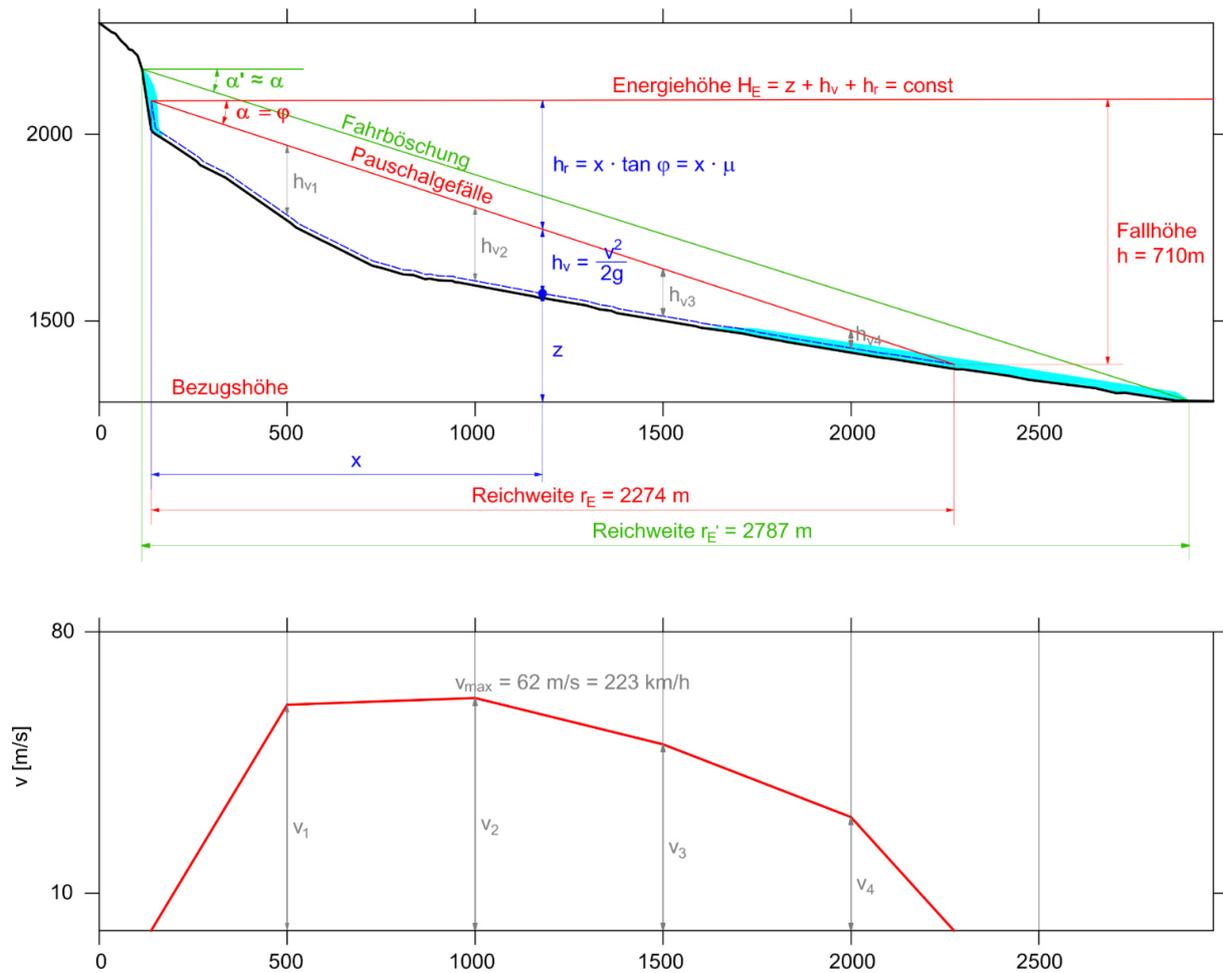
$$s_T = \frac{A_V^2}{G} \quad (2.10)$$

$$A_V = v_u \cos(\theta_u - \theta) \frac{1 + gh_u \cos \theta_u}{2v_u^2} \quad (2.11)$$

$$G = g(S_f \cos \theta - \sin \theta) \quad (2.12)$$

In obigen Gleichungen bedeuten  $s_T$  die Sturzweite,  $v_u$  die anfängliche Geschwindigkeit der Massenbewegung,  $\theta_u$  der Böschungswinkel am Anfang der Rutschung,  $\theta$  die Geländeneigung im Ablagerungsbereich,  $h_u$  die Fließhöhe am Anfangspunkt und  $S_f$  den Scher- bzw. Steigungswiderstand (*friction slope*), welcher entlang des Bewegungspfadens im Ablagerungsbereich konstant angenommen wird.

Neben dem Schlittenmodell nach Heim (1932) und der kurz erläuterten Methodik von Hungr et al. (1984) existieren zahlreiche weitere Modelle zur Abschätzung der Reichweite von Massenbewegungen. Voellmy (1955) beschäftigte sich beispielsweise mit der mathematischen Beschreibung von Schneelawinen (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.2.1).



**Abb. 2.13:** Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufes einer Massenbewegung auf Grundlage des Pauschalgefälles. Schlittenmodell nach Heim (1932). Quelle: Preh (2019).

### 2.3.3.2 Numerik

Numerische Rechenmodelle zur Modellierung von Massenströmen (Felslawinen) unterscheiden sich vom Schlittenmodell nach Heim in erster Linie dadurch, dass sie die Deformation der Masse während des Sturzprozesses abbilden können. Eine Klassifizierung numerischer Rechenverfahren kann basierend auf Konietzky (2000) nach folgenden Kriterien erfolgen:

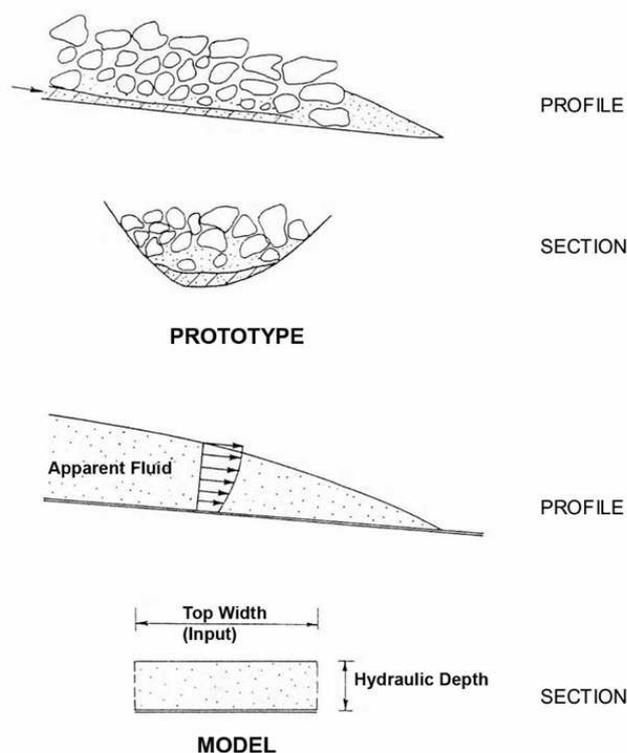
- Art der mechanischen Beschreibung (Kontinuum - Diskontinuum)
- Art der Ortsdiskretisierung (Differenzialverfahren - Integralverfahren)
- Art der Zeitdiskretisierung (implizit - explizit)

Bei der mechanischen Beschreibung von Materialien kann unter anderem zwischen der Kontinuumsmechanik und der Diskontinuumsmechanik differenziert werden. Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal ist, dass bei der Kontinuumsmechanik der Zusammenhalt der inneren Struktur (z.B. das Korngerüst) bzw. der Gesamtstruktur, welche durch diskrete Elemente dargestellt wird, bei Formänderungen, Dehnungen und Verzerrungen erhalten bleibt. Im Gegensatz hierzu können sich die einzelnen Elemente im Falle der Diskontinuumsmechanik frei bewegen, da ein Zusammenhalt der Gesamtstruktur nicht gefordert wird.

Ein einzelnes diskretes Element bzw. ein diskreter Block bildet in sich selbst immer ein Kontinuum, viele Elemente und Blöcke zusammen können ein Diskontinuum bilden (Preh, 2004).

### Kontinuumsmechanische Modelle

Bei den kontinuumsmechanischen Modellen wird das komplexe Material der Sturzmasse als äquivalente Flüssigkeit betrachtet (Hungr, 1995). Diese Berechnungsansätze basieren zumeist auf den St. Venantschen Bewegungsgleichungen, welche für die Analyse von instationären Strömungen in offenen Kanälen entwickelt wurden. Um eine dreidimensionale Berechnung zu ermöglichen, wird bei diesen Modellen nach Savage und Hutter (1989) eine gemittelte konstante Geschwindigkeitsverteilung über die Höhe vorausgesetzt. Dieser Umstand stellt eine grobe Vereinfachung der natürlichen Verhältnisse dar, ist aber zulässig, solange die Höhe der Felslawine klein gegenüber der lateralen Ausbreitung ist. Das Materialverhalten der Sturzmasse wird mit Hilfe von rheologischen Modellen zur Beschreibung der internen Deformation und des basalen Scherwiderstands abgebildet. Zur Modellierung des basalen Scherwiderstands wird in der Praxis zumeist das Materialmodell nach Voellmy (siehe Abschnitt 3.2.1) eingesetzt, welches sowohl den Widerstand infolge Reibung in der Gleitfuge als auch geschwindigkeitsproportionale Widerstände (Turbulenz) berücksichtigt.



**Abb. 2.14:** Schematische Darstellung des Konzepts der äquivalenten (scheinbaren) Flüssigkeit nach Hungr (1995). Quelle: Hungr (1995), verändert.

### Diskontinuumsmechanische Modelle

Alle derzeit zur Verfügung stehenden diskontinuumsmechanischen Modelle zur Berechnung von Massenbewegungen basieren auf der von Cundall (1971) entwickelten Diskrete-Elemente-Methode (DEM), mit deren Hilfe das mechanische Verhalten blockiger Strukturen erfasst werden kann, wobei die Verhaltensweise durch Wechselwirkungen der diskreten Elemente untereinander bestimmt wird. Hierfür ist eine Definition von Kontaktpunkten, deren Eigenschaften und die Art der Wechselwirkung bzw. der Korrelationen zwischen den Elementen erforderlich. Das mechanische Verhalten des Materials eines diskreten Blockes kann sowohl starr als auch elastisch angenommen werden (Preh, 2004; Wolffersdorff und Schweiger, 2017). Typische Vertreter der DEM sind der Particle Flow Code (PFC) und 3DEC der Itasca Consulting Group. Bei diesem Berechnungsansatz wird die Sturzmasse als Ansammlung von diskreten Elementen (Partikeln) modelliert und der feste Untergrund der Sturzbahn zumeist mit Hilfe von Wandelementen abgebildet. Der Sturzprozess wird dabei über das Kontaktverhalten der diskreten Elemente untereinander und mit der Sturzbahn kontrolliert (Poisel und Preh, 2007). Ein Vorteil der Betrachtung der Sturzmasse als Ansammlung diskreter Partikel ist darin begründet, dass die Dynamik von Massenstürzen, also die Interaktion der Partikel untereinander und mit dem Untergrund, besser abgebildet werden kann. Dies ist bei der Modellierung von kleineren Sturzmassen, wie dies bei Felsstürzen der Fall ist (vgl. Abschnitt 2.1.5), als auch bei der Simulation des Auflaufens der Masse auf Barrieren (z.B. Schutzdämme) als Vorteil zu bewerten.

In der Felsmechanik werden zur Modellierung von Massenströmen (Felslawinen) kontinuumsmechanische Modelle und diskontinuumsmechanische Modelle eingesetzt. Die Diskontinuumsmechanik ist insbesondere dann sinnvoll, wenn Störungen wie beispielsweise das Trennflächengefüge das Verformungsverhalten des Materialgefüges maßgeblich beeinflussen oder dominieren (Wolffersdorff und Schweiger, 2017). Kontinuumsmechanische Berechnungen empfehlen sich aufgrund der größeren Anzahl an durchgeführten Rückrechnungen und ableitbaren Prognoseparametern.

## Kapitel 3

# Numerische Simulation von Felslawinen mittels r.avaflow

### 3.1 Allgemeines

#### 3.1.1 Projekt

r.avaflow, welches im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts zwischen Deutschland, Österreich und der Schweiz in Zusammenarbeit mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Österreichischen Forschungsfonds (FWF) im Zeitraum von Juli 2014 bis Juni 2017 entwickelt wurde, ist ein sogenanntes Open Source Programm – also eine Software, deren Quelltext öffentlich einsehbar und nutzbar ist – zur Simulation von gravitativen schuttstromähnlichen Massenbewegungen bzw. -strömen (z.B. in Form von Felslawinen). Bei der Entwicklung des Programms waren zusätzlich zu den oben genannten beiden Institutionen DFG und FWF verschiedene internationale Experten aus folgenden deutschen und österreichischen Universitäten beteiligt:

- Rheinische Friedrichs-Wilhelms-Universität Bonn
- Universität der Bundeswehr München
- Universität für Bodenkultur Wien
- Universität Innsbruck
- Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft Österreich

Das Projekt entstand aus der Tatsache heraus, dass, obwohl es zahlreiche physikalisch basierte Modelle zur Beschreibung von an Massenbewegungen beteiligter Prozesse gibt, einige Gesichtspunkte und damit verbundene Probleme bislang unberücksichtigt und nicht hinreichend gelöst sind. Hierbei handelt es sich zum einen um die geeignete Berücksichtigung von Massenbewegungen entlang einer Topographie unter Einbeziehung der sogenannten Zweiphasennatur von Strömungen (fest und flüssig) und zum anderen um die Beachtung der Mitnahme von Partikeln bzw. Flüssigkeiten entlang des Stromes in Form von Erosion. Zudem entstand die Anwendung r.avaflow aus der Motivation heraus, dass es bis dato kaum relevante Software bzw. Open Source Software zur Beschreibung der komplexen Zusammenhänge von Massenbewegungen und der Modelle zur Simulation solcher Ereignisse gab. Die öffentliche Zugänglichkeit von r.avaflow und dessen Quelltext ermöglicht somit leicht und kostenlos einer größeren Gruppe an Anwendern (so zum Beispiel Universitäten) den Zugang zu den umfassenden Methoden und Modellen der numerischen Simulation von lawinenartigen Felsströmen und schuttstromähnlichen Bewegungen.

### 3.1.2 Funktionen

*r.avaflow* ist eine Implementation als Modul auf Basis der Geoinformationssoftware GRASS GIS, welche ebenfalls als Open Source Produkt erhältlich ist. Damit wird einem der zentralen Gedanken von *r.avaflow*, nämlich der einer frei zugänglichen Anwendung, Rechnung getragen. Bei der Implementierung der Software wurden die Programmiersprachen Python und C sowie die Statistiksoftware R verwendet. Dies ermöglicht, wie bereits angesprochen, neben dem Voellmy-Salm Modell (vgl. hierzu Abschnitt 3.2.1) die Verwendung eines Zweiphasen-Massenstrommodells nach Pudasaini (vgl. Abschnitt 3.2.2) sowie die Anwendung auf komplexe Interaktionen von Partikeln innerhalb von Massenbewegungen in der Form von Erosion und Ablagerung, also die Berücksichtigung der Änderungen in der Topographie. Zudem besteht die Möglichkeit, mehrere Ausbruchsbereiche und –massen zu definieren und in der Simulation zu berücksichtigen. Grundsätzlich ist es auch möglich, neben einem einfachen Berechnungsdurchlauf, mehrere Durchläufe auszuführen, indem bestimmte Parameter des verwendeten Materialmodells in zuvor definierter Weise entweder kontrolliert oder zufällig variiert werden. Dies wird durch die Festlegung von unteren und oberen Grenzwerten erreicht, wobei die Verteilung der Parameter innerhalb dieser Schwellenwerte entweder in festen Abständen durch die Definition der Anzahl an Berechnungsdurchgängen oder rein zufällig nur durch die Angabe der Anzahl der Berechnungsdurchgänge erfolgt. *r.avaflow* bietet zusätzlich die Möglichkeit der Kalibrierung und Optimierung der Modellparameter durch den Vergleich der Modellergebnisse mit Beobachtungen des jeweiligen Ereignisses sowie die Darstellung der Resultate aus den Berechnungen in Form von animierten Grafiken, Bilddateien und Rasterkarten der berechneten Massenbewegungen (siehe hierzu Abschnitt 3.4).

### 3.1.3 Programmversionen

Das Programm liegt im Hinblick auf die Benutzung in zwei unterschiedlichen Versionen vor, nämlich erstens in der Version [EXPERT] und zweitens in der Version [PROFESSIONAL]. Die Version [EXPERT] stellt die Implementierung der Anwendung als Modul innerhalb von GRASS GIS dar und richtet sich an fortgeschrittene Anwender sowie an Anwendungsbereiche, welche ein hohes Maß an Komplexität aufweisen. Diese Version von *r.avaflow* erfordert zudem ein UNIX-System, vorzugsweise Linux, und wird mittels eines zuvor verfassten Shell-Skripts, das die unterschiedlichen Modellparameter sowie die Befehle zur Ausführung des Programms enthält, bedient. Die [EXPERT] Version bietet die zuvor angesprochene Option der Variation und der Kalibrierung der Parameter im Rahmen mehrfacher Modelldurchläufe. Die [PROFESSIONAL] Version hingegen ist als eigenständiges funktionsfähiges Programm entwickelt, das zudem plattformübergreifend einsetzbar ist, allerdings einen reduzierten Funktionsumfang aufweist. Diese Version von *r.avaflow* wird über eine grafische Benutzeroberfläche bedient und ist nicht in der Lage mehrfache Modelldurchgänge zu simulieren.

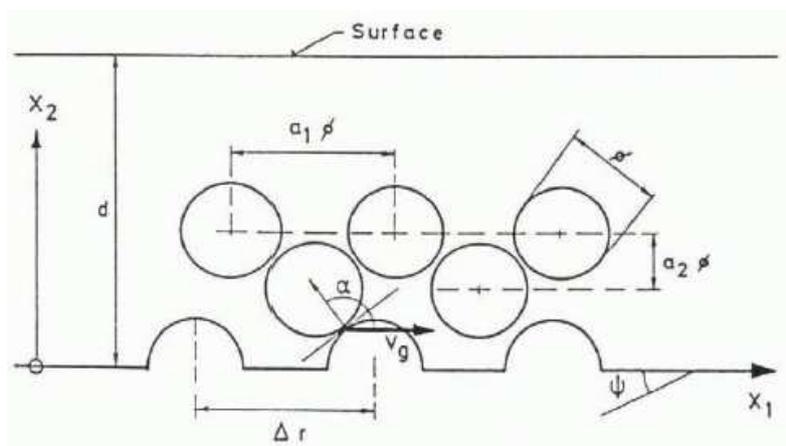
Für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen bzw. Simulationen wird *r.avaflow* [EXPERT] in der Version 1.9 (20180430) vom 30 April 2018 verwendet. Als UNIX-System wird Ubuntu 18.04 LTS benutzt, GRASS GIS wird in der Version 7.4 eingesetzt. Die Simulationen werden auf einem Rechner mit Intel Core i7-8700K Prozessor mit 12 Kernen und 16 GB RAM (DDR4, 3000 MHz) durchgeführt.

## 3.2 Verwendete Materialmodelle zur Simulation von Massenbewegungen

r.avaflow bietet innerhalb der Anwendung die Möglichkeit, zwischen zwei unterschiedlichen Berechnungsverfahren bzw. Materialmodellen zu wählen. Das erste zur Verfügung stehende Modell ist das sogenannte Voellmy-Salm Modell mit Berücksichtigung von Materialtransport entlang des Fließpfades der Massenbewegung und der Erweiterung um die zufällige kinetische Energie (RKE: *random kinetic energy*). Die Grundzüge dieses Materialmodells sind in Abschnitt 3.2.1 dargestellt. Ein weiteres Modell, nach dem der Berechnungsdurchlauf in r.avaflow erfolgen kann, ist das sogenannte Zweiphasen-Massenstrommodell nach Pudasaini, welches in Abschnitt 3.2.2 nur kurz in den Grundzügen angesprochen wird, da sich in dieser Arbeit auf das Voellmy-Salm Modell beschränkt wird.

### 3.2.1 Voellmy-Salm Modell

Das Voellmy-Salm Modell (VS-Modell) wurde von Salm (1993) entwickelt und basiert auf den Modellvorstellungen von Voellmy (1955) zur mathematischen Beschreibung von Schneelawinen. Salm (1993) untersuchte die Verteilung von Scherwiderständen innerhalb der sich bewegenden Schneemassen und stellte anhand von Beobachtungen fest, dass die Bewegungscharakteristik von Schneelawinen durch in schnellen Abfolgen oszillierende bzw. wiederkehrende Maxima des Fließdruckes gekennzeichnet ist. Dies deutet auf das Vorhandensein von Materialzusammenschlüssen in Form von Schneeklumpen (engl. *lumps of snow*), die jedenfalls größer als einzelne Schneekörner bzw. Schneepartikel sind, hin. Die Schneemassen, die sich innerhalb einer Lawine bewegen, werden durch Klumpen dargestellt und als Kugeln mit Durchmesser  $\phi$  (Größenordnung  $\phi = 0,1\text{m}$ ) idealisiert (vgl. Abbildung 3.1). Eine Interaktion zwischen den einzelnen Kugeln wird durch den internen Reibungswinkel  $\varphi$  und durch Anprallkräfte (*impact forces*) in Kombination mit einem Rückprallkoeffizienten  $e$  (*coefficient of restitution*) beschrieben.



**Abb. 3.1:** Modell zur Beschreibung der Scherkräfte in der Nähe der Geländeoberfläche (Salm, 1993).

In Abbildung 3.1 bedeuten  $\psi$  die Geländeneigung,  $d$  die Fließhöhe,  $x_1$  die Koordinate in Fließrichtung und  $x_2$  die hierauf lotrecht stehende Koordinate. Um die Geländerauigkeit zu berücksichtigen, werden im Anstand  $\Delta r$  Unregelmäßigkeiten in der Geländeoberfläche in der Größenordnung von  $\phi$  angenommen.

Das Gleiten der Schneemassen auf der Geländeoberfläche bestimmt maßgebend die Fließgeschwindigkeit, wobei die Schwerkraft die antreibende Kraft einer Massenbewegung darstellt. Salm (1993) entwickelte einen Zusammenhang von Fließgeschwindigkeit  $v_g$  und dem Scherwiderstand  $\tau$ , der aus der Fließbewegung sowie dem Anprallen einzelner idealisierter Schneekugeln mit Masse  $m$  an den Unregelmäßigkeiten der Geländeoberfläche resultiert. Hierbei bezeichnet  $\alpha$  den Winkel zwischen dem Vektor der Fließgeschwindigkeit  $v_g$  und der Normalen des Berührungspunktes einer Kugel mit der Geländeunstetigkeit (vgl. Abbildung 3.1):

$$\tau \sim \frac{1}{(a_1\phi)^2} \frac{v_g}{\Delta r} m v_g \cos^2 \alpha \quad (3.1)$$

Die Scherwiderstand und in weiterer Folge die Fließgeschwindigkeit werden durch Einführung der mittleren Dichte  $\rho_m$ , der Dichte von Schnee  $\rho_s$ , des Reibungskoeffizienten  $\mu$  und des Turbulenzkoeffizienten  $\xi$  bestimmt:

$$\frac{\rho_m}{\rho_s} = \frac{1}{a_1^2 a_2} \frac{\pi}{6} \quad (3.2)$$

$$\tau \sim \frac{a_2 \phi \cos^2 \alpha}{g \Delta r} \rho_m g v_g^2 = \frac{\rho_m g}{\xi} v_g^2 \quad (3.3)$$

$$v_g = \sqrt{\xi d (\sin \psi - \mu \cos \psi)} \quad (3.4)$$

Nach Voellmy (1955) kann der Scherwiderstand (Fließwiderstand) bei turbulentem Abfluss in Abhängigkeit der Wichte  $\gamma$  nach Gleichung (3.5), der Reibungskoeffizient aufgrund von Beobachtungen nach Gleichung (3.6) ermittelt werden:

$$\tau \sim \frac{\gamma v^2}{\xi} \quad (3.5)$$

$$\mu = \frac{\gamma}{2000} \quad (3.6)$$

Im Allgemeinen kann nach Voellmy (1955)  $\mu = \tan \varphi$  gesetzt und der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  für eine grobblockige Sohle mit  $\xi = 500 \text{m/s}^2$  angenommen werden.

Durch Lösen der Differenzialgleichung

$$\frac{\partial v}{\partial x} = - \left( \frac{1}{x + \Delta} + \frac{g}{\xi d_m} \right) v + \left[ \frac{\lambda g d_P^2}{2 d_m (x + \Delta)} - g (\mu \cos \psi_s - \sin \psi_s) \right], \quad (3.7)$$

die aus einer Momentengleichgewichtsbeziehung erhalten wird, bestimmte Salm (1993) die Gesamtlänge der Ablagerungen zu

$$x_s = x_0 + \Delta \quad (3.8)$$

mit

$$\Delta = \frac{\frac{1}{2} \lambda d_P^2}{d_P (\mu \cos \psi_s - \sin \psi_s) + \frac{v_P^2}{\xi}} \quad \lambda = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.9)$$

In den Gleichungen (3.7), (3.8) und (3.9) bedeuten  $d_m$  die mittlere Fließhöhe im Bereich der Ablagerungen mit Länge  $x_s$ ,  $d_P$  sowie  $v_P$  die Fließhöhe und -geschwindigkeit im Punkt  $P$  der Massenbewegung.  $\Delta$  gibt die Länge der konstanten Fließhöhe an der Lawinenfront an, die dann erreicht ist, wenn der Fließdruck sein Maximum von  $\lambda \rho g d_P^2 / 2$  erreicht.  $x_0$  ist die Lösung für  $v = 0$ , eingesetzt in die Lösung der Gleichung (3.7).

### Implementierung in r.avaflow

r.avaflow implementiert das Voellmy-Salm Modells nach dem Ansatz von RAMMS (Christen et al., 2010) mit der Erweiterung um die RKE (*random kinetic energy*) zur mathematischen Beschreibung des Bewegungsprozesses von Felslawinen und Schuttströmen (Mergili et al., 2017).

In Christen et al. (2010) wird die Fließbewegung durch instationäres, nicht einheitliches Verhalten mit unterschiedlichen Fließhöhen  $H(x, y, t)$  und Fließgeschwindigkeiten  $U(x, y, t)$  charakterisiert. Letztere werden durch Gleichung (3.10) beschrieben:

$$U(x, y, t) = \begin{pmatrix} U_x(x, y, t) \\ U_y(x, y, t) \end{pmatrix} \quad U_z(x, y, t) = 0 \quad (3.10)$$

Die Größe bzw. der Betrag der Fließgeschwindigkeit ist durch  $\|U\|$ , die Richtung durch  $n_U$  in Gleichung (3.11) gegeben:

$$\|U\| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad n_U = \frac{1}{\|U\|} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Die Momentengleichgewichtsbeziehung

$$\dot{Q}(x, y, t) = \partial_t H + \partial_x(HU_x) + \partial_y(HU_y) \quad (3.12)$$

kann in Komponentenschreibweise zu

$$S_{gx} - S_{fx} = \partial_t(HU_x) + \partial_x \left( c_x HU_x^2 + g_z k_{a,p} \frac{H^2}{2} \right) + \partial_y(HU_x U_y) \quad (3.13)$$

und

$$S_{gy} - S_{fy} = \partial_t(HU_y) + \partial_y \left( c_y HU_y^2 + g_z k_{a,p} \frac{H^2}{2} \right) + \partial_x(HU_x U_y) \quad (3.14)$$

angeschrieben werden, wobei  $\dot{Q}(x, y, t)$  als Abflussrate der Fließmassen (engl. *mass production source term*) bezeichnet wird. Für eine positive Rate  $\dot{Q}(x, y, t) > 0$  handelt es sich um Bewegungsprozesse mit Materialmitnahme (*snow entrainment rate*), Ablagerungsraten hingegen sind durch eine negative Rate  $\dot{Q}(x, y, t) < 0$  gekennzeichnet (Christen et al., 2010).  $c_x$  und  $c_y$  stellen einen Formfaktor des Geschwindigkeitsprofils dar,  $k_{a,p}$  den Erddruckbeiwert. In den Gleichungen (3.13) und (3.14) bezeichnen  $S_{gx}$  und  $S_{gy}$  effektive Geschwindigkeiten der Form:

$$S_{gx} = g_x H \quad S_{gy} = g_y H \quad (3.15)$$

Entsprechend dem erläuterten Voellmy-Salm Modell können die Spannungen  $S_{fx}$  und  $S_{fy}$  unter Verwendung der Parameter  $\mu$  und  $\xi$  nach Christen et al. (2010) bestimmt werden:

$$S_{fx} = n_{Ux} \left[ \mu g_z H + \frac{g \|U\|^2}{\xi} \right] \quad (3.16)$$

$$S_{fy} = n_{Uy} \left[ \mu g_z H + \frac{g \|U\|^2}{\xi} \right] \quad (3.17)$$

### Fließmodell

Das Fließmodell wird nach Fischer et al. (2012) angegeben:

$$S(V(x, t)) = \partial_t V(x, t) + \nabla \cdot F(V(x, t)) \quad (3.18)$$

Hierin bedeuten  $\nabla = (\partial_x, \partial_y)^T$ ,  $F(V)$  bezeichnet den Transportfluss und  $S(V)$  die Spannungen des Voellmy-Salm Modells:

$$F(V) = \begin{pmatrix} HU_x & HU_y \\ HU_x^2 + g_z \frac{H^2}{2} & HU_x U_y \\ HU_x U_y & HU_y^2 + g_z \frac{H^2}{2} \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$S(V) = \begin{pmatrix} 0 \\ S_x \\ S_y \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Die Spannungen  $S_x$  und  $S_y$  setzen sich aus der Gleichung (3.15) und den Gleichungen (3.16) sowie (3.17) zusammen:

$$S_x = S_{gx} - S_{fx} \quad S_y = S_{gy} - S_{fy} \quad (3.21)$$

### RKE Erweiterung: random kinetic energy

Wie bereits erwähnt wird das Bewegungsverhalten von Schneelawinen durch Klumpen von transportiertem Material, welche durch Kugeln idealisiert werden, beeinflusst (Salm, 1993). Daraus entstehende Schwankungen im Geschwindigkeitsprofil werden durch  $u_x$ ,  $u_y$  und  $u_z$  (engl. *fluctuation velocities*) erfasst und mit der über die Fließhöhe gemittelten Geschwindigkeit  $U$  zu einer Gesamtgeschwindigkeit  $\hat{U}$  addiert (Christen et al., 2010):

$$\hat{U}_x = U_x + u_x \quad \hat{U}_y = U_y + u_y \quad \hat{U}_z = U_z + u_z \quad (3.22)$$

Die Geschwindigkeiten  $u_x$ ,  $u_y$  und  $u_z$  werden anschließend zur Bewegung  $\hat{R}$  zusammengefasst und durch die über die Höhe  $H$  gemittelte kinetische Energie  $R$  wiedergegeben:

$$\hat{R}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} [u_x^2 + u_y^2 + u_z^2] \quad (3.23)$$

$$R(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_0^H \hat{R}(x, y, z, t) dz \quad (3.24)$$

Die Momentengleichgewichtsbeziehung (3.12) wird unter der Definition einer Produktionsrate kinetischer Energie  $\dot{P}$  und einer Dissipationsrate  $\dot{D}$  angeschrieben:

$$\dot{P} - \dot{D} = \partial_t HR + \partial_x(HRU_x) + \partial_y(HRU_y) \quad (3.25)$$

Christen et al. (2010) definieren in weiterer Folge die Spannungen  $S_{fx}$  und  $S_{fy}$  unter Berücksichtigung der Reibungskoeffizienten  $\mu$  und  $\xi$  in Abhängigkeit der kinetischen Energie  $R$ :

$$S_{fx} = n_{Ux} \left[ \frac{\mu(R)g_z H + g \|U\|^2}{\xi(R)} \right] \quad (3.26)$$

$$S_{fy} = n_{Uy} \left[ \frac{\mu(R)g_z H + g \|U\|^2}{\xi(R)} \right] \quad (3.27)$$

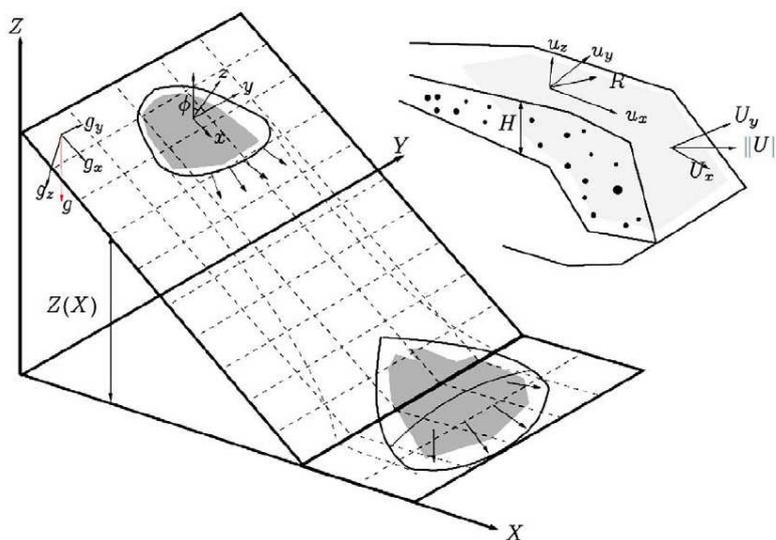
Die Voellmyparameter  $\mu$  und  $\xi$  sind nun Funktionen der kinetischen Energie und werden durch folgende Zusammenhänge beschrieben:

$$\mu(R) = \mu_0 \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right) \quad \xi(R) = \xi_0 \exp\left(\frac{R}{R_0}\right), \quad (3.28)$$

wobei

$$\mu(R=0) = \mu_0 \quad \xi(R=0) = \xi_0 \quad (3.29)$$

Die Erweiterung um die zufällige kinetische Energie (RKE) des in r.avaflow verwendeten Voellmy-Salm Modells spiegelt sich somit in den Parametern  $\mu$  und  $\xi$  wider (siehe Gleichungen (3.26) und (3.27)).



**Abb. 3.2:** Voellmy-Salm Modell mit der Erweiterung um die zufällige kinetische Energie RKE (Christen et al., 2010).

Durch Setzen des Wertes zur Erzeugung zufälliger kinetischer Energie auf 0 (siehe Abschnitt 3.3.2, Unterpunkt Fließparameter) wird die Erweiterung der *random kinetic energy* des Voellmy-Salm Modells bei der Berechnung von Sturzereignissen in r.avaflow nicht berücksichtigt. Stattdessen wird das klassische Voellmy-Salm Modell im Zuge der Modellberechnungen angewandt.

### 3.2.2 Zweiphasen-Massenstrommodell nach Pudasaini

Neben dem Voellmy-Salm Modell besteht in *r.avaflow* die Möglichkeit, ein Sturzereignis unter Verwendung des sogenannten Zweiphasen-Modells (engl. *general two-phase debris flow model*) zu berechnen. Das Modell wurde von Pudasaini (2012) entwickelt und wird vorwiegend zur Simulation von Schuttströmen und Muren angewandt. Schuttströme sind mehrphasige, gravitative Massenbewegungen, deren Bewegungsverhalten durch unterschiedlich verteilte Materialphasen (fest und flüssig) gekennzeichnet sind (Pudasaini, 2012). Die Rheologie und damit das Fließverhalten von Schuttströmen und Muren wird maßgeblich durch die geologische Zusammensetzung und die geotechnischen Eigenschaften der Materialien sowie der Verteilung der festen und flüssigen Phasen beeinflusst. Die Dynamik des Fließverhaltens wird zudem entscheidend durch die Interaktion der beiden angesprochenen Phasen bestimmt. Bisherige Modelle, welche die Zweiphasennatur von Massenbewegungen abbilden, berücksichtigen zwar beispielsweise die Viskosität der Materialphasen und den zwischen den Phasen auftretenden Scherwiderstand, geben allerdings folgende physikalische Aspekte nicht wieder (Pudasaini, 2012):

1. Viskoser Scherwiderstand

Die Menge und die Verteilung der Materialpartikel in der festen Phase beeinflusst das Fließverhalten der gesamten sich bewegenden Massen, indem durch die Interaktion der Phasen untereinander die Schubspannungen durch plastisches bzw. viskoses Verhalten zwischen den Partikeln entweder erhöht oder verringert werden. Wenn die Konzentration der Materialien der festen Phase entlang des Fließpfades zunimmt (Gradient der Konzentration ist positiv), erhöhen sich die viskosen Reibungskräfte bzw. die Schubspannungen mit steigender Anzahl an Materialpartikeln in Fließrichtung der Massenbewegung. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Menge bzw. der Konzentration des festen Materials und den Schubspannungen bzw. Scherkräften, die den Bewegungsprozess maßgeblich prägen. Der erläuterte Sachverhalt wird im Fließmodell berücksichtigt.

2. Generalisierter Widerstandsbeiwert

Im Fließmodell nach Pudasaini (2012) werden die Schubspannungsbeiträge der festen und flüssigen Materialphase zu einem generalisierten Widerstandsbeiwert zusammengefasst. Dies kann auf eine lineare Weise und auf eine quadratische Weise erfolgen: der lineare Ansatz wird beispielsweise bei laminaren Strömungen bzw. niedrigen Fließgeschwindigkeiten verwendet, der quadratische Ansatz hingegen bei turbulenten Strömungsverhältnissen und höheren Fließgeschwindigkeiten. Existierende Fließmodelle verwenden demgegenüber entweder den Beitrag der festen oder der flüssigen Phase der Schubspannungen und sind daher hinsichtlich der exakten Beschreibung aller Aspekte des Fließwiderstandes limitiert.

3. Virtuelle Masse

Die im Fließmodell (Pudasaini, 2012) entwickelte Widerstandskraft umfasst die Wechselwirkung zwischen der festen und der flüssigen Phase in gleichmäßigen Strömungsfeldern unter solchen Bedingungen, in denen Partikel der beiden Materialphasen keinen gegenseitigen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit ausüben. In der Realität ist es allerdings denkbar, dass die festen Partikel relativ zu den flüssigen Partikeln beschleunigen, sodass in dieser Situation ein Teil der umgebenden flüssigen Phase ebenfalls beschleunigt wird. Dies induziert einen ergänzenden Kraftbeitrag in der Strömung, der nach Pudasaini (2012) als zusätzliche Massenkraft oder virtuelle Massenkraft (engl. *added mass force* oder *virtual mass force*) bezeichnet wird. Dieser Aspekt wird von Pudasaini (2012) in einem Koeffizient der generalisierten virtuellen Masse berücksichtigt (*generalised virtual mass coefficient*).

Die drei erläuterten Aspekte bilden die Grundzüge des Fließmodells nach Pudasaini, dessen grundlegende Gleichungen im Folgenden kurz aufgezeigt werden.

### Gleichgewichtsbedingungen

Die beiden Phasen werden durch unterschiedliche Materialeigenschaften charakterisiert: die feste Phase (Index s: *solid*) wird durch die Dichte  $\rho_s$ , den internen Reibungswinkel  $\phi$ , den basalen Reibungswinkel  $\delta$  und den Erddruckbeiwert  $k_{a,p}$  ausgedrückt. Die flüssige Phase (Index f: *fluid*) wird durch die Dichte  $\rho_f$  und die Viskosität  $\eta_f$  definiert. Die Fließgeschwindigkeiten werden mit  $u_s$  und  $u_f$ , die Volumenanteile mit  $\alpha_s$  und  $\alpha_f = 1 - \alpha_s$  bezeichnet. Entsprechend der Differenzierung in eine feste und flüssige Materialphase wird das Massengleichgewicht zu

$$\frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_s u_s) = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f) = 0 \quad (3.31)$$

und das Momentengleichgewicht zu

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s u_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s u_s \otimes u_s) = \alpha_s \rho_s f - \nabla \cdot \alpha_s T_s + p \nabla \alpha_s + M_s \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f u_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u_f \otimes u_f) = \alpha_f \rho_f f - \alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \alpha_f \tau_f + M_f \quad (3.33)$$

angeschrieben. In obigen Gleichungen bezeichnet  $f$  die Kraftdichtevektoren,  $T$  den Cauchy'schen Spannungstensor,  $\tau$  den Spannungstensor für flüssige, viskose Phasen,  $p$  den Fließdruck und  $M$  die spannungsbezogene Kraftdichte nach  $M = M_s + M_f$ .

### Widerstandsbeiwerte

Bezugnehmend auf den bereits erklärten Aspekt der virtuellen Masse (Index VM: *virtual mass*) lässt sich der Widerstand  $M_{VM}$  und der aufgrund der relativen Beschleunigung der Materialpartikel (feste Phase) gegenüber der umgebenden flüssigen Phase auftretende viskose Widerstand  $M_D$  (Index D: *drag*) angeben:

$$M_s = M_D + M_{VM} = C_{DG} (u_f - u_s) |u_f - u_s| + C_{VMG} \frac{d}{dt} (u_f - u_s) \quad (3.34)$$

In Gleichung (3.34) bezeichnet  $C_{DG}$  den generalisierten Widerstandsbeiwert und  $C_{VMG}$  den generalisierten Koeffizienten der virtuellen Masse. Der viskose Widerstand  $M_D$  wird mit der Widerstandskraft  $F_D$  und dem Volumen des Partikels  $B_d$  sowie der projizierten Partikelfläche  $A_d$  formuliert zu:

$$M_D = \frac{\alpha_s F_D}{B_d} \quad F_D = \frac{1}{2} C_{DG} \rho_f (u_f - u_s) |u_f - u_s| A_d \quad (3.35)$$

Gleichung (3.35) ist Ausgangspunkt für weitere Umformungen sowie die Herleitung des generalisierten Widerstandsbeiwertes nach Pudasaini (2012), der folgendermaßen definiert ist:

$$C_{DG} = \frac{\alpha_s \alpha_f (\rho_s - \rho_f) g}{[U_T (PFRe_p + (1 - P)GRe_p)]^j} \quad (3.36)$$

Hierin bedeutet  $U_T$  die Geschwindigkeit eines Partikels, das sich aufgrund der Schwerkraft in einem flüssigen Medium bewegt. Diese Geschwindigkeit ergibt sich zu:

$$U_T = \sqrt{\frac{gd}{\gamma}} \quad \gamma = \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (3.37)$$

Der Parameter  $P$  in Gleichung (3.36) kombiniert die Beiträge der Scherkräfte der festen und flüssigen Phasen zum Fließwiderstand,  $Re_p$  bezeichnet die Reynolds-Zahl eines Partikels.  $F$  und  $G$  sind abhängig von den jeweiligen Materialeigenschaften:

$$F = \frac{\gamma \left(\frac{\alpha_f}{\alpha_s}\right)^3 Re_p}{180} \quad G = \alpha_f^{[M(Re_p)-1]} \quad (3.38)$$

Die Variable  $j$  in Gleichung (3.36) berücksichtigt den bereits angesprochenen linearen ( $j = 1$ ) bzw. quadratischen Ansatz ( $j = 2$ ) der Beachtung der Spannungsbeiträge der festen und flüssigen Phase.

Der Koeffizient der generalisierten virtuellen Masse (Index VMG: *virtual mass generalised*) ist in erster Linie abhängig von den Volumenanteilen der festen und der flüssigen Phase und wird nach Pudasaini (2012) definiert zu:

$$C_{VMG} = \alpha_s \rho_f C_{VM}(\alpha_s) \quad C_{VM}(\alpha_s) = \frac{1}{2} \left( \frac{1 + 2\alpha_s}{\alpha_f} \right) \quad (3.39)$$

### Fließmodell

Die Modellgleichungen des Zweiphasen-Modells werden über die Fließhöhe gemittelt und nach Pudasaini (2012) formuliert:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [h(\alpha_s u_s + \alpha_f u_f)] + \frac{\partial}{\partial y} [h(\alpha_s v_s + \alpha_f v_f)] = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s h) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_s h u_s) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_s h v_s) = 0 \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f h) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_f h u_f) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_f h v_f) = 0 \quad (3.42)$$

Für die weiteren Bestimmungsgleichungen des Fließmodells, respektive die Gleichungen der Spannungen der festen Materialphase  $S_{x_s}$  und  $S_{y_s}$  sowie der Spannungen der flüssigen Materialphase  $S_{x_f}$  und  $S_{y_f}$ , sei an dieser Stelle auf Pudasaini (2012) verwiesen.

## 3.3 Modellparameter zur Durchführung der Modellsimulation

### 3.3.1 Zwingend erforderliche Inputparameter

Um einen Berechnungsdurchgang in `r.avaflow` durchzuführen, ist die Definition einiger grundsätzlicher Parameter erforderlich. Diese als Inputparameter bezeichneten Parameter können allerdings, je nach Ziel der Simulation und vor allem der verfügbaren Daten, erweitert werden, sodass sich daraus ein recht umfangreicher Pool an Eingabedaten ergeben kann. Im Allgemeinen müssen folgende grundlegende Parameter spezifiziert sein, bevor ein Modelldurchlauf gestartet werden kann:

1. Das Geländemodell in Form einer digitalen Rasterkarte, welche die Topographie, also die basale Oberfläche des betrachteten Geländes vor dem simulierten Ereignis darstellt, muss in GRASS GIS hinterlegt sein. Hierbei ist besonders zu beachten, dass das Geländemodell im Ausbruchsbereich bzw. den Ausbruchsbereichen die absolute Höhe unterhalb des Ausbruchsbereiches bzw. der Ausbruchsbereiche selbst darstellt. Das Geländemodell wird durch den Ausdruck `elevation` gekennzeichnet.
2. In weiterer Folge wird der oder die Ausbruchsbereich(e) in einer eigenen Rasterkarte in GRASS GIS hinterlegt und durch den Ausdruck `hrelease` referenziert. Im Geländemodell ist hierbei der Bereich mit den entsprechenden Abbruchhöhen oberhalb der basalen Topographie abzubilden.
3. In einem Shell-Skript werden zum Abschluss die grundlegenden Befehle beschrieben, welche `r.avaflow` benötigt, um den Rechenprozess auszuführen. Hierin sind die Zuweisungen der oben genannten Rasterkarten, der Fließparameter und der Zeitintervalle, in welchen die Ausgabedateien geschrieben werden sollen, sowie die maximalen Zeit, nach der die Simulation abgebrochen wird, enthalten. Eine Beschreibung des grundlegenden Aufbaus eines solchen Shell-Skripts und der darin enthaltenen Befehle wird im Folgenden vorgenommen.

### 3.3.2 Berechnungskript und Modellparameter

#### Skript

`r.avaflow` selbst wird durch das Aufrufen des Shell-Skripts in einer bereits geöffneten GRASS GIS Sitzung gestartet. Innerhalb von GRASS GIS sind zumindest die beiden oben beschriebenen Rasterkarten der basalen Topographie, welche im Skript als `elevation` angegeben ist, und die Rasterkarte des Abbruchbereiches, im Skript als `hrelease` definiert, hinterlegt.

#### Flags

Der Ausdruck `r.avaflow` in Verbindung mit den sogenannten Flags zeigt den eigentlichen Code für das auszuführende Modell an, wobei bei den Flags die Wahl zwischen: `-e`, `-k`, `-m` und `-v` besteht. Erstere aktiviert die Ausführung des Modells (`e`: *model execution*), mit `-k` besteht die Möglichkeit, die bei der Berechnung erzeugten Ausgabedateien in Form der Rasterkarten im aktiven GRASS GIS Mapset zu speichern, sodass diese nicht bei einer erneuten Berechnung mit beispielsweise anderen Parametern überschrieben werden (`k`: *keep result GRASS raster maps*). Bei mehreren Modelldurchläufen, welche durch die Flag `-m` gesteuert werden (`m`: *multiple model runs*), führt dies zu einer großen Menge an gespeicherten Daten und Rasterkarten. Mittels `-v` kann die Visualisierung der Modellergebnisse aktiviert werden (`v`: *visualisation of model results*). Hierbei werden die Resultate aus der aktuellen Berechnung in Form von Profilplots und Bildern für jedes definierte Zeitintervall vom Simulationsstart bis zum Simulationsende in einem Ausgabeordner gespeichert.

### Prefix und Berechnungsmodell

Mit der Definition eines Namens im Ausdruck `prefix` wird dem Ordner, in dem die Resultate der aktuellen Berechnung gespeichert werden, eine eindeutige Benennung zugewiesen. Durch den Ausdruck `model` kann zwischen den bereits erläuterten Materialmodellen gewählt werden, wobei `model=1` das Voellmy-Salm Modell und `model=2` das Zweiphasen-Massenstrom Modell nach Pudasaini (2012) klassifiziert. Die Festlegung auf eines der beiden Materialmodelle hat im Weiteren zur Folge, dass jeweils andere Fließparameter bzw. Materialkennwerte (Ausdruck `flowparam`) verpflichtend mitangegeben werden müssen (siehe Unterpunkt Fließparameter).

### Numerische Limiter und Kontrollfunktionen

Zunächst erfolgt die Definition sogenannter numerischer Limiter (Ausdruck `limiter`) und ergänzender Funktionen (Ausdruck `funcctrl`): bei den Limitern stehen vier zur Auswahl, welche durch die Angabe einer integer-Variablen zugewiesen werden. Es wird zwischen dem Minmod Limiter, dem Superbee Limiter, dem Woodward Limiter und dem Van Leer Limiter unterschieden. Der Ausdruck `funcctrl` steuert sechs ergänzende Funktionen, die jeweils mit einer integer-Variablen in folgender Reihenfolge zugewiesen werden:

1. Die erste Variable beschreibt die Umwandlung der in vertikaler Richtung (parallel zur Erdbeschleunigung) gemessenen absoluten Höhen in Tiefen, die lotrecht stehend auf die örtliche Topographie gemessen werden. Hierbei werden Fließ-, Erosions- und Ablagerungshöhen in die jeweiligen Tiefen umgerechnet, welche dann in den Ausgabedateien dargestellt werden (Flag `-v`). Bei Setzen des Wertes dieser Variable auf 0 findet keine Umrechnung der Fließhöhen in Fließtiefen statt, legt man den Wert auf 1 fest, so findet eine Umrechnung der Höhen in Tiefen mittels einer Multiplikation der Fließhöhe mit dem Kosinus der am jeweiligen Ort vorliegenden Steigung statt. Wird der Wert auf 2 gesetzt, so werden die Fließhöhen in `-tiefen` unter Berücksichtigung der Nachbarschaften in einem spezifischen Verfahren konvertiert, welches allerdings in Mergili (2014–2019) nicht näher dokumentiert ist.
2. Bei der zweiten Variable handelt es sich um die sogenannte Diffusionskontrolle, einer Funktion, die bei einer Aktivierung nur dann eine Bewegung von einem Punkt im Modell zu einem anderen Punkt zulässt, wenn sich der Fluss innerhalb des Quellpunktes bzw. `-pixels` soweit ausgebreitet hat, dass der Zielpunkt bzw. `-pixel` mit einer bestimmten Geschwindigkeit erreicht werden kann. Diese Funktion wird aufgrund des numerischen Schemas von *r.avaflow* benötigt, um eine zu starke Diffusion von Pixeln zu vermeiden.
3. Um den Verlust an berechneten Fließvolumen, der aufgrund des numerischen Rechenschemas nach jedem Berechnungszeitschritt entsteht, zu kompensieren, werden die Fließtiefen an jedem Punkt mit einem determinierten Faktor multipliziert. Der Wert 0 schaltet diese Funktion aus, der Wert 1 sie ein.
4. Diese Variable steuert die sogenannte Oberflächenkontrolle, die bei Wechselwirkungen zwischen Massenbewegungen und beispielsweise Seen eine wichtige Rolle spielt. Hierbei werden Schwingungen im Wasser an der Wasseroberfläche, die mit Massenbewegungen interferieren können, solange unterdrückt, bis eine abgleitende Masse in Kontakt mit dem Wasser tritt, also dort beispielsweise aufprallt. Der Wert 0 schaltet diese Funktion aus, der Wert 1 sie ein.

5. Die fünfte Variable des Ausdrucks `funcctrl` aktiviert die Erosion innerhalb des Modells, indem beim Setzen auf den Wert 1 zugelassen wird, dass entlang des Fließpfades Material aus der basalen Oberfläche erodiert und mittransportiert wird.
6. Zuletzt besteht die Möglichkeit zur Definition einer Stoppbedingung, die beschreibt, unter welchen Umständen das Fließen des Materials angehalten wird. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen: wird der Wert dieser Variablen auf 0 gesetzt, so ist die Funktion deaktiviert. Bei aktiviertem Stopping (Wert 1) werden die Kräfte aus der Bewegung berechnet und zu einem sogenannten Mobilitätsfaktor zusammengefasst (fom: *factor of mobility*). Ist dieser Faktor kleiner als 1, wird die sich noch bewegendende Masse an Material angehalten, wobei die Annahme getroffen wurde, dass dabei der Scherwiderstand nach Mohr-Coulomb die Scherkräfte aus der Bewegung überschreitet. Aus diesem Zusammenhang folgt dann der Abbruch des Fließprozesses und das Postprocessing (siehe Abbildung 3.3) wird eingeleitet.

### Fließparameter

Ein nächster wesentlicher Gesichtspunkt bei den Festlegungen der Modellparameter für die Simulation ist die Auflistung `flowparam`, die die zentralen geotechnischen Materialkennwerte beschreibt und die je nach ausgewähltem Berechnungsmodell (Ausdruck `model`) in einer bestimmten Reihenfolge angegeben werden müssen. Für den Fall, dass das Voellmy-Salm Modell ausgewählt wurde (`model=1`), sind folgende geotechnische Kennwerte anzugeben:

1. Dichte  $\rho$  in  $\text{kg/m}^3$  (*density*)
2. Interner Reibungswinkel  $\phi_i$  in Grad (*internal friction angle*)
3. Basaler Reibungswinkel  $\phi_b$  in Grad (*basal friction angle*)
4. Turbulenzkoeffizient  $\xi$  in  $\text{m/s}^2$  (*turbulent friction*)
5. Erzeugung zufälliger kinetischer Energie (*production of RKE*)
6. Abbau der zufälligen kinetischen Energie (*decay of RKE*), sowie
7. Der Wert der zufälligen kinetischen Energie zur Anpassung der Reibungskoeffizienten (*value of RKE for adaptation of friction coefficients*)

Im Falle des Zweiphasen Modells nach Pudasaini erweitert sich der Umfang um einige Variablen, wie z.B. den viskosen Scherkoeffizienten für Flüssigkeiten. Auch wird hierbei zwischen der Dichte des festen Materials und der Dichte des flüssigen Materials differenziert.

### Festlegungen zur Parameterkalibrierung und Ergebnisvisualisierung

Essentiell notwendig beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit Beobachtungen des betrachteten Events ist das Hinterlegen von Rasterkarten, in denen die aufgezeichneten Ablagerungen nach Abgang der Felsmassen protokolliert sind. Die zugehörige Rasterkarte wird ebenfalls in GRASS GIS hinterlegt und im Shell-Skript durch den Ausdruck `hdeposit` referenziert. Der durch die Massenbewegung beeinflusste bzw. überstrichene Bereich des betrachteten Ereignisses lässt sich ebenfalls durch eine Rasterkarte in GRASS GIS angeben, wobei dieser für die Visualisierung der Ergebnisse durch den Ausdruck `impactarea` beschrieben wird.

Neben der Definition des Ablagerungsbereiches und der zugehörigen Ablagerungshöhen sowie der Darstellung des durch das Sturzereignis beeinflussten bzw. überstrichenen Bereiches besteht im Zuge der Auswertung der Simulationsergebnisse in `r.avaflow` die Möglichkeit, einen Fließpfad bzw. ein Fließprofil anhand von zusammenhängenden Koordinaten anzugeben. Entlang dieser Koordinaten werden Profile ausgegeben, die die Geländehöhe, die Fließhöhe sowie die Mächtigkeit

der Erosion und der Ablagerung enthalten. Ebenfalls mit dargestellt wird unter anderem die Geschwindigkeit der Massenbewegung entlang des Pfades. Eine Erläuterung der Möglichkeiten der Visualisierung der Simulationsergebnisse ist in Abschnitt 3.4 gegeben.

Im Zuge der Parameterkalibrierung ist hinsichtlich der Beurteilungsbasis die Angabe einer unteren Grenze der Fließhöhe  $H_t$  erforderlich (siehe hierzu Abschnitt 3.4.1.2). Diese untere Grenze kann durch die Einstellung `impparam` definiert werden.

Werden zur Kalibrierung von Modellparametern mehrere Simulationsdurchläufe ausgeführt, kann die Variation dieser Modellparameter auf unterschiedliche Weise mittels der Einstellung `sampling` erfolgen. Durch die Festlegung `sampling=0` wird die Anzahl an Simulationen verwendet, um den Wertebereich des variierten Modellparameters entsprechend einer gleichmäßigen Verteilung in stetige Intervalle einzuteilen.

### Zeitangaben

Weiter ist es notwendig das Zeitintervall, in welchem die Ausgabedateien geschrieben werden sollen, sowie die maximale Zeit, nach der die Simulation abgebrochen wird, zu definieren. Dies geschieht mit Hilfe der Ausdrücke `tint` und `tstop`.

### Berechnungsablauf

Das Berechnungskonzept bzw. der Berechnungsablauf ist in nachstehender Grafik aufgezeigt:

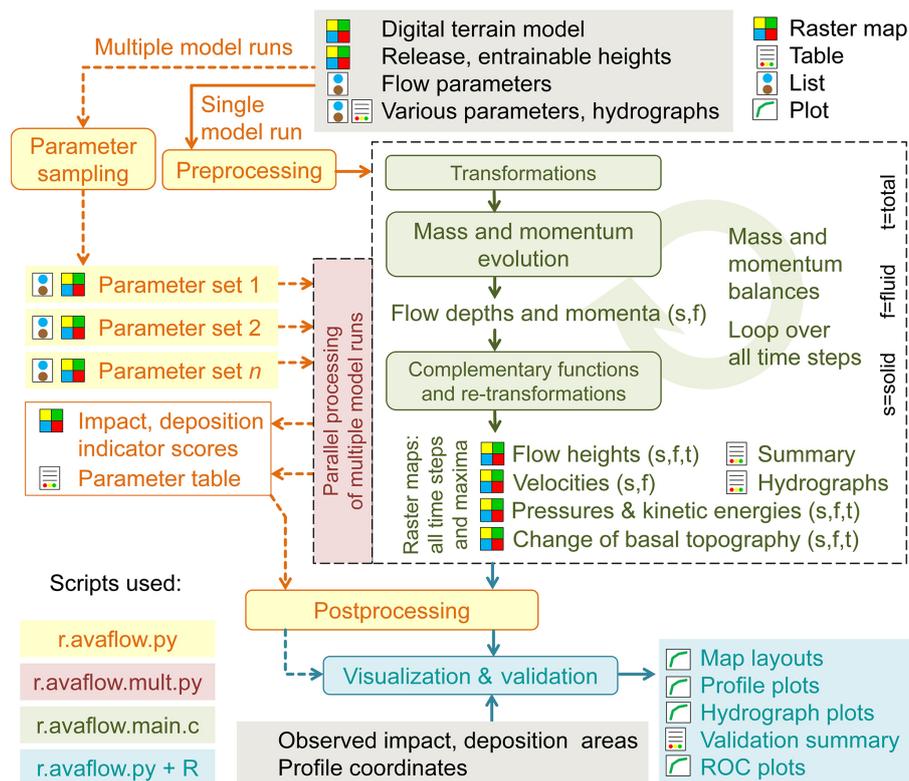


Abb. 3.3: Berechnungskonzept und -ablauf von *r.avaflow* (Mergili et al., 2017).

In Ergänzung zu den in diesem Abschnitt angeführten Parametern können je nach Ziel und Umfang der durchzuführenden Simulation viele weitere Bedingungen und äußere Umstände berücksichtigt werden. Hierfür stehen eine Vielzahl zusätzlicher, optionaler Modellparameter zur Verfügung, welche im Benutzerhandbuch von *r.avaflow* ersichtlich sind (Mergili, 2014–2019).

## 3.4 Möglichkeiten der Parameterkalibrierung und Visualisierung der Ergebnisse

### 3.4.1 Parameterkalibrierung

#### 3.4.1.1 Optionen

r.avaflow bietet die Möglichkeit der Kalibrierung der Modellparameter (Auflistung `flowparam`) und der Plausibilitätsprüfung der Modellergebnisse gegenüber dem tatsächlichen Ereignis. Ein Vergleich der Modellergebnisse des zu untersuchenden Ereignisses mit Beobachtungen, auf dessen Basis die Parameterkalibrierung durchgeführt wird, erfolgt anhand folgender Optionen (Mergili et al., 2017):

1. Vergleich der berechneten Ablagerungen (*deposition area*) und/oder des beeinflussten Bereiches (*impact area*) mit Rasterkarten des beobachteten Ablagerungsbereiches und/oder des durch die Massenbewegung überstrichenen Bereiches,
2. Vergleich des Fließpfades der Massenbewegung mit einem zuvor definierten Profil,
3. Vergleich von an bestimmten Ortskoordinaten und Zeitschritten gegebenen Fließhöhen und Fließgeschwindigkeiten mit den berechneten Werten der Fließhöhe und der Fließgeschwindigkeit.

#### 3.4.1.2 Beurteilungsbasis

##### Observed Positives (OP) und Observed Negatives (ON)

Um die Modellperformance einzuschätzen und den Kalibrierungsvorgang der Modellparameter anhand der Kalibrierungskriterien (siehe Abschnitt 3.4.1.3) auszuwerten, wird ein Pixel für Pixel-Vergleich zwischen berechneten und beobachteten Rasterkarten (*deposition area*) und/oder (*impact area*) durchgeführt. Bei den angesprochenen Rasterkarten (*deposition area*, *impact area*) handelt es sich um binäre Karten, wobei diejenigen Pixel bzw. Zellen mit beobachteten Ablagerungen bzw. solche, die sich innerhalb des überstrichenen Bereiches befinden, als *observed positives* (OP) bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu werden Pixel bzw. Zellen, die außerhalb der beobachteten Ablagerungen bzw. des durch die Massenbewegung beeinflussten Bereiches liegen, als *observed negatives* (ON) beschrieben (Mergili et al., 2017).

##### Observed Deposition Area (ODA)

Ein Pixel bzw. eine Zelle wird dann als positiv simuliert betrachtet, wenn die berechnete Ablagerungshöhe ( $H_C$ ) mindestens der zuvor definierten unteren Grenze der Fließhöhe ( $H_t$ ) entspricht:  $H_C \geq H_t$ . Ein nach dieser Definition bestimmter Pixel bzw. Zelle wird als *predicted positive* (PP), andernfalls als *predicted negative* (PN) bezeichnet.

##### Observed Impact Area (OIA)

Ein Pixel bzw. eine Zelle wird als *predicted positive* (PP) bezeichnet, wenn die maximale Fließhöhe des Pixels bzw. der Zelle mindestens der unteren Grenze der Fließhöhe entspricht ( $H_{max} \geq H_t$ ), andernfalls erfolgt die Kennzeichnung als *predicted negative* (PN).

### 3.4.1.3 Kalibrierungskriterien

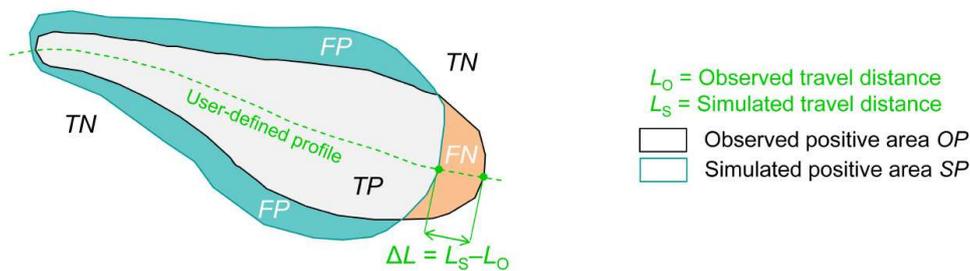
#### True Positive, True Negative, False Positive, False Negative

Aus der Kombination von Observed Positives, Observed Negatives, Predicted Positives und Predicted Negatives ergeben sich vier Qualitätskennzahlen zur Beschreibung der Modellperformance:

1. True Positive (TP): ein Pixel oder eine Zelle ist ein True Positive, wenn Berechnung (*simulated positive area*) und Simulation (*observed positive area*) übereinstimmen (vgl. Abbildung 3.4). Ein True Positive ist somit eine Kombination aus Observed Positive und Predicted Positive.
2. True Negative (TN): ein positiver Pixel bzw. eine positive Zelle liegt außerhalb der berechneten und der beobachteten Ablagerungen bzw. des beeinflussten Bereiches. Ein True Negative ist daher eine Kombination aus Observed Negative und Predicted Negative.
3. False Positive (FP): ein Pixel wird innerhalb des simulierten Bereiches (*simulated positive area: deposition area, impact area*) als Predicted Positive berechnet, befindet sich allerdings außerhalb des beobachteten Bereiches (*observed positive area*). Ein False Positive ist folglich eine Kombination aus Observed Negative und Predicted Positive.
4. False Negative (FN): ein Pixel bzw. eine Zelle wird innerhalb eines beobachteten Bereiches nicht als positiv berechnet. Ein False Negative ist daher eine Kombination aus Observed Positive und Predicted Negative.

Hinsichtlich einer möglichen Vorwärtssimulation können True Positive, True Negative, False Positive und False Negative folgendermaßen beschrieben werden: ein True Positive entspricht einem korrekt angezeigten Alarm in einer akkurat simulierten Massenbewegung, ein True Negative stimmt mit einer präzisen Vorhersage eines außerhalb der Gefährdung liegenden Bereiches überein. Ein False Positive zeigt einen falschen Alarm, ein False Negative einen versäumten Alarm an (Formetta et al., 2016).

Der erläuterte Sachverhalt kann anhand einer Grafik (vgl. Abbildung 3.4) anschaulich zur Darstellung gebracht werden:



**Abb. 3.4:** Kalibrierungskriterien True Positive, True Negative, False Positive, False Negative im Zusammenhang mit dem jeweils beobachteten und berechneten Bereich (OP: *observed positive area*, SP: *simulated positive area*). Nach Mergili et al. (2017), verändert.

**Critical Success Index (CSI)**

Maßgebend bei der Beschreibung der erreichten Simulationsgenauigkeit ist der Critical Success Index (CSI), der den prozentualen Anteil positiv richtig berechneter Pixel bzw. Zellen eines beobachteten Gebietes (*observed positive area*) an der Summe der berechneten Pixel bzw. Zellen des durch die Berechnung erhaltenen Runouts (*simulated positive area*) widerspiegelt. Der Index CSI wird nach Formetta et al. (2016) sowie Mergili et al. (2017) folgendermaßen bestimmt:

$$\text{CSI} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (3.43)$$

Das Optimum des CSI liegt bei 1, also dann, wenn 100 Prozent Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung vorliegt.

**Heidke Skill Score (HSS)**

Der Heidke Skill Score (HSS) wird vorwiegend in der Bewertung von meteorologischen Vorhersagen verwendet und ist ein Index für kategorische Vorhersagen, bei denen das Proportional-Correct-Maß (das ist der Anteil von True Positive und True Negative an der Summe aller Vorhersagen) mit dem Referenzwert aus zufälligen Vorhersagen skaliert wird (Hyvärinen, 2014). Der Heidke Skill Score kann Werte zwischen  $-\infty$  und 1 annehmen, wobei 1 das Optimum kennzeichnet. Die Ermittlung des HSS erfolgt auf Basis von Heidke (1926) nach folgender Gleichung:

$$\text{HSS} = \frac{2 (\text{TP} \cdot \text{TN} - \text{FP} \cdot \text{FN})}{(\text{TP} + \text{FP}) \cdot (\text{FP} + \text{TN}) + (\text{TP} + \text{FN}) \cdot (\text{FN} + \text{TN})} \quad (3.44)$$

**Distance to perfect classification (D2PC)**

Der Index D2PC (*Distance to perfect classification*) wird nach Formetta et al. (2016) sowie Mergili et al. (2017) bestimmt:

$$\text{D2PC} = \sqrt{(1 - \text{TPR})^2 + \text{FPR}^2} = \sqrt{\left(1 - \frac{\text{TP}}{\text{OP}}\right)^2 + \left(\frac{\text{FP}}{\text{ON}}\right)^2} \quad (3.45)$$

In Gleichung (3.45) bedeutet TPR die Richtig-Positiv-Rate nach Gleichung (3.47) und FPR die Falsch-Positiv-Rate nach Gleichung (3.48). Der Index D2PC nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Das Optimum dieses Index liegt bei 0.

**Accuracy (ACC)**

Neben dem Index CSI ist der Wert von Accuracy (ACC) ausschlaggebend bei der Bewertung und Einschätzung der erreichten Modellgenauigkeit. ACC ist definiert zu (Formetta et al., 2016):

$$\text{ACC} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}} \quad (3.46)$$

Der Index ACC kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 das Optimum an erreichter Genauigkeit kennzeichnet. Im Gegensatz zum Critical Success Index wird beim Index Accuracy der Wert von True Negative mitberücksichtigt (vgl. Gleichungen (3.43) und (3.46)).

### Area under ROC curve (AUROC)

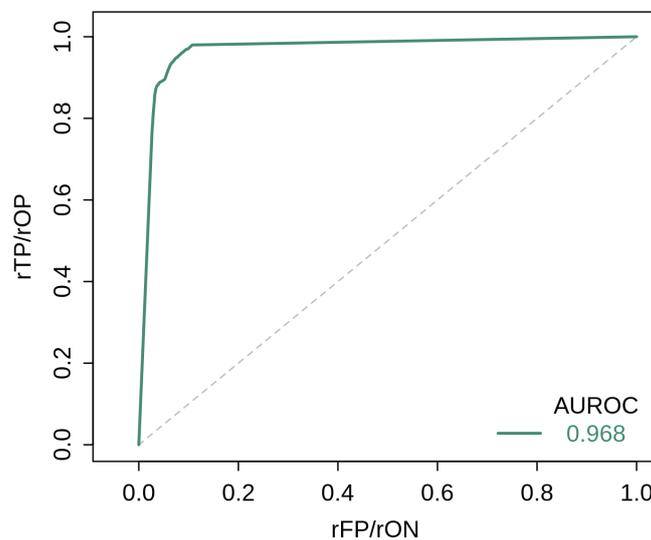
Die ROC-Kurve (engl. *receiver operating characteristic curve*) erhält man durch Gegenüberstellung von Richtig-Positiv-Rate (TPR: *true positive rate*) und Falsch-Positiv-Rate (FPR: *false positive rate*), wobei die False Positive Rate auf der Abszisse und die True Positive Rate auf der Ordinate aufgetragen wird. Die TPR ist ein Maß, das den Anteil positiv richtiger Punkte (Pixel bzw. Zelle) an allen positiven Datenpunkten (Pixeln bzw. Zellen) veranschaulicht und wird im Zuge statistischer Auswertungen als Sensitivität bzw. *hit rate* bezeichnet. Je höher der Wert der TPR, der zwischen 0 und 1 liegt, umso weniger positive Datenpunkte werden fälschlicherweise nicht als positiv richtig innerhalb der Simulation berechnet. Im Gegensatz hierzu beschreibt die FPR den Anteil simulierter Pixel bzw. Zellen, der fälschlicherweise als positiv bestimmt wird, an der Summe aller als ON gekennzeichneten Datenpunkte. Die FPR wird oftmals als *fall-out* bezeichnet und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

$$\text{TPR} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} = \frac{\text{TP}}{\text{OP}} \quad (3.47)$$

$$\text{FPR} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}} = \frac{\text{FP}}{\text{ON}} \quad (3.48)$$

Die Fläche unter der ROC-Kurve (AUROC) wird zur Beschreibung der Simulationsqualität verwendet, indem die ROC-Kurve für alle variierten Parameterwerte geplottet wird. AUROC nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei der schlechteste Wert bei 0,5 und das Optimum bei 1 liegt. Eine Diagonale in der Darstellung der ROC-Kurve zeigt die Trefferhäufigkeit eines reinen Zufallsprozesses, bei dem die Richtig-Positiv-Rate mit der Falsch-Positiv-Rate übereinstimmt.

Eine ideale ROC-Kurve zeigt sich in einem anfänglich vertikal ansteigenden Grafen, was einer Trefferquote von 1 und einer Fehlerquote von 0 entspricht (vgl. Abbildung 3.5).



**Abb. 3.5:** Beispiel einer ROC-Kurve mit einem nahezu idealen Verlauf. Die AUROC nimmt einen Wert von 0,968 an und liegt damit nahe am Optimum von 1.

### Deposition Indicator Index (DII) und Impact Indicator Index (III)

Bei der Durchführung mehrerer Modelldurchläufe im Zuge der Parameterkalibrierung werden die Ergebnisse aller Berechnungen in einem Deposition Indicator Index (DII) und einem Impact Indicator Index (III) kumuliert. Der DII gibt dabei den Anteil an Modelldurchläufen an, bei denen für einen Pixel bzw. eine Zelle an einer bestimmten Koordinate  $H_C \geq H_t$  gilt. Der III hingegen repräsentiert den Anteil an Modelldurchgängen, bei denen für einen bestimmten Pixel bzw. eine bestimmte Zelle die Bedingung  $H_{max} \geq H_t$  erfüllt ist. Das Optimum des Deposition Indicator Index und des Impact Indicator Index befindet sich bei einem Wert von 1.

#### 3.4.1.4 Zusammenstellung der Indizes

Die in Abschnitt 3.4.1.3 erläuterten Kriterien zur Parameterkalibrierung, die zur Evaluierung der jeweils erreichten Modellgenauigkeit durch den Vergleich der berechneten Ablagerungen bzw. des simulierten überstrichenen Bereiches mit den beobachteten Bereichen der Ablagerungen und des überstrichenen Bereiches im Zuge der Parametervariation herangezogen werden, sind in nachstehender Tabelle zusammengefasst:

**Tab. 3.1:** Zusammenstellung der verwendeten Kalibrierungskriterien der Parametervariation. In Anlehnung an Formetta et al. (2016) und Mergili et al. (2017).

Modelldurchlauf	Index	Spannbreite	Optimum
E <sup>1</sup>	CSI	[0, 1]	1,0
E <sup>1</sup>	HSS	$[-\infty, 1]$	1,0
E <sup>1</sup>	D2PC	[0, 1]	0,0
E <sup>1</sup>	ACC	[0, 1]	1,0
M <sup>2</sup>	AUROC	[0, 1]	1,0
M <sup>2</sup>	DII	[0, 1]	1,0
M <sup>2</sup>	III	[0, 1]	1,0

<sup>1</sup> E: Einfacher Modelldurchlauf

<sup>2</sup> M: Mehrfacher Modelldurchlauf

### 3.4.2 Ergebnisvisualisierung

Die Ergebnisse aus einem einfachen Modelldurchlauf und mehrfachen Modelldurchläufen können in *r.avaflow* durch die Flag `-v` visualisiert werden. Die Berechnungsergebnisse werden in folgender Datenstruktur angelegt (Mergili, 2014–2019):

1. Rasterkarten im aktiven GRASS GIS Mapset  
Im aktiven GRASS GIS Mapset werden für jedes berechnete Zeitintervall eine Vielzahl an unterschiedlichen Rasterkarten hinterlegt. Diese Rasterkarten beinhalten folgende Informationen: Fließhöhen, Fließgeschwindigkeit in Richtung des Fließpfades und normal auf den Fließpfad stehend, Fließgeschwindigkeit und -richtung der abgleitenden Massen, kinetische Energie der Fließbewegung, Strömungsdruck sowie Änderungen der basalen Topographie in Form von Erosion und Ablagerung.
2. AIMEC Input-Dateien  
*r.avaflow* erzeugt Input-Dateien, die zur Sensitivitätsanalyse der Fließparameter mit Hilfe der AIMEC-Methode (Automated Indicator based Model Evaluation and Comparison) herangezogen werden können (siehe Fischer, 2013).
3. ASCII Dateien  
Die pro Zeitintervall erstellten Rasterkarten, welche im aktiven GRASS GIS Mapset hinterlegt sind, werden zusätzlich als ASCII Dateien gespeichert, wodurch eine Verwendung und in weiterer Folge eine Bearbeitung der Berechnungsergebnisse innerhalb weiterführender Programme z.B. zur anschaulichen Darstellung von Fließhöhen, Ablagerungshöhen, Fließgeschwindigkeiten usw. ermöglicht wird.
4. Zusammenfassung der Modellparameter  
Die Ergebnisse der Modellparameter aller Simulationsdurchläufe werden in Textdokumenten zusammengestellt. Hierin sind unter anderem enthalten:
  - a) Fließgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung spezifischer Pixel zur Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Plot der Fließhöhen pro Zeitintervall,
  - b) Auflistung aller am Anfang der Simulation definierten Modellparameter,
  - c) Auflistung aller aus der Parametervariation resultierenden Fließparameter,
  - d) Profildaten zur Darstellung der Geländehöhe, der Fließhöhe, der Fließgeschwindigkeit, Erosionstiefen und Ablagerungshöhen, Strömungsdruck und kinetische Energie der Massenbewegung,
  - e) Angabe von Kennwerten wie unter anderem verstrichene Zeit seit Start der Berechnung, maximale Fließhöhe und maximale Fließgeschwindigkeit für jeden Zeitschritt eines jeweiligen Modelldurchgangs,
  - f) Auswertung der in Abschnitt 3.4.1.3 erläuterten Kalibrierungskriterien zur Angabe der Simulationsgenauigkeit im Zuge der Parametervariation für den jeweiligen Modelldurchlauf.
5. Plots  
Für jeden Zeitschritt werden die berechneten Fließhöhen, die kinetische Energie des Massenflusses, der Strömungsdruck sowie die Veränderung der basalen Topographie durch Erosion und Ablagerung geplottet und in einem Ordner hinterlegt. In der grafischen Darstellung der genannten Größen sind die *deposition area* und die *impact area*, falls diese Rasterkarten bereitgestellt wurden, gekennzeichnet. Zusätzlich werden Indizes wie z.B. CSI, D2PC, HSS sowie DII, III und AUROC visualisiert.

# Kapitel 4

## Fallstudie Frank Slide

### 4.1 Einleitung

Bei der Bildung der Rocky Mountains entstanden im Westen von Kanada gestörte Gebirgsstrukturen durch tektonische Bewegungen. Durch die dadurch hervorgerufene Instabilität von Talflanken und Hängen kam es in der Vergangenheit in dieser Region immer wieder zu gravitativen Massenbewegungen. Viele dieser Fels- und Bergstürze sind in der Literatur dokumentiert.

Der verheerendste dieser Vorfälle war der sogenannte Frank Slide, ein Bergsturz, welcher sich am 29. April 1903 gegen 4:10 Uhr an der Ostwand des Turtle Mountain nahe der Stadt Frank im südwestlichen Teil der Provinz Alberta in Kanada ereignete. Während dieses Ereignisses wurden ca. 36 Millionen m<sup>3</sup> an Felsvolumen (Hungr und McDougall, o.J.), was nach Cruden und Martin (2007) in etwa einer Masse von 80 Millionen Tonnen entspricht, abgelöst. Die Felsmassen begannen sich in einer Höhe von ca. 2200 m zu lösen, stürzten rund 1000 m entlang der Ostwand des Turtle Mountain in die Tiefe und überschütteten das südöstliche Ende der Stadt Frank, den Fluss Crowsnet, eine Eisenbahnlinie der Canadian Pacific Railway sowie den Eingang einer Kohlemine am Fuß des Berges. Der Sturzvorgang selbst dauerte nach Cruden und Martin (2007) nur ungefähr 100 Sekunden, wobei sich das Material auf einer Fläche von 2,67 km<sup>2</sup> mit einer durchschnittlichen Ablagerungshöhe von etwa 14 m absetzte. Der Frank Slide gilt als tödlichster Bergsturz Kanadas mit etwa 70 bis 80 Toten (Benko und Stead, 1998; Cruden und Martin, 2007).

Die Lage des Bergsturzes ist in Abbildung 4.1, die Ablagerungen sowie die Grenzen der Ablagerungen in den Abbildungen 4.2a und 4.2b dargestellt.

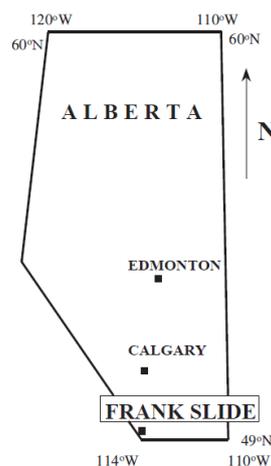
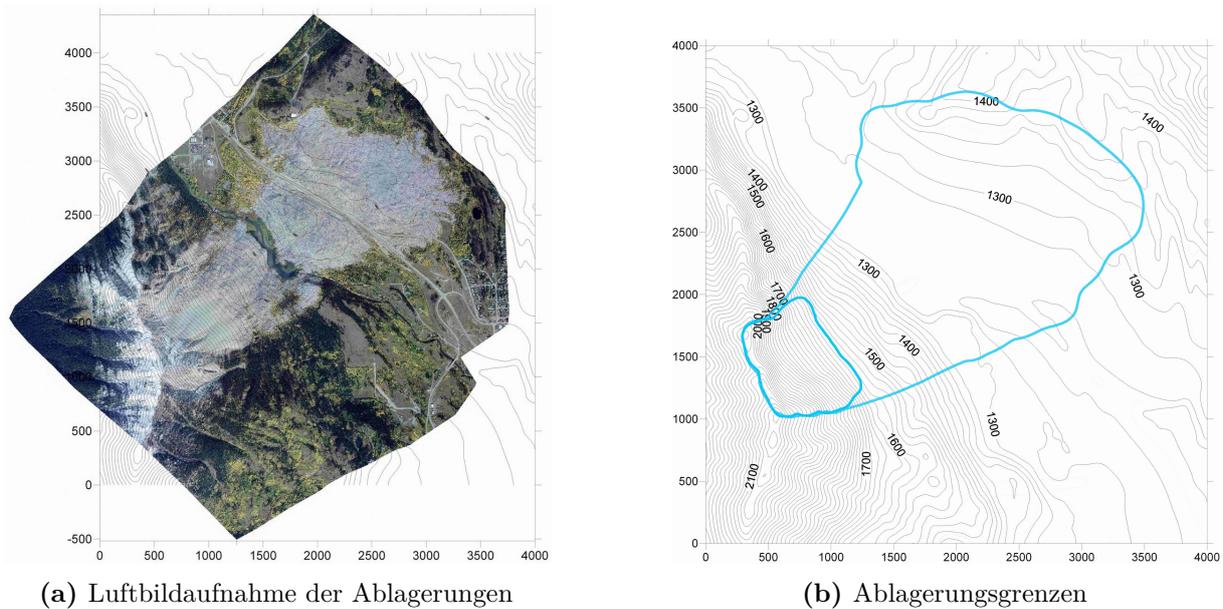


Abb. 4.1: Die Lage des Bergsturzes in Alberta, Kanada (Benko und Stead, 1998).

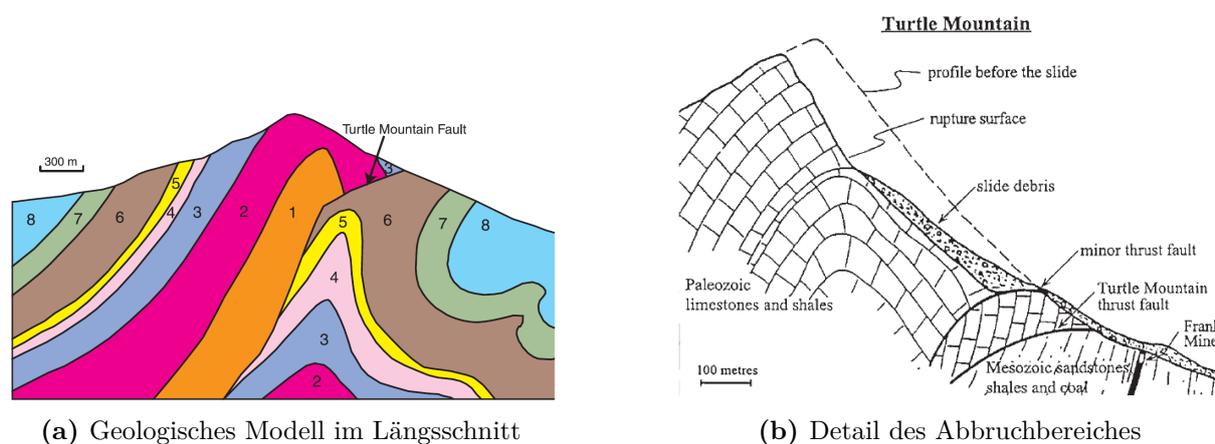


**Abb. 4.2:** (a) Darstellung der Luftbildaufnahme des Frank Slide, wobei im nordwestlichen Bereich die heutige Stadt Frank und im östlichen Bereich die Ausläufer der Stadt Bellevue zu erkennen sind, sowie (b) die Darstellung der Grenzen der Ablagerungen des Bergsturzes. Quelle: Landslide Forum (2007).

Dieses Sturzereignis wurde hinsichtlich des Versagensmechanismus in zahlreichen wissenschaftlichen Abhandlungen untersucht. Es lassen sich hieraus einige Faktoren ableiten, die in gegenseitiger Kombination zu einer negativen Beeinflussung der Hangstabilität und in weiterer Folge schließlich zum Versagen des Hanges geführt haben:

- Beanspruchung des Gesteins durch tektonische Bewegungen
- Klüfte, Trennflächen und Schieferungsflächen im Gestein
- Betrieb einer Kohlemine am Fuß des Turtle Mountain
- Kriechverformungen von Kalksteinblöcken über eine längere Zeit
- Witterungsbedingungen, insbesondere Eiskeilbildung

Der Turtle Mountain besteht im Wesentlichen aus Kalkstein und ist auf Grund von geologischen Störungszonen stark gefaltet. Die geologische Situation des Gebietes ist in Abbildung 4.3 ersichtlich. Die Faltung des Gebirges ist ausschlaggebend für die Ausbildung einer Gleitfläche, welche sich in der sogenannten Livingstone Formation befindet. Cruden und Krahn sind in ihren Untersuchungen zu dem Schluss gekommen, dass ein Versagen in der angesprochenen Livingstone Formation (siehe Abbildung 4.3a und Tabelle 4.1) ausschlaggebend für das Sturzereignis war.



**Abb. 4.3:** (a) Längsschnitt des geologischen Modells des Turtle Mountain (Cruden und Martin, 2007). (b) Darstellung einer Übersicht des Abrissgebietes des Frank Slide (Benko und Stead, 1998).

Die in Abbildung 4.3a eingetragenen geologischen Zonen können in Anlehnung an Cruden und Martin (2007) im Hinblick auf ihre geotechnischen Eigenschaften folgendermaßen klassifiziert werden:

**Tab. 4.1:** Geotechnische Materialkennwerte der anzutreffenden geologischen Zonen des Turtle Mountain.

Nr.	Formation	$E$ [MPa]	$\nu$ [-]	$\gamma$ [MN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi$ [°]	$c$ [MPa]	GSI [-]
1	Blairmore Gruppe	25000	0,30	0,026	34	4,5	70–75
2	Kootenay Gruppe	25000	0,30	0,022	36	4,0	70–75
3	Fernie Formation	25000	0,30	0,025	35	4,0	70–75
4	Tobermory Formation	18000	0,30	0,023	33	3,0	65
5	Etherington Formation	47000	0,30	0,026	40	5,7	80
6	Mount Head Formation	47000	0,30	0,028	42	5,7	80
7	Livingstone Formation	47000	0,30	0,026	42	3,8	80
8	Bannf Formation	14000	0,30	0,027	36	3,4	60
-	Kohle	8000	0,30	0,022	18	1	-

Terzaghi beispielsweise führte den Bergsturz auf eine Reduzierung der Kohäsion von festem Gestein durch Kriechbewegungen darunterliegender weicher Gesteinsschichten zurück (Terzaghi, 1950). Im Falle des Frank Slides wurde dies durch die aufliegenden Kalksteine und der dadurch zusätzlich ausgeübten Belastung auf darunter angeordnete weniger druckfeste Schichten begünstigt. Terzaghi beschrieb die Standsicherheit des Hanges durch einen Sicherheitsfaktor, der vom ursprünglichen Wert 2,5 vor Inbetriebnahme der Kohlemine auf den Wert 1 bei Eintreten des Bergsturzes reduziert worden ist und ging somit davon aus, dass der Betrieb der Kohlemine in den weniger druckfesten und stark gefalteten Schichten der Livingstone Formation des Turtle Mountain entscheidend zum Versagen beigetragen haben muss. Beobachtungen von Bäumen mit gebogenen Stämmen bestätigten die These Terzaghi's, dass Kriechbewegungen von Kalksteinblöcken über längere Zeit hinweg die Stabilität des Hanges maßgeblich beeinträchtigten.

Aufzeichnungen des Meteorological Service of Canada einer Wetterstation in Calgary, etwa 250 km nordöstlich von Frank gelegen, zeigten, dass der Niederschlag im südlichen Teil von Alberta in den unmittelbaren Jahren vor 1903 besonders stark gewesen war (Cruden und Martin, 2007). Zudem konnten am Fuß des Berges Bereiche mit Wasseraustritten (Quellen) nach Starkregenereignissen beobachtet werden. Daraus lässt sich schließen, dass sich oberflächlich durch z.B. Klüfte eingetretenes Niederschlagswasser innerhalb der Felsformationen entlang von Trennflächen, Klüften oder Karsten weiterbewegt haben muss. Es ist dokumentiert, dass einige Tage vor dem 29.4.1903 tagsüber die Temperatur recht hoch und unmittelbar vor dem 29.4.1903 die Nacht außergewöhnlich kalt war (Cruden und Martin, 2007). Terzaghi stellte zudem fest, dass große Sturzereignisse häufig in den Monaten April auftreten. In den Klüften von Gesteinen und Gebirgen über den Winter gebildete Eiskeile, welche noch nicht vollständig geschmolzen sind, üben in Kombination mit der Schneeschmelze im Frühjahr eine starke Belastung auf Diskontinuitäten im Gestein und auf Trenn- und Schieferungsflächen aus, sodass es zum lokalen Versagen kommen kann (Terzaghi, 1962).

Benko und Stead halten in ihrer Ausführung „The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism“, 1998, S.302 hinsichtlich des Versagensmechanismus fest:

„The failure mechanism appears to be complex, involving components of both shear along, and separation of, discontinuities, in addition to fracturing of the intact rock. [...]

The adverse geological structure within Turtle Mountain, however, undoubtedly played the major role in promoting instability. The jointed Paleozoic limestones that form the major part of the peak are thrust on a Mesozoic sequence of interbedded shales, siltstones, sandstones, and coal. The folding and faulting processes would in places have reduced the available shear strength along bedding surfaces, joints, and shears to values approaching residual and decreased the overall rock mass strength.“

## 4.2 Modellaufbau

### 4.2.1 Input-Rasterkarten

Das Modell in `r.avaflow` benötigt, wie in Kapitel 3 beschrieben, verschiedene Rasterkarten für die Berechnung, welche zuerst in GRASS GIS hinterlegt werden müssen. Im Fall Frank Slide wurden folgende Rasterkarten verwendet:

1. Digitales Höhenmodell der basalen Topographie des untersuchten Bereiches mit einer Auflösung von 20 m.
2. Digitales Höhenmodell des Ausbruchsbereiches, ebenfalls in einer Auflösung von 20 m.
3. Rasterkarte des Ablagerungsbereiches.
4. Rasterkarte des beeinflussten bzw. überstrichenen Bereiches unter Berücksichtigung des Abbruchs und der Ablagerungen.

### 4.2.2 Materialkennwerte

#### Dichte

Zusätzlich zu den Rasterkarten in obiger Auflistung ist die Angabe der Materialkennwerte, wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, erforderlich. In Anlehnung an die Ausführungen in Cruden und Martin (2007) sowie die in der Tabelle 4.1 aufgelisteten Wichten der unterschiedlichen geologischen Zonen im untersuchten Bereich wurde für die Rückrechnung des Ereignisses vom 29.4.1903 eine mittlere Dichte von  $2350 \text{ kg/m}^3$  ( $0,0235 \text{ MN/m}^3$ ) angenommen.

#### Interner Reibungswinkel

Der interne Reibungswinkel wurde in Anlehnung an die in Benko und Stead (1998) aufgeführten Grenzwerte mit  $30^\circ$  berücksichtigt.

#### Voellmyparameter

Die Rückrechnung der Ereignisse in `r.avaflow` erfolgte anhand einer Simulation mit mehreren Modelldurchgängen, wobei im Hinblick auf die Parameterkalibrierung die Parameter des Voellmy-Salm Modells variiert wurden. Dies sind der in Abschnitt 3.2.1 erläuterte basale Reibungswinkel  $\phi_b$  sowie der Turbulenzkoeffizient  $\xi$ .

Rückrechnungen mit Hilfe des DAN-Codes (vgl. Poisel et al., 2008; Hungr, 2008) erzielten bei der Simulation mit konstanter Voellmy Rheologie über den gesamten Runout die besten Übereinstimmungen hinsichtlich der Ausbreitung, der Ablagerung sowie der Dauer des Bergsturzes bei der Verwendung folgender Werte der Voellmyparameter:

- Reibungskoeffizient:  $f = 0,1$  (dies entspricht einem basalen Reibungswinkel  $\phi_b \approx 5,7^\circ$ )
- Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 500 \text{ m/s}^2$

Basierend auf Poisel et al. (2008) und Hungr (2008) wurde der basale Reibungswinkel im Bereich von  $\phi_b = 4^\circ - 8^\circ$  und der Turbulenzkoeffizient im Bereich von  $\xi = 400 - 600 \text{ m/s}^2$  variiert.

### 4.2.3 Modellparameter und Programmcode

#### Modellparameter

Die Modellparameter (angegeben in der Auflistung `flowparam`, vgl. Code 4.1) setzen sich folgendermaßen zusammen:

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 4^\circ\text{--}8^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 400\text{--}600 \text{ m/s}^2$
5. Erzeugung zufälliger kinetischer Energie: 0
6. Abbau der zufälligen kinetischen Energie: 0
7. Zufällige kinetische Energie zur Anpassung der Reibungskoeffizienten: 500

Die maximale Berechnungsdauer wurde mit 300 Sekunden festgelegt. Dies liegt deutlich über der dokumentierten Dauer des Bergsturzes von 100 Sekunden (Cruden und Martin, 2007) und damit auf der sicheren Seite, sodass angenommen werden kann, dass nach Simulationseende die abgeglittene Felsmasse zum Stillstand gekommen ist und sich vollständig ausgebreitet und abgelagert hat.

#### Programmcode

Im Folgenden ist der Programmcode von `r.avaflow` für die Rückrechnung des Frank Slide vom 29. April 1903 angegeben. Man erkennt anhand dieses nur 42 Zeilen umfassenden Codes eine Stärke von `r.avaflow`: das Programm lässt sich schnell und einfach bedienen, denn zur Ausführung der Anwendung muss vergleichsweise wenig Code geschrieben werden.

`r.avaflow` wird durch Aufrufen des im folgenden aufgeführten Shell Skripts (Code 4.1) innerhalb der geöffneten GRASS GIS Sitzung, in welcher die im Skript angegebenen Rasterkarten entsprechend der dort referenzierten Benennungen geladen sind, gestartet.

**Program Code 4.1:** Programmcode zur Rückrechnung des Frank Slide.

---

```

1  # Rückrechnung des Frank Slide vom 29.4.1903 in r.avaflow
2
3  # Definition der Inputparameter
4  # Pixelgröße in Meter, welche für die Modellberechnung verwendet wird.
5  # Dies entspricht der Auflösung der digitalen Höhenmodelle, die in der
6  # Simulation verwendet werden. Dies sind
7  # - Digitales Höhenmodell der basalen Topographie des untersuchten
8  #   Bereiches mit einer Auflösung von 20m
9  # - Digitales Höhenmodell des Ausbruchsbereiches, ebenfalls in einer
10 #   Auflösung von 20m
11 cellsize="20"
12
13 # Definition des Parameters funcctrl. Hierbei werden folgende Funktionen
14 # gesteuert:
15 # - Konvertierung der Höhen
16 # - Diffusionskontrolle
17 # - Berücksichtigung des Volumenverlustes
18 # - Kontrolle der Oberflächeninteraktion von Fels und Wasser
19 # - Erosion
20 # - Stoppbedingung
21 funcctrl="1,1,1,0,0,1"
22
23 # Definition des Höhenmodells der basalen Topographie
24 elevation="fs_elev"
25
26 # Definition des Höhenmodells des Ausbruchsbereiches
27 hrelease="fs_hrelease"
28
29 # Definition des Ablagerungsbereiches
30 hdeposit="fs_depositionarea"
31
32 # Definition des beeinflussten Bereiches des Bergsturzes
33 impactarea="fs_impactarea"
34
35 # Angabe der unteren Grenzen der Fließhöhe in Meter, der kinetischen
36 # Energie in Joule und des Fließdrucks in Pascal zur Darstellung der
37 # Ergebnisse
38 imparam="1.0,10000,10000,0.01"
39
40 # Start der Anwendung r.avaflow
41 # Multiple Simulationen (Flag -m): Voellmy-Salm Modell
42 r.avaflow -e -m -v prefix=fs_vom cellsize="$cellsize" model=1 limiter=1
    funcctrl="$funcctrl" elevation="$elevation" hrelease="$hrelease"
    hdeposit="$hdeposit" impactarea="$impactarea" cores=12 sampling=0
    flowparam=2350,2350,0,30,30,0,4,8,10,400,600,10,0,0,0,0,0,0,500,500,0
    imparam="$imparam" tint=300 tstop=300

```

---

### 4.3 Kalibrierung der Modellparameter

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden im Zuge der Rückrechnung der Felslawine Frank Slide die Modellparameter des Voellmy-Salm Modells variiert und durch den Vergleich der jeweils berechneten Ablagerungen mit den beobachteten Ablagerungen die am besten passende Parameterkombination ermittelt. Die Parameter der Kalibration sind

1. der basale Reibungswinkel  $\phi_b$ , welcher im Bereich von  $4^\circ$ – $8^\circ$  variiert wurde (vgl. 4.2.2), und
2. der Turbulenzkoeffizient  $\xi$ , der von  $400$ – $600$   $\text{m/s}^2$  variiert wurde (vgl. 4.2.2).

Im zugehörigen Programmcode (siehe Code 4.1) ist ersichtlich, dass die beiden Parameterbereiche in jeweils 10 gleiche Intervalle aufgeteilt wurden. `sampling=0` bedeutet hierbei, dass die Aufteilung der Parameterbereiche gleichmäßig zwischen dem festgelegten Minimum und dem festgelegten Maximum erfolgte. Die daraus erhaltene Anzahl an Berechnungsdurchgängen ist das Produkt aller definierten Intervalle. Im gegenständlichen Fall bedeutet dies:  $10 \cdot 10 = 100$  Programmdurchläufe, in denen die Variation der genannten Parameter erfolgt.

In nachstehender Tabelle 4.2 sind die Voellmyparameter, die bei den einzelnen Modellrechnungen miteinander kombiniert wurden, aufgelistet:

**Tab. 4.2:** Intervalle der Voellmy Parameter zur Rückrechnung des Frank Slide.

Parameter	1	2	3	4	5
$\phi_b$ [°]	4,00	4,44	4,89	5,33	5,78
$\xi$ [ $\text{m/s}^2$ ]	400,00	422,22	444,44	466,67	488,89
Parameter	6	7	8	9	10
$\phi_b$ [°]	6,22	6,67	7,11	7,56	8,00
$\xi$ [ $\text{m/s}^2$ ]	511,11	533,33	555,56	577,78	600,00

#### 4.3.1 Kennwerte

Zur Identifizierung der am besten passenden Voellmyparameter mit der größten Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung wurden folgende Kennwerte pro Berechnung (siehe Abschnitt 3.4) ausgewertet:

- True Positive (TP)
- True Negative (TN)
- False Positive (FP)
- False Negative (FN)
- Critical Success Index (CSI)
- Heidke Skill Score (HSS)
- Area under ROC curve (AUROC)
- Distance to perfect classification (D2PC)

Die Auswertung erfolgte jeweils für den Bereich der Ablagerungen (Index d: *deposition*) und für den durch die Felslawine beeinflussten Bereich (Index i: *impact*):

**Tab. 4.3:** Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter.

Bereich	Kennwerte							
deposition	TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
impact	TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>

### 4.3.2 Auswertung

#### Auswertung der Kennwerte hinsichtlich der Ablagerungen

Die Auswertung der Berechnungsdurchgänge für die in der Tabelle 4.3 angegebenen Kennwerte hinsichtlich der Ausbreitung der Ablagerungen (Runout) nach den jeweils besten erreichten Werten lieferte folgende Ergebnisse:

**Tab. 4.4:** Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich der Ablagerungen (*deposition area*).

Nr.	TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
10	11,358	81,615	1,718	5,309	0,618	0,727	0,830	0,319
86	12,787	81,444	1,889	3,879	0,689	0,785	0,872	0,234
88	13,016	81,918	1,415	3,651	0,720	0,809	0,882	0,220
91	12,794	78,368	4,965	3,873	0,591	0,697	0,854	0,240
93	13,273	79,800	3,533	3,394	0,657	0,756	0,877	0,208
100	12,636	81,968	1,366	4,031	0,701	0,795	0,871	0,242

#### Auswertung der Kennwerte hinsichtlich des beeinflussten Bereiches

Die Auswertung der Berechnungsdurchgänge für die in der Tabelle 4.3 angegebenen Kennwerte hinsichtlich des überstrichenen Bereiches nach den jeweils besten erreichten Werten lieferte folgende Ergebnisse:

**Tab. 4.5:** Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich des beeinflussten Bereiches (*impact area*).

Nr.	TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>
10	12,661	81,894	1,439	4,006	0,699	0,793	0,871	0,241
86	15,162	81,296	2,037	1,505	0,811	0,875	0,943	0,094
88	14,478	81,754	1,580	2,189	0,793	0,864	0,925	0,133
91	16,316	78,294	5,040	0,351	0,752	0,826	0,959	0,064
93	16,005	79,665	3,669	0,661	0,787	0,855	0,958	0,059
100	13,995	81,834	1,500	2,672	0,770	0,847	0,911	0,161

### Zusammenfassung der Auswertung

Die Auswertung der Kennwerte zur Parameterkalibrierung nach Tabelle 4.3 zeigte entsprechend den Tabellen 4.4 und 4.5, dass die Simulationsdurchläufe mit den Nummern 10, 86, 88, 91, 93 und 100 die beste Übereinstimmung zwischen Rückrechnung und Beobachtung lieferten. Die verwendeten Materialkennwerte in der jeweils ausgeführten Berechnung lauten:

**Tab. 4.6:** Materialkennwerte mit der besten Übereinstimmung (best-fit Parameter).

Nr.	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\phi_i$ [°]	$\phi_b$ [°]	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
10	2350,00	30,00	8,00	400,00
86	2350,00	30,00	6,22	577,78
88	2350,00	30,00	7,11	577,78
91	2350,00	30,00	4,00	600,00
93	2350,00	30,00	4,89	600,00
100	2350,00	30,00	8,00	600,00

## 4.4 Ergebnisse

### 4.4.1 Parameterkalibrierung

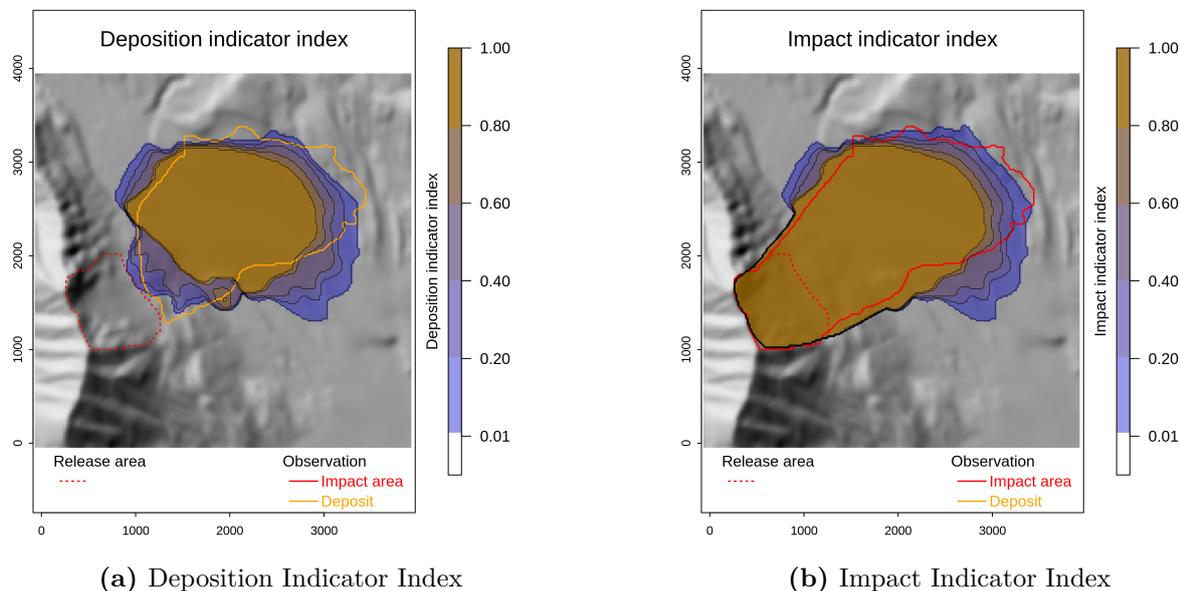
#### Am besten passende Materialparameter

Eine Auswertung der Tabelle 4.4 für den Ablagerungsbereich und der Tabelle 4.5 für den durch die Felslawine überstrichenen Bereich nach dem CSI liefert bei Vergleich mit Tabelle 4.6 einen basalen Reibungswinkel  $\phi_b \approx 6^\circ\text{--}7^\circ$  und einen Turbulenzkoeffizient  $\xi \approx 580 \text{ m/s}^2$  für die Werte der Voellmyparameter, mit denen im vorliegenden Modell die beste Analogie zwischen Simulation und Beobachtung erreicht wurde. Zusammenfassend konnten in der vorliegenden Fallstudie Frank Slide die besten Übereinstimmungen von Simulation und Beobachtung bei der Verwendung folgender Materialkennwerte (best-fit) erreicht werden (vgl. vorausgehenden Abschnitt 4.3):

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 6,5^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$

#### Parameterindizes Deposition Indicator Index und Impact Indicator Index

Im Zuge der Rückrechnung des Ereignisses vom 29. April 1903 werden durch die Visualisierung der Ergebnisse aus r.avaflow (Flag -v) der Deposition Indicator Index (DII) und der Impact Indicator Index (III) dargestellt (siehe hierzu auch Abschnitt 3.4.1.3):



**Abb. 4.4:** (a) Darstellung des Deposition Indicator Index und (b) des Impact Indicator Index für den Fall Frank Slide.

In obenstehender Abbildung 4.4 sind auf der Abszisse und Ordinate die lokalen Koordinaten des untersuchten Gebietes abgetragen. Zudem ist in grau die Hillshade-Darstellung des Untersuchungsgebietes, welche aufgrund des in GRASS GIS eingelesenen digitalen Höhenmodells der basalen Topographie von r.avaflow im Zuge der Visualisierung automatisch erstellt wird, zu erkennen.

In der Darstellung des Deposition Indicator Index sind zudem der Ausbruchsbereich, der in Form einer gestrichelten roten Konturlinie gekennzeichnet ist, und der Bereich der beobachteten Ablagerungen (durch eine durchgezogene orangene Konturlinie kenntlich gemacht) dargestellt (vgl. Abbildung 4.4a). Es ist zu erkennen, dass die Reichweite des simulierten Runout im nordöstlichen Teil durch die Simulationsdurchläufe etwas unterschätzt, die seitliche Ausbreitung der Ablagerungen im nordwestlichen und südöstlichen Bereich hingegen von teilweise bis zu 80 % aller Berechnungen überschätzt wird. Die Ablagerungen im südwestlichen Teilbereich nahe des Ausbruchsbereiches werden nur bedingt mit den Beobachtung übereinstimmend berechnet.

In der Darstellung des Impact Indicator Index ist ebenfalls der Abbruchbereich (rot gestrichelte Konturlinie) eingezeichnet. Die Grafik beinhaltet zudem den durch das Sturzereignis beobachteten überstrichenen Bereich (*impact area*), der durch eine rote durchgezogene Konturlinie beschrieben ist (siehe Abbildung 4.4b). Die *impact area* wird im unmittelbaren Ausbruchsbereich sowie entlang des Fließpfades bis zum Fuß des Turtle Mountain sehr zutreffend beschrieben. Im weiteren Verlauf entlang des Fließpfades sind die in Abbildung 4.4b erkennbaren Abweichungen des berechneten Impact Indicator Index vom beobachteten überstrichenen Bereich der Diskrepanz zwischen simuliertem Runout und beobachteter Ablagerung geschuldet (siehe Abbildung 4.4a).

### Kennwerte der Parameterkalibrierung hinsichtlich des Ablagerungsbereiches

Die im Abschnitt 4.3 im Rahmen der Kalibrierung der beiden Material- und Modellparameter basaler Reibungswinkel  $\phi_b$  sowie Turbulenzkoeffizient  $\xi$  entsprechend der Tabelle 4.4 angegebenen Kennwerte CSI, HSS, D2PC und AUROC sind in Abbildung 4.5 dargestellt. In dieser Abbildung entspricht der Parameter 5 auf der Abszisse dem basalen Reibungswinkel  $\phi_b$ , der Parameter 6, welcher auf der Ordinate aufgetragen ist, stellt den Turbulenzkoeffizienten  $\xi$  dar. Der Wert  $AUROC_d$  liegt im Mittel aller Simulationen bei  $AUROC_d = 0,946$  und damit nahe am Optimum von 1,0.

### Kennwerte der Parameterkalibrierung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches

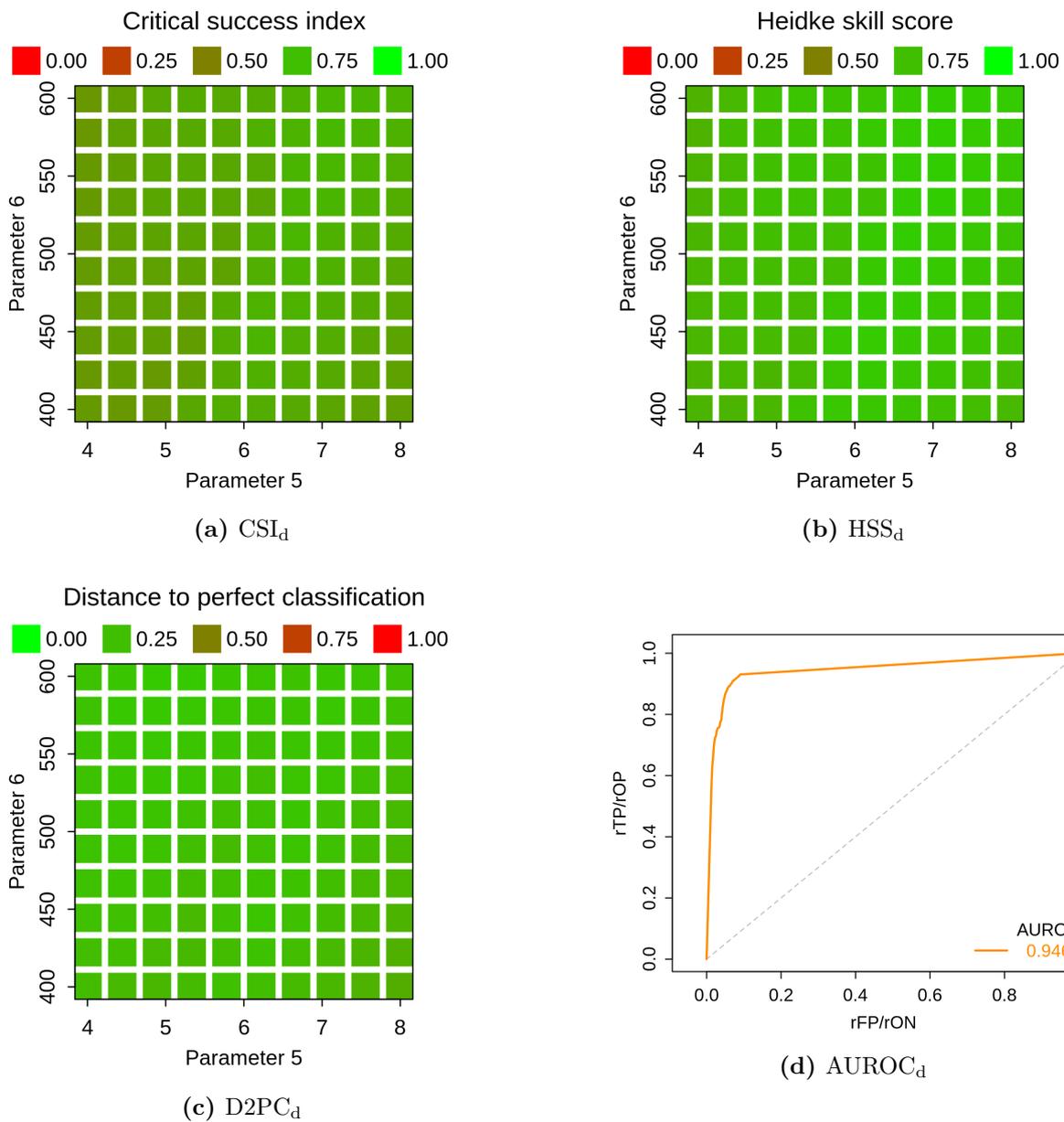
Die im Abschnitt 4.3 im Rahmen der Kalibrierung der beiden Material- und Modellparameter basaler Reibungswinkel  $\phi_b$  sowie Turbulenzkoeffizient  $\xi$  entsprechend der Tabelle 4.5 angegebenen Kennwerte CSI, HSS, D2PC und AUROC sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Wie im vorherigen Unterabschnitt bedeuten auch hier in der Abbildung 4.6 die Parameter 5 und 6 die Parameter  $\phi_b$  und  $\xi$  des Voelly-Salm Modells. Die *Area under ROC curve* liegt im Falle der Auswertung für die *impact area* bei  $AUROC_i = 0,968$  und damit noch näher an 1,0 als  $AUROC_d$ .

### Maximale Höhen der Ablagerungen und maximale Fließgeschwindigkeiten

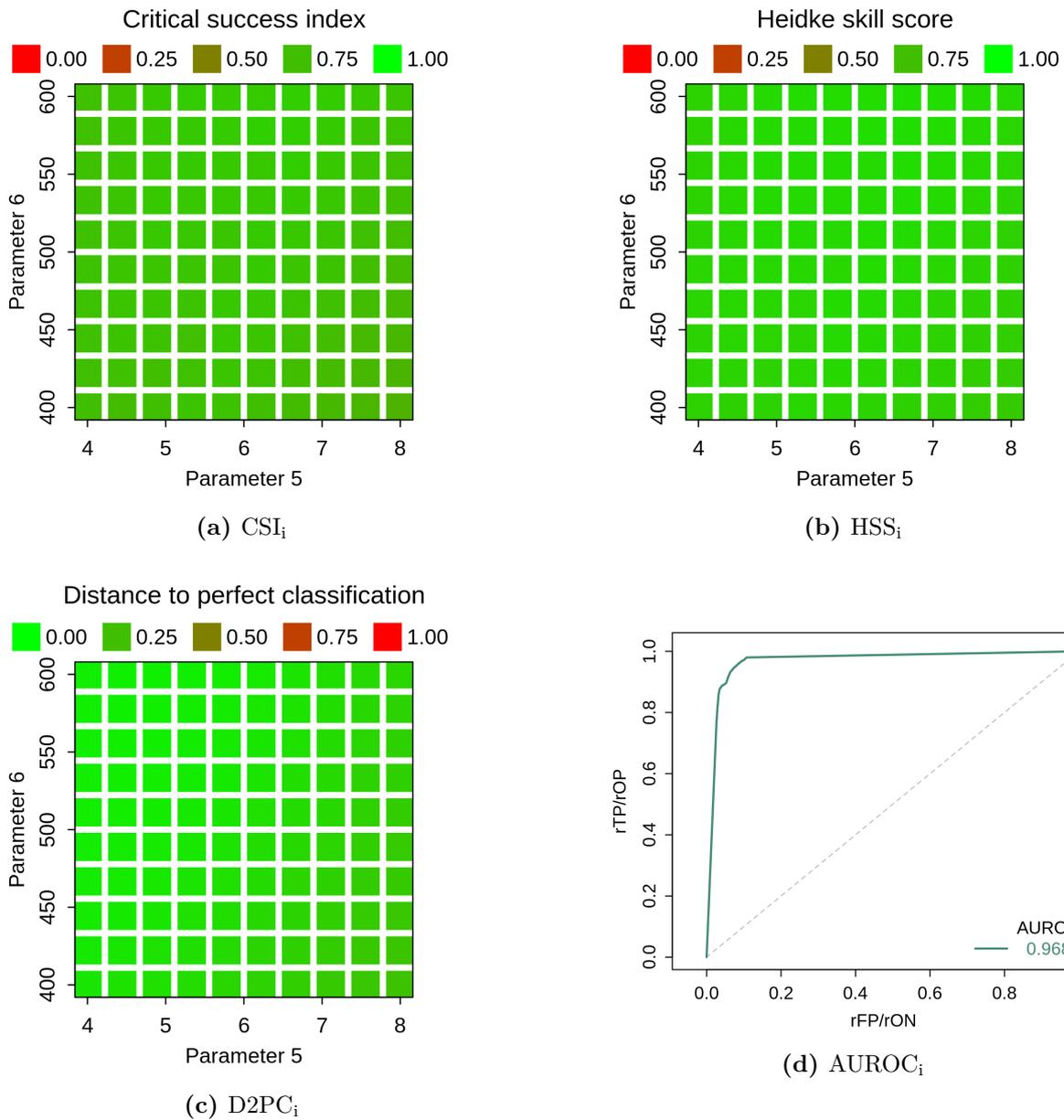
Die Auswertung der maximalen Ablagerungshöhen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten für die best-fit Parameter (vgl. hierzu Tabelle 4.6) ist in nachstehender Tabelle aufgelistet:

**Tab. 4.7:** Maximale Ablagerungshöhen  $d_{\max}$  und maximale Fließgeschwindigkeiten  $v_{\max}$  der in Tabelle 4.6 angegebenen best-fit Parameter.

Nr.	$d_{\max}$ [m]	$v_{\max}$ [m/s]	$\phi_b$ [°]	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	CSI <sub>d</sub>	CSI <sub>i</sub>
10	30,19	65,65	8,00	400,00	0,618	0,699
86	24,54	72,70	6,22	577,78	0,689	0,811
88	27,24	71,09	7,11	577,78	0,720	0,793
91	18,83	76,97	4,00	600,00	0,591	0,752
93	19,22	75,41	4,89	600,00	0,657	0,787
100	28,96	69,91	8,00	600,00	0,701	0,770



**Abb. 4.5:** (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich der beobachteten Ablagerungen. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  [m/s<sup>2</sup>].



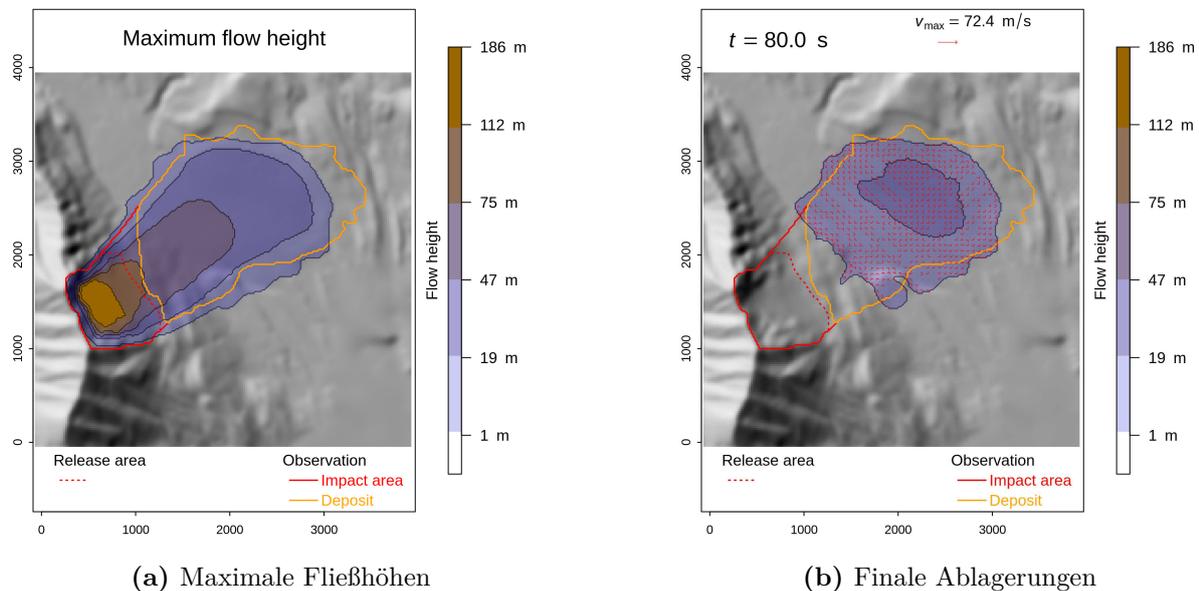
**Abb. 4.6:** (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  [ $^\circ$ ], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  [ $\text{m/s}^2$ ].

#### 4.4.2 Fließhöhen, Ablagerungshöhen und Fließgeschwindigkeiten

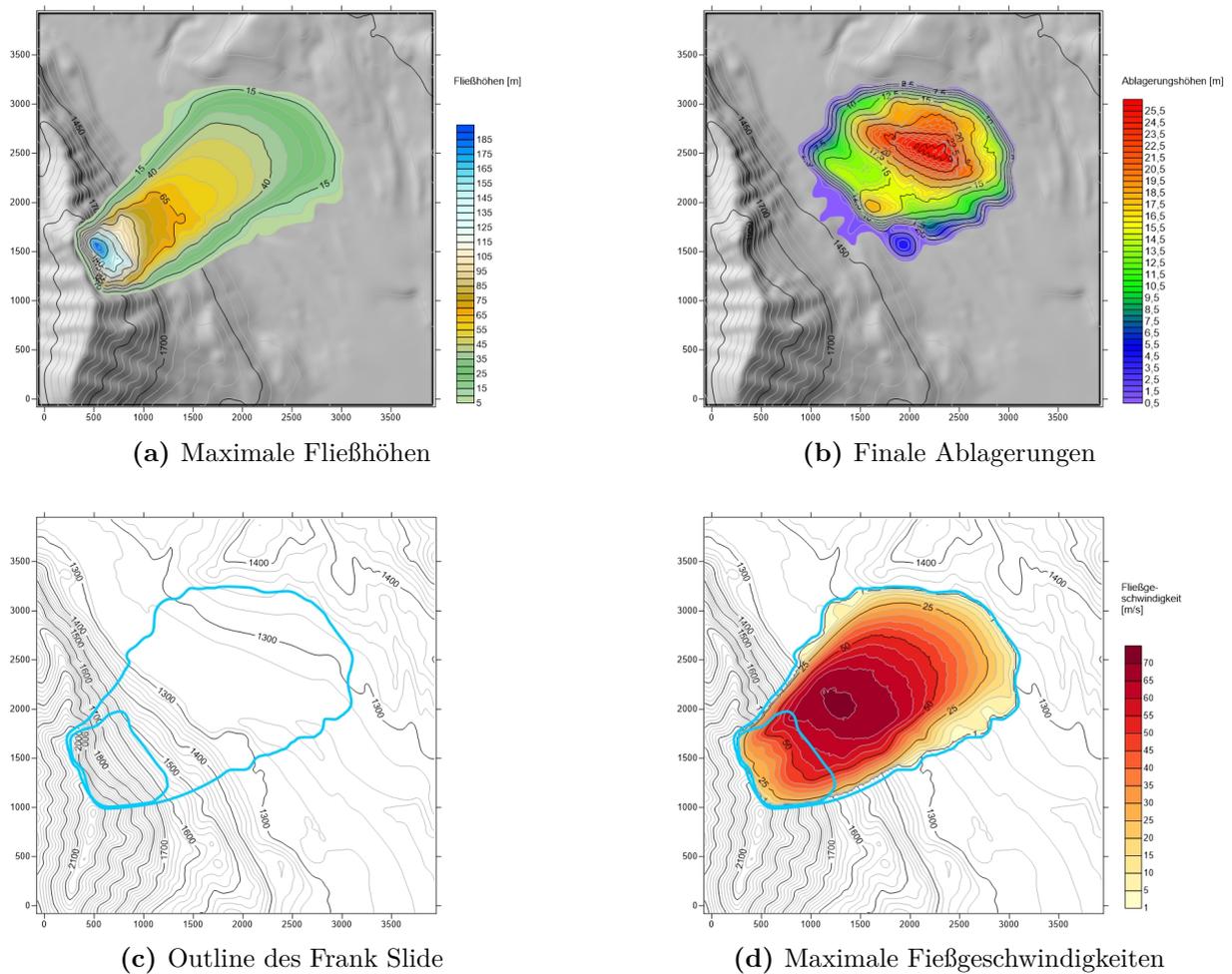
Zur Auswertung der maximalen Fließhöhen, der finalen Ablagerungshöhen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten erfolgte separat von den vorherigen Simulationen zur Parameterkalibrierung eine Rückrechnung des Ereignisses vom 29. April 1903 unter Verwendung der am besten passenden (best-fit) Materialkennwerte (vgl. vorausgehenden Abschnitt 4.4.1):

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 6,5^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$

Die Ergebnisse dieser Rückrechnung sind in nachstehenden Abbildungen 4.7 und 4.8 dargestellt, der verwendete Programmcode ist in Code 4.2 beschrieben. Abbildung 4.7a zeigt die maximalen Fließhöhen beginnend im Ausbruchsbereich (rot gestrichelte Konturlinie) entlang des Fließpfades, Abbildung 4.7b die Ablagerungen der Felsmassen nach Simulationsende. Hierbei ist festzuhalten, dass r.avaflow die Simulation durch Angabe der Stoppbedingung (Einstellung `funcctrl`) selbstständig beendet hat. Das somit berechnete Ende des Ereignisses liegt bei  $t = 80$  Sekunden und stimmt mit den in Cruden und Martin (2007) für die maximale Dauer des Bergsturzes angeführten 100 Sekunden gut überein. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt  $v_{\max} = 72,4 \text{ m/s}$  (siehe Abbildung 4.7b oben rechts und Abbildung 4.8d).



**Abb. 4.7:** (a) Darstellung der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades und (b) der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 80 \text{ s}$ ) für  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$ . Auswertungen mittels r.avaflow.



**Abb. 4.8:** (a) Konturplot der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades, (b) Konturplot der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 80$  s), (c) Outline bzw. überstrichener Bereich des Frank Slide nach der Rückrechnung und (d) maximale Fließgeschwindigkeiten. Rückrechnung mit den Voellmyparametern  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$ . Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.

**Program Code 4.2:** Programmcode zur Rückrechnung des Frank Slide mit den Voellyparametern  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$ .

---

```

1 # Rückrechnung des Frank Slide vom 29.4.1903 in r.avaflow mit
2 # den Voellmyparametern phi_b=6,5 und xi=580
3
4 # Definition der Inputparameter
5 # Pixelgröße in Meter, welche für die Modellberechnung verwendet wird.
6 # Dies entspricht der Auflösung der digitalen Höhenmodelle, die in der
7 # Simulation verwendet werden. Dies sind
8 # - Digitales Höhenmodell der basalen Topographie des untersuchten
9 #   Bereiches mit einer Auflösung von 20m
10 # - Digitales Höhenmodell des Ausbruchsbereiches, ebenfalls in einer
11 #   Auflösung von 20m
12 cellsize="20"
13
14 # Definition des Parameters funcctrl. Hierbei werden folgende Funktionen
15 # gesteuert:
16 # - Konvertierung der Höhen
17 # - Diffusionskontrolle
18 # - Berücksichtigung des Volumenverlustes
19 # - Kontrolle der Oberflächeninteraktion von Fels und Wasser
20 # - Erosion
21 # - Stoppbedingung
22 funcctrl="1,1,1,0,0,1"
23
24 # Definition des Höhenmodells der basalen Topographie
25 elevation="fs_elev"
26
27 # Definition des Höhenmodells des Ausbruchsbereiches
28 hrelease="fs_hrelease"
29
30 # Definition des Ablagerungsbereiches
31 hdeposit="fs_depositionarea"
32
33 # Definition des beeinflussten Bereiches des Bergsturzes
34 impactarea="fs_impactarea"
35
36 # Angabe der unteren Grenzen der Fließhöhe in Meter, der kinetischen
37 # Energie in Joule und des Fließdrucks in Pascal zur Darstellung der
38 # Ergebnisse
39 improam="1.0,10000,10000,0.01"
40
41 # Start der Anwendung r.avaflow
42 # Einfache Modellsimulation: Voellmy-Salm Modell
43 r.avaflow -e -v prefix=fs_6-5_580 model=1 limiter=1 funcctrl="$funcctrl"
      elevation="$elevation" hrelease="$hrelease" hdeposit="$hdeposit"
      impactarea="$impactarea" flowparam=2350,30,6.5,580,0,0,500 improam="$
      improam" tint=5 tstop=300

```

---

## 4.5 Resümee

### 4.5.1 Modellgenauigkeit

In der vorliegenden Fallstudie Frank Slide konnte zwischen Simulation und Beobachtung des Ereignisses vom 29. April 1903 eine sehr große Übereinstimmung erzielt werden. Eine Rückrechnung des Bergsturzes mit den Voellymparametern  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$  erzielte hierbei die besten Ergebnisse. Dies wird bei der Auswertung der Kennwerte zur Parameterverifizierung ersichtlich (siehe Tabelle 4.8):

**Tab. 4.8:** Auswertung der Kennwerte zur Verifizierung der Modellparameter  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$ .

TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
12,7	81,7	1,7	3,9	0,694	0,789	0,872	0,238
TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>
15,0	81,5	1,8	1,7	0,811	0,876	0,939	0,102

Die große Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung spiegelt sich besonders in der erreichten Modellgenauigkeit wider. Der hierfür neben dem CSI verwendete Parameter Accuracy (siehe Abschnitt 3.4.1.3) zur Beschreibung der erreichten Genauigkeit lässt sich nach Formetta et al. (2016) ermitteln und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 das Optimum an erreichter Genauigkeit darstellt (vgl. Abschnitt 3.4). In der vorliegenden Fallstudie und unter Verwendung von  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$  wurde ein  $ACC_d = 0,944$  und ein  $ACC_i = 0,965$  realisiert.

Beim visuellen Vergleich der berechneten finalen Ablagerungen mit den beobachteten Ablagerungen (Abbildung 4.7b) kann festgestellt werden, dass die Ausbreitung in Fließrichtung im nordöstlichen bzw. östlichen Teil etwas unterschätzt wurde, die seitliche Ausbreitung lotrecht auf den Fließpfad im nordwestlichen und südöstlichen Bereich hingegen leicht überschätzt worden ist.

## 4.5.2 Vergleichsbetrachtung

### 4.5.2.1 Voellmyparameter

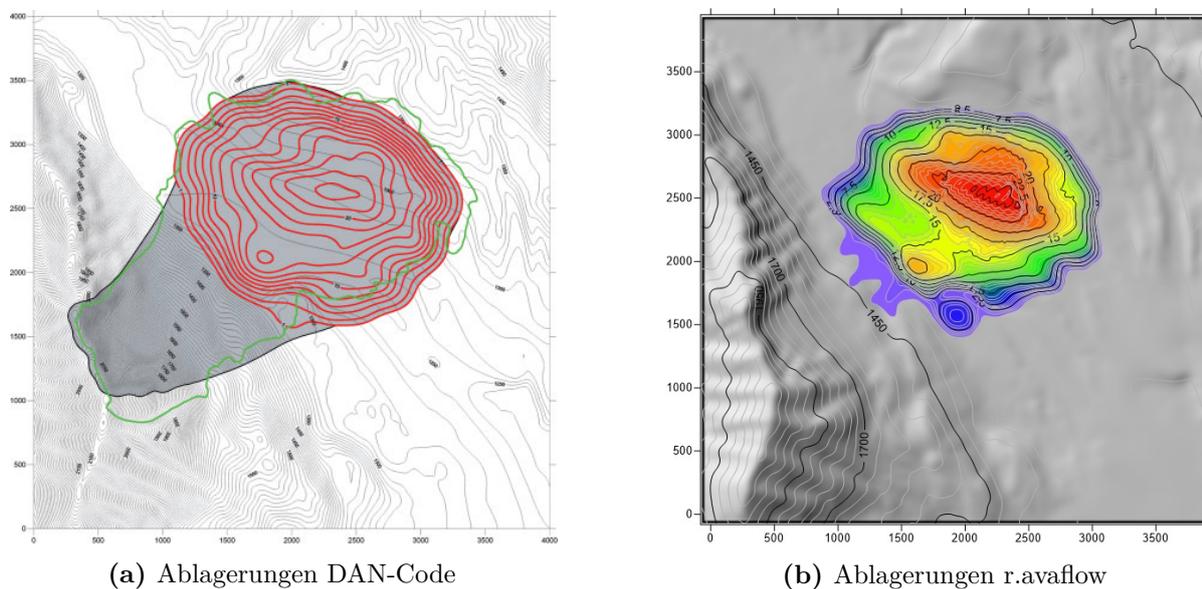
Hungr (2008) führte eine Parameterstudie zum Frank Slide durch, indem er den Einfluss unterschiedlicher Wertepaare der Parameter des Voellmy-Modells auf die Verteilung der Ablagerungen untersuchte. Die besten Ergebnisse hinsichtlich der Distanz des Runouts sowie der Ablagerungsverteilung konnten mit einem Reibungskoeffizienten  $f = 0,1$  (entspricht einem basalen Reibungswinkel  $\phi_b \approx 5,7^\circ$ ) und einem Turbulenzkoeffizienten  $\xi = 500 \text{ m/s}^2$  erzielt werden. Tabelle 4.9 zeigt eine Gegenüberstellung der am besten passenden Parameter der Voellmy Rheologie der Studie Hungr (2008) und der vorliegenden mit r.avafLOW durchgeführten Fallstudie (siehe Abschnitt 4.4.2).

**Tab. 4.9:** Gegenüberstellung der Voellmyparameter aus der Fallstudie Hungr (2008) und der vorliegenden mit r.avafLOW durchgeführten Fallstudie Frank Slide.

Studie	Hungr (2008)	Studie r.avafLOW
Berechnungssoftware	DAN-Code	r.avafLOW
Basaler Reibungswinkel $\phi_b$	$5,7^\circ$	$6,5^\circ$
Turbulenzkoeffizient $\xi$	$500 \text{ m/s}^2$	$580 \text{ m/s}^2$

### 4.5.2.2 Ablagerung

Die Ablagerungen aus den jeweiligen Berechnungen sind in Abbildung 4.9 dargestellt:



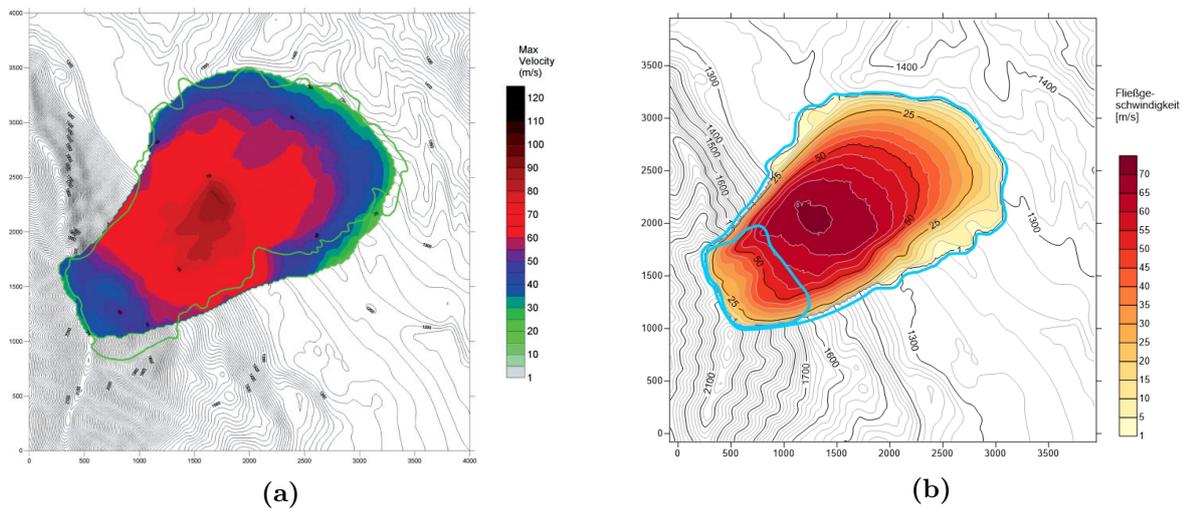
**Abb. 4.9:** (a) Ablagerungsverteilung (rote Konturlinien) nach Hungr (2008) für  $f = 0,1$  ( $\phi_b \approx 5,7^\circ$ ) und  $\xi = 500 \text{ m/s}^2$ . (b) Verteilung der Ablagerungen berechnet mittels r.avafLOW unter Verwendung der Voellmyparameter  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$  (siehe hierzu auch Abbildung 4.7b und 4.8b).

Die wesentliche Form der Ablagerungsmassen ähnelt sich in beiden Fällen stark. Grundsätzlich lässt sich ein lokales Maximum der Ablagerungen im Zentrum der beiden Fallstudien identifizieren,

südwestlich dieses Maximums ist ebenfalls in beiden Studien eine weitere, wenn auch kleinere Konzentration von Massen erkennbar.

#### 4.5.2.3 Fließgeschwindigkeit

In beiden Fallstudien werden die Fließgeschwindigkeiten der Massenbewegung grafisch zur Darstellung gebracht:



**Abb. 4.10:** (a) Gebiete gleicher maximaler Geschwindigkeit nach Hungr (2008) für  $f = 0, 1$  ( $\phi_b \approx 5,7^\circ$ ) und  $\xi = 500 \text{ m/s}^2$ . (b) Maximale Fließgeschwindigkeiten berechnet mittels r.avafLOW unter Verwendung der Voellmyparameter  $\phi_b = 6,5^\circ$  und  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$  (siehe hierzu auch Abbildung 4.8d).

Die Fließgeschwindigkeiten im Ausbruchsbereich liegen nach Hungr (2008) in Bereichen von in etwa 30 m/s bis 50 m/s. Dies deckt sich gut mit den Berechnungsergebnissen aus Abschnitt 4.4, wonach Geschwindigkeiten in Größenordnungen von bis zu 50 m/s im unmittelbaren Ausbruchsbereich identifiziert werden können. Im Zentrum des überstrichenen Gebietes liegen die Geschwindigkeiten in Abbildung 4.10a in Bereichen von 60 m/s bis 80 m/s, in Abbildung 4.10b lassen sich in diesem Gebiet Geschwindigkeiten in Bereichen von 50 m/s bis 70 m/s erkennen. Die maximale Fließgeschwindigkeit nach Hungr (2008) durch Berechnungen mittels des DAN-Codes kann mit  $v_{\max} \approx 80 \text{ m/s}$  angegeben werden. Eine Simulation des Ereignisses vom 29.04.1903 mittels r.avafLOW ergibt entsprechend Abschnitt 4.4 eine maximale Fließgeschwindigkeit  $v_{\max} = 72,4 \text{ m/s}$ .

#### 4.5.2.4 Schlussfolgerung

Die Gegenüberstellung der Rückrechnungen der Felslawine Frank Slide mit Hilfe des DAN-Codes und mittels r.avafLOW zeigte eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der best-fit Parameter der Voellmy Rheologie, der berechneten Ablagerungen und der berechneten Fließgeschwindigkeiten.

# Kapitel 5

## Fallstudie Vals

### 5.1 Einleitung

Nach der Rückrechnung des Frank Slide vom 29. April 1903, der mit einem Ausbruchsvolumen von rund 36 Millionen  $m^3$  (Hungr und McDougall, o.J.) eine beeindruckend große und sehr rasche Felslawine mit einer Dauer von nur rund 100 Sekunden war (Cruden und Martin, 2007), wird in den folgenden Abschnitten ein kleineres Ereignis in ravaflow rückgerechnet und hierfür die Modellparameter des Voellmy-Salm Modells kalibriert. Bei diesem Ereignis handelt es sich um den Felssturz Vals, der sich am 24. Dezember 2017 im Valsertal in Tirol, Österreich, ereignete (siehe blaue Markierung in Abbildung 5.1).

Beim Felssturz Vals konnten aufgrund mehrerer Laseraufnahmen, welche sowohl durch terrestrische Aufnahmen als auch mittels Drohnen erfolgten, hochauflösende Höhenmodelle vor und nach dem Ereignis entwickelt werden. Über die Differenzen der beiden digitalen Geländemodelle ließen sich Ausbruchs- und Ablagerungsvolumina berechnen. Ein Vergleich der angesprochenen Modelle ergibt ein Ausbruchsvolumen von rund 116000  $m^3$  und ein Ablagerungsvolumen von etwa 130000  $m^3$ , was einer Auflockerung und damit einhergehend einer Volumenzunahme von ca. 11,5 Prozent entspricht. Das Ereignis an sich verlief im Gegensatz zum Bergsturz Frank Slide ohne nennenswerte Schäden an Gebäuden und Personen. Liegenschaften im unmittelbaren Bereich der Auslaufzone der Sturzmasse waren maximal durch eine Staubwolke involviert, was anhand von Luftbildaufnahmen unmittelbar nach dem Ereignis deutlich erkennbar ist. Durch den hohen Kontrast der Schneedecke lassen sich zudem nicht nur die dunklen Ablagerungen und die Grenzen der Ablagerungen erkennen, sondern auch der angesprochene Staubsaum sehr anschaulich identifizieren (siehe Abbildung 5.2a). Die im Tal verlaufende Valsler Landstraße wurde durch die Felsmassen 8 m hoch überschüttet.

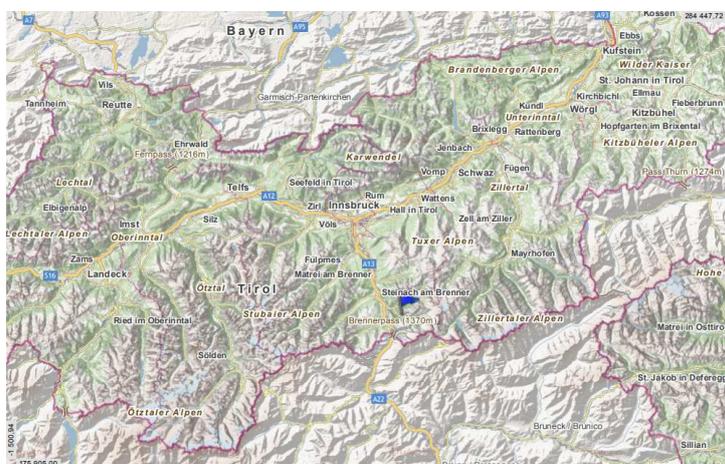


Abb. 5.1: Die Lage des Felssturzes Vals im Valsertal, Tirol, Österreich. Quelle: Tiroler Landesregierung (2019).



(a) Luftbildaufnahme der Ablagerungen und des Staubsaaums



(b) Aufnahme des Sturzgebietes

**Abb. 5.2:** (a) Darstellung der Luftbildaufnahme unmittelbar nach dem Sturzereignis am 25.12.2017. Es sind sowohl die Ablagerungen als auch der Staubsaum zu erkennen (Liebl, 2017). (b) Aufnahme des Gebietes vom 02.07.2019 (Hartl).

Das Valsertal befindet sich innerhalb einer großen tektonischen Struktur, welche als Brennerabschiebung bezeichnet wird. Das Gebiet des Felssturzes befindet sich im westlichen Bereich dieser Abschiebung und damit am Westende des Tauernfensters. Das Tauernfenster ist ein tektonisches Fenster, in dem durch eine Aufwölbung (Zentralgneiskern, Duxer Gneiskern) das oben liegende Gebirge, welches durch untere Gesteinsschichten überschoben wurde, aberodiert ist. Dies bedeutet, dass im betrachteten Gebiet weiter unten liegende Gesteinseinheiten an der Oberfläche anzutreffen sind. Geologische Störungszonen spielen eine entscheidende Rolle bei Instabilitäten und Versagen von Böschungen und Hängen. Im Bereich des Valsertales und insbesondere im Gebirgsbereich um Vals sind zahlreiche dieser Störungen anzutreffen. Durch das Herausheben und die Abschiebung der Gesteinseinheiten (in diesem Fall des Öztalkristallins) wurden Bruchstrukturen geschaffen, die in etwa Nord-Süd streichen und somit in etwa der Felswand folgen. Schieferungsflächen sind aufgrund ihrer durchgängigen Ausbildung von Bedeutung und in weiterer Folge bei ungünstigem Einfall oftmals für Versagensmechanismen verantwortlich. Im gegenständlichen Fall sind die Verhältnisse als günstig zu bewerten, da die Schieferungsflächen bergwärts fallen.

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass ein strukturbedingtes Versagen eines durch das Trennflächensystem definierten (Groß-) Keiles für das Sturzereignis verantwortlich war. Eine Kartierung der Störungen durch Begehungen nach dem Ereignis vom 24.12.2017 konnte eine sehr starke Verfaltung der Gesteinsabfolge (eine Wechselfolge von Kalk-Glimmerschiefer bis Phylliten mit Zwischenschaltung von Kalk-Silikat-Marmoren) durch die Gebirgsbildung festhalten.

Eine zentrale Frage, die im Zuge von Rückrechnungen des Felssturzes Vals auftritt, ist die Klärung des Fließverhaltens und der Rheologie der Gesteinsmassen. Im Groben kann in der gegenständlichen Untersuchung auf Basis einer visuellen Analyse der Ablagerungen und des Zerlegungsgrades des Schuttes zwischen folgenden rheologischen Verhalten bzw. Eigenschaften, deren Kenntnis für die Wahl des numerischen Berechnungsverfahrens entscheidend ist, differenziert werden:

1. Flüssigkeitsäquivalentes, schuttstromähnliches Verhalten: plastischer Verformungsanteil
2. Stützen, Fallen oder Rollen bzw. Springen: starre Interaktion von Gesteinsblöcken

Bei der Wahl des Materialmodells (rheologisches Verhalten) spielt die Block-Block-Interaktion eine zentrale Rolle, wobei zu hinterfragen ist, ob das Ereignis als Einzelereignis mit wenig Interaktion zwischen Gesteinsblöcken oder als Felslawine mit hoher Interaktion zwischen Blöcken mit schuttstromähnlichem Verhalten gewertet werden kann. Im Fall Vals lassen die Ablagerungen und der Zerlegungsgrad des Schuttes auf eine Kombination der beiden Verhalten schließen: es handelt sich nicht mehr um einen eindeutig beschreibbaren Felssturz, da flüssigkeitsäquivalentes, schuttstromähnliches Verhalten aufgetreten ist. Aus diesem Grund werden bei der Rückrechnung des Ereignisses vom 24. Dezember 2017 kontinuumsmechanische und diskontinuumsmechanische Berechnungsverfahren angewandt.



**Abb. 5.3:** Aufnahme des Gebietes vom 02.07.2019 (Hartl).

## 5.2 Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017: Modellvarianten

Im Zuge der Rückrechnung des Felssturzes Vals wurden zwei Modellvarianten in *r.avaflo* untersucht. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben ist das Höhenmodell der basalen Topographie ein zentraler Kern eines jeden Modells. Das zur Verfügung gestellte digitale Höhenmodell des untersuchten Bereiches lag in einer Auflösung von 1 m hinsichtlich der Höhe vor. Für die Simulation wurde in einem ersten Modell (Modell A, Abschnitt 5.3) das Höhenmodell mit der bereits erwähnten Auflösung von 1 m und in einem zweiten Modell ein durch das Verfahren der linearen Interpolation geglättetes Höhenmodell (Modell B, Abschnitt 5.4) verwendet, um den Einfluss der Auflösung des Höhenmodells in Z-Richtung auf das Materialmodell und die Simulationsergebnisse zu eruieren. Die Anpassungen des digitalen Höhenmodells in der Variante B wurden mittels der Software CloudCompare durchgeführt.

**Tab. 5.1:** Modelle zur Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24.12.2017.

Modellbezeichnung	Auflösung X, Y, Z [m]	Besonderheiten
Modell A	1,00, 1,00, 1,00	raues Geländemodell, Höhenintervalle 1 m
Modell B	1,00, 1,00, interpoliert	geglättetes Geländemodell, durch Interpolation

## 5.3 Modell A

### 5.3.1 Modellaufbau

#### 5.3.1.1 Input-Rasterkarten

Das Modell in *r.avaflo* setzt sich, wie in Kapitel 3 beschrieben, aus verschiedenen Rasterkarten zusammen, welche zuerst in GRASS GIS hinterlegt werden müssen. Im Fall Vals (Modell A) wurden folgende Rasterkarten verwendet:

1. Digitales Höhenmodell der basalen Topographie des untersuchten Bereiches mit einer Auflösung von 1 m.
2. Digitales Höhenmodell des Ausbruchsbereiches, ebenfalls in einer Auflösung von 1 m.
3. Rasterkarte des Ablagerungsbereiches.
4. Rasterkarte des beeinflussten bzw. überstrichenen Bereiches unter Berücksichtigung des Abbruchs und der Ablagerungen.

#### 5.3.1.2 Materialkennwerte

##### Dichte

Zusätzlich zu den Rasterkarten in obiger Auflistung ist die Angabe der Materialkennwerte mit Hilfe der Auflistung *flowparam*, wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, erforderlich. Für die Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017 wurde entsprechend der in Abschnitt 5.1 aufgelisteten und im Untersuchungsbereich anzutreffenden Gesteine eine mittlere Dichte von  $2350 \text{ kg/m}^3$  angenommen (FU Berlin, 2019: Gesteinsdichte).

##### Interner Reibungswinkel

Der interne Reibungswinkel wurde mit  $30^\circ$  angenommen.

### Voellmyparameter

Die Rückrechnung der Ereignisses in r.avaflow erfolgte anhand einer Simulation mit mehreren Modelldurchgängen, wobei im Hinblick auf die Parameterkalibrierung die Parameter des Voellmy-Salm Modells ( $\phi_b$ ,  $\xi$ ) variiert werden. Da im Fall Vals wenig Anhaltswerte für Größenordnungen der beiden beschriebenen Modellparameter in der Literatur existieren, wurden zur Eingrenzung der Bandbreiten von  $\phi_b$  und  $\xi$  mehrere Simulationen vor der eigentlichen Rückrechnung durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass Bereiche von  $\phi_b = 5^\circ\text{--}35^\circ$  und  $\xi = 50\text{--}500 \text{ m/s}^2$  zur Rückrechnung angebracht sind und deshalb innerhalb dieser Grenzen variiert wurden.

#### 5.3.1.3 Modellparameter und Programmcode

##### Modellparameter

Die Modellparameter (angegeben in der Auflistung `flowparam`, vgl. Code 5.1) setzen sich folgendermaßen zusammen:

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 5^\circ\text{--}35^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 50\text{--}500 \text{ m/s}^2$
5. Erzeugung zufälliger kinetischer Energie: 0
6. Abbau der zufälligen kinetischen Energie: 0
7. Zufällige kinetische Energie zur Anpassung der Reibungskoeffizienten: 500

Die maximale Berechnungsdauer wurde mit 300 Sekunden festgelegt.

##### Programmcode

Im Folgenden ist der Programmcode von r.avaflow für die Rückrechnung des Felssturzes Vals (Modell A) vom 24. Dezember 2017 angegeben. r.avaflow wird durch Aufrufen des unten stehenden Shell Skripts innerhalb der geöffneten GRASS GIS Sitzung, in welcher die im Skript angegebenen Rasterkarten entsprechend der dort referenzierten Benennungen geladen sind, gestartet.

#### Program Code 5.1: Programmcode zur Rückrechnung des Felssturzes Vals.

---

```

1 # Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24.12.2017 in r.avaflow
2 # Modell A
3 # Definition der Inputparameter
4 cellsize="1"
5 funcctrl="1,1,1,0,0,1"
6 elevation="vals_elevation_rau"
7 hrelease="vals_hrelease"
8 hdeposit="vals_depositionarea"
9 impactarea="vals_impactarea"
10 imparam="1.0,10000,10000,0.01"
11
12 # Start der Anwendung r.avaflow
13 # Multiple Simulationen (Flag -m): Voellmy-Salm Modell
14 r.avaflow -e -m -v prefix=vals_m-a_m cellsize="$cellsize" model=1 limiter=1
    funcctrl="$funcctrl" elevation="$elevation" hrelease="$hrelease"
    hdeposit="$hdeposit" impactarea="$impactarea" cores=12 sampling=0
    flowparam=2350,2350,0,30,30,0,5,35,7,50,500,10,0,0,0,0,0,0,500,500,0
    imparam="$imparam" tint=300 tstop=300

```

---

### 5.3.2 Kalibrierung der Modellparameter

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden im Zuge der Rückrechnung des Felssturzes Vals die Modellparameter des Voellmy-Salm Modells variiert und durch den Vergleich der jeweils berechneten Ablagerungen mit den beobachteten Ablagerungen die am besten passende Parameterkombination ermittelt. Die Parameter der Kalibration sind

1. der basale Reibungswinkel  $\phi_b$ , welcher im Bereich von  $5^\circ$ – $35^\circ$  variiert wurde (vgl. 5.3.1), und
2. der Turbulenzkoeffizient  $\xi$ , der von  $50$ – $500$   $\text{m/s}^2$  variiert wurde (vgl. 5.3.1).

Im zugehörigen Programmcode (siehe Code 5.1) ist ersichtlich, dass der Parameter  $\phi_b$  in 7 und der Parameter  $\xi$  in 10 Intervalle zur Simulation aufgeteilt werden, wobei die gegebene Anzahl an Variationen eines jeden variierten Modellparameters zur gleichmäßigen Verteilung zwischen Minimum und Maximum verwendet wird. Die daraus erhaltene Anzahl an Berechnungsdurchgängen ist das Produkt aller definierten Intervalle. Im gegenständlichen Fall bedeutet dies:  $7 \cdot 10 = 70$  Programmdurchläufe, in denen die Variation der genannten Parameter erfolgte.

In nachstehender Tabelle 5.2 sind die Voellmyparameter, die bei den einzelnen Modellrechnungen miteinander kombiniert wurden, aufgelistet:

**Tab. 5.2:** Intervalle der Voellmy Parameter zur Rückrechnung des Felssturzes Vals.

Parameter	1	2	3	4	5
$\phi_b$ [°]	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00
Parameter	6	7	8	9	10
$\phi_b$ [°]	30,00	35,00	-	-	-
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00

#### 5.3.2.1 Kennwerte

Zur Identifizierung der am besten passenden Voellmyparameter mit der größten Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung wurden folgende Kennwerte pro Berechnung (siehe Abschnitt 3.4) ausgewertet:

- True Positive (TP)
- True Negative (TN)
- False Positive (FP)
- False Negative (FN)
- Critical Success Index (CSI)
- Heidke Skill Score (HSS)
- Area under ROC curve (AUROC)
- Distance to perfect classification (D2PC)

Die Auswertung erfolgte jeweils für den Bereich der Ablagerungen (Index d: *deposition*) und für den durch den Felssturz beeinflussten Bereich (Index i: *impact*):

**Tab. 5.3:** Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter.

Bereich	Kennwerte							
	deposition	TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>
impact	TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>

### 5.3.2.2 Auswertung

#### Auswertung der Kennwerte hinsichtlich der Ablagerungen

Die Auswertung der Berechnungsdurchgänge für die in der Tabelle 5.3 angegebenen Kennwerte hinsichtlich der Ausbreitung der Ablagerungen (Runout) nach den jeweils besten erreichten Werten lieferte folgende Ergebnisse:

**Tab. 5.4:** Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich der Ablagerungen (*deposition area*).

Nr.	TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
3	6,622	76,937	6,397	10,045	0,287	0,377	0,660	0,608
4	7,627	79,969	3,364	9,040	0,381	0,496	0,709	0,544
6	8,939	81,589	1,744	7,727	0,486	0,608	0,758	0,464
69	7,597	82,094	1,240	9,070	0,424	0,548	0,720	0,544
70	7,022	81,848	1,485	9,645	0,387	0,508	0,702	0,579

#### Auswertung der Kennwerte hinsichtlich des beeinflussten Bereiches

Die Auswertung der Berechnungsdurchgänge für die in der Tabelle 5.3 angegebenen Kennwerte hinsichtlich des überstrichenen Bereiches nach den jeweils besten erreichten Werten lieferte folgende Ergebnisse:

**Tab. 5.5:** Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich des beeinflussten Bereiches (*impact area*).

Nr.	TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>
3	13,638	76,388	6,945	3,029	0,578	0,679	0,867	0,200
4	13,215	78,739	4,594	3,451	0,622	0,724	0,869	0,214
6	11,557	80,012	3,322	5,109	0,578	0,689	0,827	0,309
69	9,820	80,253	3,080	6,847	0,497	0,615	0,776	0,412
70	9,362	80,501	2,832	7,304	0,480	0,600	0,764	0,440

### Zusammenfassung der Auswertung

Die Auswertung der Kennwerte zur Parameterkalibrierung nach Tabelle 5.3 zeigte entsprechend den Tabellen 5.4 und 5.5, dass die Simulationsdurchläufe mit den Nummern 3, 4, 6, 69 und 70 die beste Übereinstimmung zwischen Rückrechnung und Beobachtung lieferten. Die verwendeten Materialkennwerte in der jeweils ausgeführten Berechnung lauten:

**Tab. 5.6:** Materialkennwerte mit der besten Übereinstimmung (best-fit Parameter).

Nr.	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\phi_i$ [°]	$\phi_b$ [°]	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
3	2350,00	30,00	15,00	50,00
4	2350,00	30,00	20,00	50,00
6	2350,00	30,00	30,00	50,00
69	2350,00	30,00	30,00	500,00
70	2350,00	30,00	35,00	500,00

### 5.3.3 Ergebnisse

#### 5.3.3.1 Parameterkalibrierung

##### Am besten passende Materialparameter

Die Simulationen zur Parameterkalibrierung ergaben für die Werte der Voellmyparameter ein  $\phi_b$  in Bereichen von 15°–35° und ein  $\xi$ , das entweder einem Wert von 50 m/s<sup>2</sup> oder 500 m/s<sup>2</sup> entspricht und damit sowohl der unteren als auch der oberen Grenze des Kalibrierungsbereiches gleicht. Das vorliegende Ergebnis für das Modell A der Fallstudie Vals ist deutlich weniger eindeutig interpretierbar als die Ergebnisse der Parameterkalibrierung innerhalb der Fallstudie Frank Slide (vgl. Kapitel 4.3).

Eine Analyse der Indizes TP<sub>d</sub>, TN<sub>d</sub>, FP<sub>d</sub>, FN<sub>d</sub>, CSI<sub>d</sub> sowie AUROC<sub>d</sub> nach den höchsten erreichten Werten identifizierte die Berechnungen mit den Nummern 6 und 69. Eine Auswertung nach dem Bereich der beobachteten Ablagerungen ergab demnach  $\phi_b = 30^\circ$  sowie  $\xi_1 = 50$  m/s<sup>2</sup> und  $\xi_2 = 500$  m/s<sup>2</sup>. Eine entsprechende Vorgehensweise nach den Indizes für den durch den Felssturz überstrichenen Bereich zeigte die größte Analogie von Simulation und Beobachtung bei den Berechnungen mit den Nummern 3, 4 und 6. Damit ergaben sich  $\phi_b \approx 15^\circ$ – $30^\circ$  und  $\xi = 50$  m/s<sup>2</sup>.

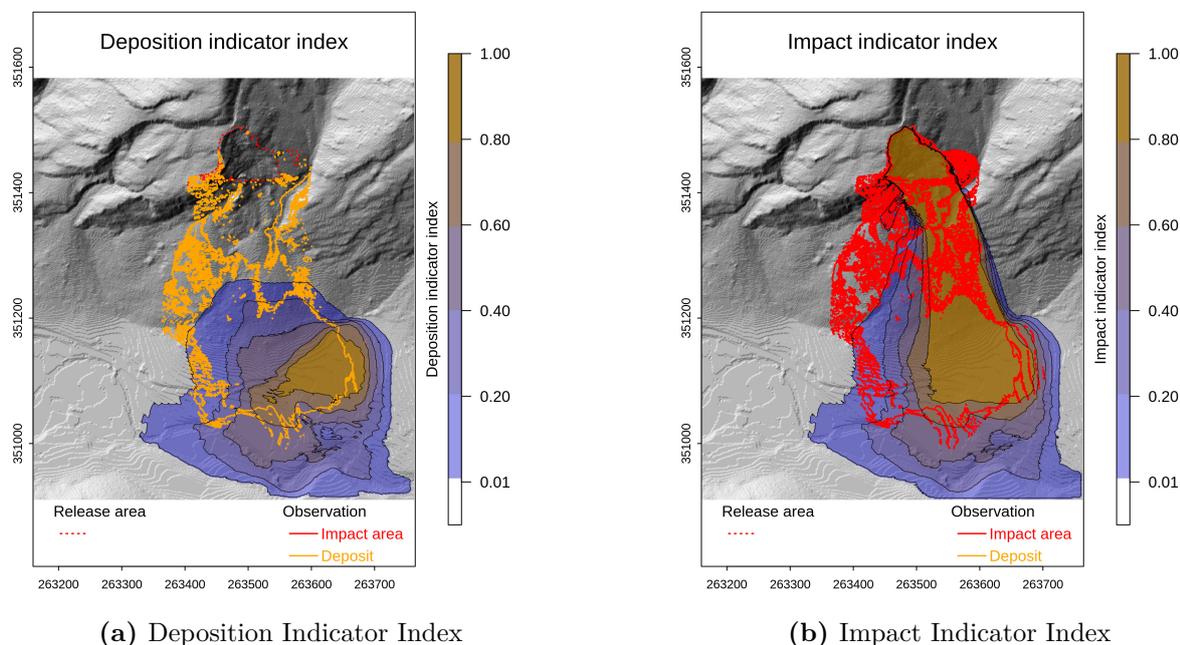
Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass aufgrund der beschriebenen Vorgehensweise zur Auswertung der Kalibrierungskriterien die unteren Wertebereiche des basalen Reibungswinkels ( $\phi_b < 15^\circ$ ) zur Identifizierung der Größenordnung, mit denen die beste Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung erreicht wurde, ausgeschlossen werden können. Der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  kann tendenziell in Bereichen von  $\phi_b \approx 30^\circ$  angesetzt werden (vgl. Tabelle 5.6).

In der vorliegenden Fallstudie Vals (Modell A) konnten die besten Übereinstimmungen von Simulation und Beobachtung bei der Verwendung folgender Materialkennwerte erreicht werden (vgl. vorausgehenden Abschnitt 5.3.2):

1. Dichte:  $\rho = 2350$  kg/m<sup>3</sup>
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 30^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 50$  m/s<sup>2</sup>

### Parameterindizes Deposition Indicator Index und Impact Indicator Index

Im Zuge der Parameterkalibrierung zur Rückrechnung des Ereignisses vom 24. Dezember 2017 werden durch die Visualisierung der Ergebnisse aus r.avaflow der Deposition Indicator Index (DII) und der Impact Indicator Index (III) dargestellt (siehe hierzu auch Abschnitt 3.4.1.3):



**Abb. 5.4:** (a) Darstellung des Deposition Indicator Index und (b) des Impact Indicator Index für den Fall Vals.

In obenstehender Abbildung 5.4 sind auf der Abszisse und Ordinate die Koordinaten des untersuchten Gebietes abgetragen. Zudem ist in grau die Hillshade-Darstellung des Untersuchungsgebietes, welche aufgrund des in GRASS GIS eingelesenen digitalen Höhenmodells der basalen Topographie von r.avaflow im Zuge der Visualisierung automatisch erstellt wird, zu erkennen.

In der Darstellung des Deposition Indicator Index sind zudem der Ausbruchsbereich, der in Form einer gestrichelten roten Konturlinie gekennzeichnet ist, und der Bereich der beobachteten Ablagerungen (durch eine durchgezogene orangene Konturlinie kenntlich gemacht) dargestellt (vgl. Abbildung 5.4a). Es ist zu erkennen, dass bis zu 60 % der Modelldurchgänge die Ausbreitung der Ablagerungen in Nord-Süd-Richtung und bis zu 20 % der Modelldurchgänge die seitliche Ausbreitung im westlichen Bereich überschätzen. Die Simulationen durchläufe zeigen außerdem ein deutlich zu erkennendes lokales Maximum der Ablagerungen im südöstlichen Teilgebiet des untersuchten Areals. Ablagerungen im Westen im unteren Teilbereich der beobachteten Ablagerungen werden von mindestens 20 % aller Simulationen authentisch wiedergegeben. Die unmittelbar nördlich des Ausbruchs beobachteten Ablagerungen werden hingegen nicht oder zumindest höchstens von 1 % aller Berechnungen ermittelt.

In der Darstellung des Impact Indicator Index ist ebenfalls der Abbruchbereich (rot gestrichelte Konturlinie) eingezeichnet. Die Grafik beinhaltet zudem den durch das Sturzereignis beobachteten überstrichenen Bereich (*impact area*), der durch eine rote durchgezogene Linie beschrieben ist (siehe Abbildung 5.4b). Der überstrichene Bereich wird im unmittelbaren Ausbruchsbereich sowie entlang des Fließpfades bis zum lokalen Maximum der Ablagerungen zutreffend beschrieben, wobei im Allgemeinen auch hier aufgrund der unzutreffenden Ermittlung des Runouts die Ausbreitung

in Nord-Süd-Richtung überschätzt wird. Der Teilbereich südwestlich des Abbruchgebietes bleibt durch den östlich orientierten Verlauf des simulierten Fließpfades unbeeinflusst.

### Kennwerte der Parameterkalibrierung hinsichtlich des Ablagerungsbereiches

Die im Abschnitt 5.3.2 im Rahmen der Kalibrierung der Modellparameter entsprechend der Tabelle 5.4 angegebenen Kennwerte CSI, HSS, D2PC und AUROC sind in Abbildung 5.5 dargestellt. In dieser Abbildung entspricht der Parameter 5 auf der Abszisse dem basalen Reibungswinkel  $\phi_b$ , der Parameter 6, welcher auf der Ordinate aufgetragen ist, stellt den Turbulenzkoeffizienten  $\xi$  dar. Der Wert  $AUROC_d$  liegt im Mittel aller Simulationen bei  $AUROC_d = 0,822$ .

### Kennwerte der Parameterkalibrierung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches

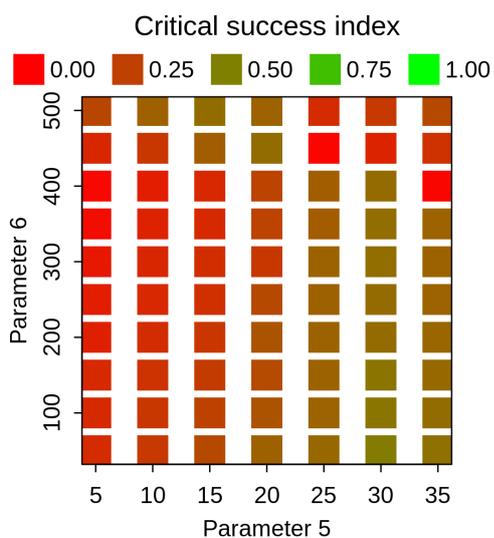
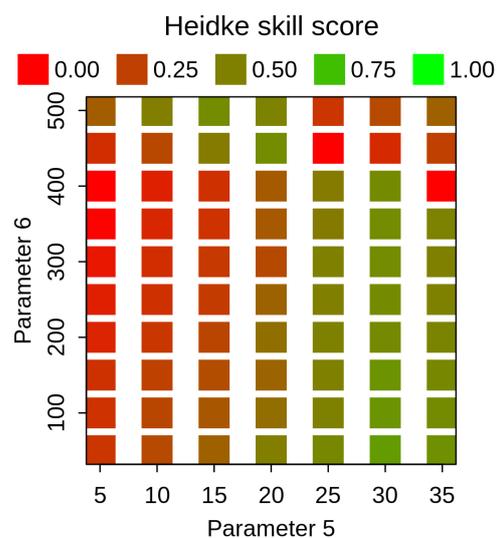
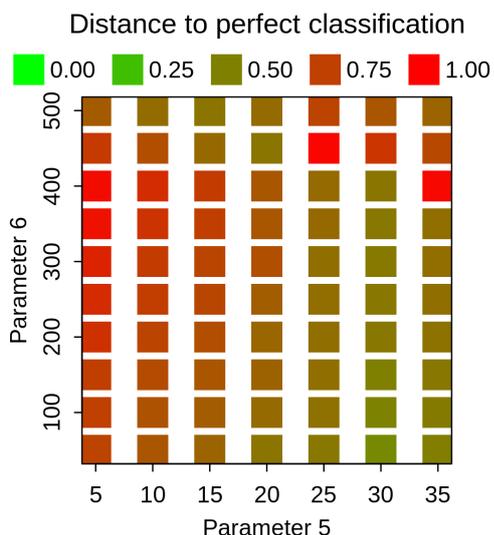
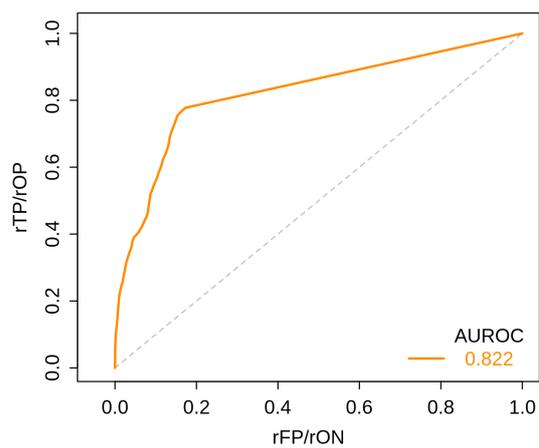
Die im Abschnitt 5.3.2 im Rahmen der Kalibrierung der Voellmyparameter basaler Reibungswinkel  $\phi_b$  sowie Turbulenzkoeffizient  $\xi$  entsprechend der Tabelle 5.5 angegebenen Kennwerte CSI, HSS, D2PC und AUROC sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Wie im vorherigen Unterabschnitt bedeuten auch hier in der Abbildung 5.6 die Parameter 5 und 6 die Parameter  $\phi_b$  und  $\xi$  des Voelly-Salm Modells. Die *Area under ROC curve* liegt im Falle der Auswertung für die *impact area* bei  $AUROC_i = 0,859$ .

### Maximale Höhen der Ablagerungen und maximale Fließgeschwindigkeiten

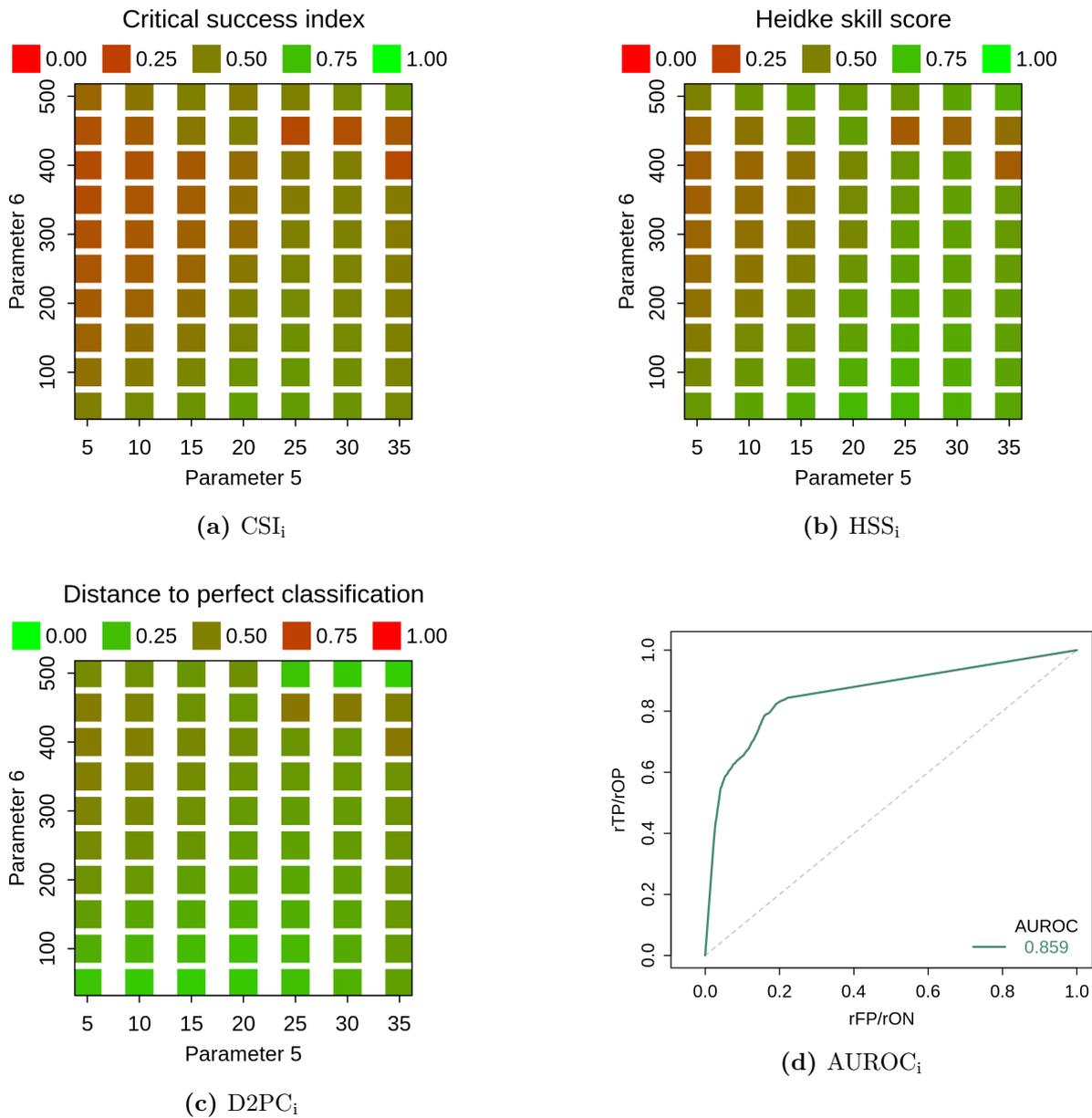
Die Auswertung der maximalen Ablagerungshöhen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten für die best-fit Parameter (vgl. hierzu Tabelle 5.6) ist in nachstehender Tabelle aufgelistet:

**Tab. 5.7:** Maximale Ablagerungshöhen  $d_{\max}$  und maximale Fließgeschwindigkeiten  $v_{\max}$  der best-fit Parameter.

Nr.	$d_{\max}$ [m]	$v_{\max}$ [m/s]	$\phi_b$ [°]	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	CSI <sub>d</sub>	CSI <sub>i</sub>
3	5,55	22,33	15,00	50,00	0,287	0,578
4	6,54	21,49	20,00	50,00	0,381	0,622
6	7,05	19,52	30,00	50,00	0,486	0,578
69	7,97	34,00	30,00	500,00	0,424	0,497
70	8,86	32,18	35,00	500,00	0,387	0,480

(a) CSI<sub>d</sub>(b) HSS<sub>d</sub>(c) D2PC<sub>d</sub>(d) AUROC<sub>d</sub>

**Abb. 5.5:** (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich der beobachteten Ablagerungen. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  [m/s<sup>2</sup>].



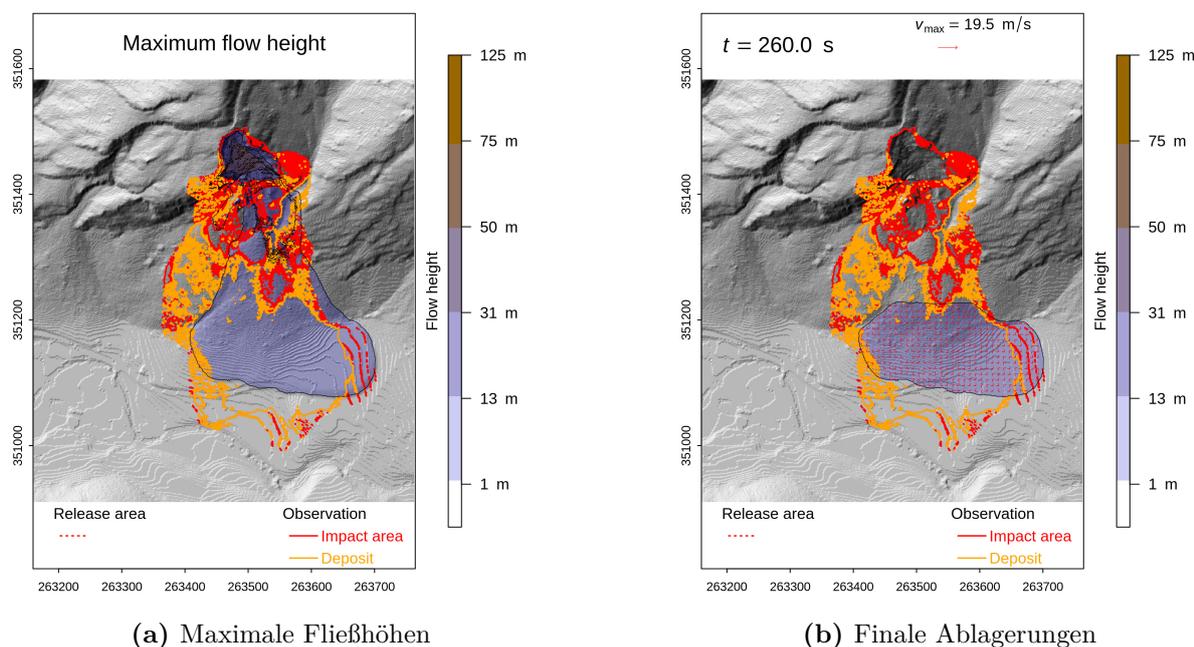
**Abb. 5.6:** (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  [ $^\circ$ ], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  [ $\text{m/s}^2$ ].

### 5.3.3.2 Fließhöhen, Ablagerungshöhen und Fließgeschwindigkeiten

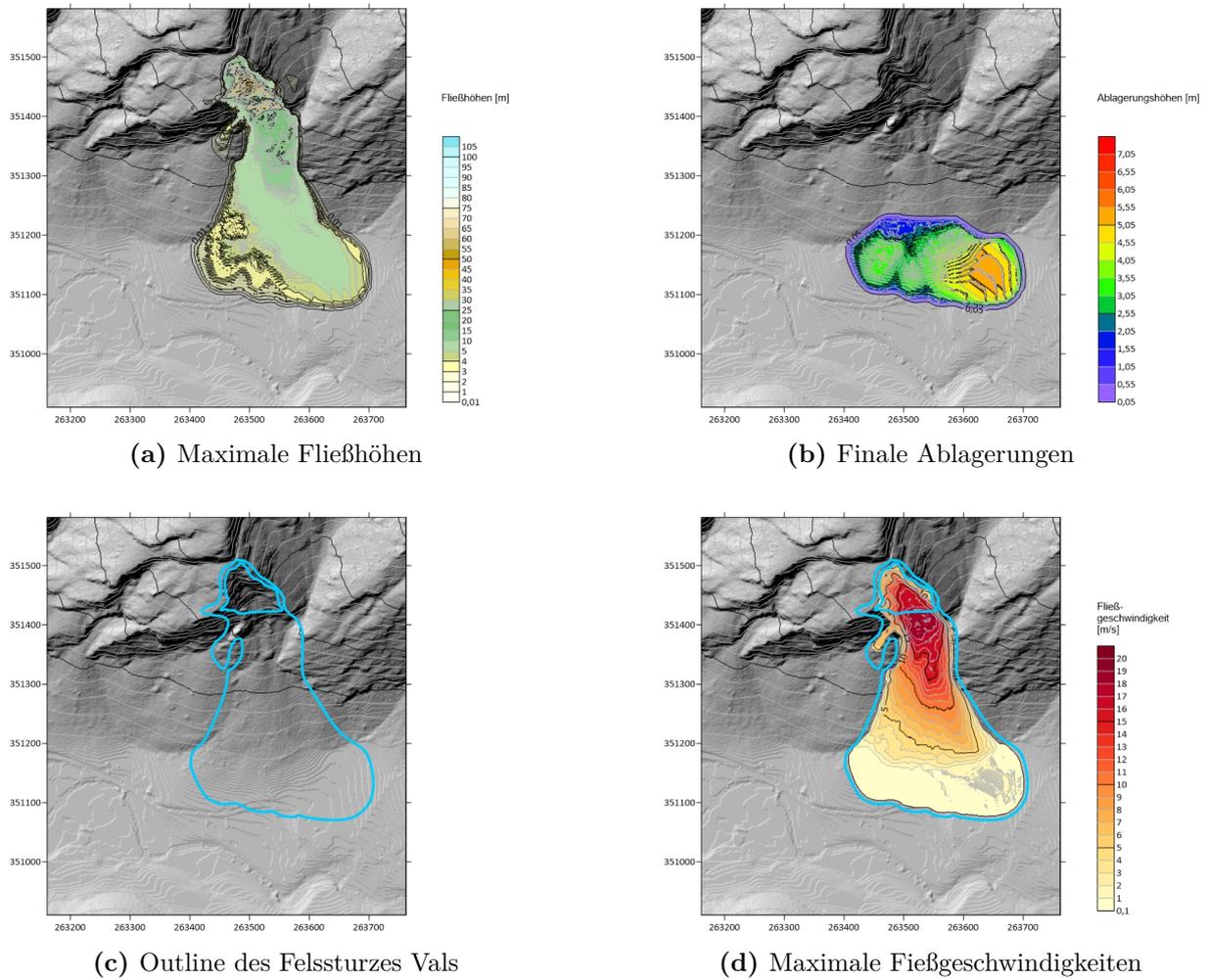
Zur Auswertung der maximalen Fließhöhen, der finalen Ablagerungshöhen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten erfolgte separat von den vorherigen Simulationen zur Parameterkalibrierung eine Rückrechnung des Ereignisses vom 24. Dezember 2017 unter Verwendung der am besten passenden (best-fit) Materialkennwerte (vgl. vorausgehenden Abschnitt 5.3.3.1):

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 30^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$

Die Ergebnisse dieser Rückrechnung sind in nachstehenden Abbildungen 5.7 und 5.8 dargestellt, der verwendete Programmcode ist in Code 5.2 beschrieben. Abbildung 5.7a zeigt die maximalen Fließhöhen beginnend im Ausbruchsbereich (rot gestrichelte Konturlinie) entlang des Fließpfades, Abbildung 5.7b die Ablagerungen der Felsmassen nach Simulationseende. Hierbei ist festzuhalten, dass r.avaflow die Simulation durch Angabe der Stoppbedingung (Einstellung `funcctrl`) selbstständig beendet hat. Das somit berechnete Ende des Ereignisses liegt bei  $t = 260$  Sekunden. Die maximale Fließgeschwindigkeit beträgt  $v_{\max} = 19,5 \text{ m/s}$  (siehe Abbildung 5.7b oben rechts und Abbildung 5.8d).



**Abb. 5.7:** (a) Darstellung der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades und (b) der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 260 \text{ s}$ ) für  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$ . Auswertungen mittels r.avaflow.



**Abb. 5.8:** (a) Konturplot der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades, (b) Konturplot der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 260$  s), (c) Outline des Felssturzes Vals nach der Rückrechnung des Modells A und (d) maximale Fließgeschwindigkeiten. Rückrechnung mit den best-fit Voellmyparametern  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 50$  m/s<sup>2</sup>. Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.

**Program Code 5.2:** Programmcode zur Rückrechnung des Felssturzes Vals mit den Voellyparametern  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$ .

---

```
1 # Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24.12.2017 in r.avaflow
2 # mit den Voellmyparametern phi_b=30 und xi=50: Modell A
3
4 # Definition der Inputparameter
5
6 cellsize="1"
7 funcctrl="1,1,1,0,0,1"
8 elevation="vals_elevation_rau"
9 hrelease="vals_hrelease"
10 hdeposit="vals_depositionarea"
11 impactarea="vals_impactarea"
12 imparam="1.0,10000,10000,0.01"
13
14 # Start der Anwendung r.avaflow
15 # Einfache Modellsimulation: Voellmy-Salm Modell
16 r.avaflow -e -v prefix=vals_m-a_30_50 model=1 limiter=1 funcctrl="$funcctrl
    " elevation="$elevation" hrelease="$hrelease" hdeposit="$hdeposit"
    impactarea="$impactarea" flowparam=2350,30,30,50,0,0,500 imparam="
    $imparam" tint=5 tstop=300
```

---

## 5.4 Modell B

### 5.4.1 Modellaufbau

#### 5.4.1.1 Input-Rasterkarten

Das Modell in `r.avaflow` setzt sich, wie in Kapitel 3 beschrieben, aus verschiedenen Rasterkarten zusammen, welche zuerst in GRASS GIS hinterlegt werden müssen. Im Fall Vals (Modell B) wurden folgende Rasterkarten verwendet:

1. Digitales Höhenmodell der basalen Topographie des untersuchten Bereiches mit einer Auflösung von 1 m, wobei die Höhen durch lineare Interpolation mittels des Programms `CloudCompare` geglättet wurden.
2. Digitales Höhenmodell des Ausbruchsbereiches, ebenfalls in einer Auflösung von 1 m.
3. Rasterkarte des Ablagerungsbereiches.
4. Rasterkarte des beeinflussten bzw. überstrichenen Bereiches unter Berücksichtigung des Abbruchs und der Ablagerungen.

#### 5.4.1.2 Materialkennwerte

##### Dichte

Für die Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017 wurde entsprechend dem Modell A (Abschnitt 5.3) sowie der in Abschnitt 5.1 aufgelisteten und im Untersuchungsbereich anzutreffenden Gesteine eine mittlere Dichte von  $2350 \text{ kg/m}^3$  angenommen (FU Berlin, 2019: Gesteinsdichte).

##### Interner Reibungswinkel

Der interne Reibungswinkel wurde in Analogie zu Modell A mit  $30^\circ$  angenommen.

##### Voellmyparameter

Die Rückrechnung der Ereignisse in `r.avaflow` erfolgte anhand einer Simulation mit mehreren Modelldurchgängen, wobei im Hinblick auf die Parameterkalibrierung die Parameter des Voellmy-Salm Modells ( $\phi_b$ ,  $\xi$ ) variiert wurden. Um die Modelle A und B untereinander vergleichen zu können, wurden im Modell B entsprechend dem Modell A Bereiche von  $\phi_b = 5^\circ\text{--}35^\circ$  und  $\xi = 50\text{--}500 \text{ m/s}^2$  zur Parameterkalibrierung im Zuge mehrerer Modelldurchläufe herangezogen.

#### 5.4.1.3 Modellparameter und Programmcode

##### Modellparameter

Die Modellparameter (angegeben in der Auflistung `flowparam`, vgl. Code 5.3) setzen sich folgendermaßen zusammen:

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 5^\circ\text{--}35^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 50\text{--}500 \text{ m/s}^2$
5. Erzeugung zufälliger kinetischer Energie: 0
6. Abbau der zufälligen kinetischen Energie: 0

### 7. Zufällige kinetische Energie zur Anpassung der Reibungskoeffizienten: 500

Die maximale Berechnungsdauer wurde mit 300 Sekunden festgelegt.

#### Programmcode

Im Folgenden ist der Programmcode von r.avaflow für die Rückrechnung des Felssturzes Vals (Modell B) vom 24. Dezember 2017 angegeben. r.avaflow wird durch Aufrufen des unten stehenden Shell Skripts innerhalb der geöffneten GRASS GIS Sitzung, in welcher die im Skript angegebenen Rasterkarten entsprechend der dort referenzierten Benennungen geladen sind, gestartet.

#### Program Code 5.3: Programmcode zur Rückrechnung des Felssturzes Vals.

---

```

1 # Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24.12.2017 in r.avaflow
2 # Modell B
3 # Definition der Inputparameter
4 cellsize="1"
5 funcctrl="1,1,1,0,0,1"
6 elevation="vals_elevation_glatt"
7 hrelease="vals_hrelease"
8 hdeposit="vals_depositionarea"
9 impactarea="vals_impactarea"
10 imparam="1.0,10000,10000,0.01"
11
12 # Start der Anwendung r.avaflow
13 # Multiple Simulationen (Flag -m): Voellmy-Salm Modell
14 r.avaflow -e -m -v prefix=vals_m-b_m cellsize="$cellsize" model=1 limiter=1
    funcctrl="$funcctrl" elevation="$elevation" hrelease="$hrelease"
    hdeposit="$hdeposit" impactarea="$impactarea" cores=12 sampling=0
    flowparam=2350,2350,0,30,30,0,5,35,7,50,500,10,0,0,0,0,0,0,500,500,0
    imparam="$imparam" tint=300 tstop=300

```

---

## 5.4.2 Kalibrierung der Modellparameter

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden im Zuge der Rückrechnung des Felssturzes Vals die Modellparameter des Voellmy-Salm Modells variiert und durch den Vergleich der jeweils berechneten Ablagerungen mit den beobachteten Ablagerungen die am besten passende Parameterkombination ermittelt. Die Parameter der Kalibration sind

1. der basale Reibungswinkel  $\phi_b$ , welcher im Bereich von  $5^\circ$ – $35^\circ$  variiert wurde (vgl. 5.4.1), und
2. der Turbulenzkoeffizient  $\xi$ , der von  $50$ – $500$   $\text{m/s}^2$  variiert wurde (vgl. 5.4.1).

Im zugehörigen Programmcode (siehe Code 5.3) ist ersichtlich, dass der Parameter  $\phi_b$  in 7 und der Parameter  $\xi$  in 10 Intervalle zur Simulation aufgeteilt werden, wobei die gegebene Anzahl an Variationen eines jeden variierten Modellparameters zur gleichmäßigen Verteilung zwischen Minimum und Maximum verwendet wird. Die daraus erhaltene Anzahl an Berechnungsdurchgängen ist das Produkt aller definierten Intervalle. Im gegenständlichen Fall bedeutet dies:  $7 \cdot 10 = 70$  Programmdurchläufe, in denen die Variation der genannten Parameter erfolgte.

In nachstehender Tabelle 5.8 sind die Voellmyparameter, die bei den einzelnen Modellrechnungen miteinander kombiniert wurden, aufgelistet:

**Tab. 5.8:** Intervalle der Voellmy Parameter zur Rückrechnung des Felssturzes Vals.

Parameter	1	2	3	4	5
$\phi_b$ [°]	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00
Parameter	6	7	8	9	10
$\phi_b$ [°]	30,00	35,00	-	-	-
$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00

### 5.4.2.1 Kennwerte

Zur Identifizierung der am besten passenden Voellmyparameter mit der größten Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung wurden folgende Kennwerte pro Berechnung (siehe Abschnitt 3.4) ausgewertet:

- True Positive (TP)
- True Negative (TN)
- False Positive (FP)
- False Negative (FN)
- Critical Success Index (CSI)
- Heidke Skill Score (HSS)
- Area under ROC curve (AUROC)
- Distance to perfect classification (D2PC)

Die Auswertung erfolgte jeweils für den Bereich der Ablagerungen (Index d: *deposition*) und für den durch den Felssturz beeinflussten Bereich (Index i: *impact*):

**Tab. 5.9:** Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter.

Bereich	Kennwerte							
deposition	TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
impact	TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>

### 5.4.2.2 Auswertung

#### Auswertung der Kennwerte hinsichtlich der Ablagerungen

Die Auswertung der Berechnungsdurchgänge für die in der Tabelle 5.9 angegebenen Kennwerte hinsichtlich der Ausbreitung der Ablagerungen (Runout) nach den jeweils besten erreichten Werten lieferte folgende Ergebnisse:

**Tab. 5.10:** Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich der Ablagerungen (*deposition area*).

Nr.	TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
1	4,560	74,120	9,213	12,107	0,176	0,218	0,582	0,735
3	7,116	76,740	6,593	9,550	0,306	0,399	0,674	0,578
19	8,141	81,056	2,277	8,526	0,430	0,551	0,731	0,512
27	9,692	81,272	2,062	6,975	0,517	0,637	0,778	0,419
55	9,592	81,526	1,807	7,074	0,519	0,639	0,777	0,425
63	7,942	81,068	2,265	8,725	0,419	0,540	0,725	0,524
69	8,739	81,540	1,794	7,927	0,473	0,596	0,751	0,476

#### Auswertung der Kennwerte hinsichtlich des beeinflussten Bereiches

Die Auswertung der Berechnungsdurchgänge für die in der Tabelle 5.9 angegebenen Kennwerte hinsichtlich des überstrichenen Bereiches nach den jeweils besten erreichten Werten lieferte folgende Ergebnisse:

**Tab. 5.11:** Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich des beeinflussten Bereiches (*impact area*).

Nr.	TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>
1	15,431	71,858	11,475	1,236	0,548	0,637	0,894	0,156
3	15,414	74,544	8,790	1,253	0,605	0,697	0,910	0,130
19	14,041	77,955	5,378	2,626	0,637	0,734	0,889	0,170
27	13,070	78,586	4,747	3,597	0,610	0,714	0,864	0,223
55	12,814	78,603	4,730	3,852	0,599	0,704	0,856	0,238
63	10,754	79,441	3,892	5,912	0,523	0,638	0,799	0,358
69	12,115	78,569	4,764	4,551	0,565	0,674	0,835	0,279

### Zusammenfassung der Auswertung

Die Auswertung der Kennwerte zur Parameterkalibrierung nach Tabelle 5.9 zeigte entsprechend den Tabellen 5.10 und 5.11, dass die Simulationsdurchläufe mit den Nummern 1, 3, 19, 27, 55, 63 und 69 die beste Übereinstimmung zwischen Rückrechnung und Beobachtung lieferten. Die verwendeten Materialkennwerte in der jeweils ausgeführten Berechnung lauten:

**Tab. 5.12:** Materialkennwerte mit der besten Übereinstimmung (best-fit Parameter).

Nr.	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\phi_i$ [°]	$\phi_b$ [°]	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]
1	2350,00	30,00	5,00	50,00
3	2350,00	30,00	15,00	50,00
19	2350,00	30,00	25,00	150,00
27	2350,00	30,00	30,00	200,00
55	2350,00	30,00	30,00	400,00
63	2350,00	30,00	35,00	450,00
69	2350,00	30,00	30,00	500,00

## 5.4.3 Ergebnisse

### 5.4.3.1 Parameterkalibrierung

#### Am besten passende Materialparameter

Maßgebend bei der Beschreibung der erreichten Simulationsgenauigkeit sind die Indizes CSI und AUROC, welche nach Formetta et al. (2016) sowie Mergili et al. (2017) ermittelt werden und in Abschnitt 3.4.1.3 erläutert sind. Eine Auswertung der Tabelle 5.10 nach dem CSI für den Ablagerungsbereich ergab  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ , eine Auswertung der Tabelle 5.11 nach dem CSI für den überstrichenen Bereich  $\phi_b = 25^\circ$  und  $\xi = 150 \text{ m/s}^2$ . Damit lieferten die Berechnungen mit den Nummern 19 und 55 hinsichtlich des CSI die beste Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung. Die Spannbreite des basalen Reibungswinkels ( $\phi_b \approx 25^\circ\text{--}30^\circ$ ) ist deutlich geringer als jene des Turbulenzkoeffizienten ( $\xi = 150 - 400 \text{ m/s}^2$ ).

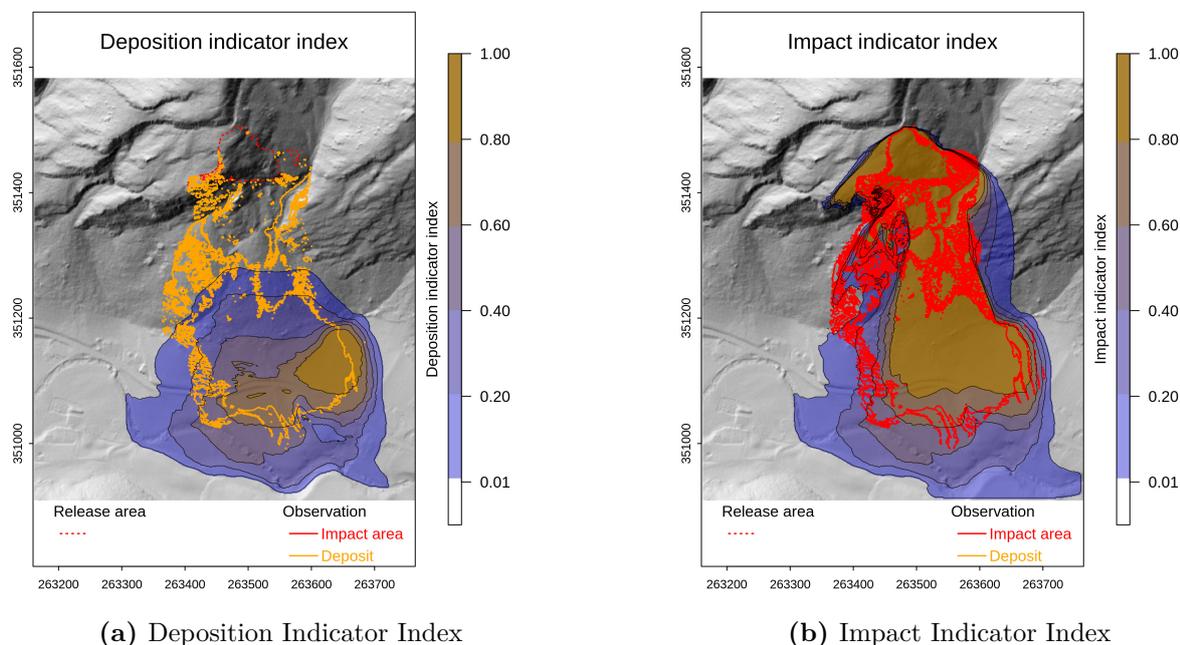
#### Identifizierung eines konkreten Wertepaares $\phi_b$ und $\xi$

Eine Gegenüberstellung von  $\text{CSI}_i^{19}$  und  $\text{AUROC}_i^{19}$  mit  $\text{CSI}_i^{55}$  und  $\text{AUROC}_i^{55}$  identifiziert in Verbindung mit  $\text{CSI}_d^{55}$  und  $\text{AUROC}_d^{55}$  bei Vergleich mit Tabelle 5.12 einen basalen Reibungswinkel  $\phi_b = 30^\circ$  und einen Turbulenzkoeffizienten  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ . In der vorliegenden Fallstudie Vals (Modell B) konnten somit die besten Übereinstimmungen von Simulation und Beobachtung bei der Verwendung folgender Materialkennwerte erreicht werden (vgl. vorausgehenden Abschnitt 5.4.2):

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 30^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$

### Parameterindizes Deposition Indicator Index und Impact Indicator Index

Im Zuge der Rückrechnung des Ereignisses vom 24. Dezember 2017 werden durch die Visualisierung der Ergebnisse in r.avaflow der Deposition Indicator Index (DII) und der Impact Indicator Index (III) dargestellt:



**Abb. 5.9:** (a) Darstellung des Deposition Indicator Index und (b) des Impact Indicator Index für den Fall Vals.

In obenstehender Abbildung 5.9 sind auf der Abszisse und Ordinate die Koordinaten des untersuchten Gebietes abgetragen. Zudem ist in grau die Hillshade-Darstellung des Untersuchungsgebietes, welche aufgrund des in GRASS GIS eingelesenen digitalen Höhenmodells der basalen Topographie von r.avaflow im Zuge der Visualisierung automatisch erstellt wird, zu erkennen.

In der Darstellung des Deposition Indicator Index sind zudem der Ausbruchsbereich, der in Form einer gestrichelten roten Konturlinie gekennzeichnet ist, und der Bereich der beobachteten Ablagerungen (durch eine durchgezogene orangene Konturlinie kenntlich gemacht) dargestellt (vgl. Abbildung 5.9a). Es ist zu erkennen, dass bei bis zu 60 % der Modelldurchgänge die Ablagerungen im südlichen Teil des untersuchten Gebietes überschätzt werden. Auch die seitliche Ausbreitung in östlicher und westlicher Richtung wird teils deutlich überschätzt, wobei die Ablagerungen im Osten augenscheinlich akkurater wiedergegeben werden. Innerhalb der ersten Hälfte der Rutschungslänge werden keine Ablagerungen simuliert, obwohl in diesen Bereichen (nördliches Gebiet) abgelagerte Materialien dokumentiert sind. Es lässt sich in mindestens 80 % der Simulationen ein lokales Maximum im südöstlichen Bereich erkennen.

In der Darstellung des Impact Indicator Index ist ebenfalls der Abbruchbereich (rot gestrichelte Konturlinie) eingezeichnet. Die Grafik beinhaltet zudem den durch das Sturzereignis beobachteten überstrichenen Bereich (*impact area*), der durch eine rote durchgezogene Linie beschrieben ist (siehe Abbildung 5.9b). Ein großer Anteil an Simulationen bildet den Fließpfad korrekt ab, was durch den hellbraunen Bereich in Abbildung 5.9b ersichtlich ist. Man erkennt, dass sich die abgleitenden Massen unmittelbar im Ausbruchsbereich in einen südlich bzw. südöstlich abrutschenden Teil und in einen westlich bis südwestlich bewegendem Teil gliedern. Im Allgemeinen

wird der durch das Ereignis beeinflusste Bereich im Süden deutlich überschätzt, die seitliche Beeinflussung wird im östlichen Teilgebiet in guter Näherung beschrieben, obwohl bis zu 20 % der Simulationen diesen Bereich ebenfalls überschätzen. Der westliche Teil der *Impact Area* wird ab dem Ausbruchsbereich bis zu dem Bereich, der in etwa der halben Rutschungslänge entspricht, von mindestens 20 % der Berechnungsdurchgänge treffend beschrieben.

#### **Kennwerte der Parameterkalibrierung hinsichtlich des Ablagerungsbereiches**

Die im Abschnitt 5.4.2 im Rahmen der Kalibrierung der Voellmyparameter  $\phi_b$  sowie  $\xi$  entsprechend der Tabelle 5.10 angegebenen Kennwerte CSI, HSS, D2PC und AUROC sind in Abbildung 5.10 dargestellt. In dieser Abbildung entspricht der Parameter 5 auf der Abszisse dem basalen Reibungswinkel  $\phi_b$ , der Parameter 6, welcher auf der Ordinate aufgetragen ist, stellt den Turbulenzkoeffizienten  $\xi$  dar. Der Wert  $AUROC_d$  liegt im Mittel aller Simulationen bei  $AUROC_d = 0,858$ .

#### **Kennwerte der Parameterkalibrierung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches**

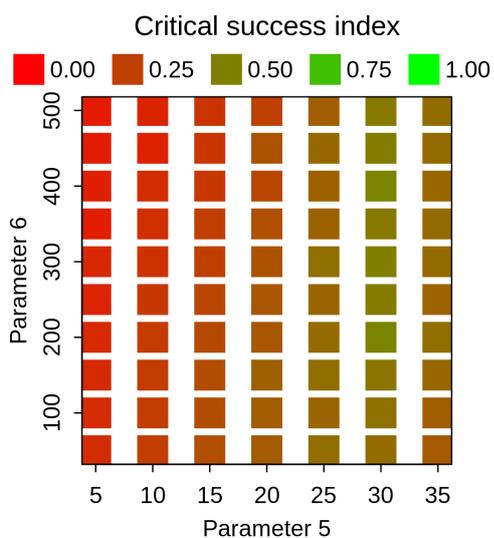
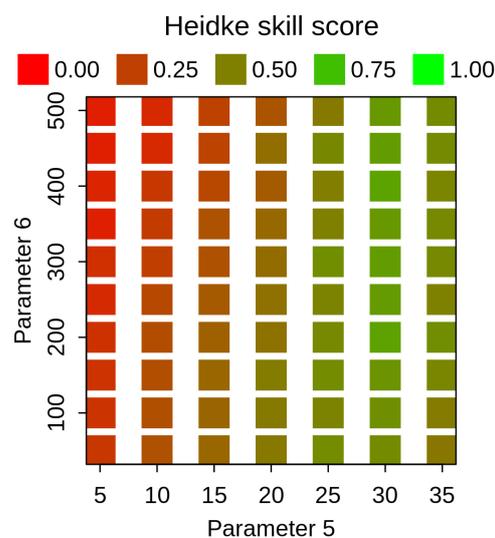
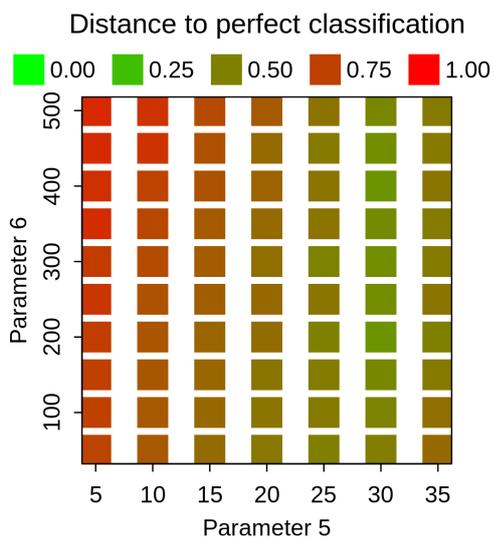
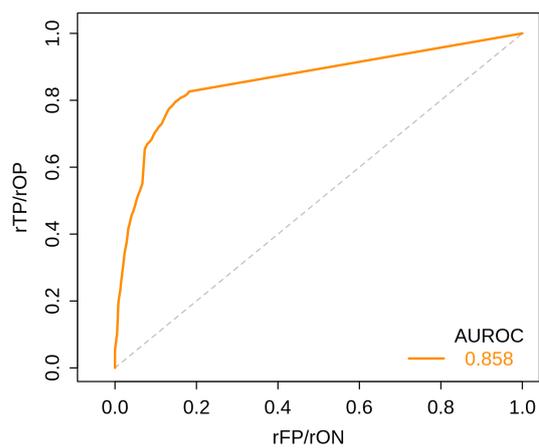
Die im Abschnitt 5.4.2 im Rahmen der Kalibrierung der Voellmyparameter  $\phi_b$  sowie  $\xi$  entsprechend der Tabelle 5.10 angegebenen Kennwerte CSI, HSS, D2PC und AUROC sind in Abbildung 5.11 dargestellt. Wie im vorherigen Unterabschnitt bedeuten auch hier in der Abbildung 5.11 die Parameter 5 und 6 die Parameter  $\phi_b$  und  $\xi$  des Voelly-Salm Modells. Die *Area under ROC curve* liegt in diesem Fall bei  $AUROC_i = 0,934$ .

#### **Maximale Höhen der Ablagerungen und maximale Fließgeschwindigkeiten**

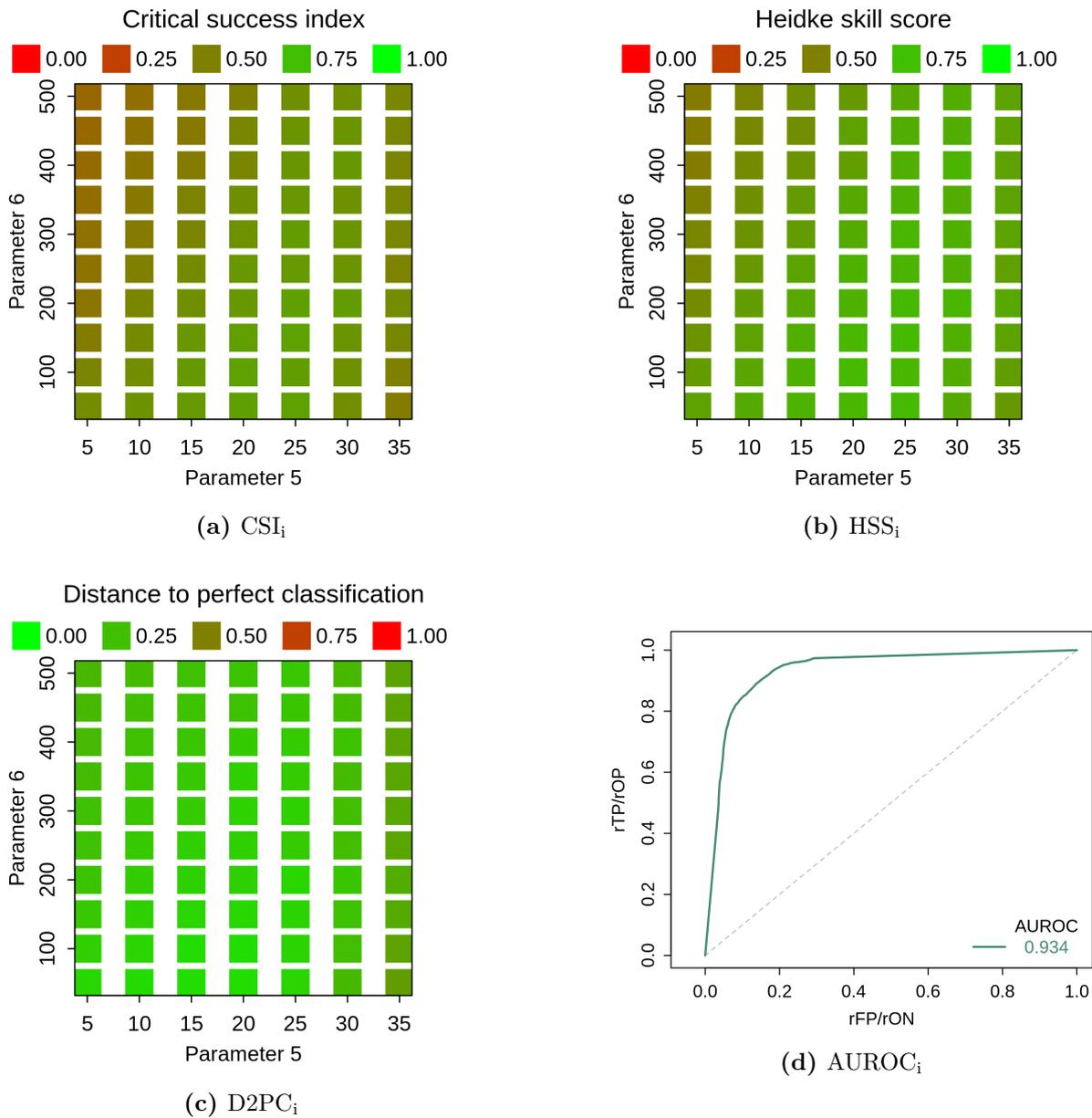
Die Auswertung der maximalen Ablagerungshöhen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten für die best-fit Parameter (vgl. hierzu Tabelle 5.12) ist in nachstehender Tabelle aufgelistet:

**Tab. 5.13:** Maximale Ablagerungshöhen  $d_{\max}$  und maximale Fließgeschwindigkeiten  $v_{\max}$  der best-fit Parameter.

Nr.	$d_{\max}$ [m]	$v_{\max}$ [m/s]	$\phi_b$ [°]	$\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]	CSI <sub>d</sub>	CSI <sub>i</sub>
1	6,60	24,01	5,00	50,00	0,176	0,548
3	4,07	22,56	15,00	50,00	0,306	0,605
19	8,22	29,21	25,00	150,00	0,430	0,637
27	5,62	29,78	30,00	200,00	0,517	0,610
55	6,16	35,82	30,00	400,00	0,519	0,599
63	5,99	32,74	35,00	450,00	0,419	0,523
69	6,29	35,07	30,00	500,00	0,473	0,565

(a) CSI<sub>d</sub>(b) HSS<sub>d</sub>(c) D2PC<sub>d</sub>(d) AUROC<sub>d</sub>

**Abb. 5.10:** (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich der beobachteten Ablagerungen. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  [m/s<sup>2</sup>].



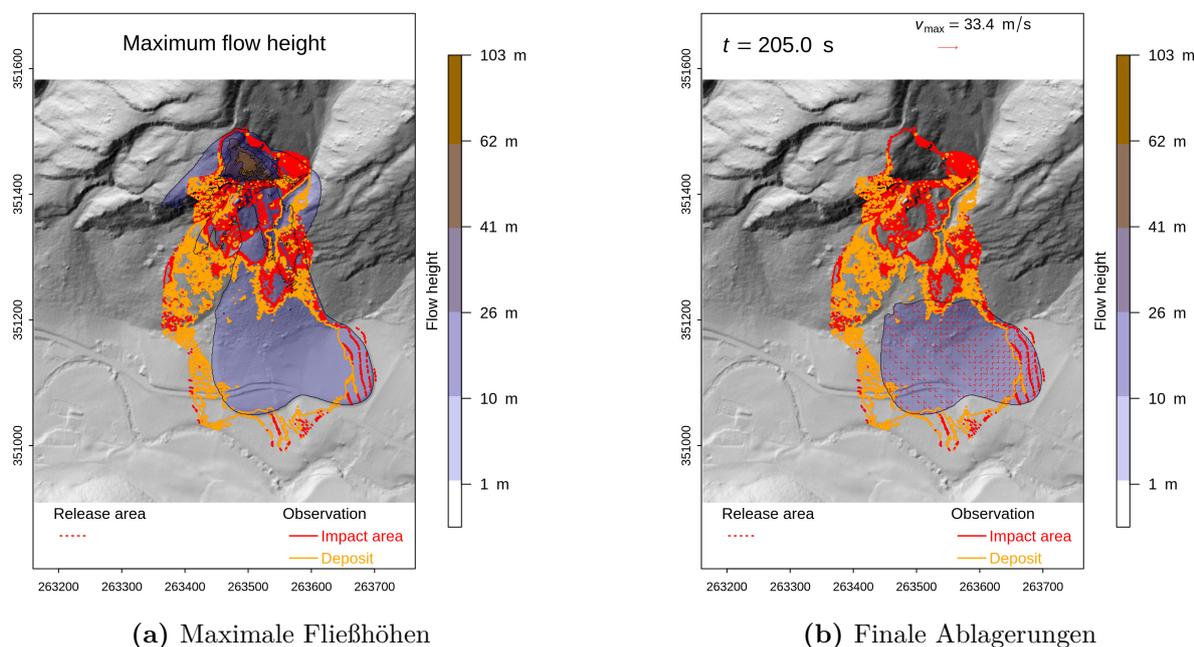
**Abb. 5.11:** (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel  $\phi_b$  [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient  $\xi$  [m/s<sup>2</sup>].

### 5.4.3.2 Fließhöhen, Ablagerungshöhen und Fließgeschwindigkeiten

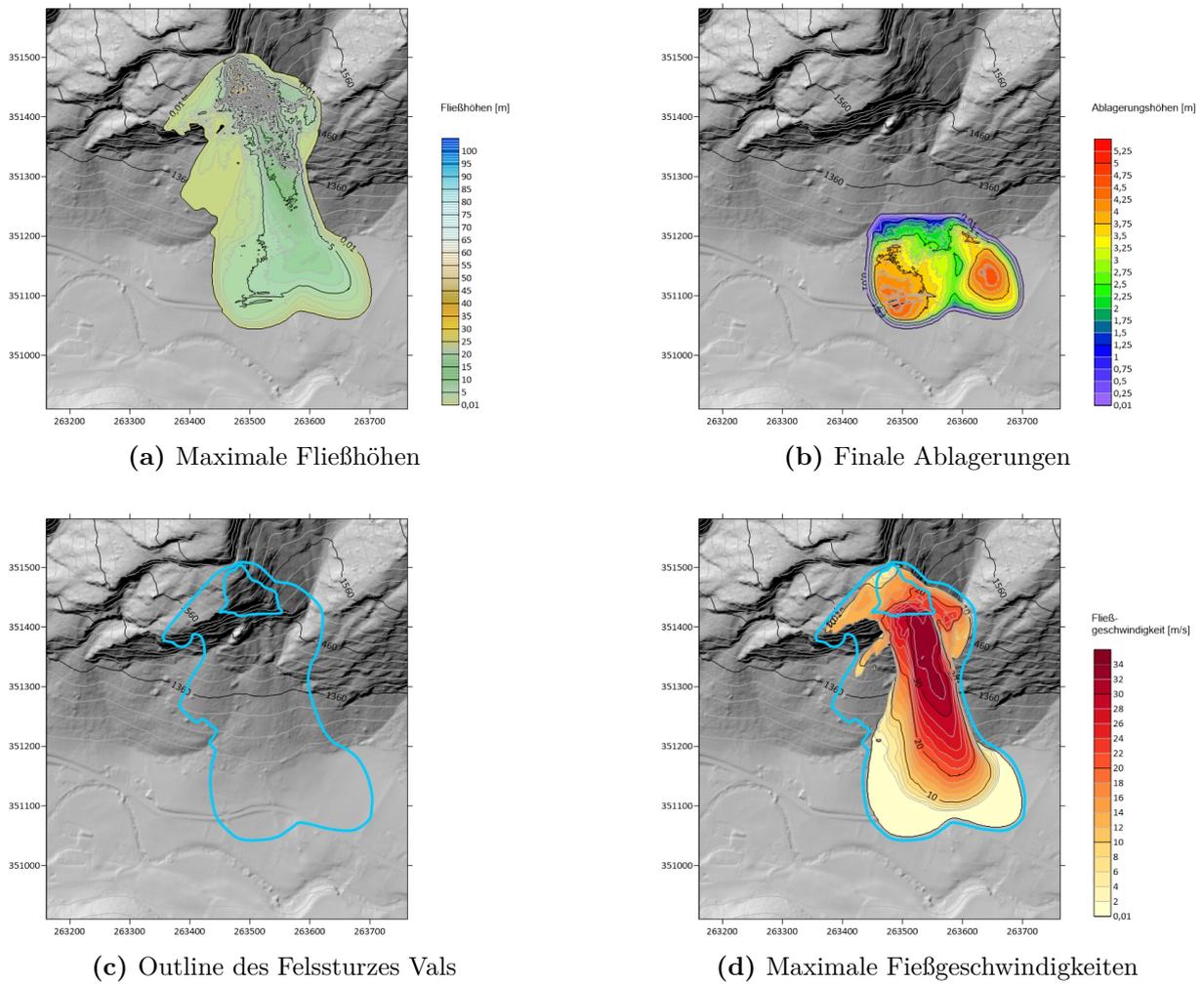
Zur Auswertung der maximalen Fließhöhen, der finalen Ablagerungshöhen und der maximalen Fließgeschwindigkeiten erfolgte separat von den vorherigen Simulationen zur Parameterkalibrierung eine Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017 unter Verwendung der am besten passenden (best-fit) Materialkennwerte (vgl. vorausgehenden Abschnitt 5.4.3.1):

1. Dichte:  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$
2. Interner Reibungswinkel:  $\phi_i = 30^\circ$
3. Basaler Reibungswinkel:  $\phi_b = 30^\circ$
4. Turbulenzkoeffizient:  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$

Die Ergebnisse dieser Rückrechnung sind in nachstehenden Abbildungen 5.12 und 5.13 dargestellt, der verwendete Programmcode ist in Code 5.4 beschrieben. Abbildung 5.12a zeigt die maximalen Fließhöhen beginnend im Ausbruchsbereich (rot gestrichelter Bereich) entlang des Fließpfades, Abbildung 5.12b die Ablagerungen der Felsmassen nach Simulationseende. Hierbei ist festzuhalten, dass r.avafLOW die Simulation durch Angabe der Stoppbedingung (Einstellung `funcctrl`) selbstständig beendet hat. Das somit berechnete Ende des Ereignisses liegt bei  $t = 205$  Sekunden. Die maximale Fließgeschwindigkeit wird mit  $v_{\max} = 33,4 \text{ m/s}$  berechnet (siehe Abbildung 5.12b oben rechts und Abbildung 5.13d).



**Abb. 5.12:** (a) Darstellung der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades und (b) der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 205 \text{ s}$ ) für  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ . Auswertungen mittels r.avafLOW.



**Abb. 5.13:** (a) Konturplot der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades, (b) Konturplot der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 205$  s), (c) Outline des Felssturzes Vals nach der Rückrechnung des Modells B und (d) maximale Fließgeschwindigkeiten. Rückrechnung mit den best-fit Voellmyparametern  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400$  m/s<sup>2</sup>. Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.

**Program Code 5.4:** Programmcode zur Rückrechnung des Felssturzes Vals mit den Voellyparametern  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ .

---

```
1 # Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24.12.2017 in r.avaflow
2 # mit den Voellmyparametern phi_b=30 und xi=400: Modell B
3
4 # Definition der Inputparameter
5
6 cellsize="1"
7 funcctrl="1,1,1,0,0,1"
8 elevation="vals_elevation_glatt"
9 hrelease="vals_hrelease"
10 hdeposit="vals_depositionarea"
11 impactarea="vals_impactarea"
12 imparam="1.0,10000,10000,0.01"
13
14 # Start der Anwendung r.avaflow
15 # Einfache Modellsimulation: Voellmy-Salm Modell
16 r.avaflow -e -v prefix=vals_m-b_30_400 model=1 limiter=1 funcctrl="
    $funcctrl" elevation="$elevation" hrelease="$hrelease" hdeposit="
    $hdeposit" impactarea="$impactarea" flowparam=2350,30,30,400,0,0,500
    imparam="$imparam" tint=5 tstop=300
```

---

## 5.5 Resümee

### 5.5.1 Modellgenauigkeit

#### 5.5.1.1 Modell A (raues Geländemodell)

Die Identifizierung der am besten geeigneten (best-fit) Voellmyparameter  $\phi_b$  und  $\xi$  gestaltete sich insofern problematisch, da der Turbulenzkoeffizient bei der Kalibration sowohl am unteren als auch am oberen Ende des Wertebereichs nahezu gleich gut bewertet werden kann. Durch eine genaue Auswertung der Kalibrierungskriterien (vgl. Abschnitt 3.4) konnte der basale Reibungswinkel mit  $\phi_b = 30^\circ$  und der Turbulenzkoeffizient mit  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$  bestimmt werden. Die Rückrechnung des Felssturzes mit den best-fit Voellmyparametern erzielte folgende Ergebnisse:

**Tab. 5.14:** Auswertung der Kennwerte zur Verifizierung der Modellparameter  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$ .

TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
8,9	81,6	1,7	7,7	0,486	0,608	0,758	0,464
TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>
11,6	80,0	3,3	5,1	0,578	0,689	0,827	0,309

Die erreichte Modellgenauigkeit kann neben dem Index CSI durch den Kennwert ACC beschrieben werden. Unter Verwendung des rauen Geländemodells resultierte hinsichtlich der Ablagerungen eine erreichte Genauigkeit von  $ACC_d=0,905$  und hinsichtlich des überstrichenen Bereiches ein  $ACC_i=0,916$ . Die Untersuchungsergebnisse zeigten hohe Zahlenwerte für den Index ACC und geringere Werte für die Kennzahl CSI. Die Diskrepanz der beiden Kennziffern lässt sich dadurch erklären, dass bei der Bestimmung des Index ACC der Wert True Negative mitberücksichtigt wird und dadurch der Zähler des Quotienten nach Gleichung (3.46) größer als der Zähler des Quotienten nach Gleichung (3.43) ist (vgl. Abschnitt 3.4.1.3). Bei einem hohen Wert für True Negative nähert sich die durch den Index ACC beschriebene Modellgenauigkeit dem Optimum von 1,0 an, wohingegen der Index CSI unabhängig von Wert True Negative ist.

#### 5.5.1.2 Modell B (geglättetes Geländemodell)

Im Zuge der Parameterkalibrierung konnte der basale Reibungswinkel mit  $\phi_b = 30^\circ$  und der Turbulenzkoeffizient mit  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$  identifiziert werden, mit denen in der Modellvariante B die beste Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung erreicht wurde. Eine Rückrechnung des Felssturzes mit diesen best-fit Voellmyparametern erzielte folgende Ergebnisse:

**Tab. 5.15:** Auswertung der Kennwerte zur Verifizierung der Modellparameter  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ .

TP <sub>d</sub>	TN <sub>d</sub>	FP <sub>d</sub>	FN <sub>d</sub>	CSI <sub>d</sub>	HSS <sub>d</sub>	AUROC <sub>d</sub>	D2PC <sub>d</sub>
9,6	81,5	1,8	7,1	0,519	0,639	0,777	0,425
TP <sub>i</sub>	TN <sub>i</sub>	FP <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>	CSI <sub>i</sub>	HSS <sub>i</sub>	AUROC <sub>i</sub>	D2PC <sub>i</sub>
12,8	78,6	4,7	3,9	0,599	0,704	0,856	0,238

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ergab sich auch in der Modellvariante B ein hoher Wert für den Index ACC. In der gegenständlichen Untersuchung und unter Verwendung des geglätteten Höhenmodells ließ sich eine Modellgenauigkeit  $ACC_d=0,911$  und  $ACC_i=0,914$  erreichen.

## 5.5.2 Gegenüberstellung der Modelle

### Modellgenauigkeit

Ein Vergleich der Kennwerte zur Verifizierung der Modellgenauigkeit, die in den Tabellen 5.14 und 5.15 aufgeführt sind, lässt erkennen, dass durch das Modell B eine höhere Genauigkeit erreicht wurde. Beispielsweise wurde im Modell A ein  $CSI_d=0,486$  und ein  $AUROC_d=0,758$  realisiert. Demgegenüber konnte im Modell B ein  $CSI_d=0,519$  und ein  $AUROC_d=0,777$  erzielt werden. Die Gegenüberstellung der Kennwerte zur Beschreibung der Modellgenauigkeit der beiden Modelle zeigt, dass das Sturzereignis vom 24. Dezember 2017 unter Verwendung des geglätteten Höhenmodells besser reproduziert werden konnte.

### Voellmyparameter

Im Falle des Modells A konnten unter Verwendung des rauen Geländemodells die besten Übereinstimmungen zwischen Sturzsimulation und Beobachtung mit den Voellmyparametern  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$  erzielt werden. Im Modell B mit geglättetem Höhenmodell ergaben sich nach der Auswertung der Kalibrierungskriterien die Werte  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ .

Augenscheinlich hat somit die Wahl des Geländemodells einen signifikanten Einfluss auf das in r.avaflo verwendete Voellmy-Salm Modell. In beiden Modellen ergibt sich durch Auswertung der Kalibrierungskennwerte zwar ein basaler Reibungswinkel  $\phi_b = 30^\circ$ , der Turbulenzkoeffizient aber unterlag starken Schwankungen. Der große Unterschied (Faktor 8) in den best-fit Werten des Turbulenzkoeffizienten spiegelt sich besonders in den berechneten Ablagerungen wider (siehe Abschnitt 5.3.3.2 und Abschnitt 5.4.3.2).

Darüber hinaus befindet sich der Turbulenzkoeffizient des Modells B in Wertebereichen für  $\xi$ , die im Zuge einer Rückrechnung des Sturzereignisses vom 24.12.2017 mit Hilfe des DAN-Codes (siehe folgenden Abschnitt 5.5.3) die besten Übereinstimmungen von Simulation und Beobachtung lieferten. Zudem ist festzuhalten, dass die Größenordnung des Turbulenzkoeffizienten in der Modellvariante B in etwa dem in Voellmy (1955) angegebenen Wert  $\xi = 500 \text{ m/s}^2$  für eine grobblockige Sohle entspricht. Die durch die Kalibrierung erhaltenen Parameter des Voellmy-Salm Modells, im Speziellen der Turbulenzkoeffizient, scheinen nicht zuletzt wegen der höheren erreichten Modellgenauigkeit und der zutreffenderen Berechnung der Ablagerungen in der Modellvariante B plausibler.

Zusammenfassend lässt sich herausstellen, dass das Modell B mit geglättetem Geländemodell die höhere Genauigkeit und die plausibleren Werte für die best-fit Parameter des Voellmy-Salm Modells liefert.

### 5.5.3 Vergleichsbetrachtung

Im Folgenden werden die erhaltenen Ergebnisse der vorliegenden Fallstudie Vals mit Ergebnissen aus Rückrechnungen mittels des DAN-Codes (Preh, 2019) gegenübergestellt. Zu diesem Zweck wird in eine Studie DAN und in eine Studie r.avaflo differenziert, wobei aufgrund der plausiblen Ergebnisse die Modellvariante B (siehe Abschnitt 5.4) der Studie r.avaflo zum Vergleich herangezogen wurde. Die Rückrechnungen des Ereignisses vom 24.12.2017 erfolgte bei beiden Studien unter Verwendung der Voellmy-Salm Rheologie. Die unterschiedlichen Berechnungsansätze (DAN und r.avaflo) lieferten jeweils andere Werte für die Materialkennwerte und die Parameter des Voellmy Modells, mit denen die beste Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung erreicht wurde. Diese sind in nachstehender Tabelle aufgezeigt:

**Tab. 5.16:** Gegenüberstellung der (best-fit) Materialkennwerte der Studie DAN und der Studie r.avaflo.

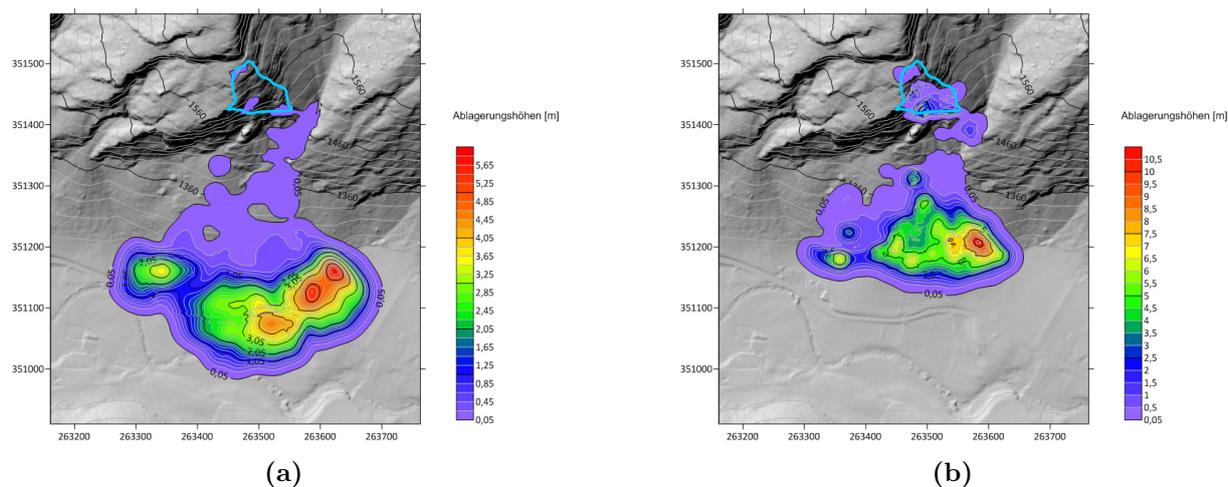
Studie	DAN (Preh, 2019)	Studie r.avaflo, Modell B
Berechnungssoftware	DAN-Code	r.avaflo
Dichte $\rho$	2420 kg/m <sup>3</sup>	2350 kg/m <sup>3</sup>
Interner Reibungswinkel $\phi_i$	30°	30°
Basaler Reibungswinkel $\phi_b$	12,95°	30°
Reibungskoeffizient $f$	0,23	0,58
Turbulenzkoeffizient $\xi$	450 m/s <sup>2</sup>	400 m/s <sup>2</sup>

Für den Felssturz Vals vom 24. Dezember 2017 existiert eine Rückrechnung mittels des DAN-Codes unter Verwendung der (best-fit) Materialkennwerte der Studie r.avaflo (Tabelle 5.16). Ebenso existiert eine Rückrechnung des Ereignisses in r.avaflo auf Basis der (best-fit) Materialkennwerte der Studie DAN (siehe ebenfalls Tabelle 5.16). Insgesamt ergeben sich aus den zwei Berechnungsansätzen vier Rückrechnungsvarianten, die nun erläutert werden.

#### 5.5.3.1 Rückrechnung DAN-Code

Die erste Kombination stellt die Rückrechnung mit Hilfe des DAN-Codes dar. In einer anfänglichen Berechnung wurden die am besten passenden Materialkennwerte ( $\rho$ ,  $\phi_i$ ) und Parameter der Voellmy Rheologie ( $\phi_b$ ,  $\xi$ ) in DAN identifiziert. Hieraus ergaben sich eine Dichte von  $\rho = 2420 \text{ kg/m}^3$  und ein interner Reibungswinkel  $\phi_i = 30^\circ$  sowie ein basaler Reibungswinkel  $\phi_b = 12,95^\circ$  und ein Turbulenzkoeffizient  $\xi = 450 \text{ m/s}^2$  (Preh, 2019). Die berechnete finale Ablagerungsverteilung unter Zugrundelegung dieser Materialkennwerte ist in Abbildung 5.14a dargestellt.

Die Verteilung der Ablagerungen auf Basis der Materialkennwerte, die im Zuge einer Rückrechnung des Ereignisses in r.avaflo die beste Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung lieferten, wurde durch eine ergänzende Berechnung des Felssturzes in DAN unter Verwendung von  $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ ,  $\phi_i = 30^\circ$ ,  $\phi_b = 30^\circ$  und  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$  erhalten (Abbildung 5.14b).



**Abb. 5.14:** (a) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der DAN-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des DAN-Modells (Preh, 2019). (b) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der DAN-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des r.avafLOW-Modells. Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.

Ein rein qualitativer, visueller Vergleich der Ergebnisse der DAN-Rückrechnungen zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der Ablagerungen und des überstrichenen Bereiches. Augenscheinlich kann festgestellt werden, dass die Rückrechnung mit den im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerten und Parametern des Voellmy Modells (Abbildung 5.14a) einen deutlich größeren überstrichenen Bereich als die Rückrechnung auf Basis der Materialkennwerte aus r.avafLOW aufweist (Abbildung 5.14b). Im Ausbruchsbereich, der in Abbildung 5.14 anhand einer hellblauen Konturlinie gekennzeichnet ist, werden Ablagerungshöhen von bis zu 0,5 m mit den im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerten berechnet (Abbildung 5.14a). Im Gegensatz dazu ergeben sich in der Rückrechnung unter Verwendung der in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte Ablagerungshöhen von bis zu 4 m (Abbildung 5.14b). Der Grund hierfür liegt vermutlich in einem deutlich höheren Reibungskoeffizienten bzw. basalen Reibungswinkel sowie einem geringeren Wert für den Turbulenzkoeffizienten (vgl. Tabelle 5.16), die in ihrer Kombination dafür sorgen, dass sich ein größerer Teil der Felsmassen aufgrund höherer Scherwiderstände im Ausbruchsbereich oberhalb der basalen Topographie ablagert.

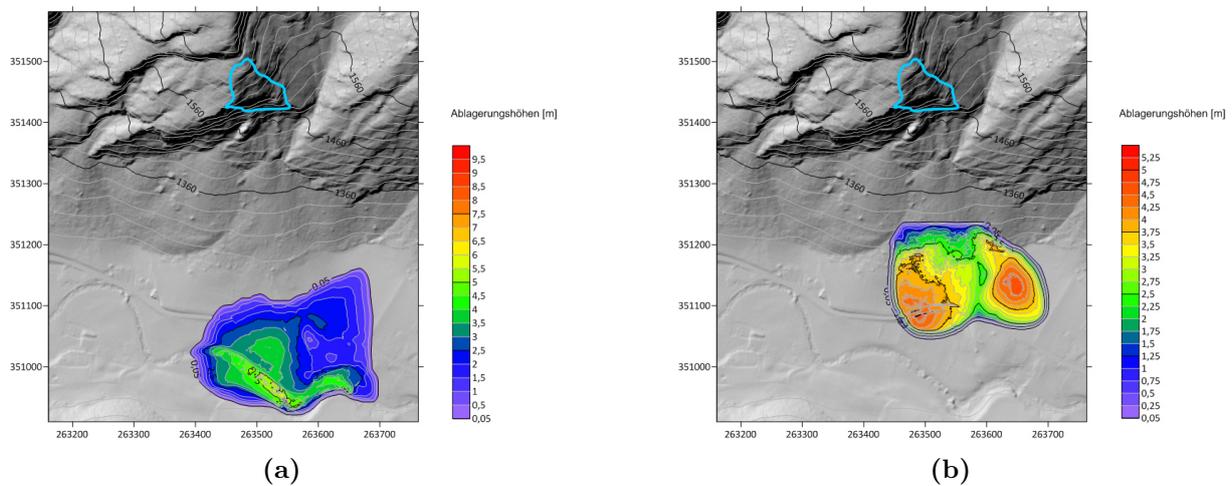
Der westliche Teil des überstrichenen Bereiches unmittelbar um den Ausbruch ist in beiden Rückrechnungen annähernd gleich wiedergegeben. Östlich des Ausbruchsbereiches weist die Rückrechnung mit den im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerten (Abbildung 5.14a) einen weiter ausladenden überstrichenen Bereich als die Rückrechnung unter Verwendung der in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte (Abbildung 5.14b) auf.

Im weiteren Verlauf entlang des Fließpfades ist zu erkennen, dass sich die Ablagerungen in der Rückrechnung auf Basis der DAN-Materialkennwerte sowohl in der Länge als auch in der Breite recht homogen verteilen (Abbildung 5.14a). Im südöstlichen Teil des Ablagerungsgebietes werden drei lokale Maxima mit Ablagerungshöhen von bis zu 6 m und im südwestlichen Teilbereich ein lokales Maximum mit einer Ablagerungshöhen von 4 m identifiziert. Im Kontrast dazu sind die Ablagerungen in der Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017 unter Verwendung der in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte augenscheinlich kompakter und konzentrierter verteilt (Abbildung 5.14b). Neben dem im westlichen Bereich vorliegenden lokalen Ablagerungsmaximum von 7 m und dem deutlich erkennbaren Maximum im Osten, das Ablagerungshöhen von bis zu

10 m aufweist, sind weitere Konzentrationen von Felsmaterial mit Größenordnungen von 4 m bis teilweise 7 m identifizierbar.

### 5.5.3.2 Rückrechnung r.avafLOW

Im Folgenden sind die Ergebnisse einer Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24. Dezember 2017 mittels r.avafLOW erläutert. Die Ergebnisse basieren erstens auf einer Rückrechnung unter Verwendung der im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerte ( $\rho = 2420 \text{ kg/m}^3$ ,  $\phi_i = 30^\circ$ ,  $\phi_b = 12,95^\circ$ ,  $\xi = 450 \text{ m/s}^2$ ) und zweitens auf einer Rückrechnung unter Verwendung der Materialkennwerte, die im Zuge der Parameterkalibrierung (Abschnitt 5.4.2 und Abschnitt 5.4.3.1) in r.avafLOW selbst erhalten wurden ( $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ ,  $\phi_i = 30^\circ$ ,  $\phi_b = 30^\circ$ ,  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ ). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.15 dargestellt:



**Abb. 5.15:** (a) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der r.avafLOW-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des DAN-Modells. (b) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der r.avafLOW-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des r.avafLOW-Modells. Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.

Abbildung 5.15a zeigt die Ablagerungshöhen unter Verwendung der im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerte, Abbildung 5.15b die Ablagerungen auf Basis der in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte. Ein visueller Vergleich der beiden Ergebnisse identifiziert deutliche Abweichungen von sowohl der Verteilung und der Form als auch der Größenordnung der Ablagerungen. In der Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017 mit den im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerten und Parametern des Voellmy Modells (Abbildung 5.15a) kommen die Felsmassen weit im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes zum liegen. Die maximale Ablagerungshöhe liegt hierbei in Bereichen von in etwa 6 m.

Im Gegensatz dazu werden entsprechend Abschnitt 5.4.3.2 in der Rückrechnung des Sturzerignisses mit den in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerten zwei lokale Maxima mit einer Ablagerungshöhe von maximal 5 m berechnet, die sich darüber hinaus, verglichen mit Abbildung 5.15a, weiter nördlich ablagern.

Eine Rückrechnung in r.avafLOW auf Basis von Vorhersageparametern, welche mit Hilfe des DAN-Codes ermittelt wurden, lieferte keine übereinstimmenden Ergebnisse hinsichtlich der Verteilung der Ablagerungen und damit auch des überstrichenen Bereiches.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Schlussbetrachtung

### Problemstellung und Zielsetzung

Die Masterarbeit beschäftigte sich mit der numerischen Modellierung von Felsstürzen und Felslawinen mit Hilfe des kontinuumsmechanischen bzw. flüssigkeitsäquivalenten Berechnungsverfahrens r.avaflow. Die möglichst genaue Modellierung der Ausbreitung schneller gravitativer Massenbewegungen (Massenströmen) wie Felslawinen ist bei der Bestimmung von der von diesen Prozessen ausgehenden Gefahr und des Risikos von großer Bedeutung. Eine Vielzahl von Fallstudien und Rückrechnungen basiert auf kontinuumsmechanischen Ansätzen unter Anwendung der Voellmy Rheologie zur Beschreibung des Bewegungsprozesses. Auf Basis dieser Rückrechnungen wurden von unterschiedlichen Autoren (z.B. Hungr, Pirulli) Prognoseparameter für die Voellmy Rheologie publiziert. Eine Vielzahl dieser Berechnungen wurde mit dem DAN-Code von Oldrich Hungr durchgeführt.

Ziel der Arbeit war die Beantwortung der Fragen, inwiefern es möglich ist, mit r.avaflow unter Verwendung der Voellmy-Salm Rheologie Felsstürze und Felslawinen zu reproduzieren und inwieweit die Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen des kontinuumsmechanischen Ansatzes DAN unter Anwendung der Voellmy Rheologie vergleichbar sind. Zu diesem Zweck wurden zwei Sturzereignisse, der Bergsturz „Frank Slide“ (Alberta, Kanada, 1903) sowie der Felssturz „Vals“ (Valsertal, Tirol, 2017), mit r.avaflow rückgerechnet und mit DAN verglichen.

### Fallstudie Frank Slide

Der Bergsturz Frank Slide ereignete sich am 29. April 1903 gegen 4:10 Uhr an der Ostwand des Turtle Mountain nahe der Stadt Frank im südwestlichen Teil der Provinz Alberta in Kanada und umfasste ein Sturzvolumen von ca. 36 Millionen m<sup>3</sup> (in etwa 80 Millionen Tonnen). Die Dauer des Sturzvorganges wird in der Literatur mit ungefähr 100 Sekunden angegeben, wobei sich das Material auf einer Fläche von 2,67 km<sup>2</sup> mit einer durchschnittlichen Ablagerungshöhe von etwa 14 m absetzte.

Ausgangspunkt der Rückrechnung dieses Ereignisses waren digitale Geländemodelle der basalen Topographie und des Ausbruchsbereiches, die jeweils in einer Auflösung von 20 m vorlagen. Im Zuge der Simulationen wurde in einem ersten Durchgang eine Parameterkalibrierung des in r.avaflow verwendeten Voellmy-Salm Modells durchgeführt. Zu diesem Zweck erfolgte eine automatisierte Parameterstudie mit den beiden Parametern des Voellmy-Salm Modells (basaler Reibungswinkel  $\phi_b$  und Turbulenzkoeffizient  $\xi$ ). Die Beurteilung der einzelnen Berechnungsergebnisse erfolgte durch den Vergleich der berechneten Ablagerungen sowie des überstrichenen Bereiches mit den beobachteten Bereichen der Ablagerungsmassen und des daraus konstruierten überstrichenen Bereiches.

Zur Identifikation der am besten passenden (best-fit) Voellmyparameter wurden zahlreiche Kalibrierungskriterien pro ausgeführter Berechnung analysiert und nach den höchsten erreichten Werten ausgewertet. Die Untersuchungen ergaben den basalen Reibungswinkel  $\phi_b = 6,5^\circ$  und den Turbulenzkoeffizienten  $\xi = 580 \text{ m/s}^2$ , mit denen die beste Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung erreicht wurde.

Mittels Kalibration konnte eine hohe Übereinstimmung von Beobachtung und Simulation erreicht werden. Dies zeigten einerseits die Kennwerte der Kalibration und andererseits der rein visuelle Vergleich. Die mit r.avaflow erzielten Ergebnisse wiesen starke Parallelen zu der Rückrechnung mit Hilfe des DAN-Codes auf. Die best-fit Parameter der Voellmy Rheologie, die berechneten Ablagerungen und die berechneten Fließgeschwindigkeiten stimmten gut bis sehr gut mit der Rückrechnung in DAN überein.

### Fallstudie Vals

In der zweiten Fallstudie wurde der Felssturz Vals, der sich am 24. Dezember 2017 im Valsertal in Tirol (Österreich) ereignete, untersucht. Das Ausbruchsvolumen konnte durch den Vergleich von hochauflösenden Laseraufnahmen vor und nach dem Ereignis des betroffenen Bereiches mit ca. 116000 m<sup>3</sup>, das Volumen der abgelagerten Felsmassen mit rund 130000 m<sup>3</sup> angegeben werden. Eine im Tal verlaufende Landstraße wurde 8 m überschüttet. Die Ablagerungen und der Zerlegungsgrad des Schuttes ließen auf flüssigkeitsäquivalentes, schuttstromähnliches Bewegungsverhalten der abgleitenden Materialien schließen.

Digitale Höhenmodelle der basalen Topographie und des Ausbruchsbereiches waren Ausgangspunkt der Rückrechnung des Ereignisses vom 24.12.2017. Die zur Verfügung gestellten Höhenmodelle lagen in einer Auflösung von 1 m vor und da die Studie Vals eine deutlich kleinere Dimension hinsichtlich des untersuchten Bereiches, des Sturzvolumens und der Höhenunterschiede als die Studie Frank aufwies, wurde der Einfluss der Auflösung des digitalen Höhenmodells in Z-Richtung auf das Materialmodell und die Simulationsergebnisse eruiert. Zu diesem Zweck wurden bei der Rückrechnung zwei unterschiedliche Geländemodelle verwendet: in einer ersten Modellvariante (Modell A) wurde das ursprüngliche (raue) Höhenmodell, in einer zweiten Modellvariante (Modell B) ein durch das Verfahren der Interpolation geglättetes Höhenmodell verwendet.

Die prinzipielle Vorgehensweise und Methodik strukturierte sich entsprechend der vorherigen Untersuchung. Die Kalibrierung der Parameter des Voellmy-Salm Modells erfolgte durch den Vergleich der berechneten Ablagerungen sowie des überstrichenen Bereiches mit den dokumentierten Bereichen der Ablagerungsmassen und des überstrichenen Bereiches, jeweils für Modell A und Modell B.

Zur Identifikation der am besten passenden (best-fit) Voellmyparameter wurde eine Vielzahl an Kalibrierungskriterien pro ausgeführter Berechnung analysiert und nach den höchsten erreichten Werten ausgewertet. Die Untersuchungen ergaben bei Verwendung des rauen Geländemodells den basalen Reibungswinkel  $\phi_b = 30^\circ$  und den Turbulenzkoeffizienten  $\xi = 50 \text{ m/s}^2$  und bei Verwendung des geglätteten Geländemodells den basalen Reibungswinkel  $\phi_b = 30^\circ$  und den Turbulenzkoeffizienten  $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ . Eine Gegenüberstellung der beiden Modelle hat gezeigt, dass das Modell B mit geglättetem Geländemodell die höhere Genauigkeit und die plausibleren Werte für die best-fit Parameter des Voellmy-Salm Modells lieferte. Das Modell B wurde für die weiterführenden Vergleiche herangezogen.

Im Zuge einer anschließenden Vergleichsbetrachtung wurde eine Rückrechnung mit Hilfe des DAN-Codes unter Verwendung der in DAN kalibrierten Materialkennwerte mit einer ebenfalls in DAN durchgeführten Rückrechnung auf Basis der in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte gegenübergestellt. Die berechneten Ablagerungen unterschieden sich stark voneinander. Eine analoge Vorgehensweise mit einer Rückrechnung in r.avafLOW unter Verwendung der im DAN-Code und der in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte zeigte ebenfalls deutliche Abweichungen der Verteilung und der Größenordnung der Ablagerungen sowie des überstrichenen Bereiches.

### Schlussfolgerungen

Die gegenständlichen Untersuchungen legen nahe, dass Felslawinen mit großen Sturzvolumina wie der Frank Slide mittels r.avafLOW mit hoher Genauigkeit rückgerechnet werden können. Die in r.avafLOW kalibrierten Materialkennwerte stimmten mit den im DAN-Code kalibrierten Materialkennwerten gut überein. Mit DAN ermittelte Vorhersageparameter gleicher Rheologie waren gut als Eingangsparameter für die Kalibrierung des Modells in r.avafLOW verwendbar. Die berechneten Ablagerungen und Fließgeschwindigkeiten der beiden kontinuumsmechanischen Ansätze zeigten ebenfalls eine gute bis sehr gute Analogie.

Bei dem deutlich kleineren Sturzvolumen des Felssturzes Vals konnten die Ablagerungen und der überstrichene Bereich nur unzureichend genau modelliert werden. Hierbei hatte die Wahl des Geländemodells einen signifikanten Einfluss auf den Turbulenzkoeffizienten des in r.avafLOW verwendeten Voellmy-Salm Modells. Vergleichsrechnungen mit Hilfe des DAN-Codes haben gezeigt, dass die mit DAN ermittelten Materialkennwerte und die best-fit Parameter der Voellmy Rheologie nicht als Eingangsparameter für die Kalibrierung des Voellmy-Salm Modells in r.avafLOW nutzbar waren. Dies ist insofern als Nachteil zu bewerten, da zahlreiche Rückrechnungen und Fallstudien auf Basis der klassischen Voellmy Rheologie existieren. Eine uneingeschränkte Verwendung von in DAN kalibrierten Materialkennwerten mit Voellmy Rheologie ist daher in r.avafLOW unter Verwendung des Voellmy-Salm Modells nicht möglich.

Die in r.avafLOW integrierten und im Rahmen des Postprocessings ausgeführten (automatisierten) Routinen zur Parameterkalibrierung ermöglichen eine effiziente Ermittlung der am besten passenden (best-fit) Materialparameter anhand von quantitativ erfassbaren Beurteilungskriterien. Die Auswertung solcher quantitativer Indexkennwerte ist neben der rein visuellen Analyse von Berechnungsergebnissen eine sinnvolle und vorteilhafte Methodik zur Aufarbeitung der ausgeführten Rückrechnungen. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber Berechnungsansätzen ohne eine automatisierte Vorgehensweise zur Bestimmung von best-fit Parametern.

Zur Erhärtung der in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse und Schlussfolgerungen wird die Durchführung weiterer Rückrechnungen und Vergleichsberechnungen von großen und mittelgroßen Felslawinen mit Sturzvolumina  $> 100000 \text{ m}^3$  in r.avafLOW empfohlen. Zudem ist die Integration der klassischen Voellmy Rheologie in das Modell empfehlenswert, um bisher ermittelte Vorhersageparameter unterschiedlicher kontinuumsmechanischer Ansätze im Zuge von Rückrechnungen in r.avafLOW benutzen zu können.

# Literaturverzeichnis

- Amt der Tiroler Landesregierung (2019). *tiris - Tiroler Rauminformationssystem*. URL: <https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/tiris/> (Zugriff am 21.07.2019).
- Benko B. und Stead D. (1998). „The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 35, S. 299–311. DOI: 10.1139/T98-005.
- Chen H. J. und Liu S. H. (2007). „Slope failure characteristics and stabilization methods“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 44, S. 377–391. DOI: 10.1139/T06-131.
- Christen M., Kowalski J. und Bartelt P. (2010). „RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain“. In: *Cold Regions Science and Technology* 63, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005.
- Corominas J. (1996). „The angle of reach as a mobility index for small and large landslides“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 33, S. 260–271. DOI: 10.1139/t96-005.
- Cruden D. M., Beltran L., Krauter E., Lefebvre G., G.I.Ter-Stepanian und Zhouyuan Z. (1993). *Multilingual Landslide Glossary*. Richmond, B.C., Canada: BiTech Publishers Ltd. ISBN: 0-920-505-10-4.
- Cruden D. M. und Martin C. D. (2007). „Before the Frank Slide“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 44, S. 765–780. DOI: 10.1139/T07-030.
- Cruden D. M. und Varnes D. J. (1996). „Landslide Types and Processes“. In: *Landslides: Investigation and Mitigation* Transportation Research Board Special Report 247. Hrsg. von N. A. of Sciences, S. 36–75.
- Fell R., Hungr O., Leroueil S. und Riemer W. (Jan. 2000). „Keynote lecture-Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills in soil“. In: *GeoEng 2000* 1.
- Fischer J.-T. (2013). „A novel approach to evaluate and compare computational snow avalanche simulation“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, S. 1655–1667. DOI: 10.5194/nhess-13-1655-2013.
- Fischer J.-T., Kowalski J. und Pudasaini S. P. (2012). „Topographic curvature effects in applied avalanche modeling“. In: *Cold Regions Science and Technology* 74-75, S. 21–30. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.01.005.
- Formetta F., Capparelli G. und Versace P. (2016). „Evaluating performance of simplified physically based models for shallow landslide susceptibility“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 20, S. 4585–4603. DOI: 10.5194/hess-20-4585-2016.
- Genske D. D. (2014). *Ingenieurgeologie: Grundlagen und Anwendung*. Zweite Auflage. Berlin: Springer Spektrum.
- Genske D. D. (2017). „Massenbewegungen“. In: *Grundbautaschenbuch Teil 1*. Hrsg. von K. J. Witt. Achte Auflage. Berlin: Ernst und Sohn, S. 721–813.
- Heim A. (1932). *Bergsturz und Menschenleben*. Zürich: Fretz und Wasmuth.
- Highland L. (2004). „Landslide Types and Processes“. In: *U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey Fact Sheet 2004-3072*, S. 1–4.

- Hungr O. (1995). „A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 32, S. 610–623. DOI: 10.1139/t95-063.
- Hungr O. (2008). „Numerical Modelling of the Dynamics of Debris Flows and Rock Avalanches“. In: *Geomechanik und Tunnelbau* 1, Heft 2, S. 112–119. DOI: 10.1002/geot.200800010.
- Hungr O., Evans S. G., Bovis M. J. und Hutchinson J. N. (2001). „A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type“. In: *Environmental and Engineering Geoscience* VII, No. 3, S. 221–238.
- Hungr O., Leroueil S. und Picarelli L. (2014). „The Varnes classification of landslide types, an update“. In: *Landslides* 11. DOI: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- Hungr O. und McDougall S. (o.J.). „The Frank Slide, Alberta, Canada“. In: *Alberta Geological Survey*.
- Hungr O., Morgan G. C. und Kellerhals R. (1984). „Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 21, S. 663–677.
- Hutchinson J. N. (1988). „General report: morphological and geological parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology“. In: *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides* 1. Hrsg. von Bonnard C., S. 3–36.
- Hyvärinen O. (2014). „A Probabilistic Derivation of Heidke Skill Score“. In: *American Meteorological Society: Weather and Forecasting* 29, S. 177–181. DOI: 10.1175/WAF-D-13-00103.1.
- Iverson R. M., Costa J. E. und LaHusen R. G. (1992). „Debris Flow Flume at the H.J. Andrews Experimental Forest, Oregon“. In: *U.S. Geological Survey Open File Report 92-483*. DOI: 10.3133/ofr92483.
- Iverson R. M., Logan M. und Obryk M. K. (2018). „Video documentation of experiments at the USGS debris-flow flume 1992–2017 (ver 1.4, January 2018)“. In: *U.S. Geological Survey Open File Report 2007-1315*. DOI: 10.3133/ofr20071315.
- Iverson R. M., Schilling S. P. und Vallance J. W. (1998). „Objective delineation of lahar-inundation hazard zones“. In: *Geological Society of America Bulletin* 110, No. 8, S. 972–984.
- Kienholz H., Zeilstra P. und Hollenstein K. (1998). *Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko: Arbeitspapier*. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Eidg. Forstdirektion.
- Konietzky H. (2000). *Numerische Simulation in der Geomechanik mittels expliziter Verfahren*. Itasca Consultant GmbH. Gelsenkirchen.
- Krauter E. (2001). „Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen“. In: *Grundbautaschenbuch Teil 1*. Hrsg. von U. Smolczyk. Sechste Auflage. Berlin: Ernst und Sohn, S. 613–665.
- Li T. (1983). „A mathematical model for predicting the extent of a major rockfall“. In: *Zeitschrift für Geomorphologie* 24, S. 473–482.
- Liebl D. (2017). *25.12.2017: aktuelle Bilder Vals Steinbruch*. URL: <https://presse.zeitungsfoto.at/?mode=view&id=3354> (Zugriff am 21. 07. 2019).
- Mergili M. (2014–2019) (o.D.). *r.avaflow - The mass flow simulation tool. r.avaflow User manual*. URL: <https://www.avaflow.org/manual.php>.
- Mergili M., Fischer J.-T., Krenn J. und Pudasaini S.P. (2017). „r.avaflow v1, an advanced open source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows“. In: *Geoscientific Model Development* 10, S. 553–569. DOI: 10.5194/gmd-10-553-2017.

- o. V. (2019). *Gesteinsdichte*. URL: [cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/petrograph/tabellen/gesteinsdichte.html](https://cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/petrograph/tabellen/gesteinsdichte.html) (Zugriff am 20.07.2019).
- Poisel R. und Preh A. (2004). „Rock Slope Initial Failure Mechanisms and their Mechanical Models“. In: *Felsbau* 22, Nr. 2, S. 40–45.
- Poisel R., Preh A. und Hungr O. (2008). „Run Out of Landslides – Continuum Mechanics versus Discontinuum Mechanics Models“. In: *Geomechanik und Tunnelbau* 1, Heft 5, S. 358–366. DOI: 10.1002/geot.200800036.
- Preh A. (2004). „Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes (PFC)“. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Preh A. (2019). „Felssturz Valsertal: Analysen und Prognoseberechnungen von Massenstürzen.“ In: *Interner Bericht an die Wildbach und Lawinenverbauung, Stabstelle Geologie, Innsbruck*.
- Pudasaini S. P. (2012). „A general two-phase debris flow model“. In: *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117, F03010, S. 1–28. DOI: 10.1029/2011JF002186.
- Reuter F., Klengel K. J. und Pasek J. (1992). *Ingenieurgeologie*. Dritte Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH.
- Rickenmann D. (1999). „Empirical relationships for debris flows“. In: *Natural Hazards* 19, S. 47–77.
- Rickenmann D. (2005). „Runout prediction methods“. In: *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Hrsg. von O. Hungr und M. Jakob. Berlin: Springer Praxis Books, S. 305–324.
- Roth W. (2003). „Dreidimensionale numerische Simulation von Felsmassenstürzen mittel der Methode der Distinkten Elemente (PFC)“. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Salm B. (1993). „Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches“. In: *Annals of Glaciology* 18, S. 221–226.
- Savage S. B. und Hutter K. (1989). „The Motion of a Finite Mass of Granular Material down a Rough Incline“. In: *Journal of Fluid Mechanics* 199, S. 177–215. DOI: 10.1017/S0022112089000340.
- Scheidegger A. E. (1973). „On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides“. In: *Rock Mechanics* 5, S. 231–236. DOI: 10.1007/BF01301796.
- Scheidl C., Rickenmann D. und McArdell B. W. (2013). „Runout Prediction of Debris Flows and Similar Mass Movements“. In: *Landslide Science and Practice* 3, S. 221–229. DOI: 10.1007/978-3-642-31310-3\_30.
- Schroder J. F. (1971). „Landslides of Utah“. In: *Utah Geological and Mineralogical Survey Bulletin* 90, 51 ff.
- Terzaghi K. (1950). „Mechanisms of landslides“. In: *Application of geology to engineering practice*, S. 83–123.
- Terzaghi K. (1962). „Stability of steep slopes on hard unweathered rock“. In: *Geotechnique* 12, S. 251–270.
- Varnes D. J. (1958). „Landslide Types and Processes“. In: *Landslides and Engineering Practice Highway Research Board Special Report 29*. Hrsg. von E. B. Eckel, S. 20–47.
- Varnes D. J. (1978). „Slope Movement Types and Processes“. In: *Landslides: Analysis and Control Transportation Research Board Special Report 176*. Hrsg. von N. A. of Sciences, S. 11–33.
- Voellmy A. (1955). „Über die Zerstörungskraft von Lawinen“. In: *Schweizerische Bauzeitung* 73, S. 159–165, 212–217, 246–249, 280–285.

- von Wolffersdorff P. und Schweiger H. F. (2017). „Numerische Verfahren in der Geotechnik“. In: *Grundbautaschenbuch Teil 1*. Hrsg. von K. J. Witt. Achte Auflage. Berlin: Ernst und Sohn, S. 633–719.
- Zimmermann M., Mani P., Gamma P., Gsteiger P., Heiniger O. und Hunziker G. (1997). „Murgangefahr und Klimaänderung: ein GIS-basierter Ansatz“. In: *Schlussbericht NFP 31*. ETH Zürich.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Rutschungstypen bzw. Bewegungstypen nach den Definitionen des Multilingual Landslide Glossary (WP/WLI, Cruden et al., 1993, S. 6-1, verändert). . . . .	13
a	Fallen . . . . .	13
b	Kippen . . . . .	13
c	Gleiten . . . . .	13
d	Fließen . . . . .	13
e	Driften . . . . .	13
2.2	Klassifizierungssystem nach Varnes (1978). Quelle: Highland (2004). U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey: Landslide Types and Processes (Fact Sheet 2004-3072). . . . .	14
2.3	Beispiele von Massenbewegungen mit Angabe von Literaturverweisen, der Rutschungsgeschwindigkeiten und dem herbeigeführten Schaden sowie deren Einteilung in Geschwindigkeitsklassen. Quelle: Cruden und Varnes (1996), S. 59, Tabelle 3.4.	18
2.4	Zusammenstellung von Geschwindigkeitswerten einiger fließähnlicher Massenbewegungen ( <i>flow-like landslides</i> ) nach Hungr et al. (2001). Quelle: Fell et al. (2000).	21
2.5	Übersicht über das 32 Kategorien umfassende Klassifizierungssystem. Mit einem hochgestellten a gekennzeichnete Klassen erreichen für gewöhnlich extrem schnelle Fließgeschwindigkeiten nach den Bezeichnungen in den Ausführungen in Cruden und Varnes (1996). Quelle: Hungr et al. (2014), verändert. . . . .	22
2.6	Beispiele von Versagensmechanismen von Felsböschungen und ihre jeweiligen Berechnungsansätze - Teil 1 (Poisel und Preh, 2004). . . . .	25
2.7	Beispiele von Versagensmechanismen von Felsböschungen und ihre jeweiligen Berechnungsansätze - Teil 2 (Poisel und Preh, 2004). . . . .	26
2.8	Simulation von Sturzprozessen in der USGS Debris-Flow Flume (Iverson et al., 2018).	27
2.9	(a) Zusammenhang zwischen dem Sturzvolumen $V$ und dem Verhältnis aus Höhendifferenz $H$ und Länge $L$ . (b) Zusammenhang zwischen dem Sturzvolumen $V$ und der von den Ablagerungen bedeckten Fläche $A$ . Quelle: Li (1983). . . . .	28
a	. . . . .	28
b	. . . . .	28
2.10	(a) Darstellung von beobachteten Rutschungslängen $L$ ( <i>travel distance</i> ) von Schuttströmen und Felslawinen im Vergleich mit berechneten Rutschungslängen nach Gleichung 2.3. (b) Darstellung von beobachteten Rutschungslängen $L$ ( <i>travel distance</i> ) von Schuttströmen und Felslawinen im Vergleich mit berechneten Rutschungslängen nach Gleichung 2.4. Quelle: Rickenmann (2005). . . . .	29
a	. . . . .	29
b	. . . . .	29
2.11	Gegenüberstellung des Tangens der Fahrböschung und des Einzugsgebietes $A_c$ ausgewählter Massenbewegungen (Rickenmann, 2005). . . . .	30
2.12	(a) Korrelation von Volumen $V$ und der Querschnittsfläche $A$ der Ablagerungen. (b) Korrelation von Volumen $V$ und der Fläche im Grundriss $B$ der Ablagerungen. Quelle: Iverson et al. (1998). . . . .	30
a	. . . . .	30

b	30
2.13 Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufes einer Massenbewegung auf Grundlage des Pauschalgefälles. Schlittenmodell nach Heim (1932). Quelle: Preh (2019).	32
2.14 Schematische Darstellung des Konzepts der äquivalenten (scheinbaren) Flüssigkeit nach Hungr (1995). Quelle: Hungr (1995), verändert.	33
3.1 Modell zur Beschreibung der Scherkräfte in der Nähe der Geländeoberfläche (Salm, 1993).	37
3.2 Voellmy-Salm Modell mit der Erweiterung um die zufällige kinetische Energie RKE (Christen et al., 2010).	41
3.3 Berechnungskonzept und -ablauf von r.avaflo (Mergili et al., 2017).	48
3.4 Kalibrierungskriterien True Positive, True Negative, False Positive, False Negative im Zusammenhang mit dem jeweils beobachteten und berechneten Bereich (OP: <i>observed positive area</i> , SP: <i>simulated positive area</i> ). Nach Mergili et al. (2017), verändert.	50
3.5 Beispiel einer ROC-Kurve mit einem nahezu idealen Verlauf. Die AUROC nimmt einen Wert von 0,968 an und liegt damit nahe am Optimum von 1.	52
4.1 Die Lage des Bergsturzes in Alberta, Kanada (Benko und Stead, 1998).	55
4.2 (a) Darstellung der Luftbildaufnahme des Frank Slide, wobei im nordwestlichen Bereich die heutige Stadt Frank und im östlichen Bereich die Ausläufer der Stadt Bellevue zu erkennen sind, sowie (b) die Darstellung der Grenzen der Ablagerungen des Bergsturzes. Quelle: Landslide Forum (2007).	56
a Luftbildaufnahme der Ablagerungen	56
b Ablagerungsgrenzen	56
4.3 (a) Längsschnitt des geologischen Modells des Turtle Mountain (Cruden und Martin, 2007). (b) Darstellung einer Übersicht des Abrissgebietes des Frank Slide (Benko und Stead, 1998).	57
a Geologisches Modell im Längsschnitt	57
b Detail des Abbruchbereiches	57
4.4 (a) Darstellung des Deposition Indicator Index und (b) des Impact Indicator Index für den Fall Frank Slide.	65
a Deposition Indicator Index	65
b Impact Indicator Index	65
4.5 (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich der beobachteten Ablagerungen. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel $\phi_b$ [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ].	67
a CSI <sub>d</sub>	67
b HSS <sub>d</sub>	67
c D2PC <sub>d</sub>	67
d AUROC <sub>d</sub>	67
4.6 (a) Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel $\phi_b$ [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ].	68
a CSI <sub>i</sub>	68

	b	HSS <sub>i</sub> . . . . .	68
	c	D2PC <sub>i</sub> . . . . .	68
	d	AUROC <sub>i</sub> . . . . .	68
4.7	(a)	Darstellung der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades und (b) der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 80$ s) für $\phi_b = 6,5^\circ$ und $\xi = 580$ m/s <sup>2</sup> . Auswertungen mittels r.avaflow. . . . .	69
	a	Maximale Fließhöhen . . . . .	69
	b	Finale Ablagerungen . . . . .	69
4.8	(a)	Konturplot der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades, (b) Konturplot der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 80$ s), (c) Outline bzw. überstrichener Bereich des Frank Slide nach der Rückrechnung und (d) maximale Fließgeschwindigkeiten. Rückrechnung mit den Voellmyparametern $\phi_b = 6,5^\circ$ und $\xi = 580$ m/s <sup>2</sup> . Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer. . . . .	70
	a	Maximale Fließhöhen . . . . .	70
	b	Finale Ablagerungen . . . . .	70
	c	Outline des Frank Slide . . . . .	70
	d	Maximale Fließgeschwindigkeiten . . . . .	70
4.9	(a)	Ablagerungsverteilung (rote Konturlinien) nach Hungr (2008) für $f = 0,1$ ( $\phi_b \approx 5,7^\circ$ ) und $\xi = 500$ m/s <sup>2</sup> . (b) Verteilung der Ablagerungen berechnet mittels r.avaflow unter Verwendung der Voellmyparameter $\phi_b = 6,5^\circ$ und $\xi = 580$ m/s <sup>2</sup> (siehe hierzu auch Abbildung 4.7b und 4.8b). . . . .	73
	a	Ablagerungen DAN-Code . . . . .	73
	b	Ablagerungen r.avaflow . . . . .	73
4.10	(a)	Gebiete gleicher maximaler Geschwindigkeit nach Hungr (2008) für $f = 0,1$ ( $\phi_b \approx 5,7^\circ$ ) und $\xi = 500$ m/s <sup>2</sup> . (b) Maximale Fließgeschwindigkeiten berechnet mittels r.avaflow unter Verwendung der Voellmyparameter $\phi_b = 6,5^\circ$ und $\xi = 580$ m/s <sup>2</sup> (siehe hierzu auch Abbildung 4.8d). . . . .	74
	a	. . . . .	74
	b	. . . . .	74
5.1		Die Lage des Felssturzes Vals im Valertal, Tirol, Österreich. Quelle: Tiroler Landesregierung (2019). . . . .	75
5.2	(a)	Darstellung der Luftbilddaufnahme unmittelbar nach dem Sturzereignis am 25.12.2017. Es sind sowohl die Ablagerungen als auch der Staubsaum zu erkennen (Liebl, 2017). (b) Aufnahme des Gebietes vom 02.07.2019 (Hartl). . . . .	76
	a	Luftbilddaufnahme der Ablagerungen und des Staubsaaumes . . . . .	76
	b	Aufnahme des Sturzgebietes . . . . .	76
5.3		Aufnahme des Gebietes vom 02.07.2019 (Hartl). . . . .	77
5.4	(a)	Darstellung des Deposition Indicator Index und (b) des Impact Indicator Index für den Fall Vals. . . . .	83
	a	Deposition Indicator Index . . . . .	83
	b	Impact Indicator Index . . . . .	83
5.5	(a)	Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich der beobachteten Ablagerungen. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel $\phi_b$ [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]. . . . .	85
	a	CSI <sub>d</sub> . . . . .	85

	b	HSS <sub>d</sub> . . . . .	85
	c	D2PC <sub>d</sub> . . . . .	85
	d	AUROC <sub>d</sub> . . . . .	85
5.6	(a)	Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel $\phi_b$ [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]. . . . .	86
	a	CSI <sub>i</sub> . . . . .	86
	b	HSS <sub>i</sub> . . . . .	86
	c	D2PC <sub>i</sub> . . . . .	86
	d	AUROC <sub>i</sub> . . . . .	86
5.7	(a)	Darstellung der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades und (b) der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 260$ s) für $\phi_b = 30^\circ$ und $\xi = 50$ m/s <sup>2</sup> . Auswertungen mittels r.avaflo. . . . .	87
	a	Maximale Fließhöhen . . . . .	87
	b	Finale Ablagerungen . . . . .	87
5.8	(a)	Konturplot der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades, (b) Konturplot der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 260$ s), (c) Outline des Felssturzes Vals nach der Rückrechnung des Modells A und (d) maximale Fließgeschwindigkeiten. Rückrechnung mit den best-fit Voellmyparametern $\phi_b = 30^\circ$ und $\xi = 50$ m/s <sup>2</sup> . Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer. . . . .	88
	a	Maximale Fließhöhen . . . . .	88
	b	Finale Ablagerungen . . . . .	88
	c	Outline des Felssturzes Vals . . . . .	88
	d	Maximale Fließgeschwindigkeiten . . . . .	88
5.9	(a)	Darstellung des Deposition Indicator Index und (b) des Impact Indicator Index für den Fall Vals. . . . .	95
	a	Deposition Indicator Index . . . . .	95
	b	Impact Indicator Index . . . . .	95
5.10	(a)	Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich der beobachteten Ablagerungen. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel $\phi_b$ [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]. . . . .	97
	a	CSI <sub>d</sub> . . . . .	97
	b	HSS <sub>d</sub> . . . . .	97
	c	D2PC <sub>d</sub> . . . . .	97
	d	AUROC <sub>d</sub> . . . . .	97
5.11	(a)	Darstellung des Critical Success Index (CSI), (b) des Heidke Skill Score (HSS), (c) der Distance to perfect classification (D2PC) und (d) der Area under ROC curve (AUROC), jeweils in der Auswertung hinsichtlich des überstrichenen Bereiches. Parameter 5 ist der basale Reibungswinkel $\phi_b$ [°], Parameter 6 der Turbulenzkoeffizient $\xi$ [m/s <sup>2</sup> ]. . . . .	98
	a	CSI <sub>i</sub> . . . . .	98
	b	HSS <sub>i</sub> . . . . .	98
	c	D2PC <sub>i</sub> . . . . .	98
	d	AUROC <sub>i</sub> . . . . .	98

5.12	(a) Darstellung der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades und (b) der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 205$ s) für $\phi_b = 30^\circ$ und $\xi = 400$ m/s <sup>2</sup> . Auswertungen mittels r.avaflo.	99
	a Maximale Fließhöhen	99
	b Finale Ablagerungen	99
5.13	(a) Konturplot der maximalen Fließhöhen entlang des Fließpfades, (b) Konturplot der finalen Ablagerungen nach dem letzten berechneten Zeitschritt ( $t = 205$ s), (c) Outline des Felssturzes Vals nach der Rückrechnung des Modells B und (d) maximale Fließgeschwindigkeiten. Rückrechnung mit den best-fit Voellmyparametern $\phi_b = 30^\circ$ und $\xi = 400$ m/s <sup>2</sup> . Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.	100
	a Maximale Fließhöhen	100
	b Finale Ablagerungen	100
	c Outline des Felssturzes Vals	100
	d Maximale Fließgeschwindigkeiten	100
5.14	(a) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der DAN-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des DAN-Modells (Preh, 2019). (b) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der DAN-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des r.avaflo-Modells. Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.	105
	a	105
	b	105
5.15	(a) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der r.avaflo-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des DAN-Modells. (b) Darstellung der finalen Ablagerungshöhen der r.avaflo-Rückrechnung unter Verwendung der am besten passenden Materialkennwerte des r.avaflo-Modells. Auswertungen mittels dem Golden Software Programm Surfer.	106
	a	106
	b	106

# Tabellenverzeichnis

2.1	Geschwindigkeitsklassen ( <i>velocity classes</i> ) nach Cruden und Varnes (1996). . . . .	16
2.2	Schadenskategorien ( <i>vulnerability categories</i> ) nach Cruden und Varnes (1996). . . . .	17
2.3	Einteilung von Fall- und Sturzmassen in Steinschlag, Fels- und Bergsturz (nach Krauter, 2001, S. 640, Tabelle 7). . . . .	23
3.1	Zusammenstellung der verwendeten Kalibrierungskriterien der Parametervariation. In Anlehnung an Formetta et al. (2016) und Mergili et al. (2017). . . . .	53
4.1	Geotechnische Materialkennwerte der anzutreffenden geologischen Zonen des Turtle Mountain. . . . .	57
4.2	Intervalle der Voellmy Parameter zur Rückrechnung des Frank Slide. . . . .	62
4.3	Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter. . . . .	63
4.4	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich der Ablagerungen ( <i>deposition area</i> ). . . . .	63
4.5	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich des beeinflussten Bereiches ( <i>impact area</i> ). . . . .	63
4.6	Materialkennwerte mit der besten Übereinstimmung (best-fit Parameter). . . . .	64
4.7	Maximale Ablagerungshöhen $d_{\max}$ und maximale Fließgeschwindigkeiten $v_{\max}$ der in Tabelle 4.6 angegebenen best-fit Parameter. . . . .	66
4.8	Auswertung der Kennwerte zur Verifizierung der Modellparameter $\phi_b = 6,5^\circ$ und $\xi = 580 \text{ m/s}^2$ . . . . .	72
4.9	Gegenüberstellung der Voellmyparameter aus der Fallstudie Hungr (2008) und der vorliegenden mit r.avaflow durchgeführten Fallstudie Frank Slide. . . . .	73
5.1	Modelle zur Rückrechnung des Felssturzes Vals vom 24.12.2017. . . . .	78
5.2	Intervalle der Voellmy Parameter zur Rückrechnung des Felssturzes Vals. . . . .	80
5.3	Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter. . . . .	81
5.4	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich der Ablagerungen ( <i>deposition area</i> ). . . . .	81
5.5	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich des beeinflussten Bereiches ( <i>impact area</i> ). . . . .	81
5.6	Materialkennwerte mit der besten Übereinstimmung (best-fit Parameter). . . . .	82
5.7	Maximale Ablagerungshöhen $d_{\max}$ und maximale Fließgeschwindigkeiten $v_{\max}$ der best-fit Parameter. . . . .	84
5.8	Intervalle der Voellmy Parameter zur Rückrechnung des Felssturzes Vals. . . . .	92
5.9	Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter. . . . .	93
5.10	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich der Ablagerungen ( <i>deposition area</i> ). . . . .	93
5.11	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Materialparameter hinsichtlich des beeinflussten Bereiches ( <i>impact area</i> ). . . . .	93
5.12	Materialkennwerte mit der besten Übereinstimmung (best-fit Parameter). . . . .	94
5.13	Maximale Ablagerungshöhen $d_{\max}$ und maximale Fließgeschwindigkeiten $v_{\max}$ der best-fit Parameter. . . . .	96

5.14	Auswertung der Kennwerte zur Verifizierung der Modellparameter $\phi_b = 30^\circ$ und $\xi = 50 \text{ m/s}^2$ . . . . .	102
5.15	Auswertung der Kennwerte zur Verifizierung der Modellparameter $\phi_b = 30^\circ$ und $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ . . . . .	102
5.16	Gegenüberstellung der (best-fit) Materialkennwerte der Studie DAN und der Studie r.avafLOW. . . . .	104