

Diploma Thesis

Comparison of the applicability of the Hoek-Brown and the Mohr-Coulomb failure criterion using the example of the Vals rock slope

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

Diplomarbeit

Vergleich der Anwendbarkeit des Hoek-Brownschen und des Mohr-Coulombschen Bruchkriteriums am Beispiel der Felsböschung Vals

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

von

Matthias Eccel, BSc

Matr.Nr.: 01226359

unter der Anleitung von

Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alexander Preh**

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

Wien, im November 2021



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.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Menschen bedanken, die das Verfassen dieser Diplomarbeit möglich gemacht haben.

Mein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Herrn Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh, der es mir ermöglicht hat, diese Diplomarbeit am Institut für Geotechnik am Forschungsbereich Ingenieurgeologie zu schreiben. Durch seine Ideen und Inputs hat er mich über den gesamten Zeitraum unterstützt und stets motiviert.

Ein herzliches Dankeschön geht an Univ. Ass. Dipl.-Ing. MBA Mariella Illeditsch, ebenfalls vom Institut für Geotechnik, für Ihre Zeit und Hilfestellung beim Verfassen dieser Arbeit. Auch sie trägt einen wesentlichen Anteil dazu bei. Jan Vincent Froschauer möchte ich danken für die aufgebrauchte Zeit sowie Tipps und Tricks beim Programmieren.

Mein größter Dank geht an meine Familie, vor allem an meinen Eltern Barbara und Andreas, die mir das alles ermöglicht haben und bei jeder Entscheidung hinter mir gestanden sind und mich unterstützt haben.

Zum Schluss danke ich meiner Freundin Mariella, die mich motiviert und angetrieben hat und immer für mich da war.

Danke!



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

Felsstürze nahe besiedelten Gebieten stellen ein großes Gefahrenpotential für Mensch und Infrastruktur dar. Diese resultieren aus instabilen Talflanken. Die Möglichkeit einer Bewertung durch numerische Verfahren und die Beurteilung der daraus resultierenden Stabilität sowie des Verschiebungsverhaltens sind für die Einschätzung der ausgehenden Gefahren essenziell.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einer möglichst realitätsnahen Modellierung eines Abbruchgebietes und vergleicht diese, mit einem beobachteten Bereich. Dabei wurde als Beispiel die Felsböschung Vals, in Tirol herangezogen, bei der es am 24. Dezember 2017 zu einem Felssturz mit einem Abbruchvolumen von ca. 117.000 m³ Felsgestein kam.

Ziel war es, das Modell anhand der Bruchkriterien nach Hoek-Brown sowie Mohr-Coulomb zu berechnen und eine Kalibrierung der Modellparameter durchzuführen. Dadurch sollte eine bestmögliche Rückrechnung bzw. Abbildung der beobachteten Hangbewegung erreicht werden, um Aussagen über die Anwendbarkeit der beiden Bruchkriterien treffen zu können. Ausgangspunkt für die Kalibrierung war der Grenzgleichgewichtszustand (GGGZ). Dieser wurde unter Anwendung des Bruchkriteriums nach Hoek-Brown und Mohr-Coulomb mit zum HB-Kriterium äquivalenten MC-Parametern mithilfe der Methode der Festigkeitsreduktion ermittelt. Bei der Kalibrierung wurde der Wertebereich der Festigkeitsparameter für den Zustand des Grenzgleichgewichts (*GSI* und *D* bzw. φ und *c*) variiert. Die Beurteilung des Systemzustandes erfolgte anhand der Verschiebungen oder Geschwindigkeiten des Modells. Die Ergebnisse wurden quantitativ mittels dem Accuracy Index (ACC) und dem Critical Success Index (CSI) bewertet.

Bei der Auswertung der Bewertungsparameter wurde schnell ersichtlich, dass das Modell unter Anwendung des Bruchkriteriums nach Hoek-Brown wesentlich genauere Übereinstimmung zwischen dem berechneten, simulierten Bereich und dem beobachteten Bereich liefert. Dabei konnte nach dem CSI eine Genauigkeit von bis zu 77,7 % erreicht werden, wobei es beim Mohr-Coulombschen Bruchkriterium lediglich 21,8 % waren.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen legen nahe, dass Berechnungen mit dem Hoek-Brownschen Bruchkriterium gut geeignet sind, um Abbrüche dieser Größenordnung zurückzurechnen. Eine Rückrechnung mit äquivalenten Mohr-Coulomb Parameter weist eine gewisse Ungenauigkeit auf, da die Bruchgerade des linearen Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb nicht die gesamte Kurve, des nicht linearen Bruchkriterium nach Hoek-Brown abdecken kann. Somit werden die äquivalenten MC-Festigkeitsparameter nicht an allen Punkten der Geraden richtig abgeschätzt.

Abstract

Rockfalls near populated areas represent a major potential hazard for people and infrastructure. These result from unstable valley sides. The possibility of an evaluation by numerical methods and the evaluation of the resulting stability as well as the displacement behaviour are essential for the estimation of the emanating hazards.

This diploma thesis deals with a modelling of a detachment area as close to reality as possible and compares it with an observed area. The rock slope Vals, in Tyrol, was used as an example, where a rockfall with a source volume of approximately 117,000 m³ has detached.

The aim was to calculate the model using the Hoek-Brown failure criteria and Mohr-Coulomb and to calibrate the model parameters. This should achieve the best possible back calculation or representation of the observed slope movement to be able to make statements about the applicability of the two failure criteria. The starting point for the calibration was the limit equilibrium state. This was determined using the Hoek-Brown and Mohr-Coulomb fracture criterion with equivalent MC parameters by means of the strength reduction method. During calibration, the strength parameters for the limit equilibrium state (GSI and D or φ and c) were varied. The system state was evaluated using the displacements or velocities of the model. The results were evaluated quantitatively using the Accuracy Index (ACC) and the Critical Success Index (CSI).

When evaluating the valuation parameters, it quickly became apparent that the model using the Hoek-Brown fracture criterion provided much more accurate agreement between the calculated simulated domain and the observed domain. According to the CSI, an accuracy of up to 77.7 % could be achieved, whereas it was only 21.8 % with the Mohr-Coulomb fracture criterion.

The results of the investigations carried out suggest that calculations with the Hoek-Brown failure criterion are well suited to back-calculate detachment of this magnitude. A back-calculation with equivalent Mohr-Coulomb parameters exhibits a certain inaccuracy since the envelope of the linear failure criterion according to Mohr-Coulomb cannot cover the entire curve of the non-linear failure criterion according to Hoek-Brown. Thus, the equivalent MC strength parameters are not correctly estimated at all points of the Mohr-Coulomb envelope.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	3
2	Numerische Modellierung	5
2.1	Diskontinuums- und Kontinuumsmechanische Berechnungsansätze	6
2.1.1	Diskrete Elemente Methode	7
2.1.2	Finite Elemente Methode / Finite Differenzen Methode	8
2.2	FLAC3D	9
2.2.1	Grundlagen	10
2.2.2	Materialmodelle	11
2.2.2.1	Mohr-Coulomb	11
2.2.2.2	Hoek-Brown	12
2.2.2.3	In FLAC3D implementierte HB-Parameter	17
2.2.2.4	Äquivalente MC-Parameter	18
2.2.3	Festigkeitsreduktionsmethode	20
3	Kalibrierungsmethode	23
3.1	Parameterkalibrierung	23
3.1.1	Beurteilungsbasis	24
3.1.2	Kalibrierungskriterien	24
3.1.3	Validierung	25
3.1.4	Zusammenstellung der Indizes	27
3.2	Ergebnisvisualisierung	27
4	Felssturz Vals	29
4.1	Einleitung	29
4.2	Untersuchungsgebiet	30
4.2.1	Geografische Lage	30
4.2.2	Geologie und Geomorphologie	31
4.3	Modellierung	34
4.3.1	Untersuchte Modellgeometrie	34
4.3.2	Randbedingungen	35

4.3.3	Bewertung der Ergebnisse	36
4.3.3.1	Monitoring der Talflanke	37
4.4	Hoek-Brown Modell	40
4.4.1	Modellparameter	40
4.4.2	Berechnung Sicherheitsfaktor	42
4.4.2.1	Ermittlung der HB-Einhüllenden für das Grenzgleichgewicht	42
4.4.3	Kalibrierung der Modellparameter	50
4.4.3.1	Kennwerte	51
4.4.3.2	Ergebnisse	51
4.5	Mohr-Coulomb Modell	59
4.5.1	Modellparameter	59
4.5.2	Berechnung Sicherheitsfaktor	60
4.5.2.1	Anpassung Modellparameter	60
4.5.3	Kalibrierung der Modellparameter	61
4.5.3.1	Kennwerte	62
4.5.3.2	Ergebnisse	63
4.6	Resümee	69
4.6.1	Hoek-Brown Modell	69
4.6.2	Mohr-Coulomb Modell	69
4.6.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse	70
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	74
	Literaturverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	84

Kapitel 1

Problemstellung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung und Kalibrierung eines numerischen Modells zur Beurteilung der Stabilität der Talflanke Vals. Das Modell wird mithilfe der dreidimensionalen Finiten Differenzen Software FLAC3D, der Itasca Consulting Group berechnet. Für die Auswertung wird ein beobachteter Bereich mit dem simulierten verglichen und die Übereinstimmung mittels Kennzahlen bewertet.

Instabile Talflanken und die daraus resultierenden Massenbewegungen, wie z.B. Felsstürze, stellen vor allem im alpinen Raum ein erhöhtes Gefahrenpotential dar. Dies reicht von einem kleinen Felssturz ohne nennenswerte Schäden bis hin zur Naturkatastrophe mit Todesopfern. Die Simulation solcher Ereignisse, mithilfe numerischer Rechenverfahren und die daraus resultierende Einschätzung spielt eine wesentliche Rolle bei der Bewertung der Standsicherheit und Versagenswahrscheinlichkeit von Untersuchungsgebieten. Solche Rückrechnungen können dabei helfen, Gefahren und Risiken abzuschätzen.

In der Geotechnik bedient man sich schon seit jeher verschiedenster Methoden, um Abbruchereignisse von Felsböschungen und Talflanken vorherzusagen. Früher wurden vor allem mit empirischen Berechnungsansätzen gerechnet, heutzutage werden allerdings vermehrt analytische und numerische Methoden verwendet. Der stetige Fortschritt in der Entwicklung von Messtechnik und Monitoring ist nur einer der vielen Gründe dafür. Dadurch gibt es viele verschiedene Methoden und Wege, um Daten auf einfache, aber sehr präzise Weise zu erhalten. Auch die Auswertung solcher Daten erfolgt heutzutage durch die gesteigerte Rechenleistung von Computern wesentlich einfacher. Eine Vielzahl von Datenmengen kann binnen weniger Sekunden ausgewertet werden.

Die wichtigsten Vertreter der numerischen Methoden sind die Finiten Elemente Methode (FEM) und die Finiten Differenzen Methoden (FDM), welche auf kontinuumsmechanischen Berechnungsansätzen basieren, sowie die Diskreten Elementen Methode (DEM), welcher diskontinuumsmechanische Berechnungsansätze zugrunde liegen.

Moser hat bereits im Frühjahr 2020 eine Stabilitätsanalyse an der Felsböschung Vals durchgeführt. Dabei hat er das Gebirge als Diskontinuum betrachtet und mittels Synthetic Rock Mass

Modell (SRM-Modell) und der Diskreten Elemente Methode das Versagen rückgerechnet.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, einen Vergleich zwischen dem Hoek-Brownschen und dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium am Beispiel der Felsböschung Vals (Tirol), bei der sich am 24.12.2017 ein Felssturz mit einem Abbruchvolumen von circa 117.000 m³ ereignete. In der vorliegenden Arbeit wird durch eine Variierung der Festigkeitsparameter untersucht, wie genau die jeweiligen Parameter kalibriert werden können, um den tatsächlichen, also den beobachteten Bewegungsbereich (*observed area*) mit dem simulierten, berechneten Bewegungsbereich (*simulated area*) vergleichen zu können.

Dabei soll die Aussage getroffen werden, welches Modell sich besser dazu eignet, sprich welches zu einer größeren Übereinstimmung kommt. Diese Arbeit soll den Ausgangspunkt für weitere Forschungen im Bereich der Beurteilung der Standsicherheit von Talflanken bilden.

Kapitel 2

Numerische Modellierung

Nach Konietzky (2000) und Preh (2004) kann eine Klassifizierung numerischer Rechenverfahren nach folgenden drei Kriterien erfolgen:

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

Um eine Massenbewegung numerisch beschreiben zu können, kommen zwei verschiedene Modelle zum Einsatz. Diese numerischen Rechenmodelle können in kontinuumsmechanische und diskontinuumsmechanische Modelle unterschieden werden. Der Vorteil gegenüber analytischen Modellen wie z. B. dem Schlittenmodell nach Heim (1932) ist, dass sie während dem Sturzprozess die Verformungen der Masse abbilden können, vergleiche dazu Preh (2018).

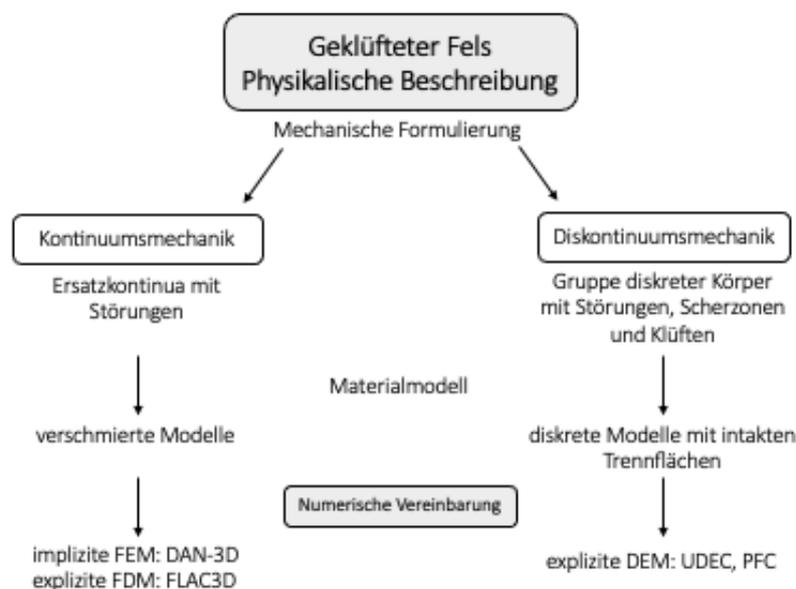


Abb. 2.1: Physikalische Beschreibung und Materialmodelle bei geklüftetem Fels (verändert nach Will und Konietzky, 1998)

2.1 Diskontinuums- und Kontinuumsmechanische Berechnungsansätze

Die mechanische Beschreibung eines Massensturzes erfolgt über ein kontinuumsmechanisches oder ein diskontinuumsmechanisches Modell. Im Flussdiagramm in Abbildung 2.1 werden die mechanische Formulierung, die Materialmodelle und die numerische Umsetzung grafisch dargestellt, sowie die unterschiedlichen Lösungsmethoden nach der mechanischen Beschreibung aufgezeigt.

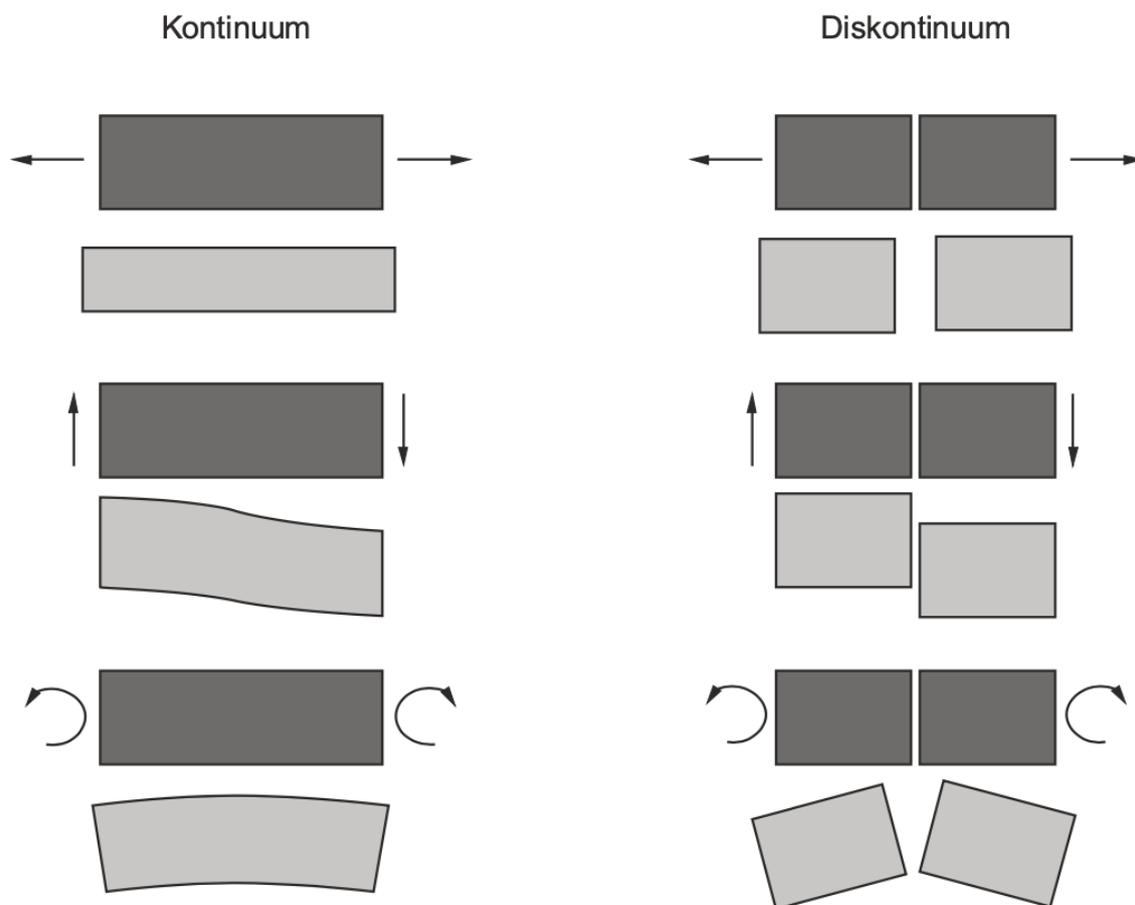


Abb. 2.2: Mechanisches Verhalten eines Kontinuums und eines Diskontinuums (Bock, 1981)

In der oben stehenden Abbildung 2.2 ist das Verhalten eines Kontinuums (Festkörper ohne wirksame Trennflächen) bzw. eines Diskontinuums (Festkörper mit wirksamen Trennflächen) bei einer mechanischen Belastung dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass bei einem Diskontinuumsmodell Kluftelemente vorliegen, die eine freie Beweglichkeit und Trennung einzelner Teilkörper im Verband ermöglichen, vergleiche dazu Prinz und Strauß (2018). Ein Kontinuum hingegen bildet einen einheitlichen Festkörper und lässt sich lediglich verformen.

Für den Nachweis der Standsicherheit werden üblicherweise diskontinuumsmechanische Modelle verwendet, während für Berechnungsansätze mit Verformungen und Spannungen meistens Kontinuumsmodelle genommen werden. (Prinz und Strauß, 2018)

Kontinuumsmechanische Modelle

Bei der kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise geht man davon aus, dass ein Modell als ein homogenes Medium wirkt. Dabei bleibt bei einer Formänderung die ursprüngliche Struktur/Form erhalten und die Verschiebungskomponenten sind kontinuierliche Funktionen des Raums, vergleiche dazu Preh (2004). Bei einem kontinuumsmechanischem Modell kann der Fels bzw. das Gebirge über das Hoek-Brown Modell mit verschmierten Ansätzen abgebildet werden.

Kontinuumsmechanische Modelle werden typischerweise entweder durch die Finiten Elemente Methode (FEM) oder die Finiten Differenzen Methode (FDM) berechnet. Typische Vertreter dieser Methoden sind der DAN-Code und FLAC3D der Itasca Consulting Group. Bei der gegenständigen Diplomarbeit wird das Modell als Kontinuum betrachtet und mithilfe der FDM durch das Programm FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) berechnet. Die genaue Beschreibung dieser Methoden erfolgt im Kapitel 2.1.2.

Diskontinuumsmechanische Modelle

Im Unterschied zur Kontinuumsmechanik wird bei der Diskontinuumsmechanik bei einer Formänderung die Gesamtstruktur nicht zusammengehalten und die diskreten Elemente sind frei beweglich (siehe Abbildung 2.2). Diese diskreten (distinkten) Blöcke und/oder Elemente bilden zusammen ein Kontinuum. Eine Gruppe diskreter Blöcke, welche Scherzonen, Störungen sowie Klüfte enthalten, bildet ein Diskontinuum. (Preh, 2004)

Alle aktuellen diskontinuumsmechanischen Modelle, die zur Berechnung von Massenbewegungen und Massenstürzen verwendet werden, basieren auf der Diskreten Elemente Methode (siehe dazu 2.1.1), welche von Cundall (1971) entwickelt wurde. Üblicher Vertreter dieser Methode sind der Particle Flow Code (PFC), UDEC sowie 3DEC, ebenfalls von der Itasca Consulting Group.

2.1.1 Diskrete Elemente Methode

Die Diskrete Elemente Methode (DEM) wurde 1971 von Dr. Peter Cundall, einem der Gründer der Itasca Consulting Group auf der Grundlage der mechanischen und geometrischen Diskontinuums-theorien entwickelt. Sie gilt als einer der wichtigsten Berechnungsmethoden von Massenstürzen bei diskontinuumsmechanischen Modellen. Dabei besteht das Gebirgsmodell aus zwei Komponenten, dem Gestein und den Trennflächen (Gasser, 2010).

Nach Preh (2004) kann die DEM folgendermaßen beschrieben werden:

- Das Modell besteht aus mehreren diskreten Elementen, die an sich ein Kontinuum bilden.
- Das Diskontinuum bilden viele diskrete Elemente. Untereinander entsteht eine Wechselwirkung, wenn diese Elemente in Kontakt sind oder in Kontakt treten können.

Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, ist es bei der diskreten Modellierung möglich, das gravitative Verhalten einzelner Blöcke zu bestimmen, da es untereinander zwischen den Blöcken zu einer Wechselwirkung kommt. Dabei können sich einzelne Blöcke des Diskontinuums aus der Einheit lösen. Der Kontakt zwischen den einzelnen Blöcken wird stets als „weich“ bezeichnet, vergleiche dazu Secklehner (2019). Dies bedeutet, dass das Eindringen eines Festkörpers möglich ist, solange sie in Kontakt sind. Das Pendant dazu wird von der Itasca Consulting Group (2016) als „harte Kontakte“ bezeichnet.

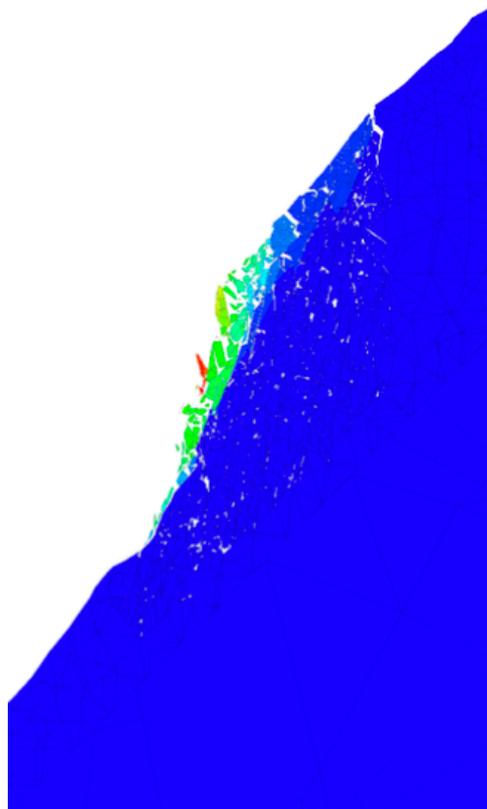


Abb. 2.3: Diskontinuumsmechanische Simulation eines Versagens mittels 3DEC (Moser, 2020)

2.1.2 Finite Elemente Methode / Finite Differenzen Methode

Zur Beschreibung von stark geklüftetem Fels werden in der Kontinuumsmechanik verschmierte Materialmodelle verwendet. Dabei behilft man sich mit dem impliziten Lösungsverfahren wie der Finiten Elemente Methode (FEM) sowie dem expliziten Lösungsverfahren, der Finiten Differenzen

Methode (FDM) (Will und Konietzky, 1998). In der Geomechanik eignet sich die FDM besonders gut für Systeme mit großen Deformationen, physikalischen Instabilitäten, starkem nicht linearem Verhalten und dynamischen Prozessen, vergleiche dazu Preh (2019b).

Bei der verschmierten Modellierung werden Trennflächen und Gestein zu einer homogenen Einheit verschmiert und es gibt dadurch keine Trennflächen mehr. Das Modell hat an jeder Stelle dieselben Eigenschaften (Gasser, 2010). Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Gebirges können in diesem Fall als isotrop betrachtet und mit „verschmierten“ Kennwerten beschrieben werden, vergleiche dazu Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (2017).

In der vorliegenden Arbeit wird ein solches Verhalten am Hoek-Brownschen Bruchkriterium angewendet. Dabei werden die Gebirgsparameter als verschmierte Parameter angesetzt.

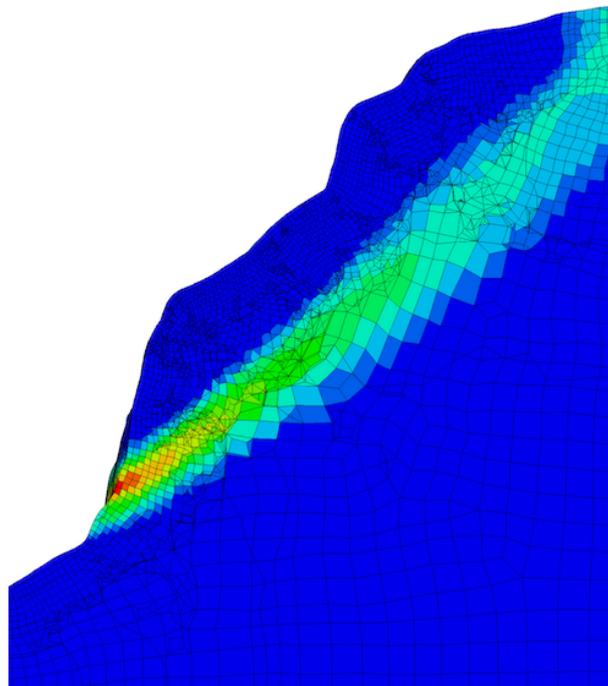


Abb. 2.4: Kontinuumsmechanische Simulation eines Versagens mittels FLAC3D

2.2 FLAC3D

FLAC („Fast Lagrangian Analysis of Continua“) ist ein Berechnungsprogramm, welches von der Itasca Consulting Group entwickelt wurde, um numerische Berechnungen von Kontinuumsmodellen im zwei- oder dreidimensionalen Raum durchzuführen. In dieser Diplomarbeit wurde die Version 7.00 des Programms FLAC3D verwendet.

2.2.1 Grundlagen

FLAC3D ist in der Lage dreidimensionale Modelle zu berechnen. Das Programm basiert auf der Methode der Finiten Differenzen und hat den Vorteil gegenüber der FEM, dass die Lokalisierung von Scherzonen besser abgebildet wird, siehe dazu Nagy (2013).

FLAC3D wurde als Programm entwickelt, welches mithilfe der expliziten Finiten Differenzen ein realistisches Verhalten zwischen Fels und Untergrund simuliert. Durch die explizite Zeitintegration werden die Differenzialgleichungen umgewandelt und mithilfe von inkrementellen Zeitschritten berechnet (Nagy, 2013). Dadurch lässt sich leicht ein komplexes Verhalten von Boden und Fels simulieren. Dadurch, dass die dynamische Bewegungsgleichung vollständig in den Lösungsprozess eingebunden ist, können verschiedene elastische und plastische Aufgabenstellungen, auch mit großen Verschiebungen, Buchzuständen oder plastischen Fliesen gelöst werden (Bauernfeind, 2013).

In FLAC3D erfolgt der Berechnungsablauf iterativ und kreisförmig. Ausgegangen wird von der allgemeinen Bewegungsgleichung nach Newton, aus der durch Kräfte und Spannungen neue Verschiebungen und Geschwindigkeiten berechnet werden. Indem die Geschwindigkeiten der einzelnen Punkte abgeleitet werden, können neue Spannungen ermittelt werden. Jeder Durchlauf in Abbildung 2.5 wird so lange wiederholt, bis sich Gleichgewicht einstellt, oder die vorgegebenen Berechnungsschritte erreicht sind. Ein Nachteil dieser Methode ist die große Anzahl an benötigten Berechnungsschritten und die enorme Rechenleistung. (Bauernfeind, 2013)

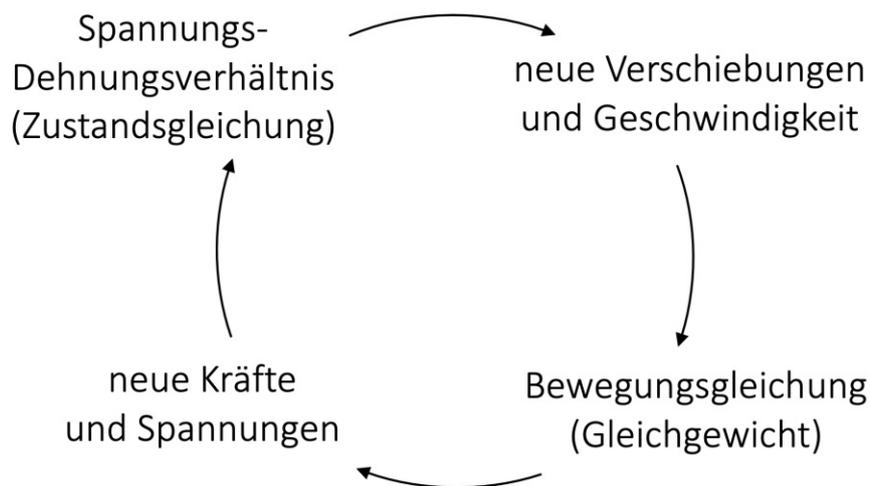


Abb. 2.5: Iterativer Berechnungsprozess in FLAC3D, frei übersetzt nach Itasca Consulting Group (2019)

Die Diskretisierung des Gebirges erfolgt durch ein Raster (grid). Die so erzeugten diskreten Elemente werden als Regionen oder Zonen bezeichnet, die Punkte an den Ecken als Gitterpunkte (gridpoints), vergleiche dazu Nagy (2013).

2.2.2 Materialmodelle

In FLAC3D gibt es aufgrund der kontinuumsmechanischen Berechnung mehrere Möglichkeiten, Modelle des Gebirges zu bemessen. In dieser Arbeit werden das Hoek-Brown Modell und das Mohr-Coulomb Modell miteinander verglichen. Da es sich bei den vorhandenen Festigkeitsparameter, welche von den zuständigen Geologen der Wildbach- und Lawinenverbauung ermittelt wurden, um Hoek-Brown Parameter handelte (semiempirische Parameter), wurden aus diesen sog. äquivalente Mohr-Coulomb Parameter berechnet.

2.2.2.1 Mohr-Coulomb

Da in der vorliegenden Diplomarbeit aus den semiempirischen Hoek-Brown Parametern (welche im Labor und im Gelände bestimmt wurden) die daraus resultierenden äquivalenten Mohr-Coulomb Parameter berechnet wurden, wird in den nachfolgenden Absätzen nur mehr auf die grundlegenden Erläuterungen des MC-Modells eingegangen. Für den theoretischen Hintergrund wird auf folgende Literatur verwiesen: Hoek (2006), Engl et al. (2008) und Mavko et al. (2009).

Das Mohr-Coulomb Kriterium ist das am häufigsten verwendete Versagenskriterium, das in der Geotechnik Anwendung findet. Viele geotechnische Analysemethoden und Programme erfordern die Verwendung dieses Festigkeitsmodells. Das Mohr-Coulomb Kriterium beschreibt eine lineare Beziehung zwischen Normal- und Schubspannung σ_n und τ (oder maximalen und minimalen Hauptspannungen) beim Versagen.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2.1)$$

Dabei sind c und φ die Scherparameter Kohäsion und Reibungswinkel des Bodens. Übersteigt die Schubspannung die Festigkeitsgrenze des inneren Scherwiderstandes, dann kommt es zu einem Bruch (Versagen). Die maximalen und minimalen Hauptspannungen σ_1 und σ_3 lassen sich nach Gleichung 2.2 berechnen. Die Abbildung 2.6 stellt den Mohrschen Spannungskreis sowie die Bruchgerade im σ_n - τ -Diagramm dar.

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + c \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2.2)$$

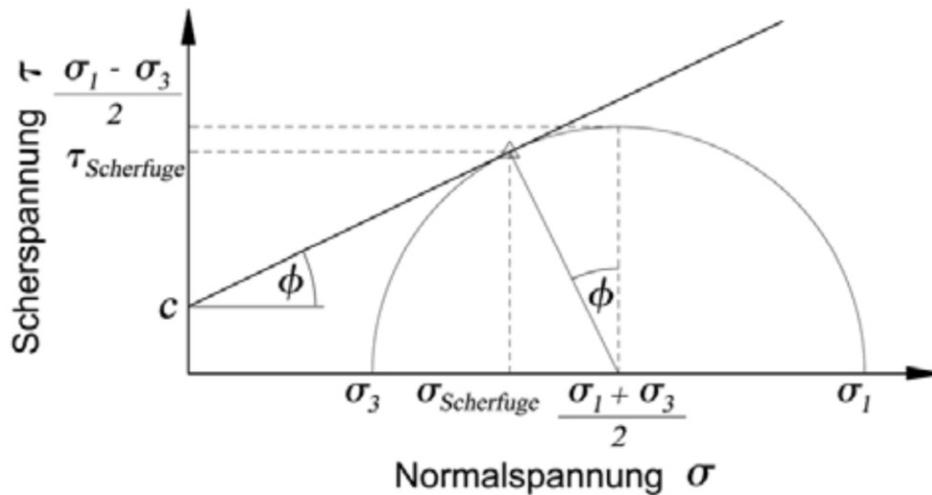


Abb. 2.6: Mohr-Coulombsches Bruchkriterium, aus Engl et al. (2008)

2.2.2.2 Hoek-Brown

Das Hoek-Brownsche Bruchkriterium ist ein semiempirisches Versagenskriterium, das die Festigkeit von Gestein in Form von einer nicht linearen Beziehung zwischen größter und kleinster Hauptspannungen, σ_1 und σ_3 , darstellt. Es bestimmt eine Bruchgerade, welche nahe an den Werten die bei Triaxialversuchen im Labor, am intakten Gestein und bei beobachteten Brüchen in Klufkörpern ermittelt wurde.

Das generalisierte Hoek-Brown Bruchkriterium wurde von Hoek und Brown (1997) folgendermaßen definiert:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.3)$$

wobei σ_{ci} die einaxiale Druckfestigkeit des intakten Gesteins (UCS) ist und m_b , s und a Materialparameter sind, die mit dem Geological Strength Index und dem Auflockerungsfaktor in Verbindung gebracht werden können.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2.4)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (2.5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (2.6)$$

m_b ... Materialparameter für das Gebirge

m_i ... Materialparameter für das intakte Gestein

D ... Auflockerungsfaktor

GSI ... Geological Strength Index

Aus der Formel 2.3 lassen sich in einem weiteren Schritt die Normalspannung σ_n und die Schubspannung τ für das verallgemeinerte Hoek-Brown Kriterium berechnen. Die Gleichungen ergeben sich nach Hammah et al. (2005) wie folgt:

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \frac{\sqrt{1 + a m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}}}{2 + a m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}} \quad (2.7)$$

$$\sigma_n = \sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \frac{a m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}}{2 + a m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}} \quad (2.8)$$

Der GSI ist ein wesentlicher Parameter beim HB-Kriterium. Zur Schätzung des GSI können zwei Tabellen von Hoek und Marinos (2000) verwendet werden (siehe Abbildung 2.8a und 2.8b). Der Geological Strength Index reicht von etwa 10 für schlechte Gesteinsmassen bis 100 für intaktes Gestein. Sollte der GSI unter einem Wert von 25 liegen, so gelten laut Hoek und Brown (1997) folgende Formeln:

$$s = 0 \quad (2.9)$$

$$a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (2.10)$$

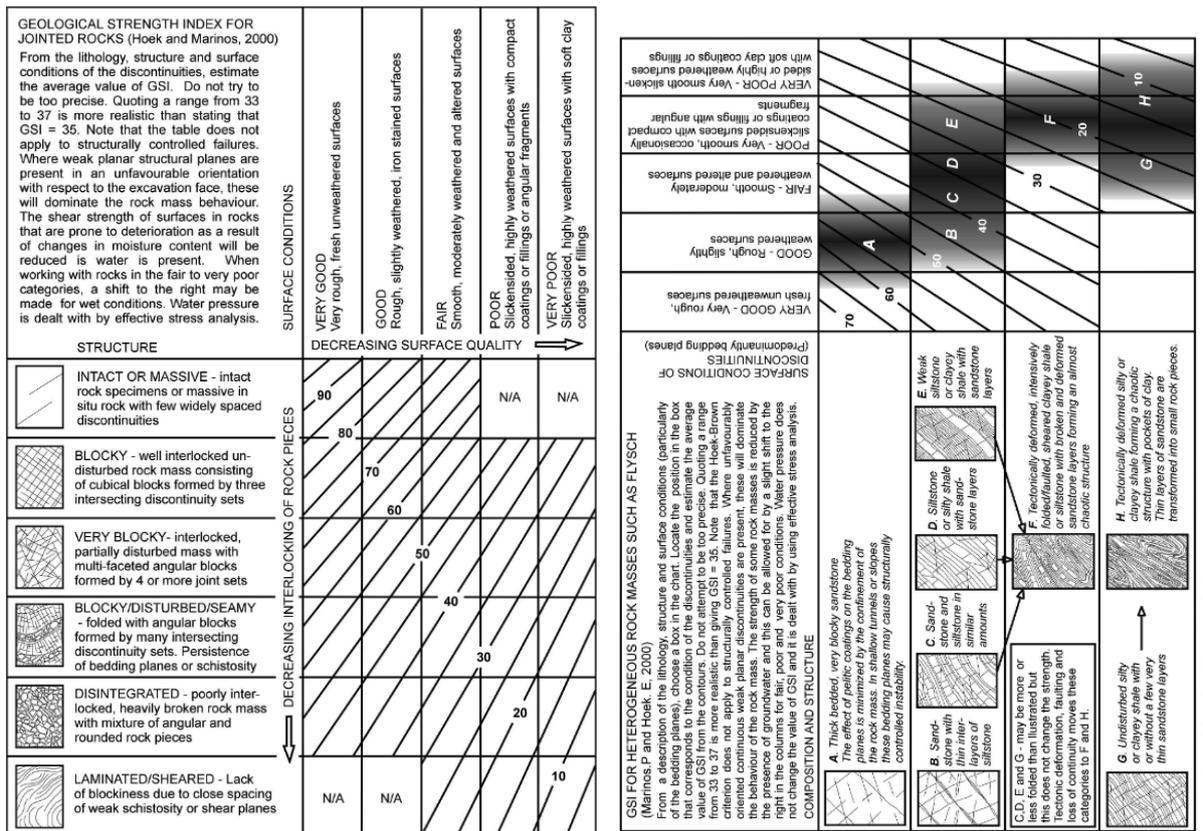
Rock type	Class	Group	Texture			
			Course	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19	Siltstone 9	Claystone 4
			← Greywacke (18) →			
	Non-Clastic	Organic	← Chalk (7) →			
			← Coal (8-21) →			
	Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8		
	Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13		
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists (10)	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
			Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
		Norite 22				
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

Abb. 2.7: Übliche Werte für den Materialparameter m_i , aus Hoek, Kaiser et al. (1995)

Wie Hoek & Brown (1997) feststellen, kann der Parameter m_i nur durch Triaxialversuche an Kernproben bestimmt oder anhand einer qualitativen Beschreibung des Gesteinsmaterials (siehe dazu Abbildung 2.7) geschätzt werden. Das empirische Kriterium ermöglicht die Verwendung eines Näherungswerts für den Materialparameter m_i für ein bestimmtes Gestein, und sie hat einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften des Gesteins.

Der Parameter m_i hängt mit den Reibungseigenschaften des Gesteins zusammen und ändert sich mit der Art des Gesteins, seiner mineralischen Zusammensetzung, der Verzahnung der Körner, der Korngröße usw. Große m_i -Werte in der Größenordnung von 15 bis 25 führen zu

steil geneigten Mohrschen Bruchgeraden und hohen Reibungswinkeln bei niedrigen effektiven Normalspannungswerten. Diese großen *mi*-Werte werden in der Regel mit spröden magmatischen und metamorphen Gesteinen wie Andesiten, Gneisen und Graniten in Verbindung gebracht. Niedrigere Werte, in der Größenordnung von 3 bis 7, führen zu niedrigeren Reibungswinkeln und werden eher mit duktilen Karbonatgesteinen wie Kalkstein und Dolomit in Verbindung gebracht (Sari, 2010).



(a) Tabelle zur Bestimmung des GSI bei geklüftetem Gestein (b) Tabelle zur Bestimmung des GSI bei heterogenem Gestein

Abb. 2.8: Tabellen zur Charakterisierung der Gebirgsmasse sowie Abschätzung der Verformbarkeit und Gebirgsfestigkeit, nach Hoek und Marinos (2000)

Der Parameter *D* ist ein Faktor, der vom Grad der Störung/Auflockerung abhängt. Der vorgeschlagene Wert des Auflockerungsfaktors ist *D* = 0 für ungestörten Fels und *D* = 1 für vollkommen aufgelockerten Fels. Die Größe des Störungsfaktors wird durch Sprengschäden und Spannungsabbau infolge der Abtragung des Deckgebirges beeinflusst. In dieser Arbeit wird der Auflockerungsfaktor mit dem Wert *D* = 0 angesetzt. In Abbildung 2.9 sind einige Beispiele üblicher Werte für *D* dargestellt.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation

Abb. 2.9: Beispiele für den Auflockerungsfaktor D , nach Hoek, Carranza-Torres et al. (2002)

2.2.2.3 In FLAC3D implementierte HB-Parameter

Die numerische Implementierung des Hoek-Brown-Modells verwendet eine lineare Annäherung (siehe Abbildung 2.10), wobei die nicht lineare Versagensfläche kontinuierlich durch die Mohr-Coulomb-Tangente an das aktuelle Belastungsniveau angenähert wird, vergleiche dazu Itasca Consulting Group (2019). Das Mohr-Coulombsche Tangentenkriterium lautet somit:

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_{\phi c} + 2 c_c \sqrt{N_{\phi c}} \quad (2.11)$$

wobei

$$N_{\phi c} = \frac{1 + \sin \phi_c}{1 - \sin \phi_c} = \tan^2 \left(\frac{\phi_c}{2} + 45^\circ \right) \quad (2.12)$$

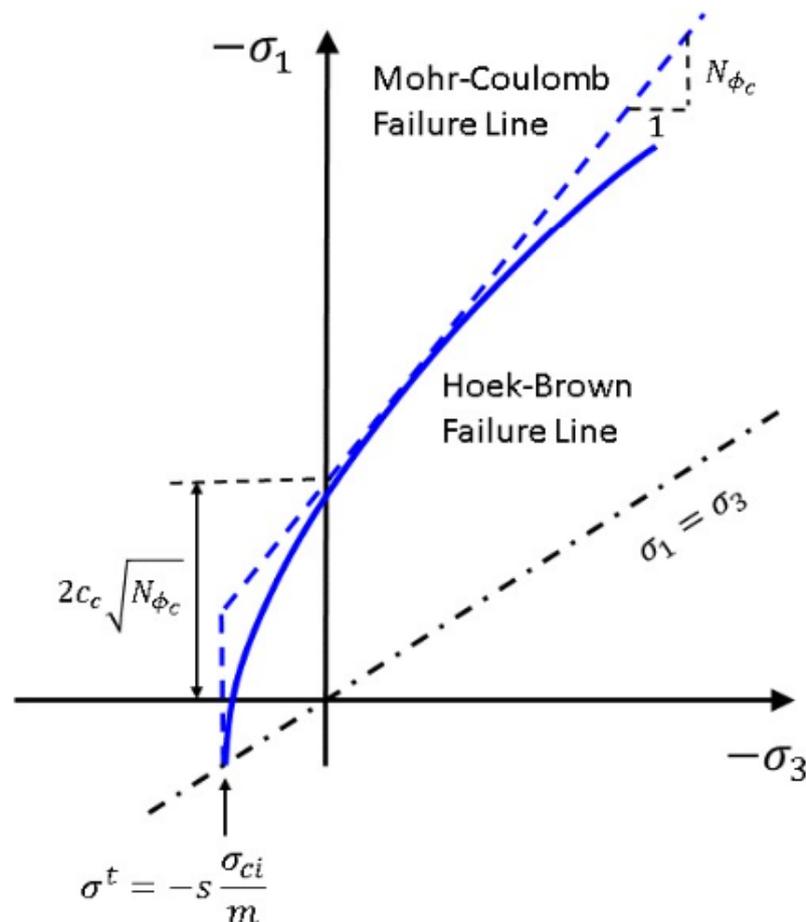


Abb. 2.10: Hoek-Brownsche Bruchkriterium und die Mohr-Coulombsche Approximation (Itasca Consulting Group, 2019)

FLAC3D legt sich an jeden Punkt für σ_3 eine Tangente an die HB-Bruchgeraden und berechnet die scheinbare Kohäsion c_c und den scheinbaren Reibungswinkel ϕ_c . Nach der Itasca Consulting Group (2019) errechnen sich die Parameter folgendermaßen:

$$\phi_c = \sin^{-1} \left(\frac{N_{\phi_c} - 1}{N_{\phi_c} + 1} \right) \quad (2.13)$$

$$c_c = \frac{\sigma_c^{UCS}}{2 \sqrt{N_{\phi_c}}} \quad (2.14)$$

wobei

$$N_{\phi_c} = 1 + a m_b \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1} \quad (2.15)$$

$$\sigma_c^{UCS} = \sigma_3 (1 - N_{\phi_c}) + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.16)$$

Mithilfe der scheinbaren MC-Parameter wurde im Kapitel 4.4.2.1 die Hoek-Brown Einhüllende für das Grenzgleichgewicht ermittelt.

2.2.2.4 Äquivalente MC-Parameter

Da die meisten geotechnischen Programme auf der Grundlage des Mohr-Coulombschen Bruchkriteriums aufgebaut sind, oder wie in diesem Fall die HB-Parameter bekannt sind, müssen in der Praxis der äquivalente Reibungswinkel ϕ' und die äquivalente Kohäsion c' berechnet werden. Dies geschieht durch Anpassen einer linearen Beziehung an die HB-Kurve, die durch Lösen von Gleichung 2.1 erzeugt wird. Bei der Anpassung werden die Bereiche oberhalb und unterhalb der Mohr-Coulomb-Kurve ausgeglichen (Hoek, 2006).

In Abbildung 2.11 sind das Hoek-Brown-Kriterium und die äquivalente Mohr-Coulomb Bruchgerade dargestellt. Da die äquivalente Mohr-Coulomb Bruchgerade, welche als Sekante dargestellt wird, linear ist, kann sie die Hoek-Brown Kurve nicht vollständig abdecken. Unterteilt man Abbildung 2.11 in drei Zonen, nämlich Region 1, Region 2 und Region 3, so zeigt sich, dass die Verwendung äquivalenter Mohr-Coulomb Parameter die Scherfestigkeit im Vergleich zur Hoek-Brown-Kurve überschätzen kann, wenn die Gesteinsspannungsbedingungen in die Regionen 1 und 3 fallen (Li et al., 2008). Weitere Einzelheiten zum Anpassungsprozess sind unter anderem in Hoek, Carranza-Torres et al. (2002) zu finden.

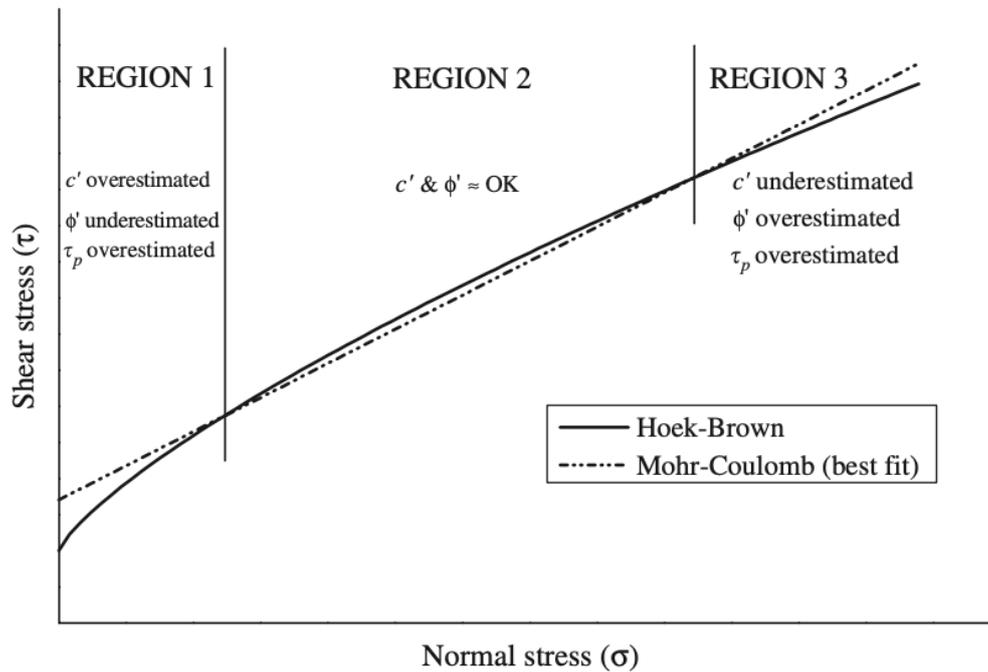


Abb. 2.11: Genauigkeit der MC-Parameter bei Anpassung der Kurve, nach Li et al. (2008)

Durch die Anpassung der Sekante ergeben sich nach Hoek (2006) für die äquivalenten MC-Parameter ϕ' und c' folgende Formeln:

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left((1+2a)s + (1-a)mb\sigma'_{3n} \right) (s + mb\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6amb(s + mb\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (2.17)$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{6amb(s + mb\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6amb(s + mb\sigma'_{3n})^{a-1}} \right) \quad (2.18)$$

mit

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (2.19)$$

Für die Berechnung der Standsicherheit, schlagen Hoek, Carranza-Torres et al. (2002) vor, σ'_{3max} nach folgender Formel abzuschätzen:

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,91} \quad (2.20)$$

wobei H die Höhe der Felsböschung und γ die Wichte des Gesteins sind. Für einen Spannungsbereich von $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$ kann die Druckfestigkeit des Gesteines σ'_{cm} folgendermaßen ermittelt werden:

$$\sigma'_{cm} = \frac{(mb + 4s - a(mb - 8s))(mb/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (2.21)$$

Mit der Methode der äquivalenten MC-Parameter wurden die Berechnungen in Kapitel 4.5 durchgeführt. Dabei sind die Parameter ϕ' und c' mit der Software RocData berechnet worden.

2.2.3 Festigkeitsreduktionsmethode

Die Festigkeitsreduktionsmethode ist eine beliebte numerische Methode zur Bewertung des Sicherheitsfaktors in der Geomechanik (siehe z. B. Dawson und Roth 1999 sowie Griffiths und Lane 1999). Obwohl die Methode im Zusammenhang mit Mohr-Coulomb Materialien ausgiebig verwendet wurde, gibt es in der Literatur nur einige wenige Referenzen, die den Ansatz auf nicht lineare Bruchkriterien im Allgemeinen ausweiten, vergleiche dazu Hammah et al. (2005).

Um die Methode der Festigkeitsreduktion anwenden zu können, muss ein Sicherheitsfaktor berechnet werden. Das Verfahren kann in FLAC3D manuell durchgeführt werden, indem ausgewählte Festigkeitseigenschaften bis zum Versagen reduziert werden, oder automatisch. Ein Sicherheitsfaktor kann für jeden relevanten Problemparameter definiert werden, indem das Verhältnis zwischen dem berechneten Parameterwert unter gegebenen Bedingungen und dem kritischen Wert des Parameters, bei dem ein inakzeptables Ergebnis eintritt, ermittelt wird.

Zunächst ermittelt das Programm eine „charakteristische Reaktionszeit“, d. h. eine repräsentative Anzahl von Berechnungsschritten (bezeichnet mit N_r), die die Reaktionszeit des Systems charakterisiert. Die charakteristische Reaktionszeit wird ermittelt, indem die Materialfestigkeit (bei Mohr-Coulomb Modell die Kohäsion und Zugfestigkeit) auf einen großen Wert gesetzt wird, eine große Änderung der inneren Spannungen vorgenommen wird und ermittelt wird, wie viele Schritte erforderlich sind, damit das System zum Gleichgewicht zurückkehrt. Standardmäßig ist für N_r eine Höchstgrenze von 50.000 festgelegt. Wenn das Modell das Gleichgewicht nicht innerhalb von 50.000 Schritten erreicht, wird die Berechnung angehalten und die Ermittlung des Sicherheitsfaktors kann nicht abgeschlossen werden. (Itasca Consulting Group, 2019)

Ein Sicherheitsfaktor, der größer als eins ist, deutet auf stabile Verhältnisse hin. Daher wird der Sicherheitsfaktor als der tatsächliche Wert über dem kritischen Parameterwert angenommen, wenn der Parameterwert über dem kritischen Wert akzeptabel ist, und andernfalls als der Keh-

wert dieses Verhältnisses.

Nachdem der Sicherheitsfaktor F für das jeweilige Modell bestimmt wurde, kann die Reduzierung der Festigkeitsparameter vorgenommen werden.

Festigkeitsreduktion für Mohr-Coulomb

Wenn das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb verwendet wird, werden die Kohäsion c und der Reibungswinkel ϕ durch den berechneten Sicherheitsfaktor reduziert. Die Gleichungen zur Berechnung der reduzierten Parameter sind:

$$c^{red} = \frac{1}{F} c \quad (2.22)$$

$$\phi^{red} = \arctan\left(\frac{1}{F} \tan\phi\right) \quad (2.23)$$

Zusätzlich zur Kohäsion und zum Reibungswinkel kann die Zugfestigkeit σ_t abgemindert werden. Die Gleichung sieht folgendermaßen aus:

$$\sigma_t^{red} = \frac{1}{F} \sigma_t \quad (2.24)$$

Festigkeitsreduktion für Hoek-Brown

Beim Hoek-Brownschen Bruchkriterium werden die Formeln 2.13 und 2.14 sowie jene der Gleichung 2.7 durch den Sicherheitsfaktor reduziert. Dies geschieht durch folgende Formeln:

$$\phi_c^{red} = \arctan\left(\frac{1}{F} \tan\phi_c\right) \quad (2.25)$$

$$c_c^{red} = \frac{1}{F} c_c \quad (2.26)$$

$$\tau_{red} = \frac{1}{F} \tau \quad (2.27)$$

In Abbildung 2.12 ist die Einhüllende des verallgemeinerten Hoek-Brown-Kriteriums und die sich

ergebende Kurve, wenn die Hüllkurve um einen Faktor F reduziert wird, dargestellt. Auf der Abszisse sind die Normalspannungen σ_n aufgetragen und auf der Ordinate die Schubspannungen τ .

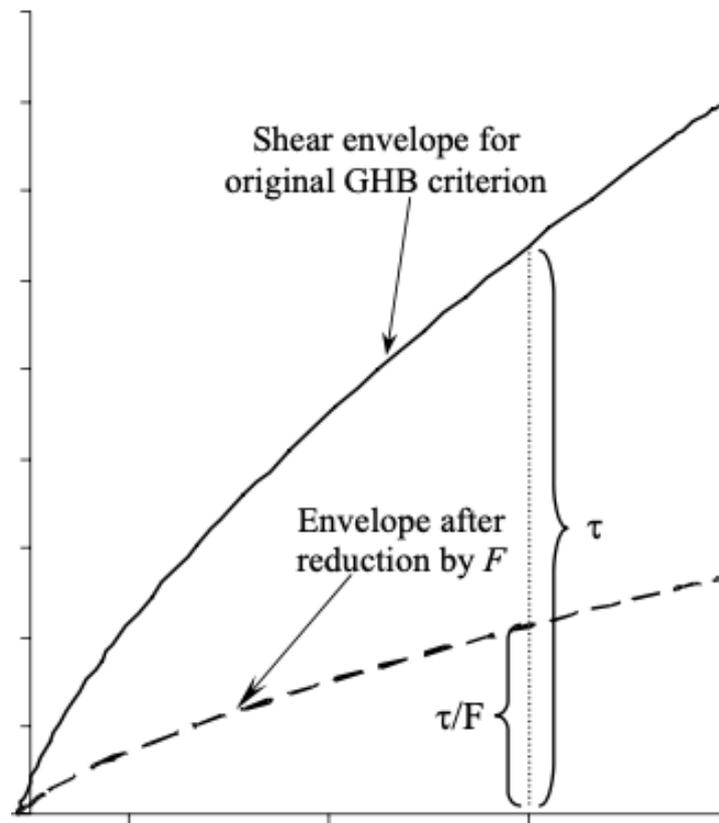


Abb. 2.12: Schub- und Normalspannungskurve beim HB-Kriterium und die reduzierte HB-Einhüllende, nach Hammah et al. (2005)

Kapitel 3

Kalibrierungsmethode

Ziel der Kalibrierung eines Modells ist die bestmögliche Abbildung (Rückrechnung) einer beobachteten Hangbewegung. Dazu wurden die Festigkeitsparameter variiert und die Ergebnisse quantitativ mittels Kennzahlen bewertet. Das Ergebnis kann auch durch andere Modellparameter wie z. B. durch die Qualität des Geländemodells, die Hanghöhe, die aufgebrachte Last, etc. beeinflusst werden. Den größten Einfluss hat aber die Festigkeit und darum wurde diese Parameter zur Kalibrierung benutzt. Ausgangspunkt der Kalibration ist das mithilfe der Methode der Festigkeitsreduktion (siehe dazu 2.2.3) ermittelte Grenzgleichgewicht unter Anwendung des Bruchkriteriums nach Hoek-Brown und Mohr-Coulomb mit äquivalenten MC-Parametern.

FLAC3D selbst bietet nicht die Möglichkeit, automatisch Modellparameter zu kalibrieren und die Modellergebnisse mit einem tatsächlichen Ereignis zu vergleichen. Diese Vorgänge müssen händisch und Schritt für Schritt durchgeführt werden. Zur Visualisierung der Ergebnisse wird ein Python-Skript verwendet. Dies wird näher im Abschnitt 3.2 beschrieben.

Um das Modellergebnis des zu untersuchenden Ereignisses mit dem beobachteten Ereignis zu vergleichen, werden der tatsächliche, also der beobachtete Bewegungsbereich (*observed area*) und der simulierte, berechnete Bewegungsbereich (*simulated area*) miteinander verglichen und es wird eine Übereinstimmung berechnet.

3.1 Parameterkalibrierung

Um eine Kalibrierung der Modellparameter und ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, müssen folgende Schritte durchgeführt werden:

1. Die Kalibrierung erfolgte durch die Variation der Modellparameter für Grenzgleichgewicht. Dazu wurde der Wertebereich jeweils zweier Modellparameter (z. B. *GSI* und *D*) variiert. Jede Variation des Parameterpaares bedarf der Neuberechnung der Talflanke.
2. Die Beurteilung des Systemzustandes erfolgte anhand der Verschiebungen oder Geschwindigkeiten des Modells. Dazu wird mit vorher festgelegten Grenzen jener Bereich ermittelt,

der sich im Definitionsbereich befindet. Dabei entsteht eine Vielzahl an Punktkoordinaten, welche in einem `.csv`-File gespeichert werden.

3. Im nächsten Schritt werden die Punktkoordinaten in einem `Python`-Code eingelesen. Dieser vergleicht den beobachteten Bewegungsbereich (*observed area*) mit dem soeben berechneten Bewegungsbereich (*simulated area*). Die Auswertung erfolgt anhand der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Kriterien.
4. Die Ergebnisse werden quantitativ mittels Kennzahlen bewertet und vom Programm ausgegeben. Zusätzlich wird automatisch eine Abbildung erstellt, die den Vergleich zwischen Berechnung und Beobachtung anhand der Kalibrierungskriterien darstellt. Mithilfe einer Farbmatrix können die Ergebnisse tabellarisch dargestellt werden (vgl. Abschnitt 3.2).

3.1.1 Beurteilungsbasis

Observed Positives (OP) und Observed Negatives (ON)

Um die Genauigkeit des Modells zu bewerten und den Kalibrierprozess der Modellparameter anhand der Kalibrierungskriterien (siehe Abschnitt 3.1.2) zu bewerten, wird ein Vergleich zwischen berechnetem (*simulated area*) und beobachtetem Bereich (*observed area*) durchgeführt. Jene Bereiche der beobachteten Bewegung bzw. solche, die sich innerhalb des simulierten Bereiches befinden, werden als *observed positives* (OP) bezeichnet. Im Gegensatz dazu werden Bereiche, die außerhalb der beobachteten Bewegung liegen, als *observed negatives* (ON) beschrieben. (Hartl, 2019)

Predicted Positives (PP) und Predicted Negatives (PN)

Ein Bereich wird dann als positiv simuliert betrachtet, wenn der berechnete Bereich der Simulation, dem zuvor definierten Bereich entspricht. Ein nach dieser Definition bestimmter Bereich wird als *predicted positive* (PP), andernfalls als *predicted negative* (PN) bezeichnet. (Hartl, 2019)

3.1.2 Kalibrierungskriterien

Nach Hartl (2019) ergeben sich aus der Kombination von Observed Positives, Observed Negatives, Predicted Positives und Predicted Negatives vier Qualitätskennzahlen zur Beschreibung der Modellgenauigkeit:

1. True Positive (TP): Ein Teilbereich ist ein True Positive, wenn Beobachtung (*observed area*) und Berechnung (*simulated area*) übereinstimmen (vgl. Abbildung 3.1). Ein True Positive ist somit eine Kombination aus Observed Positive und Predicted Positive.
2. True Negative (TN): Ein positiver Teilbereich liegt außerhalb der berechneten und der beobachteten Bewegung. Ein True Negative ist daher eine Kombination aus Predicted Negative und Observed Negative.

3. False Positive (FP): Ein Teilbereich wird innerhalb des simulierten Bereiches 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 Teilbereich wird innerhalb eines beobachteten Bereiches nicht als positiv berechnet. Ein False Negative ist daher eine Kombination aus Observed Positive und Predicted Negative. (Hartl, 2019)

Man kann die vier Kalibrierungskriterien True Negative, True Positive, False Negative und False Positive auch folgendermaßen beschrieben: Ein True Negative stimmt mit einer präzisen Vorhersage eines außerhalb der Gefährdung liegenden Bereiches überein, ein True Positive entspricht einem korrekt angezeigten Alarm. Ein False Positive zeigt einen falschen Alarm, ein False Negative einen versäumten Alarm an. (Hartl, 2019)

In der untenstehenden Grafik (vgl. Abbildung 3.1) werden die Kalibrierungskriterien veranschaulicht:

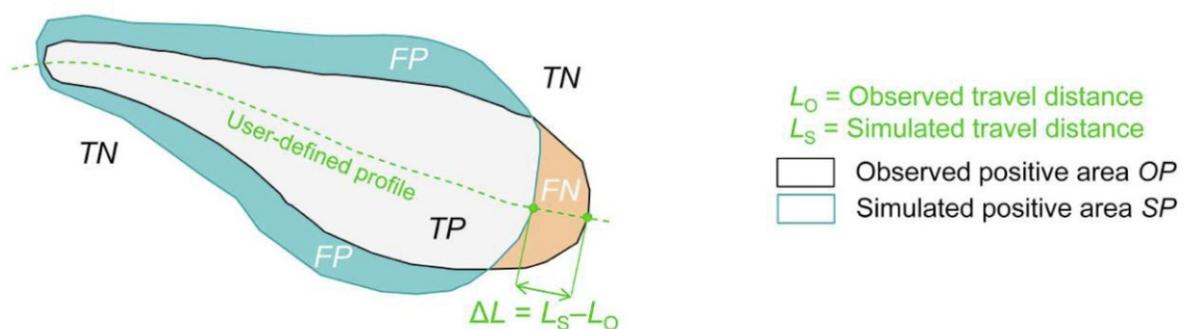


Abb. 3.1: Kalibrierungskriterien TP, TN, FP und FN nach Mergili et al. (2017), verändert

3.1.3 Validierung

Critical Success Index (CSI)

Ein maßgebender Index für die Beschreibung der erreichten Simulationsgenauigkeit ist der Critical Success Index (CSI). Er spiegelt den prozentualen Anteil positiv richtig berechneter Teilbereiche eines beobachteten Gebietes (*observed positive area*) an der Summe der berechneten Teilbereiche des durch die Berechnung erhaltenen bewegten Bereichs (*simulated positive area*) wider. (Hartl, 2019)

Der Index CSI wird nach Mergili et al. (2017) sowie Formetta et al. (2016) folgendermaßen bestimmt:

$$CSI = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (3.1)$$

Wenn ein Wert von 1 erreicht wird, gibt es eine hundertprozentige Übereinstimmung zwischen dem simulierten Bereich und dem beobachteten Bereich. In diesem Fall spricht man von einem Optimum.

Accuracy (ACC)

Ein weiterer Wert zur Bewertung und Einschätzung einer erreichten Modellgenauigkeit ist neben dem CSI Index, der Wert von Accuracy (ACC). Er erreicht mit einem Wert von 1 seine optimale Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung. Sein Definitionsbereich liegt also zwischen 0 und 1. ACC ist durch Formetta et al. (2016) wie folgt definiert:

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (3.2)$$

Anders als beim Critical Success Index, wird beim ACC der Wert von True Negative mitberücksichtigt (vgl. dazu Gleichung 3.1 und 3.2). (Hartl, 2019)

Distance to perfect classification (D2PC)

Der Index D2PC (*Distance to perfect classification*) kann Werte zwischen 1 und 0 annehmen, wobei das Optimum hier beim Wert 0 liegt. Nach Formetta et al. (2016) und Mergili et al. (2017) wird der Index folgendermaßen bestimmt:

$$D2PC = \sqrt{(1 - TPR)^2 + FPR^2} = \sqrt{\left(1 - \frac{TP}{OP}\right)^2 + \left(\frac{FP}{ON}\right)^2} \quad (3.3)$$

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{TP}{OP} \quad (3.4)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} = \frac{FP}{ON} \quad (3.5)$$

TPR steht in der Gleichung 3.3 für Richtig-Positiv-Rate, nach Gleichung 3.4 und FPR nach Gleichung 3.5 für Falsch-Positiv-Rate.

Heidke Skill Score (HSS)

PAUL HEIDKE¹ definierte 1926 den Heidke Skill Score (HSS) (Hyvärinen, 2014), der vorwiegend bei meteorologischen Vorhersagen verwendet wird und der ein Index für kategorische Vorhersagen

¹PAUL HEIDKE (1877-1953), Deutscher Meteorologe und Autor

ist, 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 (Hartl, 2019). Die Ermittlung des HSS erfolgt nach Heidke (1926) durch folgende Gleichung:

$$HSS = \frac{2 (TP \cdot TN - FP \cdot FN)}{(TP + FP)(FP + TN) + (TP + FN)(FN + TN)} \quad (3.6)$$

Der HSS kann Werte zwischen $-\infty$ und 1 annehmen, wobei auch hier ein Wert gleich 1 eine hundertprozentige Übereinstimmung bedeutet.

3.1.4 Zusammenstellung der Indizes

Die in Abschnitt 3.1.3 erläuterten Parameterkalibrierungskriterien, anhand deren die jeweils erzielte Modellgenauigkeit durch Vergleich der simulierten Bereiche mit den beobachteten Bereichen im Verlauf der Parametervariation bewertet werden kann, sind in der nachstehenden Tabelle nach Hartl (2019) zusammengefasst:

Tab. 3.1: Kalibrierungskriterien der Parametervariationen

Index	Definitionsbereich	Optimum
CSI	[0,1]	1
ACC	[0,1]	1
D2PC	[0,1]	0
HSS	$[-\infty, 1]$	1

3.2 Ergebnisvisualisierung

Nachdem die in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Kalibrierungskriterien mittels eines `Python`-Codes berechnet wurden, müssen sie noch visualisiert werden. Dies geschieht mit einem weiteren `Python`-Code, welcher eine `.png` Datei erstellt und die in einem ausgewählten Ordner hinterlegt wird. Die Bezeichnung wird vom Benutzer selbst gewählt. In Abbildung 3.2 wird die Visualisierung der Kalibrierungskriterien dargestellt, welche vom `Python`-Code ausgegeben werden.

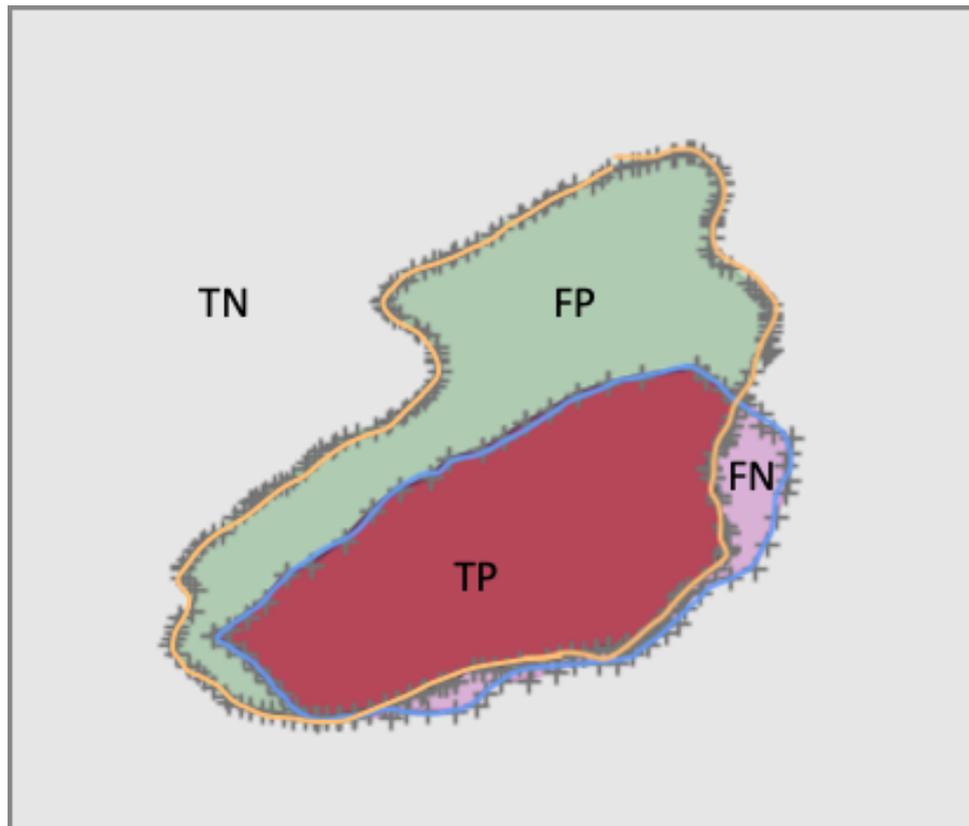


Abb. 3.2: Vergleich Berechnung (gelb umrandeter Bereich) und Beobachtung (blau umrandeter Bereich) anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN

Dabei sind die Bereiche wie folgt definiert:

- roter Bereich = True Positive (TP)
- grüner Bereich = False Positive (FP)
- magentafarbener Bereich = False Negative (FN)
- grauer Bereich = True Negative (TN)

Der rote Bereich, also jener von TP, stellt die Schnittmenge zwischen dem tatsächlichen, also beobachteten Bewegungsbereich (*observed area*) und dem simulierten, berechneten Bewegungsbereich (*simulated area*) dar. Die äußeren Ränder der grau hinterlegten Umgebung kennzeichnen die physischen Modellgrenzen. Der blau umrandete Bereich begrenzt die beobachtete Hangbewegung. Die gelbe Umrandung stellt den berechneten Bereich dar.

Die aus den Kalibrierungskriterien berechneten Indizes (vgl. dazu Abschnitt 3.1.3), können mithilfe einer Farbmatrix zur Verdeutlichung der Ergebnisse dargestellt werden.

Kapitel 4

Felssturz Vals

Ziel dieser Arbeit ist es, die in den vorherigen Kapiteln 2 und 3 beschriebenen theoretischen Ansätze am Beispiel des Felssturzes Vals praktisch anzuwenden. Damit soll die Aussage getroffen werden, wie gut sich die beiden Bruchkriterien, jenes von Hoek-Brown und Mohr-Coulomb anwenden lassen. Dabei werden folgende Daten miteinander verglichen:

- jene der Wildbach- und Lawinenverbauung Tirols, die einen Bereich monitorisieren der in Bewegung ist (siehe Kapitel 4.3.3.1), mit
- dem simulierten bzw. berechneten Bereich (siehe Kapitel 4.4 und Kapitel 4.5).

4.1 Einleitung

Beim Felssturz in Vals (Tirol) donnerte rund 117.000 m³ Felsgestein, vergleiche dazu Preh (2019a), ins Tal und begruben die Valser Landesstraße (L230) bis zu 8 m hoch auf einem Abschnitt von circa 150 m Länge unter Steine und Geröll. Das Ablagerungsvolumen konnte mit rund 130.500 m³ bestimmt werden, was eine Volumszunahme infolge Erosion und Auflockerung der stark fragmentierten Sturzmasse von ca. 11,5 Prozent zufolge hatte. Mithilfe mehrerer LIDAR-Kampagnen vor und nach dem Felssturz war es möglich, digitale Höhenmodelle zu erstellen und somit die Differenz der Volumina zu bestimmen.

Die Ursache für den Massensturz am Heiligabend sei eine Verkettung diverser Umstände gewesen, so der ehemalige Chef der Tiroler Landesgeologie, Gunther Heißel, in einem Interview mit dem ORF Österreich (2017) am Tag nach dem Ereignis. Letztendlich waren mutmaßlich die Frost-Tau-Wechsel im Bündnerschiefer, einem feinkörnigen, dunklen Tongestein, die Auslöser. Durch das Gefrieren des Wassers in der porösen, kapillaren Struktur des Gesteines bei Temperaturen von unter 0 °C kommt es zu einer Frostsprengung, ausgelöst durch die Ausdehnung des Wassers. Erschwerend kam dazu, dass die Bergflanke in den Wintermonaten wegen ihrer über 55° Neigung stark lawinengefährdet war und es im Sommer häufig zu kleineren Steinschlägen kam, vergleiche dazu Moser (2020).

Ereignet hatte sich der Felssturz am Abend des 24. Dezembers 2017 gegen 18 Uhr Ortszeit. Glücklicherweise wurde niemand dabei verletzt und die Felslawine blieb nur wenige Meter vor einigen Wohngebäuden stehen. Ausläufer der Sturzmasse erreichten das Bachbett des Valser Bachs, welcher sich durch das gesamte Tal zieht. Dank des Schnees, welcher liegen gebliebenen war, konnten die Konturen des Massensturzes leicht aus der Luft ausgemacht und das Ausmaß schnell festgestellt werden. In Abbildung 4.1 ist dieser Schuttkegel durch den Schwarz-Weiß-Kontrast gut zu sehen.



Abb. 4.1: Schuttkegel des Massensturzes und seine Ausläufer (Wuertenberger, 2018)

Nach dem Felssturz kam die Frage auf, ob es noch zu weiteren möglichen Ablösungen in diesem Bereich kommen kann. Darum wird seither von der Wildbach- und Lawinenverbauung Tirol die Talflanke mittels Monitoring überwacht. Dabei wurde festgestellt, dass es einen instabilen Bereich gibt, der sich in Bewegung befindet.

Ziel war es nun, mittels eines kontinuumsmechanischen Berechnungsverfahren, durch die Software FLAC3D, diesen Bereich zu berechnen und mit dem beobachteten zu vergleichen. Eine diskontinuumsmechanische Berechnung mithilfe des Programms 3DEC, wurde von Moser, 2020 bereits durchgeführt.

4.2 Untersuchungsgebiet

4.2.1 Geografische Lage

Wie schon erwähnt, befindet sich das Untersuchungsgebiet im Valsertal. Dieses ist ein Seitental des Wipptales, ein in Nord-Süd-Richtung verlaufendes Tal im Süden Nordtirols, nahe der italienischen Grenze. Das etwa 6 km lange Valsertal befindet sich im Gemeindegebiet Vals und hat eine Fläche

von rund 48,7 km², auf der 527 Einwohner (Stand 1. Jänner 2021, Statistik Austria) zerstreut angesiedelt sind.



Abb. 4.2: Orthofoto des Untersuchungsgebietes (Quelle: Laser- und Luftbildatlas Tirol, verändert, <https://portal.tirol.gv.at>)

Das Tal erstreckt sich von St. Jodok am Brenner (ca. 1100 m. ü. d. M.) nach Osten bis nach Innervals (ca. 1500 m. ü. d. M.). Den Talschluss bilden die Zillertaler Alpen im Osten, mit dem Olperer mit einer Höhe von 3476 m. ü. d. M.. Er ist der Hauptgipfel und gleichzeitig der höchste Berg des Tuxer Kammes, welcher die Grenze zu Südtirol bildet. Die Abbildung 4.2 zeigt das Orthofoto des zu untersuchenden Gebietes.

4.2.2 Geologie und Geomorphologie

Das Valsertal befindet sich geologisch betrachtet am westlichen Ende des Tauernfensters. Dieses ist in den Ostalpen die tektonisch tiefste Einheit. Es erstreckt sich vom Brennerpass (Tirol) im Westen bis zum Katschberg (Kärnten) im Osten. Das Tauernfenster ist eine weit gespannte Aufwölbung, um das sich nach Rockenschaub et al. (2003) herum ein in Decken und Schuppen zerlegter Ring unterostalpiner und penninischer Gesteinsserien schließt. Der ehemalige Meeresboden des Penninischen Ozeans bildet den Ausgangspunkt für die Gesteine, die heute im Tauernfenster

freigelegt werden. In einem Zeitraum vor etwa 150 Millionen Jahren zwischen Oberer Jura bis Unterkreide wurde das Gebiet von den Gesteinsformationen des Ostalpins überschoben und dadurch tauchte die Platte in den Erdmantel ab, siehe dazu Krainer (2005). Dieser Vorgang wird Subduktion genannt. Dabei kann durch den Anstieg der Dichte der abgetauchte Teil bis tief in den Erdmantel absinken. Somit entstand eine geologische Störzone, welche eine entscheidende Rolle bei Versagen und Instabilitäten von Hängen und Böschungen spielt.

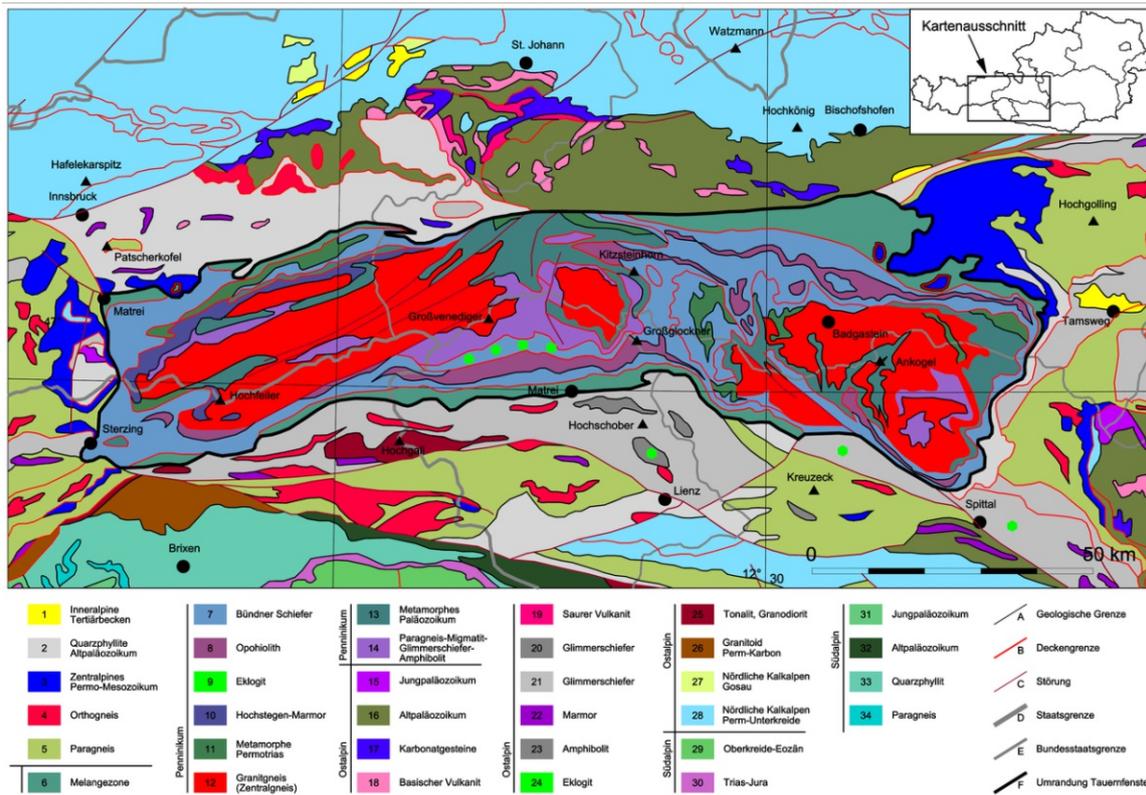


Abb. 4.3: Geologische Übersichtskarte des Tauernfensters 1:1.000.000 (Quelle: Wikimedia Commons)

In der oben stehenden Abbildung 4.3 ist die geologische Übersichtskarte des Tauernfensters mit seinen verschiedenen Bereichen dargestellt. Das Untersuchungsgebiet Vals befindet sich am linken Rand der Zone, oberhalb von Sterzing. Prägend für diese Region ist der Zentralgneis, welcher ein Sammelbegriff für die im Oberkarbon-Unterperm entstandenen Gesteine des Alten Daches ist, vergleiche dazu Krainer (2005). Dieser ist von Gesteinen der sogenannten Schieferhülle umgeben. Neben dem Zentralgneis dominiert ebenfalls der Kalk-Glimmerschiefer, auch Bündlerschiefer genannt, im westlichen Tauernfenster. Weitere gebräuchliche Namen für die Gesteinsserien sind „Äußere Schieferhülle“ sowie „Jüngere Schieferhülle“, siehe dazu Moser (2020).

Das Untersuchungsgebiet liegt in den oben genannten weichen, stark geklüfteten inneren Schieferhülle des Penninikums. Nach Moser (2020) wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass durch

Kalkglimmerschiefer ist innerhalb des Tauernfensters weit verbreitet. Typisch bei einem frischen Bruch ist seine graue bis graublauere Farbe. Verwittert dieser, färbt er sich gelb bis braun und blättert oberflächlich ab. Dabei bildet er sogenannte Bratschen.

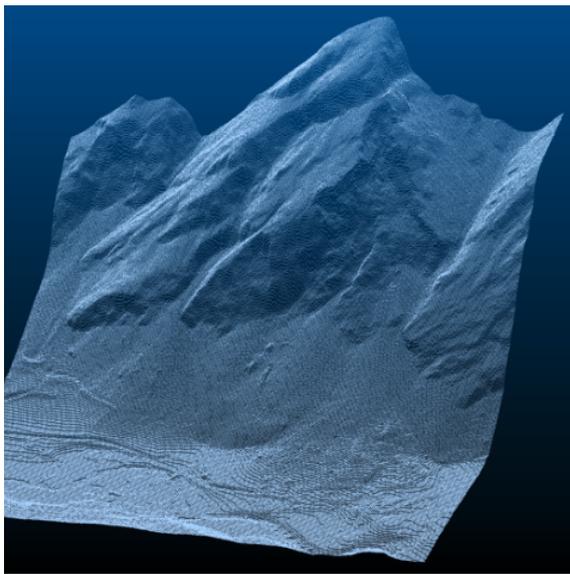
Nach Marks und Warnecke (2017) entstehen **Kalkphyllite** aus unreinem Kalkstein bzw. Mergel bei sehr schwacher Metamorphose (ca. 350 - 550 °C). Wird die Temperatur auf 550 - 650 °C erhöht, so wandelt sich der Kalkphyllit in Kalkglimmerschiefer um. Auffallend ist dabei der unterschiedlich hohe Glimmergehalt der beiden Gesteine. Kalkphyllit hat einen wesentlich höheren Glimmergehalt und eine engere Schieferung (Höck, 1969).

Die dritte Gesteinsgruppe bildet der **dunkle Phyllit**. Durch den hohen Anteil an Grafit verläuft sein Farbspektrum von dunkelgrau bis schwarz. Vergleicht man den dunklen Phyllit mit dem helleren Kalkphyllit, so nimmt beim ersteren der Quarz- und Feldspatgehalt ab, während der Glimmergehalt weiter steigt, vergleiche dazu Moser (2020). Diese Gesteinsart gilt vor allem in Verbindung mit Niederschlag als nicht besonders standfest. Rutschungen oder Versagen von Berghängen sind keine Seltenheit.

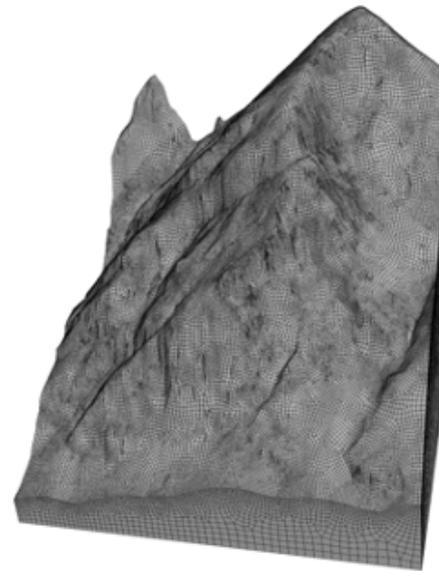
4.3 Modellierung

4.3.1 Untersuchte Modellgeometrie

Grundlage der numerischen Modellierung ist das digitale Geländemodell (DGM) der vom Felssturz betroffenen Talflanke. Nach dem Massensturzereignis wurden mittels mehreren fotogrammetrischen Geländeaufnahmen, welche sowohl durch terrestrische Aufnahmen als auch mithilfe von Drohnen durchgeführt wurden, hochauflösende Höhenmodelle erstellt, vergleiche dazu Hartl (2019). Mehrere LIDAR-Kampagnen (Light Detection and Ranging) wurden vom Amt für Wildbach- und Lawinverbauung durchgeführt, durch die man eine hochauflösende Punktwolke vor und nach dem Felssturz aufzeichnen konnte. In Abbildung 4.5a ist das Punktwolkenmodell, welches mithilfe der Software CloudCompare (Programm zum Bearbeiten und Zusammensetzen von Punktwolken) erstellt wurde, zu sehen. Damit es möglich war, das Geländemodell in FLAC3D zu übertragen, musste es in einen geschlossenen Flächenverband umgewandelt werden. Dabei wurde eine Software zur 3D-Modellierung namens Rhinoceros (Rhino) verwendet. Mithilfe von Griddle wurden anschließend hexaedrische Zonen für das Modell nach dem Felssturz in FLAC3D erstellt. Anschließend wurde es in FLAC3D importiert und die Modellparameter zugewiesen (siehe Abbildung 4.5b).



(a) Punktwolke aus der LIDAR-Kampagne



(b) In FLAC3D verwendetes Volumenmodell

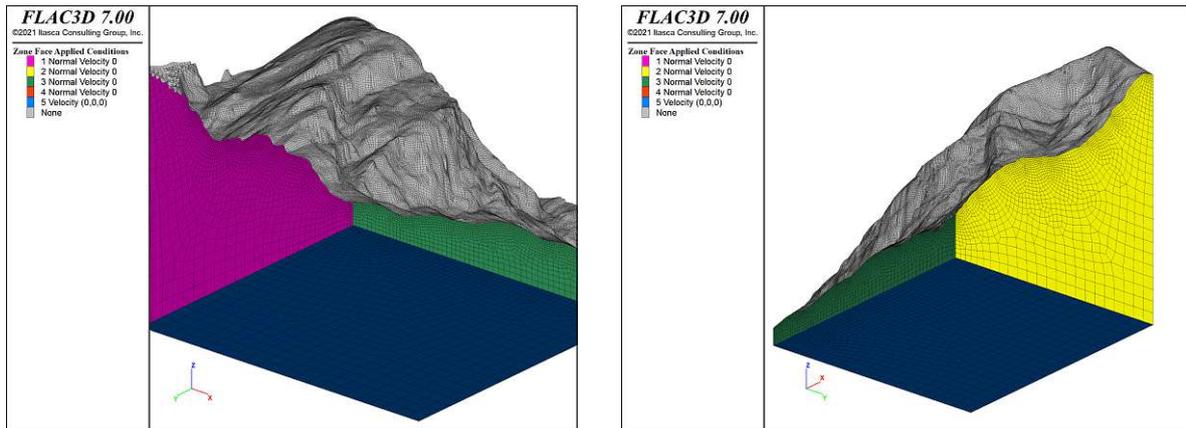
Abb. 4.5: Bearbeitungsschritte beim Aufbau des Modells

Ein wichtiger Punkt bei Finite-Differenzen Berechnungen ist die Größe des Modells. Das Modell muss groß genug sein, um mögliche Auswirkungen von Randbedingungen zu eliminieren und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Im weiteren Sinne muss jedoch darauf geachtet werden, das Modell nicht zu überdimensionieren. Dies kann zur Folge haben, dass die Berechnungszeit des 3D-Modells deutlich verlängert wird und das Modell aufgrund zu vieler Elemente nicht berechnet werden kann.

Es wurde versucht, die Modellgröße so zu bestimmen, dass augenscheinlich genügend Bereiche in die Berechnungen mit einfließen konnten. Die Dimensionen des Modells wurden mit Breite gleich 560 m, Tiefe gleich 400 m und Höhe gleich 510 m festgelegt. Dabei erstellte FLAC3D ein Modell mit 654263 diskreten Elementen, auch Zonen genannt und 368552 Gitterpunkte, welche den Ausgang für die Berechnungen bilden.

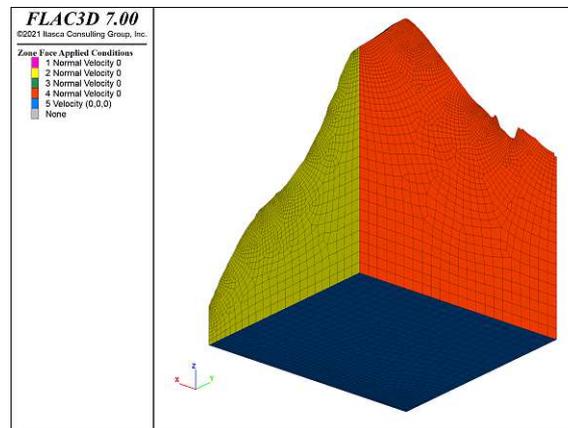
4.3.2 Randbedingungen

Die in dem Modell verwendeten Randbedingungen beziehen sich auf die Oberflächen des Modells. Der untere Modellrand wurde in alle drei Richtungen gehalten (x - y - z -Ebene). Die seitlichen Ränder waren in vertikaler Richtung verschieblich und wurden in horizontaler Richtung gehalten. Lediglich die obere Fläche war in allen Richtungen verschieblich. In Abbildung 4.6 sind die Randbedingungen grafisch dargestellt.



(a) Randbedingung für die Unter-, Vorder- und linke Seite

(b) Randbedingung für die Unter-, Vorder- und rechte Seite



(c) Randbedingung für die Unter-, Hinter- und rechte Seite

Abb. 4.6: Bildhafte Darstellung der Randbedingungen für alle Oberflächen

Erdbeschleunigung

Bei der Erdbeschleunigung handelt es sich zwar um keine Randbedingung, doch diese Eingabezeile definiert das Ende der Eingaben, die für das Hoek-Brown, sowie für das Mohr-Coulomb Modell gelten. Die Erdbeschleunigung wird in FLAC3D als Vektor festgelegt. Die Gravitation wird als Einheit der Beschleunigung angegeben [m/s^2]. Die Gewichtskraft wird als Produkt aus dem Gravitationsvektor und der realen Masse eines Objekts berechnet (Itasca Consulting Group, 2019). In FLAC3D kann die Gravitation mit nur einer Zahl angegeben werden, dann setzt das Programm automatisch die Vektoren als $(0,0,-z)$.

4.3.3 Bewertung der Ergebnisse

Der berechnete bewegte Bereich wird mit einem mittels Kartierung und Monitoring ausgewiesenen bewegten Bereich verglichen. Damit jener Bereich gefunden werden konnte, der sich in Bewegung befand, wurden Grenzwerte festgelegt, zwischen denen die Bewertung stattfand.

Diese wurde entweder über

1. die Verschiebungen (*displacement*) oder
2. die Geschwindigkeiten (*velocity*) durchgeführt.

Die verwendete Methode war von Modell zu Modell unterschiedlich und wird in den jeweiligen Abschnitten beschrieben. Für das Hoek-Brown Modell im Abschnitt 4.4.3.2 und für das Mohr-Coulomb Modell im Abschnitt 4.5.3.2.

Die oberen Grenzwerte der Verschiebung und Geschwindigkeit wurden mit folgenden Werten angegeben:

- Geschwindigkeit: $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Verschiebung: $6,0 \cdot 10^{-2}$ m

4.3.3.1 Monitoring der Talflanke

Das Amt für Wildbach- und Lawinenverbauung des Bundeslandes Tirol kontrolliert ununterbrochen mittels Sensoren und Geländepunkten die Verschiebungen im Gelände. Diese werden in einer internen Datenbank gespeichert und von Amt bereitgestellt. Insgesamt wurden für die Datenermittlung der Bewegungen

- 16 Geländepunkte und
- 5 Sensoren

verwendet. Die Positionen der jeweiligen Messeinrichtungen werden in Abbildung 4.7 dargestellt.



Abb. 4.7: Übersicht der Position der jeweiligen Messstellen

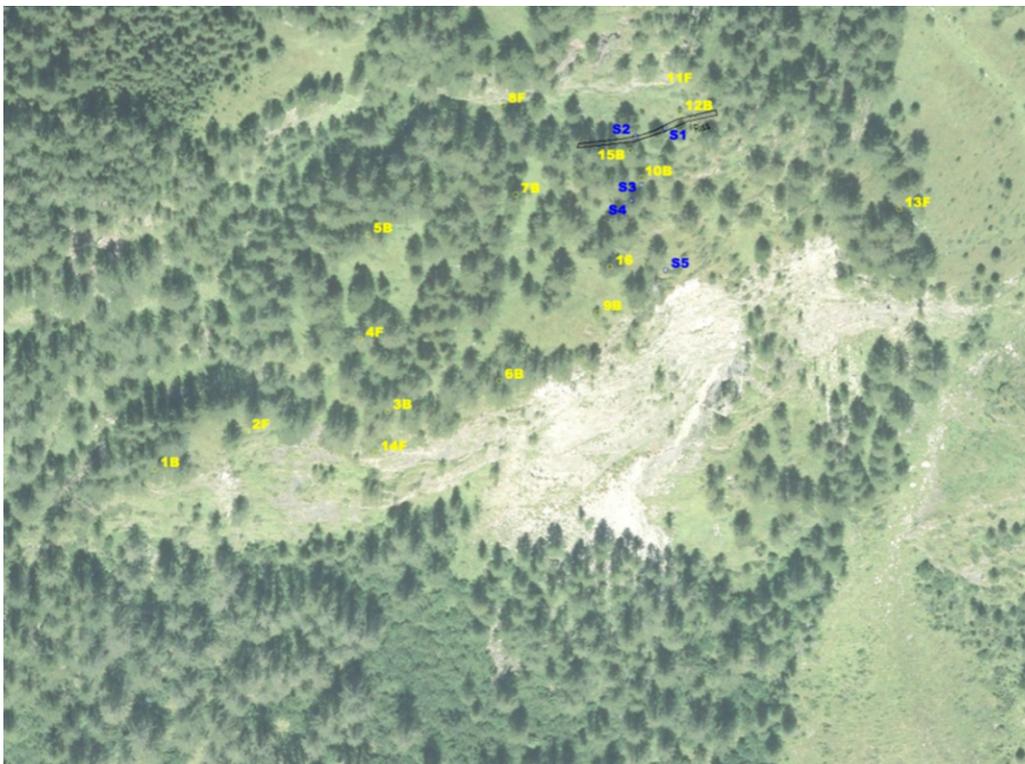


Abb. 4.8: Position der Messpunkte im Abbruchbereich

Um später die bewegten Bereiche feststellen zu können, sind folgende Messpunkte wichtig: 6B, 7B, 8B, 9B, 10B, 11F, 12B, 15B, 16, S1, S2, S3, S4 und S5. In der Abbildung 4.8 sind ihre Positionen genauer dargestellt. Diese Punkte wurden verwendet, um an den jeweiligen Stellen die Verschiebungen in Richtung der y-Achse des Koordinatensystems zu messen.

Damit es zu einem späteren Zeitpunkt möglich war, den simulierten Bewegungsbereich (*simulated area*) und den tatsächlichen, also beobachteten Bewegungsbereich (*observed area*) miteinander zu vergleichen und eine Übereinstimmung zu finden, musste der beobachtete Bereich bestimmt werden. Dieser wurde vom Amt für Wildbach- und Lawinenverbauung ausgewiesen und die jeweiligen Punkte in einem Lambert'schen Koordinatensystem ausgegeben. Aus diesen Koordinaten konnte dann jener Bereich bestimmt werden, der in Bewegung war. Dieser wurde in das FLAC3D Modell eingelesen. In Abbildung 4.9 wird dieser Bereich als blaue Umrandung dargestellt. Zusätzlich zum beobachteten Bereich sind die Positionen der relevanten Messpunkte abgebildet. Das Modell wird aus dem Blickwinkel der Vogelperspektive betrachtet.

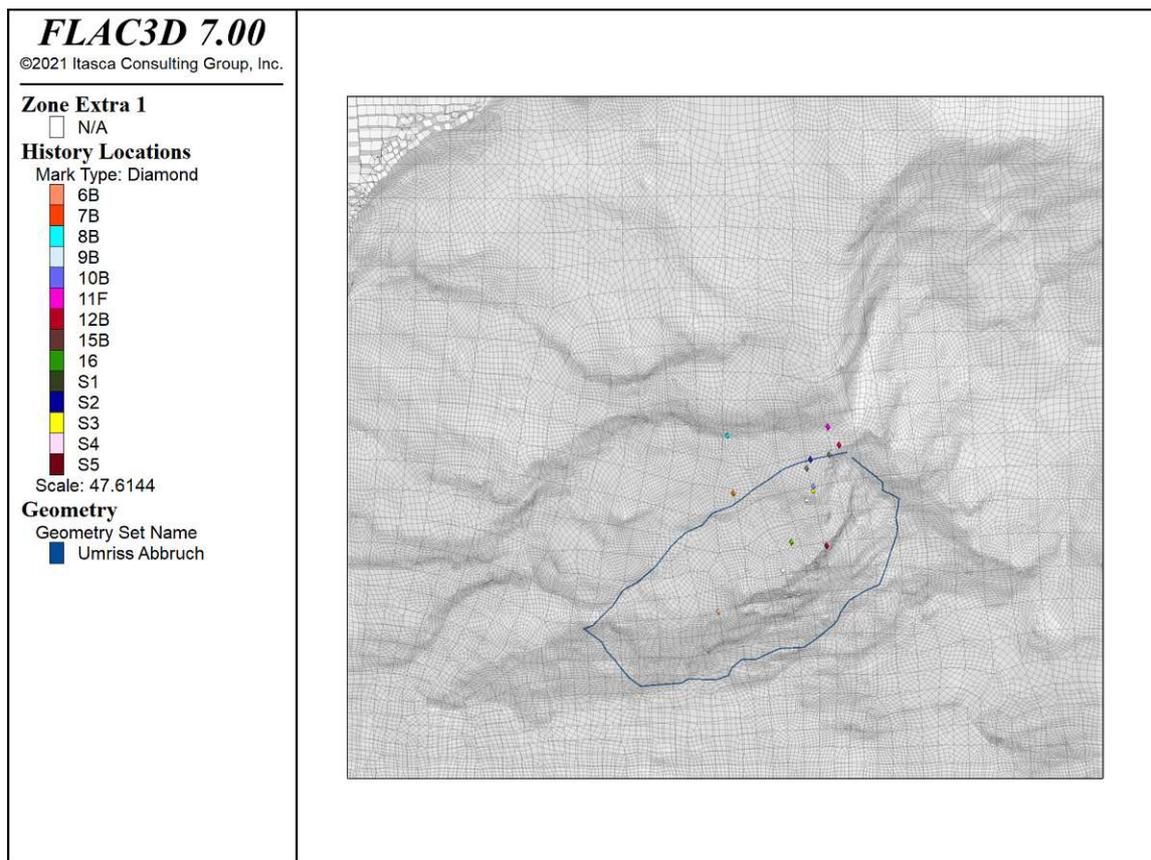


Abb. 4.9: Bewegter-, beobachteter Bereich und Messpunkte im FLAC3D-Modell

4.4 Hoek-Brown Modell

Dem Hoek-Brown Modell wurde ein linear elastisches, ideal-plastisches Materialverhalten zugrunde gelegt.

4.4.1 Modellparameter

Die von FLAC3D benötigten Modellparameter, um die Berechnungen durchführen zu können, wurden wie folgt angegeben:

- Dichte: $\rho = 2728 \text{ kg/m}^3$
- Verformungsmodul: $E_m = 3400 \text{ MPa}$
- Poissonzahl: $\nu = 0,3$

Es wurden Daten zur besseren Abschätzung mechanisch relevanter Parameter aus zahlreichen Laborversuchen von der Brenner Basistunnel GmbH zur Verfügung gestellt. Die Laborversuche wurden nicht eigens für die Analyse des Abbruchereignisses in Auftrag gegeben, sondern waren für die Planung des Brenner Basistunnels vorgesehen. Da die Trasse des Tunnels nicht unweit der Felsböschung liegt und durch dieselben Gesteinsarten verläuft, kann angenommen werden, dass die in den Laboruntersuchungen ermittelten Parameter auch für den Felssturz in Vals repräsentativ sind. (Moser, 2020)

Der Verformungsmodul E_m für das Gebirge errechnet sich aus dem Elastizitätsmodul des intakten Gesteins, dem GSI und dem Auflockerungsfaktor D . Er wird nach Hoek und Diederichs (2006) folgendermaßen berechnet:

$$E_m = E \left(0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D)/11)}} \right) \quad (4.1)$$

Dabei wurde für den E-Modul ein Wert von $E = 30000 \text{ MPa}$ eingesetzt, für den Auflockerungsfaktor $D = 0$ und für den $GSI = 34$.

Aus den oben stehenden Werten errechnete sich FLAC3D mithilfe einer vorher programmierten FISH Routine den Kompressionsmodul und den Schubmodul; die beiden elastischen Konstanten K und G . Diese werden gegenüber dem Verformungsmodul und der Poissonzahl bevorzugt. Obwohl beide in FLAC3D verwendet werden können, wird davon ausgegangen, dass der Kompressions- und der Schubmodul grundlegenderen Aspekten des Materialverhaltens entsprechen als der Verformungsmodul und die Poissonzahl. (Itasca Consulting Group, 2019)

Aus diesem Grund werden die beiden Parameter wie folgt umgerechnet:

$$K = \frac{E_m}{3(1-2\nu)} \quad (4.2)$$

$$G = \frac{E_m}{2(1+\nu)} \quad (4.3)$$

Laut der Itasca Consulting Group (2019) sollten die Gleichungen (4.2) und (4.3) mit Vorsicht verwendet werden, falls ν nahe am Wert 0,5 liegt, da der berechnete Wert von K sonst unrealistisch hoch sein kann und die Konvergenz zur Lösung sehr langsam ist. Es wird vorgeschlagen, den Wert von K auf einen bekannten Wert festzulegen und dann G aus K und ν zu berechnen.

- Kompressionsmodul: $K = 2833$ MPa
- Schubmodul: $G = 1308$ MPa

Für das Hoek-Brown Modell wurden zusätzlich noch weitere Parameter benötigt. Dabei handelte es sich um Festigkeitsparameter, welche im Labor ermittelt wurden, wie die Gesteinsfestigkeit σ_{ci} und der Gesteinsparameter m_i , sowie um empirische Werte, sprich die von der Erfahrung des Geologen abhängig sind. Sie wurden folgendermaßen gewählt:

- Gesteinsfestigkeit: $\sigma_{ci} = 45,80$ MPa
- Geological Strength Index: $GSI = 34$
- Gesteinsparameter für intaktes Gestein: $m_i = 12$
- Auflockerungsfaktor: $D = 0$

Zu Beginn der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass der Auflockerungsfaktor D mit null angenommen wird, was bedeutet, es ist keine Störung/Auflockerung des Gebirges vorhanden. Ausgehend von diesen Parametern wurden die nachfolgenden Hoek-Brown Parameter berechnet:

- $mb = 1,136$
- $s = 0,0006534$
- $a = 0,517$

Wie die Berechnung von mb , s , und a erfolgte, wurde bereits im Abschnitt 2.2.2.2 ausführlich beschrieben.

4.4.2 Berechnung Sicherheitsfaktor

Der Sicherheitsfaktor wurde mithilfe der Methode der Festigkeitsreduktion, welche bereits im Kapitel 2.2.3 erläutert wurde, ermittelt. Dadurch konnten jene Parameter bestimmt werden, bei denen sich das Modell im Grenzgleichgewichtszustand (GGGZ) befand. Durch die Ermittlung des Grenzgleichgewichtszustandes wurde es möglich, jenen Bereich zu definieren, bei dem sich das Modell gerade noch im stabilen Zustand, sowie an der Grenze des Versagens befand. Beide Zustände wurden von FLAC3D jeweils in separaten Dateien gespeichert. Zusätzlich zu dem stabilen (stable) und dem instabilen (unstable) Zustand wurde der Sicherheitsfaktor F ausgegeben. Der Abminderungsfaktor für das letzte instabile und stabile Ergebnis konnte mit $F=1,195$ bzw. $F=1,191$ berechnet werden. In Abbildung 4.10 sind die maximalen Schubverzerrungen bei einem Abminderungsfaktor von $F=1,195$ dargestellt.

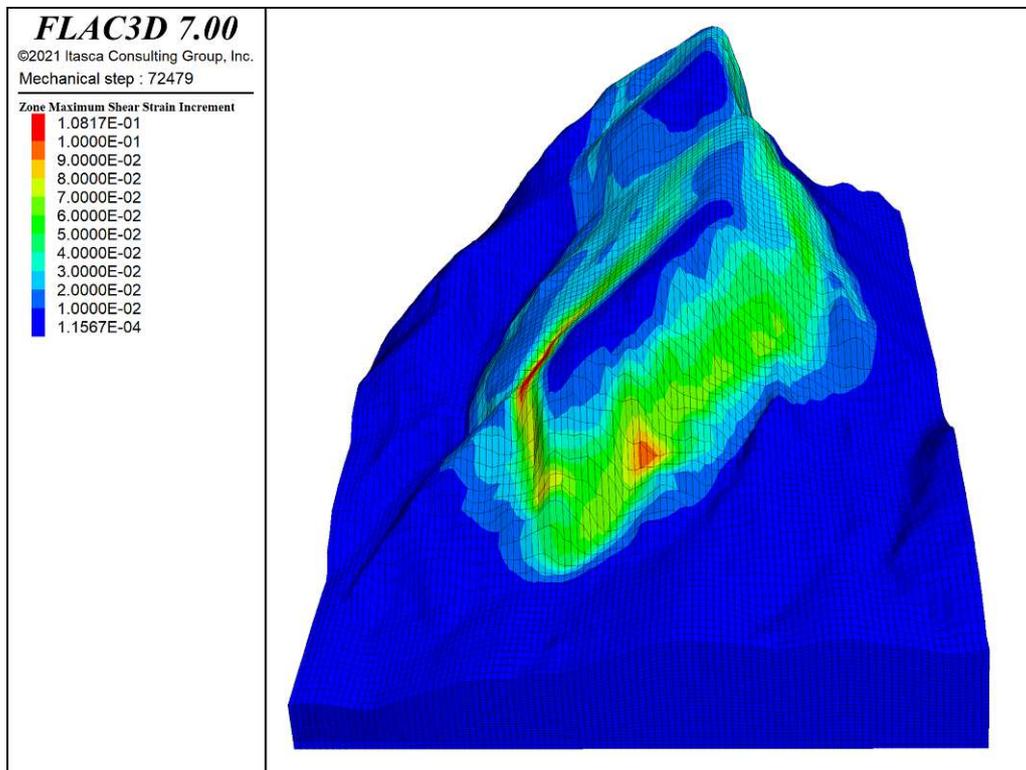


Abb. 4.10: Konturplot der Schubverzerrungen nahe dem Grenzgleichgewicht

4.4.2.1 Ermittlung der HB-Einhüllenden für das Grenzgleichgewicht

Für die Auswertung des HB-Modells war es wichtig jene Parameter zu finden, für die Grenzgleichgewicht herrschte. Im vorigen Abschnitt wurde ein Sicherheitsfaktor von 1,195 bestimmt. Mithilfe dessen konnten nun jene Modellparameter berechnet werden, für die Grenzgleichgewicht bestand. Um möglichst genau die reduzierten Hoek-Brown Parameter berechnen zu können, wurde die von Illeditsch (2021) entworfene Methode angewendet. Dabei errechnet man sich die scheinbaren

Mohr-Coulomb Parameter, aus welchen sich wiederum über die Methode der Festigkeitsreduktion die Hoek-Brown Einhüllende für das Grenzgleichgewicht bilden lässt.

Der Berechnungsablauf sieht wie folgt aus:

1. Im ersten Schritt wurden nach Gleichung 2.11 bis Gleichung 2.16 die Parameter N_{ϕ_c} , σ_c^{UCS} , ϕ_c , c_c und σ_1 berechnet
2. Wie in Gleichung 2.7 beschrieben, wurde die Schubspannung τ aus den Parametern berechnet
3. Anhand der Gleichung 2.8 wurde die Normalspannung σ_n bestimmt
4. Über den berechneten Sicherheitsfaktor F und ϕ_c wurde der reduzierte Parameter ϕ_c^{red} ermittelt (vgl. dazu Gleichung 2.25)
5. Der reduzierte Parameter c_c^{red} wurde nach Gleichung 2.26 ermittelt
6. Die reduzierte Schubspannung τ_{red} wurde nach Gleichung 2.27 aus dem Sicherheitsfaktor und der in Punkt 2 ermittelten Schubspannung berechnet
7. Im letzten Punkt wurde ein Diagramm aus den Werten von σ_n und τ (siehe dazu die blaue Kurve in Abbildung 4.11), sowie aus den Werten von σ_n und τ_{red} (orange Kurve in Abbildung 4.11) erstellt

In der unten stehenden Tabelle 4.1 sind die ermittelten Werte aus der Berechnung von Schritt 1-7, für die HB-Kurve aufgelistet.

Tab. 4.1: σ und τ Parameter (Illeditsch, 2021)

σ_3	N_c	σ_c^{UCS}	ϕ_c	c_c	σ_1	τ	σ_n	ϕ_c^{red}	c_c^{red}	τ_{red}
2	3.49	4.78	33.68	1.28	11.76	4.06	4.17	29.15	1.07	3.40
1.9	3.55	4.66	34.10	1.24	11.41	3.94	3.99	29.53	1.03	3.29
1.8	3.62	4.54	34.54	1.19	11.05	3.81	3.80	29.94	1.00	3.19
1.7	3.69	4.41	35.00	1.15	10.68	3.68	3.62	30.37	0.96	3.08
1.6	3.77	4.28	35.49	1.10	10.31	3.55	3.43	30.83	0.92	2.97
1.5	3.86	4.15	36.02	1.06	9.93	3.41	3.24	31.32	0.88	2.85
1.4	3.95	4.01	36.58	1.01	9.54	3.27	3.04	31.84	0.84	2.73
1.3	4.06	3.87	37.19	0.96	9.14	3.12	2.85	32.41	0.80	2.61
1.2	4.17	3.72	37.84	0.91	8.73	2.97	2.65	33.02	0.76	2.49
1.1	4.31	3.57	38.54	0.86	8.30	2.82	2.46	33.69	0.72	2.36
1	4.46	3.41	39.32	0.81	7.86	2.66	2.26	34.42	0.67	2.22
0.9	4.63	3.24	40.17	0.75	7.41	2.49	2.06	35.23	0.63	2.08
0.8	4.84	3.06	41.11	0.70	6.94	2.31	1.85	36.14	0.58	1.93
0.7	5.09	2.88	42.18	0.64	6.44	2.13	1.64	37.17	0.53	1.78
0.6	5.39	2.68	43.39	0.58	5.92	1.93	1.43	38.35	0.48	1.62
0.5	5.77	2.47	44.81	0.51	5.36	1.72	1.22	39.74	0.43	1.44
0.4	6.29	2.24	46.51	0.45	4.76	1.50	1.00	41.42	0.37	1.26
0.3	7.01	1.99	48.63	0.38	4.10	1.25	0.77	43.54	0.31	1.05
0.2	8.18	1.71	51.45	0.30	3.34	0.98	0.54	46.40	0.25	0.82
0.1	10.51	1.37	55.72	0.21	2.42	0.65	0.30	50.83	0.18	0.55
0	21.28	1.03	65.54	0.11	1.03	0.21	0.05	61.47	0.09	0.18

Rückrechnung der HB-Einhüllenden durch Anpassung von mi und GSI

Nachdem das Diagramm mit den beiden Sigma-Tau Kurven erstellt wurde (Schritt 7), konnte die Anpassung von GSI und mi vorgenommen werden. Für die Rückrechnung wurde eine weitere Tabelle erstellt mit den Ausgangsparameter GSI , mi , D und σ_{ci} . Die Werte für den Auflockerungsfaktor und die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins wurden auf ihren ursprünglichen Werten belassen, sprich $D = 0$ und $\sigma_{ci} = 45,8\text{MPa}$. Lediglich die Werte für den GSI und mi blieben als Variablen in der Berechnung. Ziel war es eine weitere HB-Einhüllende zu erstellen, welche so nahe wie möglich an der zuvor erstellten Einhüllenden liegt.

Zur Berechnung wurden, wie in der Vorgehensweise oben beschrieben, die Parameter N_{ϕ_c} , σ_c^{UCS} , ϕ_c , c_c und σ_1 berechnet. Anschließend die Schubspannung τ und die Normalspannung σ_n . In der Tabelle 4.2 sind die jeweiligen Werte dargestellt. Über die Variation vom Geological Strength Index und dem Auflockerungsfaktor konnte die neu erstellte Kurve an die vorherige angepasst werden. Die nun erhaltende Einhüllende stellte ebenfalls den Grenzgleichgewichtszustand dar. Sie wird in der Abbildung 4.11 als graue Kurve dargestellt.

Die Anpassung der beiden Sigma-Tau Kurven ergab folgende reduzierte Werte:

- $\sigma_{ci} = 45,80\text{ MPa}$
- $GSI = 24,5$
- $mi = 11,1$
- $D = 0$

Anhand der oben berechneten Werte konnten die Hoek-Brown Parameter

- $mb = 0,7486502$
- $s = 0,0002274$
- $a = 0,5323342$

ermittelt werden.

Mit diesen, der Kurve angepassten Werten, wurde in FLAC3D das rein elastische Modell berechnet. In der Abbildung 4.12 sind die maximalen Schubverformungen nach der Anpassung der Modellparameter an die berechneten Kurven dargestellt.

Tab. 4.2: σ und τ Parameter durch Anpassung von mi und GSI (Illeditsch, 2021)

σ_3	N_c	σ_c^{UCS}	ϕ_c	c_c	σ_1	σ_n	τ
2.2	2.88	3.69	29.00	1.09	10.03	4.22	3.42
2.1	2.92	3.60	29.35	1.05	9.74	4.05	3.33
2	2.97	3.51	29.73	1.02	9.44	3.88	3.23
1.9	3.01	3.42	30.12	0.98	9.14	3.70	3.13
1.8	3.07	3.32	30.54	0.95	8.84	3.53	3.03
1.7	3.12	3.22	30.98	0.91	8.53	3.36	2.93
1.6	3.18	3.12	31.45	0.88	8.21	3.18	2.82
1.5	3.25	3.02	31.95	0.84	7.89	3.00	2.71
1.4	3.32	2.92	32.49	0.80	7.56	2.83	2.60
1.3	3.40	2.81	33.07	0.76	7.23	2.65	2.48
1.2	3.49	2.69	33.70	0.72	6.88	2.47	2.36
1.1	3.59	2.58	34.38	0.68	6.53	2.28	2.24
1	3.71	2.45	35.13	0.64	6.16	2.10	2.11
0.9	3.85	2.32	35.97	0.59	5.79	1.91	1.98
0.8	4.00	2.19	36.90	0.55	5.39	1.72	1.84
0.7	4.19	2.05	37.95	0.50	4.98	1.52	1.69
0.6	4.43	1.90	39.17	0.45	4.55	1.33	1.53
0.5	4.73	1.73	40.59	0.40	4.10	1.13	1.37
0.4	5.12	1.56	42.32	0.34	3.61	0.92	1.18
0.3	5.69	1.36	44.52	0.28	3.07	0.71	0.99
0.2	6.61	1.13	47.50	0.22	2.46	0.50	0.76
0.19	6.74	1.11	47.87	0.21	2.39	0.47	0.74
0.18	6.88	1.08	48.25	0.21	2.32	0.45	0.71
0.17	7.02	1.06	48.66	0.20	2.25	0.43	0.69
0.16	7.18	1.03	49.08	0.19	2.18	0.41	0.66
0.15	7.36	1.00	49.53	0.19	2.11	0.38	0.64
0.14	7.55	0.98	50.00	0.18	2.03	0.36	0.61
0.13	7.76	0.95	50.50	0.17	1.96	0.34	0.58
0.12	7.99	0.92	51.03	0.16	1.88	0.32	0.55
0.11	8.25	0.89	51.60	0.15	1.80	0.29	0.52
0.1	8.54	0.86	52.21	0.15	1.71	0.27	0.49

In Abbildung 4.11 sind die Hoek-Brown Versagenskurven dargestellt. Dabei beschreibt die blaue Sigma-Tau-Kurve die Einhüllende mit den Ausgangsparametern der Berechnung. Die orange Kurve beschreibt das Versagen bei einem Sicherheitsfaktor von $F = 1,195$, wobei hingegen die graue Sigma-Tau-Kurve jene Werte darstellt aus der Anpassung von GSI und mi .

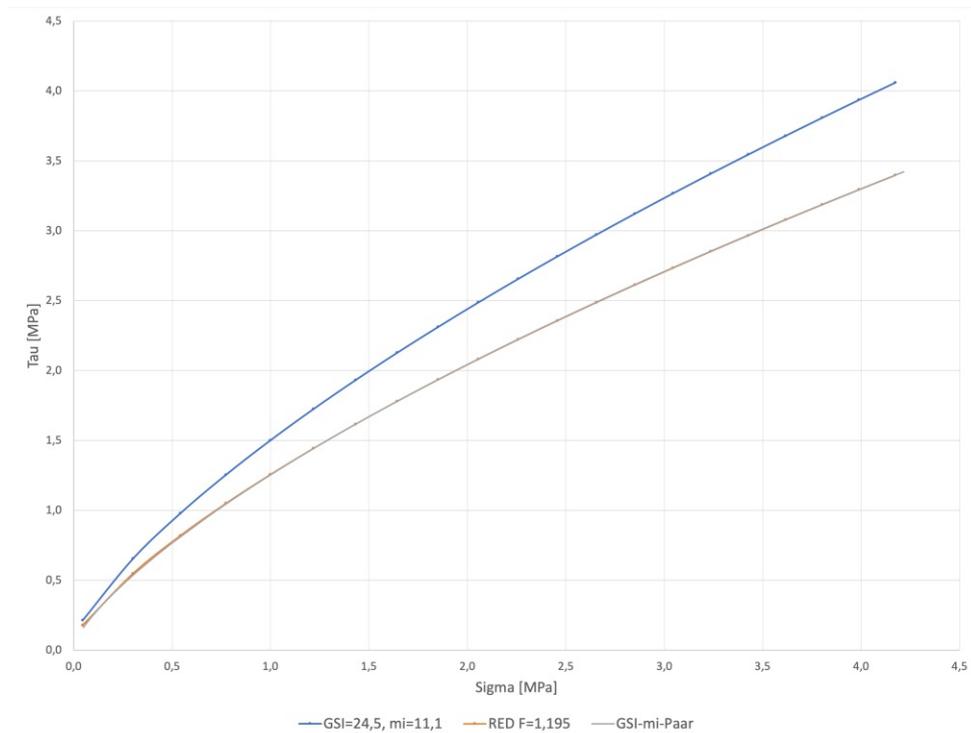


Abb. 4.11: Sigma-Tau-Kurven, verändert nach Illeditsch (2021)

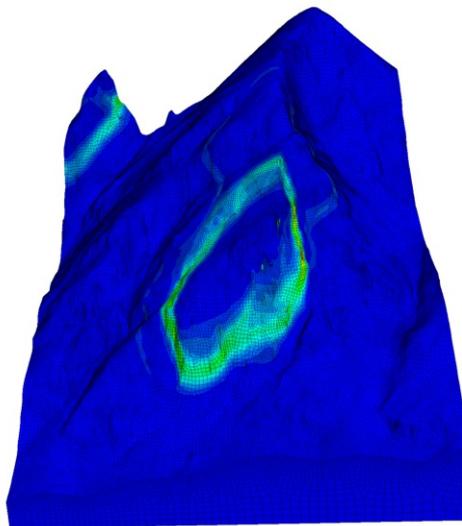


Abb. 4.12: Maximale Schubverzerrungen nach Anpassung der Parameter mi und GSI

Rückrechnung durch Anpassung von D

Nach einigen Überlegungen wurde klar, dass ein Auflockerungsfaktor mit dem Wert $D=0$ in der Realität bei diesem Abbruchereignis eher unwahrscheinlich erscheint. Daher wurde versucht die beiden Kurven über den Auflockerungsaktor D anzunähern. Dabei wurden die Werte für den GSI und mi nicht verändert, sondern blieben mit 34 bzw. 12 gleich. Lediglich der Wert für D wurde angepasst. In Tabelle 4.3 sind die Werte aus der Berechnung dargestellt. Nach mehreren Versuchen wurde ein Wert gefunden, welcher eine gute Annäherung an jene Kurve mit dem τ_{red} abbildet (siehe dazu Abbildung 4.13).

Der optimale errechnete Wert für den Auflockerungsfaktor ergibt sich aus den Kurven zu $D=0,37$. Folgende Hoek-Brown Materialparameter ließen sich dadurch errechnen:

- $mb = 0,6654491$
- $s = 0,0002329$
- $a = 0,5170641$

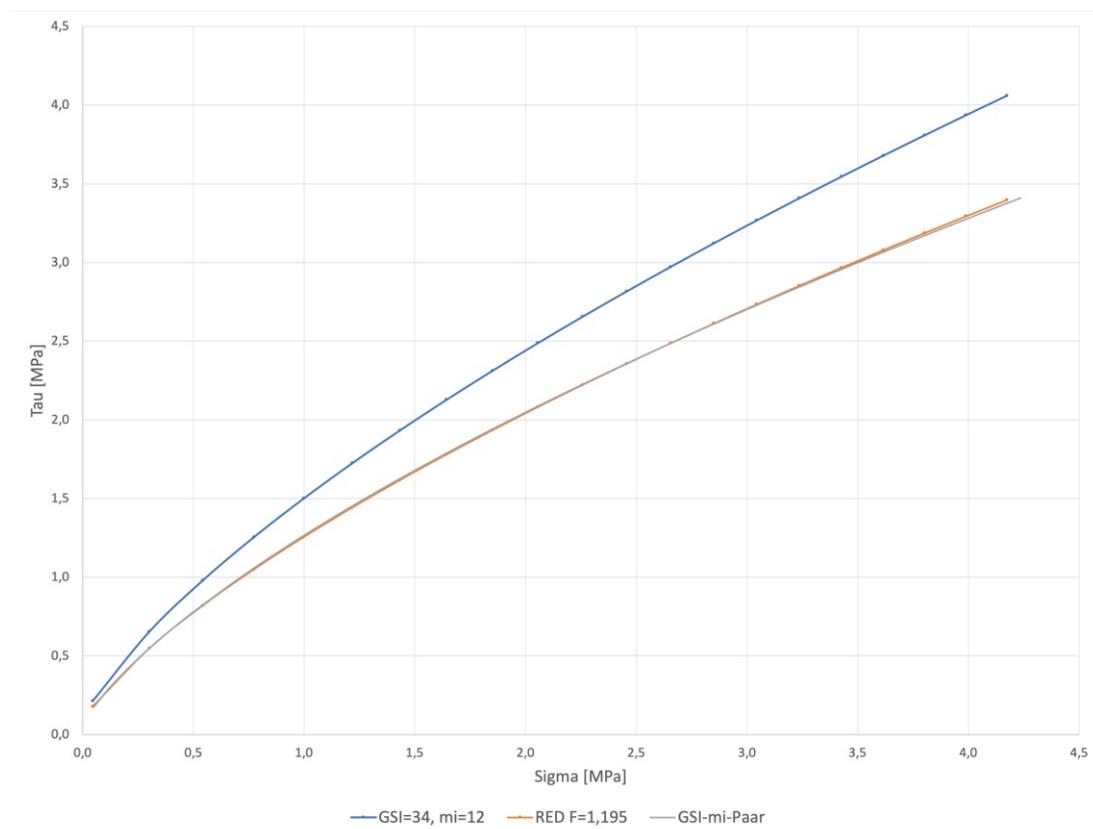


Abb. 4.13: Sigma-Tau-Kurven nach Anpassung des D -Wertes, nach Illeditsch (2021), verändert

Tab. 4.3: Berechnung der σ und τ Parameter durch Anpassung von D (Illeditsch, 2021)

σ_3	N_c	σ_c^{UCS}	ϕ_c	c_c	σ_1	σ_n	τ
2.2	2.81	3.77	28.35	1.13	9.95	4.24	3.41
2.1	2.85	3.68	28.71	1.09	9.67	4.07	3.32
2	2.89	3.59	29.09	1.06	9.38	3.90	3.22
1.9	2.94	3.50	29.50	1.02	9.09	3.72	3.13
1.8	2.99	3.41	29.92	0.99	8.79	3.55	3.03
1.7	3.05	3.31	30.38	0.95	8.49	3.38	2.93
1.6	3.11	3.21	30.86	0.91	8.18	3.20	2.83
1.5	3.17	3.11	31.38	0.87	7.87	3.03	2.72
1.4	3.25	3.01	31.93	0.83	7.55	2.85	2.61
1.3	3.33	2.90	32.52	0.79	7.22	2.67	2.50
1.2	3.42	2.78	33.17	0.75	6.88	2.49	2.38
1.1	3.52	2.67	33.87	0.71	6.54	2.30	2.26
1	3.64	2.54	34.65	0.67	6.18	2.12	2.13
0.9	3.77	2.41	35.50	0.62	5.81	1.93	2.00
0.8	3.93	2.28	36.46	0.58	5.42	1.74	1.86
0.7	4.12	2.14	37.55	0.53	5.02	1.54	1.71
0.6	4.36	1.98	38.80	0.48	4.60	1.35	1.56
0.5	4.66	1.82	40.27	0.42	4.15	1.15	1.39
0.4	5.06	1.64	42.05	0.36	3.66	0.94	1.21
0.3	5.63	1.44	44.30	0.30	3.13	0.73	1.01
0.2	6.57	1.21	47.36	0.24	2.53	0.51	0.79
0.19	6.70	1.19	47.74	0.23	2.46	0.48	0.76
0.18	6.83	1.16	48.13	0.22	2.39	0.46	0.74
0.17	6.98	1.14	48.54	0.21	2.32	0.44	0.71
0.16	7.14	1.11	48.98	0.21	2.25	0.42	0.69
0.15	7.32	1.08	49.43	0.20	2.18	0.39	0.66
0.14	7.51	1.05	49.91	0.19	2.11	0.37	0.63
0.13	7.73	1.03	50.42	0.18	2.03	0.35	0.61
0.12	7.96	1.00	50.97	0.18	1.95	0.32	0.58
0.11	8.22	0.97	51.55	0.17	1.87	0.30	0.55
0.1	8.52	0.93	52.17	0.16	1.79	0.28	0.52

4.4.3 Kalibrierung der Modellparameter

Wie im Kapitel 3 beschrieben, wurden die Modellparameter des Hoek-Brown Modells variiert und durch den Vergleich des beobachteten Bewegungsbereiches mit dem berechneten Bewegungsbereiches die am besten passende Parameterkombination ermittelt. Die Parameter der Kalibrierung waren:

1. der Geological Strength Index GSI , der in 2er Schritten variiert wurde, und
2. der Auflockerungsfaktor D , der in 0,02er Schritten variiert wurde.

In der nachstehenden Tabelle 4.4 sind die Kombinationen der beiden Parameter aufgelistet.

Tab. 4.4: Kombinationen der beiden Parameter D und GSI

Bezeichnung	Auflockerungsfaktor	Geological Strength Index
Abminderung_30	0,31	36
Abminderung_31	0,31	35
Abminderung_32	0,31	34
Abminderung_33	0,31	33
Abminderung_34	0,31	32
Abminderung_20	0,33	36
Abminderung_21	0,33	35
Abminderung_22	0,33	34
Abminderung_23	0,33	33
Abminderung_24	0,33	32
Abminderung_16	0,35	36
Abminderung_19	0,35	35
Abminderung_5	0,35	34
Abminderung_17	0,35	33
Abminderung_18	0,35	32
Abminderung_40	0,37	36
Abminderung_41	0,37	35
Abminderung_1	0,37	34
Abminderung_42	0,37	33
Abminderung_43	0,37	32
Abminderung_50	0,39	36
Abminderung_51	0,39	35
Abminderung_52	0,39	34
Abminderung_53	0,39	33
Abminderung_54	0,39	32

Dabei wurden die Berechnungen mit einem GSI -Wert im Bereich von 32 bis 36 und einem D -Wert im Bereich von 0,31 bis 0,39 durchgeführt. Dadurch ergaben sich für die beiden Parameter jeweils eine Aufteilung in 5 Intervalle. Die daraus erhaltene Anzahl an Berechnungsdurchläufen ist das Produkt aller definierten Intervalle. Dies bedeutet, dass es also $5 \cdot 5 = 25$ Durchläufe von FLAC3D benötigte, um alle Variation der genannten Parameter durchzuführen.

4.4.3.1 Kennwerte

Zur Beurteilung der Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation mit den besten passenden Parametern, wurden folgende Kennwerte pro Berechnung (siehe Abschnitt 3.1.2) ausgewertet:

- True Positive (TP)
- True Negative (TN)
- False Positive (FN)
- False Negative (FN)
- Critical Success Index (CSI)
- Accuracy (ACC)
- Distance to perfect classification (D2PC)
- Heidke Skill Score (HSS)

Die Auswertung erfolgte jeweils für die in Tabelle 4.4 beschriebenen Parameterpaare und wird im nachstehenden Abschnitt beschrieben.

4.4.3.2 Ergebnisse

Wie im Abschnitt 4.4.2 beschrieben wurde für das Modell der Grenzgleichgewichtszustand (GGGZ) ermittelt. Dabei ist der errechnete Sicherheitsfaktor von $F=1,195$ ermittelt worden. Damit es überhaupt möglich war eine Auswertung am Modell vorzunehmen, sprich den bewegten Bereich identifizieren zu können, mussten die Geschwindigkeiten der Bewegungen vom Modell berechnet werden. Die Parameterkalibrierung kann entweder über die Verschiebungen oder über die Geschwindigkeiten ausgewertet werden. Versuche haben gezeigt, dass eine Auswertung über die Geschwindigkeit des bewegten Bereiches genauere Ergebnisse lieferte. Daher wurde jene Geschwindigkeit zur Auswertung verwendet, welche mit den Grenzwerten

1. im unteren Bereich von 0,0 m/s und
2. nach oben von $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s begrenzte.

War die Geschwindigkeit des bewegten Bereiches kleiner als $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s, wurde sie von der Auswertung nicht mehr erfasst. Diese Berechnungen werden nachfolgend als *stabil* bezeichnet. Das bedeutet, dass sie vom Programm als stabil ausgewertet werden, ihre berechnete Geschwindigkeit aber eigentlich unter dem Grenzwert von $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s liegt.

Die Auswertung für die in Abschnitt 4.4.3.1 beschriebenen Kennwerte hinsichtlich des beobachteten und des berechneten Bewegungsbereiches, nach den jeweils besten erreichten Werten, lieferte folgende Ergebnisse:

Tab. 4.5: Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Parameter beim HB-Modell

Bezeichnung	D	GSI	FN	FP	TN	TP	CSI	ACC	HSS	D2PC
Abminderung_33	0,31	33	0.00	1.56	91.26	6.56	0.751	0.978	0.846	0.088
Abminderung_34	0,31	32	6.78	1.07	85.10	7.05	0.473	0.921	0.602	0.490
Abminderung_22	0,33	34	0.00	3.16	91.88	4.96	0.611	0.968	0.743	0.033
Abminderung_23	0,33	32	6.07	1.05	85.81	7.06	0.498	0.940	0.726	0.066
Abminderung_24	0,33	32	7.57	0.79	84.31	7.33	0.467	0.916	0.594	0.508
Abminderung_5	0,35	34	0.74	1.25	91.15	6.88	0.777	0.980	0.863	0.093
Abminderung_17	0,35	33	5.05	1.48	86.83	6.63	0.504	0.935	0.635	0.433
Abminderung_18	0,35	32	7.24	0.91	84.64	7.21	0.469	0.918	0.597	0.501
Abminderung_41	0,37	35	0.00	4.77	91.88	3.35	0.413	0.952	0.563	0.049
Abminderung_1	0,37	34	4.93	1.27	86.95	6.85	0.525	0.938	0.655	0.419
Abminderung_42	0,37	33	5.46	1.53	86.43	6.58	0.485	0.930	0.616	0.454
Abminderung_43	0,37	32	9.54	0.40	82.34	7.72	0.437	0.901	0.560	0.553
Abminderung_51	0,39	35	0.74	1.42	91.14	6.70	0.756	0.978	0.849	0.101
Abminderung_52	0,39	34	4.46	1.70	87.42	6.41	0.510	0.938	0.642	0.411
Abminderung_53	0,39	33	8.97	0.64	82.91	7.48	0.438	0.904	0.561	0.545
Abminderung_54	0,39	32	10.30	0.30	81.58	7.82	0.452	0.894	0.565	0.568

Wenn man Tabelle 4.4 mit Tabelle 4.5 vergleicht, wird schnell klar, dass einige Kombinationen der Parameter nicht in beiden Tabellen vorhanden sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Auswertung, wie oben beschrieben, eine Grenze festgelegt wurde und nicht jedes *GSI-mi*-Paar die Kriterien dafür erfüllte.

Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 stellen die Auswertung der Tabelle 4.5 in Form der Bereiche TP, TN, FP und FN grafisch dar.

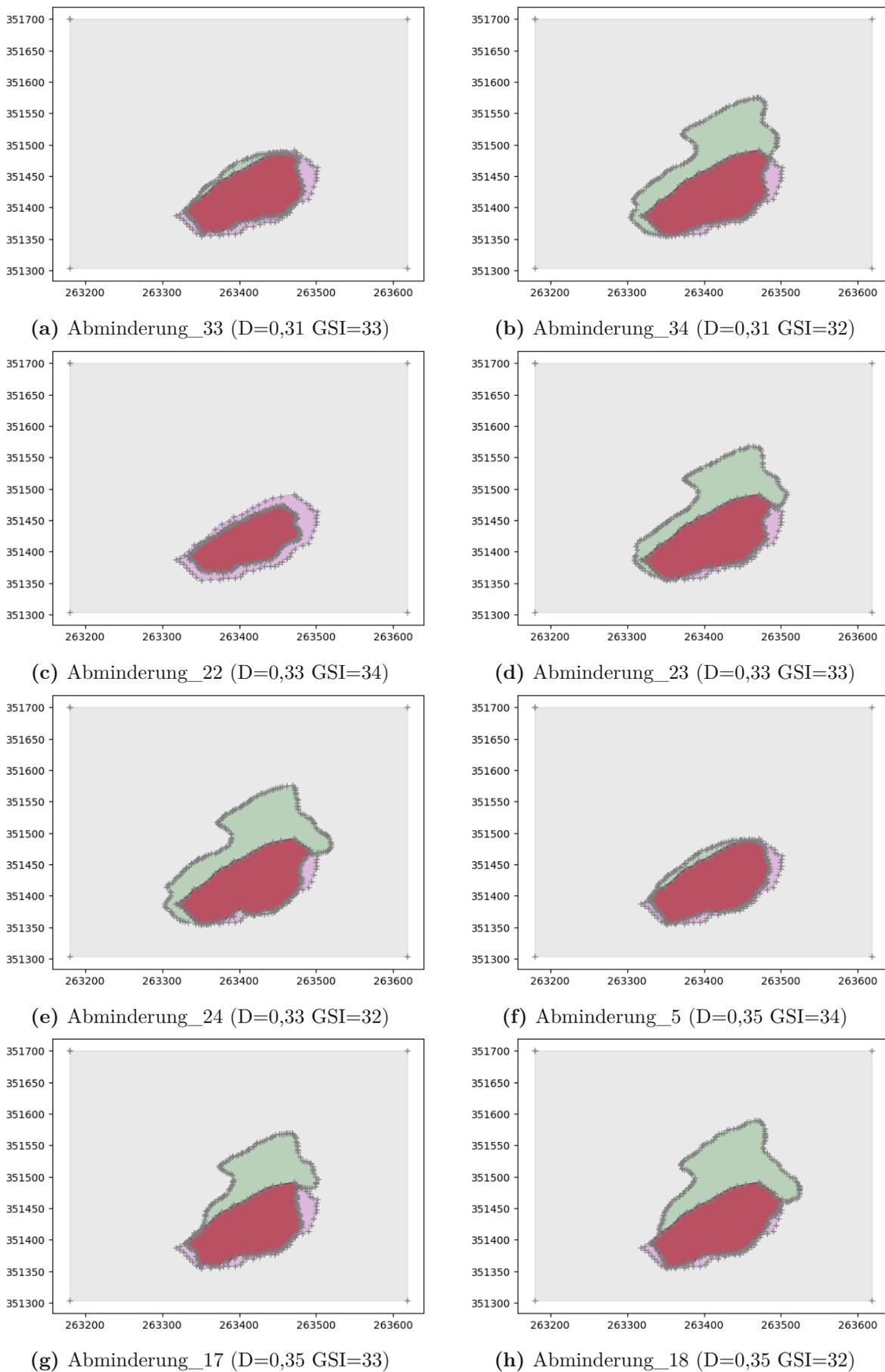


Abb. 4.14: Vergleich Simulation und Beobachtung anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN (Teil I)

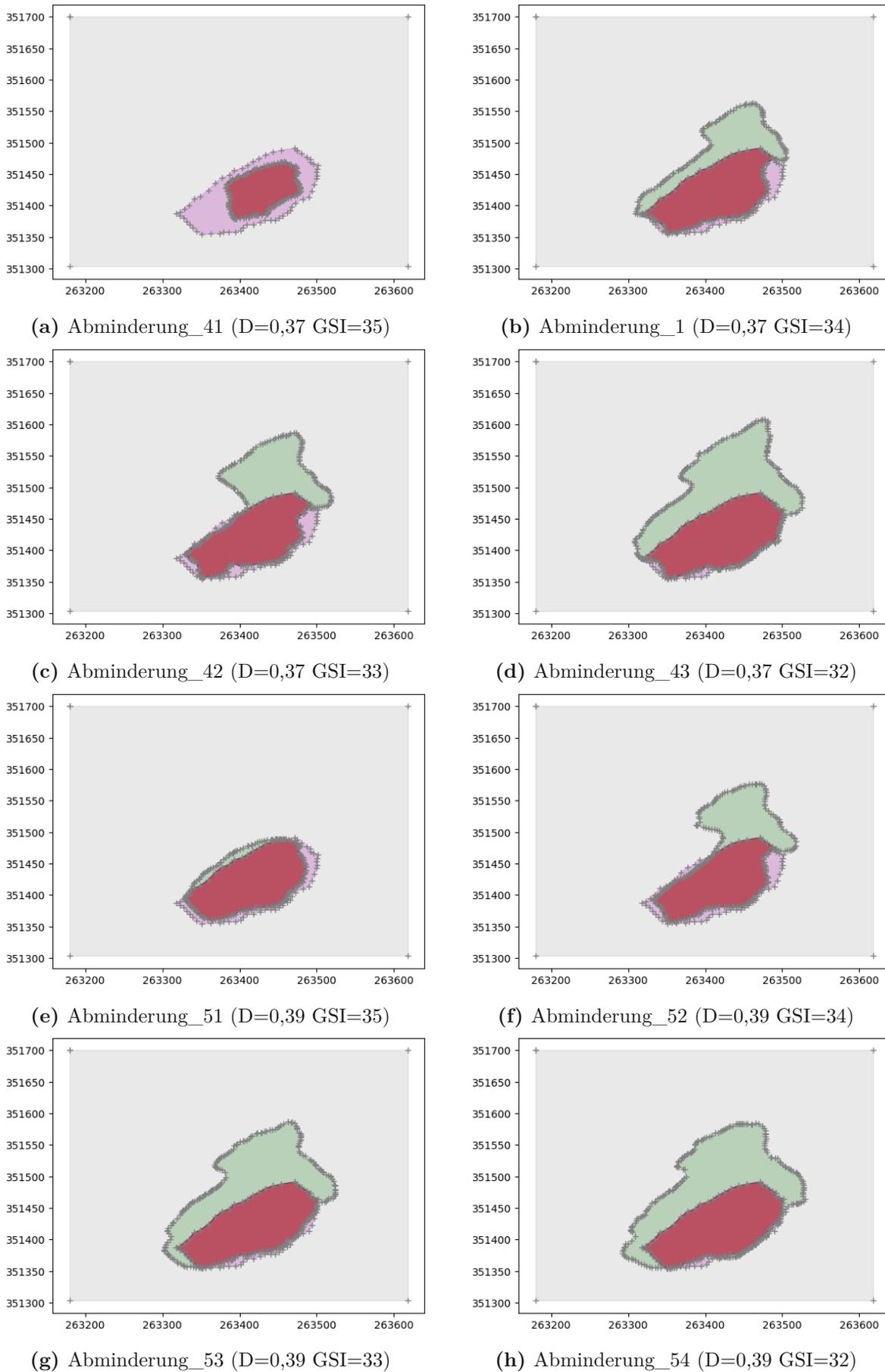


Abb. 4.15: Vergleich Simulation und Beobachtung anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN (Teil II)

Maßgebend für die Beurteilung der erreichten Simulationsgenauigkeit und der Übereinstimmung zwischen berechnetem und beobachtetem Bereich waren die Indizes ACC und CSI, welche nach Formetta et al., 2016 und Mergili et al., 2017 ermittelt wurden und in Abschnitt 3.1.3 erläutert sind. Die Auswertung der Tabelle 4.4 und der Tabelle 4.5 nach den höchsten erreichten Werten zeigte, dass die Berechnung mit der Bezeichnung *Abminderung_5* die beste Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem tatsächlichen bewegten Bereich lieferte. Damit ließen sich folgende Materialkennwerte bestimmen, für die die beste Übereinstimmung (*best-fit Parameter*) von Beobachtung und Simulation erreicht wurden:

1. $\sigma_{ci} = 45,80$ MPa
2. $GSI = 34$
3. $m_i = 12$
4. $D = 0,35$

Anhand der oben berechneten Werte konnten die Hoek-Brown Parameter

- $mb = 0,6891914$
- $s = 0,0002480$
- $a = 0,5170641$

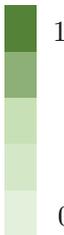
ermittelt werden.

Bei der Auswertung der Kennwerte, ergab sich nach dem Accuracy Index (ACC) eine Übereinstimmung von 98 % und nach dem Critical Success Index (CSI) eine Übereinstimmung von 77,7 % für die genaueste Simulation. Die große Differenz ist darauf zurückzuführen, dass beim ACC der Wert von True Negative im Zähler und Nenner der Gleichung mitberücksichtigt wird (vgl. dazu Gleichung 3.2). Der ACC wird dadurch maßgebend von der Modellgröße beeinflusst. Eine Bewertung durch den CSI liefert somit eine genauere Aussage über die Übereinstimmung zwischen beobachteten und simulierten Bereich.

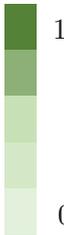
Betrachtet man die Tabelle 4.5, so stechen neben den Ergebnissen der *Abminderung_5* auch jene der *Abminderung_33* und *Abminderung_51* hervor. Vergleicht man die Werte des CSI, so weichen sie nur gering voneinander ab.

In den Tabellen 4.6 bis 4.9 werden die Kennwerte ACC, CSI, HSS und D2PC mithilfe einer Farbmatrix dargestellt. Bei der Auswertung nach dem ACC, CSI und HSS, liegt das Optimum jeweils bei einem Wert gleich 1. Beim D2PC Index hingegen bei einem Wert gleich 0.

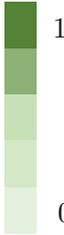
Tab. 4.6: Bewertung anhand des ACC

ACC						
36	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	
35	stabil	stabil	stabil	0.952	0.978	
34	stabil	0.968	0.980	0.938	0.938	
33	0.978	0.940	0.935	0.930	0.904	
32	0.921	0.916	0.918	0.901	0.894	
GSI/D	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	

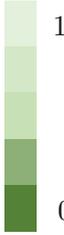
Tab. 4.7: Bewertung anhand des CSI

CSI						
36	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	
35	stabil	stabil	stabil	0.413	0.756	
34	stabil	0.611	0.777	0.525	0.510	
33	0.751	0.498	0.504	0.485	0.438	
32	0.473	0.467	0.469	0.437	0.452	
GSI/D	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	

Tab. 4.8: Bewertung anhand des HSS

HSS						
36	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	
35	stabil	stabil	stabil	0.563	0.849	
34	stabil	0.743	0.863	0.655	0.642	
33	0.846	0.726	0.635	0.616	0.561	
32	0.602	0.594	0.597	0.560	0.565	
GSI/D	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	

Tab. 4.9: Bewertung anhand des D2PC

D2PC						
36	stabil	stabil	stabil	stabil	stabil	
35	stabil	stabil	stabil	0.049	0.101	
34	stabil	0.033	0.093	0.419	0.411	
33	0.088	0.066	0.433	0.454	0.545	
32	0.490	0.508	0.501	0.553	0.568	
GSI/D	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	

Vergleicht man den, wie in Abschnitt 4.3.3.1 beschriebenen, beobachteten Bereich mit den maximalen Schubverformungen der *Abminderung_5*, so lässt sich eine gute Übereinstimmung feststellen. Die berechneten maximalen Schubverformungen (*Maximum Shear Strain Increment, SSI*) in der Felswand konzentrierten sich recht eindeutig auf den beobachteten Bereich, wie in Abbildung 4.16 zu sehen ist.

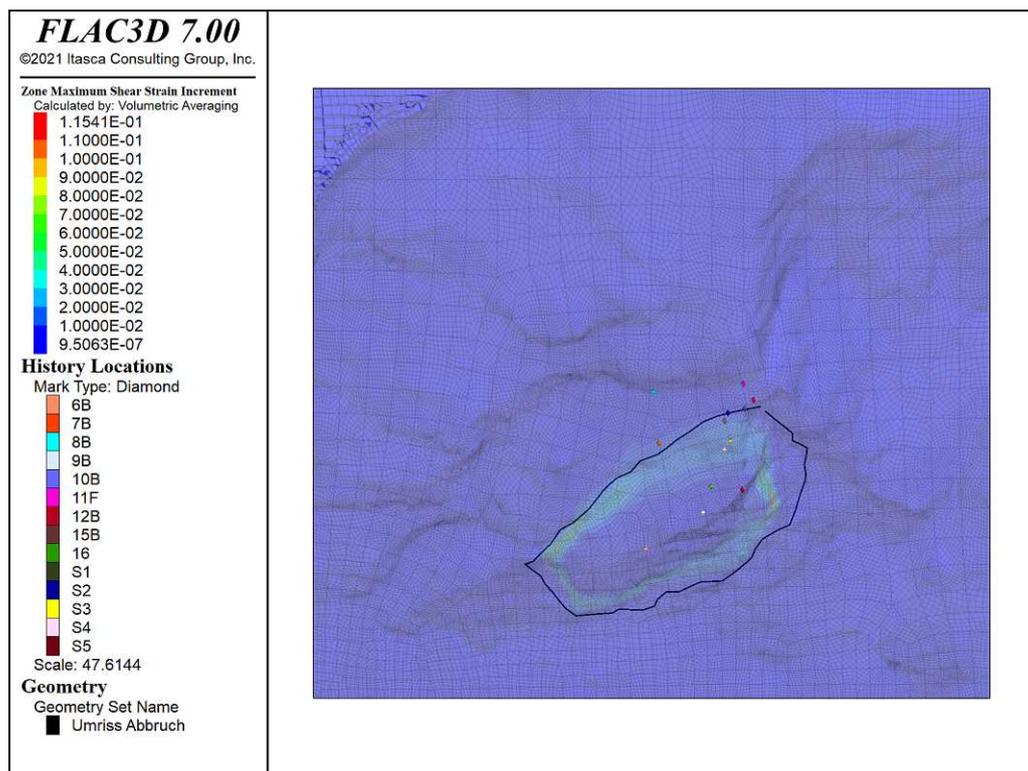


Abb. 4.16: Übereinstimmung Maximale Schubverformung mit dem beobachteten Bereich beim HB-Modell

Die Abbildung 4.17 stellt die maximalen Schubverformungen, in einem Schnitt durch das Gelände, dar. Dabei ist jene Zone deutlich zu sehen, die gefährdet ist abzubrechen, bei einem erneuten Abbruchereignis.

Wie im Abschnitt 4.3.3.1 beschrieben, sind für die Auswertung der Bewegungen des Geländes, Messpunkte angelegt worden. Sie zeichneten die Verschiebungen und Bewegungen der Felsböschung auf. Parallel dazu, wurden im FLAC3D-Modell die Verschiebungen simuliert. Die Grafik 4.18 stellt diese dar. Dabei wurden die Verschiebungen nach rund 27326 Berechnungsschritten ausgewertet und im Diagramm dargestellt. Betrachtet man dieses genauer, zeigte sich, dass in den Messpunkte 9B, 16 und S5 die größten Verschiebungen ermittelt wurden. Diese Punkte liegen genau am oberen Rand der Schubverformungen, sprich dieser Bereich bewegt sich am meisten.

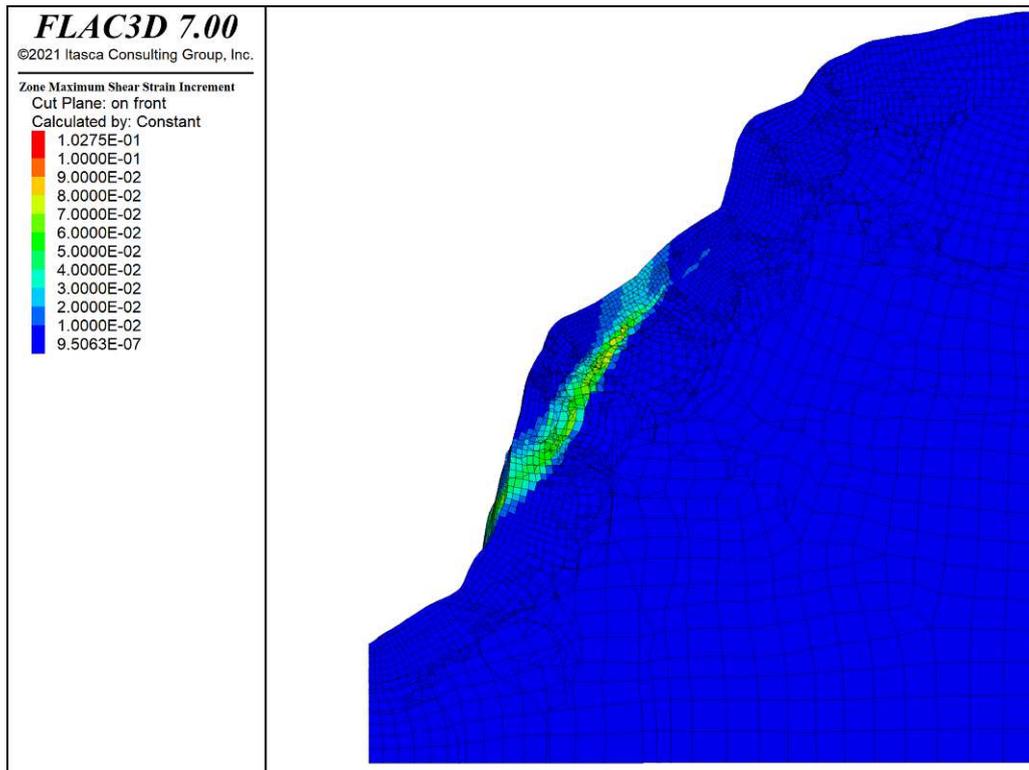


Abb. 4.17: Maximale Schubverformungen im Schnitt durch das Gelände beim HB-Modell

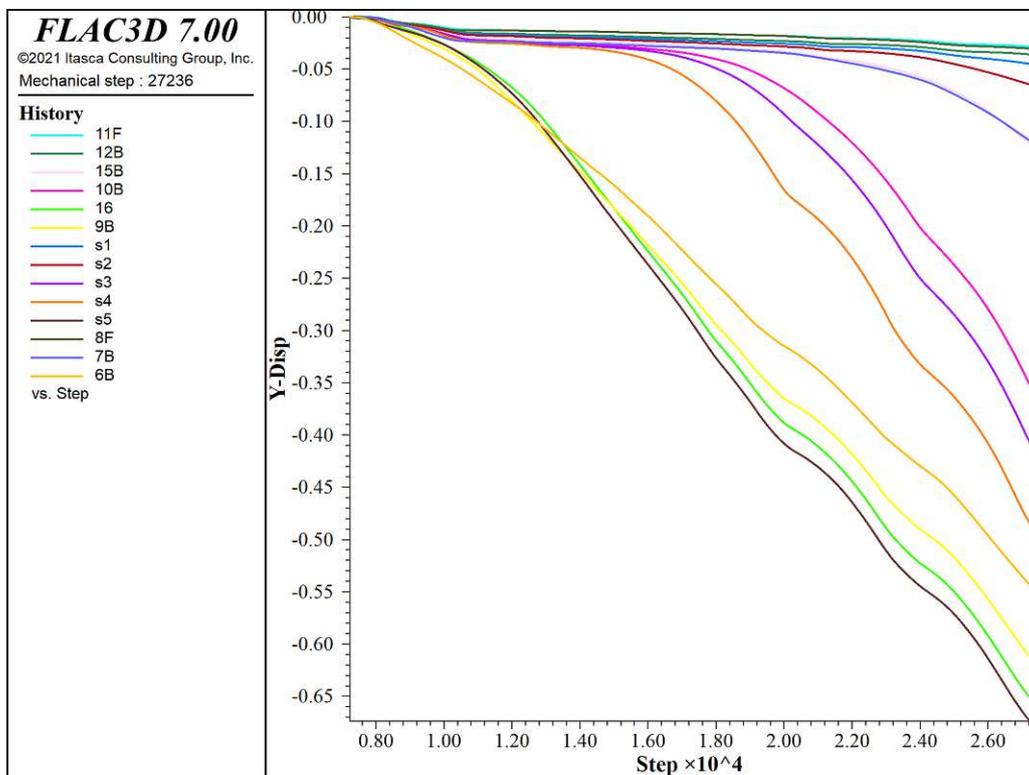


Abb. 4.18: Berechnete Verschiebungen an den Messpunkten

4.5 Mohr-Coulomb Modell

4.5.1 Modellparameter

Die von FLAC3D benötigten Modellparameter waren folgende:

- Dichte: $\rho = 2728 \text{ kg/m}^3$
- Verformungsmodul: $E_m = 3400 \text{ MPa}$
- Poissonzahl: $\nu = 0,3$

Aus den oben stehenden Werten wurde in FLAC3D mithilfe einer vorher programmierten FISH Routine der Kompressionsmodul und der Schubmodul K und G berechnet. Vgl. dazu in Abschnitt 4.4.1 die beiden Gleichungen 4.3 und 4.2.

- Kompressionsmodul: $K = 2833 \text{ MPa}$
- Schubmodul: $G = 1308 \text{ MPa}$

Anders als beim Hoek-Brown Modell, wo die verwendeten Parameter aus Laborversuchen und aus empirischen Werten bestehen, handelt es sich bei den benötigten Parametern um sogenannte äquivalente Parameter. Dies bedeutet, dass die semiempirischen Hoek-Brown-Werte in äquivalente Mohr-Coulomb-Parameter umgerechnet wurden. Das war notwendig, da man den inneren Reibungswinkel φ und die Kohäsion c nur direkt durch einen Triaxialversuch bestimmen kann. Die Umrechnung der Parameter wurde mit dem Programm RocData, der Firma Rocscience Inc., durchgeführt. Damit RocData aus der Hoek-Brown-Bruchgeraden die äquivalenten Parameter berechnen konnte, wurde zusätzlich noch ein weiterer Parameter benötigt. Bei diesem handelte es sich um die Böschungshöhe h , welche mit 80 m abgeschätzt wurde. Bei der Umrechnung ergaben sich folgende äquivalenten Mohr-Coulomb Parameter:

- $\varphi = 42,641^\circ$
- $c = 0,526 \text{ MPa}$

Wenn man mit einem nicht linearem Festigkeitskriterium in RocData arbeitet (z. B. Generalized Hoek-Brown), wird die äquivalente lineare Bruchgerade nach Mohr-Coulomb automatisch für einen bestimmten Spannungsbereich berechnet. Die äquivalenten Mohr-Coulomb-Parameter wurden berechnet, indem eine lineare Bruchgerade bestimmt wurde, die eine „beste Anpassung“ über einen bestimmten Spannungsbereich einer nicht linearen Bruchgerade bot. Die Ergebnisse der Mohr-Coulomb Anpassung (Kohäsion und Reibungswinkel) wurden in der Tabelle und im Sigma-Tau-Diagramm angezeigt (siehe dazu Abbildung 4.19). Dabei zeigt die rote Linie die Hoek-Brown-Bruchlinie und die blaue Gerade die angenäherte Mohr-Coulombsche-Bruchgerade. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Parametern φ und c , war für das Mohr-Coulomb Modell einen weiteren Materialkennwert nötig; die Zugfestigkeit σ_t . Diese ergab sich zu einem Wert von $\sigma_t = 0,026 \text{ MPa}$.

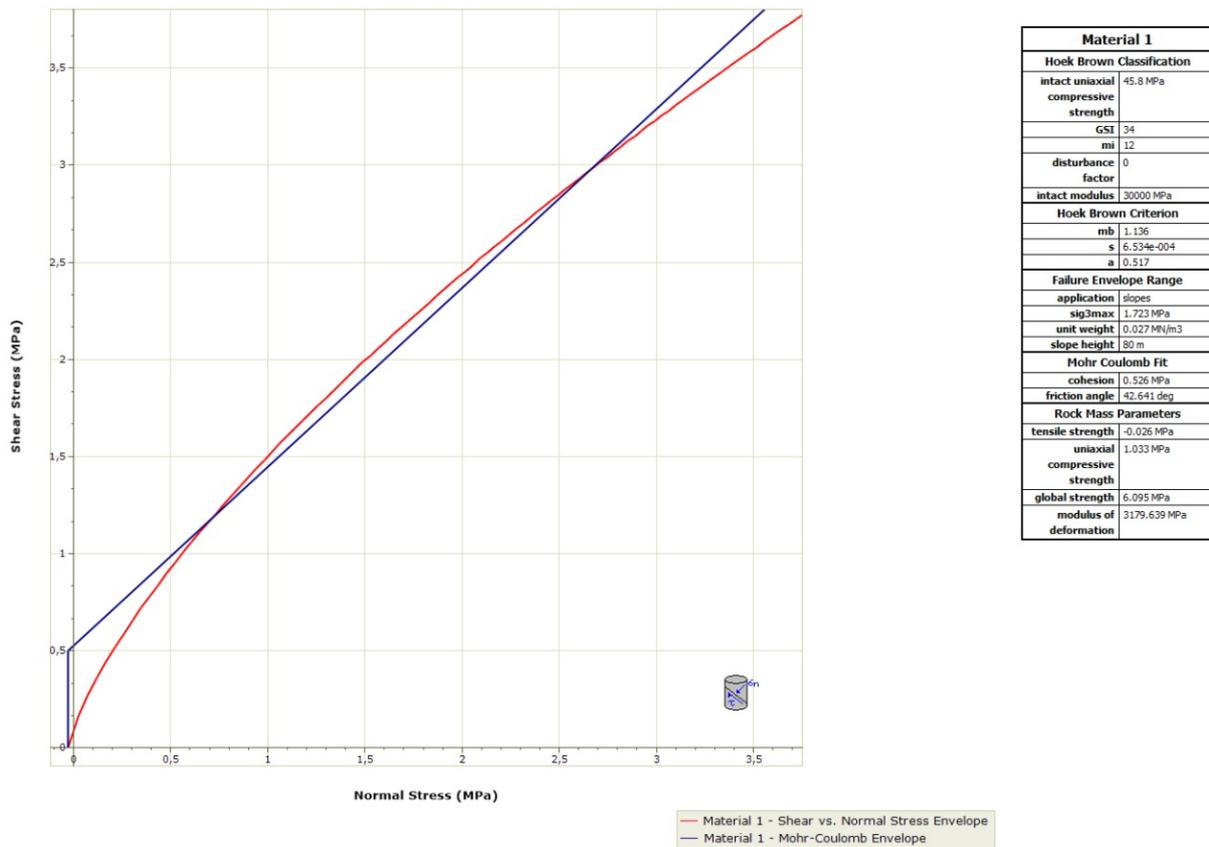


Abb. 4.19: Hoek-Brown Einhüllende (rot) und angenäherte Mohr-Coulomb Bruchgerade (blau)

Nachdem alle Parameter in FLAC3D eingegeben wurden, konnte die Berechnung des Modells gestartet werden.

4.5.2 Berechnung Sicherheitsfaktor

Analog zu Abschnitt 4.4.2 wurde auch hier der Sicherheitsfaktor des Modells berechnet. Dadurch konnten jene Parameter bestimmt werden, bei denen sich das Modell im Grenzgleichgewichtszustand (GGGZ) befindet. Der errechnete Abminderungsfaktor für den instabilen Bereich wurde von FLAC3D mit $F=1,462$ ermittelt.

4.5.2.1 Anpassung Modellparameter

Die Berechnung der reduzierten Mohr-Coulomb Parameter wurde wie folgt durchgeführt:

1. Im ersten Schritt wurde nach Gleichung 2.22, mithilfe des zuvor berechneten Sicherheitsfaktors F , die reduzierte Kohäsion c^{red} ermittelt
2. Der reduzierte Parameter φ^{red} wurde nach Gleichung 2.23 berechnet
3. Die Zugfestigkeit σ_t wurde nicht reduziert

Werte nach Reduktion

Aus der Reduktion anhand des Sicherheitsfaktors F ergaben sich folgende reduzierte Parameter für das vorliegende Mohr-Coulomb Modell:

- $\varphi = 31,62^\circ$
- $c = 0,340$ MPa

4.5.3 Kalibrierung der Modellparameter

Mit den vorher bestimmten Werten der Kohäsion und des inneren Reibungswinkels wurden nun, wie schon in Kapitel 3 beschrieben, die Modellparameter des Mohr-Coulomb Modells variiert und durch den Vergleich des beobachteten Bewegungsbereiches mit dem berechneten Bewegungsbereich die „*Best-fit Parameter*“ bestimmt. Die Materialkennwerte der Kalibrierung waren folgende:

1. der innere Reibungswinkel φ , der in 0,5 Grad Schritten variiert wurde, und
2. die Kohäsion c , welche in 0,05 MPa Schritten variiert wurde.

Bei den Berechnungen wurden der innere Reibungswinkel im Bereich von 31,1 bis 32,6 und die Kohäsion zwischen 0,24 und 0,44 variiert. Dadurch ergab sich eine Anzahl von $4 \cdot 5 = 20$ Berechnungsdurchläufen, die FLAC3D benötigte, um die Variation der genannten Parameter durchzuführen.

In der Tabelle 4.10 sind die Kombinationen der beiden Parameter aufgelistet.

Tab. 4.10: Kombinationen der beiden Parameter φ und c

Bezeichnung	innere Reibungswinkel	Kohäsion
Abminderung_21	31,1	0,24
Abminderung_22	31,1	0,29
Abminderung_23	31,1	0,34
Abminderung_24	31,1	0,39
Abminderung_25	31,1	0,44
Abminderung_1	31,6	0,24
Abminderung_2	31,6	0,29
Abminderung_3	31,6	0,34
Abminderung_4	31,6	0,39
Abminderung_5	31,6	0,44
Abminderung_11	32,1	0,24
Abminderung_12	32,1	0,29
Abminderung_13	32,1	0,34
Abminderung_14	32,1	0,39
Abminderung_15	32,1	0,44
Abminderung_31	32,6	0,24
Abminderung_32	32,6	0,29
Abminderung_33	32,6	0,34
Abminderung_34	32,6	0,39
Abminderung_35	32,6	0,44

4.5.3.1 Kennwerte

Zur Beurteilung der Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation mit den besten passenden Parametern, wurden auch beim Mohr-Coulomb Modell folgende Kennwerte pro Berechnung (siehe Abschnitt 3.1.2) ausgewertet:

- True Positive (TP)
- True Negative (TN)
- False Positive (FP)
- False Negative (FN)
- Critical Success Index (CSI)
- Accuracy (ACC)
- Distance to perfect classification (D2PC)

- Heidke Skill Score (HSS)

Die Auswertung erfolgte jeweils für die in Tabelle 4.10 beschriebenen Parameterpaare und wird im nachstehenden Abschnitt beschrieben.

4.5.3.2 Ergebnisse

Wie im Abschnitt 4.5.2 beschrieben wurde für das MC-Modell einen Grenzgleichgewichtszustand (GGGZ) ermittelt. Dabei wurde ein Sicherheitsfaktor von $F=1,462$ berechnet. Damit es überhaupt möglich war eine Auswertung am Modell vorzunehmen, sprich den bewegten Bereich identifizieren zu können, mussten die Geschwindigkeiten der Bewegungen vom Modell berechnet werden. Die Parameterkalibrierung kann entweder über die Verschiebungen oder über die Geschwindigkeiten ausgewertet werden. Wie bei der Hoek-Brown Berechnung, wurde die Auswertung über die Geschwindigkeit des bewegten Bereiches ausgeführt, mit den Grenzwerten

1. im unteren Bereich von 0,0 m/s und
2. nach im oberen Bereich von $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s.

War die Geschwindigkeit des bewegten Bereiches kleiner als $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s, wurde sie von der Auswertung nicht mehr erfasst. Diese Berechnungen werden nachfolgend als *stabil* bezeichnet. Das bedeutet, dass sie vom Programm als stabil ausgewertet werden, ihre berechnete Geschwindigkeit aber eigentlich unter dem Grenzwert von $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s liegt. Des weiteren kommen in den Tabellen 4.13 bis 4.16 einige Werte mit der Angabe *k.A.* vor, was so viel wie keine Aussage bedeutet. Dabei handelt es sich um berechnete Bereiche, bei denen es eine so große Streuung der Verschiebungswerte gab, sodass kein genauer Abbruchbereich definiert werden konnte.

Die Auswertung für die in Abschnitt 4.5.3.1 beschriebenen Kennwerte hinsichtlich des beobachteten und des berechneten Bewegungsbereiches, nach den jeweils besten erreichten Werten, liefert folgende Ergebnisse:

Tab. 4.11: Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Parameter beim MC-Modell

Bezeichnung	φ	c	FN	FP	TN	TP	CSI	ACC	HSS	D2PC
Abminderung_21	31,1	0,24	75,09	0,00	16,79	8,12	0,093	0,205	0,025	0,907
Abminderung_23	31,1	0,34	48,96	0,02	42,92	8,10	0,218	0,713	0,260	0,781
Abminderung_2	31,6	0,29	52,53	0,00	39,35	8,12	0,123	0,419	0,086	0,877
Abminderung_12	32,1	0,29	54,00	0,01	37,89	8,11	0,129	0,453	0,099	0,871

Wenn man Tabelle 4.10 mit Tabelle 4.11 vergleicht, wird schnell klar, dass einige Kombinationen der Parameter nicht in beiden Tabellen vorhanden sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Auswertung, wie oben beschrieben, eine Grenze festgelegt wurde und nicht jedes φ -c Paar

die Kriterien dafür erfüllte.

Nachdem die Auswertung der Kennwerte für die Kalibrierung fertig war, konnten diese, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, visualisiert werden. Abbildung 4.20 stellt die Auswertung der Tabelle 4.11 in Form der Kennwerte TP, TN, FP und FN grafisch dar.

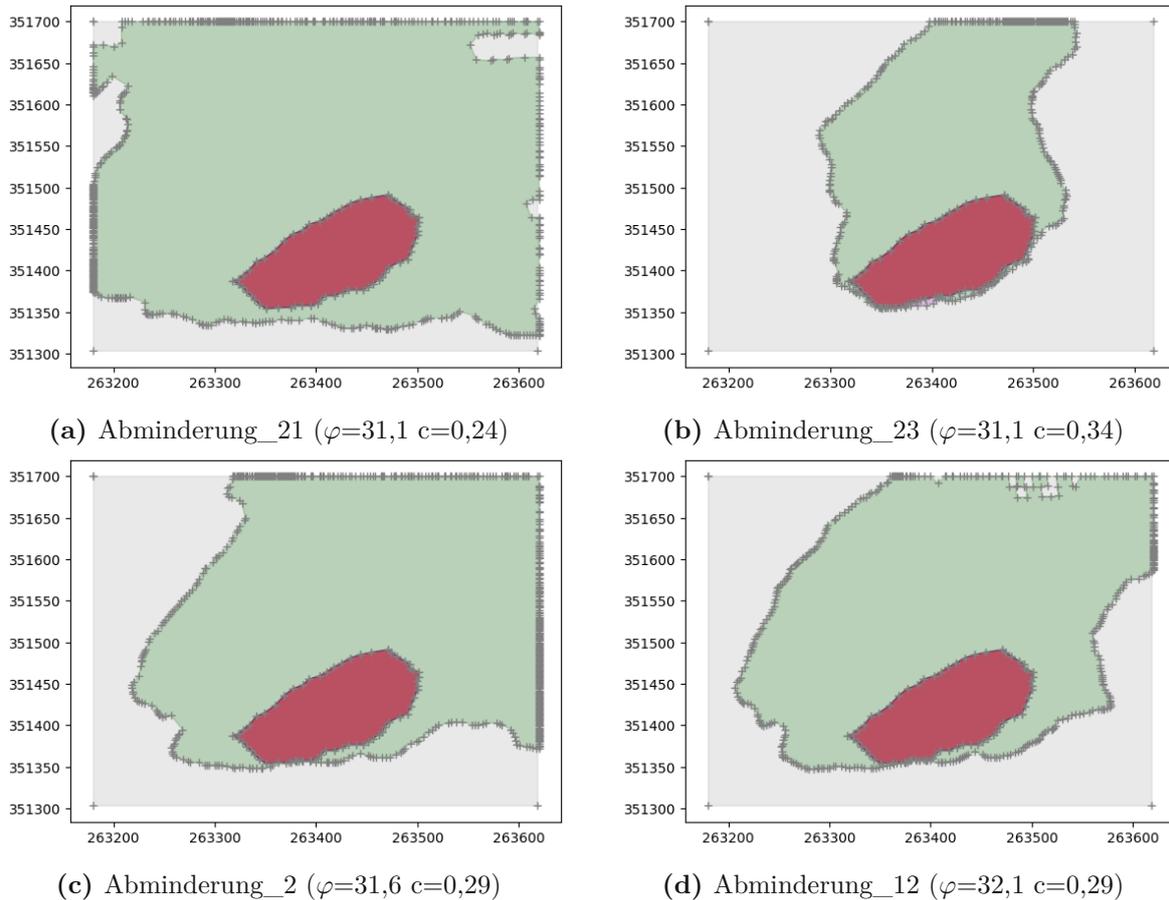


Abb. 4.20: Vergleich Beobachtung und Simulation anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN

Böschungshöhe

Damit es überhaupt möglich ist aus den semiempirischen Hoek-Brown Parametern die äquivalenten Mohr-Coulomb Parameter φ und c zu berechnen, wird vom Programm RocData die Eingabe der Böschungshöhe h gefordert. Diese wurde am Anfang der Berechnungen mit dem Wert $h=80$ m angenommen. Betrachtet man die Abbildung 4.19, so ist die Böschungshöhe als Annäherung der Sekante an die Hoek-Brown Versagenskurve zu verstehen.

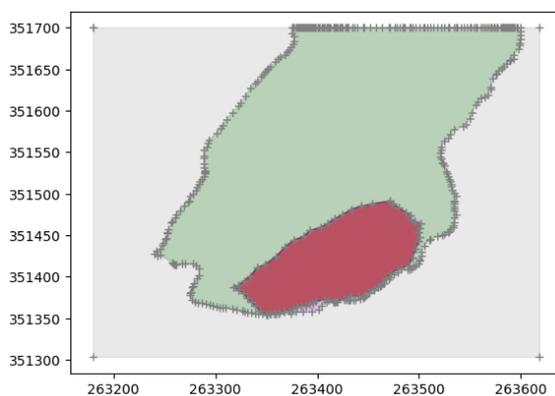
Zusätzlich zu den oben beschriebenen Kalibrierungsmethoden wurde versucht durch die Verringerung der Böschungshöhe optimale Werte für CSI, ACC, HSS sowie D2PC zu erreichen. Die äquivalenten Mohr-Coulomb Parameter wurden dabei erneut mit dem Programm RocData

berechnet. Analog dazu wurde die Böschungshöhe h in 5 m Schritten verkleinert, bis zum Wert $h=65$ m. Dargestellt werden die Kennwerte in der Tabelle 4.12.

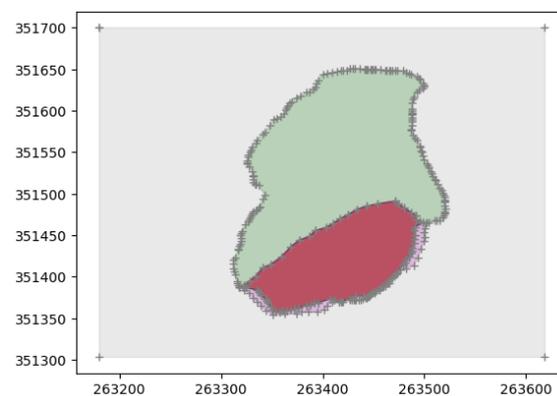
Tab. 4.12: Auswertung der Kennwerte über Variation der Böschungshöhe

Berechnung	Böschungshöhe	CSI	ACC	HSS	D2PC
Abminderung_121	75 m	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Abminderung_122	70 m	0,175	0,626	0,186	0,824
Abminderung_123	65 m	0,293	0,821	0,377	0,699

In den beiden unten stehenden Abbildungen (4.21a und 4.21b) werden die Auswertungen der Kennwerte grafisch dargestellt.



(a) Abminderung_122 ($h=70$ m)



(b) Abminderung_123 ($h=65$ m)

Abb. 4.21: Vergleich Beobachtung und Simulation anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN, abhängig von h

Weiteres wurde versucht, ausgehend vom Grenzgleichgewichtszustand der Hoek-Brown Parameter (vgl. dazu Abschnitt 4.4.2.1), die äquivalenten Mohr-Coulomb Parameter in RocData, für die verschiedenen Böschungshöhen zu berechnen. Diese Berechnungen lieferten jedoch keine aussagekräftigen Ergebnisse und wurden daher nicht weiter berücksichtigt.

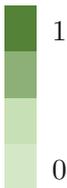
Gleich wie in Kapitel 4.4.3.2 beschriebenen Hoek-Brown Berechnungen, waren auch hier maßgebend für die Beschreibung der erreichten Simulationsgenauigkeit und der Übereinstimmung zwischen berechneten und beobachteten Bereich, die Indizes ACC und CSI. Diese wurden nach Formetta et al., 2016 und Mergili et al., 2017 ermittelt und bereits in Abschnitt 3.1.3 erläutert. Die Auswertung der Tabelle 4.10 und der Tabelle 4.11 nach den höchsten erreichten Werten zeigt, dass die Berechnung mit der Bezeichnung *Abminderung_23* die beste Übereinstimmung zwischen dem berechneten und dem tatsächlichen bewegten Bereich erreicht.

Damit ließen sich jene Materialkennwerte bestimmen, für die die beste Übereinstimmung (*Best-fit Parameter*) von Beobachtung und Simulation erreicht wurde. Diese waren:

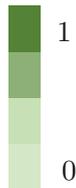
1. $\varphi = 31,1^\circ$
2. $c = 0,34$ MPa

Bei der Auswertung der Kennwerte, ergab sich nach dem Accuracy Index (ACC) eine Übereinstimmung von 71,3 % und nach dem Critical Success Index (CSI) eine Übereinstimmung von 21,8 %. Auch bei diesem Modell beeinflusst die Modellgröße den ACC deutlich. Der CSI liefert somit eine genauere Übereinstimmung ab. In den Tabellen 4.13 bis 4.16 werden die Kennwerte ACC, CSI, HSS und D2PC mithilfe einer Farbmatrix dargestellt. Beim Index ACC, CSI und HSS, lag das Optimum jeweils bei einem Wert von 1, beim D2PC Index hingegen bei einem Wert von 0.

Tab. 4.13: Bewertung anhand des ACC

ACC						
32,6	stabil	k.A.	stabil	stabil	stabil	
32,1	k.A.	0.453	stabil	stabil	stabil	
31,6	k.A.	0.419	stabil	stabil	stabil	
31,1	0.205	k.A.	0.713	stabil	stabil	
φ / c	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	

Tab. 4.14: Bewertung anhand des CSI

CSI						
32,6	stabil	k.A.	stabil	stabil	stabil	
32,1	k.A.	0.129	stabil	stabil	stabil	
31,6	k.A.	0.123	stabil	stabil	stabil	
31,1	0.093	k.A.	0.218	stabil	stabil	
φ / c	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	

Tab. 4.15: Bewertung anhand des HSS

HSS						
32,6	stabil	k.A.	stabil	stabil	stabil	1
32,1	k.A.	0.099	stabil	stabil	stabil	
31,6	k.A.	0.086	stabil	stabil	stabil	
31,1	0.025	k.A.	0.260	stabil	stabil	0
φ / c	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	

Tab. 4.16: Bewertung anhand des D2PC

D2PC						
32,6	stabil	k.A.	stabil	stabil	stabil	1
32,1	k.A.	0.871	stabil	stabil	stabil	
31,6	k.A.	0.877	stabil	stabil	stabil	
31,1	0.907	k.A.	0.781	stabil	stabil	0
φ / c	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	

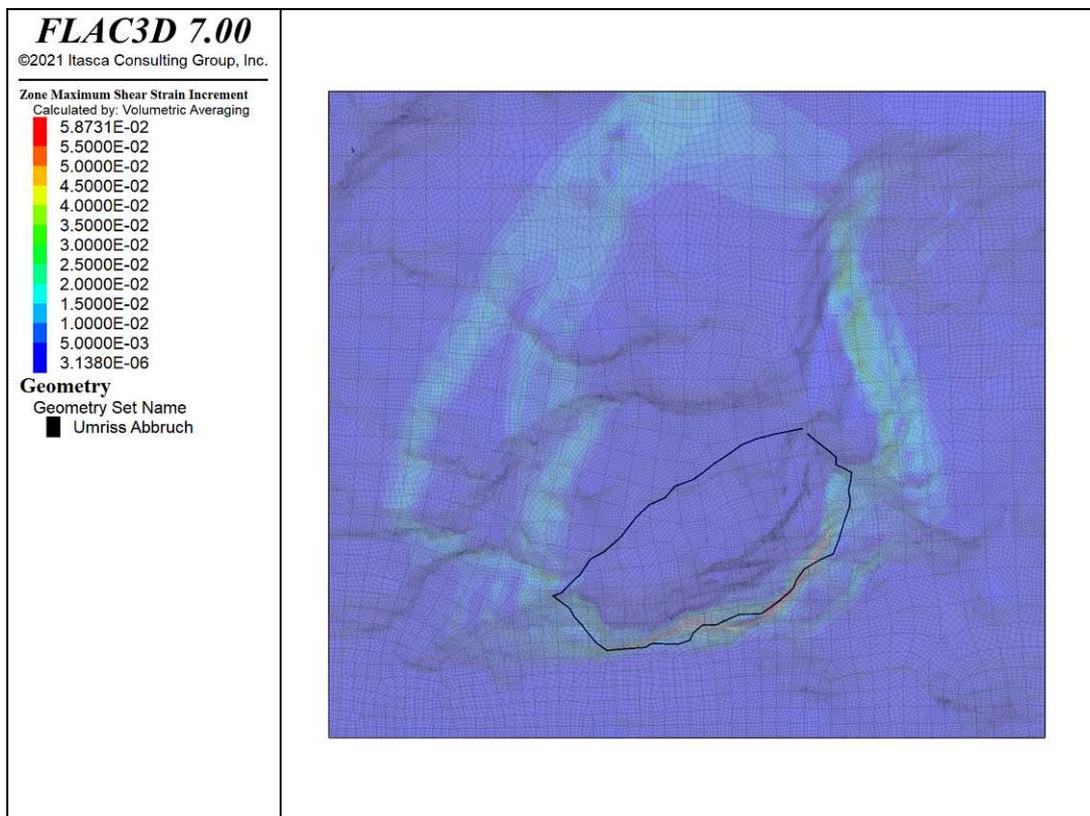


Abb. 4.22: Übereinstimmung maximale Schubverformung mit dem beobachteten Bereich beim MC-Modell (Abminderung_23)

Vergleicht man den, wie in Abschnitt 4.3.3.1 beschrieben, beobachteten Bereich mit den maximalen Schubverformungen der *Abminderung_23*, so lässt sich hier, anders als beim Hoek-Brown Modell, eine nicht so eindeutige Übereinstimmung feststellen. Die berechneten Maximalwerte der Schubverformungen (*Maximum Shear Strain Increment (SSI)*) in der Felswand konzentrieren sich recht eindeutig am vorderen Rand des beobachteten Bereiches, wie in Abbildung 4.22 zu sehen ist. Nach hinten jedoch verlaufen die Schubverformungen in Richtung der hinteren Modellgrenzen und nicht entlang des beobachteten Bereiches. Die Abbildung 4.23 stellt die maximalen Schubverformungen in einem Schnitt durch das Gelände dar. Dabei ziehen sich die Verformungen fast durch das ganze Modell.

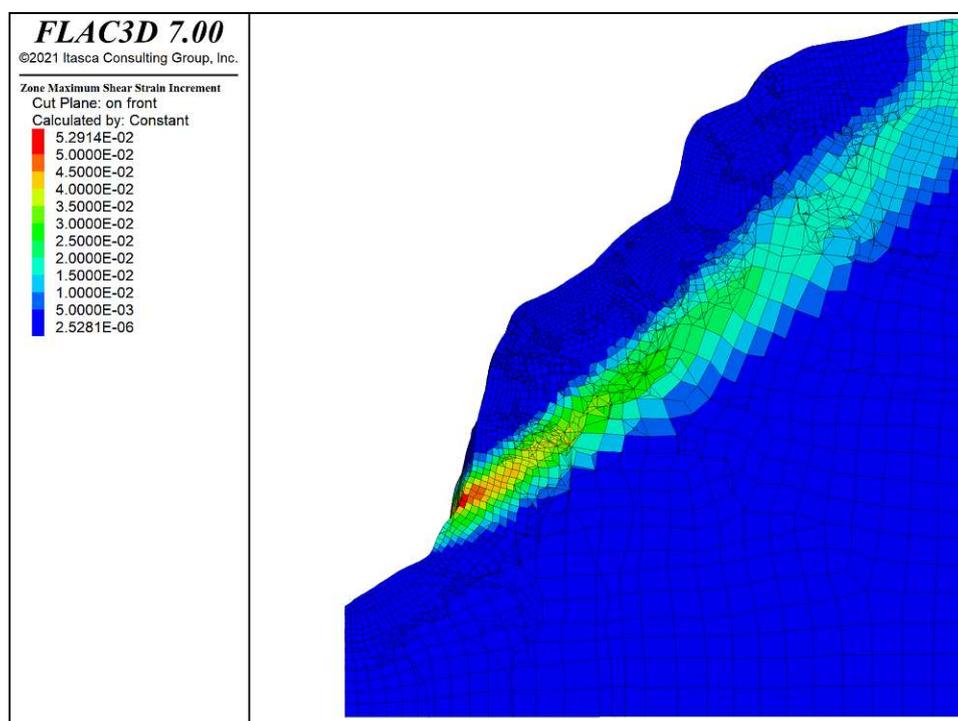


Abb. 4.23: Maximale Schubverformungen im Schnitt durch das Gelände beim MC-Modell (*Abminderung_23*)

Böschungshöhe

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurden weitere Berechnungen durchgeführt, bei denen die Böschungshöhe stufenweise verringert wurde. Dabei stellte sich heraus, dass die Berechnung mit einer Böschungshöhe von $h=65$ m eine höhere Genauigkeit liefert als jene mit einer Höhe von 80 m. Die Auswertung der Kennwerte ergab einen $ACC=0,821$ und einen $CSI=0,293$. Somit konnten folgende *Best-fit Parameter* für die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation berechnet werden:

1. $\varphi = 44,16^\circ$
2. $c = 0,465\text{MPa}$

4.6 Resümee

In den Kapiteln 4.4.3.2 und 4.5.3.2 wurden jeweils die Ergebnisse der beiden Modelle präsentiert. Nun ist es das Ziel das Hoek-Brown Bruchkriterium mit dem Mohr Coulomb Bruchkriterium zu vergleichen und Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede zu finden.

4.6.1 Hoek-Brown Modell

Im Zuge der Parameterkalibrierung konnten die am besten geeigneten (*best-fit*) Hoek-Brown Parameter GSI und mi festgestellt werden. Für die *Abminderung_5* konnte die beste Übereinstimmung gefunden werden. *Abminderung_33* und *Abminderung_51* lieferten ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Durch die genaue Auswertung der Tabelle 4.5 konnten der Geological Strength Index mit $GSI=34$ und der Materialparameter mit $mi=12$ bestimmt werden. Zusätzlich wurde für den Auflockerungsfaktors D ein optimaler Wert von $D=0,35$ gefunden. Die Auswertung der Kennwerte ACC, CSI, HSS und D2PC erzielte folgende Ergebnisse:

Tab. 4.17: Auswertung der Kennwerte zur Bestimmung der best-fit Parameter beim HB-Modell

Bezeichnung	D	GSI	FN	FP	TN	TP	CSI	ACC	HSS	D2PC
Abminderung_33	0,31	33	0.00	1.56	91.26	6.56	0.751	0.978	0.846	0.088
Abminderung_5	0,35	34	0.74	1.25	91.15	6.88	0.777	0.980	0.863	0.093
Abminderung_51	0,39	35	0.74	1.42	91.14	6.70	0.756	0.978	0.849	0.101

Neben dem Critical Success Index kann die erreichte Modellgenauigkeit auch durch den Accuracy Index beschrieben werden. Dabei wurde eine maximale Genauigkeit von $ACC=0,98$ und $CSI=0,777$ erreicht. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Differenz der beiden Kennziffern. Die Diskrepanz lässt sich dadurch erklären, dass bei der Bestimmung des Index CSI der Wert True Negative nicht mitberücksichtigt wird und dadurch der Zähler des Quotienten nach Gleichung (3.1) kleiner als der Zähler des Quotienten nach Gleichung (3.2) ist (vgl. Abschnitt 3.1.3). Bei einem großen Wert für TN nähert sich die durch den Index ACC beschriebene Modellgenauigkeit dem Optimum von 1 an, wohingegen der Index CSI unabhängig vom Wert TN ist.

Damit lässt sich sagen, dass für die Beschreibung der Genauigkeit der CSI eine bessere Aussage treffen kann. Seine Ergebnisse heben sich untereinander deutlich ab und eine hohe Übereinstimmung ist deutlicher zu erkennen. Der HSS und der D2PC liefern keine aussagekräftigen Ergebnisse für die Modellgenauigkeit.

4.6.2 Mohr-Coulomb Modell

Beim Mohr-Coulomb Modell gestaltete sich die Identifizierung der best-fit Parameter, φ und c etwas problematischer, da sich die am besten geeigneten Parameter bei einigen Kombinationen

gar nicht berechnen ließen. Die Auswertung ergab, dass die Berechnung mit der Bezeichnung *Abminderung_23* hinsichtlich dem ACC und dem CSI die höchste Genauigkeit lieferte. Die Auswertung der Kennwerte ACC, CSI, HSS und D2PC erzielte folgende Ergebnisse:

Tab. 4.18: Auswertung der Kennwerte zur Bestimmung der best-fit Parameter beim MC-Modell

FN	FP	TN	TP	CSI	ACC	HSS	D2PC
48,96	0,02	42,92	8,10	0,218	0,713	0,260	0,781

Dabei kann von einer Genauigkeit zwischen tatsächlichem, also beobachteten Bewegungsbereich (*observed area*) und dem simulierten, berechneten Bewegungsbereich (*simulated area*), von 71,3 % bzw. 21,1 % ausgegangen werden. Durch die Auswertung der Tabelle 4.11 ergaben sich für die *Abminderung_23* die Werte $\varphi=31,1^\circ$ und $c=0,35$ MPa.

Zusätzlich wurden noch weitere Berechnungen durchgeführt, bei denen die Böschungshöhe h verringert wurde. *Abminderung_123* lieferte dabei die genaueste Übereinstimmung bei einer Höhe von 65 m. Die unten stehende Tabelle fasst die Ergebnisse nochmals zusammen.

Tab. 4.19: Auswertung der Kennwerte zur Bestimmung der best-fit Parameter beim MC-Modell ($h=65$ m)

CSI	ACC	HSS	D2PC
0,293	0,821	0,377	0,699

Vergleicht man nun die Simulation mit der Beobachtung, so lässt sich eine Übereinstimmung nach dem ACC von 82,1 % und nach dem CSI von 29,3 % feststellen. Diese Simulation kann jedoch nicht als repräsentativ bezeichnet werden, da die Böschungshöhe von 65 m nicht der Realität entspricht und damit nur ein Versuch war, um ein besseres Ergebnis zu erlangen. Vergleicht man in der Abbildung 4.17 die Höhe zwischen den Schubverformungen und der Geländekante, so erweist sich eine Böschungshöhe von 80 m als realistisch.

4.6.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse zwischen dem Hoek-Brown Modell und dem Mohr-Coulomb Modell wird deutlich, dass es bei Ersterem zu einer genaueren Ermittlung der Kennwerte zur Feststellung der Modellgenauigkeit kommt. Beispielsweise wurde im Hoek-Brown Modell ein $ACC=0,98$ und ein $CSI=0,777$ erreicht. Beim Mohr-Coulomb Modell hingegen ein $ACC=0,713$ und ein $CSI=0,218$ berechnet. Prozentual ausgedrückt ergibt sich beim Accuracy Index eine Differenz von rund 25 % und beim Critical Success Index eine Differenz von 55 %.

In Abbildung 4.24 werden die Geschwindigkeiten der beiden Modelle gegenübergestellt. Zu sehen ist deutlich jener Bereich, der sich wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, innerhalb oder außerhalb der festgelegten Grenzen, von $1,0 \cdot 10^{-5} m/s befindet. Bei der Mohr-Coulomb Berechnung befindet sich das Modell bis zur hinteren Modellkante in Bewegung, anders als bei der Berechnung des Hoek-Brown Modells.$

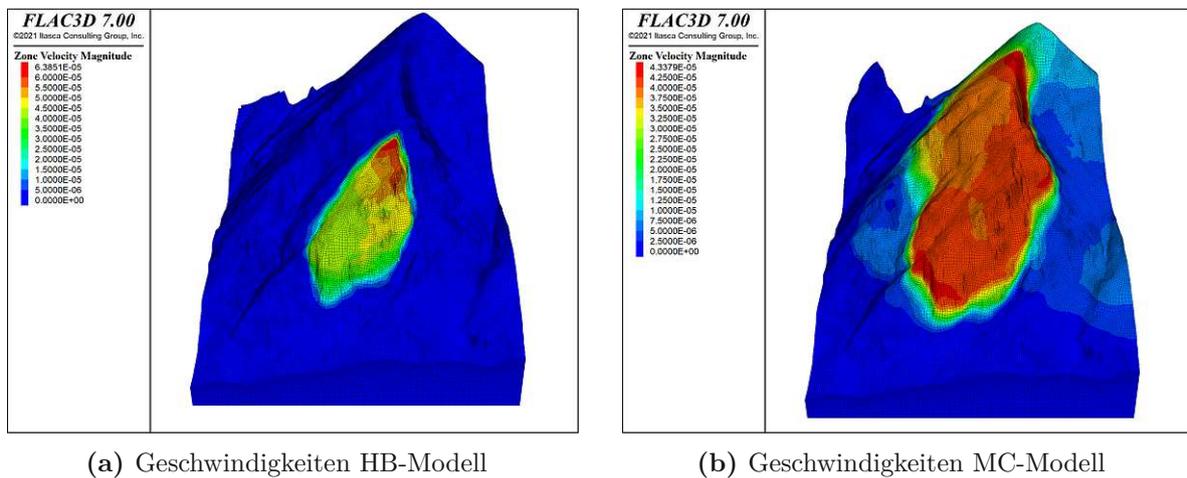


Abb. 4.24: Konturplot der Geschwindigkeiten am HB und MC-Modell

Vergleicht man die Werte von ACC und CSI, sowie den bewegten Bereich, so wird schnell klar, dass beim Hoek-Brown Modell deutlich größere Genauigkeiten zwischen Simulation und Beobachtung erreicht werden können.

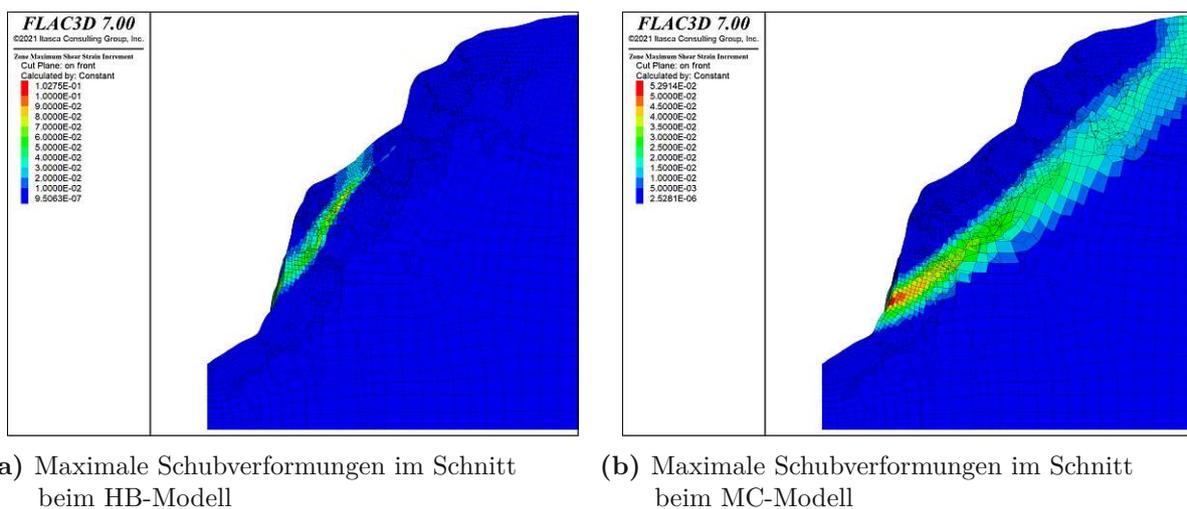
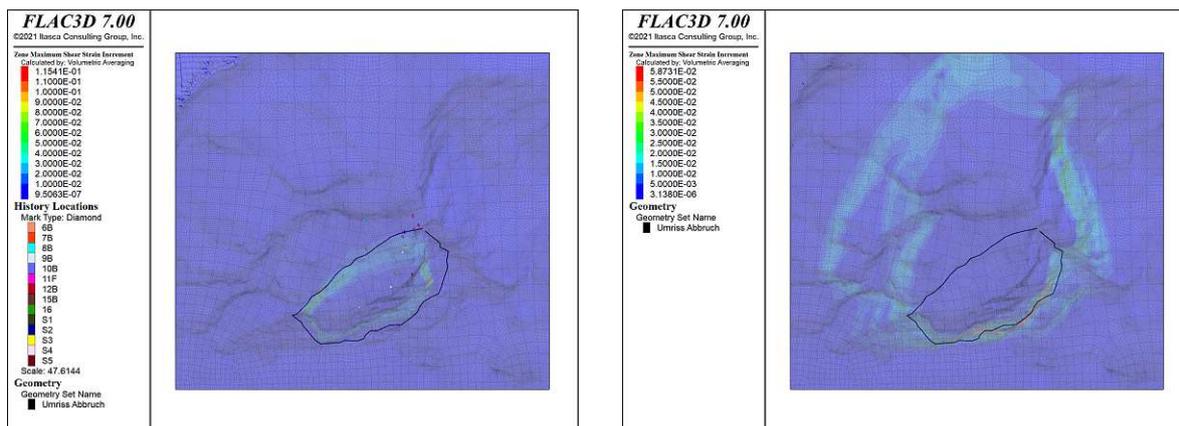


Abb. 4.25: Maximale Schubverformungen im Schnitt durch das Modell

Betrachtet man nun die maximalen Schubverzerrungen im Schnitt durch das Gelände als Vergleichspunkt, so kann man beim Vergleichen der Abbildung 4.25a mit der Abbildung 4.25b

feststellen, dass die Ausdehnung der Schubverformungen deutlich größer beim Mohr-Coulomb Modell, als beim Hoek-Brown Modell sind und bis weit an die hintere Modellgrenze reichen.

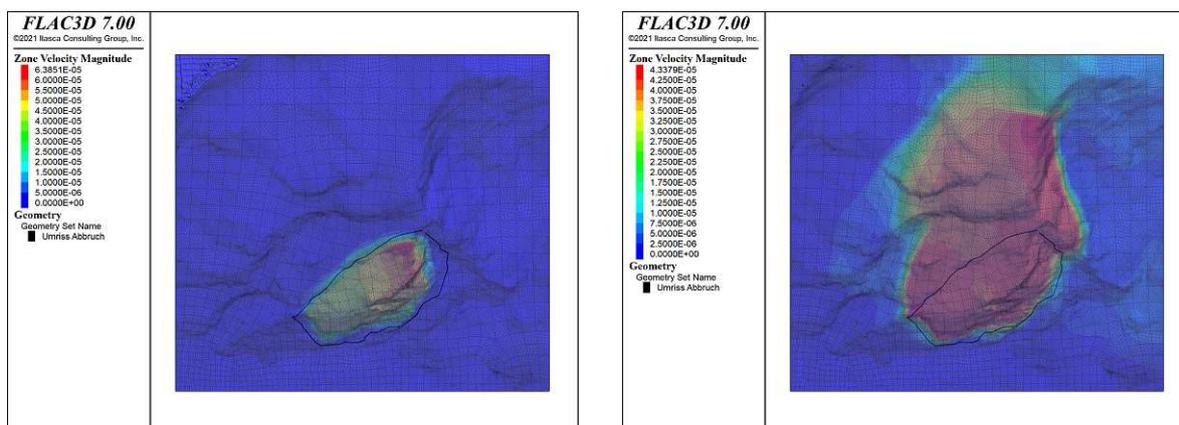
Gleiches spiegelt sich auch bei der Betrachtung der Abbildung 4.26 wider. Dabei ist zu sehen, dass die berechneten maximalen Schubverformungen beim Hoek-Brown Modell um einiges näher am beobachteten Bewegungsbereich (schwarze Umrandung) liegen, als jene aus der Mohr-Coulomb Berechnung.



- (a) Maximale Schubverformungen und beobachteter Bereich beim HB-Modell
- (b) Maximale Schubverformungen und beobachteter Bereich beim MC-Modell

Abb. 4.26: Übereinstimmung Maximale Schubverformungen und beobachteter Bereich

Die Abbildung 4.27 zeigt die Übereinstimmung der Geschwindigkeiten des berechneten Bereiches und des beobachteten Bereiches (schwarze Umrandung). Beim HB-Modell ist deutlich zu sehen, dass sich die berechneten Geschwindigkeiten nahezu vollständig im umrandeten Bereich befinden, was zeigt, dass die Simulation nahe an der Realität liegt.



- (a) Geschwindigkeiten und beobachteter Bereich beim HB-Modell
- (b) Geschwindigkeiten und beobachteter Bereich beim MC-Modell

Abb. 4.27: Übereinstimmung berechnete Geschwindigkeiten und beobachteter Bereich

Vergleicht man zusammenfassend die Parameter zur Beschreibung der Genauigkeit der beiden Modelle, so zeigt sich, dass für die Felsböschung Vals (Tirol), die Berechnung mit den semiempirischen Hoek-Brown Parametern bessere Ergebnisse liefert.

Eine Auswertung nach dem Critical Success Index liefert eindeutigere Ergebnisse und ist damit besser zur Beschreibung einer Übereinstimmung geeignet.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Massenbewegungen wie Felsstürze sind keine Seltenheit in alpinen Regionen und stellen eine ständige Gefährdung von Menschen und Infrastruktur dar. Die Beurteilung der Stabilität der betroffenen Talflanken erfolgt dabei mittels numerischer Verfahren und mittels Monitoring. Rechnerisch können solche Massenbewegungen simuliert und die bewegten Bereiche ermittelt werden.

Solche Massenbewegungen lassen sich einerseits als Diskontinuum mittels der Diskreten Elemente Methode (DEM) betrachten, andererseits als Kontinuum durch die Finite Elemente Methode (FEM) oder die Finite Differenzen Methode (FDM). Bei der kontinuumsmechanischen Betrachtungsweise wird davon ausgegangen, dass ein Modell als ein homogener Festkörper ohne Trennflächen wirkt, welcher sich bei einer mechanischen Einwirkung lediglich verformt. Solche Modelle werden als „verschmierte“ Materialmodelle bezeichnet, bei deren Betrachtungsweise Trennflächen und Gestein zu einer homogenen Einheit werden. Ein solches Modell ist jenes nach Hoek-Brown, welches das Gebirge bzw. den Fels mit verschmierten Materialparametern abbildet.

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es, die beiden Bruchkriterien, jenes nach Hoek-Brown (HB) und Mohr-Coulomb (MC), anhand des Beispiels der Felsböschung Vals in Tirol, miteinander zu vergleichen. Dies sollte darauf abzielen, eine Aussage über die Anwendbarkeit der beiden Kriterien treffen zu können. Dabei wurde ein von der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) Tirol beobachteter Bewegungsbereich (*observed area*) und ein simulierter, berechneter Bewegungsbereich (*simulated area*) miteinander verglichen und mittels Kennziffern bewertet.

Als Grundlage für die numerische Modellierung wurde ein digitales Geländemodell (DGM) verwendet, welches durch mehrere LIDAR-Kampagnen vor und nach dem Felssturzereignis am 24.12.2017 im Valsertal erstellt wurde. Die dadurch entstandene Punktwolke wurde in mehreren Schritten mittels CloudCompare und Griddle in ein dreidimensionales Volumensmodell umgewandelt und diente als Grundlage für FLAC3D, einem FDM-Programm.

Die in FLAC3D verwendeten Materialparameter sind semiempirische Parameter und wurden einerseits durch die zuständigen Geologen bestimmt (GSI und D), andererseits stammen sie

aus Laborversuchen (σ_{ci} und mi), welche von der WLF aufgenommen und von der Brenner Basistunnel GmbH ausgewertet wurden. Alle weiteren relevanten Parameter sind berechnet worden. Mittels FLAC3D und der Methode der Festigkeitsreduktion wurde unter Anwendung des Bruchkriteriums nach Hoek-Brown und Mohr-Coulomb mit äquivalenten Mohr-Coulomb Parametern ein Grenzgleichgewichtszustand (GGGZ) für das Modell ermittelt. Dieser Zustand bildete den Ausgangspunkt für die Kalibrierung der Festigkeitsparameter. Durch die Variation der semiempirischen Parameter D und GSI für Hoek-Brown sowie den äquivalenten Parametern φ und c für Mohr-Coulomb wurde versucht, eine bestmögliche Abbildung der durch das Monitoring beobachteten Hangbewegung zu erreichen. Die Ergebnisse wurden quantitativ mittels Kennzahlen bewertet. Maßgebend für die Beschreibung der Übereinstimmung waren der Accuracy Index (ACC) und der Critical Success Index (CSI), welche jeweils mit einem Wert gleich 1 eine hundertprozentige Übereinstimmung zwischen Simulation und Beobachtung erreichen.

Bei der ersten Kalibrierung des HB-Modells wurde versucht, Übereinstimmung mittels Variation des Geological Strength Index (GSI) und dem Materialparameter mi zu erreichen. Dabei wurde der Auflockerungsfaktor D bei einem Wert gleich null belassen. Dieser Kalibrierungsversuch führte zu keiner zufriedenstellenden Übereinstimmung. Bei der zweiten durchgeführten Kalibration wurde der optimale D -Wert und jener für den GSI berechnet. Dabei wurde der Grenzgleichgewichtszustand mithilfe der Methode der Festigkeitsreduktion für die HB-Parameter ermittelt. Ausgehend von den reduzierten HB-Parametern konnte unter Anwendung der Methode nach Illeditsch (2021) die HB-Einhüllende rückgerechnet werden. Der dadurch erhaltene GSI und D -Wert bildete den Ausgangspunkt für die Kalibrierung. In einem vorher definierten Wertebereich wurden die Parameter variiert und die jeweiligen Parameterpaare ermittelt. Die Beurteilung des Systemzustandes erfolgte anhand der Geschwindigkeiten des Modells.

Durch die Auswertung der Kennwerte konnten für die Hoek-Brown Berechnungen eine maximale Übereinstimmung von bis zu 98 % beim ACC erreicht werden. Der CSI wurde mit einem Wert von 77,7 % Übereinstimmung ermittelt. Die Differenz ergibt sich dadurch, dass beim Accuracy Index der Wert von True Negative (TN) mitberücksichtigt wird. Er stellt jenen Bereich dar, der außerhalb der Simulation und Beobachtung liegt, aber noch innerhalb der festgelegten Grenzen. Somit wird der ACC von der Modellgröße beeinflusst. Betrachtet man die Ergebnislisten, so sind beim CSI gute Ergebnisse klarer zu erkennen und er eignet sich besser zur Beschreibung einer Übereinstimmung. Die best-fit Parameter konnten somit mit $GSI = 34$, $mi = 12$ und $D = 0,35$ ermittelt werden.

Anders als bei den HB-Parametern handelte es sich bei den MC-Parametern, dem inneren Reibungswinkel φ und der Kohäsion c , um sog. äquivalente Parameter, die aus den semiempirischen HB-Werten mithilfe des Programms RocData berechnet wurden. Dabei wurde die Mohr-Coulomb Bruchgerade an die Hoek-Brown Einhüllende angenähert. Bei diesem Modell wur-

de der Grenzgleichgewichtszustand mittels Festigkeitsreduktion der äquivalenten MC-Parameter berechnet. Die daraus erhaltenen reduzierten MC-Festigkeitsparameter φ^{red} und c_c^{red} waren die Ausgangsparameter für die Kalibrierung. Durch die anschließende Kalibrierung konnten die Kennwerte ermittelt und ausgewertet werden.

Die Auswertung ergab für das Mohr-Coulomb Modell mit äquivalenten MC-Parametern einen ACC von rund 71,3 % und einen CSI von 21,8 %. Für die Kohäsion und den Reibungswinkel konnten die best-fit Parameter mit $\varphi=31,1^\circ$ und $c=0,35$ MPa bestimmt werden.

Im Zuge einer weiteren Modellreihe wurde versucht die Böschungshöhe von ursprünglich 80 m auf eine geringere Höhe zu reduzieren. Diese Versuchsreihe lieferte ansatzweise bessere Übereinstimmungen der Bereiche. Jedoch kann sie als nicht repräsentativ angesehen werden, da die simulierten Böschungshöhen nicht der Realität entsprechen.

Aus der Auswertung der beiden Bruchkriterien wird klar, dass das Bruchkriterium nach Hoek-Brown mit semiempirischen Materialparametern die beobachtete Hangbewegung wesentlich genauer abbildet. Betrachtet man die Geschwindigkeiten des bewegten Bereiches, so ist deutlich zu sehen, dass beim MC-Modell ein größerer Bereich in Bewegung ist als beim HB-Modell. Ebenfalls bei den maximalen Schubverformungen ist eine deutliche Diskrepanz zu verzeichnen.

Betrachtet man die zum Anfang geschätzten Hoek-Brown Festigkeitsparameter, so zeigt sich, dass der Wert für GSI und mi gut abgeschätzt wurde und zu einem akzeptablen Ergebnis führte.

Schlussfolgerung

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass mithilfe des semiempirischen Bruchkriteriums nach Hoek-Brown eine hohe Genauigkeit in der Übereinstimmung zwischen beobachteter und simulierter Hangbewegung erreicht werden kann. Die Berechnungen unter Anwendung des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb erreichten wesentlich geringere Genauigkeiten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aus einem ursprünglich nicht linearem Bruchkriterium ein lineares abgebildet wurde. Da die als Sekante dargestellte äquivalente Mohr-Coulomb Bruchgerade linear ist, kann sie die Hoek-Brown Kurve nicht vollständig abdecken. Somit kommt es zu einer Überschätzung bzw. Unterschätzung der Schubspannung entlang der Bruchgeraden. Die äquivalenten MC-Parameter eignen sich somit nicht für die Simulation.

Weiteres wird ersichtlich, dass die von Mergili et al. (2017) entworfene Methode sich gut für Abbrüche solcher Größenordnungen anwenden lässt, um quantitativ die Übereinstimmung zwischen dem berechneten Bereich und dem beobachteten Bereich mittels Kennzahlen zu bewerten. Der Critical Success Index (CSI) eignet sich für solche Berechnungen am besten, da er unabhängig von der Modellgröße ist und sich dadurch nicht beeinflussen lässt.

Diese Arbeit soll die Grundlage für weitere Forschungen in Bezug auf die Beurteilung der Stabilität von Talflanken unter Anwendung des Hoek-Brownschem Bruchkriterium bilden. Sie soll helfen den Zustand mittels Monitoring überwachte instabile (bewegte) Bereiche durch Simulationen zu bewerten, um gegebenenfalls darauf reagieren zu können.

Literaturverzeichnis

- Bauernfeind, C. (2013). „Untersuchungen der Standsicherheit von Tunneln in s hlig gelagertem Gebirge mittels UDEC und FLAC“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien.
- Bock, H. (1981). *An Introduction to rock mechanics*. Townsville: Dept. of Civil Engineering Systems, James Cook University.
- Engl, D. A., Fellin und C. Zanger (2008). „Scherfestigkeiten von Scherzonen-Gesteinen – Ein Beitrag zur geotechnischen Bewertung von tektonischen Störungen und Gleitzonen von Massenbewegungen“. In: *Bulletin für angewandte Geologie* 13.82, S. 63–81.
- Formetta, G., G. Capparelli und P. Versace (2016). „Evaluating performance of simplified physically based models for shallow landslide susceptibility“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 20.11, S. 4585–4603. DOI: 10.5194/hess-20-4585-2016.
- Gasser, O. (2010). „Ermittlung des Gebirgsverhaltens mittels diskreter und verschmierter Modellierung“. Diplomarbeit. Technische Universität Graz.
- Hammah, R., T. Yacoub, J. Curran und B. Corkum (2005). *The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion*.
- Hartl, S. (2019). „Analyse der Felslawinen Frank Slide und Vals mit Hilfe des Computercodes r.avaflow“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien.
- H ck, V. (1969). *Zur Geologie des Gebietes zwischen Tuxer Joch und Olperer (Zillertal, Tirol)*. 1. Aufl. Wien.
- Hoek, E. und M. Diederichs (2006). „Empirical estimation of rock mass modulus“. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43.2, S. 203–215. ISSN: 1365-1609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*.
- Hoek, E. und E. Brown (1997). „Practical estimates of rock mass strength“. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34.8, S. 1165–1186.
- Hoek, E., C. Carranza-Torres und B. Corkum (Jan. 2002). „Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition“. In: *Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium Toronto*.

- Hoek, E., P. Kaiser und W. F. Bawden (Jan. 1995). *Support of Underground Excavation in Hard Rock*.
- Hoek, E. und P. Marinos (Jan. 2000). „Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses“. In: *Tunnels and Tunnelling International* 32, S. 45–51.
- Hyvärinen, O. (2014). „A Probabilistic Derivation of Heidke Skill Score“. In: *Weather and Forecasting* 29, S. 177–181. DOI: 10.1175/WAF-D-13-00103.1.
- Illeditsch, M. (2021). *Berechnung der reduzierten Hoek-Brown Parameter*. TU Wien, Forschungsbereich Ingenieurgeologie. 1040 Wien, Karlsplatz 13/220-1.
- Itasca Consulting Group, I. (2016). *3DEC Users Guide*. ITASCA. Minneapolis.
- (2019). *FLAC-3D 7.00 Manual*. ITASCA. Minneapolis.
- Konietzky, H. (2000). *Numerische Simulation in der Geotechnik mittels expliziter Verfahren*. Gelsenkirchen.
- Krainer, K. (2005). *Nationalpark Hohe Tauern - Geologie*. 2., überarb. u. erw. Aufl. Nationalpark Hohe Tauern - Wissenschaftliche Schriften. Verl. Carinthia. ISBN: 3853785859.
- Li, A., R. Merifield und A. Lyamin (2008). „Stability charts for rock slopes based on the Hoek–Brown failure criterion“. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45, S. 689–700.
- Marks, M. und M. Warnecke (2017). *GesteinskundeSkript für die Übungen zur Dynamik der Erde*. Vorlesungsskript. Universität Tübingen.
- Mavko, G., T. Mukerji und J. Dvorkin (2009). *The Rock Physics Handbook - Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN: 978-1-139-47832-8.
- Mergili, M., J.-T. Fischer, J. Krenn und S. P. Pudasaini (2017). „r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows“. In: *Geoscientific Model Development* 10.2, S. 553–569. DOI: 10.5194/gmd-10-553-2017.
- Moser, B. (2020). „Synthetic Rock Mass (SRM) Modelle für Stabilitätsanalysen von Felsböschungen: Einsatzmöglichkeiten und Grenzen am Beispiel Vals (Tirol)“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien.
- Nagy, P. (2013). „Rückrechnung eines Nagelwand-Großversuches mittels FLAC3D zur Verifikation von Boden-Nagel Modellen“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien.
- ORF Österreich (2017). „Felssturz Verkettung mehrerer Umstände“. In: URL: <https://tirol.orf.at/v2/news/stories/2885967/> (Zugriff am 05. 10. 2021).
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (2017). „Leitfaden für die Ermittlung geologisch-geotechnischer Grundlagen für die Planung tiefliegender Tunnel“. In: *ÖGG*.

- Preh, A. (2004). „Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes (PFC)“. Dissertation. Technische Universität Wien.
- (2018). „Felsstürze – Sturzprozess“. In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* 125, S. 59–65.
 - (2019a). „Felssturz Valsertal: Analysen und Prognoseberechnungen von Massenstürzen“. In: *Interner Bericht an die Wildbach- und Lawinenverbauung, Stabstelle Geologie, Innsbruck*.
 - (2019b). *Skriptum zur Vorlesung Angewandte Felsmechanik*, S. 19–22.
- Prinz, H. und R. Strauß (2018). „Rutschungen“. In: *Ingenieurgeologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 467–531. ISBN: 3662547090.
- Rockenschaub, M. J., B. Kolenprat und A. Nowotny (2003). „Das westliche Tauernfenster“. In: *Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt*. Hrsg. von Ö. Geologische Bundesanstalt Wien.
- Sari, M. (Juni 2010). *A simple approximation to estimate the Hoek-Brown parameter 'mi' for intact rocks*.
- Sausgruber, J. T. (2010). „Ingenieurgeologische und geotechnische Untersuchungen von Massenbewegungen im Gebiet des Bunzkögeles bei Matri in Osttirol“. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Secklehner, R. (2019). „Untersuchungen zum Einfluss der Verteilung der Raumstellung von Trennflächen auf die Standsicherheit von Hohlraumbauwerken“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien.
- Will, J. und H. Konietzky (1998). *Neue Techniken der Numerik zur Berechnung von Felsböschungen*. 3. Aufl. Bd. 16.
- Wuertenberger, M. (2018). „Ein Jahr nach Felssturz: Vals für Winter gerüstet“. In: *Tiroler Tageszeitung*. URL: <https://www.tt.com/artikel/15126817/ein-jahr-nach-felssturz-vals-fuer-winter-geruestet> (Zugriff am 05. 10. 2021).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Physikalische Beschreibung und Materialmodelle bei geklüftetem Fels (verändert nach Will und Konietzky, 1998)	5
2.2	Mechanisches Verhalten eines Kontinuums und eines Diskontinuums (Bock, 1981)	6
2.3	Diskontinuumsmechanische Simulation eines Versagens mittels 3DEC (Moser, 2020)	8
2.4	Kontinuumsmechanische Simulation eines Versagens mittels FLAC3D	9
2.5	Iterativer Berechnungsprozess in FLAC3D, frei übersetzt nach Itasca Consulting Group (2019)	10
2.6	Mohr-Coulombsches Bruchkriterium, aus Engl et al. (2008)	12
2.7	Übliche Werte für den Materialparameter mi , aus Hoek, Kaiser et al. (1995) . . .	14
2.8	Tabellen zur Charakterisierung der Gebirgsmasse sowie Abschätzung der Verformbarkeit und Gebirgsfestigkeit, nach Hoek und Marinos (2000)	15
a	Tabelle zur Bestimmung des GSI bei geklüftetem Gestein	15
b	Tabelle zur Bestimmung des GSI bei heterogenem Gestein	15
2.9	Beispiele für den Auflockerungsfaktor D , nach Hoek, Carranza-Torres et al. (2002)	16
2.10	Hoek-Brownsche Bruchkriterium und die Mohr-Coulombsche Approximation (Itasca Consulting Group, 2019)	17
2.11	Genauigkeit der MC-Parameter bei Anpassung der Kurve, nach Li et al. (2008) .	19
2.12	Schub- und Normalspannungs Kurve beim HB-Kriterium und die reduzierte HB-Einhüllende, nach Hammah et al. (2005)	22
3.1	Kalibrierungskriterien TP, TN, FP und FN nach Mergili et al. (2017), verändert	25
3.2	Vergleich Berechnung (gelb umrandeter Bereich) und Beobachtung (blau umrandeter Bereich) anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN	28
4.1	Schuttkegel des Massensturzes und seine Ausläufer (Wuertenberger, 2018)	30
4.2	Orthofoto des Untersuchungsgebietes (Quelle: Laser- und Luftbildatlas Tirol, verändert, https://portal.tirol.gv.at)	31
4.3	Geologische Übersichtskarte des Tauernfensters 1:1.000.000 (Quelle: Wikimedia Commons)	32

4.4	Auszug aus der Geologischen Karte der Republik Österreich M 1:50.000, Kartennummer 148 Brenner. Quelle: Geologische Bundesanstalt, Wien 2009	33
4.5	Bearbeitungsschritte beim Aufbau des Modells	35
	a Punktwolke aus der LIDAR-Kampagne	35
	b In FLAC3D verwendetes Volumenmodell	35
4.6	Bildhafte Darstellung der Randbedingungen für alle Oberflächen	36
	a Randbedingung für die Unter-, Vorder- und linke Seite	36
	b Randbedingung für die Unter-, Vorder- und rechte Seite	36
	c Randbedingung für die Unter-, Hinter- und rechte Seite	36
4.7	Übersicht der Position der jeweiligen Messstellen	38
4.8	Position der Messpunkte im Abbruchbereich	38
4.9	Bewegter-, beobachteter Bereich und Messpunkte im FLAC3D-Modell	39
4.10	Konturplot der Schubverzerrungen nahe dem Grenzgleichgewicht	42
4.11	Sigma-Tau-Kurven, verändert nach Illeditsch (2021)	47
4.12	Maximale Schubverzerrungen nach Anpassung der Parameter m_i und GSI	47
4.13	Sigma-Tau-Kurven nach Anpassung des D -Wertes, nach Illeditsch (2021), verändert	48
4.14	Vergleich Simulation und Beobachtung anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN (Teil I)	53
	a Abminderung_33 (D=0,31 GSI=33)	53
	b Abminderung_34 (D=0,31 GSI=32)	53
	c Abminderung_22 (D=0,33 GSI=34)	53
	d Abminderung_23 (D=0,33 GSI=33)	53
	e Abminderung_24 (D=0,33 GSI=32)	53
	f Abminderung_5 (D=0,35 GSI=34)	53
	g Abminderung_17 (D=0,35 GSI=33)	53
	h Abminderung_18 (D=0,35 GSI=32)	53
4.15	Vergleich Simulation und Beobachtung anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN (Teil II)	54
	a Abminderung_41 (D=0,37 GSI=35)	54
	b Abminderung_1 (D=0,37 GSI=34)	54
	c Abminderung_42 (D=0,37 GSI=33)	54
	d Abminderung_43 (D=0,37 GSI=32)	54
	e Abminderung_51 (D=0,39 GSI=35)	54
	f Abminderung_52 (D=0,39 GSI=34)	54
	g Abminderung_53 (D=0,39 GSI=33)	54
	h Abminderung_54 (D=0,39 GSI=32)	54

4.16	Übereinstimmung Maximale Schubverformung mit dem beobachteten Bereich beim HB-Modell	57
4.17	Maximale Schubverformungen im Schnitt durch das Gelände beim HB-Modell . .	58
4.18	Berechnete Verschiebungen an den Messpunkten	58
4.19	Hoek-Brown Einhüllende (rot) und angenäherte Mohr-Coulomb Bruchgerade (blau)	60
4.20	Vergleich Beobachtung und Simulation anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN	64
	a Abminderung_21 ($\varphi=31,1$ $c=0,24$)	64
	b Abminderung_23 ($\varphi=31,1$ $c=0,34$)	64
	c Abminderung_2 ($\varphi=31,6$ $c=0,29$)	64
	d Abminderung_12 ($\varphi=32,1$ $c=0,29$)	64
4.21	Vergleich Beobachtung und Simulation anhand der Bereiche TP, FN, FP und TN, abhängig von h	65
	a Abminderung_122 ($h=70$ m)	65
	b Abminderung_123 ($h=65$ m)	65
4.22	Übereinstimmung maximale Schubverformung mit dem beobachteten Bereich beim MC-Modell (Abminderung_23)	67
4.23	Maximale Schubverformungen im Schnitt durch das Gelände beim MC-Modell (Abminderung_23)	68
4.24	Konturplot der Geschwindigkeiten am HB und MC-Modell	71
	a Geschwindigkeiten HB-Modell	71
	b Geschwindigkeiten MC-Modell	71
4.25	Maximale Schubverformungen im Schnitt durch das Modell	71
	a Maximale Schubverformungen im Schnitt beim HB-Modell	71
	b Maximale Schubverformungen im Schnitt beim MC-Modell	71
4.26	Übereinstimmung Maximale Schubverformungen und beobachteter Bereich . . .	72
	a Maximale Schubverformungen und beobachteter Bereich beim HB-Modell	72
	b Maximale Schubverformungen und beobachteter Bereich beim MC-Modell	72
4.27	Übereinstimmung berechnete Geschwindigkeiten und beobachteter Bereich . . .	72
	a Geschwindigkeiten und beobachteter Bereich beim HB-Modell	72
	b Geschwindigkeiten und beobachteter Bereich beim MC-Modell	72

Tabellenverzeichnis

3.1	Kalibrierungskriterien der Parametervariationen	27
4.1	σ und τ Parameter (Illeditsch, 2021)	44
4.2	σ und τ Parameter durch Anpassung von mi und GSI (Illeditsch, 2021)	46
4.3	Berechnung der σ und τ Parameter durch Anpassung von D (Illeditsch, 2021)	49
4.4	Kombinationen der beiden Parameter D und GSI	50
4.5	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Parameter beim HB-Modell	52
4.6	Bewertung anhand des ACC	56
4.7	Bewertung anhand des CSI	56
4.8	Bewertung anhand des HSS	56
4.9	Bewertung anhand des D2PC	56
4.10	Kombinationen der beiden Parameter φ und c	62
4.11	Auswertung der Kennwerte zur Kalibrierung der Parameter beim MC-Modell	63
4.12	Auswertung der Kennwerte über Variation der Böschungshöhe	65
4.13	Bewertung anhand des ACC	66
4.14	Bewertung anhand des CSI	66
4.15	Bewertung anhand des HSS	67
4.16	Bewertung anhand des D2PC	67
4.17	Auswertung der Kennwerte zur Bestimmung der best-fit Parameter beim HB-Modell	69
4.18	Auswertung der Kennwerte zur Bestimmung der best-fit Parameter beim MC-Modell	70
4.19	Auswertung der Kennwerte zur Bestimmung der best-fit Parameter beim MC-Modell ($h=65$ m)	70