

MASTERARBEIT

Ermittlung des Gebirgsverhaltens mittels diskreter und verschmierter Modellierung

Oliver GASSER, BSc

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz

Begutachter:

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont Wulf Schubert

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Corina Leber

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau
Technische Universität Graz

Graz, September 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegeben Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Graz, September 2010

Oliver Gasser

Danksagung

erledigt

Graz, September 2010

Oliver Gasser

Kurzfassung

Die Eigenschaften und das Verhalten des Gebirges werden durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Welche einen wesentlichen Einfluss ausüben, kann nur schwer beurteilt werden. Außerdem ist die Größe dieses Einflusses kaum abschätzbar. In dieser Arbeit wird versucht, diese Fragen durch vier Parameterstudien, in denen jeweils verschiedene Gebirgskennwerte variiert werden, zu beantworten. Diese sind: Trennflächenorientierung, Trennflächenabstand, Trennflächenzustand, Radius des kreisförmigen Ausbruchsquerschnittes und Gesteinsart. Ein tiefliegender Tunnel mit einer Überlagerung von 500m und einem Seitendruckbeiwert von 0,8 liegt den Parameterstudien zu Grunde. Durch die in Summe 215 durchgeführten Variationen ist es möglich, Trends für das Gebirgsverhalten abzuleiten. Das Gebirge wird mittels 2-dimensionalen FE-Berechnungen einerseits mit intakten Gesteinsparametern sowie zwei Trennflächenscharen nachgebildet, was in dieser Arbeit als diskrete Modellierung bezeichnet wird.

Andererseits werden alle im Zuge der vier Parameterstudien untersuchten Kombinationen, mittels der drei Gebirgsklassifikationssysteme RMR (*Rock Mass Rating*), RMI (*Rock Mass Index*) sowie GSI (*Geological Strength Index*) erfasst und die dazugehörigen "verschmierten" Gebirgsparameter bestimmt. Die Ermittlung des GSI basiert auf den Verfahren nach Cai et al.. Auf Grundlage dieser Gebirgsparameter werden die "verschmierten" Modellierungen berechnet. Für die Berechnungen wird das Mohr-Coulomb'sche sowie das Hoek-Brown'sche Versagenskriterium verwendet.

Verschmierte und diskrete Modellierung werden miteinander verglichen und bezüglich der Kriterien radiales Verformungsbild, Fehlermechanismus und der Fläche der Querschnittsverkleinerung ausgewertet. Dies erlaubt eine Evaluierung der gängigen Klassifizierungssysteme und lässt Rückschlüsse auf deren Anwendungsgrenzen zu.

Abstract

The rock mass behaviour is determined by a plethora of parameters. An a priori identification of relevant parameters is not an easy task, and the magnitude of their influence can sometimes be hard to assess. This work addresses these issues by the means of four parameter studies, each of them varying a different geotechnical parameter. The varied parameters are: discontinuity orientation, discontinuity spacing, discontinuity shear strength, radius of the excavated tunnel and the intact rock strength. All calculations have been conducted with the assumption of an overburden of 500 m and a lateral pressure coefficient of 0,8. The rock mass behaviour is calculated with the finite element program Phase², assuming two sets of discontinuities and elasto-plastic material behaviour, in this thesis called “distinct“ model.

All of the modelled rock masses have been evaluated by three empirical classification systems (RMR - Rock Mass Rating, RMi - Rock Mass Index, GSI - Geological Strength Index) and the respective smeared rock mass properties have been determined based on the rating. Based on those parameters the “smeared“ models were calculated. The framework presented by Cai et al. has been used for objective determination of the GSI value. Mohr-Coulomb and Hoek-Brown failure criteria are used.

The comparison between smeared and distinct modelling is conducted along the criteria of radial displacement field, failure mode and the reduction of excavated area due to deformations. That allows evaluation of currently used classification systems and determination of their applicability boundaries.

Abkürzungsverzeichnis

$\gamma_{1,2,3}$	Winkel zwischen den Trennflächenscharen
ν	Poissonzahl
ω	Öffnungswinkel zwischen den Trennflächenscharen
φ	Reibungswinkel
c	Kohäsion
D	Faktor für die Auflockerung des Gebirges
dM	diskrete Modellierung
E_F	Elastizitätsmodul der Kluftfüllung
E_i	Elastizitätsmodul des Gesteins
E_{rm}	Elastizitätsmodul des Gebirges
f	Abminderungsfaktor
G_i	Schubmodul des Gesteins
G_{rm}	Schubmodul des Gebirges
k_n	Kluftnormalsteifigkeit
k_s	Kluftschersteifigkeit
L	Gesamtlänge des Bohrkernes für den RQD
L_1	Länge über die kein Kluftwandkontakt besteht
L_2	Länge über die Kluftwandkontakt besteht
L_{ges}	Betrachtungslänge ($L_1 + L_2$)
m_b	Gebirgskonstante im Hoek-Brown Versagenskriterium
m_i	Gesteinskonstante im Hoek-Brown Versagenskriterium
t	vorhandene Kluftöffnung
V_b	Blockgröße
vM	verschmierte Modellierung
UCS	einachsiale Druckfestigkeit

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	9
2	Stand der Technik	10
2.1	Einleitung	10
2.2	Systeme zur Klassifizierung des Gebirges	11
2.2.1	RMR-System	11
2.2.2	RMi-System	12
2.2.3	GSi-System	12
2.3	Anforderungen an ein Klassifizierungssystem	13
3	Parameterstudie	15
3.1	Gesteinsparameter	15
3.2	Trennflächenparameter	16
3.3	Übersicht Parameterstudien	19
4	Berechnungsmodelle	23
4.1	Modellbildung	23
4.2	Diskrete Modellierung	25
4.3	“Verschmierte“ Modellierung	25
4.3.1	Abgeleitete “verschmierte“ Gebirgsparameter	25
4.3.1.1	RMR	26
4.3.1.2	RMi	29
4.3.1.3	GSi	32
4.3.1.4	Gegenüberstellung der Elastizitätsmodule	33
5	Methodik der Auswertung	35
5.1	Allgemeines	35
5.2	Auswertung der Querschnittsverkleinerung	37

5.3	Auswertung der diskreten Modellierung	38
5.4	Auswertung der verschmierten Modellierung	42
6	Ergebnisse	44
6.1	Allgemeines	44
6.2	Parameterstudie I	45
6.2.1	Einzelergbnis diskrete Modellierung	45
6.2.2	Einzelergbnis verschmierte Modellierung	45
6.2.3	Zusammenfassung	45
6.3	Parameterstudie II	48
6.3.1	Einzelergbnis diskrete Modellierung	48
6.3.2	Einzelergbnis verschmierte Modellierung	48
6.3.3	Zusammenfassung	48
6.4	Parameterstudie III	51
6.4.1	Einzelergbnis diskrete Modellierung	51
6.4.2	Einzelergbnis verschmierte Modellierung	51
6.4.3	Zusammenfassung	51
6.5	Parameterstudie IV	54
6.5.1	Einzelergbnis diskrete Modellierung	54
6.5.2	Einzelergbnis verschmierte Modellierung	54
6.5.3	Zusammenfassung	54
6.6	Zusammenfassung und Überblick	58
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	62
	Literaturverzeichnis	64

KAPITEL 1

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, aufgrund verschiedener Parameterstudien ein Verhalten des Gebirges abzuleiten. Grundlage dafür sind drei realistisch gewählte, einer gewissen Gesteinsart zugehörige, Gesteinsparameter. Weiters werden für diese Parameterstudien drei verschiedene Trennflächenzustände bestimmt, die durch ihre Festigkeitseigenschaften und Steifigkeiten gute, mittlere und schlechte Trennflächeneigenschaften beschreiben. Die restlichen Parameter, sind: Trennflächenorientierung, Trennflächenabstand, und Radius des kreisförmigen Ausbruchsquerschnittes. In jeder Parameterstudie soll der Schwerpunkt auf einen der vorher erwähnten Parameter bzw. eine Kombination dieser gelegt werden. Dadurch soll erkennbar werden, wie sich dieser bzw. diese auf das Gebirgsverhalten auswirken.

Die einzelnen Variationen in den Parameterstudien werden weiters durch die drei Klassifizierungssysteme RMR, R_{Mi} und G_{Si} bewertet. Die Wahl dieser drei Systeme, begründet sich durch deren häufige Anwendung, für Vorhersage von Verschiebungen bzw. als Grundlage für die Vordimensionierung von Stützmittel in der geotechnischen Planung. Die Modellierung des Gebirges mit intakten Gesteinsparametern und Trennflächenscharen, denen Trennflächeneigenschaften zugewiesen werden, wird in dieser Arbeit als diskrete Modellierung bezeichnet. Im Gegensatz dazu steht die verschmierte Modellierung, welche auf Grundlage der mittels Klassifizierungssystemen ermittelten Parameter, die Trennfläche über das Modell "verschmiert" und damit ein homogenes System erzeugt. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Beantwortung der Frage liefern, inwieweit diese drei Klassifizierungssysteme in der Lage sind, die tatsächlich auftretenden Verschiebungen zu prognostizieren. Weiters soll geklärt werden, ob und wie es eventuell möglich ist, diese Klassifizierungssysteme zuverlässiger zu gestalten.

Die 2-dimensionalen numerischen Untersuchungen welche mit dem Finiten Elemente Programm Phase² der Firma Rocscience durchgeführt werden, ermöglichen es die große Anzahl an Rechnungen in einem vertretbaren Zeitraum zu bewältigen. (Im Gegensatz zu einer Diskrete Element Methode-Berechnung, wo die Rechenzeit ein Vielfaches betragen würde).

KAPITEL 2

Stand der Technik

2.1 Einleitung

Im Tunnelbau ist der Baugrund auch gleichzeitig Baustoff, der in seinen Eigenschaften eine sehr große Streuung aufweist. Aufgrund dieser Tatsache ist es notwendig, den anzutreffenden Baugrund realitätsnah zu erfassen. Die Beschreibung der Untergrundverhältnisse bildet die Grundlage für ein sicheres und wirtschaftliches Arbeiten im Tunnelbau. Daher ist eine geotechnische Erkundung mit anschließender Auswertung notwendig, die laut Sommer [21] in drei verschiedene Vorgehensweisen unterteilt werden kann (siehe Abb.2.1).

- I.) Entwurf auf Grundlage realitätsnaher felsmechanischer Modelle und darauf aufbauender numerischer Berechnungen
- II.) Entwurf auf Grundlage von Gebirgsverhaltenstypen
- III.) Entwurf auf der Grundlage von empirischen Ansätzen

In dieser Arbeit soll näher auf Punkt III - Entwurf auf Grundlage von empirischen Ansätzen eingegangen werden. Diese Vorgehensweise beruht alleine auf Fallbeispielen vergleichbarer Projekte. Hierfür wird dem Gebirge mit Hilfe von Beschreibungsmerkmalen eine numerische Größe zugeteilt. Die Zuteilung bzw. Ermittlung dieser numerischen Größe wird mit Hilfe von Formeln, Tabellen, Diagrammen oder Kombinationen daraus durchgeführt. Die Ergebnisse der Klassifizierungssysteme werden unter Berücksichtigung weiterer Parameter als Grundlage für eine Sicherungsempfehlung, Angaben zum erwarteten Gebirgsdruck oder für die ausbruchsbedingten Verschiebungen herangezogen.

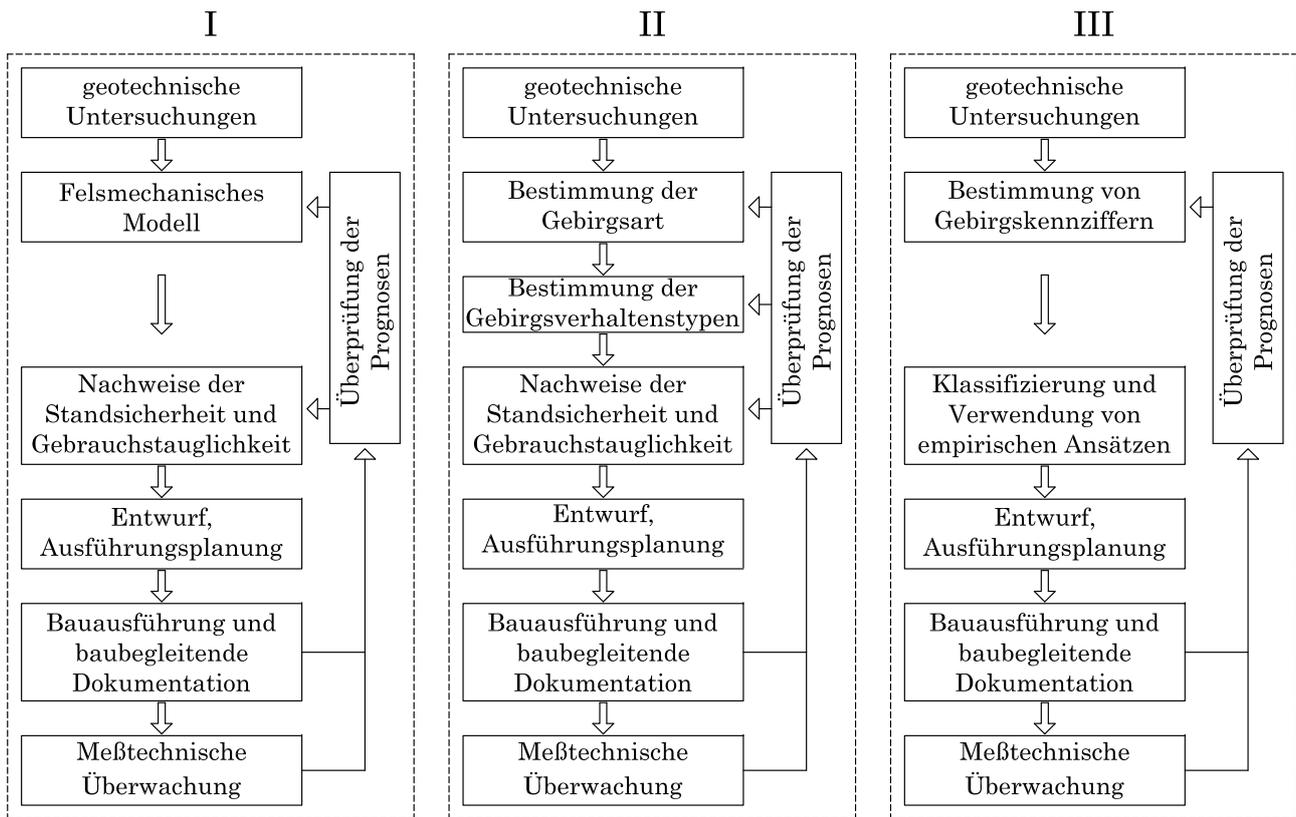


Abb. 2.1: Vorgehensweisen bei der Projektbearbeitung im Tunnelbau nach *R. Sommer* [21]

2.2 Systeme zur Klassifizierung des Gebirges

Die in dieser Arbeit verwendeten Klassifizierungssysteme unter Verwendung von Formel und Tabellen sind:

2.2.1 RMR-System

Die Gebirgsklassifizierung nach *Bieniawski*, *Rock Mass Rating* (RMR) [20] hat als Grundlage ca. 270 Fallbeispiele aus Südafrika. Dieses System beschreibt das Gebirge durch sechs gewichtete Parameter, deren Ergebnisse zum RMR-Wert aufsummiert werden.

Die sechs Parameter lauten:

- Gesteinsfestigkeit (einaxiale Druckfestigkeit)
- Durchtrennung bzw. Beschreibung der Felsqualität (RQD)
- Trennflächenabstand
- Trennflächeneigenschaften (Trennflächenzustand)
- Grundwasserverhältnisse
- Trennflächenorientierung

2.2.2 R_{Mi}-System

Die Gebirgskennzahl nach Palmström, *Rock Mass Index* (R_{Mi}) [13] ist das Produkt aus einachsialer Druckfestigkeit des intakten Gesteins und dem Kluftkennwert (J_P). Dieser setzt sich aus Klufttrauigkeit, Kluftverwitterung, Kluftlänge und Blockgröße zusammen.

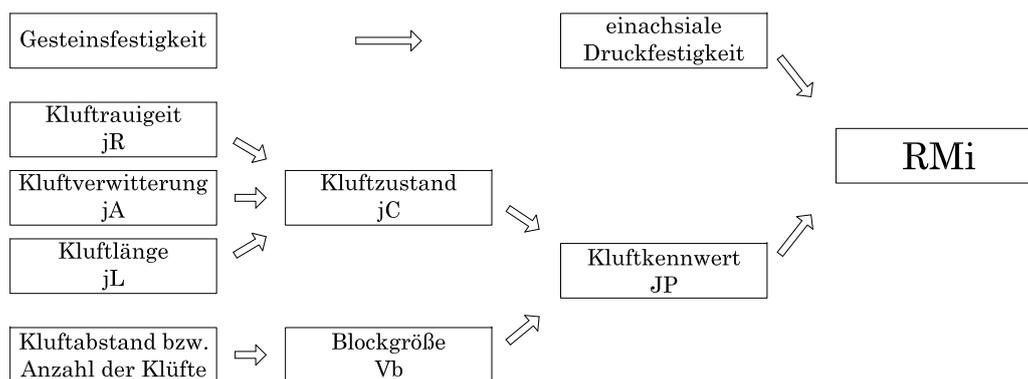


Abb. 2.2: Aufbau der Gebirgskennzahl (R_{Mi}) nach Palmström. [12]

2.2.3 GSi-System

Die Kennzahl der geologischen Festigkeit nach Hoek, *Geological Strength Index* (GSi) [6] ermittelt sich nicht wie die anderen Systeme durch Formeln und Tabellen, das Gebirge wird stattdessen mit Hilfe eines Diagramms beschrieben.

2.3 Anforderungen an ein Klassifizierungssystem

Ein Klassifizierungssystem sollte das Gebirge so beschreiben, dass alle seine Eigenschaften berücksichtigt werden. Da die Eigenschaften und das Verhalten des Gebirges aber von einer Vielzahl von Parametern und deren möglichen Kombinationen bestimmt werden, kann eine Klassifizierung nur eine grobe Umschreibung darstellen.

Fallbeispiele als Grundlage eines Klassifizierungssystems

Die Grenzen eines Klassifizierungssystems müssen dem Anwender bekannt sein, damit er überprüfen kann, ob sein Projekt im Rahmen dieser Fallbeispiele liegt. Diese Anwendungsgrenzen werden entweder vom Autor bekannt gegeben, oder müssen durch Studium der zugrunde gelegten Fallbeispiele erarbeitet werden. Da die in den Klassifizierungssystemen verwendeten Fallbeispiele aber nicht im vollem Umfang zugänglich bzw. dokumentiert sind, ist es schwierig die Anwendungsgrenzen daraus zu ermitteln. Daher sollte eine ausführliche Dokumentation der verwendeten Fallbeispiele jedem System zu Grunde liegen. [21]

Blockfallen

Für die Möglichkeit, dass sich ein Felsblock aufgrund des Ausbruchs aus dem Gebirgsverband lösen kann, müssen Trennflächen vorhanden sein. Ein Klassifizierungssystem bewertet unter anderem die Trennflächen und die Blockgröße (R_{Mi} und G_{Si}) und reduziert dadurch den Gebirgsmodul, aber eine Einschätzung für ein mögliches Blockfallen ist unmöglich.

Eindeutigkeit der Klassifizierung bzw. subjektive Einschätzung

Die Eindeutigkeit der Klassifizierung muss gegeben sein, hängt aber sehr von der subjektiven Bewertung und der Erfahrung des Anwenders ab. Daher kann bei gleichen Ausgangsparametern für eine Klassifizierung von verschiedenen Anwendern ein unterschiedliches Ergebnis erzielt werden. [21]

Mögliche Schwachpunkte von Klassifizierungssystemen nach Riedmüller und Schubert, (1999) für den Tunnelbau [18]

- Klassifizierungsparameter müssen für alle Gebirgsarten ohne Rücksicht auf eine spezielle Charakteristik des Gebirges oder eines Projektes anwendbar sein.
- Die komplexen Eigenschaften eines Gebirges, besonders die Anisotropie und das zeitabhängige Verhalten können nicht ausreichend in einer einzigen Zahl wiedergegeben werden.
- Eine gleiche Klassifizierung kann durch Variation der Parameter erreicht werden, aber trotzdem ein anderes Gebirgsverhalten ergeben.

- Die vereinfachte empirische Annäherung basiert auf einigen Klassifizierungsparametern. Dies beinhaltet keine Versagensmechanismen, Verformungen oder die Wechselwirkung mit einem Ausbau.
- Die Klassifizierungsparameter sind nicht ausreichend genug definiert, um damit einen brauchbaren Ausbau festlegen zu können.
- Die komplexe Wechselwirkung zwischen der Orientierung der Trennfläche, der Gebirgszerlegung und der Scherfestigkeit von Trennflächen und besonders das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Hauptnormalspannungen sind als Haupteinflussfaktoren für das Gebirgsverhalten nicht ausreichend betrachtet.

Um die Grenzen und Schwachpunkte von Klassifizierungssystemen zu kennen und auch richtig einschätzen zu können, ist daher viel Erfahrung nötig.

KAPITEL 3

Parameterstudie

Die Eingangswerte der diskreten Modellierung, sowie deren Variationen für die Parameterstudie, werden in diesem Kapitel beschrieben. Es werden realistische, einer gewissen Gesteinsart entsprechende Parameter gewählt.

3.1 Gesteinsparameter

In Tab. 3.1 werden drei Gesteinsarten mit ihren repräsentativen Gesteinsparametern dargestellt. Der Zusammenhang der Parameter UCS, φ und c wird nach Formel 3.1 hergestellt.

$$UCS = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [MPa] \quad (3.1)$$

Tab. 3.1: Gesteinsarten mit den zugehörigen ausgewählten Gesteinsparametern

	UCS	Reibungsw.	Kohäsion	m_i	E-Modul	Poissonzahl	Wichte
	[MPa]	[°]	[MPa]	[-]	[GPa]	[-]	$[\frac{MN}{m^3}]$
Gneis	110	40	26	28	50	0,2	0,027
Kalkmarmor	80	33	22	15	35	0,2	0,027
Quarzphyllit	40	30	12	13	20	0,2	0,027

3.2 Trennflächenparameter

Für die diskrete Modellierung werden drei repräsentative Trennflächenzustände mit verschiedenen Eigenschaften gewählt. Diese Trennflächenzustände unterscheiden sich durch Kluftöffnung und Kluftwandkontakt. Als Füllung der Trennfläche wird ein Ton-Schluff (fest) mit einem Elastizitätsmodul von 25 MPa angenommen.

Beschreibung der drei Trennflächenzustände:

- Trennflächenzustand I (*TFZ I*) - gut
- Trennflächenzustand II (*TFZ II*) - mittel
- Trennflächenzustand III (*TFZ III*) - schlecht

Weiters wird für die Modellierung der Trennflächen noch die Kluftnormalsteifigkeit (k_n) und die Kluftschersteifigkeit (k_s) benötigt. Für die Ermittlung der Kluftnormalsteifigkeit ist es erforderlich die Kluft in einen Bereich ohne und einen mit Trennflächenkontakt zu unterteilen. Beiden Bereichen werden Längen im Bezug auf eine Betrachtungslänge (L_{ges}) zugewiesen und daher in Prozent angegeben. Die Länge über die kein Kluftwandkontakt besteht (L_2) wird mit dem E-Modul von Ton-Schluff (fest) (E_F) multipliziert und noch durch die vorhandene Kluftöffnung (t) dividiert. Bei der Länge über die Kluftwandkontakt besteht (L_1) wird der E-Modul des umgebenden Gesteins (E_i) verwendet. Um den Kluftwandkontakt realistischer zu beschreiben, wird dieser mit dem Abminderungsfaktor (f) multipliziert. Dadurch soll die punktuelle Belastung des Gesteins an der Trennflächenoberfläche und der nicht perfekte Kontakt der beiden aufeinander liegenden Trennflächen berücksichtigt werden. Dieser Zusammenhang für die Ermittlung der Kluftnormalsteifigkeit wird in Formel 3.2 und in Abb. 3.1 dargestellt. Die gewählten Eingangswerte für Kluftöffnung (t), Kluftwandkontakt in Prozent sowie der Abminderungsfaktor (f) werden in Tab. 3.2 aufgelistet.

Tab. 3.2: Werte für die Berechnung der Kluftsteifigkeiten

Trennflächenzustand	Kluftöffnung	Kluftwandkontakt	abm. Faktor	Poissonzahl
	[mm]	[%]	[-]	[-]
I	0,1	80	0,9	0,2
II	1	50	0,9	0,2
III	5	5	0,9	0,3

$$k_n = \frac{f \cdot E_i \cdot L_1 + \frac{E_F}{t} \cdot L_2}{L_{ges}} \quad [MPa/m] \quad (3.2)$$

- L_1 Länge über die Kluftwandkontakt besteht
- L_2 Länge über die kein Kluftwandkontakt besteht
- L_{ges} Betrachtungslänge ($L_1 + L_2$)
- E_F Elastizitätsmodul der Füllung
- t vorhandene Kluftöffnung
- f Abminderungsfaktor

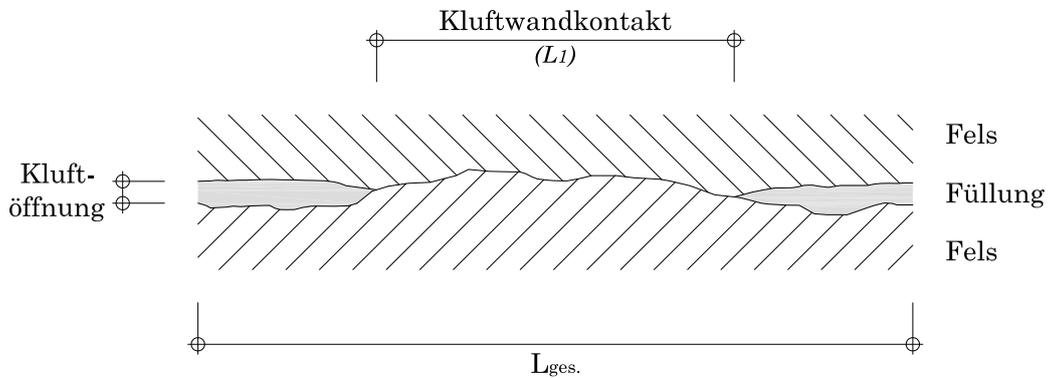


Abb. 3.1: Skizze zu Formel 3.2 für die Ermittlung der Kluftnormalsteifigkeit (k_n)

Für die Bestimmung der Kluftschersteifigkeit (k_s) wird die Kluftnormalsteifigkeit (k_n) aus Formel 3.2 in Formel 3.3 eingesetzt und damit der Elastizitätsmodul des Gebirges (E_{rm}) berechnet.

$$k_n = \frac{E_i \cdot E_{rm}}{L \cdot (E_i - E_{rm})} \quad [MPa/m] \quad \text{Barton [1]...} \quad (3.3)$$

Der Elastizitätsmodul des Gebirges (E_{rm}) bzw. des Gesteins (E_i) und die Poissonzahl (ν) liefert mit Formel 3.4 den Schubmodul des Gebirges (G_{rm}) bzw. des Gesteins (G_i).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad [GPa] \quad (3.4)$$

Mit dem Schubmodul des Gebirges (G_{rm}) und Gesteins (G_i) wird mit Formel 3.5 die Kluftscherteifigkeiten (k_s) berechnet.

$$k_s = \frac{G_i \cdot G_{rm}}{L \cdot (G_i - G_{rm})} \quad [MPa/m] \quad \text{Barton [1]... (3.5)}$$

Eine Zusammenfassung der errechneten Kluftsteifigkeiten findet sich in Tab. 3.3, jene der Festigkeitseigenschaften für die drei Trennflächenzustände in Tab. 3.4.

Tab. 3.3: Gerundete Mittelwerte der errechneten Kluftsteifigkeiten

Gesteinsart	TFZ I		TFZ II		TFZ III	
	k_n [$\frac{MPa}{m}$]	k_s [$\frac{MPa}{m}$]	k_n [$\frac{MPa}{m}$]	k_s [$\frac{MPa}{m}$]	k_n [$\frac{MPa}{m}$]	k_s [$\frac{MPa}{m}$]
Gneis	86.000	35.800	35.000	14.600	7.000	2.700
Kalkmarmor	75.200	31.300	28.300	11.800	6.300	2.400
Quarzphyllit	64.400	26.800	21.500	9.000	5.700	2.200

Tab. 3.4: Gewählte Festigkeitseigenschaften der drei Trennflächenzustände

Bezeichnung	Reibungsw.	Kohäsion
	[°]	[MPa]
TFZ I	28	0
TFZ II	20	0
TFZ III	12	0

3.3 Übersicht Parameterstudien

Für diese Arbeit werden vier verschiedene Parameterstudien betrachtet. In jeder werden die folgenden fünf Kennwerte verschieden miteinander kombiniert.

- Trennflächenorientierung
- Trennflächenabstand
- Trennflächenzustand
- Radius des kreisförmigen Ausbruchsquerschnittes
- Gesteinsart

Ein tiefliegender Tunnel sollte die Randbedingung für die Parameterstudien sein. Daher wurde eine Überlagerung von **500m** und ein Seitendruckbeiwert (K_0) von **0,8** gewählt. Eine Variation dieser beiden Randbedingungen würde die Anzahl der möglichen Kombinationen drastisch erhöhen, daher werden diese bei allen vier Parameterstudien nicht verändert.

Abb. 3.2 stellt ein beispielhaftes Modell aus Parameterstudie I mit zwei Trennflächenscharen und deren zugehöriger Trennflächenneigung dar. In allen dargestellten Fällen haben beide Trennflächenscharen per Definition ihren Ursprung im Kreismittelpunkt. In dieser Arbeit werden nur Trennflächen modelliert, die parallel zur Vortriebsrichtung streichen. Eine Untersuchung von normal zur Vortriebsrichtung einfallenden Trennflächen ist bei Verwendung einer 2D-Numerik nicht möglich.

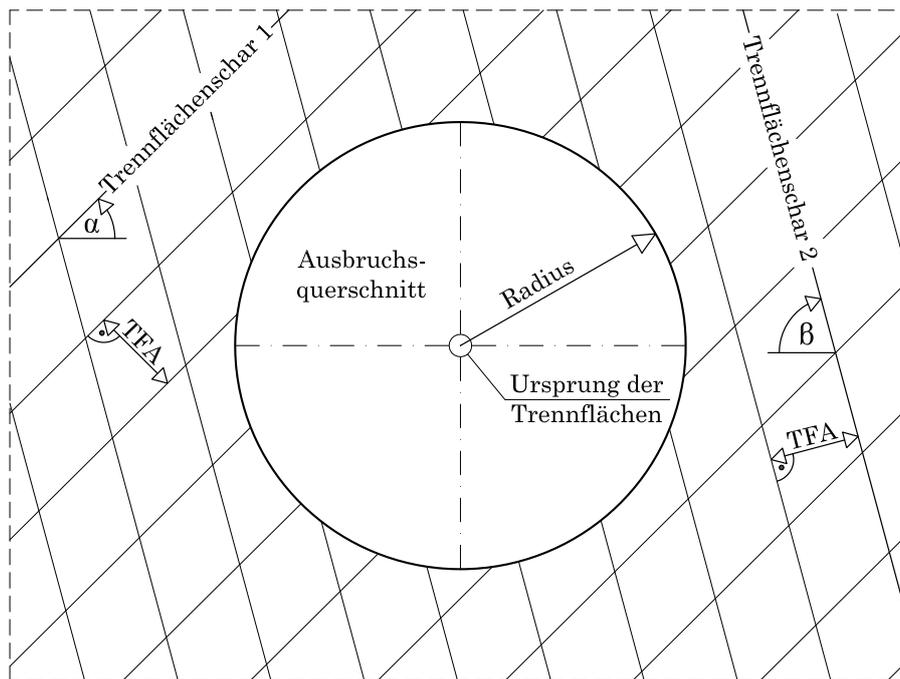


Abb. 3.2: Definition der zwei Trennflächenscharen und dazugehöriger Trennflächenneigung

α ... von der Horizontalen ausgehend gegen den Uhrzeigersinn ... $0^\circ - 90^\circ$

β ... von der Horizontalen ausgehend im Uhrzeigersinn ... $0^\circ - 90^\circ$

Parameterstudie I

In Parameterstudie I soll der Einfluss der unterschiedlichen **Trennflächenneigungen** genauer betrachtet werden. Durch die im Verhältnis zu den anderen Parameterstudien größere Anzahl an verschiedenen Neigungen, soll besser erkennbar werden ab wann bzw. in welchem Bereich, ein Einfluss auf das Verschiebungsverhalten auftritt.

Die Abstufung der Trennflächenneigung beider Trennflächenscharen erfolgt in 15° -Schritten. Die Neigung der Trennflächenschar 1 beginnt bei 0° (horizontal) und endet bei 90° (vertikal). Die Neigung der Trennflächenschar 2 beginnt bei 0° (horizontal) und endet bei 90° (vertikal) z.B. TF1 45° - TF2 90° . Die Kombinationen $0^\circ \setminus 0^\circ$ bzw. $90^\circ \setminus 90^\circ$ werden ausgelassen.

Der Trennflächenzustand I wird der Trennflächenschar 1, der Trennflächenzustand III der Trennflächenschar 2 zugeordnet. Weiters wird der Radius mit 4m, der Trennflächenabstand mit 2,5m (für beide Trennflächenscharen gleich) und als Gesteinsart der Kalkmarmor festgelegt. Bei der Kombination aller Parameter dieser Studie ergeben sich 47 Variationen.

Parameterstudie II

In Parameterstudie II soll der Zusammenhang zwischen **Ausbruchsradius** und **Trennflächenabstand** genauer betrachtet werden. Durch die Variation dieser beiden Parameter sollen die Verschiebungscharakteristika, vor allem im Hinblick auf Blockfallen, aufgrund unterschiedlicher Verhältnisse zwischen Radius und Trennflächenabstand untersucht werden.

Die Abstufung der Trennflächenneigung beider Trennflächenscharen erfolgt in 20°-Schritten symmetrisch. Die Neigung der beiden Trennflächenscharen beginnt bei 20° und endet bei 80° (z.B. TF1 40° - TF2 40°). Somit ergeben sich 4 verschiedene Trennflächenneigungen.

Der Ausbruchsradius wird mit 2m, 4m und 6m festgelegt. Die Trennflächenabstände werden mit 1,5m, 2,5m, 3,5m und 4,5m gewählt (beide Trennflächenscharen haben den selben Abstand). Weiters werden für beide Trennflächenscharen der Trennflächenzustand III und als Gesteinsart der Kalkmarmor festgelegt. Bei der Kombination aller Parameter dieser Studie ergeben sich 48 Variationen.

Parameterstudie III

In Parameterstudie III soll der Einfluss der drei verschiedenen **Trennflächenzustände** (I, II & III) auf das Verschiebungsverhalten genauer betrachtet werden. Durch die zusätzliche Variation der Gesteinsart (Gneis und Quarzphyllit) ergeben sich sechs unterschiedliche Trennflächenzustände. Weiters soll ein möglicher Zusammenhang zwischen Trennflächenzustand und Neigungswinkel erkannt werden.

Die Trennflächenneigungen werden wie bei Parameterstudie II gewählt. Bei der Variation aller Trennflächenzustände wären neun verschiedene Kombinationen möglich, die doppelt vorhanden werden nicht betrachtet. Weiters wird der Radius mit 4m, der Trennflächenabstand mit 2,5m (für beide Trennflächenscharen) sowie die Gesteinsarten Gneis und Quarzphyllit festgelegt. Bei der Kombination aller Parameter dieser Studie ergeben sich 48 Variationen.

Parameterstudie IV

In Parameterstudie IV soll der Einfluss der drei verschiedenen **Gesteinsarten** in Bezug auf Trennflächenabstand und Trennflächenzustand (I & II) genauer betrachtet werden. Durch die Variation dieser drei Parameter soll der zu erwartende Trend, dass ein kleines Verhältnis von Ausbruchsradius zu Trennflächenabstand in Kombination mit einem hohen Elastizitätsmodul

des Gesteins, die geringste Verschiebung ergibt, bestätigt werden. Weiters soll versucht werden mögliche Verschiebungscharakteristika aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisse zwischen Radius und Trennflächenabstand aufzuzeigen.

Die Trennflächenneigungen werden wie bei Parameterstudie II bzw. III gewählt. Weiters wird der Radius mit 5m und der Trennflächenabstand mit 2m bzw. 4m (für beide Trennflächenscharen gleich) festgelegt. Bei der Kombination aller Parameter dieser Studie ergeben sich 72 Variationen.

Tab. 3.5 zeigt eine Zusammenfassung der vier Parameterstudien mit den Kennwerten, die variiert wurden. Hervorgehoben sind die jeweiligen Schwerpunkte der Parameterstudien.

Tab. 3.5: Zusammenfassung der vier Parameterstudien

Parameterstudie I	Parameterstudien II	Parameterstudie III	Parameterstudie IV
TF-Neigung	TF-Neigung TF-Abstand Radius	TF-Neigung TF-Zustand Gesteinsart	TF-Neigung TF-Abstand Gesteinsart TF-Zustand

KAPITEL 4

Berechnungsmodelle

4.1 Modellbildung

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wird das menügesteuerte Computerprogramm Phase² der Firma Rocscience verwendet. Phase² ist ein 2-dimensionales elasto-plastisches Finite Elemente Programm für die Berechnung von Spannungen und Verschiebungen im Tunnelbau [19]. Wegen der Verwendung eines Kontinuumsmodells ist es nicht möglich, dass sich Blöcke aus dem Gebirgsverband lösen können, sie ergeben lediglich größere Verschiebungen. Daher kann auch nicht unterschieden werden, ob ein Block aufgrund der Gravitation fällt oder nicht. Ein Blockfallen wäre nur mit einem Diskontinuumsmodell (z.b. UDEC¹) möglich. Deshalb wurden Kontrollrechnungen mit UDEC durchgeführt und ein Kriterium zur Identifizierung fallender Blöcke bei der Auswertung der Berechnungsergebnisse von Phase² entwickelt. Eine Beschreibung dieses Kriteriums erfolgt in Kapitel 5.3. Die Bezeichnung diskrete Modellierung ist auf Grund der Verwendung eines FE-Programms (Kontinuumsmodell) nicht ganz korrekt, dies würde eigentlich nur bei der Verwendung eines Diskontinuumsmodells zutreffen. Da in Phase² die Trennflächen mit ihren Eigenschaften aber berücksichtigt werden, wird dies in dieser Arbeit als diskrete Modellierung bezeichnet.

Damit die Berechnungsergebnisse nur geringfügig von den Randbedingungen beeinflusst werden, ist es notwendig, den Gebirgsblock ausreichend groß zu dimensionieren. Daraus ergibt sich ein quadratischer Gebirgsblock mit einer Seitenlänge von 72m, in dessen Zentrum der Mittelpunkt des kreisförmigen Ausbruchsquerschnittes liegt. Abb. 4.1 zeigt das Modell für die Berechnung in Phase².

Das Modell wird an beiden Seiten in horizontaler und am unteren Rand in horizontaler und

1 UDEC (Universal Distinct Element Code) der Firma ITASCA

in vertikaler Richtung gesperrt. Die Primärspannung wird in die finiten Elemente des Modells eingebracht. Dieser Spannung wird an der Oberseite kein Auflager, sondern eine vertikal wirkende Gleichlast von 13,5 MPa (entspricht der vertikalen Primärspannung) entgegengesetzt. Dies ermöglicht Verschiebungen an der Oberseite, die durch den Ausbruch hervorgerufen werden. Des weiteren werden die Verschiebungen, die aufgrund der Primärspannung auftreten, vor dem Ausbrechen des Hohlraumes auf Null gesetzt.

Die Generierung des Netzes bzw. die Dichte des Netzes wird vom Programm selbstständig durchgeführt und auch angepasst. Um den Einfluss des FE-Netzes zu untersuchen und die Berechnungen zu kalibrieren, wurde eine manuelle Verdichtung des Netzes um den Hohlraum für einige Rechnungen durchgeführt. Dies lieferte jedoch nur sehr geringfügige Änderungen. Die Zeit für die Netzgenerierung und Berechnungen stieg aber erheblich an.

Für die Kalibrierung der FE-Berechnungen wird ein "homogenes" Modell des intakten Gesteins mit den in dieser Arbeit verwendeten Gesteinsparametern und Ausbruchsradien der geschlossenen Lösung nach Feder und Arwanitakis [5] gegenübergestellt.

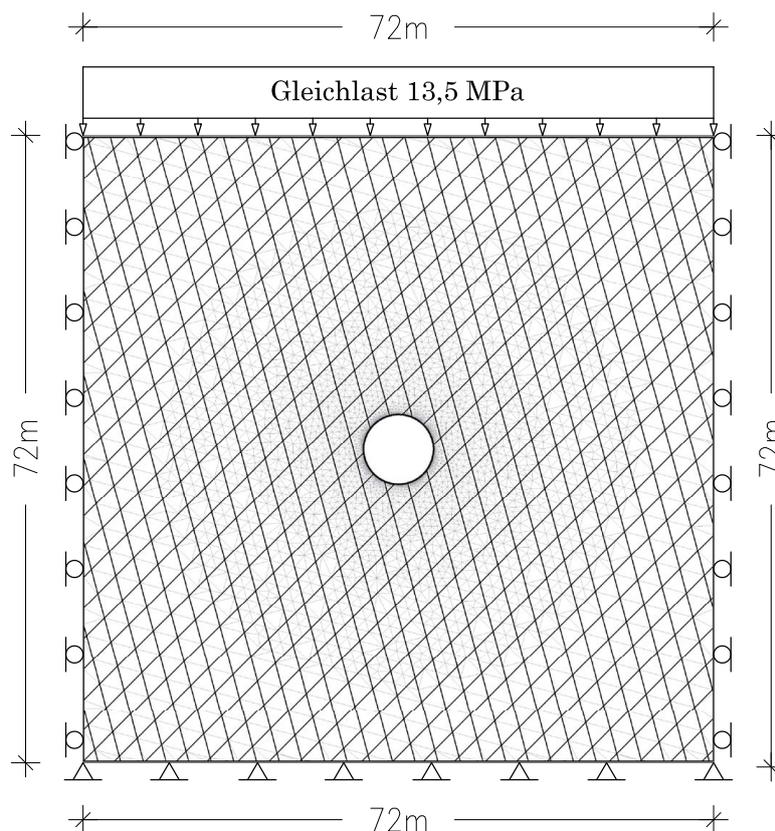


Abb. 4.1: Gebirgsblock mit Ausbruch, Trennflächen und Auflagerbedingungen in Phase²

4.2 Diskrete Modellierung

Bei der diskreten Modellierung besteht das Gebirgsmodell aus den zwei Komponenten, Gestein und Trennflächen bzw. Trennflächenscharen. In dieser Arbeit wird das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium mit den Parametern Zugfestigkeit, Reibungswinkel (φ) und Kohäsion (c) sowie dem Elastizitätsmodul (E_i) und der Poissonzahl (ν) für das Gestein verwendet. Die Trennflächen werden ebenfalls nach dem Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium mit den Parametern Zugfestigkeit, Reibungswinkel, Kohäsion, Kluftnormalsteifigkeit (k_n) und Kluftschersteifigkeit (k_s) beschrieben.

4.3 "Verschmierte" Modellierung

Ein Klassifizierungssystem liefert eine Zahl bzw. einen Index. Damit ist es möglich, den Gebirgsmodul (E_{rm}) sowie die Festigkeitseigenschaften zu errechnen. Dadurch werden Gestein und Trennflächen zu einem homogenen Modell verschmiert. Somit gibt es keine Trennflächen mehr und es finden sich an jeder Stelle des Modells die selben Eigenschaften.

Die Berechnung der Festigkeitseigenschaften aus dem Ergebnis der Klassifizierungssysteme ist laut Literatur nur mit Formeln, die auf den Hook-Brown Parametern (m_b & s) aufbauen, möglich. Damit wird für Berechnung in Phase² das Hook-Brown'sche Bruchkriterium angewendet.

4.3.1 Abgeleitete "verschmierte" Gebirgsparameter

Die Ermittlung der abgeleiteten "verschmierten" Gebirgsparameter soll anhand eines Beispiels aus Parameterstudie I gezeigt werden. Bei der diskreten Modellierung kann jede Trennflächenschar einen der drei Trennflächenzustände annehmen, ist dieser unterschiedlich wird der schlechtere der beiden für die Klassifizierung verwendet. Unterscheiden sich die beiden wird der schlechtere für die Klassifizierung verwendet. Damit soll gewährleistet werden, dass der ungünstigste Fall betrachtet wird.

Im folgenden Beispiel wäre dies die Trennflächenschar 2 mit dem Trennflächenzustand III anstatt Trennflächenschar 1 mit dem Zustand I.

Beispiel: 45/75

Trennflächenschar 1: Neigung 45° - Trennflächenzustand I (gut)

Trennflächenschar 2: Neigung 75° - Trennflächenzustand III (schlecht)

Trennflächenabstand: 2,5m

Trennflächenfüllung: Ton-Schluff (fest)

Ausbruchsradius: 4m

Gesteinsart: Kalkmarmor

Grundwasser: nicht vorhanden

4.3.1.1 RMR

Gesteinsfestigkeit

Bei der Einteilung der Gesteinsfestigkeit weist der RMR eine sehr grobe Abstufung auf. Um dies auszugleichen, wird zwischen den Abstufungen linear interpoliert. Nach der ursprünglichen Einteilung hätte der verwendete Kalkmarmor, mit einer einachsialen Druckfestigkeit von 80 MPa, eine Bewertung von 7 erhalten, nach der Interpolation wird er auf **5,8** reduziert.

RQD

Da in dieser Arbeit der kleinste Trennflächenabstand 1,5m beträgt, würde der RQD bei einer Bohrkernlänge von 1m nach Formel 4.1 immer 100 betragen. Nur für den Sonderfall, dass man die Probe genau im Bereich der Verschneidung der beiden Trennflächenscharen betrachtet, wäre ein RQD unter 100 möglich. Dieser Fall wird in Abb. 4.2 dargestellt. Per Definition beeinflussen aber nur Bohrkernstücke, die kleiner als 10cm sind, den RQD. Da aber auf der Länge von 1m nur eine Verschneidung liegen kann, ist es auch für diesen Sonderfall nur möglich, minimal einen RQD von 90 zu erreichen. Die Bewertung im RMR unterscheidet nicht zwischen einem RQD von 100 oder 90. Es wurde versucht, alle Bewertungen in dieser Arbeit so genau als möglich zu ermitteln, daher wird auch für den RQD zwischen den Bewertungsstufen interpoliert. Damit würde sich bei einem RQD von 90 eine Bewertung von 17 ergeben.

Für dieses Fallbeispiel (45/75) errechnet sich ein RQD von 100 und ergibt damit eine Bewertung von **20**.

$$RQD = \frac{\sum L_s}{L} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$\sum L_s$ Summe der Längen der Bohrkernstücke, die länger als 10cm sind
 L Gesamtlänge des Bohrkernes

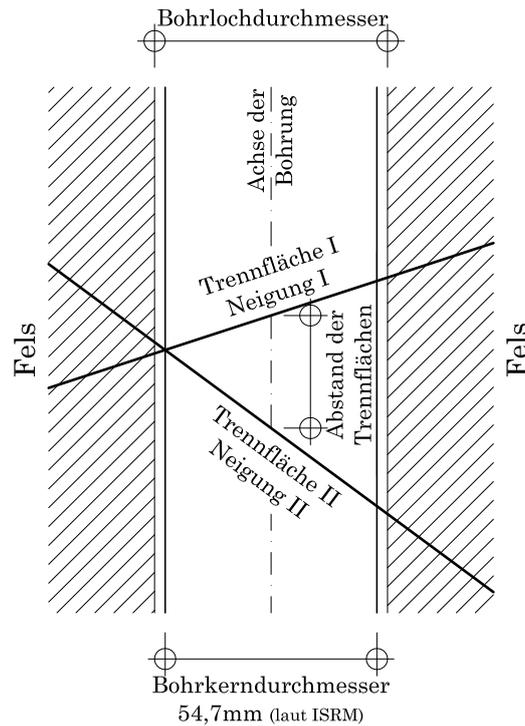


Abb. 4.2: Skizze der Bohrung zur Ermittlung des RQD an der Verschnidung der beiden Trennflächenscharen

Trennflächenabstand

Der größte Trennflächenabstand, der vom RMR definiert wird, ist 2m. Daher ergibt sich eine Bewertung von **20** für einen Abstand von 2,5m.

Trennflächenzustand

Der Trennflächenzustand im RMR wird in fünf Gruppen unterteilt. Dies ergibt für das Beispiel (45/75) aus Parameterstudie I folgende Werte (siehe Tab.4.1).

Tab. 4.1: Detaillierte Bewertung für den Trennflächenzustand III

Bezeichnung	Beschreibung	Bewertung
Länge der Trennflächen	größer 20m	0
Öffnungsweite	5mm	0
Rauigkeit	glatt	1
Kluftfüllung	harte Füllung (5mm)	2
Verwitterung	stark verwittert	1

Hiermit folgt eine Gesamtbewertung für den Trennflächenzustand III mit **4**.

Grundwasserverhältnisse

Es wurde angenommen, dass kein Grundwasser vorhanden ist. Daraus folgt eine Bewertung von **15** für alle untersuchen Fälle.

Trennflächenorientierung

Bei der Raumstellung der Trennflächen in Bezug zum Bauwerk ist in dieser Arbeit auf Grund der 2D-Numerik nur ein Streichen parallel zur Tunnelachse möglich. Der RMR unterscheidet in diesem Fall zwischen Einfallen kleiner bzw. größer 45° . Für die Bewertung wird immer die ungünstigere ($> 45^\circ$) Trennflächenneigung ausgewählt. Im verwendeten Beispiel ist eine Trennflächenneigung größer 45° , daraus folgt eine Bewertung von **-12**. Bei genau 45° Neigung gibt es im RMR keinen Unterschied zwischen günstig und ungünstig, daher wird bei genau 45° günstig angenommen.

Zusammenfassung und Auswertung

Der RMR ergibt sich aus der Summe der sechs oben genannten Bewertungen zu **53**.

Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls des Gebirges (E_{rm}) im RMR werden die Formeln 4.2 und 4.3 verwendet. Diese beiden werden verwendet, weil sie als einzige Bezug auf den Elastizitätsmodul des Gesteins (E_i) nehmen. In der Literatur wird aber keine der beiden als vorteilhafter beschrieben, daher wird für die weitere Berechnung der Mittelwert aus beiden Formeln verwendet.

$$E_{rm} = \frac{E_i}{100} \cdot \left(0,0028 \cdot RMR^2 + 0,9 \cdot e^{\frac{RMR}{22,82}} \right) [GPa] \quad (4.2)$$

Nicholson & Bieniawski [11]...

$$E_{rm} = E_i \cdot \left(0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{\pi \cdot RMR}{100} \right) \right) \right) [GPa] \quad \text{Mitri et al. [10]... (4.3)}$$

Die Festigkeitseigenschaften des Gebirges werden mit Hilfe der Hook-Brown Parameter m_b und s ermittelt. Dazu werden die Formeln 4.4 und 4.5 verwendet.

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{RMR-100}{28}} [-] \quad \underline{\text{ungestörtes Gebirge}} \quad \text{Bieniawski [2]... (4.4)}$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}} [-] \quad \underline{\text{ungestörtes Gebirge}} \quad \text{Bieniawski [2]... (4.5)}$$

4.3.1.2 RMi

Kluftrauigkeit jR

Die Kluftrauigkeit wird für den maßgebenden Trennflächenzustand III mit **1** (glatt - eben) bewertet.

Kluftverwitterung jA

Es handelt sich in dem Beispiel um eine gefüllte Trennfläche mit teilweisem oder keinem Kontakt zwischen den Oberflächen der Trennflächen. Die Eigenschaft der Füllung ist hart und kohäsiv und weist eine Füllung aus Ton auf. Dieser Definition folgt eine Bewertung von **6**.

Kluftlänge jL

Es handelt sich um gefüllte Trennflächen, die an anderen Trennflächen absetzen und länger 30m sind. Das in dieser Arbeit verwendete Modell hat eine Seitenlänge von 72m. Daher ist die Trennflächenlänge immer größer als die maximale Länge des Klassifizierungssystems. Daraus ergibt sich für die Kluftlänge eine Bewertung von **0,5**.

Kluftzustand jC

Aus den drei oben genannten Parametern (jR , jA und jL) errechnet sich mit Formel 4.6 die Kennziffer für den Kluftzustand. Damit ergibt sich für das Beispiel ein jC von **0,083**.

$$jC = jL \cdot \frac{jR}{jA} \quad \text{Palmström [15]... (4.6)}$$

Blockgröße V_b

Die Blockgröße (siehe Formel 4.7) ergibt sich aus dem Winkel der beiden Trennflächenscharen ($\alpha + \beta = \gamma_1$ siehe Abb. 4.3) sowie den zugehörigen Trennflächenabständen (S_1 & S_2) und einer angenommenen Trennfläche 3. Diese streicht normal zur Tunnelachse, in einem Abstand von 1m (S_3) vor der Ortsbrust und fällt unter 90° ($\gamma_2 = 90^\circ$ & $\gamma_3 = 90^\circ$) ein.

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin \gamma_1 \cdot \sin \gamma_2 \cdot \sin \gamma_3} \quad [m^3] \quad (4.7)$$

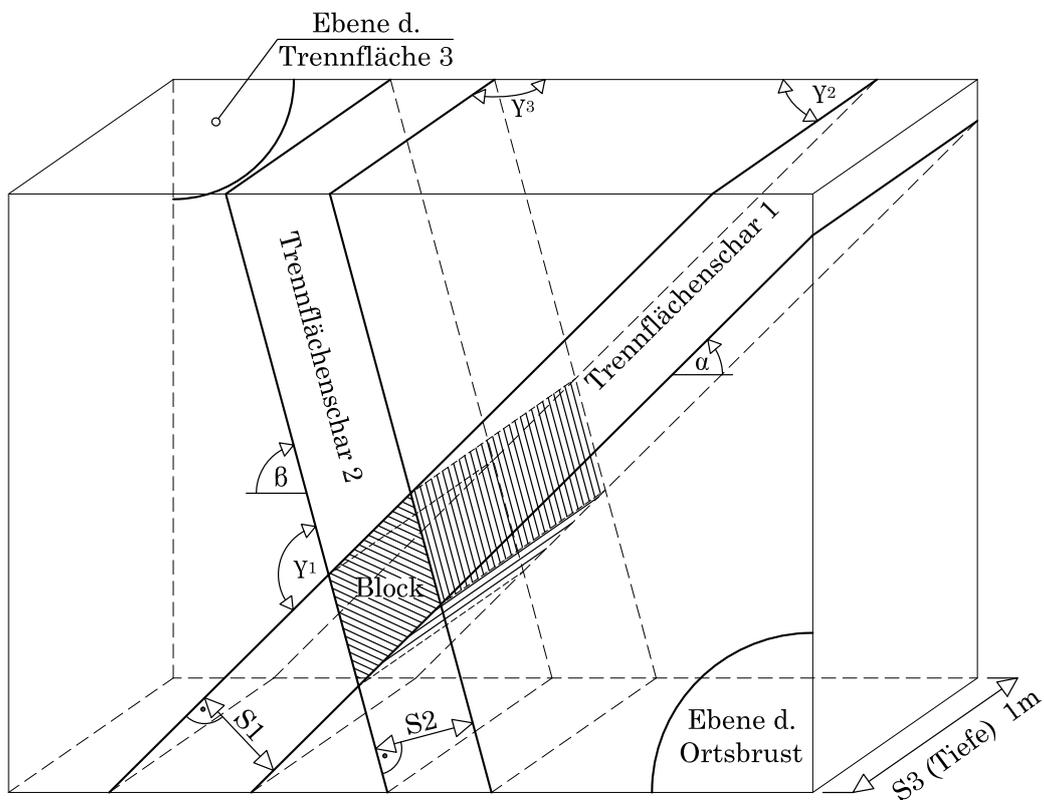


Abb. 4.3: 3D Ansicht des Gebirges mit den drei Trennflächen zur Bestimmung der Blockgröße

Kluftkennwert J_P

Der Kluftkennwert zur Berücksichtigung der Trennflächen wird mit Formel 4.8 sowie 4.9 errechnet. Damit ergibt sich für das Beispiel ein Kluftkennwert von **0,192**.

$$J_P = 0,2 \cdot \sqrt{jC} \cdot V_b^{D_{RMi}} \quad \text{Palmström [15]... (4.8)}$$

$$D_{RMi} = 0,37 \cdot jC^{-0,2} \quad \text{Palmström [15]... (4.9)}$$

Zusammenfassung und Auswertung

Die Gebirgsdruckfestigkeit nach Palmström (RMi) errechnet sich aus der einachsialen Druckfestigkeit des Gesteins multipliziert mit dem Kluftkennwert (J_P). Damit ergibt sich für das Beispiel ein RMi von **15 MPa**. Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls wird die Formel 4.10 für einen $RMi \leq 30$ bzw. Formel 4.11 für einen $RMi > 30$ verwendet.

$$E_{rm} = 7 \cdot RMi^{0,5} [GPa] \quad \underline{1 < RMi \leq 30} \quad \text{Palmström [16]... (4.10)}$$

$$E_{rm} = 7 \cdot RMi^{0,4} [GPa] \quad \underline{RMi > 30} \quad \text{Palmström \& Singh [17]... (4.11)}$$

Die Festigkeitseigenschaften des Gebirges werden mit Hilfe der Hook-Brown Parameter m_b und s ausgedrückt. Dazu werden die Formeln 4.12 und 4.13 verwendet.

$$m_b = m_i \cdot J_P^{0,64} \quad \underline{\text{ungestörtes Gebirge}} \quad \text{Palmström [14]... (4.12)}$$

$$s = J_P^2 \quad \text{Palmström [14]... (4.13)}$$

4.3.1.3 GSi

Ermittlung des GSi nach Cai et al. [3]

Die Bewertung des GSi erfolgt üblicherweise über die Tabelle nach Marinou und Hoek [9]. Damit bei der Klassifizierung kein bzw. nur ein minimaler subjektiver Einfluss vorhanden ist, wird die Bewertung mit Hilfe der Formeln 4.14 nach Cai et al. [3] realisiert. Weiters ist es mit dieser Formel wesentlich besser möglich, eine große Anzahl von Klassifizierungen durchzuführen, als mit der GSi-Tabelle [9].

$$GSi = \frac{26,5 + 8,79 \cdot \ln J_c + 0,9 \cdot \ln V_b}{1 + 0,0151 \cdot \ln J_c - 0,0253 \cdot \ln V_b} \quad \text{Cai et al. [3]... (4.14)}$$

Kluftzustand J_c (GSi)

Für den Kluftzustand des GSi (siehe Formel 4.15) wird der Faktor für die Welligkeit (J_w) sowie der Faktor für die Ebenheit (J_s) benötigt. Die Kluftverwitterung ($jA = J_a$), wird laut Cai et al. ohne Veränderungen aus dem RMI-System übernommen.

$$J_c = \frac{J_w \cdot J_s}{J_a} \quad \text{Cai et al. [4]... (4.15)}$$

Damit ergibt sich für den Trennflächenzustand III eine Welligkeit von **1** (eben) und ein Oberflächenzustand von **1,5** (schwach rau). Daraus folgt mit Formel 4.15 bzw. 4.14 und der Blockgröße (V_b) ein GSi von **49**.

Auswertung GSi

Der Elastizitätsmodul des Gebirges errechnet sich aus Formel 4.16. Der Faktor für die Auflockerung des Gebirges (D) [6] ist Null, da ein kontrolliertes Sprengen bzw. eine Tunnelbohrmaschine für den Vortrieb angenommen wird.

$$E_{rm} = E_i \cdot \left(0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSi}{11}}} \right) [GPa] \quad \text{Hoek \& Diederichs [8]... (4.16)}$$

Die Festigkeitseigenschaften des Gebirges werden mit Hilfe der Hook-Brown Parameter m_b und s ausgedrückt. Dazu werden die Formeln 4.17 und 4.18 verwendet.

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GS_i-100}{28-14 \cdot D}\right)} \quad \text{Hoek et al. [7]... (4.17)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GS_i-100}{9-3 \cdot D \cdot D}\right)} \quad \text{Hoek et al. [7]... (4.18)}$$

4.3.1.4 Gegenüberstellung der Elastizitätsmodule

In Abb. 4.4 werden die verwendeten Formeln für die Elastizitätsmodule des Gebirges (E_{rm}) gegenübergestellt. Alle Werte liegen unter dem Elastizitätsmodul des Gesteins (E_i). Die beiden Klassifizierungssysteme RMR und GSi verwenden für die Berechnung des Gebirgsmoduls den Gesteinsmodul und können dadurch nie größer als dieser werden. In Parameterstudie II überschreitet der E-Modul des RMi in einigen Fällen geringfügig den Elastizitätsmodul des Gesteins (E_i). Da dies unmöglich ist, wird der Gebirgsmodul in diesen Fällen auf das Niveau des Gesteinsmoduls reduziert. Eine weitere Reduktion bzw. Manipulation der Werte wird nicht durchgeführt, da die vorhandenen Formeln so angewendet werden, wie sie von den Autoren publiziert wurden.

Weiters ist Abb. 4.4 auf der Sekundärachse die Blockgröße (V_b) aufgetragen. Hiermit ist ersichtlich, wie sehr der RMi und der GSi von auf diesen aufbauen. Auch zu erkennen ist, dass bei maximaler Blockgröße (z.b. Variation 15_00) der RMi nicht den maximalen Gebirgsmodul (E_{rm}) liefert, weil hier der RMi größer 30¹ MPa wird und daher nicht mehr Formel 4.10, sondern 4.11 zum Tragen kommt. Bei den beiden Gebirgsmodulen des RMR ist der Einfluss der Trennflächenneigung gut zu erkennen. Ist eine Neigung größer als 45° wie z.b. Variation 00_60 reduziert sich der Gebirgsmodul, ab Variation 45_60 bleibt der Gebirgsmodul konstant niedriger.

1 30 MPa ist das Ergebnis der Klassifizierung und nicht der Elastizitätsmodul

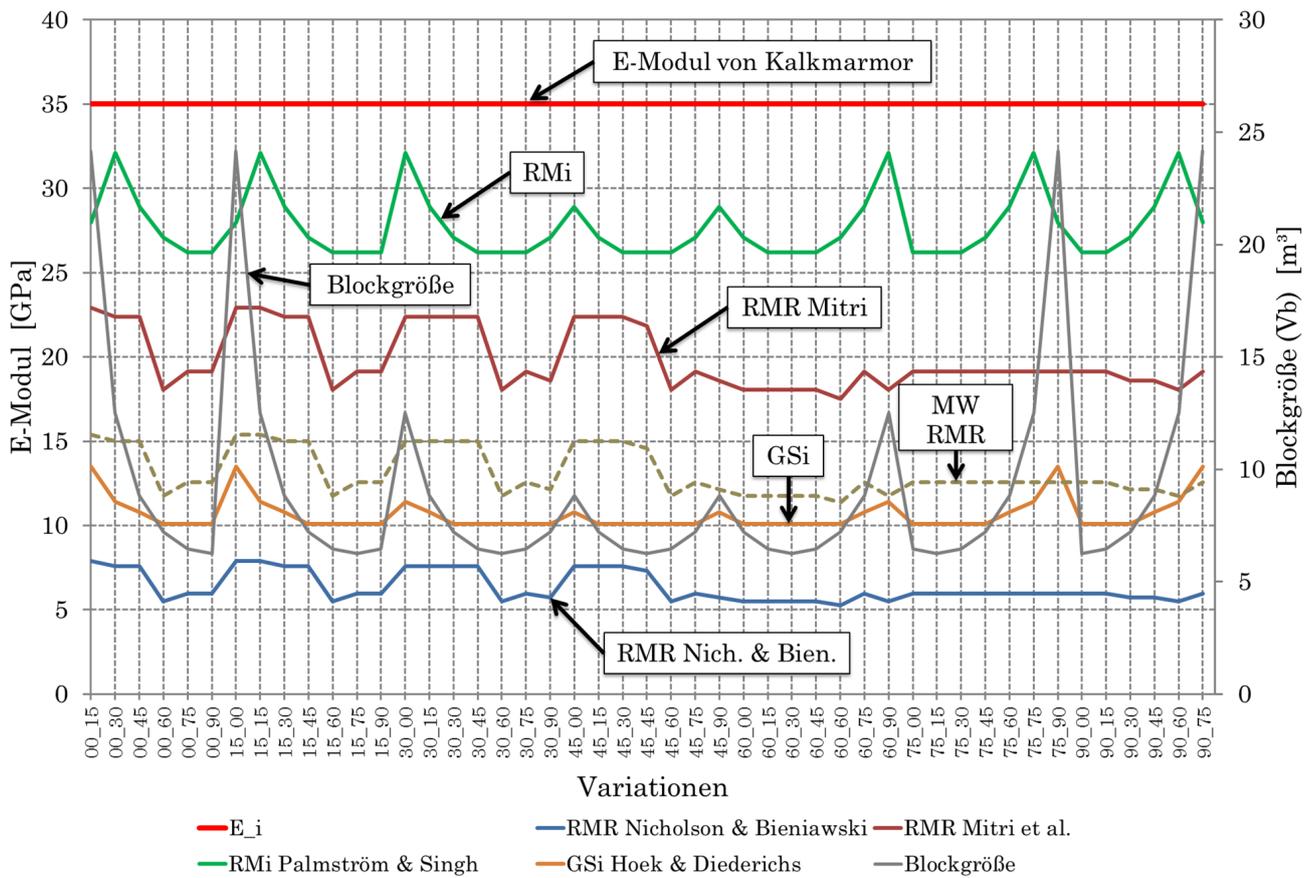


Abb. 4.4: Gegenüberstellung der E-Module von Parameterstudie I (E_{rm} , E_i)

KAPITEL 5

Methodik der Auswertung

5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die Auswertung der diskreten und verschmierten Modellierung erläutert. In Abb. 5.1 ist die Einteilung des Querschnitts in Firste, Ulme links, Sohle und Ulme rechts für diese Arbeit definiert. Das Programm Phase² beginnt mit der Auswertung in der Mitte der linken Ulme und verläuft dann gegen den Uhrzeigersinn.

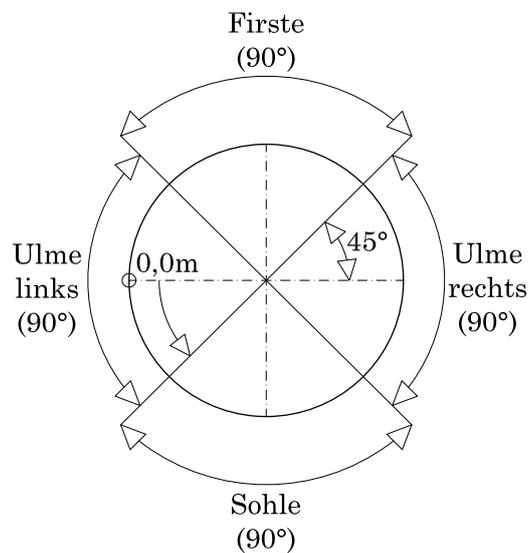


Abb. 5.1: Definition von Firste, Ulme und Sohle

Der kreisförmige Ausbruchsquerschnitt wird im Programm Phase² bei der diskreten Modellierung durch ein Tausendeck und bei der verschmierten Modellierung durch ein Hunderteck nachgebildet. Grund für diese Unterscheidung ist, dass bei der diskreten Modellierung der Schnittpunkt Trennfläche-Kreis mit dem Auslesepunkt der Spannungen und Verschiebungen genau überein-

stimmen muss. Würde bei der diskreten Modellierung nur ein Hunderteck verwendet werden, wäre der Abstand zwischen den Punkten in etwa 0,25m (bei einem Radius von 4m). Mit diesem großen Abstand ist es nicht möglich, einen eventuell auftretenden Anstieg der Verschiebungen dem Beginn bzw. dem Ende eines Blockes zuzuordnen. Bei der verschmierten Modellierung ist dieser wesentlich höhere Rechen- und Bearbeitungsaufwand nicht erforderlich, da ein Blockfallen nicht möglich ist.

Aus dem Programm Phase² werden für jeden Punkt um den Querschnitt (am Ausbruchsrund) folgende drei Parameter ausgelesen:

- Hauptnormalspannung (σ_1)
- Horizontale Verschiebung
- Vertikale Verschiebung

Die weitere Auswertung erfordert eine Umrechnung der horizontalen und vertikalen Verschiebungen in die totalen sowie in die radialen Verschiebungen. Die totalen Verschiebungen werden für die Bestimmung des Blockfallens herangezogen, die radialen für die Ermittlung der Fläche der Querschnittsverkleinerung (Def. siehe Kapitel. 5.2).

5.2 Auswertung der Querschnittsverkleinerung

Die Querschnittsverkleinerung ist die Fläche, die von den Vektoren der radialen Verschiebungen aufgespannt werden. In Abb. 5.2 ist diese Fläche grau hinterlegt. Damit alle Variationen untereinander vergleichbar sind, muss die Fläche der Querschnittsverkleinerung unabhängig vom Ausbruchsradius sein. Das wird erreicht, indem das Verhältnis von der Fläche Querschnittsverkleinerung zu Ausbruchsradius gebildet wird. Dies ist sowohl bei der diskreten als auch der verschmierten Modellierung notwendig, um wiederum vergleichbar zu bleiben. Bei der diskreten Modellierung müssen vor der Ermittlung der Fläche der Querschnittsverkleinerung noch die Blöcke, die sich Aufgrund der Trennflächen und des Ausbruchsquerschnittes aus dem Gebirgsverband lösen würden, gelöscht werden (siehe dazu Punkt 5.3).

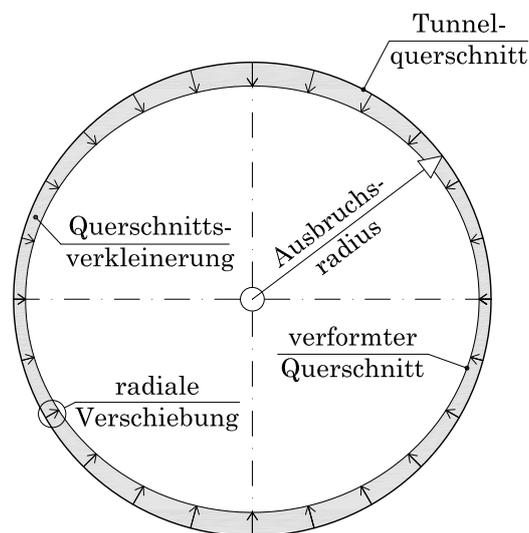


Abb. 5.2: Definition der Fläche der Querschnittsverkleinerung (Exemplarisch)

5.3 Auswertung der diskreten Modellierung

Ziel der Auswertung ist es unter anderen die radialen Verschiebungen entlang des abgewickelten Querschnitts zu analysieren. Hierfür werden für jene Fälle der diskreten Modellierung die Verschiebungen der fallenden Blöcke gelöscht und durch die umliegenden Verschiebungen ersetzt, um ein Vergleichen mit den homogenen Modellen zu ermöglichen.

Wie schon in Kapitel 4.1 erwähnt, handelt es sich bei Phase² um ein Finite Elemente Programm (Kontinuumsmodell), weshalb sich die Bestimmung von Blöcken, die sich aus dem Gebirgsverband lösen, als schwierig erweist. Eine Methode muss entwickelt werden, um dieses Blockfallen zu erkennen und auszuwerten.

Für den Bereich eines gelöschten Blockes werden die angrenzenden radialen Verschiebungen der beiden Nachbarblöcke herangezogen und zwischen ihnen linear interpoliert. Daher ist es notwendig, die Blöcke (Anfang und Ende) entlang der Abwicklung des Querschnitts zu bestimmen. Diese Blocklänge und Position des Blockes entlang der Abwicklung wird durch gleichsetzen der Geradengleichung ($y = kx + d$) der Trennflächen mit der Kreisgleichung ($r^2 = x^2 + y^2$) des Ausbruchsquerschnittes ermittelt.

Nachdem die beiden Schnittpunkte der Trennflächen und des Ausbruchsquerschnittes, aus denen sich der Block ergibt, bekannt sind, wird aufgrund des Zusammenspiels Spannung-Verschiebung ein mögliches Fallen identifiziert. Es wird definiert, dass ein Block fällt, wenn die Spannung sehr klein und die totalen Verschiebungen sehr groß sind. Abb. 5.3 und 5.4 zeigen die Hauptnormalspannungen (σ_1) sowie die totalen Verschiebungen für das Beispiel (45_75) aus Parameterstudie I. Bei den Blöcken 4 und 10 ist zu erkennen, dass die Verschiebung groß ist (Abb. 5.4) und gleichzeitig die Spannung (Abb. 5.3) im gesamten Block fast zu Null wird. Damit wird das vorher erwähnte Kriterium erfüllt und beide Blöcke lösen sich aus dem Gebirgsverband.

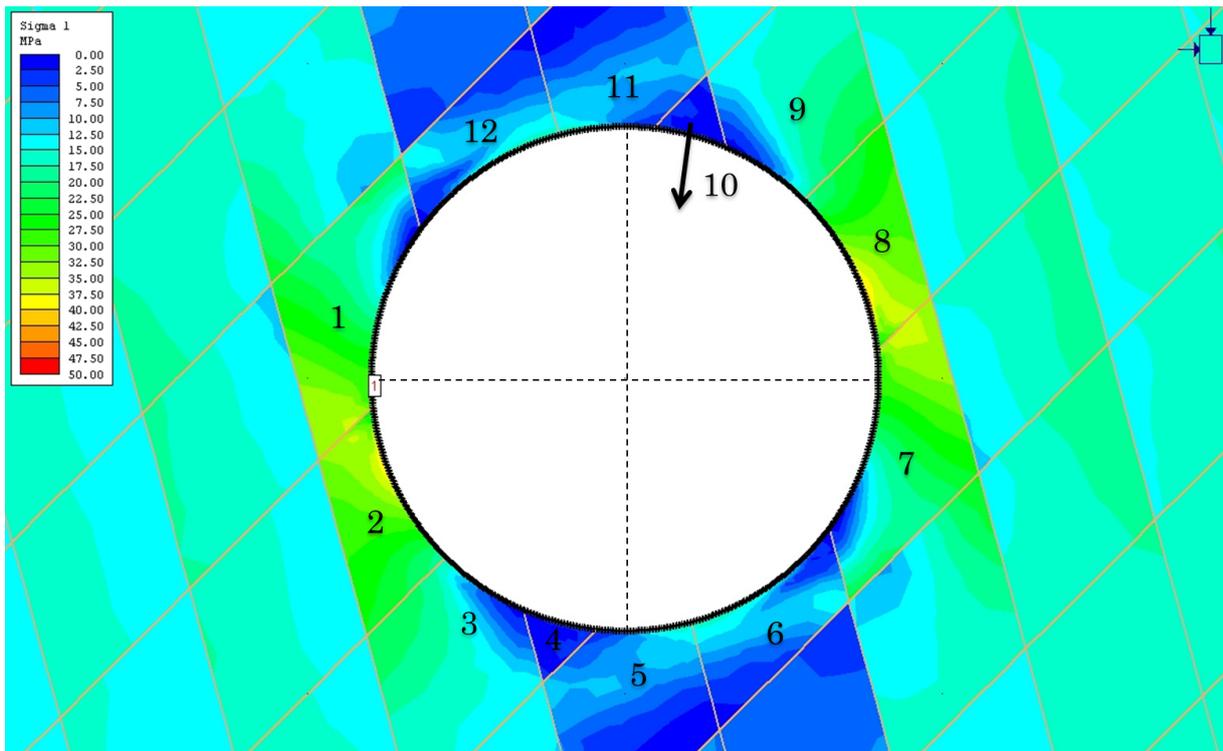


Abb. 5.3: Hauptnormalspannungen (σ_1) am Beispiel (45_75) aus Parameterstudie I

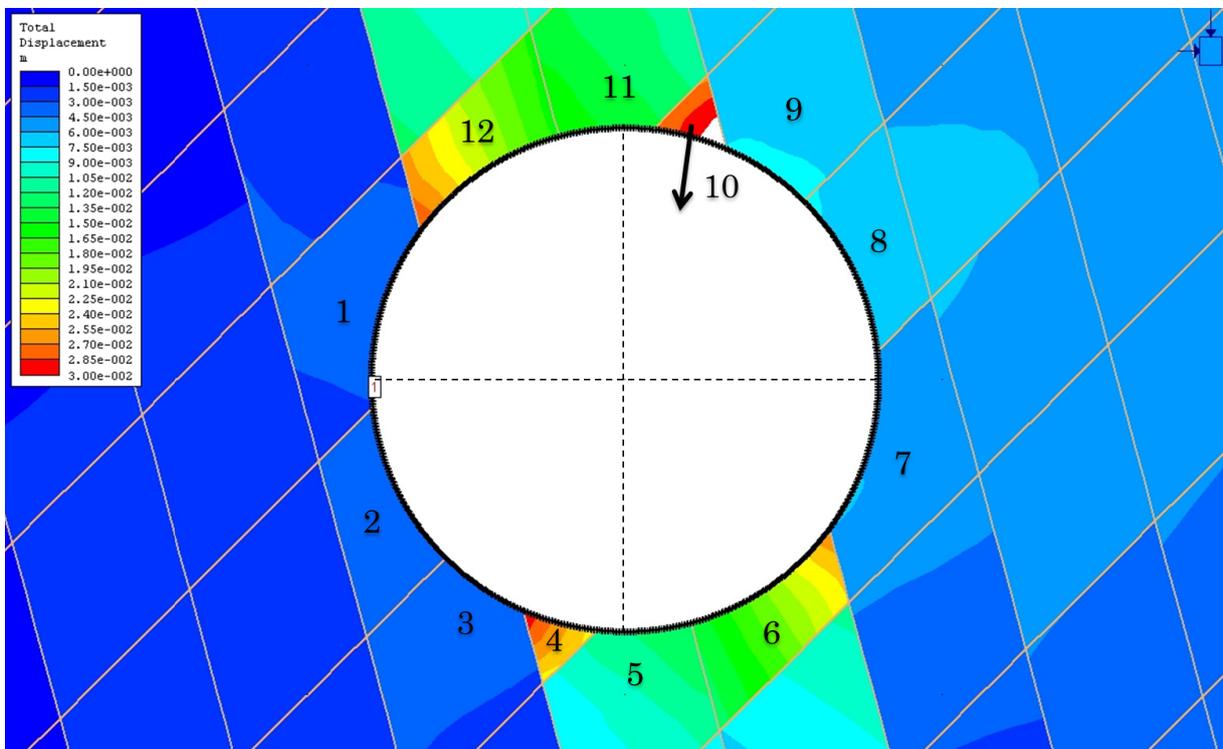


Abb. 5.4: Totale Verschiebungen am Beispiel (45_75) aus Parameterstudie I

Die Abb. 5.5 und 5.6 zeigen die radialen Verschiebungen der diskreten Modellierung sowie der drei Klassifizierungssysteme und die der intakten Gesteinsparameter, welche für die Kalibrierung des FE-Netzes verwendet wurden (siehe Kapitel 4.1), entlang des abgewickelten Querschnitts. Auf der horizontalen Achse ist die Abwicklung in Metern, entlang des Querschnitts beginnend an der linken Ulme aufgetragen. Im oberen Bereich des Diagramms ist die Unterteilung des Querschnitts in Ulme, Sohle und Firste eingezeichnet. Die vertikalen roten Linien stellen die Blockgrenzen dar, ebenfalls zu sehen ist die Blocknummerierung. Auf der vertikalen Achse ist die radiale Verschiebung in Metern aufgetragen.

Die in Abb. 5.5 grau hinterlegten Bereiche zeigen die Fläche der radialen Verschiebungen, die sich durch die beiden fallenden Blöcke 4 & 10 ergeben. In Abb. 5.6 werden diese beiden Flächen gelöscht und durch die radialen Verschiebungen am Ende des vorhergehenden (3 & 9) sowie am Anfang des nachfolgenden Blockes (5 & 11) ersetzt. Im Bereich der beiden gelöschten Blöcke ergeben sich jetzt linear interpolierte radiale Verschiebungen mit denen eine Berechnung der Fläche der Querschnittsverkleinerung möglich ist (siehe Abb. 5.6). Wie in Kapitel 5.2 bereits erwähnt, werden diese Flächen anschließend durch den Radius dividiert um größenunabhängig zu werden. Diese bezogene Querschnittsverkleinerungen jeder Variation, werden für die vier Parameterstudien einzeln ermittelt, der Größe nach sortiert und nachfolgend weiter untersucht.

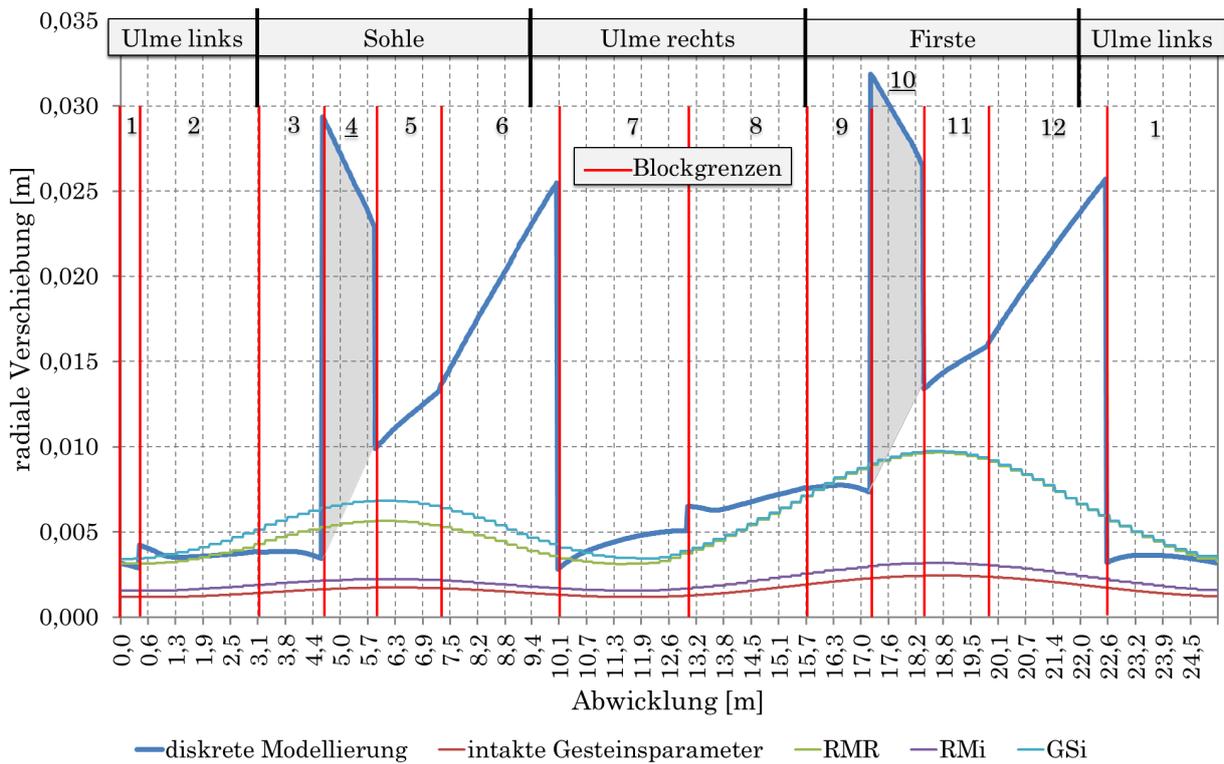


Abb. 5.5: Querschnittsverkl. ohne korr. Blockfallen am Bsp. (45_75) aus Parameterstudie I

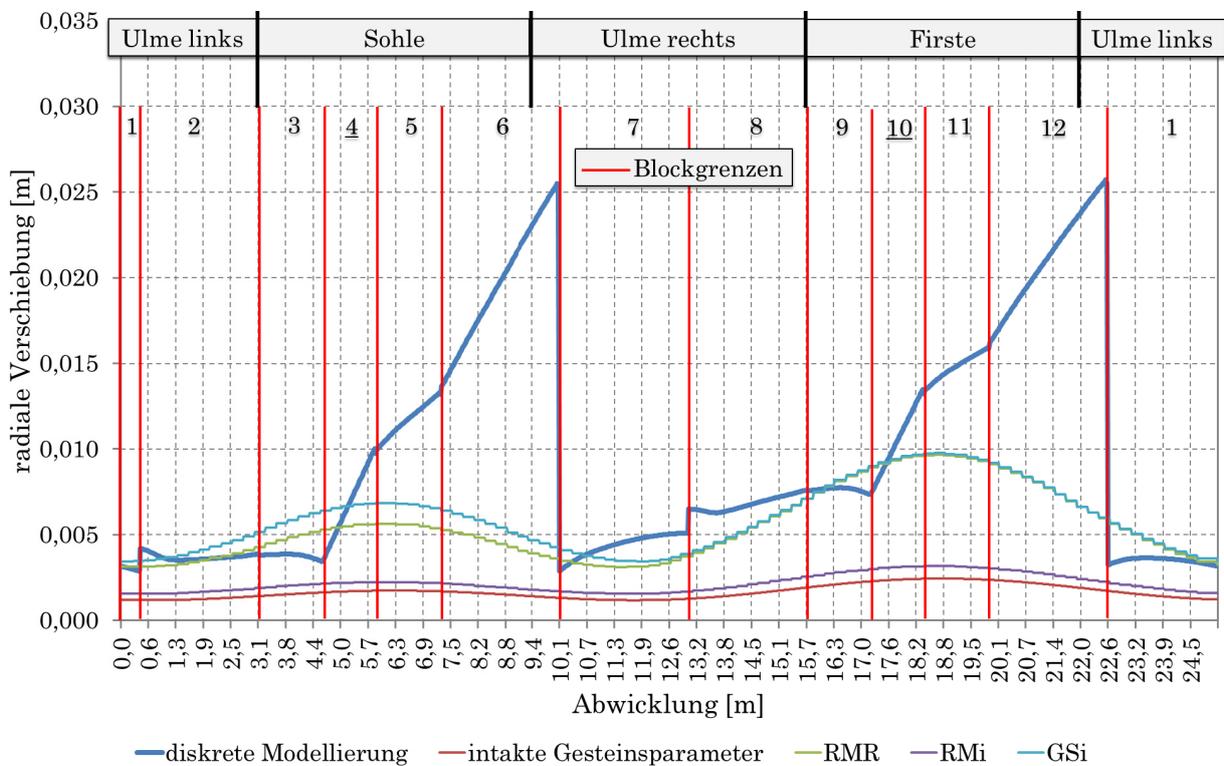


Abb. 5.6: Querschnittsverkl. mit korr. Blockfallen am Bsp. (45_75) aus Parameterstudie I

5.4 Auswertung der verschmierten Modellierung

Für eine Beurteilung der drei in dieser Arbeit verwendeten Klassifizierungssysteme wird die Genauigkeit der Prognose, mit der sie das Gebirgsverhalten vorhersagen, untersucht, indem deren Eigenschaften mit jenen der diskreten Modellierung verglichen werden. Es handelt sich also um die Abweichung der verschmierten zur diskreten Modellierung sowie um eine Aussage, ob die prognostizierte die tatsächlich auftretende Querschnittsverkleinerung über-oder unterschätzt. Dies wird für jede Variation in jeder Parameterstudie durchgeführt. Es muss natürlich beachtet werden, dass die Ergebnisse der diskreten Modellierung, die in dieser Arbeit mit Phase² berechnet werden, nur eine Näherung darstellen. Eine exakte Lösung ist mit einem Finite Elemente Programm nicht möglich. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass ein Klassifizierungssystem keine Blockkinematik beinhaltet, da in der verschmierten Modellierung ein homogenes System angesetzt wird. Somit ergibt sich, dass für den Fall eines gefügebedingten Überbruchs bzw. Blockfallens das Klassifizierungssystem in Bezug auf die Blockkinematik versagt

Für die weitere Auswertung ist es notwendig zwei Fälle zu unterscheiden (siehe Abb. 5.7):

- a.) Verhältnis der Fläche der Querschnittsverkleinerung von verschmierter (vM) zu diskreter Modellierung (dM) in Prozent. Zur Bestimmung, ob die Verschiebungen des Klassifizierungssystems die tatsächlich auftretenden Verschiebungen über-oder unterschätzen $\left(\frac{vM}{dM} \cdot 100\right)$. Bei größer 100% überschätzt und bei kleiner 100% unterschätzt das Klassifizierungssystem die Verschiebungen der diskreten Modellierung.
- b.) Differenz der Fläche der Querschnittsverkleinerung von verschmierter (vM) und diskreter Modellierung (dM) im Verhältnis zur diskreten Modellierung in Prozent. Zur Bestimmung der Abweichung der Klassifizierungssysteme gegenüber der tatsächlich auftretenden Verschiebungen $\left(\frac{dM-vM}{dM} \cdot 100\right)$.

Die beiden vorher genannten Fälle sind zur Verdeutlichung in Abb. 5.7 dargestellt. Fall a untersucht, wieviel Prozent der Variationen der Klassifizierungssysteme die Fläche der Querschnittsverkleinerung der diskreten Modellierung, in jeweils einer bzw. in Summe aller Parameterstudien, über-oder unterschätzen. Für Fall b wird die Abweichung der Klassifizierungssysteme gegenüber der diskreten Modellierung im Bezug auf die Fläche der Querschnittsverkleinerung berechnet. Diese Werte werden anschließend für jede Parameterstudie getrennt der Größe nach aufsteigend sortiert und ausgewertet.

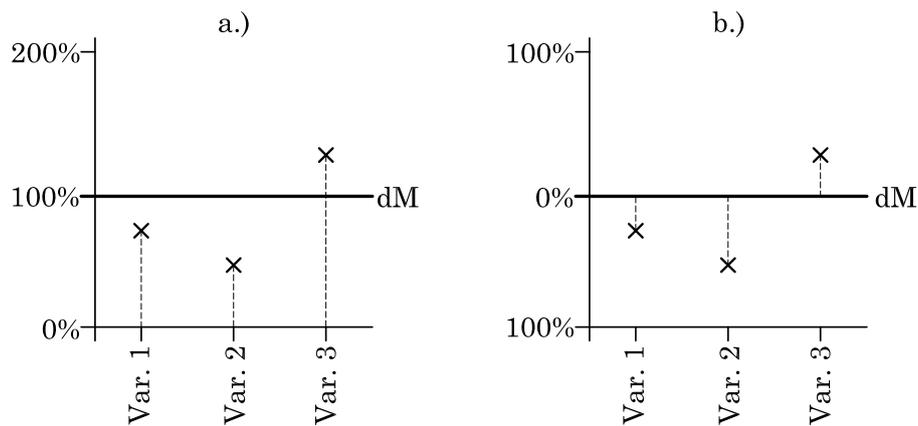


Abb. 5.7: Darstellung von drei exemplarischen Variationen für die Fälle a & b

KAPITEL 6

Ergebnisse

6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden für jede Parameterstudie einzeln die Ergebnisse der diskreten und verschmierten Modellierung dargestellt. Es wird beschrieben, welche Trends bzw. Zusammenhänge in den verschiedenen Parameterstudien und Klassifizierungssystemen zu erkennen sind.

Die Ergebnisse der verschmierten Modellierung werden in Bezug auf eine Übereinstimmung der Fläche der Querschnittsverkleinerung mit der diskreten Modellierung hin untersucht. Damit soll gezeigt werden, inwieweit die drei verwendeten Klassifizierungssysteme für eine Verschiebungs-Prognose geeignet sind.

Für die Beschreibung der Ergebnisse ist der Öffnungswinkel (ω), der in Abb. 6.1 dargestellt ist, notwendig.

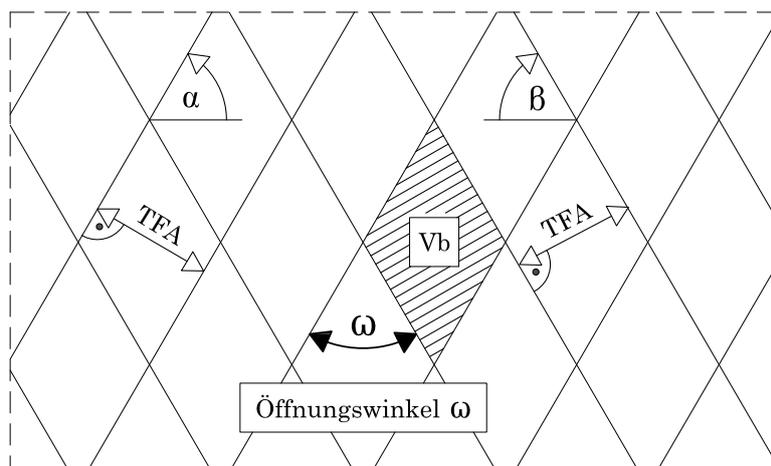


Abb. 6.1: Definition des Öffnungswinkels ω

6.2 Parameterstudie I

6.2.1 Einzelergebnis diskrete Modellierung

In Parameterstudie I soll der Einfluss der unterschiedlichen **Trennflächenneigungen** genauer betrachtet werden. Durch die Untersuchung von verschiedenen Neigungen, soll ein Einfluss auf die Verschiebungscharakteristik und das Verschiebungsbild erkannt werden.

Eine geringere Querschnittsverkleinerung ergibt sich, wenn der Winkel zwischen den Trennflächen (Öffnungswinkel ω) im Bereich von 15° bis 30° oder 150° bis 165° liegt. Bei flacher Trennflächenneigung sind die Verschiebungen am geringsten. Ab 30° steigen sie merklich an und erreichen ihr Maximum bei 45° . Im Bereich von 45° bis 60° fallen die Verschiebungen wieder etwas ab. Danach ergeben sich in etwa die gleichen Werte, wie bei flacher Trennflächenneigung. Die geringste Querschnittsverkleinerung ergibt sich in dieser Parameterstudie bei einer Trennflächenneigung von $0^\circ/15^\circ$ bzw. $0^\circ/90^\circ$. Einen Einfluss der zwei verschiedenen Trennflächenzustände (I & III) ist nicht zu erkennen, da ein Vertauschen der beiden Trennflächenneigungen und damit auch der Zustände kaum Auswirkungen auf die Verschiebungen ergibt.

Für das Verhältnis von Ausbruchsquerschnitt zu Blockgröße (V_b) kann der erwartete Trend bestätigt werden, dass je kleiner dieses Verhältnis wird, desto geringer auch die auftretende Querschnittsverkleinerung ist. Dies bedeutet zum Beispiel, dass bei gleich bleibendem Ausbruchsquerschnitt und größer werdender Blockgröße die Verschiebungen tendenziell geringer werden.

6.2.2 Einzelergebnis verschmierte Modellierung

Alle drei Klassifizierungssysteme weisen den geringsten Unterschied der Verschiebungen zur diskreten Modellierung auf, wenn der Öffnungswinkel (ω) im Bereich von 15° - 30° und 150° - 165° liegt. Die Variation $90^\circ/15^\circ$ ergibt bei allen Systemen fast die geringsten Abweichungen.

6.2.3 Zusammenfassung

Die Divergenz der Klassifizierungssysteme von der diskreten Modellierung ist am geringsten, wenn sich kleine Verschiebungen ergeben. Dies zeigt die Kombination $45^\circ/45^\circ$ deutlich. Bei ihr ergibt sich die größte Querschnittsverkleinerung und die größte Abweichung. Sowohl im diskreten Modell ($15^\circ/90^\circ$) als auch in den homogenen Modellen ($0^\circ/90^\circ$) ergeben sich die kleinsten Verschiebungen für Fälle mit einer senkrechten und einer (nahezu) horizontalen Trennflächenschar. Die geringste

Divergenz der Verschiebungen liefert der GSi (siehe Abb. 6.2), obwohl die Trennflächenneigung im GSi nur indirekt mit Blockgröße (V_b) berücksichtigt wird. Das deutlich schlechteste Ergebnis weist der RMi auf.

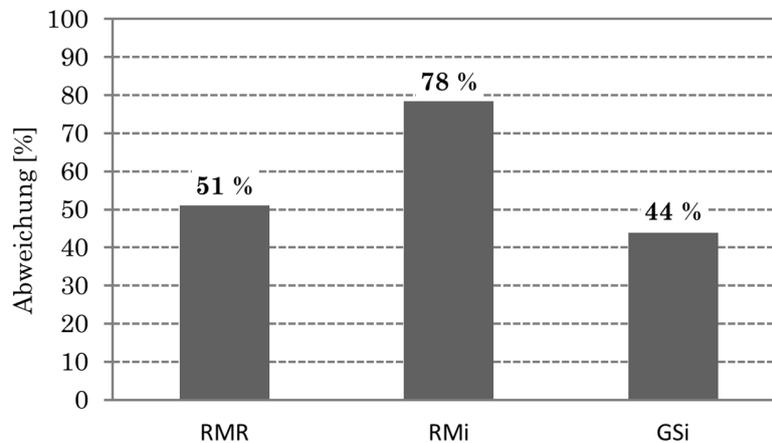


Abb. 6.2: Mittlere Abweichung der Klassifizierungssysteme zur diskreten Modellierung von Parameterstudie I

Tab. 6.1: Ergebnistabelle der Parameterstudie 1 (Teil I)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
1	00_15	00	15	165	0,625	0,0383	0,0238	0,0128	0,0272
2	00_30	00	30	150	0,625	0,0455	0,0243	0,0112	0,0327
3	00_45	00	45	135	0,625	0,1313	0,0243	0,0126	0,0348
4	00_60	00	60	120	0,625	0,0690	0,0316	0,0135	0,0372
5	00_75	00	75	105	0,625	0,0538	0,0330	0,0141	0,0372
6	00_90	00	90	90	0,625	0,0228	0,0296	0,0141	0,0372
7	15_00	15	00	165	0,625	0,0378	0,0238	0,0128	0,0272
8	15_15	15	15	150	0,625	0,0403	0,0238	0,0112	0,0327
9	15_30	15	30	135	0,625	0,2143	0,0243	0,0126	0,0348
10	15_45	15	45	120	0,625	0,0893	0,0243	0,0135	0,0372
11	15_60	15	60	105	0,625	0,0586	0,0316	0,0141	0,0372
12	15_75	15	75	90	0,625	0,0504	0,0330	0,0141	0,0372
13	15_90	15	90	75	0,625	0,0611	0,0296	0,0141	0,0372
14	30_00	30	00	150	0,625	0,0406	0,0243	0,0112	0,0327
15	30_15	30	15	135	0,625	0,3365	0,0243	0,0126	0,0348
16	30_30	30	30	120	0,625	0,0849	0,0243	0,0135	0,0372
17	30_45	30	45	105	0,625	0,0747	0,0243	0,0141	0,0372

Tab. 6.2: Ergebnistabelle der Parameterstudie 1 (*Teil II*)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
18	30_60	30	60	90	0,625	0,0596	0,0316	0,0141	0,0372
19	30_75	30	75	75	0,625	0,0508	0,0345	0,0141	0,0372
20	30_90	30	90	60	0,625	0,0626	0,0301	0,0135	0,0372
21	45_00	45	00	135	0,625	0,2736	0,0243	0,0126	0,0349
22	45_15	45	15	120	0,625	0,0634	0,0243	0,0136	0,0373
23	45_30	45	30	105	0,625	0,0687	0,0243	0,0141	0,0373
24	45_45	45	45	90	0,625	0,0660	0,0251	0,1418	0,0373
25	45_60	45	60	75	0,625	0,0577	0,0317	0,0141	0,0373
26	45_75	45	75	60	0,625	0,0599	0,0346	0,0136	0,0373
27	45_90	45	90	45	0,625	0,1054	0,0302	0,0126	0,0349
28	60_00	60	00	120	0,625	0,0687	0,0316	0,0135	0,0372
29	60_15	60	15	105	0,625	0,0532	0,0316	0,0141	0,0372
30	60_30	60	30	90	0,625	0,0596	0,0316	0,0141	0,0372
31	60_45	60	45	75	0,625	0,0471	0,0316	0,0141	0,0372
32	60_60	60	60	60	0,625	0,0738	0,0330	0,0135	0,0372
33	60_75	60	75	45	0,625	0,1121	0,0356	0,0126	0,0348
34	60_90	60	90	30	0,625	0,0507	0,0316	0,0112	0,0327
35	75_00	75	00	105	0,625	0,0496	0,0330	0,0141	0,0372
36	75_15	75	15	90	0,625	0,0512	0,0330	0,0141	0,0372
37	75_30	75	30	75	0,625	0,0610	0,0345	0,0141	0,0372
38	75_45	75	45	60	0,625	0,0778	0,0345	0,0135	0,0372
39	75_60	75	60	45	0,625	0,1393	0,0356	0,0126	0,0348
40	75_75	75	75	30	0,625	0,0530	0,0373	0,0112	0,0327
41	75_90	75	90	15	0,625	0,0475	0,0330	0,0128	0,0272
42	90_00	90	00	90	0,625	0,0484	0,0296	0,0141	0,0372
43	90_15	90	15	75	0,625	0,0546	0,0296	0,0141	0,0372
44	90_30	90	30	60	0,625	0,0781	0,0301	0,0135	0,0372
45	90_45	90	45	45	0,625	0,1443	0,0301	0,0126	0,0348
46	90_60	90	60	30	0,625	0,0467	0,0316	0,0112	0,0327
47	90_75	90	75	15	0,625	0,0346	0,0332	0,0142	0,0278

6.3 Parameterstudie II

6.3.1 Einzelergebnis diskrete Modellierung

In Parameterstudie II soll der Zusammenhang zwischen **Ausbruchsradius** und **Trennflächenabstand** genauer betrachtet werden. Durch die Variation dieser beiden Parameter sollen Verschiebungscharakteristika in Bezug auf unterschiedlicher Verhältnisse zwischen Radius und Abstand untersucht werden.

Bei einem Verhältnis von Ausbruchsradius zu Trennflächenabstand von kleiner 1,0 (das heißt Radius ist kleiner als Trennflächenabstand) beginnt das Verformungsbild homogen zu werden. Ab 0,5 und darunter ist kein Einfluss der Trennflächen mehr zu erkennen. Bei größer 2,0 (Radius ist doppelt so groß wie der Trennflächenabstand) beginnt das Verformungsbild ebenfalls wieder homogen zu werden. Jedoch ist hier eine Abhängigkeit von der Trennflächenneigung zu beobachten. Bei einem Winkel unter 40° bleibt es homogen, ab 40° ergeben sich an der Firste und an der Sohle wesentlich größere Verschiebungen als am restlichen Querschnitt. Dieser Trend wird immer größer je größer das Verhältnis von Ausbruchsradius zu Trennflächenabstand wird. Bei einem Verhältnis zwischen 1,0 und 2,0 ist kein homogenes Verformungsbild zu erkennen. Wie zu erwarten war, nimmt die Querschnittsverkleinerung bei kleinerem Verhältnis ab.

Die geringste Querschnittsverkleinerung ergibt sich bei einem Öffnungswinkel (ω) von 60° , Radius von 2m und einem Trennflächenabstand von 4,5m.

Bei einem Trennflächenabstand von 1,5m und einem Radius von 6m ergeben sich rein geometrisch die meisten Blöcke. Daher ist, wie vorherzusehen war, die Gefahr von Blockfallen hier am größten.

6.3.2 Einzelergebnis verschmierte Modellierung

Alle drei Klassifizierungssysteme weisen die geringsten Abweichungen von der diskreten Modellierung bei einem Quotienten von Ausbruchsradius zu Trennflächenabstand kleiner 0,8 auf. Die größte Divergenz ergibt sich ab einem Verhältnis von 2,5 bzw. 3,5 bei RMR und GSi.

6.3.3 Zusammenfassung

Gleich wie in Parameterstudie I zeigt sich auch hier, dass die Divergenz der Klassifizierungssysteme von der diskreten Modellierung am geringsten ist, wenn sich kleine Verschiebungen ergeben. In Abb. 6.3 ist ersichtlich, dass der GSi die geringste Abweichung aufweist. Alle drei

Systeme ergeben im Schnitt eine Divergenz von größer 70%. Das ließe sich damit erklären, dass keines dieser drei Klassifizierungssysteme Bezug auf den Ausbruchsradius nimmt. Es wird nur der Trennflächenabstand bzw. die sich daraus ergebende Blockgröße (V_b), nicht aber der Zusammenhang mit dem Radius miteinbezogen.

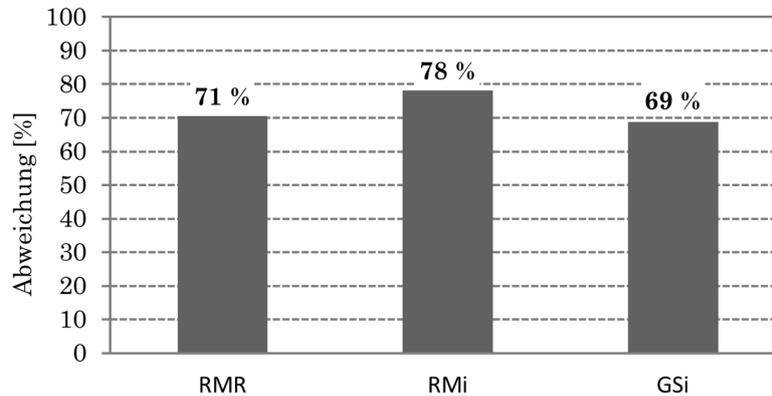


Abb. 6.3: Mittlere Abweichung der Klassifizierungssysteme zur diskreten Modellierung von Parameterstudie II

Tab. 6.3: Ergebnistabelle der Parameterstudie 2 (Teil I)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
1	r2_20_15	20	20	140	0,75	2,108	0,014	0,008	0,021
2	r2_20_25	20	20	140	1,25	0,017	0,012	0,006	0,017
3	r2_20_35	20	20	140	1,75	0,011	0,012	0,005	0,014
4	r2_20_45	20	20	140	2,25	0,009	0,012	0,006	0,013
5	r2_40_15	40	40	100	0,75	0,103	0,015	0,009	0,024
6	r2_40_25	40	40	100	1,25	0,024	0,012	0,007	0,018
7	r2_40_35	40	40	100	1,75	0,013	0,012	0,006	0,016
8	r2_40_45	40	40	100	2,25	0,010	0,012	0,005	0,014
9	r2_60_15	60	60	60	0,75	0,944	0,020	0,009	0,023
10	r2_60_25	60	60	60	1,25	0,020	0,016	0,007	0,018
11	r2_60_35	60	60	60	1,75	0,012	0,016	0,005	0,015
12	r2_60_45	60	60	60	2,25	0,009	0,016	0,006	0,013
13	r2_80_15	80	80	20	0,75	0,170	0,017	0,007	0,018
14	r2_80_25	80	80	20	1,25	0,013	0,015	0,005	0,014
15	r2_80_35	80	80	20	1,75	0,008	0,015	0,006	0,012
16	r2_80_45	80	80	20	2,25	0,006	0,015	0,005	0,011

Tab. 6.4: Ergebnistabelle der Parameterstudie 2 (*Teil II*)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
17	r4_20_25	20	20	140	0,63	3,821	0,024	0,012	0,035
18	r4_20_35	20	20	140	0,88	4,520	0,024	0,010	0,029
19	r4_20_45	20	20	140	1,13	0,029	0,024	0,012	0,026
20	r4_40_15	40	40	100	0,38	0,753	0,030	0,018	0,049
21	r4_40_25	40	40	100	0,63	0,255	0,025	0,014	0,037
22	r4_40_35	40	40	100	0,88	0,071	0,025	0,011	0,033
23	r4_40_45	40	40	100	1,13	0,043	0,025	0,010	0,029
24	r4_60_25	60	60	60	0,63	0,691	0,033	0,014	0,037
25	r4_60_35	60	60	60	0,88	0,979	0,033	0,011	0,030
26	r4_60_45	60	60	60	1,13	0,038	0,033	0,013	0,027
27	r4_80_15	80	80	20	0,38	0,454	0,036	0,014	0,037
28	r4_80_25	80	80	20	0,63	0,175	0,030	0,010	0,029
29	r4_80_35	80	80	20	0,88	0,324	0,030	0,012	0,024
30	r4_80_45	80	80	20	1,13	0,031	0,030	0,010	0,022
31	r6_20_35	20	20	140	0,58	4,917	0,037	0,016	0,045
32	r6_20_45	20	20	140	0,75	5,470	0,037	0,018	0,039
33	r6_40_15	40	40	100	0,25	3,911	0,045	0,028	0,076
34	r6_40_25	40	40	100	0,42	0,573	0,038	0,021	0,057
35	r6_40_35	40	40	100	0,58	0,378	0,038	0,017	0,050
36	r6_40_45	40	40	100	0,75	0,020	0,038	0,016	0,047
37	r6_60_35	60	60	60	0,58	0,801	0,051	0,016	0,046
38	r6_60_45	60	60	60	0,75	1,053	0,051	0,020	0,042
39	r6_80_15	80	80	20	0,25	9,890	0,055	0,021	0,057
40	r6_80_25	80	80	20	0,42	0,615	0,045	0,016	0,045
41	r6_80_35	80	80	20	0,58	0,152	0,045	0,018	0,037
42	r6_80_45	80	80	20	0,75	0,233	0,045	0,018	0,037

6.4 Parameterstudie III

6.4.1 Einzelergebnis diskrete Modellierung

In Parameterstudie III soll der Einfluss der drei verschiedenen **Trennflächenzustände** auf das Verschiebungsverhalten genauer betrachtet werden.

Wenn der Trennflächenzustand einen hohen Reibungswinkel und hohe Klüftsteifigkeiten aufweist, ergibt dies, wie zu erwarten, die kleinsten Verschiebungen. Weiters ist anzumerken, dass die Querschnittsverkleinerung, sofern beide Trennflächenscharen den Trennflächenzustand III haben, diese am größten ist. Dies ist ebenso zu beobachten, wenn nur eine Trennflächenschar den Zustand III aufweist.

Die geringste Querschnittsverkleinerung ergibt sich bei einem Öffnungswinkel (ω) von 100° bzw. 20° . Die Gesteinsart Gneis liefert erwartungsgemäß die kleinsten Verschiebungen, der Unterschied zwischen Gneis und Quarzphyllit ist jedoch nicht groß.

Wenn der Öffnungswinkel (ω) 60° beträgt und beide Trennflächenscharen den Trennflächenzustand I aufweisen, ergibt dies die geringste Gefahr für das Fallen eines Blockes. Die Gesteinsart hat klarerweise keinen erkennbaren Einfluss auf das Lösen eines Blockes aus dem Gebirgsverband.

6.4.2 Einzelergebnis verschmierte Modellierung

RMR und GSi liefern bei einem Öffnungswinkel (ω) von 20° sowie der Gesteinsart Quarzphyllit die geringsten Abweichungen zur diskreten Modellierung. Ein hoher Reibungswinkel und hohe Klüftsteifigkeiten führen in allen Klassifizierungssystemen zu den geringsten Abweichungen.

6.4.3 Zusammenfassung

In Abb. 6.4 ist ersichtlich, dass alle drei Klassifizierungssysteme eine gleich große Abweichung von der diskreten Modellierung aufweisen. Dies lässt darauf schließen, dass in allen drei Systemen der Trennflächenzustand in etwa gleich gut bzw. gleich schlecht klassifiziert wird.

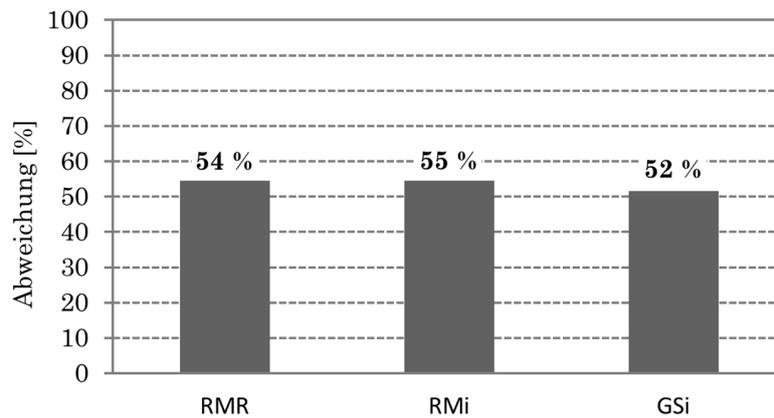


Abb. 6.4: Mittlere Abweichung der Klassifizierungssysteme zur diskreten Modellierung von Parameterstudie III

Tab. 6.5: Ergebnistabelle der Parameterstudie 3 (*Part I*)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
1	11_20_g	20	20	140	0,625	0,010	0,011	0,011	0,007
2	11_40_g	40	40	100	0,625	0,010	0,011	0,011	0,008
3	11_60_g	60	60	60	0,625	0,010	0,013	0,011	0,007
4	11_80_g	80	80	20	0,625	0,009	0,013	0,010	0,007
5	22_20_g	20	20	140	0,625	0,042	0,012	0,016	0,011
6	22_40_g	40	40	100	0,625	0,027	0,012	0,018	0,012
7	22_60_g	60	60	60	0,625	0,064	0,015	0,018	0,012
8	22_80_g	80	80	20	0,625	0,026	0,014	0,014	0,010
9	33_20_g	20	20	140	0,625	1,552	0,016	0,021	0,024
10	33_40_g	40	40	100	0,625	0,233	0,016	0,023	0,024
11	33_60_g	60	60	60	0,625	0,153	0,020	0,023	0,025
12	33_80_g	80	80	20	0,625	0,539	0,019	0,017	0,019
13	12_20_g	20	20	140	0,625	0,020	0,012	0,016	0,011
14	12_40_g	40	40	100	0,625	0,018	0,012	0,018	0,012
15	12_60_g	60	60	60	0,625	0,026	0,015	0,018	0,012
16	12_80_g	80	80	20	0,625	0,014	0,014	0,014	0,010
17	13_20_g	20	20	140	0,625	0,038	0,016	0,021	0,024
18	13_40_g	40	40	100	0,625	0,057	0,016	0,023	0,024
19	13_60_g	60	60	60	0,625	0,061	0,020	0,023	0,025
20	13_80_g	80	80	20	0,625	0,046	0,019	0,017	0,019
21	23_20_g	20	20	140	0,625	0,559	0,016	0,021	0,024
22	23_40_g	40	40	100	0,625	0,094	0,016	0,023	0,024

Tab. 6.6: Ergebnistabelle der Parameterstudie 3 (*Part II*)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
23	23_60_g	60	60	60	0,625	0,186	0,020	0,023	0,025
24	23_80_g	80	80	20	0,625	0,075	0,019	0,017	0,019
25	11_20_q	20	20	140	0,625	0,022	0,030	0,018	0,019
26	11_40_q	40	40	100	0,625	0,022	0,031	0,018	0,019
27	11_60_q	60	60	60	0,625	0,024	0,039	0,018	0,019
28	11_80_q	80	80	20	0,625	0,022	0,037	0,018	0,018
29	22_20_q	20	20	140	0,625	0,079	0,035	0,027	0,031
30	22_40_q	40	40	100	0,625	0,036	0,036	0,027	0,032
31	22_60_q	60	60	60	0,625	0,093	0,047	0,027	0,033
32	22_80_q	80	80	20	0,625	0,044	0,043	0,021	0,028
33	33_20_q	20	20	140	0,625	7,130	0,038	0,031	0,063
34	33_40_q	40	40	100	0,625	0,310	0,039	0,039	0,066
35	33_60_q	60	60	60	0,625	0,744	0,058	0,039	0,066
36	33_80_q	80	80	20	0,625	0,224	0,052	0,027	0,052
37	12_20_q	20	20	140	0,625	0,041	0,035	0,027	0,031
38	12_40_q	40	40	100	0,625	0,039	0,012	0,018	0,012
39	12_60_q	60	60	60	0,625	0,040	0,047	0,027	0,033
40	12_80_q	80	80	20	0,625	0,030	0,043	0,021	0,028
41	13_20_q	20	20	140	0,625	0,101	0,052	0,031	0,024
42	13_40_q	40	40	100	0,625	0,080	0,053	0,039	0,080
43	13_60_q	60	60	60	0,625	0,097	0,077	0,040	0,080
44	13_80_q	80	80	20	0,625	0,069	0,070	0,027	0,060
45	23_20_q	20	20	140	0,625	0,848	0,052	0,031	0,075
46	23_40_q	40	40	100	0,625	0,134	0,053	0,039	0,080
47	23_60_q	60	60	60	0,625	0,268	0,077	0,039	0,080
48	23_80_q	80	80	20	0,625	0,119	0,077	0,039	0,080

6.5 Parameterstudie IV

6.5.1 Einzelergebnis diskrete Modellierung

In Parameterstudie IV soll der Einfluss der drei verschiedenen **Gesteinsarten** in Bezug auf Trennflächenabstand und Trennflächenzustand genauer betrachtet werden.

Bei der Größe der Querschnittsverkleinerung ist kein Unterschied zwischen Gneis und Kalkmarmor zu erkennen. Quarzphyllit ergibt jedoch tendenziell die größten Verschiebungen. Ein Trennflächenzustand mit hohem Reibungswinkel und hohen Klüftsteifigkeiten liefert die geringste Querschnittsverkleinerung. Hier ist jedoch kein so großer Einfluss zwischen den verschiedenen Trennflächenzuständen zu erkennen wie in Parameterstudie III. Ein merkbarer Anstieg der Querschnittsverkleinerung ist erst gegeben, wenn beide Trennflächenscharen den Zustand II (Trennflächenzustand III gibt es in dieser Studie nicht) aufweisen.

Die geringste Querschnittsverkleinerung ergibt sich bei einem Öffnungswinkel (ω) von 80° und einem Trennflächenabstand von 4m. Die mit Abstand größten Verschiebungen ergeben sich bei einer Trennflächenneigung von 80° ($\omega = 20^\circ$).

Bei dem Verhältnis von Ausbruchsradius zu Trennflächenabstand zeigt sich das gleiche Bild wie in Parameterstudie II. Ist der Quotient größer 1,0 (hier bei einem Trennflächenabstand von 4m) ergibt sich kein homogenes Verformungsbild. Bei einem Trennflächenabstand von 2m (Verhältnis von 2,5) zeigt sich jedoch ein homogenes Verformungsbild. Wenn die Trennflächenneigung größer als 40° ist, beginnt gleich wie in Parameterstudie II, ein Hereinschieben des Gebirges in der Firste und der Sohle.

6.5.2 Einzelergebnis verschmierte Modellierung

RMR und GSi liefern bei einem Öffnungswinkel (ω) von 60° sowie der Gesteinsart Quarzphyllit die geringsten Abweichungen zur diskreten Modellierung. Ein hoher Reibungswinkel und hohe Klüftsteifigkeiten sowie ein Trennflächenabstand von 2m, führen in allen Klassifizierungssystemen zu den geringsten Abweichungen.

6.5.3 Zusammenfassung

In Abb. 6.5 ist ersichtlich, dass der RMR und der RMi circa eine gleich große Abweichung von der diskreten Modellierung aufweisen. Nur der GSi ergibt hier eine größere Divergenz. Das

ließe sich damit erklären, dass der GSi bei der Klassifizierung keinen Bezug auf die Gesteinsart (einachsiale Druckfestigkeit) nimmt.

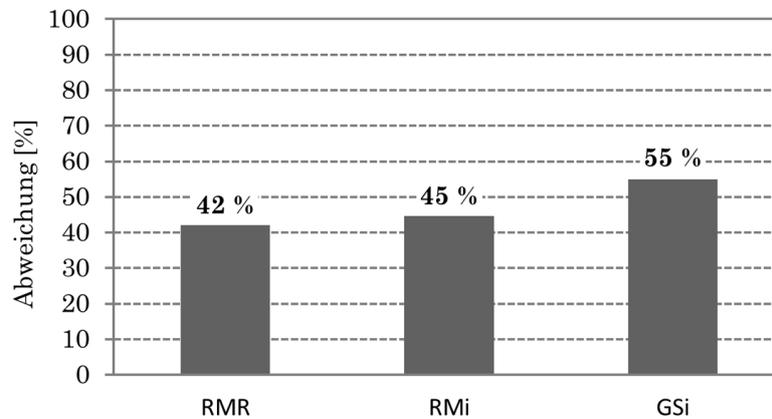


Abb. 6.5: Mittlere Abweichung der Klassifizierungssysteme zur diskreten Modellierung von Parameterstudie IV

Tab. 6.7: Ergebnistabelle der Parameterstudie 4 (*Part I*)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
1	11_20_2g	20	20	140	0,4	0,040	0,014	0,014	0,009
2	11_40_2g	40	40	100	0,4	0,019	0,015	0,016	0,010
3	11_60_2g	60	60	60	0,4	0,078	0,018	0,015	0,009
4	11_80_2g	80	80	20	0,4	0,078	0,019	0,013	0,009
5	11_20_2k	20	20	140	0,4	0,039	0,022	0,021	0,013
6	11_40_2k	40	40	100	0,4	0,025	0,022	0,023	0,014
7	11_60_2k	60	60	60	0,4	0,095	0,026	0,023	0,014
8	11_80_2k	80	80	20	0,4	0,029	0,027	0,019	0,013
9	11_20_2q	20	20	140	0,4	0,081	0,043	0,022	0,024
10	11_40_2q	40	40	100	0,4	0,039	0,043	0,023	0,024
11	11_60_2q	60	60	60	0,4	0,068	0,053	0,023	0,024
12	11_80_2q	80	80	20	0,4	0,045	0,053	0,022	0,023
13	11_20_4g	20	20	140	0,8	0,021	0,015	0,018	0,009
14	11_40_4g	40	40	100	0,8	0,016	0,015	0,019	0,009
15	11_60_4g	60	60	60	0,8	0,019	0,018	0,019	0,009
16	11_80_4g	80	80	20	0,8	0,013	0,018	0,016	0,009
17	11_20_4k	20	20	140	0,8	0,020	0,022	0,013	0,013
18	11_40_4k	40	40	100	0,8	0,021	0,022	0,013	0,013

Tab. 6.8: Ergebnistabelle der Parameterstudie 4 (Part II)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
19	11_60_4k	60	60	60	0,8	0,026	0,026	0,013	0,013
20	11_80_4k	80	80	20	0,8	0,022	0,027	0,016	0,013
21	11_20_4q	20	20	140	0,8	0,033	0,043	0,022	0,023
22	11_40_4q	40	40	100	0,8	0,036	0,043	0,022	0,023
23	11_60_4q	60	60	60	0,8	0,042	0,053	0,022	0,023
24	11_80_4q	80	80	20	0,8	0,039	0,053	0,022	0,023
25	12_20_2g	20	20	140	0,4	0,069	0,017	0,023	0,015
26	12_40_2g	40	40	100	0,4	0,049	0,017	0,026	0,016
27	12_60_2g	60	60	60	0,4	0,155	0,020	0,024	0,016
28	12_80_2g	80	80	20	0,4	0,155	0,020	0,024	0,016
29	12_20_2k	20	20	140	0,4	0,055	0,020	0,020	0,014
30	12_40_2k	40	40	100	0,4	0,086	0,025	0,032	0,022
31	12_60_2k	60	60	60	0,4	0,062	0,025	0,038	0,023
32	12_80_2k	80	80	20	0,4	0,191	0,030	0,038	0,023
33	12_20_2q	20	20	140	0,4	0,050	0,030	0,029	0,020
34	12_40_2q	40	40	100	0,4	0,081	0,043	0,022	0,024
35	12_60_2q	60	60	60	0,4	0,064	0,050	0,027	0,044
36	12_80_2q	80	80	20	0,4	0,254	0,064	0,025	0,044
37	12_20_4g	20	20	140	0,8	0,075	0,064	0,023	0,037
38	12_40_4g	40	40	100	0,8	0,028	0,017	0,024	0,012
39	12_60_4g	60	60	60	0,8	0,022	0,017	0,026	0,013
40	12_80_4g	80	80	20	0,8	0,026	0,026	0,013	0,013
41	12_20_4k	20	20	140	0,8	0,023	0,020	0,021	0,011
42	12_40_4k	40	40	100	0,8	0,032	0,025	0,017	0,018
43	12_60_4k	60	60	60	0,8	0,030	0,025	0,019	0,019
44	12_80_4k	80	80	20	0,8	0,052	0,030	0,018	0,019
45	12_20_4q	20	20	140	0,8	0,030	0,030	0,015	0,017
46	12_40_4q	40	40	100	0,8	0,058	0,050	0,025	0,032
47	12_60_4q	60	60	60	0,8	0,058	0,050	0,027	0,035
48	12_80_4q	80	80	20	0,8	0,074	0,064	0,027	0,035
49	22_20_2g	20	20	140	0,4	0,061	0,064	0,022	0,030
50	22_40_2g	40	40	100	0,4	0,173	0,021	0,032	0,015
51	22_60_2g	60	60	60	0,4	0,068	0,021	0,037	0,016
52	22_80_2g	80	80	20	0,4	0,348	0,026	0,037	0,016
53	22_20_2k	20	20	140	0,4	0,081	0,026	0,029	0,014
54	22_40_2k	40	40	100	0,4	0,227	0,025	0,038	0,023
55	22_60_2k	60	60	60	0,4	0,038	0,025	0,038	0,023

Tab. 6.9: Ergebnistabelle der Parameterstudie 4 (*Part III*)

Nr.	Bez.	TF1 [°]	TF2 [°]	ω [°]	TFA/r [$\frac{m}{m}$]	DM	RMR	RMi	GSi
						QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]	QS/r [$\frac{m^2}{m}$]
56	22_80_2k	80	80	20	0,4	0,442	0,030	0,038	0,023
57	22_20_2q	20	20	140	0,4	0,105	0,030	0,029	0,020
58	22_40_2q	40	40	100	0,4	0,786	0,050	0,033	0,042
59	22_60_2q	60	60	60	0,4	0,096	0,049	0,038	0,044
60	22_80_2q	80	80	20	0,4	0,607	0,064	0,039	0,044
61	22_20_4g	20	20	140	0,8	0,060	0,064	0,022	0,030
62	22_40_4g	40	40	100	0,8	0,041	0,017	0,024	0,012
63	22_60_4g	60	60	60	0,8	0,019	0,017	0,026	0,013
64	22_80_4g	80	80	20	0,8	0,073	0,020	0,026	0,013
65	22_20_4k	20	20	140	0,8	0,036	0,020	0,021	0,011
66	22_40_4k	40	40	100	0,8	0,055	0,025	0,024	0,018
67	22_60_4k	60	60	60	0,8	0,026	0,025	0,026	0,019
68	22_80_4k	80	80	20	0,8	0,123	0,030	0,026	0,019
69	22_20_4q	20	20	140	0,8	0,048	0,030	0,021	0,017
70	22_40_4q	40	40	100	0,8	0,116	0,050	0,025	0,032
71	22_60_4q	60	60	60	0,8	0,042	0,050	0,027	0,035
72	22_80_4q	80	80	20	0,8	0,177	0,064	0,027	0,035

6.6 Zusammenfassung und Überblick

In Abb. 6.6 ist der Mittelwert der Abweichungen der Fläche der Querschnittsverkleinerung (siehe Kapitel 5.2 in Prozent über alle vier Parameterstudien aufgetragen. Daraus geht hervor, dass der RMR und der GSi am besten mit der diskreten Modellierung übereinstimmen. Der RMi ergibt eine etwas größere Abweichung. Dieses Ergebnis zeigt, dass keines der drei Klassifizierungssysteme in Bezug auf die ‐Genauigkeit der Vorhersage‐ gute Ergebnisse liefert. Dies würde bedeuten, dass bei einer Abweichung von 50% und einer Verschiebung von angenommenen 10cm, ein Klassifizierungssystem 5cm oder 15cm prognostizieren würde¹.

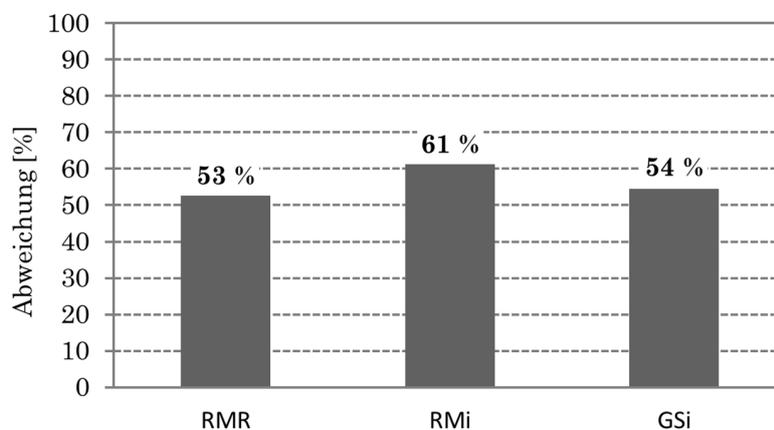


Abb. 6.6: Mittelwert der Abweichungen der drei Klassifizierungssysteme zur diskreten Modellierung aller vier Parameterstudien

In dieser Arbeit ergeben sich für 46% aller Modellierungen (alle vier Parameterstudien zusammen), dass zumindest ein Block sich aus dem Gebirgsverband löst. Dies würde streng genommen bedeuten, dass in diesen Fällen die Klassifizierungssysteme fehlerhafte Ergebnisse liefern.

¹ Die Standardabweichung dieses Mittelwertes bleibt unberücksichtigt

Die folgenden drei Diagramme (Abb. 6.7, 6.8 & 6.9) zeigen die Verteilung der Abweichung auf Grundlage der Fläche der Querschnittsverkleinerung der Klassifizierungssysteme zur diskreten Modellierung.

Die vertikale Achse stellt die Anzahl der Modellierungen in Prozent dar. Auf der horizontalen Achse wird die Abweichung des Klassifizierungssystems zur diskreten Modellierung in Bezug auf eine Über- bzw. Unterschätzung (negatives Vorzeichen) dargestellt. Aufsummiert ergeben alle vertikalen Werte 100% der Modellierungen.

Als Beispiel ergibt sich, dass 3% der Modellierungen eine Abweichung von -50% (Minus für unterschätzt, im Diagramm grün hinterlegt) aufweisen (siehe Abb. 6.7).

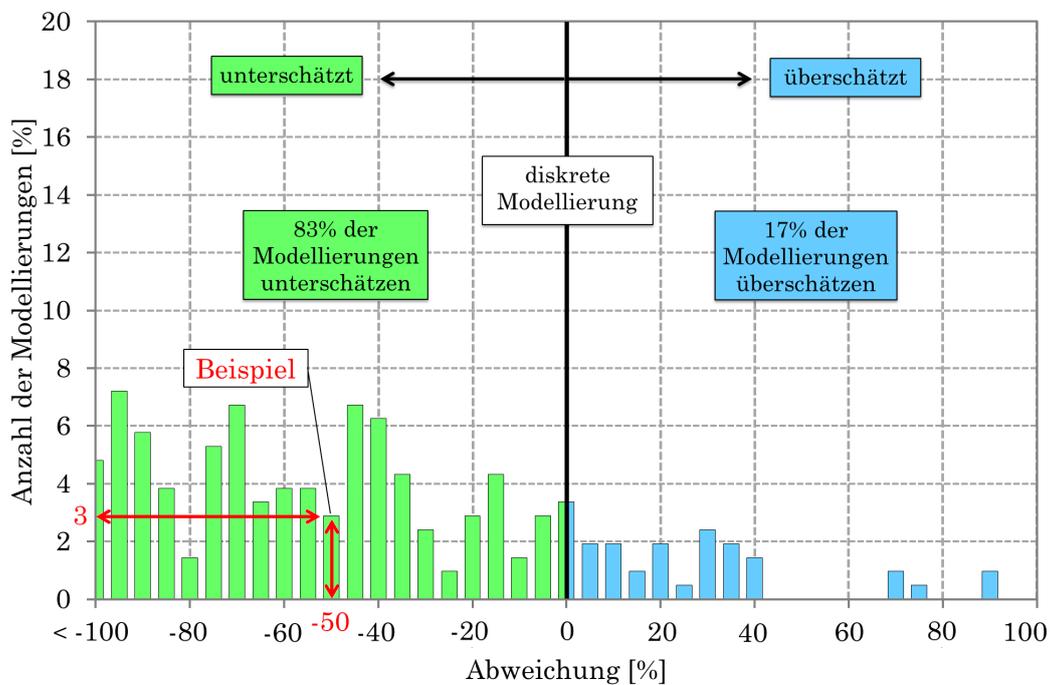


Abb. 6.7: Über- und Unterschätzen des RMR in Bezug zur diskreten Modellierung

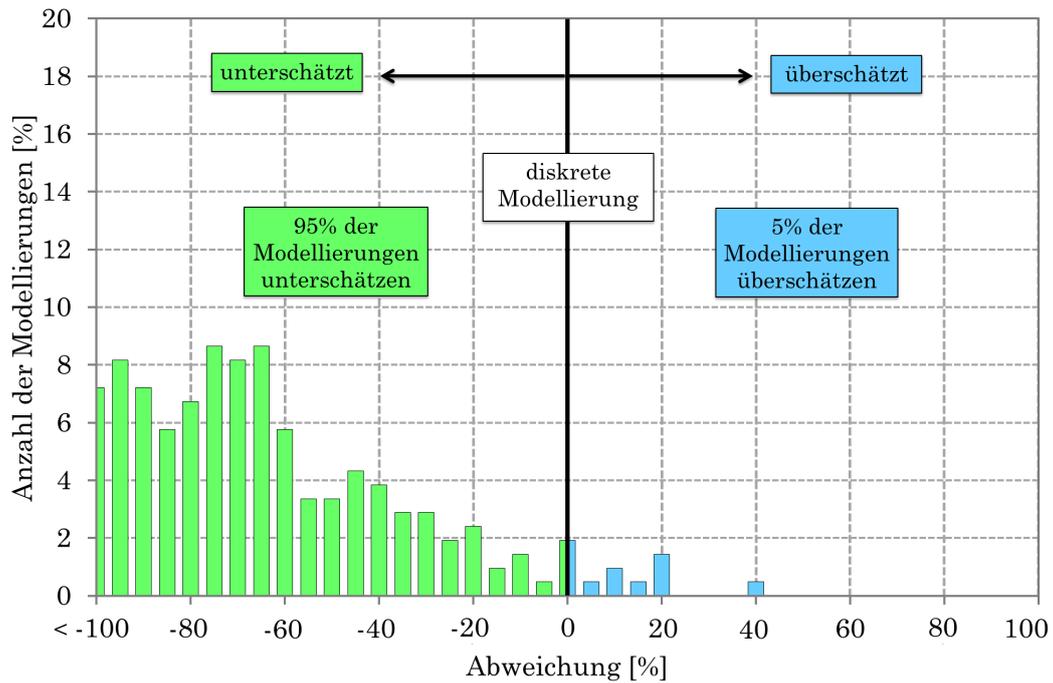


Abb. 6.8: Über- und Unterschätzen des RMi in Bezug zur diskreten Modellierung

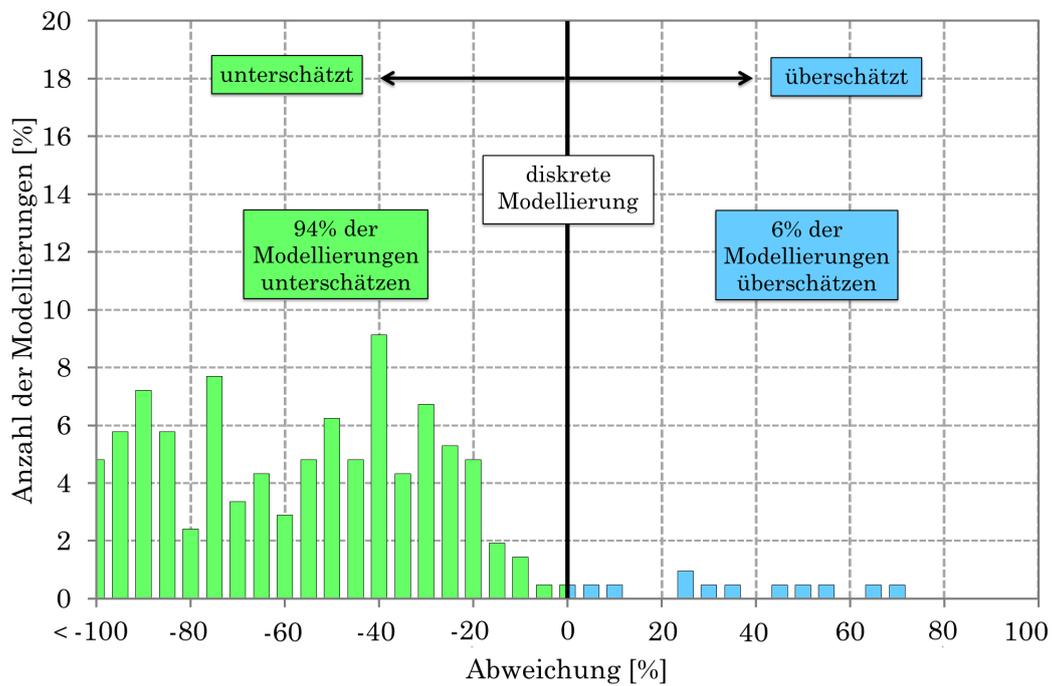


Abb. 6.9: Über- und Unterschätzen des GSi in Bezug zur diskreten Modellierung

Aus den vorhergehenden drei Diagrammen ist ersichtlich, dass alle drei Klassifizierungssysteme die diskrete Modellierung weitestgehend unterschätzen. Das bedeutet: RMR, RMi und GSi prognostizieren großteils eine geringere Querschnittsverkleinerung, als die diskrete Modellierung.

Abb. 6.10 zeigt die Über- und Unterschätzung aller drei Klassifizierungssysteme in den vier Parameterstudien. Auf der vertikalen Achse wird das Verhältnis der Fläche der Querschnittsverkleinerung von verschmierter zu diskreter Modellierung aufgetragen. 1,0 stellt dabei eine Übereinstimmung der beiden Modelle dar. Die horizontale Achse stellt die aufsteigend sortierte, bezogene Querschnittsverkleinerung (durch den Radius dividiert, um dimensionslos zu bleiben) der diskreten Modellierung dar. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass die Klassifizierungssysteme mit zunehmender Verschiebung das tatsächliche Verhalten immer mehr unterschätzen.

Das heißt: Sind die Verschiebungen der diskreten Modellierung gering, liefern die Klassifizierungssysteme eine bessere Prognose. Wird die Verschiebung jedoch größer, ergeben sich keine plausiblen Werte mehr.

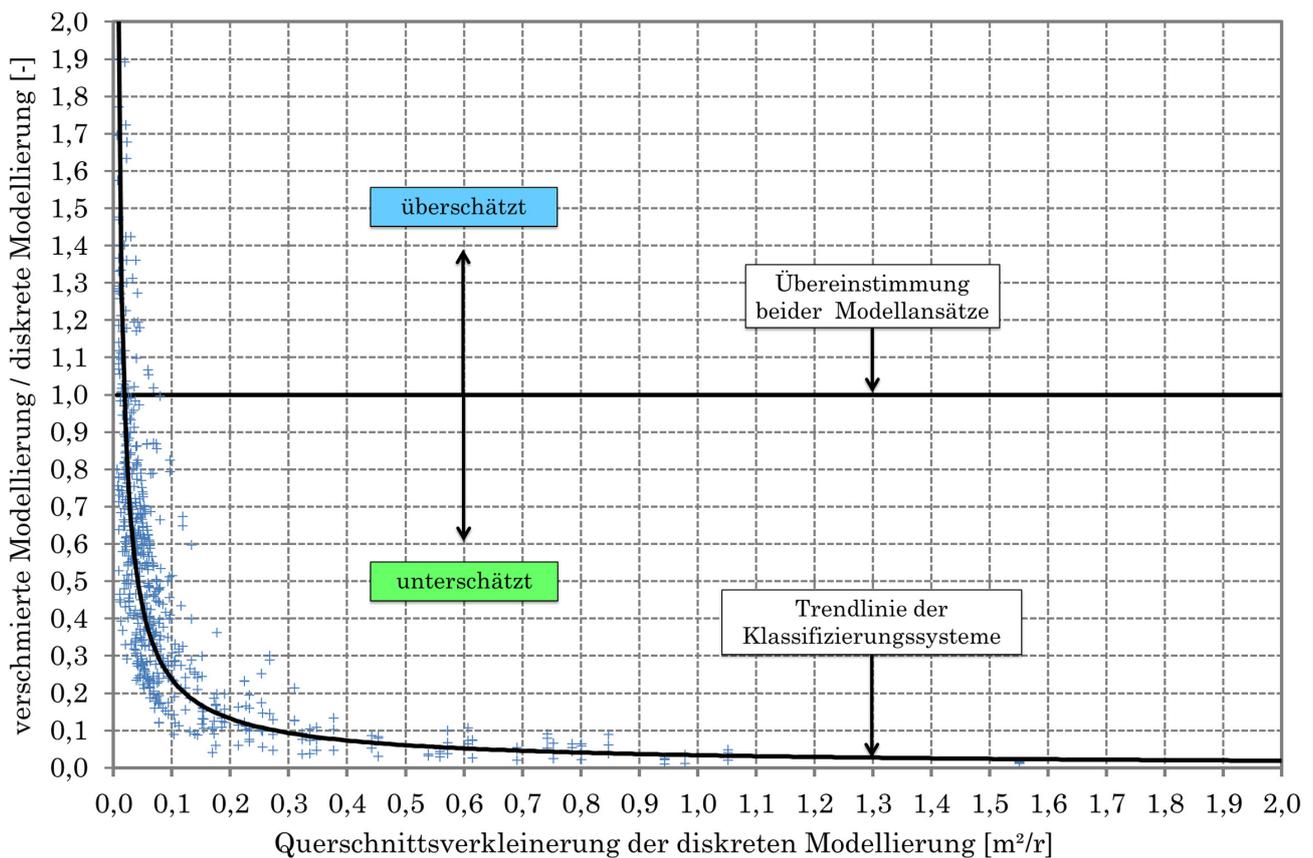


Abb. 6.10: Gegenüberstellung aller vier Parameterstudien und der drei Klassifizierungssysteme

KAPITEL 7

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit war es, durch verschiedene Parameterstudien ein Verhalten des Gebirges abzuleiten. Weiters sollten die Klassifizierungssysteme RMR, R_{Mi} und G_{Si} untereinander und mit der diskreten Modellierung verglichen werden. Dies sollte darauf abzielen, eine Aussage über die "Genauigkeit der Prognose" dieser Systeme machen zu können.

diskrete Modellierung

Bei der Trennflächenneigung bezogen auf die geringste Querschnittsverkleinerung ergibt sich kein einheitliches Bild. Die einzig mögliche Aussage ist, dass sich bei flacher Neigung tendenziell geringere Verschiebungen ergeben. Ein kleines Verhältnis von Radius zu Trennflächenabstand liefert erwartungsgemäß geringere Querschnittsverkleinerungen, da sich dadurch die Gebirgsparameter den intakten Gesteinsparametern annähern. Wenn dieses Verhältnis kleiner 1 oder größer 2 wird, ergibt sich ein homogenes Verformungsbild. Der Einfluss von verschiedenen Trennflächenzuständen auf die Verschiebung wird erst größer, wenn sich die Festigkeitseigenschaften und Steifigkeiten der Trennflächen merklich verschlechtern, wie z.B. von Gneis mit Zustand I zu Quarzphyllit mit Zustand III.

verschmierte Modellierung

Der Trennflächenzustand wird in allen drei Systemen gleich gut bzw. schlecht einbezogen. Der G_{Si} zeigt eine Schwäche bei der Klassifizierung der Gesteinsart, da er als einziger keinen Bezug auf die einachsiale Druckfestigkeit des Gesteins nimmt. Obwohl der RMR die unterschiedlichen Trennflächenneigungen berücksichtigt, ergibt sich dadurch keine bessere Übereinstimmung mit der diskreten Modellierung. R_{Mi} und G_{Si} implementieren die Trennflächenneigung nur indirekt durch die Blockgröße (V_b), trotzdem ergibt der G_{Si} bei der Variation der Neigung eine wesentlich geringere Abweichung als der R_{Mi}. Ein bedeutendes Defizit aller Klassifizierungssysteme ist

zum einen der fehlende Einbezug des Verhältnisses Trennflächenabstand - Ausbruchsradius und zum anderen die fehlende Berücksichtigung, eines möglichen Blockfallens, das sich aufgrund von Trennflächen und des Ausbruchs ergibt. Dies kann nur durch eine weitergehende kinematische Betrachtung (Numerik) beurteilt werden. In dieser Arbeit gibt sich für 46% aller Modellierungen, dass sich zumindest ein Block aus dem Gebirgsverband löst. Dies würde streng genommen bedeuten, dass in diesen Fällen die Klassifizierungssysteme fehlerhafte Ergebnisse liefern.

Allgemeines

Es erfordert sicher noch weitere Untersuchungen, um zu ermitteln, ob die verwendeten Formeln für den Elastizitätsmodul des Gebirges (E_{rm}), welche aus den jeweiligen Klassifizierungssystemen abgeleitet werden, zufriedenstellende Ergebnisse liefern oder noch modifiziert werden müssen. Bei der Beurteilung bzw. Modifizierung dieser Formeln bleibt natürlich immer noch die Frage offen, ob das Klassifizierungssystem selbst oder die Formel für die Ermittlung des Gebirgsmoduls ungenau bzw. fehlerhaft ist. Aufgrund der Ergebnisse in dieser Arbeit werden die beiden Klassifizierungssysteme RMR und GSi als gleichwertig und wesentlich besser als jenes des RMi eingestuft. Diese Aussage ist aber nur gültig, wenn der GSi nicht mit der Tabelle nach **Marinos** und **Hoek** [9], sondern nach **Cai et al.** [3] bestimmt wurde. Die Ermittlung des GSi nach **Cai et al.** [4] hat zusätzlich den Vorteil, dass der subjektive Einfluss einer Klassifizierung minimiert werden kann. In allen drei Klassifizierungssystemen sollte entweder der Ausbruchsradius oder das Verhältnis Ausbruchsradius bzw. Ausbruchsquerschnitt zu Trennflächenabstand bzw. Blockgröße implementiert werden.

Es wurde in dieser Arbeit als nicht unerhebliches Problem identifiziert, dass für größere Verschiebungen, die Klassifizierungssysteme keine brauchbaren Prognosen liefern. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die in dieser Arbeit behandelten Klassifizierungssysteme RMR, RMi und GSi nur zu einer sehr rudimentären Beurteilung des Gebirges herangezogen werden sollten.

Literaturverzeichnis

- [1] BARTON, N. R.: A model study of rock-joint deformation. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 9 (1971), S. 579–602 (Zitiert auf Seiten 17 und 18)
- [2] BIENIAWSKI, Z. T.: Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends. In: *Comprehensive Rock Engineering* 3 (1993), S. 553–573 (Zitiert auf Seite 29)
- [3] CAI, M. ; KAISER, P.K. ; TAsAKA, Y. ; MINAMI, M.: Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44 (2007), S. 247–265 (Zitiert auf Seiten 32 und 63)
- [4] CAI, M. ; KAISER, P.K. ; UNO, H. ; TAsAKA, Y. ; MINAMI, M.: Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41 (2004), S. 3–19 (Zitiert auf Seiten 32 und 63)
- [5] FEDER, G. ; ARWANITAKIS, M.: Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Breiche tiefliegender Hohlraumbauten. In: *Berg- und Huettenmaenische Monatshefte* 4 (1976), S. 103–117 (Zitiert auf Seite 24)
- [6] HOEK, E.: Practical Rock Engineering. In: *Internet* 1 (2006), S. 237 (Zitiert auf Seiten 12 und 32)
- [7] HOEK, E. ; CARRANZA-TORRES, C. ; CORKUM, B.: Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition. In: *Internet (www.rocscience.com)* 1 (2002), S. 7 (Zitiert auf Seite 33)
- [8] HOEK, E. ; DIEDERICHS, M. S.: Empirical estimation of rock mass Modulus. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43 1 (2006), S. 203–215 (Zitiert auf Seite 32)
- [9] MARINOS, PG. ; HOEK, B.: GSi: a geologically friendly tool for rock mass strenght estimation. In: *GeoEng 2000 Lancaster PA. Melbourne Technomic Publishers 200* 1 (2000), S. 1 (Zitiert auf Seiten 32 und 63)

- [10] MITRI, H. S. ; EDRISSI, R. ; HENNING, J.: Finite element modeling of cablebolted stopes in hard rock ground mines. In: *SME annual meeting, New Mexico, Albuquerque* (1994), S. 94–116 (Zitiert auf Seite 29)
- [11] NICHOLSON, G.A. ; BIENIAWSKI, Z.T.: A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. In: *International Journal of Mining and Geological Engineering* 8 (1990), S. 181 – 202 (Zitiert auf Seite 29)
- [12] PALMSTROEM, A.: A short introduction to the Rock Mass index (RMi) and its applications. In: *www.rockmass.net* (Zitiert auf Seite 12)
- [13] PALMSTROEM, A.: Characterizing rock masses by the RMi for use in practical rock engineering, part 1 : the development of the Rock Mass Index (RMi). In: *Tunnel Underground Space Tech* 1 (1996), S. 1 (Zitiert auf Seite 12)
- [14] PALMSTROEM, A.: Characterizing Rock Masses by the RMi for Use in Practical Rock Engineering, Part 2 Some practical applications of the Rock Mass index (RMi). In: *Tunneling and Underground Space Technology* 11 (1996), S. 287–303 (Zitiert auf Seite 31)
- [15] PALMSTROEM, A.: Recent developments in rock support estimates by the RMi. In: *J Rock Mech Tunnel Tech* 1 (2000), S. 1 – 19 (Zitiert auf Seiten 30 und 31)
- [16] PALMSTROEM, A.: Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). In: *Tunnel Underground Space Technology* 20 (2005), S. 362 – 377 (Zitiert auf Seite 31)
- [17] PALMSTROEM, A. ; SINGH, R.: The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. In: *Tunneling and Underground Space Technology* 16 (2001), S. 115–131 (Zitiert auf Seite 31)
- [18] RIEDMUELLER, G. ; SCHUBERT, W.: Critical Comments on Quantitative Rock Mass Classification. In: *Felsbau* 17 1 (1999), S. 164–167 (Zitiert auf Seite 13)
- [19] ROCSCIENCE: *Handbuch Phase2 Version 7.014*. Rocscience Inc. 31 Balsam Avenue Toronto, Ontario Canada M4E 3B5: Rocscience, Maerz 2010 (Zitiert auf Seite 23)
- [20] SINGH, B. ; GOEL, R.K. ; J.HOUGH (Hrsg.): *Rock mass classification - A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier, 1999. – ISBN 0080430139 (Zitiert auf Seite 11)
- [21] SOMMER, R.: *Kritische Wertung der Methoden der Gebirgsklassifizierung im Tunnelbau*. W.Wittke, 2009 (Zitiert auf Seiten 10, 11 und 13)