

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

# **Untersuchungen zum Einfluss der Verteilung der Raumstellung von Trennflächen auf die Standsicherheit von Hohlraumbauwerken**

Investigations on the Influence of Joint Orientation  
Uncertainties on the Stability of  
Underground Excavations

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Rainer Secklehner, BSc.**

Matr.Nr.: 00925898

unter der Anleitung von

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

E 220 - Institut für Geotechnik  
Forschungsbereich Ingenieurgeologie  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/220, A-1040 Wien

Wien, im Februar 2019

---

## Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei jenen Menschen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben.

Einen großen Dank möchte ich aussprechen an Herrn Priv. Doz. Dipl. Ing. Dr. techn. Alexander Preh, dessen fachliche Ratschläge und Geduld mir dabei geholfen haben diese Arbeit fertigzustellen.

Auch möchte ich meinen Dank dem Team des Fachbereiches Ingenieurgeologie, des Institutes für Geotechnik, aussprechen für die Bereitstellung und die Unterstützung in der Verwendung meiner Arbeitsmittel.

Für die Möglichkeit einer flexiblen zeitlichen Arbeitsgestaltung in meiner beruflichen Tätigkeit bei iC consulenten, möchte ich mich bedanken bei Herrn Dipl. Ing. Bernhard Hochgatterer, Herrn Dipl. Ing. Vladislav Mihaylov und Herrn Dipl. Ing. Johannes Weigl. Sie hatten als Projektleiter stets Einsicht und Geduld für den Aufwand, den das Verfassen dieser Arbeit in Anspruch genommen hat.

Zu besonderem Dank bin ich meiner Freundin Denise verpflichtet, die mich stets aufgebaut und unterstützt hat, besonders in den aufwändigsten Abschnitten meines Studiums.

Meinen Eltern möchte ich großen Dank für die finanzielle Unterstützung aussprechen, ohne die mir dieses Studium nicht möglich gewesen wäre.

Abschließend gilt mein Dank noch den Freunden, die mir durch ihre Gesellschaft, den gemeinsamen Sport oder andere Zerstreuungen eine Studienzeit bereitet haben, an die ich mich gerne zurückerinnere.

## Kurzfassung

Das Materialverhalten von Fels wird bestimmt durch die Interaktion von massiven Festkörpern (Kluftkörpern), welche von Trennflächen (Klüfte, Störungen, Schichtungen, Schieferungen) begrenzt werden. Entsprechend der Ausprägung des Trennflächensystems (Gefüges) können die Felsmassen eines Gebirges als Kontinuum oder als Diskontinuum beschrieben werden. Letzteres ist als die in der Natur allgemein gültige Modellbildung anzusehen.

Die einzelnen Trennflächen einer Schar werden für die Modellierung meist parallel zueinander angenommen, entsprechend der maßgebenden (zumeist mittleren) Raumstellung der betrachteten Trennflächen. Diese Annahme kann jedoch zu einer Vernachlässigung eines maßgeblichen Stabilitätsverlustes führen, die sich aus der Veränderung des Versagensmechanismus eines Kluftkörpers (Blocks) ergibt (Poisel et al., 2017).

Da die Geometrie eines Trennflächensystems zumeist zu komplex ist, um dieses mittels Handrechnung analysieren zu können, kommen Software Anwendungen zum Einsatz. Die Berechnung wird entweder analytisch oder numerisch durchgeführt. Eine gängige Methode zur analytischen Berechnung einer Ansammlung von Kluftkörpern (Diskontinuum) stellt die Block Theorie dar (Goodman und Shi, 1985). Für eine numerische Berechnung von Blockansammlungen kann die Diskrete Elemente Methode eingesetzt werden (Cundall, 1988 und Hart et al., 1988). Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl die Block Theorie als auch die Diskrete Elemente Methode eingesetzt. Die Block Theorie kam dabei unter Verwendung der Programme *Block Theorie* (Langer, 1986) und *Unwedge* (Rocscience) zum Einsatz. Berechnungen auf Grundlage der Diskreten Elemente Methode, wurden mit *3DEC* der Itasca Consulting Group durchgeführt.

Bisher ist ein Nachweis der Stabilität von Kluftkörpern entsprechend Eurocode, nur unter einer Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Einwirkungen und Festigkeiten durchzuführen. Die Berücksichtigung einer Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen wird von der gültigen Fassung der Eurocodes nicht berücksichtigt. Durch jüngere Publikationen (Poisel et al., 2017 und Harrison, 2017) wird eine Berücksichtigung spezifischer felsmechanischer Eingangswerte gefordert, wie z.B. der Raumstellungen von Trennflächen und deren Variation. In der Revision der Eurocodes 2020 sollen auch diese partikulären Fragestellungen der Felsmechanik behandelt werden. Des Weiteren ist der Eurocode 7 in seiner gültigen Fassung formell nicht für den Tunnelbau anzuwenden (Radoncic, 2012 und Hofmann et al., 2010). Auf nationaler Ebene wird in Österreich jedoch diese Lücke mithilfe ergänzender Regelungen, wie z.B. der Richtlinien der ÖGG, geschlossen.

Zielsetzung dieser Arbeit war es die Auswirkungen der natürlichen Variation der Raumstellungen von Trennflächen auf die Stabilität von Hohlraumbauwerken zu untersuchen. Die Untersuchungen wurden durchgeführt am Modell einer Kaverne in geklüftetem Gebirge.

Da die Berechnungen dafür sowohl mit der Block Theorie als auch mit der DEM durchgeführt worden sind, waren die Ergebnisse aus beiden Berechnungsansätzen einander gegenüberzustellen. In weiterer Folge wurde der Vergleich eines Versagens von Blöcken, ausgelöst durch eine Abminderung der Scherparameter in den Trennflächen, gemäß EC 7, und dem Versagen zufolge der Variation der Raumstellung der Trennflächen angestrebt.

Die Untersuchungen dazu wurden an drei voneinander unterschiedlichen Trennflächensystemen vorgenommen. Die ersten beiden Trennflächensysteme sind das Ergebnis einer Kartierung im Steinbruch Renz (Kolenprat, 2019). Das dritte Trennflächensystem entstammt der Übung zur angewandten Felsmechanik an der Technischen Universität Wien (Poisel, 2015).

Die aus der Block Theorie und der DEM ermittelten Ergebnisse für die Geometrie der Klufkörper, den Versagensmechanismus und das Versagensbild (Lokalisation und Ausmaß des Versagens) sind qualitativ miteinander vergleichbar. Es wurde darüber hinaus festgestellt, dass plausible Ergebnisse für den Versagensmechanismus und das Versagensbild einer Variation der Trennflächen bedürfen. Die Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Scherparameter alleine ist hingegen nicht ausreichend, um das Versagensverhalten von Klufkörpern zu berücksichtigen.

**Schlagwörter:** Felsmechanik, Tunnelbau, Block Theorie, DEM, Raumstellung von Trennflächen, Eurocode 7

## Abstract

Rock mass behavior is extremely affected by the interaction of massive rock blocks, separated by joints (discontinuities). Depending on the characteristics of joint structure, rock may be classified as a continuum or as a discontinuum. In nature, rock mass is generally assumed to be a discontinuum.

Individual joints of a joint set are considered mostly parallel one to another, according to the orientation of their significant (dominantly median) member. This assumption can lead to the negligence of a critical loss of stability, caused by joint orientation uncertainties (Poisel et al., 2017).

Software applications are preferred for the analysis of joint structure, which inhabit an extensive geometrical complexity and, therefore, pose difficulties for calculations by hand. The analysis is either performed with analytical or numerical software. A common method for the analytical calculation of discontinuous systems is the Block Theory (Goodman and Shi, 1985). Numerical calculations for discontinuous systems can be done with Discrete Element Method (DEM) (Cundall, 1988 und Hart et al., 1988). The analyses in this thesis were accomplished with the Block Theory and the DEM. For the examination with the Block Theory the applications *Block Theorie* (Langer, 1986) and *Unwedge* (Rocscience) were used. Numerical investigation, based on the Discrete Element Method, was realized by means of *3DEC* from Itasca Consulting Group.

Presently, Eurocode regulations provide a basis for the verification of the stability of rock blocks. The Eurocodes consider partial safety factors, which are applied on actions and shear strengths. However, joint orientation uncertainties are not addressed in the current version of Eurocode 7. Recent publications (Poisel et al. 2017 and Harrison, 2017) demand a consideration of scientific issues, which are typical for rock mechanics e.g. joint orientation uncertainties. The Eurocode 2020 amendment should address those particular issues. Consequently, the Eurocode 7 is formally not applicable in tunneling (Radoncic, 2012 und Hofmann et al., 2010). In Austria this gap is bridged on a national basis with supplemental documents, such as the OeGG Guidelines.

The aim of this thesis is to analyze the effects on the stability of subsurface buildings, resulting from natural joint orientation uncertainties. Investigations were performed on the model of a cavern in jointed rock.

The results of Block Theory and DEM were then compared with each other. Furthermore, comparisons were drawn between the results of the application of partial safety factors and the consideration of joint orientation uncertainties.

Three different joint sets were investigated to answer the key question of this thesis. The first two systems are a result of geological mapping in the Renz quarry (Kolenprat, 2019). The third system originates from the exercise for applied rock mechanics at the Vienna University of Technology (Poisel, 2015).

Results of Block Theory and DEM for block shapes, failure mechanisms and failure schemes (localization and extent of failure) are qualitatively comparable. In addition, it was determined that, in order to receive plausible results for the failure mechanism and the failure scheme, joint orientation uncertainties have to be considered. The application of partial safety factors is, on the contrary, not sufficient for the determination of block failure.

**Keywords:** rock mechanics, tunneling, Block Theory, DEM, joint orientations, Euro-code 7

# Inhaltsverzeichnis

|                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| <b>Danksagung .....</b>                              | <b>II</b>  |
| <b>Kurzfassung.....</b>                              | <b>III</b> |
| <b>Abstract.....</b>                                 | <b>V</b>   |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                      | <b>VII</b> |
| <b>Einleitung.....</b>                               | <b>1</b>   |
| <b>1     Gestein, Fels und Gebirge.....</b>          | <b>3</b>   |
| 1.1   Diskontinuitäten .....                         | 3          |
| 1.2   Raumstellungen von Trennflächen.....           | 4          |
| 1.3   Berechnungsmodelle für Fels und Gebirge .....  | 6          |
| 1.4   Versagensmechanismen und Versagensbilder ..... | 7          |
| <b>2     Stand der Technik .....</b>                 | <b>10</b>  |
| 2.1   Eurocode.....                                  | 10         |
| 2.2   Richtlinien der ÖGG.....                       | 15         |
| <b>3     Block Theorie .....</b>                     | <b>19</b>  |
| 3.1   Annahmen der Block Theorie .....               | 19         |
| 3.2   Identifikation von Key Blocks.....             | 21         |
| 3.3   Block Code .....                               | 24         |
| 3.4   Versagensmechanismen .....                     | 27         |
| 3.5   Anwendung der Block Theorie .....              | 27         |
| 3.6   Software.....                                  | 28         |
| <b>4     Discrete Element Method (DEM).....</b>      | <b>30</b>  |
| 4.1   Grundlagen der Distinct Element Method.....    | 30         |
| 4.2   Distinct Element Code und Block Theorie.....   | 31         |
| 4.3   Festkörperkinematik .....                      | 32         |
| 4.4   Kontakte und Trennflächen .....                | 34         |
| <b>5     Untersuchungen.....</b>                     | <b>36</b>  |
| 5.1   Untersuchte Hohlraumgeometrie.....             | 36         |
| 5.2   Materialparameter.....                         | 37         |
| 5.3   Berechnungen mit der Block Theorie.....        | 37         |

---

|           |                                                                            |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4       | Berechnungen mit DEM.....                                                  | 41         |
| 5.5       | Untersuchungsprogramm .....                                                | 47         |
| 5.6       | Untersuchung 0.....                                                        | 48         |
| 5.7       | Untersuchung 1.....                                                        | 51         |
| 5.8       | Untersuchung 2.....                                                        | 54         |
| <b>6</b>  | <b>Ergebnisse – Untersuchung 0 .....</b>                                   | <b>59</b>  |
| 6.2       | Zusammenfassung der Ergebnisse aus Untersuchung 0.....                     | 61         |
| <b>7</b>  | <b>Ergebnisse – Untersuchung 1 .....</b>                                   | <b>63</b>  |
| 7.1       | Gruppe 1: Trennflächensystem 1, deterministisch, keine Blockrotation ..... | 63         |
| 7.2       | Gruppe 2: Trennflächensystem 1, deterministisch, mit Blockrotation.....    | 71         |
| 7.3       | Gruppe 3: Trennflächensystem 1, probabilistisch, keine Blockrotation ..... | 75         |
| 7.4       | Gruppe 4: Trennflächensystem 1, probabilistisch, mit Blockrotation.....    | 79         |
| 7.5       | Zusatzuntersuchung: Auswirkung der Rotation von Blöcken.....               | 83         |
| 7.6       | Zusatzuntersuchung: Änderung des Versagensmechanismus .....                | 85         |
| 7.7       | Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung 1 .....                    | 92         |
| <b>8</b>  | <b>Ergebnisse - Untersuchung 2.....</b>                                    | <b>95</b>  |
| 8.1       | Ergebnisse der Rechnung 2.1 und Rechnung 2.2 .....                         | 95         |
| 8.2       | Ergebnisse der Rechnung 2.3 .....                                          | 97         |
| 8.3       | Zusatzuntersuchung: Versagen in der Ulme.....                              | 99         |
| 8.4       | Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung 2.....                     | 101        |
| <b>9</b>  | <b>Zusammenfassung .....</b>                                               | <b>102</b> |
| <b>10</b> | <b>Schlussfolgerung .....</b>                                              | <b>109</b> |
|           | <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                         | <b>111</b> |
|           | Kürzel mit lateinischen Buchstaben .....                                   | 111        |
|           | Kürzel mit griechischen Buchstaben .....                                   | 111        |
|           | <b>Glossar .....</b>                                                       | <b>113</b> |
|           | <b>Quellenverzeichnis .....</b>                                            | <b>115</b> |



## Einleitung

Das Material Fels besteht aus massiven Festkörpern (Blöcken), die in ein System aus Trennflächen (Gefüge) eingebettet sind. Das Gefüge setzt sich aus Trennflächenscharen (Kluftscharen) zusammen, die wiederum aus einzelnen Trennflächen mit ähnlichen Raumstellungen bestehen.

In der Natur weichen die Raumstellungen der Trennflächen einer Kluftschar im Allgemeinen voneinander ab. Bei der Modellierung eines Gebirges werden einzelne Trennflächen einer Kluftschar jedoch meist parallel zueinander angenommen.

Eine Variation der Raumstellung der Trennflächen kann das Versagen von Blöcken (Kluftkörpern) beeinflussen. Mit diesem Phänomen beschäftigte sich die Untersuchung eines Gleitkeiles in einer Böschung durch Poisel et al. (2017). Für diese wurde eine Variation der Raumstellungen von Trennflächen einer Variation der Scherparameter, in Anlehnung an den Eurocode 7, gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass die Raumstellungen der Trennflächen einen größeren Einfluss als die Scherparameter (Reibungswinkel und Kohäsion) auf den Versagensmechanismus ausgeübt haben. (Poisel et al., 2017)

Die Auswirkungen der Variation der Raumstellungen von Trennflächen gelten auch für Hohlraumbauten wie Tunnels, Kavernen, Stollen oder Schächte. In einem Hohlraum besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass Blöcke aus der Firste fallen. Dieses Verhalten wird durch die Raumstellungen der Trennflächen verursacht, ist aber kaum beeinflusst von den Scherparametern.

Die gültige Fassung des Eurocode 7 (Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik) berücksichtigt keine Variation der Raumstellungen von Trennflächen. Mit der geplanten Revision der Eurocodes im Jahr 2020, sollen derartige Fragestellungen der Felsmechanik Beachtung finden. (Harrison, 2017)

Darüber hinaus ist der Eurocode 7 formell nicht für den Tunnelbau heranzuziehen. Aus praktischer Notwendigkeit wird bei der Bemessung im Tunnelbau jedoch auch darauf zurückgegriffen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung ergänzender Richtlinien, die eine Anwendung der Eurocodes genau festlegen. Die Grundlage hierfür stellen in Österreich die RVS 09.01.42 (Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung) und die Richtlinien der ÖGG dar. (Hofmann et al., 2010, ÖGG, 2018 und Radoncic, 2012)

Die Untersuchungen an einem Gefüge können sowohl mit analytischen als auch mit numerischen Berechnungsansätzen durchgeführt werden. Ein Beispiel für ein analytisches Berechnungsmodell stellt die Block Theorie dar (Goodman und Shi, 1985), mit

der entfernbare Kluftkörpern anhand von Gefügedaten analysiert werden können. Komplexere Fragestellungen können mit numerischen Berechnungsmodellen, wie der Diskreten Elemente Methode (DEM) beantwortet werden (Cundall, 1988 und Hart et al., 1988). Zur Anwendung kommt die DEM u.a. in der Software Lösung *3DEC* (3- Dimensional Distinct Element Code) der Itasca Consulting Group.

Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden durchgeführt an einer Kaverne, unter Anwendung der Block Theorie und der DEM. Die daraus ermittelten Ergebnisse dienen einer Feststellung des Einflusses einer Variation der Raumstellung von Trennflächen, auf das Versagen von Kluftkörpern. Im Anschluss daran sollen die Resultate, welche mit der Block Theorie und der DEM gewonnen worden sind, einander gegenübergestellt werden.

In Analogie zum oben angeführten Beispiel eines Gleitkeiles (Poisel et al., 2017), sollen auch für eine Kaverne, die Variation der Raumstellungen von Trennflächen mit der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten (gem. Eurocode 7) verglichen werden.

# 1 Gestein, Fels und Gebirge

Die Begriffe Gestein, Fels und Gebirge sind je nach Quelle unterschiedlich definiert. So subsummiert die ISRM (1975) die Begriffe Gebirge und Fels als das örtlich vorliegende Gestein, einschließlich seiner Trennflächen.

In der Definition der ÖGG (2008) wird das Gebirge als ein Teil der Erdkruste aufgefasst, der aus dem Festgestein (Fels) sowie dem Lockergestein (Boden) besteht und sowohl Anisotropien als auch Trennflächen miteinschließt. Die Eigenschaften des Festgesteines werden wiederum durch dessen physikalisch/chemische Bindung bestimmt. Im Gegensatz dazu ergeben sich die Eigenschaften des Lockergesteins durch die Korngrößen und Kornverteilungen, sowie durch Lagerungsdichte und Wassergehalt. Trennflächen (Diskontinuitäten) werden dabei ausschließlich dem Festgestein zugewiesen. Diese bezeichnen eine ebene (zweidimensionale) Unterbrechung des zusammenhängenden Festgesteines und schließen dabei auch Schichtungen und Schieferungen (potentielle Trennflächen) mit ein.

Für diese Arbeit werden in weiterer Folge die Definitionen der ÖGG herangezogen.

## 1.1 Diskontinuitäten

Festgestein (Fels) ist in seinen mechanischen Eigenschaften im Allgemeinen als anisotrop zu bezeichnen (Wittke, 1984). Die hinzukommende Durchtrennung des Gesteines durch Diskontinuitäten führt zur Bildung eines Gefüges. Dieses besteht aus massiven Festkörpern (Kluftkörpern, Blöcken), begrenzt durch Trennflächen.

Der Begriff Trennflächen bezeichnet alle Diskontinuitäten, die infolge einer Überbeanspruchung des Materials (Klüfte, Harnischflächen und Störungen), wie auch durch den Entstehungsprozess des Gesteins (Schichtungen und Schieferungen), gebildet wurden (ÖGG, 2008). Pars pro toto werden Trennflächen oftmals auch als „Klüfte“ bezeichnet, in weiterer Folge werden auch die Einzelblöcke des Gefüges „Kluftkörper“ genannt.

Die einzelnen Blöcke des Gefüges können geometrisch charakterisiert werden durch ihre Dimensionen (Größe und Masse) und Gestalt (Oberfläche der Blöcke). Das Trennflächengefüge wird in seinen Eigenschaften definiert durch die Kluftscharen, sowie die Abstände, Raumstellungen, Rauigkeit, Öffnungsweite und den Durchtrennungsgrad der Diskontinuitäten. Die Definition von letzterem ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Raum der Trennflächen kann überdies mit Zerreibungsprodukten gefüllt sein. (Kolymbas, 1998)

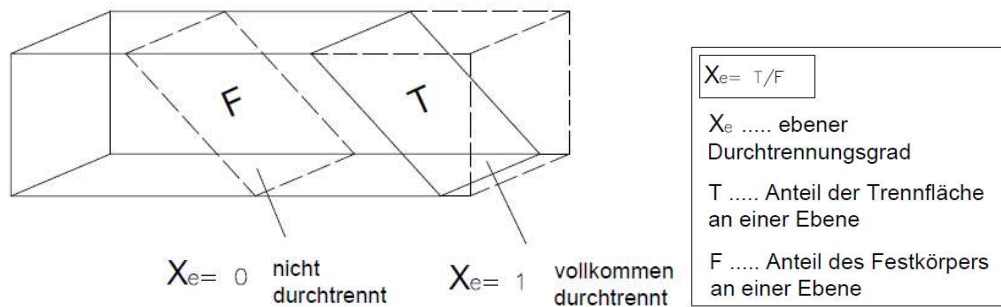


Abbildung 1: Ebener Durchtrennungsgrad einer Trennfläche (Pacher, 1959)

Einen weiteren mittelbaren Einfluss auf die Eigenschaften des Gefüges übt das Bergwasser aus. Dieses beeinflusst das Verhalten der Trennflächen und kann ein Abheben von Blöcken begünstigen. (Goodman und Shi, 1985)

## 1.2 Raumstellungen von Trennflächen

Gestalt und Versagensmechanismus der Blöcke eines Gefüges sind abhängig von der Raumstellung der Trennflächen. Diese setzen sich zusammen aus Fallrichtung ( $\alpha$ ) und dem Fallwinkel ( $\beta$ ). Der Fallrichtung (engl. dip direction) entspricht das Azimut des Fallpfeils von Norden aus gemessen, der Fallwinkel (engl. dip) wiederum ist die Neigung der Trennfläche aus der Horizontalen (siehe Abbildung 2). Die Raumstellungen werden im Feld mit dem Geologenkompass (Claar Kompass) gemessen. (Poisel, 2010)

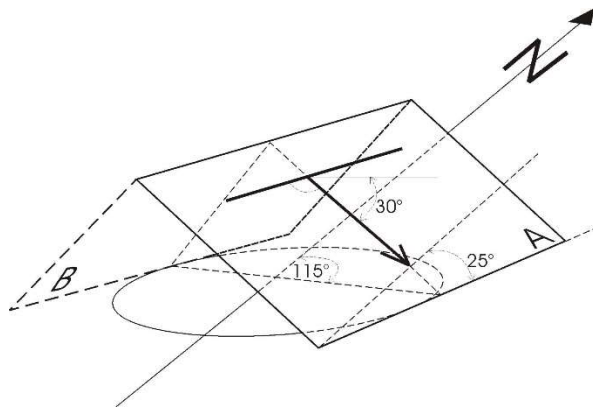
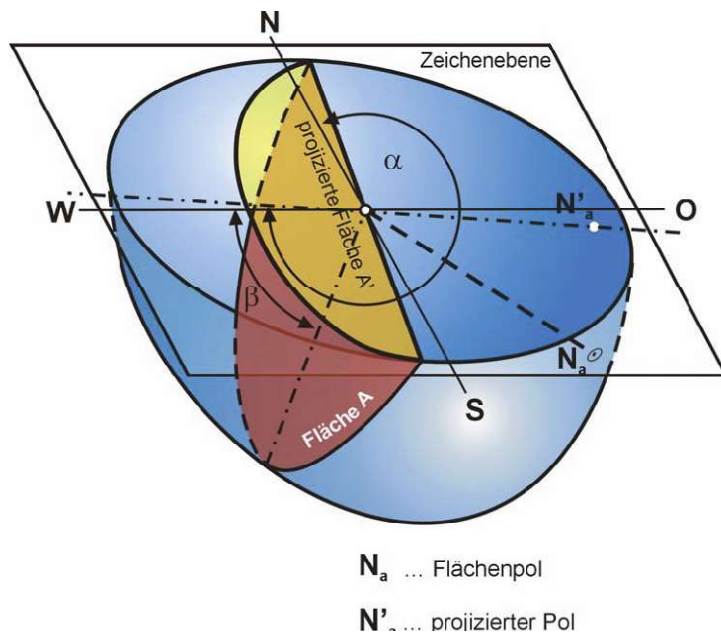


Abbildung 2: Darstellung der Trennfläche 115/30, 30° Fallwinkel, 115 Fallrichtung (Poisel, 2010)

Die grafische Darstellung der Trennflächenorientierung erfolgt im Lagekugeldiagramm. Die stereografische Projektion der Trennflächenebenen ermöglicht es, ihre 3-dimensionale räumliche Orientierung auch in der Ebene abzubilden (siehe Abbildung 3). Diese Darstellung ermöglicht auch erste Aufschlüsse über eine potentielle Entfernbarkeit von Blöcken. Die Darstellung der Trennflächen erfordert die vereinfachte Annahme, dass Trennflächen keine Krümmungen aufweisen. (Poisel, 2010)



$$\vec{n} = \frac{\cos \beta \sin \alpha}{\cos \beta \cos \alpha + \sin \beta} \quad (\text{Formel 1})$$

Trennflächensysteme setzen sich aus einzelnen Kluftscharen (K) zusammen, die wiederum aus den individuellen Trennflächen bestehen. In der Natur sind die einzelnen Trennflächen einer Kluftschar weder parallel, noch in einem exakten Intervall zueinander angeordnet. (Kolymbas, 1998)

### 1.3 Berechnungsmodelle für Fels und Gebirge

Für die computergestützte Analyse eines Gebirges stehen zwei große Gruppen von Berechnungsansätzen zur Verfügung:

- Kontinuierliches Modell (z.B. Finite Elemente Methode)
- Diskontinuierliches Modell (z.B. Block Theorie, Diskrete Elemente Methode)

Kontinuierliche Modelle haben sich bei der Berechnung bodenmechanischer Fragestellungen bewährt und finden auch Einsatz in der Felsmechanik. Ihre Anwendung setzt voraus, dass die Auswirkungen von Trennflächen eines Gebirges nicht maßgeblich sind. Auf Grundlage der Festigkeit und der Verformungseigenschaften des Gebirges wird eine verschmierte Berechnung durchgeführt. Die Einfachheit kontinuumsmechanischer Modelle in der Handhabung, der Interpretation ihrer Ergebnisse, sowie deren universeller Anwendbarkeit für Boden- und Felsmechanik haben zu ihrer großen Verbreitung beigetragen.

Die Modellbildung eines Kontinuums zeigt bei einer Anwendung in der Felsmechanik jedoch Schwachpunkte auf. Ein Block, der sich aus dem Gebirge löst, kann nicht durch ein Kontinuumsmodell erfasst werden. Hinzu kommt, dass die einfache Bedienung über sehr komplexe programminterne Rechenabläufe hinwegtäuscht. Bei aufwendigen Berechnungen, die nicht mit analytischen Methoden verifiziert werden können, kann es dadurch zu unplausiblen Ergebnissen kommen. (Barton, 2006)

Beispiele für numerische Anwendungen, unter Einsatz kontinuierlicher Gebirgsmodelle, sind FLAC, Sofistik, ZSoil und Plaxis.

Diskontinuierliche Modelle ermöglichen es, das Trennflächengefüge mit seinen geometrischen und mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Dabei wird die Darstellung von Einzelblöcken, ihrer Versagensmechanismen und Versagensbilder, sowie deren Entfernung aus dem Gefüge ermöglicht.

Die Diskrete Elemente Methode stellt ein numerisches Modell dar, das eine Interaktion von Blöcken untereinander, ihre Loslösung aus dem Verband und deren Rotation ermöglicht. Eine Berechnung der Block zu Block Kontakte und der Kinematik von Einzelblöcken, zieht jedoch einen sehr großen Rechenaufwand nach sich. Durch den Einsatz immer leistungsfähigerer Computer mindern sich allerdings die Auswirkungen dieses Problems. (Cundall, 1988 und Hart et. al. 1988)

Eine Auswertung der Ergebnisse der DEM ist wesentlich komplexer als bei einem Kontinuumsmodell. Die Interpretation von Versagensmechanismen bedarf u.U. ergänzender analytischer Berechnungen.

Der Einsatz analytischer Methoden zur Berechnung eines Diskontinuums ist aufgrund der Komplexität von Material und Gefüge sehr begrenzt. Unter Vernachlässigung des Materialverhaltens der Festkörper (Annahme starrer Blöcke) können jedoch sehr wohl Berechnungen für ein Gefüge durchgeführt werden. Zu den bekanntesten Methoden hierfür zählt die Block Theorie (Goodman und Shi, 1985). Diese ermöglicht Aussagen über die Entfernbarkeit von Blöcken aus einem Gefüge, anhand stereographischer Projektion (Lagekugeldiagramm) oder einer vektoriellen Darstellung der Trennflächen.

Es gilt, dass ein Gebirge in der Natur im Allgemeinen als Diskontinuum aufzufassen ist. Die Modellbildung von Festgestein kann jedoch a priori nicht zwangsläufig als Kontinuum oder Diskontinuum erfolgen. Ein digitales Modell hat sich nach den mechanischen Eigenschaften des Gebirges in der Natur zu richten (Poisel et al., 2004).

## **1.4 Versagensmechanismen und Versagensbilder**

Von einem Versagen ist im Hohlraumbau dann zu sprechen, wenn das Gebirge sich zu stark in den Hohlraum hinein verformt oder sich Gestein aus dem Verband löst.

Das Verhalten des Gebirges ist abhängig von den mechanischen Eigenschaften des Gesteines und der Ausprägung des Trennflächengefüges. Ein Versagen kann beispielsweise durch übermäßige Verformungen eintreten, die infolge von Plastifikation, (ÖGG, 2008) durch Spröbruchversagen (Bergschlag oder Scherversagen (Poisel et al. 1995) oder durch den Ausbruch von Kluftkörpern entstehen (Goodman und Shi, 1985).

Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit dem Verhalten des kinematischen Ausbruchs von Kluftkörpern aus dem Verband. Dieses Verhalten entspricht dem Gebirgsverhaltenstyp

2 (GVT 2) „Gefügebedingter Ausbruch“, der ÖGG Richtlinien zum zyklischen und maschinellen Vortrieb.

Eine kinematische Ablösung von Kluftkörpern aus dem Verband entsteht abhängig vom Trennflächengefüge des Gebirges und kann nicht mithilfe kontinuumsmechanischer Modelle untersucht werden (Barton, 2006). Die Versagensmechanismen dieses Verhaltens können grob in das Gleiten und das Fallen von Blöcken eingeteilt werden (Goodman und Shi, 1985).

Das Gleiten eines Kluftkörpers definiert die Ablösung eines Blockes, der sich entlang einer oder mehrerer Trennflächen aus dem Gefüge heraus bewegt. Dies wird durch eine Überschreitung der Scherfestigkeit in den Trennflächen verursacht und ist folglich abhängig vom Gefüge sowie den Scherparametern.

Als Fallen eines Kluftkörpers ist die Loslösung eines Blockes zu verstehen, dessen Translation nicht entlang einer oder mehrerer Trennflächen erfolgt, sondern nur parallel zum Vektor der Schwerkraft (Goodman und Shi, 1985). Dieses Verhalten ist unabhängig von Scherparametern und wird ausschließlich durch die Raumstellungen der Trennflächen verursacht (ÖGG, 2008). Der Versagensmechanismus des Fallens ist als besonders kritisch anzusehen, da er auch bei sorgfältiger Planung plötzlich auftreten kann. (Cravero et al., 1996)

Eine Änderung des Versagensmechanismus bedeutet, dass dieser sich in der Natur anders gestaltet, als in der Planung erwartet worden ist bzw. sich anhand anderer Randbedingungen ändert. Ein Beispiel hierfür ist eine Änderung des Blockversagens von Gleiten auf Fallen. Dieser Änderung des Versagensmechanismus ist besondere Beachtung zu schenken, da das Fallen die Reibung in den Trennflächen vollkommen ignoriert. Dadurch entfällt der Sicherheitsfaktor des Blockes, welcher schließlich automatisch versagt. Eine Änderung von Fallen zu Gleiten erhöht wiederum die Sicherheit eines Blockes und ist daher als günstiger für dessen Standsicherheit zu erachten. Selbiges gilt für einen Übergang des Gleitens auf einer Fläche zu einem Gleiten auf mehreren Flächen. Im Allgemeinen wird durch die Erhöhung der Anzahl an Gleitflächen auch die Sicherheit eines Blockes erhöht. Im Rahmen dieser Arbeit wird als qualitative Änderung des Versagensmechanismus nur der Übergang Gleiten zu Fallen et vice versa bezeichnet. Die Änderung des Versagensmechanismus eines Kluftkörpers über die Grenzen des GVT 2 hinweg, kann in der Natur auftreten, ist aber nicht Gegenstand dieser Arbeit. Des Weiteren kann das Versagen eines zuvor stabilen Blockes, durch die Änderung der Randbedingungen, ebenfalls als eine Veränderung des Versagensmechanismus angesehen werden. Der Versagensmechanismus selbst ist eine rein qualitative Größe, die mit der quantitativen Größe der Sicherheit (FoS oder Ausnutzungsgrad ( $\mu$ )) verknüpft ist.



Unter dem Versagensbild sind die Lokalisation und das Ausmaß (Anzahl und Masse) von versagenden Blöcken in einem Hohlraumbauwerk zu verstehen. Die Lokalisation bezieht sich dabei auf die Ausbruchsfläche entlang oder quer zur Vortriebsrichtung. Die Ausbruchsfläche ist eingeteilt in Firste, Ulme, Sohle und Ortsbrust bzw. Endwand, im Fall einer Kaverne.

Von einer qualitativen Änderung des Versagensbildes ist dann zu sprechen, wenn sich die Lokalisation des Versagens in anderen oder zusätzlichen Teilen der Ausbruchsfläche feststellen lässt. Ein Beispiel hierfür wäre, dass ein Versagen, das bisher nur in der Ulme aufgetreten ist, nun auch zusätzlich in der Firste oder der Ortsbrust stattfindet.

Eine quantitative Änderung des Versagensbildes bedeutet eine Erhöhung oder Verringerung der Anzahl und/oder Masse versagender Kluftkörper.

## 2 Stand der Technik

Der Stand der Technik für Tunnelbau und Felsmechanik in Österreich, setzt sich zusammen aus den gültigen Normen, ergänzenden Richtlinien sowie der gelebten Praxis in Planung und Ausführung. Letzteres kann auch Gegenstand von Verträgen und Ausschreibungen darstellen.

Das wichtigste normative Regelwerk, das in Österreich zum Einsatz kommt, ist der Eurocode, der die Bemessung sämtlicher Tragwerke regeln soll. Da dieser jedoch keine expliziten Bemessungsregeln für den Tunnelbau enthält (Radoncic, 2012 und Hofmann et al., 2010), spezifizieren Richtlinien wie die RVS 09.01.42 das anzuwendende Nachweisformat. Die Richtlinien der ÖGG zum zyklischen und maschinellen Vortrieb dienen außerdem zur gesamten Abwicklung von Tunnelprojekten, von der Entwurfs- bis zur Ausführungsphase. Es werden in diesen auch Vorgaben für die Planung getroffen.

Tunnelbauten sind durch ihre Größe und ihre gesamte Organisation, Gegenstand vertraglicher Vereinbarungen hinsichtlich Planung und Ausführung. Entscheidungsträger der Bauherrschaft müssen ebenso wie die Planer Experten sein. Regelungen, die in der Norm nicht enthalten sind, können daher auch durch sorgfältige vertragliche Festlegungen getroffen werden.

### 2.1 Eurocode

Die Eurocodes stellen die allgemein gültigen Bemessungsregeln für Bauwerke in Europa dar. Der Übergang der bis dahin gültigen nationalen Normungen hat auch zu einem Wandel der Bemessungsphilosophie geführt. Grundlage der Eurocodes ist das semi-probabilistische Sicherheitskonzept, in Form von Teilsicherheitsbeiwerten. Dieses berücksichtigt Einwirkungen und Widerstände „lokal“, anstatt die Standsicherheit eines Tragwerkes anhand eines globalen Sicherheitsfaktors zu definieren.

#### 2.1.1 EC0

Grundlagen der Tragwerksplanung werden im Eurocode 0 geregelt. In diesem ist auch das allgemeine Nachweisformat und die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte definiert. Die Teilsicherheitsbeiwerte sind ein Kernstück der Eurocodes. Sie sind Ergebnisse probabilistischer Auswertungen, die wiederum auf akzeptablen Risikoniveaus beruhen. Um derartige Analysen nicht für jedes einzelne Bauteil durchführen zu müssen, werden einzelne Lasten und Bauteile mit einem Teilsicherheitsbeiwert faktorisiert.

Bemessungswerte für Einwirkungen/Beanspruchungen und Widerstände sind ein Ergebnis ihrer charakteristischen Werte, multipliziert mit dem entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert.

Die Faktorisierung ist für Einwirkungen und Beanspruchungen, wie in Formel 2 definiert, durchzuführen.

$$E_k \times \gamma_E = E_d \quad (\text{Formel 2})$$

$E_k$  ... charakteristische Einwirkung oder Beanspruchung

$\gamma_E$  ... Teilsicherheitsbeiwert von Einwirkungen und Beanspruchungen

$E_d$  ... Bemessungseinwirkung oder Beanspruchung

Analog dazu ist die Faktorisierung für Widerstände in Formel 3 dargestellt.

$$\frac{R_k}{\gamma_M} = R_d \quad (\text{Formel 3})$$

$R_k$  ... charakteristischer Widerstand

$\gamma_M$  ... Teilsicherheitsbeiwert der Widerstände

$R_d$  ... Bemessungswiderstand

Nachweise mit dem Teilsicherheitskonzept der Eurocodes sind entsprechend Formel 4 definiert.

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Formel 4})$$

Das Nachweiskriterium der Eurocodes stellt eine Grenzgleichgewichtsbetrachtung, für einen in geometrischer Hinsicht deterministischen Fall, dar. Dieses Grenzgleichgewicht ist entsprechend der Formel 5 definiert.

$$E_d = R_d \quad (\text{Formel 5})$$

Der Quotient aus Einwirkung und Widerständen ist der Ausnutzungsgrad  $\mu$  (Formel 6).

$$\mu = \frac{Ed}{Rd} \quad (\text{Formel 6})$$

Für den konstruktiven Ingenieurbau wurden die Teilsicherheitsbeiwerte des semi- probabilistischen Sicherheitskonzeptes auf einer zuverlässigen Grundlage für Einwirkungen und Materialparameter bestimmt. Ihre Anwendung wird anhand einer eindimensionalen Faktorisierung für Einwirkungen/Beanspruchungen (Formel 2) und für Widerstände (Formel 3) vorgenommen. Dieser Faktor schließt jedoch die ganze Bandbreite räumlicher Effekte aus, die u.a. in der Felsmechanik auftreten. (Harrison, 2017)

Der Eurocode 0 stellt es frei, für einen Nachweis, der noch nicht in den Eurocodes festgelegt worden ist, eine passende Alternative zu finden. Eine Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit, die auch auf geometrischen Daten basieren kann, ist dem informativen Anhang des Eurocode 0 zu entnehmen. Ein solches Nachweisformat überschreitet jedoch bereits die Grenze zu einer probabilistischen Nachweisführung. Grundlage für diese Berechnung wäre außerdem ein entsprechend großer Datensatz an Eingangswerten, wie z.B. der Raumstellung von Klüften.

### 2.1.2 EC7

Der Eurocode 7 in seiner aktuellen Fassung ist die gültige Norm für Standsicherheitsberechnungen in der Geotechnik im europäischen Raum. Sein hauptsächlicher Zweck ist die Nachweisführung für Fundamente, Stützmauern und Böschungen.

In der Geotechnik ist eine klare Abgrenzung von Einwirkungen und Widerständen zuweilen nicht möglich. Aus diesem Grunde bedient sich die Nachweisführung des EC 7 mehrerer Grenzzustandsbetrachtungen, welche sich aus Formel 4 ableiten.

Für Bemessungsbeanspruchungen sind folgende Ansätze möglich:

$$Ed = E \left\{ \gamma F \times F_{rep}; \frac{Xk}{\gamma M}; ad \right\} \quad (\text{Formel 7})$$

sowie

$$Ed = \gamma E \times E \left\{ F_{rep}; \frac{Xk}{\gamma M}; ad \right\} \quad (\text{Formel 8})$$

In Formel 7 wird ein Teilsicherheitsbeiwert ( $\gamma_F$ ) auf die repräsentative Einwirkung ( $F_{rep}$ ) angewandt, aus der sich die Bemessungsbeanspruchung ergibt. Hingegen wird in Formel 8 der Teilsicherheitsbeiwert direkt auf die charakteristische Beanspruchung ( $E_k$ ) angewandt, welche in Abhängigkeit zur Einwirkung steht.

Im Falle der Bemessungswiderstände werden Teilsicherheitsbeiwerte entweder auf die Baugrundeigenschaften ( $X_k$ ) (Formel 9), auf die Widerstände ( $R$ ) (Formel 10) oder auf beide Größen (Formel 11) angewandt.

$$R_d = R \left\{ \gamma_F \times F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; \alpha_d \right\} \quad (\text{Formel 9})$$

$$R_d = \frac{R \{ \gamma_F \times F_{rep}; X_k; \alpha_d \}}{\gamma_R} \quad (\text{Formel 10})$$

$$R_d = \frac{R \left\{ \gamma_F \times F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_M}; \alpha_d \right\}}{\gamma_R} \quad (\text{Formel 11})$$

Die Beanspruchungen und Widerstände in der Geotechnik sind nicht unabhängig voneinander zu betrachten. Die Grenzzustandsgleichung stimmt daher nicht mit der Anforderung des EC 0 überein, dass Einwirkungen (Beanspruchungen) und Widerstände voneinander unabhängig sein müssen.

#### 2.1.2.1 Bemessungsansätze

Der Kombination der Formeln 7 – 11 wird zusammengefasst zu Nachweisverfahren, denen die Nachweise gemäß EC 7 entsprechen zu haben.

Im Nachweisverfahren 1 (NV 1-1 und NV 1-2) wird die ungünstigere Variante, aus einer Beaufschlagung der Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungen oder aber auf veränderliche Einwirkungen und Baugrundkennwerte, als maßgeblich erachtet.

Das Nachweisverfahren 2 erfordert die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungen und auf den Baugrund oder aber auf Beanspruchungen und auf den Baugrund. Der Begriff Beanspruchungen bezeichnet den Effekt der Einwirkungen. Der Unterschied zwischen Einwirkungen und Widerständen ist in der Geotechnik oftmals schwierig feststellbar. Daher wird eine Berücksichtigung der Beanspruchungen jener der Einwirkungen vorgezogen. Zur einfacheren Unterscheidung wird dieses Nachweisverfahren als NV2\* bezeichnet (ÖGG, 2018).

Für das Nachweisverfahren 3 werden Teilsicherheitsbeiwerte auf veränderliche Einwirkungen sowie auf die Scherparameter des Baugrundes angewandt. Eine Berücksichtigung von Widerständen durch bauliche Maßnahmen erfolgt nicht. Dieses Verfahren ist in Österreich für den Nachweis ungesicherter Böschungen anzuwenden.

### 2.1.3 Eurocode und Tunnelbau

Der EC 7 geht in seinem Nachweisformat sehr genau auf das zu bemessende Bauwerk und die Bemessungssituation ein. Formell ergibt sich daraus, dass der EC7 nicht im Tunnelbau anzuwenden ist. (Radoncic, 2012 und Hofmann et al., 2010)

Aus praktischer Notwendigkeit, wie der Bemessung von Tragwerksteilen, die in anderen Eurocodes geregelt sind, wird der EC 7 dennoch für die Bemessung von Tunneln herangezogen. (ÖGG, 2018)

Praktische Annahmen für Bemessungen orientieren sich an der Ähnlichkeit der Tragwerksteile eines Tunnels zu anderen Tragwerken. Beispielsweise wird eine Tunnelschale einer Stützmauer gleichgesetzt (FSV, 2013 und ÖGG, 2018). Die Randbedingungen einer Ortsbrust sind wiederum vergleichbar mit einer Böschung. Entsprechend findet für diese ein Nachweis des Geländebruches statt (Adam, 2011).

Die RVS 09.01.42 ermöglicht eine Anwendung aller drei Nachweisverfahren. Diese Regelung gilt jedoch nur für seicht liegende Tunnel im Lockergestein. Bereits zur vorangegangenen Richtlinie für seicht liegende Tunnel im Lockergestein, der RVS 09.32, wurde vorgeschlagen, das NV2 dem NV1 gegenüber zu bevorzugen, da Beanspruchungen und nicht Einwirkungen berücksichtigt werden. (Hofmann et al., 2010)

Auch in der ÖGG Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau wird das NV1 nicht mehr berücksichtigt. Darüberhinaus geht in dieser Richtlinie das nichtlineare Verhalten der Widerstände aus der Konstruktion in das Nachweisverfahren ein.

Für die Nachweisführung von ungesicherten Böschungen bzw. des Geländebruchs, ist in Österreich das Nachweisverfahren 3 des EC 7 zwingend anzuwenden. Dieses setzt Teilsicherheitsbeiwerte auf Seite von Einwirkungen und Baugrundkennwerten an. Da die Ortsbrust eines Tunnels als eine ungesicherte Böschung angesehen wird, ist diese mit dem NV3 nachzuweisen. Analog dazu sollte, in Anbetracht der Randbedingungen, auch ein unverbauter Tunnel mit NV 3 nachgewiesen werden. Zur Vereinfachung können Tunnel mit sehr dünnen Spritzbetonschalen als nicht ausgebaut angenommen werden.

## 2.2 Richtlinien der ÖGG

Boden und Fels sind im Allgemeinen nicht mit denselben Methoden nachzuweisen. Die Beschaffenheit des Materials Fels führt zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Versagensmechanismen, die im EC7 keine Berücksichtigung finden. Darüber hinaus ist eine Abwechslung aus Lockergestein bzw. Boden und Fels, die sich im Übergang zwischen Locker- und Festgestein befindet zu berücksichtigen (z.B. konglomeratisch verkitteter Kies, überkonsolidierter Schluff (Schlier)).

Diese Faktoren sind durch die ÖGG Richtlinien zum zyklischen und maschinellen Vortrieb abgedeckt. Durch diese wird das Gebirge in sogenannte Gebirgsverhaltenstypen (GVT) eingeteilt. Gebirgsverhaltenstypen beschreiben das Verhalten des (annähernd) kreisförmig ausgebrochenen Hohlraumes ohne Ausbau. Das Gebirgsverhalten in einem Abschnitt kann beschrieben werden durch einen einzelnen oder durch eine Kombination aus mehreren GVT. Dieses Gebirgsverhalten nimmt vor allem Rücksicht auf einen möglichen Versagensmechanismus im ausgebrochenen Hohlraum. Dadurch können bereits erste Rückschlüsse getroffen werden, ob Berechnungen mittels eines Kontinuumsmodells oder anhand eines Diskontinuums durchzuführen sind. Die elf möglichen Gebirgsverhaltenstypen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Gebirgsverhaltenstypen (GVT) – der ÖGG Richtlinien für zyklischen (2008) und maschinellen Vortrieb (2013)

| <b>Gebirgsverhaltenstyp</b> |                                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1                           | Standfestes Gebirge                                          |
| 2                           | Gefügebedingte Ausbrüche                                     |
| 3                           | Hohlraumnahe Überbeanspruchung                               |
| 4                           | Tiefreichende Überbeanspruchung                              |
| 5                           | Bergschlag                                                   |
| 6                           | Schichtknicken                                               |
| 7                           | Firstniederbruch durch Scherversagen                         |
| 8                           | Rolliges Gebirge                                             |
| 9                           | Fließendes Gebirge                                           |
| 10                          | Quellendes Gebirge                                           |
| 11                          | Gebirge mit kleinräumig wechselnden Verformungseigenschaften |

Der maßgebliche Gebirgsverhaltenstyp für die Berücksichtigung von Klüften und herausfallenden/gleitenden Blöcken ist **GVT 2** (Gefügebedingte Ausbrüche). Die genaue Definition des Gebirgsverhaltens lautet wie folgt (ÖGG, 2008):

*„Großvolumige gefüge- und schwerkraftbedingte Ausbrüche, vereinzelt lokales überschreiten der Scherfestigkeit an Trennflächen.“*

Für diesen Gebirgsverhaltenstyp empfiehlt die ÖGG- Richtlinie die Untersuchung mit diskreten Methoden (z.B. DEM) bzw. der Block Theorie. Das Verhalten des GVT 2 ist in Abbildung 5 dargestellt.

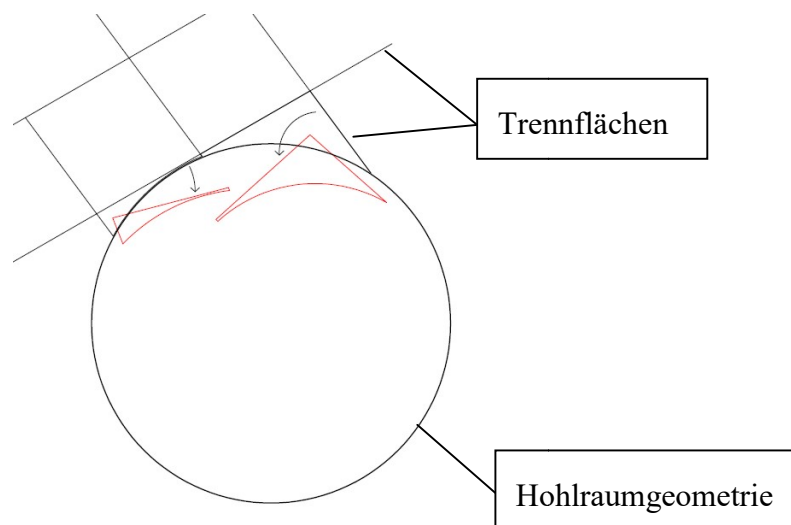


Abbildung 5: Gebirgsverhaltenstyp 2 – Gefügebedingte Ausbrüche (ÖGG, 2008)

Nicht zu verwechseln ist der GVT 2, dessen Versagen durch die Raumstellungen der Klüfte zustande kommt, mit dem GVT 7 (Firstniederbruch durch Scherversagen), der in Abbildung 6 dargestellt ist. Das Scherversagen in der Firste ist dabei abhängig von den Scherparametern des Gebirges und damit auch von den Festigkeiten.

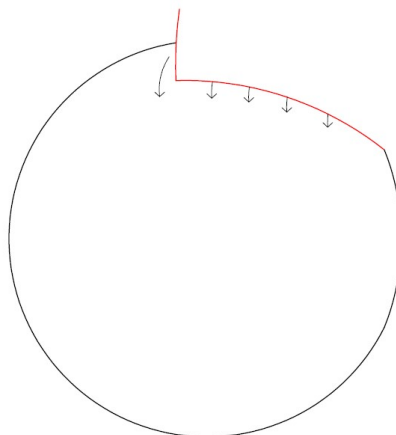


Abbildung 6: Gebirgsverhaltenstyp 7 – Firstniederbruch durch Scherversagen (ÖGG, 2008)



Ein Beispiel für vollkommen festigkeitsabhängiges Versagen, welches mittels einer kontinuumsmechanischen Berechnung nachgewiesen werden kann, ist der GVT 3 (Hohlraumnahe Überbeanspruchung). Der Versagensmechanismus entsteht u.a. durch die Plastifikation von Fels in den Ulmen. Vornehmlich tritt dies durch die Spannungsumlagerung nach dem Ausbruch auf.

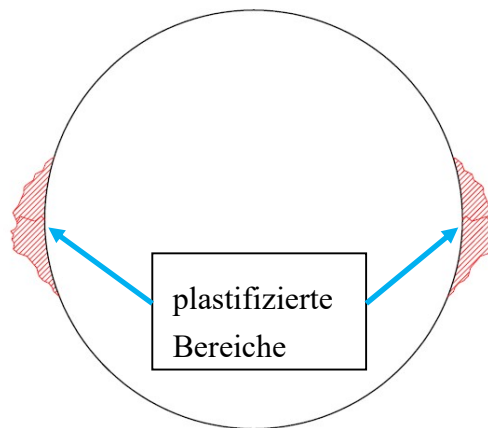


Abbildung 7: Gebirgsverhaltenstyp 3 – Hohlraumnahe Überbeanspruchung (ÖGG, 2008)

In stark geklüftetem Gebirge, dessen Verhalten durch den GVT 2 beschrieben wird, führen diese Spannungsumlagerungen eher zu einer Stabilisierung von Kluftkörpern. Dadurch wird veranschaulicht, dass erst eine genaue Beschreibung des Gebirgsverhaltens zu einer richtigen Wahl der Berechnungsmethode führt.

### 2.2.1 Berücksichtigung von Trennflächen

Aus der Beschreibung des GVT 2 wird ersichtlich, dass der Mechanismus des Blockversagens von der Raumstellung der Trennflächen des Gebirges abhängt. Die Berechnung ist durchzuführen mit einer geeigneten Methode zur Berücksichtigung eines Diskontinuums.

Für das Gleiten einzelner Blöcke kann ein Nachweis anhand des EC7 erfolgen. Eine entsprechende Sicherheit wird durch die Abminderung von Scherparametern, analog zum Nachweis einer Böschung, gewährleistet.

Das größte Risiko eines Versagens geht jedoch von Blöcken aus, die aus der Firste herausfallen. Dieses Versagen kann als unabhängig von den Scherparametern in den Trennflächen betrachtet werden. Dieser Versagensmechanismus ist einzig abhängig von den Raumstellungen der Trennflächen.

Die Berücksichtigung von Trennflächen wird in aktuellen Normen und Richtlinien nur anhand der Scherparameter vorgenommen. Der EC7 geht im Bezug auf die Raumstellung einer Trennfläche nur von einer deterministischen Annahme aus, die wiederum nur explizit für Felsböschungen beschrieben ist.

### 3 Block Theorie

Die Block Theorie von R.E. Goodman und G. Shi (1985) liefert eine einfache Möglichkeit, um anhand der Raumstellungen von Trennflächen eines Gefüges, die Entfernbarkeit einzelner Blöcke feststellen zu können.

Die Grundannahme der Block Theorie ist, dass einzelne Blöcke, sogenannte Key Blöcke (KB), wie der Schlussstein eines Gewölbes wirken. Ein entfernen eines Key Blocks würde zu einem Zusammenbrechen der gesamten Struktur führen. Diese Kettenreaktion wurde beim Bau des Kemano Tunnels in Kanada beobachtet. (Cook et al., 1983)

Das Fixieren eines Key Blockes führt, laut Block Theorie, zu einer Stabilisierung des gesamten Gefüges. Ein Zutreffen dieser Annahme unterstellt, dass keine weiteren Untersuchungen des Trennflächensystems durchzuführen sind, um eine Standfestigkeit der Blockansammlung zu gewährleisten.

Die Block Theorie ist darauf bedacht, derartige Key Blocks zu finden und ihre Sicherheit nachzuweisen. Die Form der Berechnung erfolgt analytisch und kann für einfache Fälle von Hand durchgeführt werden. Diese Simplizität in der Berechnung erfordert jedoch eine Vereinfachung der mechanischen Randbedingungen.

#### 3.1 Annahmen der Block Theorie

Eine Anwendung der Block Theorie erfordert die Berücksichtigung folgender vier Grundprinzipien (Goodman und Shi, 1985):

##### 1. Ebenheit der Trennflächen

Wie in 1.2 Raumstellungen von Trennflächen definiert, werden die Trennflächen für die Anwendung der Block Theorie als eben angenommen.

Eine Erweiterung der Theorie zur Berücksichtigung gekrümmter Trennflächen wird jedoch als zulässig erachtet.

##### 2. Durchtrennungsgrad

Der ebene Durchtrennungsgrad einer Kluft ( $\chi_e$ ) wird entsprechend der Abbildung 2 zu 100% angenommen ( $\chi_e = 1,0$ ). Im Bereich der Trennflächen existieren keine Überbrückungen.

### 3. Starre Blöcke

Die Blöcke im untersuchten Gefüge werden als nicht deformierbar angenommen. Die Auswirkungen von Stauchungen, Dehnungen und Verzerrungen gehen nicht in die Berechnung ein.

### 4. Verteilung der Trennflächen

Die Raumstellung der Trennflächen wird streng deterministisch angenommen. Eine Berücksichtigung der probabilistischen Verteilung findet nicht statt.

Die Ingenieurin oder der Ingenieur haben für die Berechnung eine maßgebliche Raumstellung zu wählen. Eine Erweiterung der Theorie, hinsichtlich einer probabilistischen Verteilung der Raumstellungen, die z.B. unter Einsatz der Monte Carlo Methode erfolgt, wird als zulässig erachtet. (Goodman und Shi, 1985)

Ergänzend zu diesen Annahmen, existieren noch fünf Annahmen, welche für eine Berechnung relevant sind. Diese werden in der Formulierung der klassischen Block Theorie entweder nur am Rande erwähnt oder ergeben sich implizit aus deren Anwendung. (Goodman und Shi, 1985)

- **Initiales Versagen**

Die Block Theorie untersucht nur das Grenzgleichgewicht eines Blockes, jedoch kein weiteres Verhalten, das nach dem initialen Versagen stattfindet.

- **Versagensmechanismus**

Das Versagen eines Blockes in der BT ist bestimmt durch die kinematische Entfernbarekeit eines Blockes, sowie zusätzlich bei einem Blockgleiten, durch die Überschreitung des Grenzgleichgewichtes in den Trennflächen. Folglich wird nur ein Versagen eines KB durch die Mechanismen „Gleiten“ oder „Fallen“ untersucht. Weitere Mechanismen, wie der Bruch des Einzelblockes oder die Überschreitung einer Grenzverformung, können durch die BT nicht erfasst werden. Durch die Erweiterung der Untersuchung des Grenzgleichgewichtes, kann die Block Theorie zu den Grenzgleichgewichtverfahren gezählt werden (Cundall und Hart, 1992).

- **Mehrfaches Auftreten von Trennflächen**

Die Anwendung des Lagekugeldiagrammes suggeriert, dass die Kombination mehrerer Trennflächen stets nur eine Trennfläche aus einer Trennflächenschar enthält. Ein mehrfaches Auftreten von TF aus einer Trennflächenschar, an einem Block wird dabei vernachlässigt.

- **Reine Translation**

Die BT vereinfacht die Blockkinematik zu reinen Translationsbewegungen. Eine Berücksichtigung von Rotationsbewegungen der Körper findet nicht statt.

Die Berücksichtigung all dieser Annahmen definiert die klassische Block Theorie. Erweiterungen dieser Theorie, wie z.B. eine Berücksichtigung der Rotation oder des Zerbrechens von Blöcken ist möglich, werden aber nicht im Rahmen dieser Arbeit diskutiert.

### 3.2 Identifikation von Key Blocks

Der Kern der BT besteht aus der Identifikation und dem Nachweis der Key Blocks in einem Trennflächengefüge. Um einen Key Block zu identifizieren, muss dieser folgende drei Kriterien erfüllen:

- Kriterium der Endlichkeit
- Kriterium der Entfernbareit
- Kriterium des (überschrittenen) Grenzgilechgewichts

Die schematische Identifikation eines Key Blockes ist in Abbildung 8 dargestellt.

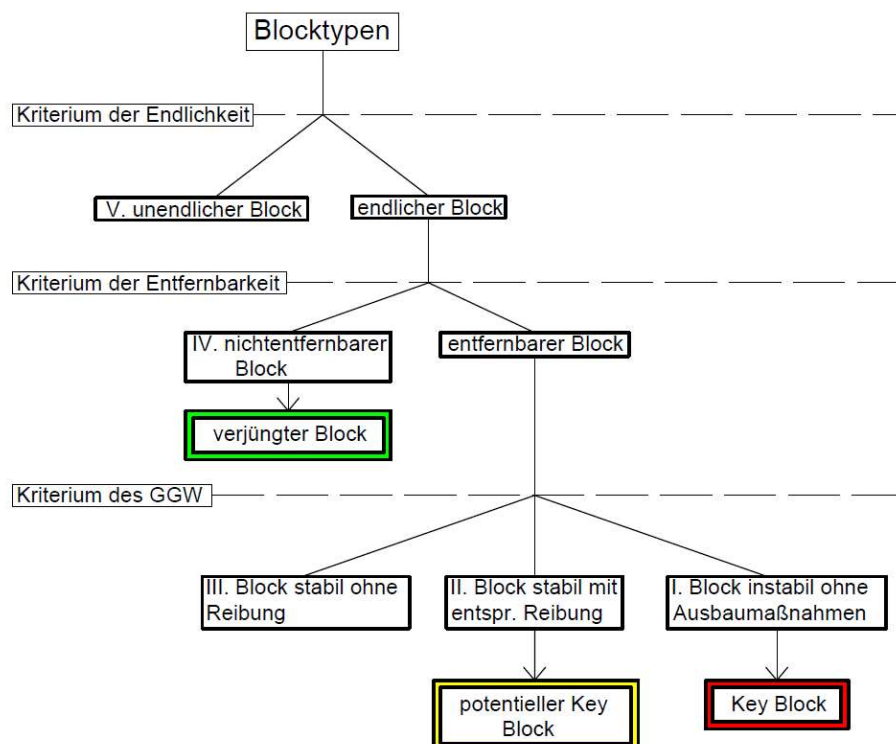


Abbildung 8: Schema Key Block Identifikation (nach Goodman und Shi, 1985)

Den Kriterien der Endlichkeit, der Entfernbareit und des Grenzgleichgewichtes liegen drei Theoreme zugrunde, die im Folgenden diskutiert werden.

### 3.2.1 Theorem der Endlichkeit

Das Theorem der Endlichkeit ist wie folgt definiert (Goodman und Shi, 1985):

*„Ein konvexer Block ist endlich, wenn seine Block Pyramide endlich ist.  
Im Umkehrschluss ist ein konvexer Block unendlich, wenn seine Block Pyramide unendlich ist.“*

Eine Block Pyramide wird gebildet, durch die Verschneidung aller Trennflächen bzw. der Halbräume, die von den Trennflächen definiert wird. Die Spitze einer Block Pyramide wird gebildet, durch den gedachten Schnittpunkt aller Trennflächen in einem zuvor definierten Ursprung. Ein Beispiel für einen unendlichen Block ist dargestellt in Abbildung 9.

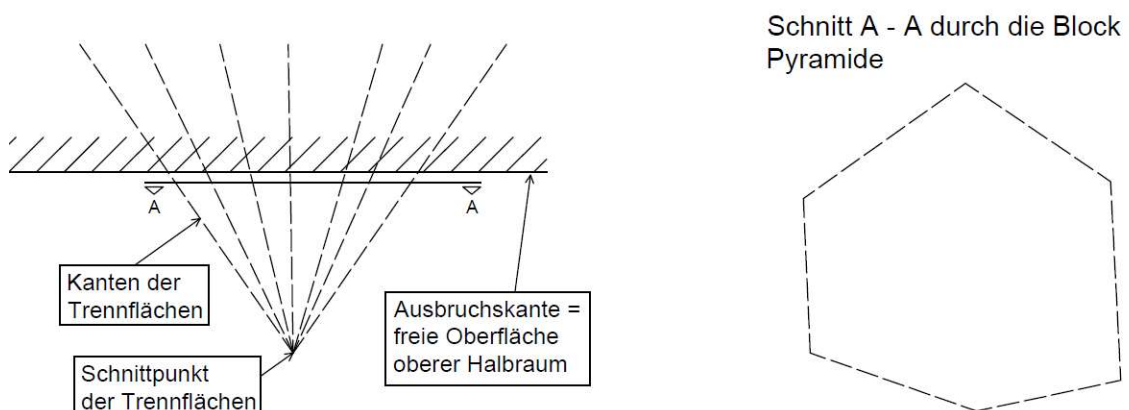


Abbildung 9: Unendliche Block Pyramide (nach Goodman und Shi, 1985)

Eine Block Pyramide, deren Spitze in einem endlichen Abstand von der freien Oberfläche (Ausbruchskante) entfernt und zudem innerhalb des nicht ausgebrochenen Gefüges liegt, ist somit immer endlich.

Ein konvexer Block ist dadurch definiert, dass zwei Punkte innerhalb des Blockes, durch eine gerade Linie, miteinander verbunden werden können, ohne dass diese das Innere des Blockes verlässt (siehe Abbildung 10).

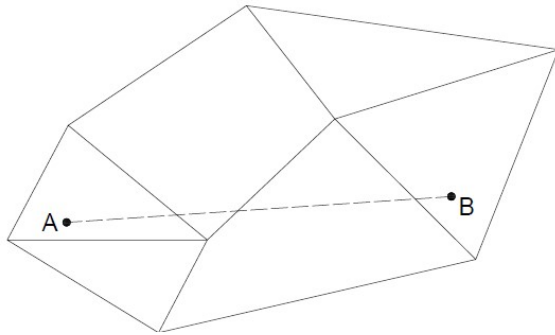


Abbildung 10: Konvexer Block (nach Goodman und Shi, 1985)

### 3.2.2 Theorem der Entfernbareit

Das Theorem der Entfernbareit definiert sich wie folgt (Goodman und Shi, 1985):

*„Ein konvexer Block ist entfernbar, wenn seine Block Pyramide leer ist und seine Kluftpyramide nicht leer ist. Ein konvexer Block ist nicht entfernbar (verjüngter Block), wenn seine Block Pyramide leer ist und seine Kluftpyramide auch leer ist.“*

Die Block Pyramide wird definiert durch einen gemeinsamen Schnittpunkt aller Trennflächen, die diesen bilden. Treffen sich diese Trennflächen nicht in einem Punkt, so ist die Block Pyramide leer.

Der Fall eines konvexen Blockes, für den sowohl die Block Pyramide leer ist, als auch die Kluftpyramide (verjüngter Block), ist dargestellt in Abbildung 11.

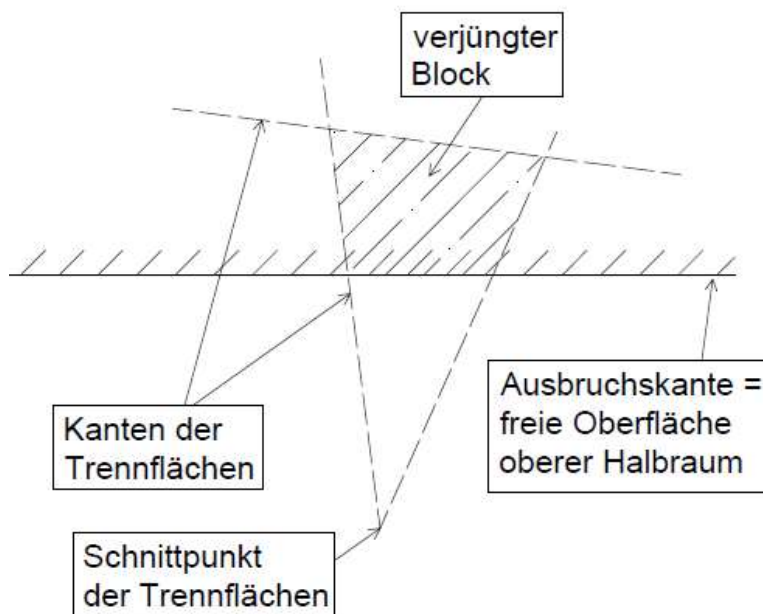


Abbildung 11: verjüngter Block (nach Goodman und Shi, 1985)

### 3.2.3 Grenzgleichgewicht

Von Goodman und Shi (1985) wurde das Kriterium eines Grenzgleichgewichtes nicht explizit formuliert. Ihr Schema der Key Block Identifikation impliziert dieses jedoch.

Wesentliche Fragestellung dahinter ist, wie weit das Versagen eines Blockes abhängig ist von den rückhaltenden Wirkungen, von denen vor allem die Reibung in den Trennflächen hervorzuheben ist. Aus dieser Fragestellung ergeben sich drei mögliche Blocktypen, die bereits in Abbildung 8 aufgelistet worden sind und in Abbildung 12 dargestellt werden:

- I. Key Block (instabil ohne Sicherungsmaßnahmen): Block in der Ulme unter sehr steil einfallender Trennfläche (Neigung größer als realistischer Reibungswinkel) oder Block der aus der Firste fallen kann
- II. Potentieller Key Block (stabil mit entsprechender Reibung): Block in der Ulme, der durch Gleiten versagen kann. Durch das Aufschwimmen des Blockes kann ein potentieller Key Block zu einem Key Block werden
- III. Bedingungslos stabiler Block: z.B. ein Block in der Sohle

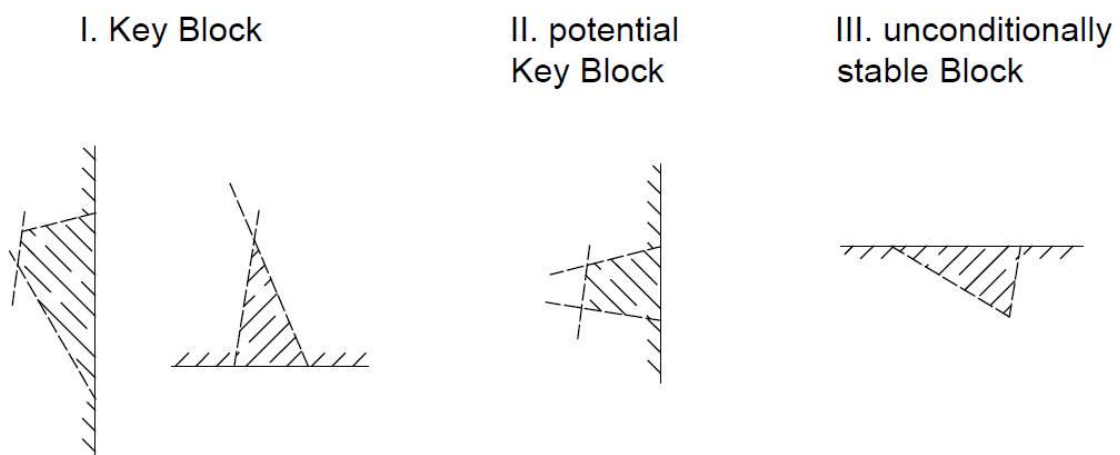


Abbildung 12: Key Blöcke (nach Goodman und Shi, 1985)

### 3.3 Block Code

Die Oberfläche eines Blockes, der als KB in Frage kommt, wird gebildet durch die Trennflächen des Gefüges und die freie Oberfläche des Ausbruchsrandes.

Die Flächen, die einen Block konstituieren, können dabei einen Halbraum bilden, soweit man diese in ihrer Ausdehnung als unendlich auffasst. Der Block Code beschreibt dabei die Lage des Blockes, in Relation zu den Halbräumen die ihn bilden. Die freie Oberfläche wird dabei vernachlässigt. Folglich setzt sich der Block Code zusammen aus einer Zahlenkombination mit  $n$  – Stellen, wobei  $n$  die Anzahl der vorhandenen Trenn-



flächenscharen des Blockgefüges darstellt. Diese Trennflächen werden mit dem Kürzel K beschrieben und beginnen mit der Trennfläche K1. Der allgemeine Block in der Firste in Abbildung 13 ist vereinfacht 2- dimensional dargestellt. Er wird gebildet aus den Trennflächen K1 und K2 sowie der freien Oberfläche (FO). Der Halbraum der Trennflächen besteht jeweils aus einer oberen Seite ( $O_{K_n}$ ) und einer unteren Seite ( $U_{K_n}$ ). Befindet sich der Block auf der oberen Seite der Trennfläche, so nimmt die entsprechende Stelle des Block Codes den Wert 0 an. Ist der Block jedoch auf der Unterseite einer Trennfläche, so nimmt der Wert des Block Codes an dieser Stelle den Wert 1 an.

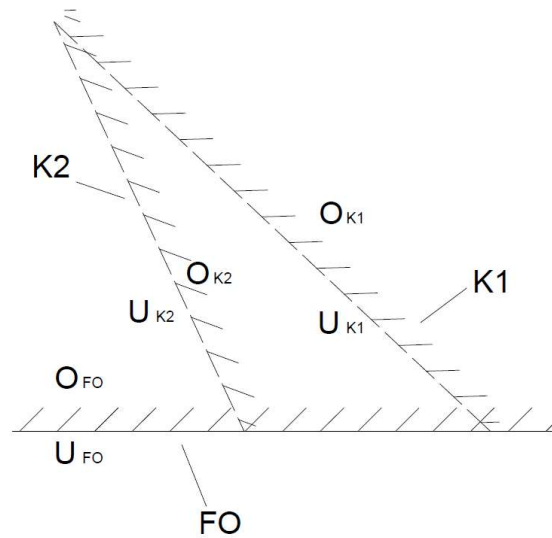
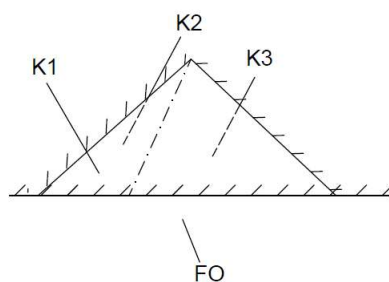


Abbildung 13: Allgemeiner Block in der Firste (nach Goodman und Shi, 1985)

Der allgemeine Block befindet sich an der Unterseite des Halbraumes der Trennfläche K1 und an der Oberseite des Halbraumes der Trennfläche K2. Sein Block Code lautet somit 10.

Da ein Block in der Natur immer 3- dimensional ist, wird mit dem Beispiel eines Firstblockes demonstriert, wie sich ein räumlicher Block Code zusammensetzt.

Schnitt - Firstblock



Isometrie - Firstblock

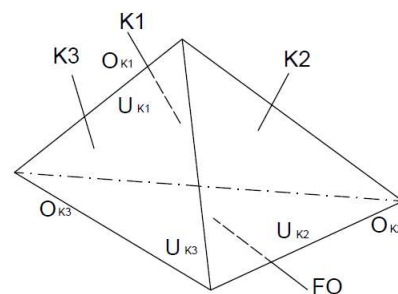


Abbildung 14: 3-dimensionaler Block in der Firste (nach Goodman und Shi, 1985)

Für den Firstblock in Abbildung 14 gilt, dass das Volumen des Körpers unterhalb aller Halbräume der Trennflächen liegt. Daher ist der Block Code folglich 111.

Um auch einen Ulmenblock hinsichtlich seines Block Codes zu untersuchen, wird dies anhand des Beispiels aus Abbildung 15 unternommen. Das Blockvolumen befindet sich unterhalb der Halbräume der Trennflächen K1 und K2 sowie oberhalb des Halbraumes von K3. Der Block Code des Ulmenblockes ist somit 110.

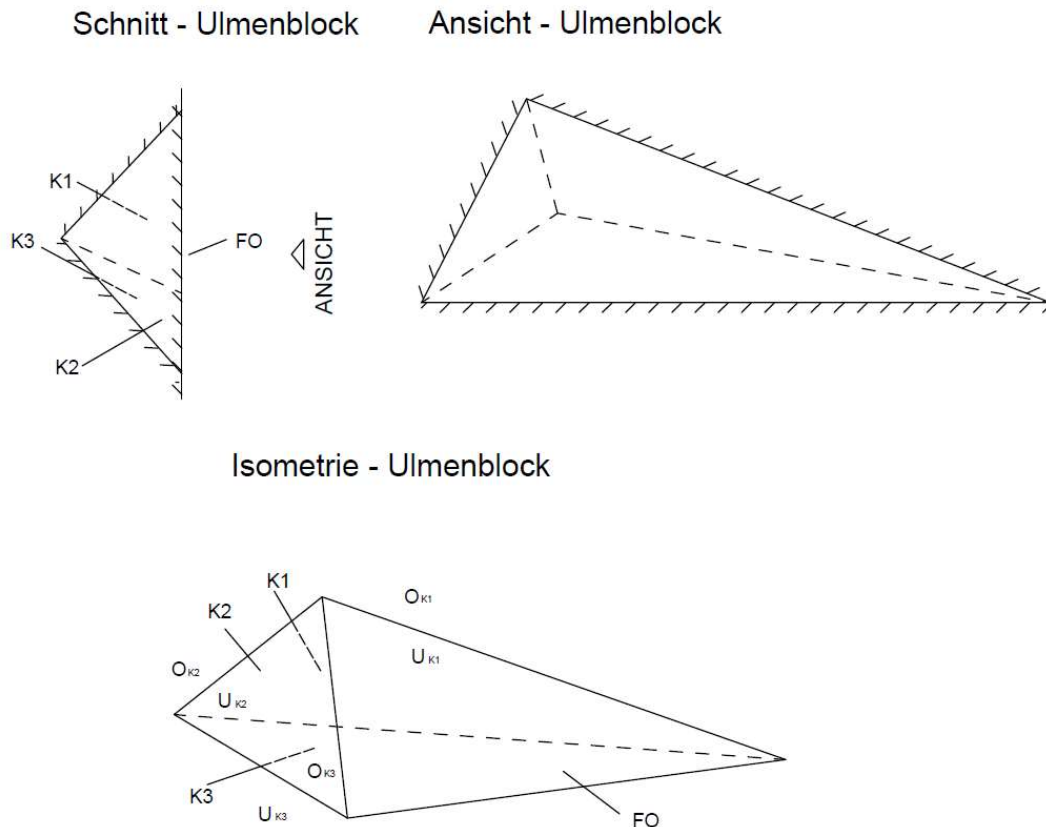


Abbildung 15: 3-dimensionaler Ulmenblock (nach Goodman und Shi, 1985)

Der Block Code dient zur Beschreibung eines definierten Blockes und seiner Lage im Gefüge und kann dadurch Aussagen zu einem Versagensbild und dem Versagensmechanismus ermöglichen. Ein Block der wie in Abbildung 14 unterhalb sämtlicher Halbräume liegt, versagt durch Fallen aus der Firste. Der Block in Abbildung 15 liegt beispielsweise nur auf einer Trennfläche, bei nicht ausreichender Reibung in dieser Fläche, wird er somit durch Gleiten auf einer Fläche versagen.

### 3.4 Versagensmechanismen

Mit der Block Theorie ist es anhand des Trennflächengefüges, der Lage des Blockes und dem Vektor der Schwerkraft bzw. den vektoriellen Größen weiterer Kräfte möglich, den Versagensmechanismus eines Körpers zu bestimmen. Die beiden Versagensmechanismen, die von der BT erfasst werden können sind das Fallen sowie das Gleiten von Blöcken. Das Gleiten wird wiederum eingeteilt in Gleiten auf einer Fläche und Gleiten auf mehreren Flächen.

Um ein Versagen vorhersehen zu können, gilt es zunächst zu definieren, ob ein gewählter Block auch tatsächlich ein Key Block ist. Anhand der stereographischen Projektion der Lagekugeldarstellung, unter Einbezug des Block Codes, können anschließend Versagensmechanismus und Versagensbild qualitativ ermittelt werden.

Um einen Nachweis auch quantitativ zu führen, muss auf die Methoden der Vektoranalysis zurückgegriffen werden. Für die Block Theorie existieren mittlerweile Software Lösungen, die derartige Berechnungen durchführen können.

Anhand der Vektoranalysis wird auch die resultierende Bewegungsrichtung des versagenden Blockes ermittelt. Dabei erfolgt das Fallen eines Blockes stets parallel zum einwirkenden, resultierenden Kraftvektor. Das Gleiten eines Blockes auf einer Ebene erfolgt parallel zu ihrem Fallwinkel. Ein Gleiten von Blöcken auf zwei Ebenen erfolgt parallel zur Verschneidungslinie der beiden Gleitflächen. (Goodman und Shi, 1985)

### 3.5 Anwendung der Block Theorie

Die Block Theorie kann aufgrund ihrer allgemeinen Formulierung in unterschiedlichen Bereichen der Felsmechanik angewandt werden. Hauptanwendungsgebiete der BT sind Nachweise für (Goodman und Shi, 1985):

- Böschungen
- Fundamente von Talsperren (v.a. schlanke Bogenstaumauern)
- Hohlraumbauwerke (Tunnels, Kavernen, Schächte)

Im Tunnelbau findet die BT Anwendung sowohl im zyklischen als auch im maschinellen Vortrieb (ÖGG, 2008 und ÖGG, 2013). Vor allem ist die Ermittlung des größtmöglichen Blockes zu nennen, der als Key Block von der BT ausgegeben werden kann. (Goodman und Shi, 1985)

Auch im Rahmen des Vortriebes eines zweiröhrigen Autobahntunnels der Route Aosta-Monte Bianco in Italien, ist die Block Theorie zum Einsatz gekommen. Hier wurde sie zur Bestimmung des Gebirgsdruckes und für die Ausbaumaßnahmen im zyklischen Vortrieb angewandt. Das Versagen von Firstblöcken zufolge des Fallens, konnte unter

Einsatz einer probabilistischen Verteilung der Raumstellung von Trennflächen prognostiziert werden. Entsprechende Gegenmaßnahmen wurden getroffen. Nichtsdestotrotz kam es zu einem plötzlichen und unvorhergesehenen Versagen von Blöcken in der Firste. (Cravero et al., 1992)

## 3.6 Software

Berechnungen mit der Block Theorie sind grundsätzlich mittels Handrechnung lösbar. Durch komplexere Berechnungsabläufe, Blockgeometrien und Erweiterungen wie z.B. einer probabilistischen Verteilung von Trennflächen, ist die Verwendung von Software Lösungen zu empfehlen. Im Folgenden werden die Programme *Block Theorie* und *Unwedge* vorgestellt.

### 3.6.1 *Block Theorie*

Das Programm *Block Theorie*<sup>1</sup> (Langer, 1986) stellt ein einfaches Werkzeug dar, mit dem entfernbare Kluftkörper anhand der Block Theorie festgestellt werden können.

Zu den Funktionen, die in der Anwendung *Block Theorie* implementiert worden sind, zählen:

- Grafische Ausgabe von Key Blocks
- Detaillierte Angaben über Kluft- und Blockpyramiden
- Eingabemöglichkeit äußerer Kräfte
- Berücksichtigung einer hohen Zahl von Trennflächen und freier Oberflächen
- Berechnung eines FOS

### 3.6.2 *Unwedge (Rocscience)*

Eine weit verbreitete Software Lösung für den Einsatz der Block Theorie ist *Unwedge* von Rocscience. Die Anwendung verfügt über geeignete Schnittstellen zu anderen Programmen von Rocscience. Dadurch wird z.B. das Einlesen von aufgenommenen Trennflächen erleichtert.

Zu den Nachteilen des Programmes zählt, dass maximal 3 Trennflächenscharen explizit miteinander kombiniert werden können.

---

<sup>1</sup> Das Programm *Block Theorie* wird zur besseren Unterscheidung immer in *kursiver Schrift* geschrieben, im Gegensatz zur Block Theorie von Goodman und Shi.

## Features von Unwedge:

- Grafische Ausgabe der Blöcke
- Grafische Ausgabe des Hohlraumquerschnittes
- Eingabemöglichkeit äußerer Kräfte
- Bemessung von Ausbaumaßnahmen
- Probabilistische Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen, Trennflächenscharen (bei mehr als drei Scharen) und Scherparametern
- Berechnung eines FOS

## 4 Discrete Element Method (DEM)

Diskontinuierliche Systeme setzen sich zumindest aus folgenden Komponenten zusammen:

- Festkörpern
- Diskontinuitäten (Interface oder Kontakte zwischen den Festkörpern)

Festkörper können bei diskretisierter Berechnung sowohl als deformierbar als auch starr angenommen werden. Die Kontakte werden eingeteilt in „weiche Kontakte“ (ein Eindringen eines Festkörpers entlang eines Kontaktes ist möglich) oder „harte Kontakte“ (nicht- physisch aufgefasst). (Itasca Consulting Group Inc., 2016)

Aufgrund der Zusammensetzung eines diskretisierten Modelles, kann dieses als Gefüge aus einzelnen Kontinuumskörpern und deren Kontaktflächen betrachtet werden.

Damit Berechnungen anhand diskretisierter Elemente durchgeführt werden können, haben sie zwei Bedingungen zu erfüllen (Cundall & Hart, 1992):

*„Eine Berechnung erlaubt endliche Verformungen und Rotationen inklusive vollkommener Abtrennung aus einem Blockverband. Zudem Erkennt die Berechnung neue Kontakte automatisch im Zuge des Rechenverlaufes.“*

### 4.1 Grundlagen der Distinct Element Method

Die Distinct Element Method wurde von Peter A. Cundall erstmals 1971 vorgestellt. Ihr ursprünglicher Zweck war bereits ihre Anwendung für Problemstellungen in der Felsmechanik. (Itasca Consulting Group Inc., 2016)

Zur Gleichungslösung wird bei DEM- Codes (wie *3DEC*) ein Zeitschrittverfahren angewandt, um Bewegungen direkt zu berechnen. Eine Berücksichtigung des Verhaltens von Festkörpern erfolgt entweder verformbar oder starr. Kontakte zwischen den einzelnen Blöcken werden stets als „weich“ aufgefasst und unterliegen einem definierten Stoffgesetz. Die einzelnen Körper des Diskontinuums können sich aus einem Verband lösen. Eine Erkennung von Kontakten untereinander, wird ebenfalls von der DEM ermöglicht und stellt eine der komplexesten und rechenaufwändigsten Aufgaben dieser Codes dar. (Cundal & Hart 1992)

Nicht zu den Diskreten Element Methoden zählen die Grenzgleichgewichtsbetrachtungen wie etwa die Block Theorie von Goodman und Shi (1985). Grund dafür ist, dass lediglich ein initialer Versagenszustand berücksichtigt wird. Eine weitere Beachtung des kinematischen Verhaltens wird darüber hinaus nicht untersucht (Itasca Consulting Group Inc., 2016). Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden unter Anwendung des DEM Codes *3DEC* (3- Dimensional Distinct Element Code) durchgeführt.

## 4.2 Distinct Element Code und Block Theorie

Die DEM und die Block Theorie verfügen über unterschiedliche Annahmen und Berechnungsweisen. Hinsichtlich ihrer Anwendung weisen sie Stärken und Schwächen auf, die in Tabelle 2 aufgelistet sind.

Tabelle 2: Vergleich DEM und Grenzgleichgewichtsbetrachtung (Cundall und Hart, 1992)

### Legende

++ gute Modellierung des Verhaltens

+ Modellierung des Verhaltens möglich aber nicht gut geeignet

- Modellierung nicht möglich

|                        |  |                           | Distinct Element Method |    | Block Theorie |    |
|------------------------|--|---------------------------|-------------------------|----|---------------|----|
| Harte Kontakte         |  | Weiche Kontakte           | -                       | ++ | ++            | -  |
| Starre Körper          |  | Verformbare Körper        | ++                      | ++ | ++            | -  |
| Geringe Verschiebungen |  | Große Verschiebungen      | ++                      | ++ | ++            | -  |
| Geringe Verformungen   |  | Große Verformungen        | ++                      | ++ | -             | -  |
| Wenige Körper          |  | Viele Körper              | ++                      | ++ | ++            | +  |
| Lineares Material      |  | Nichtlineares Material    | ++                      | ++ | -             | -  |
| Lose Lagerung          |  | Dichte Lagerung           | ++                      | ++ | -             | ++ |
| statisch               |  | dynamisch                 | ++                      | ++ | ++            | -  |
| Nur Kräfte             |  | Kräfte und Verschiebungen | +                       | ++ | ++            | -  |

Die in Tabelle 2 berücksichtigten Faktoren beachten jedoch nicht die Anwendung der Berechnungsmodelle. Eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse ist durch eine Anwendung der Block Theorie einfacher möglich. Eine vergleichbare Plausibilisierung der

Ergebnisse aus der DEM erfordert zusätzliche Berechnungen, die analytische Methoden der Gleichgewichtsbetrachtung miteinschließen können.

Die Annahmen für den Initialzustand des Versagens sind für Berechnungen mit DEM und Block Theorie gleichwertig. Weiterführende Berechnungen wie z.B. bei progressivem Versagen können jedoch nicht mit der Block Theorie durchgeführt werden. (Cundall und Hart, 1992)

### 4.3 Festkörperkinematik

Wie in der Tabelle 2 bereits ersichtlich ist, können für Berechnungen mit der DEM sowohl starre Körper als auch verformbare Körper berücksichtigt werden.

Um die Berechnungen dieser Arbeit mit DEM und Block Theorie möglichst vergleichbar zu machen, wird die Annahme getroffen, dass die Blöcke des Systems starr sind. Diese Annahme wird als ausreichend genau für das untersuchte Versagen von Einzelblöcken in einer Kaverne erachtet.

#### 4.3.1 Bewegung starrer Blöcke

Die Blockkinematik der DEM schließt sowohl die Rotation als auch die Translation von Kluftkörpern mit ein.

Die Bewegungsgleichung für eine Translation starrer Blöcke ist im Programm *3DEC* definiert mit Formel 12. (Itasca Consulting Group Inc., 2016)

$$\ddot{x}_i + \alpha \dot{x}_i = \frac{F_i}{m} + g_i \quad (\text{Formel 12})$$

Die Terme der Formel ergeben sich dabei wie folgt:

$\ddot{x}_i$  ... .. *Beschleunigung des Block Zentroids*

$\dot{x}_i$  ... .. *Geschwindigkeit des Block Zentroids*

$\alpha$  ... .. *Viskose Dämpfungskonstante*

$F_i$  ... .. *Auf den Block einwirkende Kräfte*

$m$  ... .. *Blockmasse*

$g_i$  ... .. *Beschleunigungsvektor der Schwerkraft*



Die Rotationsbewegung von starren Blöcken wird durch die Euler'schen Bewegungsgleichungen in den Formeln 13 - 15 beschrieben. Diese nehmen Bezug auf die Hauptträgheitsachsen des Blockes. (Itasca Consulting Group Inc., 2016)

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 = M_1 \quad (\text{Formel 13})$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 = M_2 \quad (\text{Formel 14})$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 = M_3 \quad (\text{Formel 15})$$

$I_1, I_2, I_3 \dots \dots \dots$  Hauptträgheitsmomente des Blockes

$\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_3 \dots \dots \dots$  Winkelbeschleunigungen bezogen auf die Hauptachsen

$\omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots \dots \dots$  Winkelgeschwindigkeiten bezogen auf die Hauptachsen

$M_1, M_2, M_3 \dots \dots \dots$  Drehmoment des Blockes bezogen auf die Hauptachsen

#### 4.3.2 Dämpfung

Eine Dämpfung wird im System aufgebracht, um anhand der vorgegebenen Eingaben, möglichst schnell ein statisches Gleichgewicht des Gefüges zu erzielen. Diese Dämpfung ist proportional zur Bewegungsgeschwindigkeit der Blöcke. Schwachpunkt ist hierbei die Konvergenz der Dämpfung, die bei einer abnehmenden Geschwindigkeit, auch eine abnehmende Dämpfung zur Folge hat. Aus diesem Grund wird in 3DEC auch die Berücksichtigung einer lokalen Dämpfung ermöglicht, die sich proportional zu den Restkräften verhält. Lokale Dämpfung wird bevorzugt für ein Versagensverhalten, in dem ein progressiver Nachbruch zu erwarten ist. (Itasca Consulting Group, 2016)

#### 4.3.3 Mass Density Scaling

Die Aktivierung des Mass Density Scaling in 3DEC beschleunigt den Rechenprozess des Programmes und trägt bei, zu einem schnelleren Konvergieren zu einem statischen Zustand (Itasca Consulting Group, 2016). Dies kann jedoch zu unplausiblen Ergebnissen, in Hinblick auf die Schwerkraft, führen. Größere Blöcke fallen dabei schneller als kleinere. Unter einer Vernachlässigung des Luftwiderstandes sind derartige Ergebnisse nicht plausibel. (Hein- Stumpp, 2008)

Für die Berechnungen dieser Arbeit wurde daher das Mass Density Scaling deaktiviert.

## 4.4 Kontakte und Trennflächen

Die Berücksichtigung von Kontakten und Trennflächen in *3DEC* weist eine größere Auswahl an Variablen auf, als dies beispielsweise für die Block Theorie gilt. In einem 3-dimensionalen Modell können sowohl Trennflächenabstände als auch die Zufallsverteilung von Trennflächen implementiert werden. Die mechanischen Eingangswerte für die Trennflächen, können neben dem Reibungswinkel und der Dilatanz, viele weitere Größen beinhalten. (Itasca Consulting Group, 2016)

Im Gegensatz zur BT berücksichtigt *3DEC* die Interaktion von Blöcken untereinander. Das Loslösen von Blöcken aus einem Verband wird berücksichtigt, wie auch eine Kollision von Blöcken. (Cundall und Hart, 1992 und Itasca Consulting Group, 2016)

### 4.4.1 Kontakterkennung

Die Kontakterkennung (Contact Detection) ist ein Berechnungsablauf in *3DEC*, der die Position zweier Blöcke ermittelt und im Anschluss feststellt, ob die Blöcke miteinander in Kontakt sind. Voraussetzung hierfür ist, dass beide Blöcke als Nachbarn erkannt worden sind. Maßgebend für die Kontaktfeststellung ist darüber hinaus die geometrische Toleranz in der Berechnung. Wenn sich Blöcke innerhalb dieser Toleranzschranke befinden, werden sie als einander potentiell berührende Blöcke erfasst, auch wenn die Körper noch nicht miteinander interagieren können. Der Abstand der Blöcke wird ab dem Unterschreiten der Toleranzschranke genauer untersucht und vom Programm laufend weiterverfolgt.

#### 4.4.1.1 Common Plane Detection

Um den Kontakt zweier Blöcke einfacher ermitteln zu können, wird von *3DEC* auch die Erkennung einer gemeinsamen Ebene (common plane) angestrebt.

Die gemeinsame Ebene verändert sich dabei von einem Rechenschritt zum nächsten und passt sich somit an die veränderte Lage der Blöcke an. Berühren beide Blöcke die gemeinsame Ebene, so berühren sie automatisch auch einander. Wie der Abbildung 16 zu entnehmen ist, kann dadurch auch ein Kontakt einer Kante eines Blockes, zu einer Fläche eines anderen Blockes, leichter festgestellt werden.

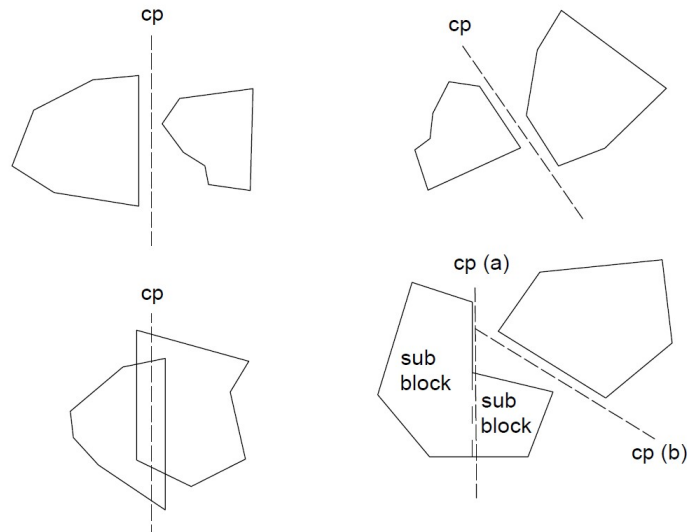


Abbildung 16: Gemeinsame Ebene zweier Blöcke (nach Itasca Consulting Group, 2016)

#### 4.4.2 Konstitutive Gesetze von Kontakten

Die konstitutiven Beziehungen des Trennflächenmodells in *3DEC* werden für reguläre Anwendungen durch das Coulomb Slip Model beschrieben. Dieses beruht auf dem allgemeinen Coulomb'schen Reibungsgesetz und kann ein Zugversagen ebenso berücksichtigen wie den Dilatanzwinkel in den Trennflächen. Zur Veranschaulichung der Konstitutiven Beziehungen ist das Modell in Abbildung 17 dargestellt. Um das komplexere Verhalten einer schrittweise zerscherten Trennfläche darzustellen, kann in *3DEC* auch das Continuously Yielding Joint Model zur Anwendung kommen.

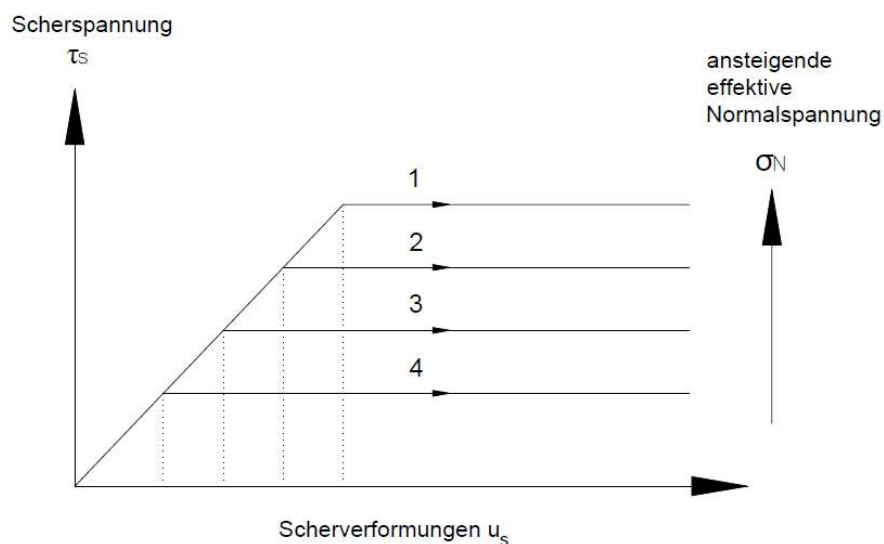


Abbildung 17: Coulomb Slip Model ohne Berücksichtigung der Kohäsion (nach Itasca Consulting Group, 2016)

Im Rahmen der Berechnungen wird der Einfluss von Dilatanz und Zugfestigkeit in den Trennflächen vernachlässigt.

## 5 Untersuchungen

Am Beispiel einer Modellkaverne und dreier Trennflächensysteme, wurden die Auswirkungen der Variation der Raumstellungen von Trennflächen auf den Gebirgsverhaltens-typ 2 (Gefügebedingte Ausbrüche) untersucht.

Eine Untersuchung der Blockansammlung wurde mittels Block Theorie, unter Einsatz von *Block Theorie* und *Unwedge*, und DEM, unter Einsatz von *3DEC*, durchgeführt.

### 5.1 Untersuchte Hohlraumgeometrie

Die Geometrie der untersuchten Kaverne ist den Übungsunterlagen der LVA zur angewandten Felsmechanik der TU- Wien entnommen (Preh, 2019 und Poisel, 2015). Diese wurde zur Durchführung der Berechnungen in *Block Theorie*, *Unwedge* und *3DEC* eingegeben.

Eine allgemeine Geometrie des Hohlraumes der Kaverne ist der Abbildung 18 zu entnehmen. Diese diente vorrangig der Erstellung des Modelles mit *Unwedge*.

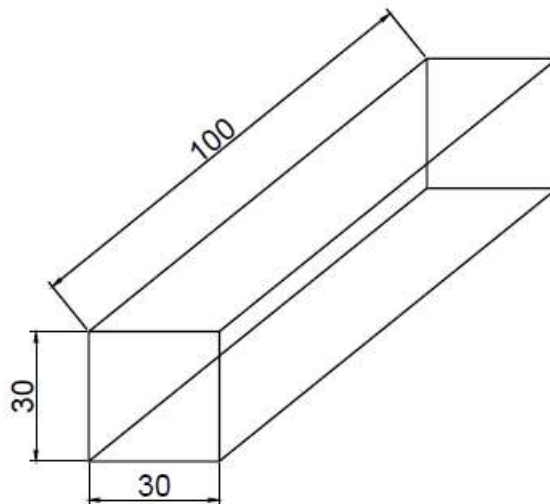


Abbildung 18: Abmessungen Ausbruchquerschnitt

In Abbildung 19 sind die Modellabmessungen zur dreidimensionalen numerischen Berechnung, mithilfe des DEM- Codes *3DEC*, dargestellt.

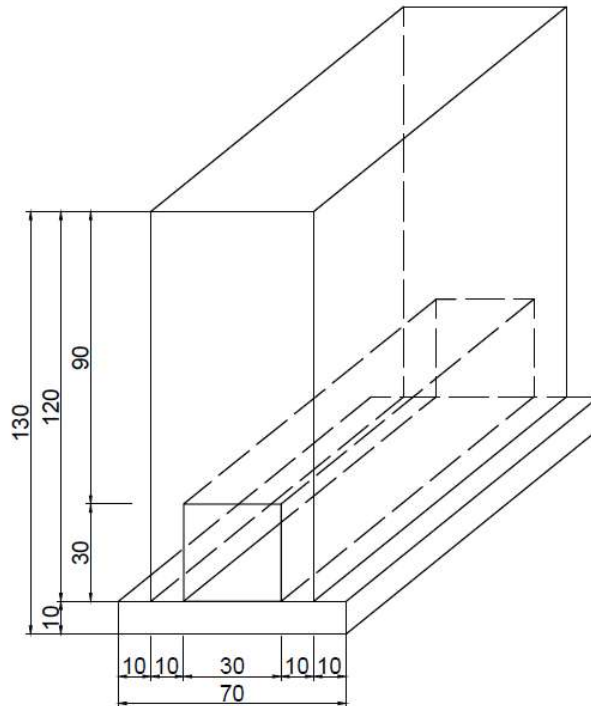


Abbildung 19: Abmessung Gebirgsmodell – 3DEC

Ein Ausbau der Kaverne, wurde ebenso wie ein durch Abschlge stattfindender Vortrieb, in den Untersuchungen nicht berücksichtigt.

## 5.2 Materialparameter

Für alle Berechnungen gelten folgende Modellannahmen des Gebirges:

**Wichte der Festkörper:**  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$

**Festigkeit der Festkörper:** unzerstörbar

**Verformungsverhalten Festkörper:** Starrkörper

**Bergwasser:** nicht vorhanden

## 5.3 Berechnungen mit der Block Theorie

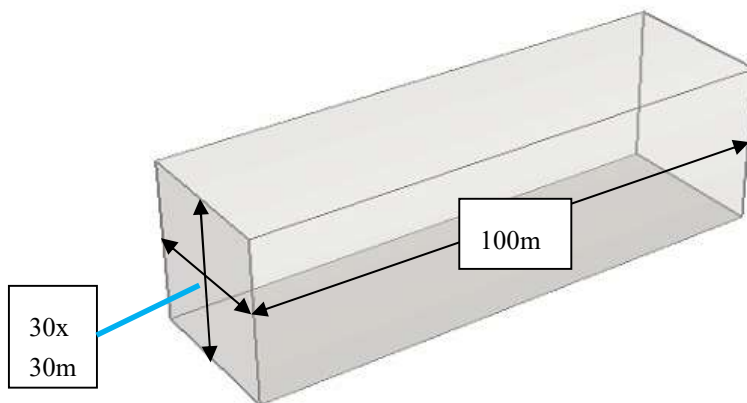
### 5.3.1 Modellierung der Hohlraumgeometrie

Die Berechnung mit *Block Theorie* wurde anhand einer freien Oberfläche (Firste oder Ulme) und ihres jeweiligen Halbraumes durchgeführt. Dazu flossen in das Modell der Fallwinkel und die Fallrichtung der freien Oberfläche sowie die Lage des Halbraumes entsprechend der Tabelle 3 ein.

Tabelle 3: Block Theorie – Freie Oberflächen und Halbraum

| Lage        | Fallwinkel | Fallrichtung | Halbraum |
|-------------|------------|--------------|----------|
| Firste      | 0°         | 0°           | oberer   |
| linke Ulme  | 90°        | 0°           | oberer   |
| rechte Ulme | 90°        | 0°           | unterer  |

Für die Berechnung mit *Unwedge* wurde die Hohlraumgeometrie der Kaverne, wie in Abbildung 20 dargestellt, eingegeben. Eine Berechnung mit *Unwedge* benötigt nur die Eingabe des ausgebrochenen Hohlraumes. Eine Modellierung des Gebirges erfolgt automatisch, durch die Eingabe der Raumstellungen der Trennflächen. Diese werden jedoch nicht grafisch dargestellt.

Abbildung 20: Hohlraumgeometrie in *Unwedge*

### 5.3.2 Berücksichtigung der Gebirgsspannungen

Vor dem Ausbruch des Hohlraumes der Kaverne, herrschen im Gebirge der Initialzustand und die darin vorliegenden Primärspannungen vor. Nach dem Ausbruch prägt sich, durch die Umlagerungen der Spannungen, der Sekundärspannungszustand aus. Dies geht einher mit der Auflockerung des Gebirges. Für das Gebirgsmodell existieren jedoch keine Daten für einen möglichen Auflockerungsfaktor. Aus diesem Grunde wurden auf das Gebirge, in der Modellierung mit *Block Theorie* und *Unwedge*, die beiden Extremfälle für Spannungsfelder aufgebracht.

Im ersten Fall wurden keinerlei Spannungen aufgebracht. Diese Annahme kann als sehr konservativ aufgefasst werden, da auf potentielle Key Blöcke keine Belastung aufgebracht und die Auswirkung der Reibung in den Trennflächen unterschätzt wird.

Im zweiten Fall wurden die Primärspannungen, infolge der Gebirgsüberlagerung auf das Modell aufgebracht. Dieses ergibt sich aus der Überlagerungshöhe, der Wichte des Festgesteines und durch den Seitendruckbeiwert. Durch die sehr hohe aufgebrachte Spannung wird der Einfluss der Reibung in den Trennflächen überschätzt. Das vertikale und horizontale Spannungsfeld des Gebirges, ergibt sich dadurch wie folgt:

**Höhe der Überlagerung ( $h_u$ ):** 90m

**Wichte des Festgesteins ( $\gamma$ ):** 27kN/m<sup>3</sup>

**Vertikaler Gebirgsdruck ( $p_v$ ):**  $h_u * \gamma = 27\text{kN/m}^3 * 90\text{m} = \underline{2430\text{ kPa}}$

**Seitendruckbeiwert ( $K_0$ ):** 0,5

**Horizontaler Gebirgsdruck ( $p_h$ ):**  $K_0 * p_v = 2430\text{ kPa} * 0,5 = \underline{1215\text{ kPa}}$

Um eine plausible Auswertung möglich zu machen, wurden die Ergebnisse beider Grenzfälle gegenübergestellt.

### 5.3.3 Definition des Versagenskriteriums

Die Block Theorie ist ein analytisches Verfahren, das die Entfernbarkeit eines Blockes aus einem Gefüge ermittelt. Die Stabilität eines Blockes wird, nachdem dessen Entfernbarkeit festgestellt worden ist, mithilfe eines Grenzgleichgewichtsverfahrens nachgewiesen. Ein Block ist dann stabil, wenn er das Grenzgleichgewicht überschreitet ( $FoS \geq 1,0$ ). Das Grenzgleichgewicht ist erreicht, wenn einwirkende und rückhaltende Größen im Gleichgewicht stehen ( $FoS = 1,0$ ). Unterschritten wird das Grenzgleichgewicht, wenn der Wert der Beanspruchungen den Wert des Widerstandes überschreitet ( $FoS \leq 1,0$ ) und der Block in Folge dessen versagt. Der FoS ist hierbei der Quotient aus Widerstand (R) und Beanspruchungen (E) (Formel 16).

$$FoS = \frac{R}{E} \quad (\text{Formel 16})$$

Darüber hinaus stellt der FoS den Kehrwert von  $\mu$  aus Formel 5 dar, die eine Grundlage für den Standsicherheitsnachweis des Eurocodes darstellt.

Bei einem Blockgefüge, dessen Trennflächen als deterministisch verteilt angenommen werden, genügt die Aussage des FoS für den Key Block um eine Standsicherheit nachzuweisen bzw. ein Versagen festzustellen.

Im Fall einer probabilistischen Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen, tritt auch eine Variation der Blockgeometrie auf. In diesem Fall muss die Versagenswahrscheinlichkeit mithilfe einer im Voraus bestimmten Anzahl an Stichproben, bestimmt werden. Für jede Stichprobe wird ein FoS ermittelt, der entsprechend der Formel 17 zu einer Versagenswahrscheinlichkeit ausgegeben wird.

$$p_f = \frac{n_f}{n} \quad (\text{Formel 17})$$

$p_f$  ... .. Wahrscheinlichkeit des Versagens

$n_f$  ... .. Anzahl der Stichproben mit  $\text{FoS} < 1,0$

$n$  ... .. Gesamtsumme der Stichproben

Die Versagenswahrscheinlichkeit wird anhand einer Normalverteilung mit der Monte Carlo Methode, anhand von 10000 Stichproben, ermittelt.

Bei einer probabilistischen Verteilung der Raumstellungen, sind deterministischen Berechnungen zum Vergleich heranzuziehen. Nur im Falle einer Versagenswahrscheinlichkeit von 100% ist ein Blockversagen sicher, der FOS für diesen Fall ist für jede Stichprobe 0,0.

Die Identifikation der versagenden Blöcke wird anhand ihres Block Codes durchgeführt.

### 5.3.4 Ausgewertete Ergebnisse

Die ausgewerteten Ergebnisse werden in den folgenden Punkten beschrieben.

#### 5.3.4.1 Lage der Key Blöcke

Nach der Ausgabe der Key Blöcke aus *Block Theorie* und *Unwedge* wurde deren Lage im Modell bestimmt. Die Block Theorie kann bei einem Trennflächensystem aus drei Trennflächenscharen nur einen Key Block pro Ausbruchfläche ausgeben. Das Versagensbild kann mit der BT nur qualitativ, hinsichtlich der Lokalisation entfernbarer Blöcke, ausgewertet werden.

Für die ermittelten Blöcke wurden der Block Code, der FoS, der Versagensmechanismus und für probabilistisch verteilte TF-Systeme, auch die Versagenswahrscheinlichkeit ausgewertet.

Blöcke in den Endwänden der Kaverne wurden nicht ausgewertet.





Die Randbedingungen wurden mittels unverschieblicher Blöcke an den Modellrändern realisiert. Zur Beobachtung des Versagensbildes sind diese in den folgenden Darstellungen ausgeblendet. Die seitlichen Begrenzungen und die Basis wurden ebenfalls unverschieblich modelliert.

#### 5.4.2 Berücksichtigung der Gebirgsspannungen

Zur Berücksichtigung der Primärspannungen wurde das Rechenmodell mit einer festgelegten Anzahl an Berechnungsschritten konsolidiert. Beendet war die Konsolidation, sobald sämtliche Blöcke des Modelles stillstanden. Sichergestellt wurde dies durch die Darstellung der Blockgeschwindigkeiten, die nach Abschluss der Konsolidierungsphase 0 m/s betrug.

Für eine ausreichende Konsolidierung wurden 10000 Rechenschritte (Steps) als ausreichend aufgefasst. Die vertikalen Blockgeschwindigkeiten im Modell sind in Abbildung 22 bis Abbildung 25 dargestellt.

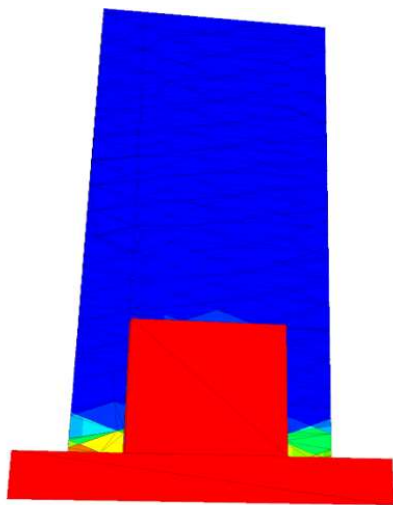


Abbildung 22: Modell Konsolidierung  
nach 229 Schritten

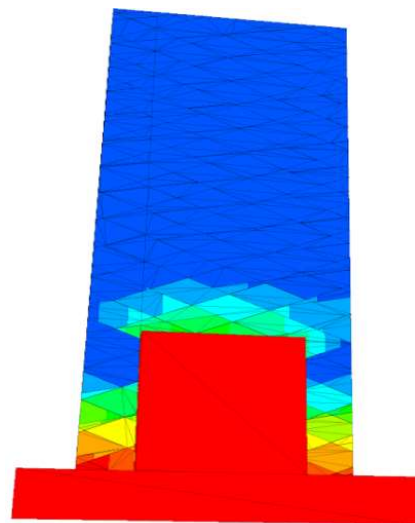


Abbildung 23: Modell Konsolidierung  
nach 1100 Schritten

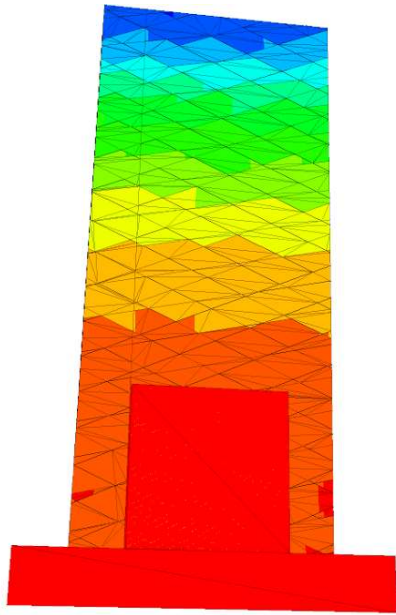


Abbildung 24: Modell Konsolidierung  
nach 2700 Schritten

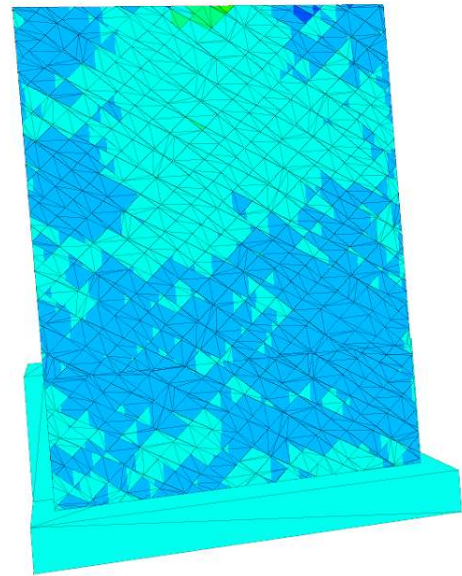


Abbildung 25: Modell Konsolidierung  
nach 10000 Schritten

Anmerkung: In Abbildung 22 bis Abbildung 24 sind rote Blöcke stillstehend, blaue Blöcke hingegen in Bewegung. Im Gegensatz dazu sind in Abbildung 25 blaue und türkise Blöcke bereits still stehend, grüne Blöcke zeigen noch geringe Bewegungen an.

Nach 10000 Schritten befanden sich einzelne Blöcke am oberen Rand des Modelles, noch in Bewegung (siehe Abbildung 25). Dieses Ergebnis sollte durch weitere Rechenschritte zur Konsolidierung untersucht werden.

Wie in Abbildung 26 dargestellt, hat sich die Bewegungsgeschwindigkeit der oberen Randblöcke des Modelles, nach weiteren 2000 Berechnungsschritten, nicht verändert. Es ist davon ausgegangen worden, dass die Randblöcke lediglich eine numerische Unschärfe darstellen. Da der obere Rand des Modelles nicht in direktem Kontakt und Einflussbereich der Ausbruchskante der Kaverne ist, wurde die Geschwindigkeit der dort befindlichen Blöcke als vernachlässigbar erachtet. Die Konsolidierung mit 10000 Berechnungsschritten wurde folglich als zulässig aufgefasst.

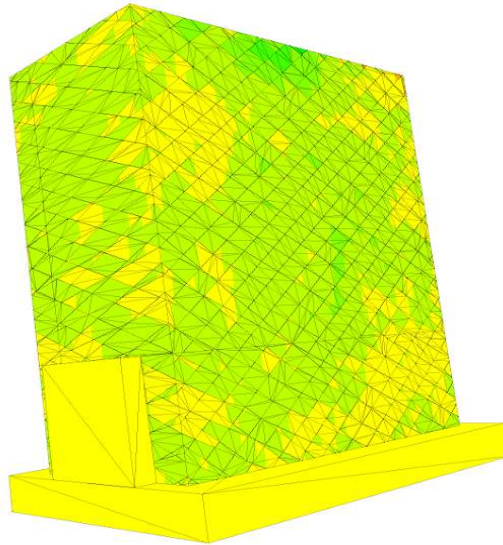


Abbildung 26: Blockgeschwindigkeiten nach weiteren 2000 Schritten (insgesamt: 12000 Steps)

Die Sekundärspannungen setzen ein nach Ausbruch des Hohlraumes der Kaverne, der in einem Stück auf ganzer Länge erfolgt ist. Eine Simulation des Vortriebes durch einzelne Abschlüge fand nicht statt.

#### 5.4.3 Modellannahmen für 3DEC

Das Modell in *3DEC* benötigt Eingaben, welche über die Annahmen aus 5.2 Materialparameter, hinausgehen.

Der Abstand der einzelnen Trennflächen wurde für alle Trennflächenscharen mit 5,0 m angenommen. Die Steifigkeit der Blockkontakte wurde normal und parallel zu den TF als sehr steif angenommen ( $10^3$  MPa). Als konstitutives Modell der Trennflächen, wurde das Coulomb Slip Modell gewählt, dabei wurden die Zugfestigkeit und die Dilatanz in den TF vernachlässigt. Das Dämpfungsverhalten des Modelles wurde lokal berücksichtigt (entsprechend 4.3.2 Dämpfung).

#### 5.4.4 Definition entfernbarer Blöcke

Die Identifikation entfernbarer Blöcke wird in *3DEC* anhand der Bewegungsgeschwindigkeit der Blöcke definiert. Ein Block wird als aus dem Verband entfernbar angenommen, wenn dieser eine Geschwindigkeit annimmt, die 1m/s übertrifft und sich nicht verlangsamt, bis er auf der Kavernensole aufschlägt.

Um Blöcke zu identifizieren wird die programminterne Block ID herangezogen. Die Block ID stellt eine fortlaufende Nummer dar, die automatisch von *3DEC* zugewiesen wird. Diese ist nicht gleichbedeutend mit dem binären Block Code, welcher auch Aussagen über die Geometrie eines Blockes erlaubt.

Die Ermittlung eines Versagensmechanismus für entfernbare Blöcke in *3DEC*, ist nur durch einen Vergleich der Geometrie mit entfernbaren Blöcken aus der Block Theorie möglich. Alternativ können, bei einer einfachen Blockgestalt, zur Feststellung des Versagensmechanismus auch analytische Berechnungen oder eine Ermittlung des Block Codes gem. Block Theorie zum Einsatz kommen.

### 5.4.5 Ausgewertete Ergebnisse

#### 5.4.5.1 Lage, Anzahl und Masse versagender Blöcke

Das Verhalten des Modelles wurde anhand des Versagens von Blöcken untersucht. Zunächst wurde (analog zu 5.3.4.1 Lage der Key Blöcke) bestimmt, an welcher Ausbruchskante der Kaverne das Versagen eines Blockes eingetreten ist (Ermittlung des qualitativen Versagensbildes).

Eingeteilt nach ihrer Lokalisierung, ist die Anzahl der Blöcke ermittelt worden (Ermittlung des quantitativen Versagensbildes).

Die Größe der Blöcke variiert stark durch die Abstände der Trennflächen, die vorgegebenen Toleranzen und der daraus resultierenden Verschnitte. Daher wurde auch die Masse der versagenden Kluftkörper bestimmt und mit deren Anzahl verglichen.

#### 5.4.5.2 Größter Block

Der größte versagende Block in der Berechnung mit *3DEC* wurde hinsichtlich seiner Masse, seines Volumens und seiner Oberflächengeometrie untersucht. Die Auswertung der Oberflächengeometrie beschäftigt sich mit der Identifikation der konstituierenden Blockflächen anhand ihres Normalenvektors. Dieser Normalenvektor einer Blockfläche kann aus *3DEC* ausgelesen werden. Im Anschluss wurden die Blockflächen anhand ihrer Fallrichtung ( $\alpha$ ) und ihres Fallwinkels ( $\beta$ ) einer Kluftschar des Diskontinuums zugeordnet.

Der Normalenvektor einer Blockoberfläche wird in Formel 18 definiert.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \sin \alpha \\ \cos \beta \cos \alpha \\ \sin \beta \end{pmatrix} \quad (\text{Formel 18})$$

#### Legende:

**x** ... x- Komponente des Normalenvektors

**y**... y- Komponente des Normalenvektors

**z** ... z- Komponente des Normalenvektors

Eine Zuordnung der Lage des Blockes an der Ausbruchskante, wird bereits durch die Orientierung des Normalenvektors an der freien Oberfläche ermöglicht.

Die freie Oberfläche eines Firstblockes, wird entsprechend der Formel 19 definiert, anhand eines zur Z- Achse parallelen Einheitsvektors.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{Formel 19})$$

Eine freie Oberfläche eines Ulmenblockes hingegen, weist einen zur Y- Achse parallelen Einheitsvektor auf, wie in Formel 20 dargestellt.

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{Formel 20})$$

Aus dem Normalenvektor errechnet sich die Fallrichtung ( $\alpha$ ) gemäß Formel 21 und der Fallwinkel ( $\beta$ ) gemäß Formel 22.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) \quad (\text{Formel 21})$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \quad (\text{Formel 22})$$

Durch die Identifikation der Blockflächen in *3DEC*, kann ein direkter Vergleich mit der Geometrie der Key Blocks aus *Block Theorie / Unwedge* durchgeführt werden.

Das Programm *3DEC* kann den Versagensmechanismus eines Blockes nicht direkt ausgeben. Um auf diesen schließen zu können, muss die Geometrie eines Blockes ergänzend mit *Block Theorie* ausgewertet werden. Bei einer einfachen Blockgeometrie kann jedoch bereits eine Auswertung des Block Codes, analog zur Block Theorie, schlüssige Ergebnisse liefern.

### 5.4.5.3 Key Block Analyse

Nach dem Grundsatz der Block Theorie, sollte das Fixieren eines einzelnen Kluftkörpers das Versagen weiterer Blöcke verhindern. Um dieses Verhalten auch in einer numerischen Berechnung untersuchen zu können, wurden potentielle Key Blocks identifiziert und anschließend fixiert. In weiterer Folge wurde eine iterative Berechnung durchgeführt, um die rückhaltende Wirkung dieser potentiellen Key Blocks in *3DEC* zu untersuchen.

Die sich in *3DEC* ergebenden Blöcke wurden, nach der Auswertung ihrer Oberflächengeometrie in ein Schema eingeteilt, das durch die Tabelle 4 bestimmt ist. Dieses richtet sich nach der Anzahl einzelner Oberflächen eines Blockes, die einer Kluftschar zuordenbar sind.

Tabelle 4: Blocktypen für die Key Block Analyse

| Blockbezeichnung | Anzahl der konstituierenden Oberflächen                |
|------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>A - Block</b> | 4 (freie Oberfläche + 3 Kluftflächen)                  |
| <b>B - Block</b> | 5 (freie Oberfläche + 4 Kluftflächen)                  |
| <b>C - Block</b> | 6 (freie Oberfläche + 5 Kluftflächen)                  |
| <b>D - Block</b> | 7 (freie Oberfläche + 6 Kluftflächen)                  |
| <b>E - Block</b> | 8 (freie Oberfläche + 7 Kluftflächen)                  |
| <b>J - Block</b> | Beliebig (keine freie Oberfläche, min. 4 Kluftflächen) |

A- Blöcke sind jene Blöcke mit der geringsten Anzahl an konstituierenden Trennflächen. Diese wurden bei Analyse am ehesten als KB erachtet. J- Blocks sind Joint Blocks, die sich vor allem dadurch von anderen Blöcken unterscheiden, dass über keinerlei Anteil an der freien Oberflächen verfügen. (Goodman und Shi, 1985)

In den Resultaten der Berechnungen, kamen J- Blocks nur in sehr seltenen Fällen vor. Diese waren darüber hinaus nicht von nennenswerter Kubatur bzw. Masse.

## 5.5 Untersuchungsprogramm

Für das Kavernenmodell wurden drei Untersuchungen durchgeführt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des eingegebenen Trennflächensystems, ihres Untersuchungszieles sowie der daraus resultierenden Variation der Berechnungsannahmen. Die Untersuchungen (Untersuchung 0, Untersuchung 1 und Untersuchung 2) gliedern sich in einzelne Rechnungen, die sich wiederum durch ihre Berechnungsannahmen unterscheiden.

Untersuchung 0 wurde anhand einer einzelnen Rechnung (Rechnung 0.1) vorgenommen. Für Untersuchung 1 wurden insgesamt 12 Rechnungen durchgeführt (Rechnung 1.1 bis Rechnung 1.12), die wiederum in 4 Gruppen eingeteilt sind. Die Untersuchung 2 wurde schließlich unter dem Einsatz von 3 Rechnungen (Rechnung 2.1 bis Rechnung 2.3) durchgeführt.

## 5.6 Untersuchung 0

Die Untersuchung 0 fand anhand des Trennflächensystems 0 statt, welches aus drei Kluftscharen besteht. In Untersuchung 0 wurde nur die Rechnung 0.1 vorgenommen und ausgewertet. Diese sollte zur Feststellung dienen, ob durch die Anwendung des Trennflächensystems 0 ein Versagen von Blöcken anhand der vorgegebenen Raumstellungen von Trennflächen eintritt. Es wurde dazu ein sehr geringer, einheitlicher Reibungswinkel von  $20^\circ$  in den Trennflächen angenommen. Darüber hinaus wurde eine deterministische Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen für das Modell angesetzt. Dies bedeutet, dass alle Trennflächen einer Schar parallel zueinander sind und deren Raumstellungen dem Mittelwert aus Tabelle 5 entsprechen.

Berechnungen wurden hierfür unter Einsatz von *Block Theorie*, *Unwedge* und *3DEC* durchgeführt.

Die Berechnungen mit *Block Theorie* und *Unwedge* wurden hinsichtlich der Lage der Key Blöcke (5.3.4.1) und des größten Key Blockes (5.3.4.2) ausgewertet.

Ergebnisse aus den Berechnungen mit *3DEC* sollten sich auf die Lokalisation des Versagens (5.4.5.1) beschränken.

### 5.6.1 Auswertung des Trennflächensystems 0

Die Eingangsdaten des Trennflächensystems 0 (TS 0) sind das Ergebnis einer Kartierung der Raumstellungen von Trennflächen im Steinbruch Renz (Kolenprat, 2019). Die Rohdaten der Raumstellungen, welche mit dem Geologenkompass aufgenommen worden sind, wurden anhand des Trennflächentyps und ihrer Ausrichtung in drei Kluftscharen (K1 – K3) gruppiert. Die Streuung der Raumstellungen der Trennflächen dieser Kluftscharen wurde unter Annahme einer Normalverteilung ermittelt. Daraus ergaben sich (entsprechend Abbildung 27) die statistischen Kennwerte für den Mittelwert ( $m$ ), die Standardabweichung ( $\sigma$ ) und die relative Abweichung vom Mittel (rel. Min. und rel. Max. ( $\Delta m$ )). Die relative Abweichung vom Mittel dient dabei einer Begrenzung der möglichen Werte der Raumstellungen, welche durch die Aufnahmen in der Natur festgestellt worden sind.



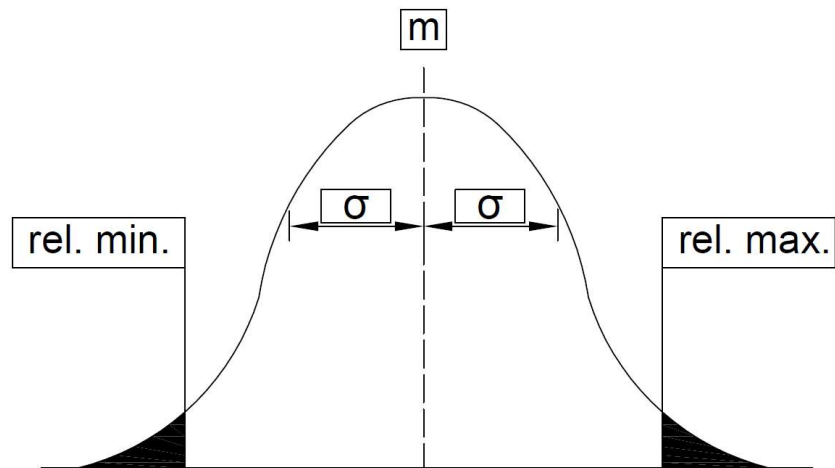


Abbildung 27: Kennwerte Normalverteilung

Die daraus resultierenden Daten des Trennflächensystems sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Trennflächensystem 0 – untersuchte Raumstellungen und ausgewertete Verteilungen

| Kluftschar |              | Mittelwert<br>(m) | Standardabweichung<br>( $\sigma$ ) | rel. Min. / Max.<br>( $\Delta m$ ) |
|------------|--------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| K 1        | Fallwinkel   | 43°               | 6°                                 | 13°                                |
|            | Fallrichtung | 104°              | 14°                                | 34°                                |
| K 2        | Fallwinkel   | 36°               | 7°                                 | 15°                                |
|            | Fallrichtung | 127°              | 7°                                 | 43°                                |
| K 3        | Fallwinkel   | 44°               | 9°                                 | 11°                                |
|            | Fallrichtung | 63°               | 11°                                | 12°                                |

Eine Variation der Raumstellungen von Trennflächen, gemäß Normalverteilung, kann durch das Programm *Unwedge* berücksichtigt werden, jedoch nicht durch das Programm *3DEC*. Mit diesem ist nur die Berücksichtigung einer Variation, entsprechend einer linearen Verteilung der Raumstellungen, möglich. Die Funktion für eine lineare Verteilung ist in Abbildung 28 dargestellt. Daraus ist auch ersichtlich, dass die größten Abweichungen vom Mittelwert, mit derselben Wahrscheinlichkeit auftreten, wie dieser selbst.

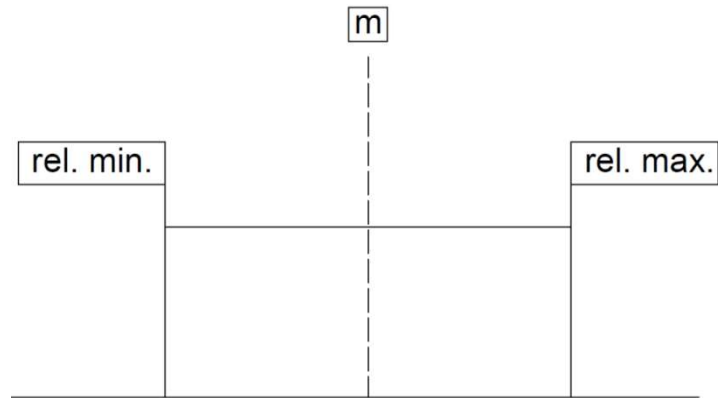


Abbildung 28: Kennwerte lineare Verteilung

Die Berechnungen aus Unwedge und *3DEC* können nur qualitativ miteinander verglichen werden. Der Unterschied in der Verteilungsfunktion, bei der Variation der Raumstellung der Trennflächen, wird daher zum Zweck der Untersuchung als vernachlässigbar erachtet.

Eine Vergleichsrechnung in Unwedge, unter Einsatz einer linearen Verteilung, hat außerdem Ergebnisse geliefert, die jenen mit einer Normalverteilung sehr ähnlich sind.

Die Trennflächen und die freie Oberfläche am Beispiel der Firste ist, in Form der Großkreisdarstellung (Goodman und Shi, 1985), in Abbildung 29 dargestellt.

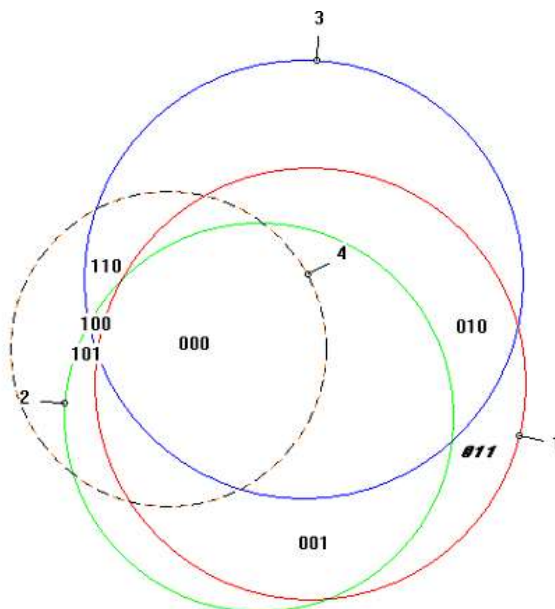


Abbildung 29: Lagekugeldiagramm - Trennflächensystem 0 - (Freie Oberfläche: 4 - Firste)

## 5.7 Untersuchung 1

Die Untersuchung 1 fand statt für das Trennflächensystem 1, dessen Kennwerte in Tabelle 6 aufgelistet sind.

Tabelle 6: Trennflächensystem 1 – untersuchte Raumstellungen und Verteilungen

| Kluftschar |              | Mittelwert<br>( $\mu$ ) | Standardabweichung<br>( $\sigma$ ) | rel. Min. / Max.<br>( $\Delta\mu$ ) |
|------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>K 1</b> | Fallwinkel   | 43°                     | 6°                                 | 13°                                 |
|            | Fallrichtung | 284°                    | 14°                                | 34°                                 |
| <b>K 2</b> | Fallwinkel   | 36°                     | 7°                                 | 15°                                 |
|            | Fallrichtung | 127°                    | 7°                                 | 43°                                 |
| <b>K 3</b> | Fallwinkel   | 44°                     | 9°                                 | 11°                                 |
|            | Fallrichtung | 63°                     | 11°                                | 12°                                 |

Der einzige Unterschied des TS 1 zum TS 0 ist der Mittelwert der Fallrichtung der Trennflächenschar K1. Diese wurde um 180° gedreht um ein Fallen in der Firste und ein Gleiten auf jeweils einer und zwei Flächen in den Ulmen zu ermöglichen.

Die Trennflächen und die freie Oberfläche am Beispiel der Firste ist, in Form der Großkreisdarstellung (Goodman und Shi, 1985), in Abbildung 30 dargestellt.

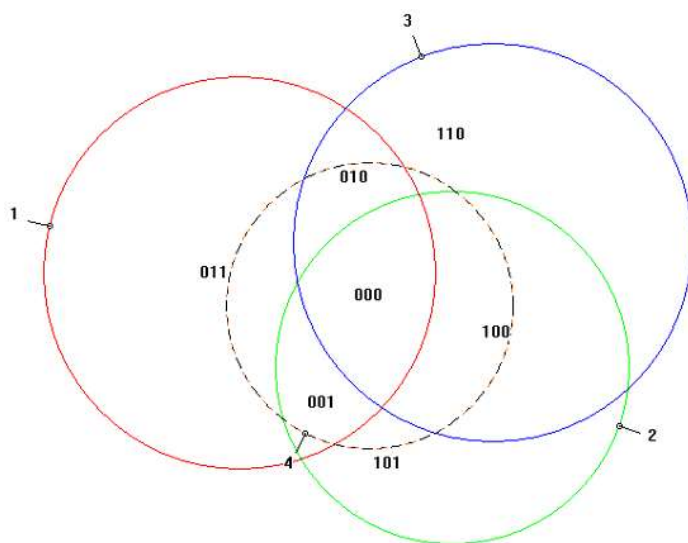


Abbildung 30: Lagekugeldiagramm – Trennflächensystem 1 – (Freie Oberfläche: 4 - Firste)

In Untersuchung 1 wurden 12 Rechnungen durchgeführt, bezeichnet als Rechnungen 1.1 bis 1.12. Diese wurden wiederum in vier Gruppen eingeteilt. Diese Gruppen unterscheiden sich jeweils durch die Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen (deterministisch oder probabilistisch) und die Kinematik der Blöcke (rein translatorisch oder translatorisch und rotatorisch). Die schematische Vorgehensweise bei der Berechnung ist in Abbildung 31 dargestellt.

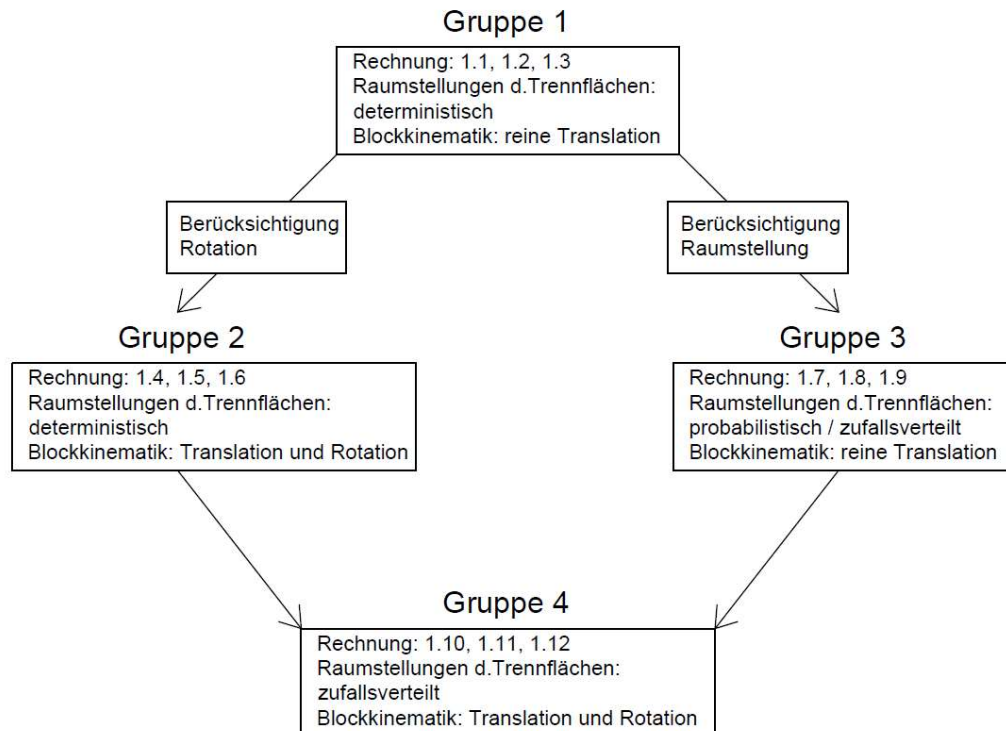


Abbildung 31: Untersuchung 1 - Berechnungsschema

Zweck dieses Berechnungsschemas ist eine schrittweise Abweichung von den Grundsätzen der Block Theorie (siehe 3.1 Annahmen der Block Theorie). Dieses Vorgehen hat den Vergleich der DEM mit der Block Theorie zum Ziel. Daher wurde auch der Hauptteil der Berechnungen in Gruppe 2 und der Gruppe 4 nur mit *3DEC* durchgeführt. Der Grund hierfür ist, dass eine Rotation von Kluftkörpern nicht durch die Block Theorie erfasst werden kann. Darüber hinaus sollte eine Bewertung der Auswirkungen von probabilistisch variierten Raumstellungen von Trennflächen ermöglicht werden.

Innerhalb der vier Gruppen, die jeweils drei Rechnungen beinhalten, unterscheiden sich einzelne Rechnungen nur durch den einheitlichen Reibungswinkel in den Trennflächen. Dieser wurde in der ersten Rechnung einer Gruppe zu  $20^\circ$  angesetzt, in der zweiten Rechnung auf  $25^\circ$  gesteigert und in der dritten Rechnung auf  $40^\circ$  erhöht. Dieses Vorgehen sollte eine Identifikation des Versagens von Kluftkörpern durch Fallen ermögli-

chen. Der Mechanismus des Fallens kann durch eine Erhöhung des Reibungswinkels in den Trennflächen nicht verhindert werden (Hein- Stumpp, 2008).

Eine Einteilung der Gruppen, Rechnungen und der entsprechenden Werte von  $\varphi$  ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Untersuchung 1 – Reibungswinkel in den Trennflächen

|          | Gruppe |     |     |      |    |               |
|----------|--------|-----|-----|------|----|---------------|
|          | 1      | 2   | 3   | 4    |    |               |
| Rechnung | 1.1    | 1.4 | 1.7 | 1.10 | 20 | $\varphi$ [°] |
|          | 1.2    | 1.5 | 1.8 | 1.11 | 25 |               |
|          | 1.3    | 1.6 | 1.9 | 1.12 | 40 |               |

### 5.7.1 Rechnungen der Gruppe 1: Rechnung 1.1 bis 1.3

Rechnungen der Gruppe 1 dienen als Referenzrechnung für alle weiterführenden Rechnungen der Untersuchung 1. Die eingegangenen Annahmen entsprechen den Grundlagen der Block Theorie und berücksichtigen daher nur eine translatorische Kinematik, wie auch deterministisch verteilte Raumstellungen der Trennflächen.

Die Berechnungen wurden durchgeführt mit *Block Theorie*, *Unwedge* und *3DEC*. Sie dienen damit auch dem Vergleich der Ergebnisse der verwendeten Berechnungsprogramme untereinander.

Unter Anwendung von Block Theorie und Unwedge wurden die Ergebnisse zur Lage der Key Blöcke (siehe 5.3.4.1) und für den größten Key Block (siehe 5.3.4.2) ausgewertet.

Ergebnisse, die mit *3DEC* ermittelt worden sind, wurden ausgewertet in Bezug auf die Lokalisation des Versagens (siehe 5.4.5.1) und des größten Blockes (siehe 5.4.5.2). Es wurde darüber hinaus eine Analyse der potentiellen Key Blöcke, entsprechend Punkt 5.4.5.3, durchgeführt.

### 5.7.2 Rechnungen der Gruppe 2: Rechnung 1.4 bis 1.6

Die Rechnungen der Gruppe 2 wurden, entsprechend Abbildung 31, unter Berücksichtigung der Rotation von Blöcken durchgeführt.

Die Berechnungen sollten dazu dienen, die Auswirkung der Rotation auf das Versagen (Versagensbild, Versagensmechanismus) zu ermitteln. Da eine Berücksichtigung der

Rotation durch die Block Theorie nicht möglich ist, wurden Berechnungen ausschließlich mit *3DEC* durchgeführt.

Zur Auswertung gelangten die Ergebnisse für die Lokalisation des Versagens (gemäß Pkt. 5.4.5.1) und für den größten Block (gemäß 5.4.5.2). Ebenfalls wurden potentiellen Key Blöcke analysiert, so wie dies in Punkt 5.4.5.3 beschrieben ist.

### **5.7.3 Rechnungen der Gruppe 3: Rechnung 1.7 bis 1.9**

Die Rechnungen der Gruppe 3 wurden, unter Berücksichtigung der probabilistisch variierten Ausrichtung der Raumstellungen der Trennflächen, ausgeführt. Deren Verteilung ist der Tabelle 6 zu entnehmen. Hintergrund für diese Vorgehensweise ist der Vergleich der Ergebnisse aus Gruppe 1 und Gruppe 3. Dadurch soll festgestellt werden, welche Auswirkung eine Variation der Trennflächenausrichtung auf den Versagensmechanismus und das Nachbruchverhalten (Versagensbild) in der Kaverne hat.

Die Berechnungen wurden durchgeführt unter Einsatz von *Unwedge* und *3DEC*.

Für die Berechnungen mit *Unwedge* wurden die Ergebnisse zur Lokalisation von Key Blöcken und eine genauere Analyse des größten Blockes ausgewertet (entsprechend 5.3.4.1 und 5.3.4.2).

Es wurden aus der Berechnung mit *3DEC* die Lokalisation des Versagens (siehe 5.4.5.1) und der größte zum Versagen gelangende Block (siehe 5.4.5.2) ausgewertet. Darüber hinaus wurde eine Analyse der potentiellen Key Blöcke, entsprechend Punkt 5.4.5.3, durchgeführt.

### **5.7.4 Rechnungen der Gruppe 4: Rechnung 1.10 bis 1.12**

Die Rechnungen der Gruppe 4 sollten sowohl eine Zufallsverteilung der Raumstellung von Trennflächen als auch die Rotation von Blöcken berücksichtigen. Ergebnisse aus diesen Berechnungen sollten einen Vergleich mit jenen aus Gruppe 2 und Gruppe 3 ermöglichen.

Durchgeführt wurden die Berechnungen ausschließlich mit *3DEC*. Eine Auswertung der Ergebnisse ist für die Lokalisation und das Ausmaß des Versagens (siehe 5.4.5.1) sowie den größten zum Versagen gelangenden Block (siehe 5.4.5.2) erfolgt.

## **5.8 Untersuchung 2**

Untersuchung 2 setzt sich aus drei Rechnungen zusammen, bezeichnet als Rechnung 2.1 bis 2.3. Diese sollten dazu dienen, ein möglicherweise kritisches Nachbruchverhalten von Kluftkörpern in der Kaverne zu untersuchen, das sich aus der Variation der Raumstellungen von Trennflächen ergibt. Das Nachbruchverhalten in der Kaverne sollte au-

ßerdem analysiert werden, um einen Vergleich der Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten (gem. EC 7) mit der Auswirkung einer Variation der Raumstellung von Trennflächen zu ermöglichen.

Das Schema der Rechnungen ist dargestellt in Abbildung 32.

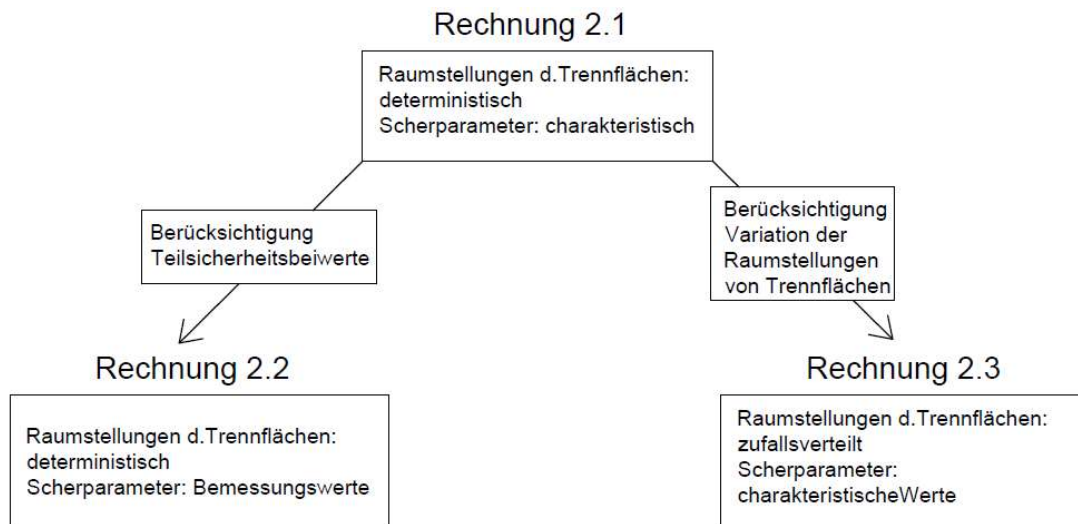


Abbildung 32: Untersuchung 2 - Berechnungsschema

Ergebnisse zum Einfluss der Rotation von Blöcken wurden bereits durch die Berechnungen der Untersuchung 1 geliefert. Diese wurden daher nicht erneut in Untersuchung 2 analysiert.

Die Rechnungen der Untersuchung 2 wurden ausschließlich mit *3DEC* ausgeführt. Eine Auswertung fand statt, entsprechend der Methodologie in 5.4.5.1 und 5.4.5.2, für die Lokalisation des Versagens (Versagensbild) und für den größten versagenden Block.

### 5.8.1 Auswertung des Trennflächensystems 2

Die Untersuchung 2 fand statt für das Trennflächensystem 2, dessen Kennwerte in Tabelle 8 aufgelistet sind.

Die Raumstellungen des TS2 wurden den Übungsunterlagen der LVA zur angewandten Felsmechanik der Technischen Universität Wien entnommen (Preh, 2019 und Poisel, 2015). Diese Eingangswerte haben ursprünglich einer deterministischen Eingabe gegolten. Um auch eine probabilistische Auswertung des Trennflächensystems zu ermöglichen, wurde auf die Verteilungen der Trennflächensysteme 0 und 1 zurückgegriffen. Als Mittelwert ( $m$ ) der Raumstellungen der Kluftscharen des Trennflächensystems 2 wurden die Angaben aus den Übungsunterlagen angewandten Felsmechanik direkt herangezogen. Die Variation der Kluftscharen  $K1 - K3$  wurde mithilfe der Verteilung der

Trennflächensysteme TS 0 und TS 1 vorgenommen. Die Werte der Standardabweichung und der relativen Abweichung vom Mittelwert wurden unverändert übernommen. Da TS2 jedoch über insgesamt vier Kluftscharen verfügt, musste die Verteilung der Trennflächenschar K4 gesondert zugewiesen werden. Dazu wurde das Mittel aus den statistischen Kennwerten der Kluftscharen K1 – K3 gebildet. Dieses wurde als eine in der Natur plausible Verteilung aufgefasst.

Die Standardabweichung ( $\sigma$ ) der Kluftschar K4 hat sich entsprechend der Formel 23 ergeben.

$$\sigma(K4) = \frac{\sigma(K1) + \sigma(K2) + \sigma(K3)}{3} \quad (\text{Formel 23})$$

Die relative Abweichung vom Mittelwert ( $\Delta_m$ ) wurde gebildet, wie in Formel 24 dargestellt.

$$\Delta_m(K4) = \frac{\Delta_m(K1) + \Delta_m(K2) + \Delta_m(K3)}{3} \quad (\text{Formel 24})$$

Tabelle 8: Trennflächensystem 2 – untersuchte Raumstellungen und Verteilungen

| Kluftschar |              | Mittelwert<br>(m) | Standardabweichung<br>( $\sigma$ ) | rel. Min. /<br>Max. ( $\Delta_m$ ) |
|------------|--------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>K 1</b> | Fallwinkel   | 71°               | 6°                                 | 13°                                |
|            | Fallrichtung | 163°              | 14°                                | 34°                                |
| <b>K 2</b> | Fallwinkel   | 50°               | 7°                                 | 15°                                |
|            | Fallrichtung | 243°              | 7°                                 | 43°                                |
| <b>K 3</b> | Fallwinkel   | 45°               | 9°                                 | 11°                                |
|            | Fallrichtung | 275°              | 11°                                | 12°                                |
| <b>K4</b>  | Fallwinkel   | 43°               | 7,3°                               | 13°                                |
|            | Fallrichtung | 350°              | 10,6°                              | 30°                                |

Die Trennflächen und die freie Oberfläche am Beispiel der Firste ist, in Form der Großkreisdarstellung (Goodman und Shi, 1985), in Abbildung 33 dargestellt.



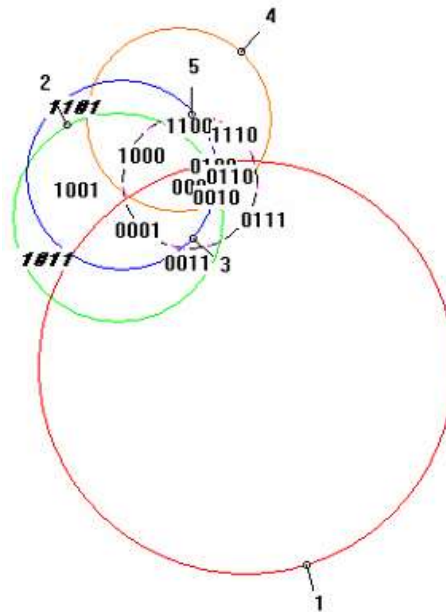


Abbildung 33: Lagekugeldiagramm - Trennflächensystem 2 – (Freie Oberfläche: 5 - Firste)

### 5.8.2 Auswertung der Scherparameter

Da der Eurocode 7 die Bemessung von Tunneln, Kavernen und anderen Hohlraumbauwerken nicht berücksichtigt, ist für die Annahme der Teilsicherheitsbeiwerte die Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau der ÖGG (2018) heranzuziehen. Die Modellkaverne wurde ohne Ausbaumaßnahmen, wie beispielsweise einer Spritzbetonschale, modelliert. Eine dünne Spritzbetonschale kann jedoch in der Modellbildung als stille Reserve vernachlässigt werden. In Anlehnung an die Bemessung einer ungesicherten Ortsbrust, für die ein Nachweis des Geländebruches geführt wird, ist für alle Ausbruchflächen der Kaverne der Nachweis des Geländebruches zu führen. Im Nationalen Anhang des EC 7 wird das Nachweisverfahren 3 für den Nachweis des Geländebruchs vorgeschrieben. Dieses berücksichtigt Teilsicherheitsbeiwerte nur auf Seite der Scherparameter. Eine Beaufschlagung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Anker oder Spritzbeton wird dabei nicht berücksichtigt.

In weiterer Folge wurde für die Modellkaverne ein Teilsicherheitsbeiwert, entsprechend dem Nachweisverfahren 3, gemäß der Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau der ÖGG, auf die Scherparameter in den Trennflächen aufgebracht.

Die Kennwerte der Scherparameter der Trennflächenscharen unterscheiden sich untereinander. Ihre Aufteilung auf die jeweiligen Trennflächenscharen und ihre Anwendung in den Rechnungen sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Untersuchung 2 - Scherparameter in den Trennflächen

| Rechnung                                                                                                                                                                                                                                  | 2.1 und 2.3             |         | 2.2                                                    |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|--------------------------------------------------------|---------|
| Typ                                                                                                                                                                                                                                       | Charakteristischer Wert |         | Bemessungswert<br>( $\gamma_\phi = \gamma_c = 1,25$ )* |         |
| Kennwert                                                                                                                                                                                                                                  | $\phi$ [°]              | c [MPa] | $\phi$ [°]                                             | c [MPa] |
| K1                                                                                                                                                                                                                                        | 15                      | 0,04    | 12                                                     | 0,032   |
| K2                                                                                                                                                                                                                                        | 30                      | 0,4     | 24                                                     | 0,32    |
| K3                                                                                                                                                                                                                                        | 30                      | 0,4     | 24                                                     | 0,32    |
| K4                                                                                                                                                                                                                                        | 25                      | 0,1     | 20                                                     | 0,08    |
| *) In Anlehnung an die Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau der ÖGG werden die Teilsicherheitsbeiwerte analog eines Geländebruches (NV3) (nach Adam (2011)) nur auf Seite der Baugrundkennwerte aufgebracht |                         |         |                                                        |         |

### 5.8.3 Rechnung 2.1

Die Rechnung 2.1 ist die grundlegende Referenzrechnung der Untersuchung 2. Das Trennflächensystem 2 wurde darin anhand deterministisch verteilter Raumstellungen von Trennflächen und charakteristischer Scherparameter untersucht.

### 5.8.4 Rechnung 2.2

Für die Rechnung 2.2 wurden die Scherparameter in den Trennflächen, entsprechend dem Nachweisverfahren 3 des EC 7, abgemindert. Der Teilsicherheitsbeiwert auf Seite des Widerstandes ( $\gamma_c, \gamma_\phi$ ), wurde unter Berücksichtigung der ÖGG Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau, mit 1,25 angenommen. Einwirkungen bzw. Beanspruchungen wurden analog dazu, ohne eine Faktorisierung durch einen Teilsicherheitsbeiwert ( $\gamma_E$ ) bzw. mit  $\gamma_E = 1,0$ , angenommen.

### 5.8.5 Rechnung 2.3

Die Rechnung 2.3 sollte der Ermittlung des Einflusses einer Variation der Raumstellungen der Trennflächen dienen. Im Anschluss daran sollten die Ergebnisse der Rechnung 2.3 mit jenen aus Rechnung 2.2 verglichen werden. Dabei wurde angestrebt eine Aussage über die Maßgeblichkeit der Eingangswerte (Teilsicherheitsbeiwerte oder Variation der Raumstellungen von Trennflächen), treffen zu können.

## 6 Ergebnisse – Untersuchung 0

Die Untersuchung 0 fand statt, um ein Versagen von Kluftkörpern im Trennflächensystem 0 festzustellen.

Aus diesem Grunde wurde die Rechnung 0.1 durchgeführt. Zu den eingegangenen Berechnungsannahmen gehörten eine deterministische Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen und ein einheitlicher Reibungswinkel ( $\varphi$ ) von  $20^\circ$  in allen Trennflächen. Die Kinematik der Blöcke wurde rein translatorisch angenommen.

Rechnung 0.1 wurde mit *Block Theorie*, *Unwedge* und *3DEC* ausgeführt.

### 6.1.1.1 Ergebnisse der Rechnung 0.1 – Block Theorie / Unwedge

Die Ergebnisse der Rechnung 0.1 lieferten drei potentielle Key Blöcke, von denen sich einer in der Firste und zwei weitere, jeweils in der linken und rechten Ulme befinden. Alle potentiellen Key Blöcke im Modell aus Unwedge, sind in Abbildung 34 dargestellt.

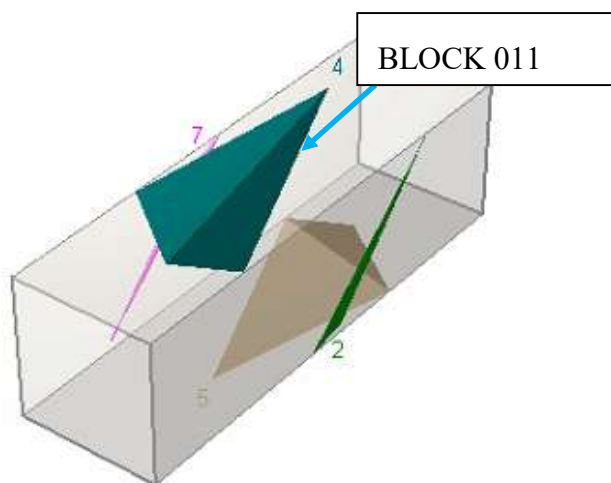


Abbildung 34: Potentielle Key Blöcke der Kaverne – Trennflächensystem 0

Der Block, welcher sich in Abbildung 34 in der Sohle erkennen lässt, ist als bedingungslos stabil zu identifizieren (siehe Definition in Abbildung 12). Die Blöcke in den Ulmen sind sowohl mit als auch ohne Einfluss der Gebirgsspannung stabil und sind somit nur potentielle Key Blöcke. Der KB in der Firste, welcher mit dem Block Code 011 zu identifizieren ist, stellt den größten potentiellen Key Block dar. Werden für die Berechnung Gebirgsspannungen berücksichtigt, stellt dieser sich als stabil heraus (FoS: 6,857). Bei einer Vernachlässigung der Gebirgsspannungen, zeigt der Block jedoch ein

Versagen durch Gleiten auf einer Fläche auf (FoS: 0,39). Die Kennwerte des Blockes 011 sind in Tabelle 10 aufgelistet, begleitet von der Darstellung der Blockgeometrie in Abbildung 35. In Tabelle 11 sind die konstituierenden Oberflächen des potentiellen Key Blockes 011 aufgelistet.

Tabelle 10: Größter Key Block – Trennflächensystem 0 - Rechnung 0.1 – *Block Theorie*

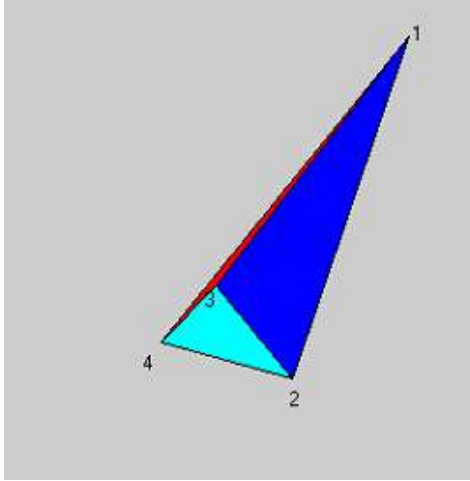
|                                       |                                                                                                                                      |                               |              |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------|
| <b>Größter potentieller Key Block</b> |  <p>Abbildung 35: Firstblock - Block Code 011</p> |                               |              |
|                                       | <b>Block Code</b>                                                                                                                    |                               | 011 (Firste) |
|                                       | <b>FoS</b>                                                                                                                           | <b>mit Gebirgsspannungen</b>  | 6.857        |
|                                       |                                                                                                                                      | <b>ohne Gebirgsspannungen</b> | 0,39         |

Tabelle 11: Größter Key Block – Trennflächensystem 0 - Rechnung 0.1 – *Block Theorie*  
– konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 104                                           | 43                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 127                                           | 36                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 63                                            | 44                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 0                                             | 0                                          | FO                |

### 6.1.1.2 Ausgewertete Ergebnisse – 3DEC

Die Berechnung mit 3DEC zeigt keinerlei Versagen von Blöcken.

In Abbildung 36 ist das Modell der Kaverne aus 3DEC nach 80000 Berechnungsschritten dargestellt. Augenscheinlich ist kein Versagen von Blöcken feststellbar, dies wird durch eine Auswertung der entfernbaren Kluftkörper gemäß Punkt 5.4.4 bestätigt.

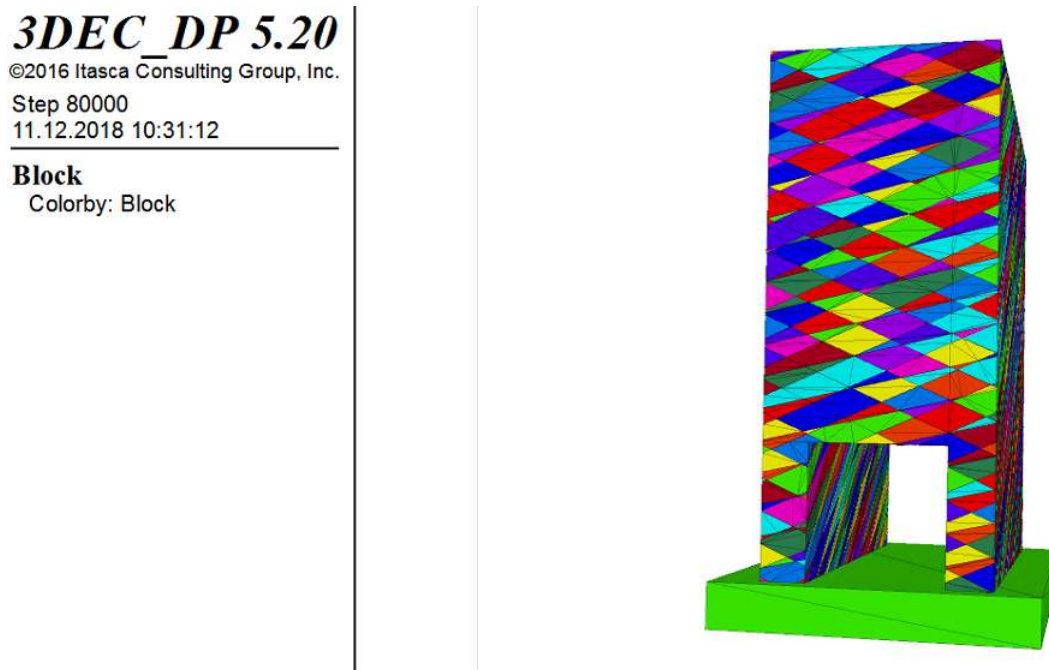


Abbildung 36: Kaverne in 3DEC nach 80000 Berechnungsschritten

## 6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse aus Untersuchung 0

Für die Untersuchung 0 wurde nur die Rechnung 0.1 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnung zeigten ausschließlich, unter Vernachlässigung der Gebirgsspannungen und der Berechnung mit Block Theorie, ein Versagen des KB in der Firste (Block Code 011). Unter der Berücksichtigung von Gebirgsspannungen mit Block Theorie ist kein Versagen in den Berechnungen feststellbar. Dies ist auch für die Ergebnisse gültig, die mit 3DEC ermittelt worden sind.

Die Rechnung 0.1 sollte eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen darstellen. Da jedoch kein Versagen von Kluftkörpern auftrat, wurden keine weiteren Untersuchungen des Trennflächensystems 0 angestrebt.

Da sich das Versagen des Blockes 011 in großer Abhängigkeit zu den Gebirgsspannungen verhält, wurde für weitere Berechnungen die Raumstellung der Trennflächen verändert. Um ein Fallen eines Blockes aus der Firste zu gewährleisten, wurde die Fallrich-

tung der Trennflächenschar K1 um  $180^\circ$  gedreht. Das daraus entstehende Trennflächensystem wurde Trennflächensystem 1 genannt und zum Gegenstand der Untersuchung 1 gemacht.

Das Fallen von Blöcken aus der Firste wird kaum von den Scherparametern in den Trennflächen beeinflusst. Daher üben Gebirgsspannungen auch nur einen geringen Einfluss auf diesen Versagensmechanismus aus.

## 7 Ergebnisse – Untersuchung 1

Die Untersuchung 1 wurde durchgeführt, um das Versagen des Trennflächensystems 1 zu analysieren. Dies geschah unter Berücksichtigung der Variation der Raumstellungen von Trennflächen und der Kinematik.

Es wurden insgesamt 12 Rechnungen durchgeführt, die Rechnungen 1.1 bis 1.12, welche in vier Gruppen zu je drei Rechnungen eingeteilt worden sind. Die einzelnen Gruppen der Rechnungen unterscheiden sich voneinander, anhand der Annahmen zur Raumstellung und Trennflächen und der Kinematik (siehe Berechnungsschema in Abbildung 31). Innerhalb einer Gruppe unterscheiden sich die Rechnungen voneinander durch den einheitlichen Reibungswinkel in den Trennflächen von  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  oder  $40^\circ$ , entsprechend der Tabelle 6.

Die Rechnungen wurden wie in 5.7.1 bis 5.7.4 beschrieben, entsprechend den Anforderungen der Analyse mit *Block Theorie*, *Unwedge* und *3DEC* durchgeführt.

### 7.1 Gruppe 1: Trennflächensystem 1, deterministisch, keine Blockrotation

#### 7.1.1 Ergebnisse Analyse *Block Theorie* / *Unwedge*

Die Ergebnisse der Rechnungen aus Gruppe 1 lieferten 3 potentielle Key Blöcke, jeweils zwei in den Ulmen (Block 010 und Block 101) und einer in der Firste (Block 111) (siehe Abbildung 37). Der Block in der Sohle ist wie schon in Untersuchung 0 bedingungslos stabil.

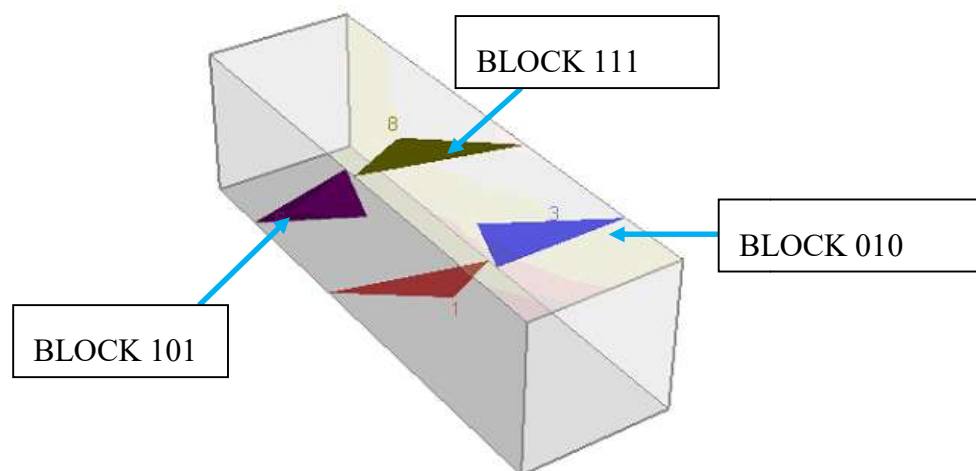


Abbildung 37: Potentielle Key Blöcke der Kaverne – Trennflächensystem 1

In Rechnung 1.1 versagten die Blöcke 101 in der Ulme und der Block 111 in der Firste. Der Ulmenblock 101 ist der größere der beiden Blöcke und versagte durch Gleiten auf einer Fläche. Die Kennwerte dieses KB sind aufgelistet in Tabelle 12, mit einer Darstellung der Geometrie in Abbildung 38. In Tabelle 13 sind die konstituierenden Oberflächen des Key Blockes 101 aufgelistet.

Tabelle 12: Größter Key Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.1 - *Block Theorie*

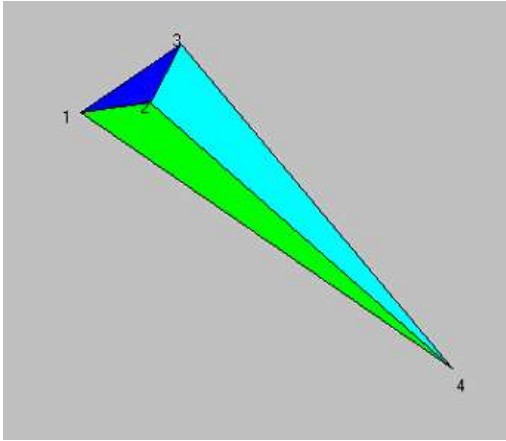
|                          |                                                                                                                                      |                               |            |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------|
| <b>Größter Key Block</b> |  <p>Abbildung 38: Ulmenblock - Block Code 101</p> |                               |            |
|                          | <b>Block Code</b>                                                                                                                    |                               | 101 (Ulme) |
|                          | <b>FoS</b>                                                                                                                           | <b>mit Gebirgsspannungen</b>  | 0,941      |
|                          |                                                                                                                                      | <b>ohne Gebirgsspannungen</b> | 0,501      |
|                          | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                                                                             |                               | 782        |
|                          | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                                                                |                               | 2114       |

Tabelle 13: Größter Key Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.1 - *Block Theorie*  
– konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 284                                           | 43                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 127                                           | 36                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 63                                            | 44                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 0                                             | 90                                         | FO                |



In den Rechnungen 1.2 und 1.3 trat kein Versagen mehr in den Ulmen auf. Dadurch wurde der Block 111 in der Firste zum einzigen Key Block. Dieser hat in den beiden Rechnungen 1.2 und 1.3 versagt. Eine Auflistung der Kennwerte des Blockes befindet sich in Tabelle 14. Die Gestalt des Blockes ist dargestellt in Abbildung 39. In Tabelle 15 sind die konstituierenden Oberflächen des Key Blockes 111 aufgelistet.

Tabelle 14: Größter Key Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.2 - *Block Theorie*

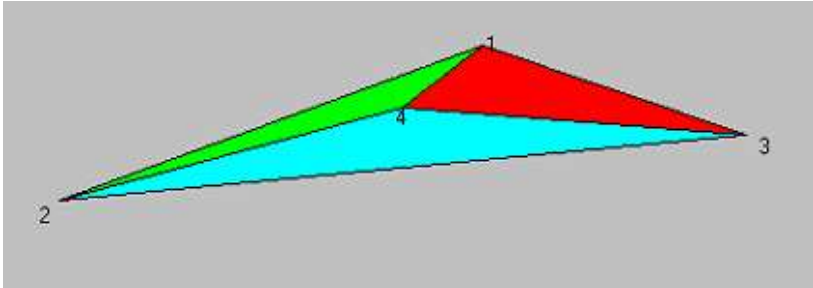
|                          |                                                                                                                                     |              |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Größter Key Block</b> |  <p>Abbildung 39: Firstblock - Block Code 111</p> |              |
|                          | <b>Block Code</b>                                                                                                                   | 111 (Firste) |
|                          | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                                                                            | 158          |
|                          | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                                                               | 428          |

Tabelle 15: Größter Key Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.2 - *Block Theorie*  
– konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 284                                           | 43                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 127                                           | 36                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 63                                            | 44                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 0                                             | 0                                          | FO                |

Der FoS des Blockes 111 in Rechnung 1.2 beträgt 0,01 mit Einfluss der Gebirgsspannungen und 0,0 ohne deren Einfluss. Für Rechnung 1.3 war ein FoS von 0,02 mit und 0,0 ohne Gebirgsspannungen festzustellen. Für diese und alle folgenden Rechnungen hat eine Berücksichtigung der Gebirgsspannungen zu einer leichten Erhöhung der Sicherheit (FoS) geführt. Dies hat jedoch in keinem Fall den FoS auf 1,0 oder darüber erhöht und dadurch ein Versagen des Kluftkörpers verhindern können.

### 7.1.2 Ergebnisse Analyse 3DEC

In Rechnung 1.1 haben insgesamt 53 Blöcke versagt, davon 16 (30,2%) in der Firste und 37 (69,8%) in der Ulme. Das Versagensbild in den Ulmen hat sich auf der Ostseite konzentriert. Die gesamte Masse der versagenden Blöcke betrug dabei 3408 t, die sich zu 811 t (23,8%) auf die Firste und zu 2596 t (76,2%) auf die Ulme verteilt haben.

In Abbildung 40 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.1 nach 65000 Berechnungsschritten dargestellt.

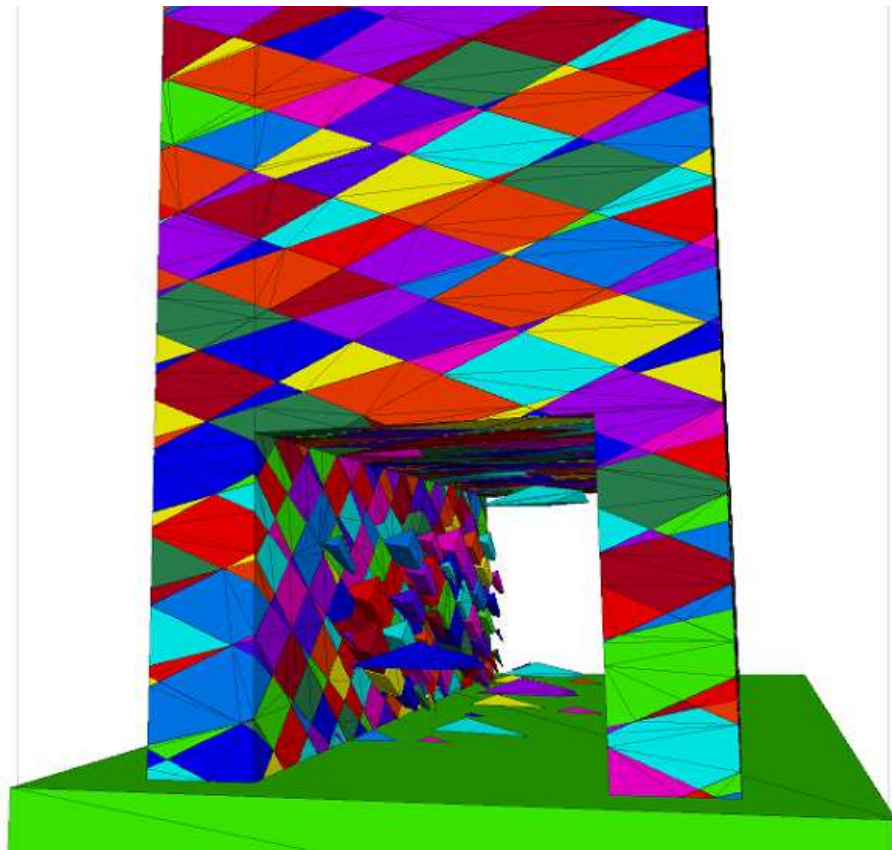


Abbildung 40: Kaverne - Rechnung 1.1 nach 65000 Berechnungsschritten

Der größte versagende Block (Block ID 1791) war in Rechnung 1.1 in der Ulme situiert. Die Kennwerte des Blockes sind in Tabelle 16 aufgelistet, eine Darstellung seiner Geometrie ist der Abbildung 41 zu entnehmen. In Tabelle 17 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 1791 aufgelistet.

Tabelle 16: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.1 – 3DEC

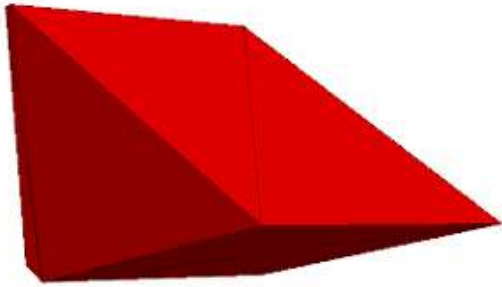
|                      |                                                                                    |           |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 41: Ulmenblock – Block ID 1791                                           |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                    | 1791      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                    | B - Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                           | Ulme      |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                           | 124       |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                              | 336       |

Tabelle 17: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.1 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 63                                            | 44                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 0                                             | 90                                         | FO                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 127                                           | 36                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 284                                           | 43                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 5</b> | 284                                           | 43                                         | K1                |

Durch die Erhöhung des Reibungswinkels in Rechnungen 1.2 und 1.3, ergab sich ein verändertes Versagensbild. Das Versagen trat ausschließlich in der Firste auf. Die Ergebnisse beider Rechnungen waren identisch. Es versagten 16 Blöcke mit einer Masse von insgesamt 567 t.

In Abbildung 42 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.2 und 1.3 nach 65000 Berechnungsschritten dargestellt.

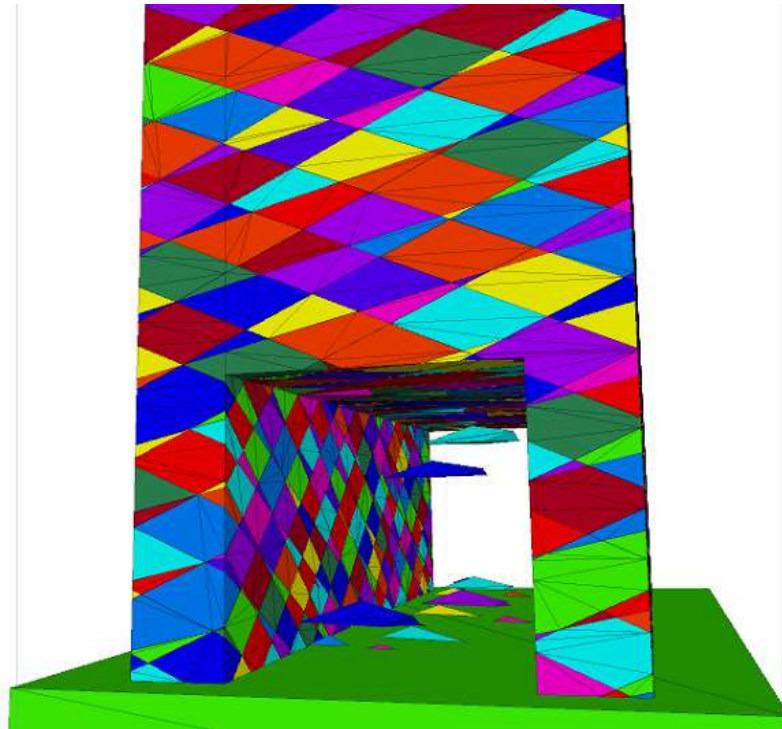


Abbildung 42: Kaverne - Rechnung 1.2 nach 65000 Berechnungsschritten

Die Kennwerte des größten versagenden Blockes (Block ID 1053) sind in Tabelle 18 aufgelistet, in Abbildung 43 ist die Gestalt des Kluftkörpers grafisch dargestellt. In Tabelle 19 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 1053 aufgelistet.

Tabelle 18: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.2 – 3DEC

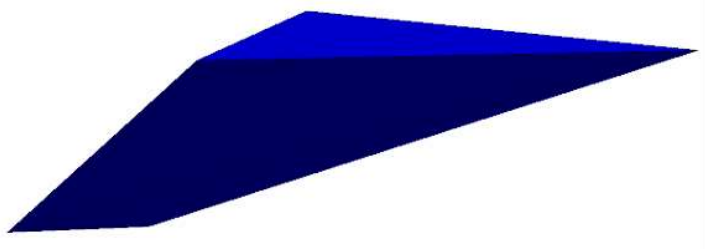
|                      |                                                                                      |           |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 43: Firstblock – Block ID 1053                                             |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                      | 1053      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                      | B - Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                             | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                             | 26,8      |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                | 72,27     |

Tabelle 19: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.2 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| Oberfläche          | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 127                           | 36                         | K2         |
| <b>Oberfläche 2</b> | 284                           | 43                         | K1         |
| <b>Oberfläche 3</b> | 0                             | 0                          | FO         |
| <b>Oberfläche 4</b> | 63                            | 44                         | K3         |
| <b>Oberfläche 5</b> | 63                            | 44                         | K3         |

### Key Block Analyse:

Die Analyse der KB wurde exemplarisch für die Rechnung 1.1 durchgeführt. In dieser Rechnung hat auch die größte Anzahl an Blöcken versagt.

Unter der Annahme, dass Blöcke, die sich aus 4 Oberflächen zusammensetzen, am ehesten als KB zu identifizieren sind, wurden zunächst nur A – Blöcke in Firste und Ulme festgehalten. Sollten diese Blöcke potentielle KB sein, hätte in einer iterativen Berechnung kein Versagen in der Firste und den Ulmen stattfinden dürfen.

Die Untersuchung wurde iterativ durchgeführt. Das Modell der Kaverne ist aus diesem Grunde noch einmal berechnet worden. A- Blöcke, die in der regulären Berechnung versagt hatten, wurden jedoch im Vorfeld durch einen Befehl an ihrer Ausgangsposition fixiert. Im Anschluss an die Berechnung ist untersucht worden, ob ein weiteres Versagen von Blöcken eintrat. Dies diente zur Überprüfung der Annahme, ob einzelne festgehaltene Blöcke als Schlussstein wirken und dadurch andere Blöcke zurückhalten könnten. Darüber hinaus sollte dadurch festgestellt werden, ob festgehaltene Blöcke sich wirklich nicht mehr bewegen.

Diese Vorgehensweise wurde in allen weiteren Key Block Analysen in 3DEC durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass fixierte Blöcke sich nicht von ihrer Ausgangsposition weg bewegen. Ein Versagen einzelner Blöcke in Firste und Ulme ist jedoch weiterhin zu beobachten (siehe Abbildung 44).

In der Firste hat Block 1053 versagt. Dieser Block wird in den Rechnungen 1.2 und 1.3 als größter versagender Block ausgewiesen. In den Ulmen kam es weiterhin zu einem Versagen von Blöcken mit 5 oder mehr Flächen. Die Zerschneidung der Blöcke infolge der Trennflächenabstände führte (infolge der Blockgestalt) zu einem Versagen durch

Gleiten auf zwei Flächen. Die Festhaltung von A- Blöcken hat nichts am Versagensbild in der Ulme verändert sondern nur an ihrem spezifischen Versagensmechanismus.

Anhand dieser Berechnung konnten keine potentiellen KB anhand ihrer Geometrie festgestellt werden. Die geometrische Ähnlichkeit des Blockes 1053 zum KB der Berechnung mit *Block Theorie*, in Rechnung 1.2 und 1.3, hat nahegelegt, dass nicht nur A-Blöcke KB sein können.

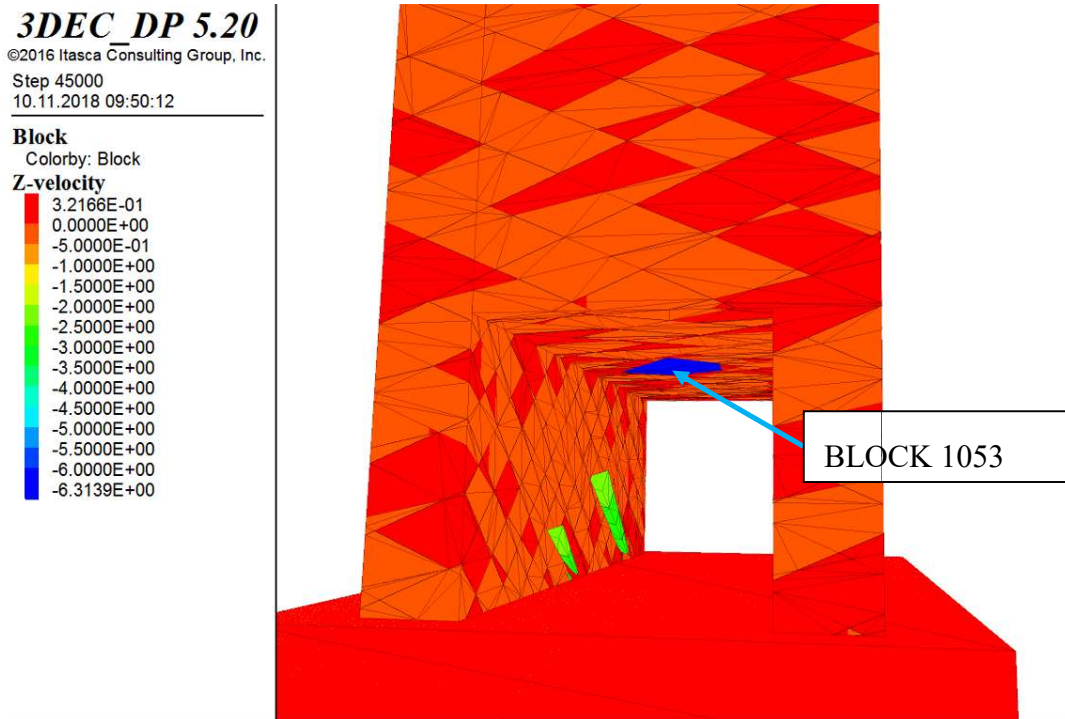


Abbildung 44: Versagensbild infolge Fixierung der A- Blöcke



## 7.2 Gruppe 2: Trennflächensystem 1, deterministisch, mit Blockrotation

Die Rechnungen der Gruppe 2 wurden mit aktivierter Blockrotation und nur unter Einsatz von *3DEC* durchgeführt.

Die Ergebnisse der Rechnung 1.4 wiesen ein Versagen von insgesamt 55 Blöcken aus, davon entfielen 26 Stück (47%) auf die Firste und 29 Stück (53%) auf die Ulme. Wie bereits in Rechnung 1.1 zu erkennen war, trat auch in Rechnung 1.4 nur Versagen in der Ulme, auf der Ostseite der Kaverne, auf. Die Masse der versagenden Kubatur summierte sich zu 2616 t, die sich zu 2069 t (79%) auf die Firste und zu 596 t (21%) auf die Ulme verteilt haben.

In Abbildung 45 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.4 nach 55000 Berechnungsschritten dargestellt.

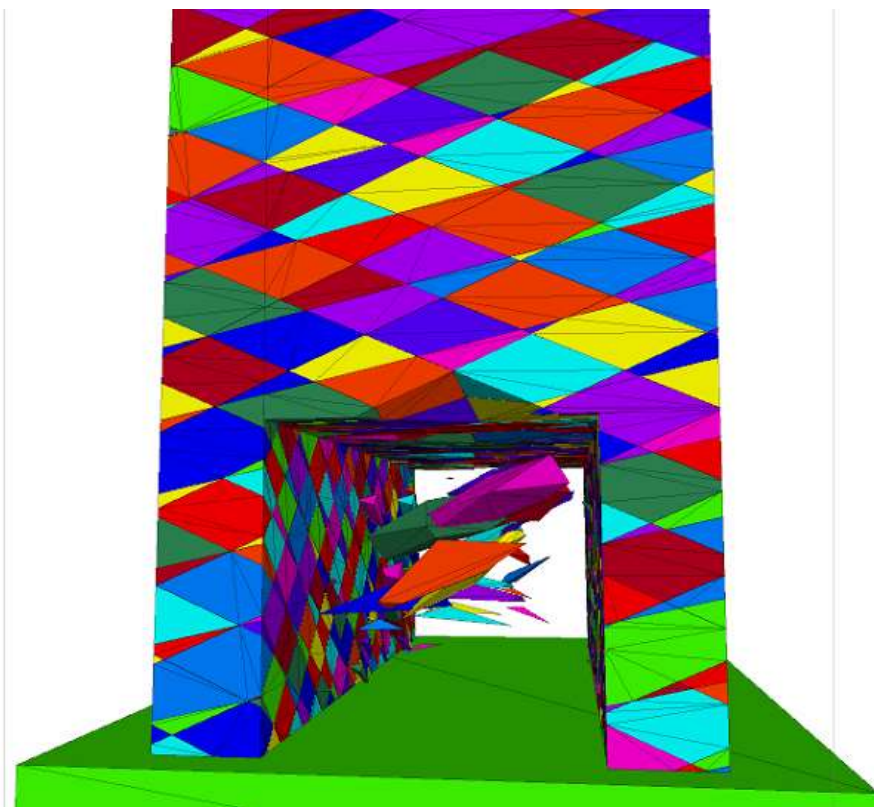


Abbildung 45: Kaverne - Rechnung 1.4 nach 55000 Berechnungsschritten

Der größte versagende Block, mit der Block ID 1054, war in Rechnung 1.4 in der Firste zu identifizieren. Eine Zusammenstellung der Kennwerte des Blockes ist in Tabelle 20 aufgelistet. Die Darstellung der Blockgestalt ist der Abbildung 46 zu entnehmen. In Tabelle 21 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 1054 aufgelistet.

Tabelle 20: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.4 – 3DEC

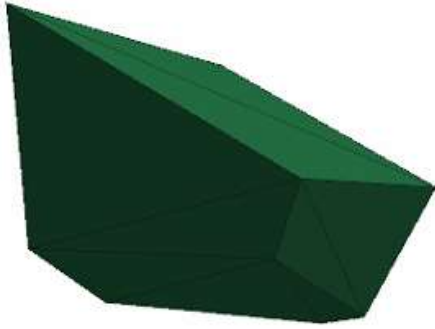
|                      |                                                                                    |           |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 46: Firstblock – Block ID 1054                                           |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                    | 1054      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                    | D – Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                           | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                           | 178       |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                              | 482       |

Tabelle 21: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.4 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 63                                            | 44                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 127                                           | 36                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 284                                           | 43                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 0                                             | 0                                          | FO                |
| <b>Oberfläche 5</b> | 284                                           | 43                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 6</b> | 127                                           | 36                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 7</b> | 63                                            | 44                                         | K3                |

Die Ergebnisse für das Versagensbild in der Rechnung 1.5 und 1.6 aus 3DEC sind ident. Ein Versagen trat bei 20 Blöcken und nur in der Firste ein. Die Masse der Blöcke betrug dabei 1157 t.

In Abbildung 47 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.5 und 1.6 nach 55000 Berechnungsschritten dargestellt.



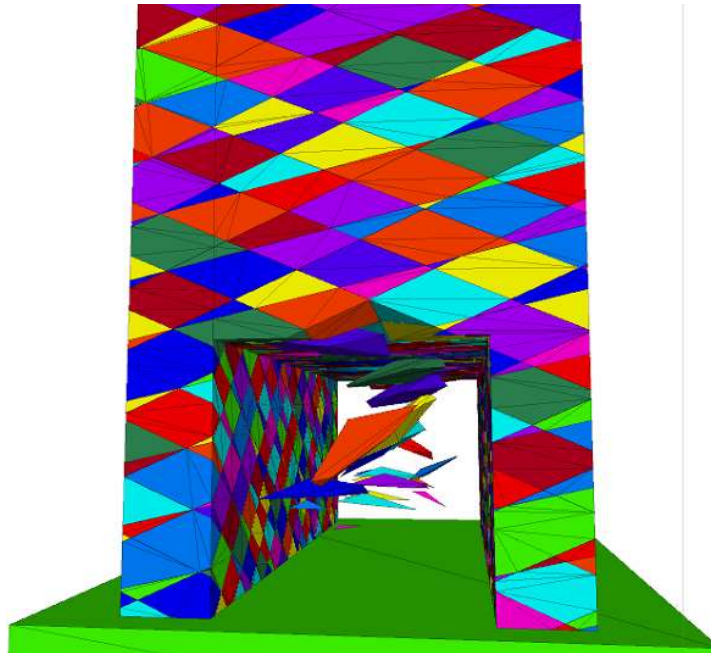


Abbildung 47: Kaverne - Rechnung 1.5 und 1.6 nach 55000 Berechnungsschritten

Der in Abbildung 48 dargestellte Block, mit der Block ID 2092, ist der größte versagende Block der Rechnungen 1.5 und der Rechnung 1.6. Die Kennwerte von Block 2092 sind der Tabelle 22 zu entnehmen. In Tabelle 23 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 2092 aufgelistet.

Tabelle 22: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.5 – 3DEC

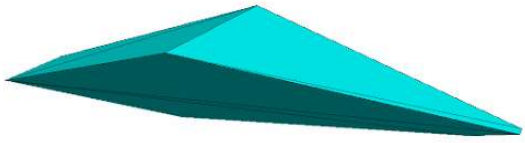
|                      |                                                                                      |           |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 48: Firstblock – Block ID 2092                                             |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                      | 2092      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                      | C – Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                             | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                             | 60,7      |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                | 163,9     |

Tabelle 23: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.5 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| Oberfläche          | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 63                            | 44                         | K3         |
| <b>Oberfläche 2</b> | 0                             | 0                          | FO         |
| <b>Oberfläche 3</b> | 284                           | 43                         | K1         |
| <b>Oberfläche 4</b> | 127                           | 36                         | K2         |
| <b>Oberfläche 5</b> | 284                           | 43                         | K1         |
| <b>Oberfläche 6</b> | 127                           | 36                         | K2         |

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Rechnungen 1.5 und 1.6 ein identes Versagensbild zur Folge haben.

Einige Blöcke, die in Rechnung 1.4 noch in der Firste versagt haben, blieben an ihrer Ausgangsposition in weiteren Berechnungen der Gruppe 2. Dies traf auch für den größten Block in der Rechnung 1.4 zu, der in den Berechnungen 1.5 und 1.6 nicht versagt hat.

### Key Block Analyse:

Die Key Block Analyse wurde exemplarisch für die Rechnung 1.4 durchgeführt. Sie gilt analog für die Rechnungen 1.5 und 1.6, in denen eine geringere Anzahl an Blöcken versagt hat. Die Vorgehensweise der Key Block Analyse wurde analog zur Rechnung 1.1 durchgeführt.

Da in der Firste nur ein Block mit 4 konstituierenden Flächen (A- Block) zu identifizieren war, wurden in der Analyse auch B- Blöcke festgehalten. In der Ulme war eine größere Anzahl an A- Blöcken zu identifizieren. Daher wurden in der Ulme nur A – Blöcke fixiert.

Die vorgenommene Fixierung führte zu keiner Stabilisation der gesamten Kaverne. In den iterativen Berechnungen haben Blöcke sowohl in der Firste als auch in den Ulmen versagt.

### 7.3 Gruppe 3: Trennflächensystem 1, probabilistisch, keine Blockrotation

#### 7.3.1.1 Rechnungen 1.7 – 1.9, Block Theorie/Unwedge

Die ausgewiesene Lage potentieller Key Blocks der Rechnungen aus Gruppe 3 entspricht der Lage der KB aus Gruppe 1, entsprechend der Abbildung 34. Durch die Variation der Raumstellungen von Trennflächen, verändert sich jedoch das Volumen und die Masse der potentiellen KB. Da bei einer probabilistischen Verteilung der Trennflächen- ausrichtung immer nur ein FoS für eine Stichprobe gegeben werden kann, ist auch das Versagen von Key Blöcken anders zu interpretieren als in Rechnungen der Gruppe 1.

Für die Auswertung der Rechnungen aus Gruppe 3 wurde eine Versagenswahrscheinlichkeit  $\leq 1\%$  als quasi- stabiles Verhalten interpretiert. Jeder Key Block, der über eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit in der probabilistischen Berechnung verfügt, wird daher als instabil angesehen.

In der Rechnung 1.7 versagen Blöcke in der Firste (Block Code 111) und in der Ulme an der Ostseite der Kaverne (Block Code 101). Block 101 ist anhand seiner Größe der maßgebliche der beiden Blöcke, seine Kennwerte sind in Tabelle 24 aufgelistet. Der Block versagt durch Gleiten auf einer Fläche.

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Blockes ergibt sich unter Berücksichtigung der Gebirgsspannungen zu 49,6%. Eine Vernachlässigung der In Situ vorliegenden Gebirgsspannungen führt zu einer Wahrscheinlichkeit des Versagens von 86,7 %.

Tabelle 24: Größter Key Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.7 – *Block Theorie*

| <b>Größter Block</b> | <b>Block Code</b>        | 101 (Ulme) |
|----------------------|--------------------------|------------|
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b> | 7777       |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>    | 21000      |

Die großen Abweichungen in Masse und Volumen des Blockes 101, in den Rechnungen 1.1 und 1.7, resultieren aus der Verteilung der Trennflächen ausrichtung. Daten zum Blockvolumen und der Versagenswahrscheinlichkeit wurden aus dem Diagramm der Verteilung entnommen, eine explizite grafische Darstellung des Blockes ist nicht möglich.

In den Rechnungen 1.8 und 1.9 ergab sich nur das Versagen kleinerer Blöcke in der Ulme. Der Firstblock 111 wurde dadurch zum maßgeblichen Key Block. Die Kennwerte des Firstblockes sind der Tabelle 25 zu entnehmen.

Tabelle 25: Größter Key Block - TS 1 - Rechnung 1.8 – *Block Theorie*

|                      |                                         |                               |       |
|----------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|-------|
| <b>Größter Block</b> | <b>Block Code</b>                       |                               | 111   |
|                      | <b>Wahrscheinlichkeit des Versagens</b> | <b>mit Gebirgsspannungen</b>  | 0.973 |
|                      |                                         | <b>ohne Gebirgsspannungen</b> | 1,0   |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                |                               | 2224  |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                   |                               | 6005  |

In Rechnung 1.8 ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Blockes, unter Berücksichtigung der Gebirgsspannungen, zu 97,3%. Werden die Gebirgsspannungen jedoch vernachlässigt, tritt ein Versagen des Firstblockes mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % ein.

In Rechnung 1.9 zeigt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit des Blockes von 95,1 %, mit Ansatz der Gebirgsspannungen und von 98,3 % ohne deren Berücksichtigung.

### 7.3.1.2 Rechnungen 1.7 – 1. 9, 3DEC

Die Rechnung 1.7 hat in der Berechnung mit 3DEC in einem Versagen von 26 Blöcken resultiert, die sich zu 16 Stück (61,5%) auf die Firste und zu 10 Stück (38,5%) auf die Ulmen aufgeteilt haben. Die gesamte Masse der Blöcke summierte sich auf 954,4 t, aus denen 973,3 t auf die Firste und lediglich 17,8 t auf die Ulme entfallen sind.

Als größten versagenden Block der Rechnung konnte man Block 1816 in der Firste identifizieren, dessen Gestalt in Abbildung 49 dargestellt und dessen Kennwerte in Tabelle 26 aufgelistet sind. In Tabelle 27 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 1816 aufgelistet.

Tabelle 26: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.7 – 3DEC

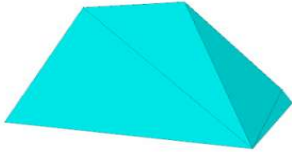
|                      |                                                                                      |           |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 49: Firstblock – Block ID 1816                                             |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                      | 1816      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                      | B – Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                             | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                             | 95        |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                | 256,5     |

Tabelle 27: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.7 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| Oberfläche          | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 53,28                         | 52,35                      | K3         |
| <b>Oberfläche 2</b> | 122                           | 39                         | K2         |
| <b>Oberfläche 3</b> | 268,36                        | 50,05                      | K1         |
| <b>Oberfläche 4</b> | 271,6                         | 50,05                      | K1         |
| <b>Oberfläche 5</b> | 0                             | 0                          | FO         |

In Rechnung 1.8 resultierte die Berechnung in einem Versagen von 13 Blöcken, deren Anteil in der Firste 9 Stück (69,23 %) und in der Ulme 4 Stück (30,76%) betrug. Ihre Masse ergab sich zu 431,8 t, davon sind 430,2 t (99,6%) auf versagende Kubatur in der Firste und 1,6 t (0,4%) auf die Ulme entfallen.

In Abbildung 50 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.8 nach 65000 Berechnungsschritten dargestellt.

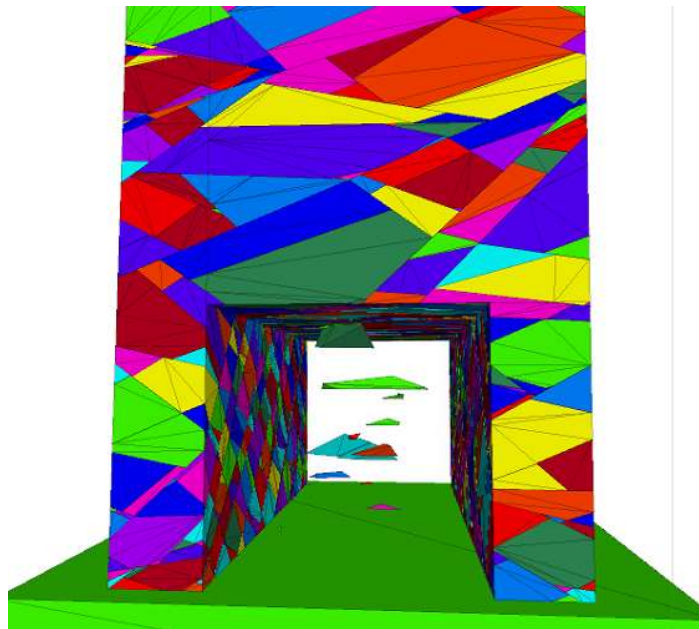


Abbildung 50: Kaverne - Rechnung 1.8 nach 65000 Berechnungsschritten

Die Rechnung 1.9 hat ein Versagen von 13 Blöcken aufgezeigt, die sich zu 6 Stück (86 %) in der Firste und einem Stück (14 %) in der Ulme, aufgeteilt haben. Ihre Masse ergab sich zu 305 t. Davon sind 304,98 t (99,9%) auf versagende Kubatur in der Firste und 0,02 t (<0,1%) auf die Ulme entfallen.

In Abbildung 51 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.9 nach 65000 Berechnungsschritten dargestellt.

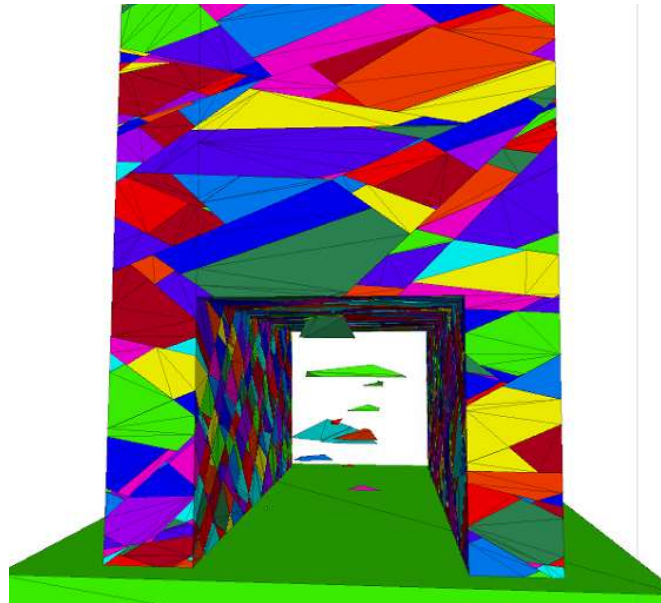


Abbildung 51: Kaverne - Rechnung 1.9 nach 65000 Berechnungsschritten

Als maßgeblich für die Rechnungen 1.8 und 1.9 wurde der Block 2428 in der Firste identifiziert, dessen Daten in Tabelle 28 aufgelistet sind. Die Gestalt des Blockes ist in Abbildung 52 dargestellt. In Tabelle 29 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 2428 aufgelistet.

Tabelle 28: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.8 – 3DEC

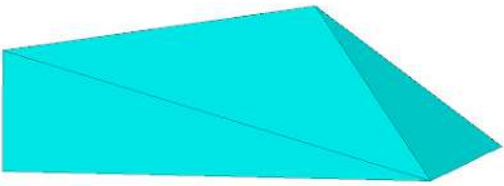
|                      |                                                                                      |           |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 52: Firstblock – Block ID 2428                                             |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                      | 2428      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                      | C – Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                             | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                             | 73        |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                | 197,36    |

Tabelle 29: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.8 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| Oberfläche          | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 132,05                        | 39,8                       | K3         |
| <b>Oberfläche 2</b> | 137,95                        | 39,8                       | K2         |
| <b>Oberfläche 3</b> | 0                             | 0                          | FO         |
| <b>Oberfläche 4</b> | 121,09                        | 42,1                       | K2         |
| <b>Oberfläche 5</b> | 253,64                        | 45,41                      | K1         |
| <b>Oberfläche 6</b> | 244,6                         | 45,9                       | K1         |

### Key Block Analyse:

In der Firste war lediglich ein A- Block zu identifizieren (Block ID 1793, 1,7 to, 0,63 m<sup>3</sup>). Aus diesem Grunde wurden für die Key Block Analyse in der Firste der A- Block 1793 und alle B- Blöcke fixiert. In der Ulme fand lediglich die Fixierung von A- Blöcken statt, die dort in größerer Anzahl auftraten.

Die vorgenommene Fixierung hinderte jedoch keine Blöcke mit einer höheren Zahl an konstituierenden Flächen am Versagen. Die versagenden Blöcke waren als C- und D- Blöcke zu identifizieren.

In den Rechnungen der Gruppen 1, 2 und 3 waren keine eindeutigen Ergebnisse aus der Key Block Analyse zu gewinnen. Daher wurde diese in den Rechnungen der Gruppe 4 nicht weiter verfolgt.

## 7.4 Gruppe 4: Trennflächensystem 1, probabilistisch, mit Blockrotation

Die Rechnungen der Gruppe 4 berücksichtigen eine Zufallsverteilung der Raumstellungen von Trennflächen ebenso wie die Rotation der Blöcke. Eine Berücksichtigung der Blockrotation schließt eine Anwendung der Block Theorie aus, weshalb die Berechnungen nur mit 3DEC ausgeführt wurden.

Rechnung 1.10 zeigte ein Versagen von 37 Blöcken, die sich zusammensetzten aus 22 Blöcken (59,5%) in der Firste und 15 Blöcke (40,5%) in der Ulme. Zusammenfassend betrug die Masse der versagenden Kubatur im Modell 1984,3 t, die sich zu 312,99 t (15,7%) auf die Firste und 1671 t (84,22%) auf die Ulme verteilt haben.

Das Versagen in der Ulme trat für die Rechnungen der Gruppe 4 stets an einer Seite der Kaverne auf.

In Abbildung 53 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.10 nach 55000 Berechnungsschritten dargestellt.

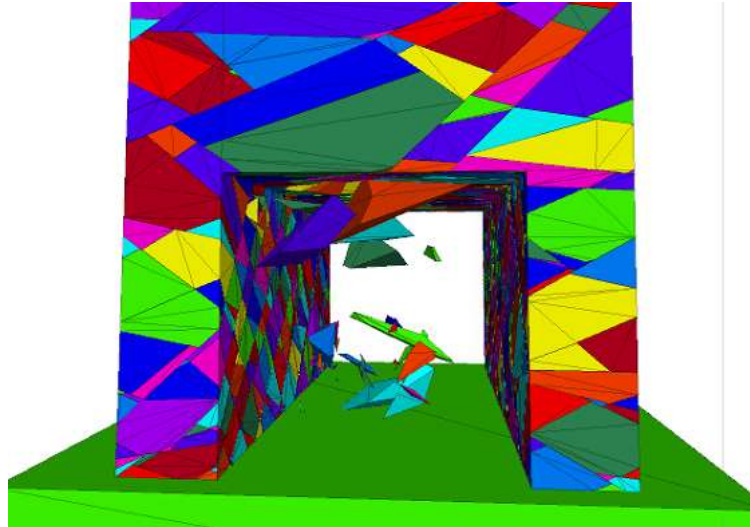


Abbildung 53: Kaverne - Rechnung 1.10 nach 55000 Berechnungsschritten

Die Auswertung wies den Firstblock mit Block ID 1890 als größten Block aus. Die ausgewerteten Daten des Blockes sind zusammengefasst in Tabelle 30. Eine grafische Darstellung von Block 1890 ist in Abbildung 54 gegeben. In Tabelle 31 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 1890 aufgelistet.

Tabelle 30: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.10 – 3DEC

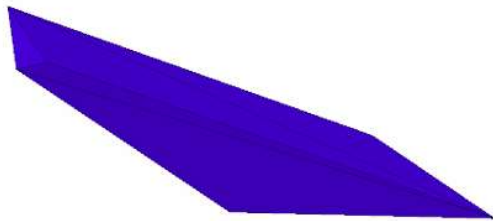
|                      |                                                                                      |          |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Größter Block</b> |  |          |
|                      | Abbildung 54: Firstblock – Block ID 1890                                             |          |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                      | 1890     |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                      | E- Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                             | Firste   |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                             | 734      |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                | 1984     |



Tabelle 31: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.10 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| Oberfläche   | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|--------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| Oberfläche 1 | 88,55                         | 26,52                      | K2         |
| Oberfläche 2 | 311                           | 35                         | K1         |
| Oberfläche 3 | 0                             | 0                          | FO         |
| Oberfläche 4 | 317                           | 54                         | K1         |
| Oberfläche 5 | 151                           | 34,28                      | K2         |
| Oberfläche 6 | 74,45                         | 37,49                      | K3         |
| Oberfläche 7 | 158                           | 50                         | K2         |
| Oberfläche 8 | 68                            | 49                         | K3         |

In der Rechnung 1.11 ist ein Versagen von 23 Blöcken eingetreten. Diese haben sich zu 19 Stück (82,6%) auf die Firste und zu 4 Stück (17,4%) auf die Ulme verteilt. Die Masse dieser Blöcke summierte sich zu 1654 t. Diese hat sich wiederum zu 1457 t (88%) auf die Firste und 197 t (12%) auf die Ulme aufgeteilt.

In Abbildung 55 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.11 nach 55000 Berechnungsschritten dargestellt.

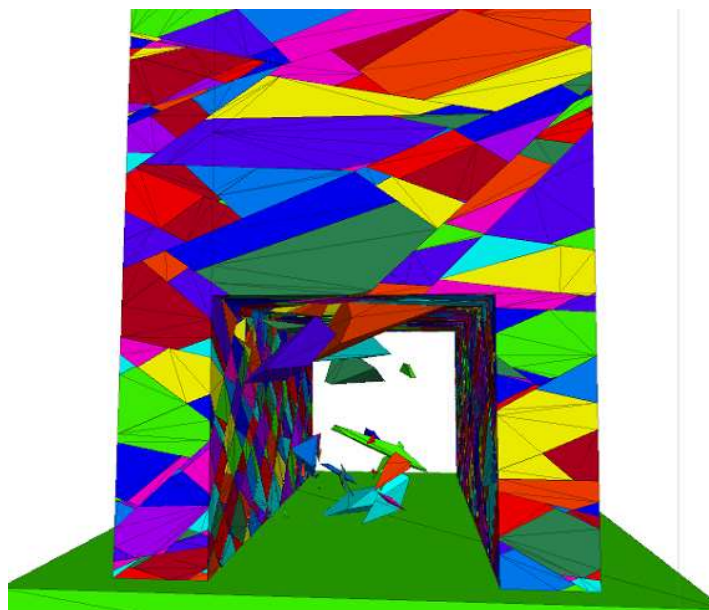


Abbildung 55: Kaverne - Rechnung 1.11 nach 55000 Berechnungsschritten

Die Kennwerte des maßgeblichen versagenden Blockes 1793, sind in Tabelle 32 zusammengestellt. Die Geometrie des Blockes ist in Abbildung 56 dargestellt. In Tabelle 33 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 1793 aufgelistet.

Tabelle 32: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.11 – 3DEC

|                      |                                                                                                                                    |           |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  <p>Abbildung 56: Firstblock – Block ID 1793</p> |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                                                                    | 1793      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                                                                    | A - Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                                                                           | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                                                                           | 95        |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                                                              | 256,5     |

Tabelle 33: Größter Block - Trennflächensystem 1 - Rechnung 1.11 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 263                                           | 41                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 138                                           | 42                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 0                                             | 0                                          | FO                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 67                                            | 35                                         | K1                |

In der Rechnung 1.12 wurde ein Versagen von 11 Blöcken ermittelt, deren Masse 374,7 t betragen hat. Diese Blöcke haben sich zu 9 Stück (81,8%), mit einer Masse von 215,8 t (57,5%), auf die Firste und mit 2 Stück (18,2 %), deren Masse 158,9 t (42,4 % ) betrug, auf die Ulme verteilt.

In Abbildung 57 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 1.12 nach 55000 Berechnungsschritten dargestellt.

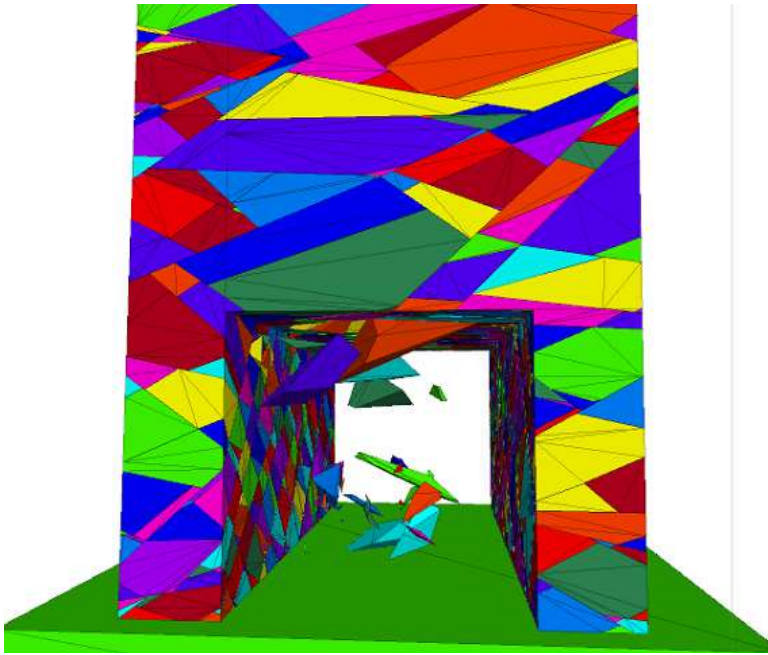


Abbildung 57: Kaverne - Rechnung 1.12 nach 55000 Berechnungsschritten

In Rechnung 1.12 stellte sich die Masse des Blockes 1793 ebenfalls als maßgeblich heraus.

## 7.5 Zusatzuntersuchung: Auswirkung der Rotation von Blöcken

Die Rechnungen der Gruppen 1 und 2 in Untersuchung 1 unterscheiden sich in ihren Berechnungsannahmen, anhand der Kinematik versagender Blöcke. Wie in 5.7.1 definiert, wird für die Rechnungen der Gruppe 1 eine reine Translation von Blöcken angenommen. Für Rechnungen der Gruppe 2 wurde, wie bereits in 5.7.2 festgelegt, auch eine Rotation von Blöcken zugelassen.

In den Rechnungen 1.2 und 1.3 der Gruppe 1 sowie den Rechnungen 1.5 und 1.6 der Gruppe 2 tritt das Versagen von Blöcken ausschließlich in der Firste ein. Das Trennflächengefüge des Modelles wie auch die Nummerierung der Blöcke sind in beiden Gruppen ident.

Der maßgebliche Block in den Rechnungen 1.2 und 1.3 wurde identifiziert als Block 1053. In den Rechnungen 1.5 und 1.6 trug der größte Block jedoch die ID 2092. Aus der Darstellung der Blockgeometrie und der Kennwerte, in Abbildung 43 und Abbildung 48 sowie Tabelle 18 und Tabelle 22, lässt sich eine geometrische Ähnlichkeit beider Blöcke ableiten. Durch den festgelegten Trennflächenabstand von 5,0 m, verfügt Block 2092 eine zusätzliche Oberfläche. Beide Blöcke unterscheiden sich außerdem durch ihre Kubatur. Der Block 2092 verfügt mit  $60,7\text{m}^3$  über mehr als das doppelte des Volumens von Block 1053, mit  $26,8\text{m}^3$ .

Zweck der zusätzlichen Untersuchung ist es daher festzustellen, ob ein Einfluss der Rotation die Loslösung wesentlich größerer Blöcke aus dem Gefüge ermöglicht.

### 7.5.1 Untersuchung der Kinematik des Blockes 2092

Um die Auswirkung der Rotation von Block 2092 untersuchen zu können, wurden die vertikale Geschwindigkeit und Verschiebung sowie die Winkelgeschwindigkeit eines Blockes in festgelegten Intervallen ermittelt.

Aufgezeichnet wurden die Werte im Initialzustand (10000 Berechnungsschritte) sowie nach 15000 und 30000 Berechnungsschritten. Die Ausgewerteten Daten sind der Tabelle 34 zu entnehmen. Der Block selbst ist von einem festgelegten Betrachtungswinkel aus gesehen, in Abbildung 58 bis Abbildung 60, zu den jeweils festgelegten Intervallen dargestellt.

Tabelle 34: Geschwindigkeit, Rotation und Verschiebung – Block 2092

| <b>Darstellung</b>                 | <br>Abbildung 58: 10000 Steps - Initialzustand | <br>Abbildung 59: 15000 Steps | <br>Abbildung 60: 30000 Steps |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Intervall</b>                   | 10000 Steps                                                                                                                      | 15000 Steps                                                                                                       | 30000 Steps                                                                                                        |
| <b><math>v - z</math> [m/s]</b>    | 0,0                                                                                                                              | 3,43                                                                                                              | 5,98                                                                                                               |
| <b><math>Rv - x</math> [rad/s]</b> | 0,0                                                                                                                              | -0,03                                                                                                             | -0,31                                                                                                              |
| <b><math>Rv - y</math> [rad/s]</b> | 0,0                                                                                                                              | 0,0055                                                                                                            | 0,091                                                                                                              |
| <b><math>Rv - z</math> [rad/s]</b> | 0,0                                                                                                                              | 0,0094                                                                                                            | 0,067                                                                                                              |
| <b><math>\delta z</math> [m]</b>   | 0,0                                                                                                                              | 0,5406                                                                                                            | 2,8324                                                                                                             |
| <b><math>\Delta z</math> [m]</b>   | 0,0                                                                                                                              | 0,5406                                                                                                            | 3,373                                                                                                              |
| <b><math>\delta t^*</math> [s]</b> | 0,0                                                                                                                              | 0,14                                                                                                              | 0,52                                                                                                               |
| <b><math>\Delta t^*</math> [s]</b> | 0,0                                                                                                                              | 0,14                                                                                                              | 0,66                                                                                                               |
| *) linearisiert berechnet          |                                                                                                                                  |                                                                                                                   |                                                                                                                    |

**Legende zu Tabelle 34:**

- $v - z$  ..... Blockgeschwindigkeit parallel zur Z- Achse
- $Rv - x$  ..... Rotationsgeschwindigkeit des Blockes um x –Achse
- $Rv - y$  ..... Rotationsgeschwindigkeit des Blockes um y – Achse
- $Rv - z$  ..... Rotationsgeschwindigkeit des Blockes um z- Achse
- $\Delta z$  ..... Absolute vertikale Verschiebung des Blockes
- $\delta z$  ..... Vertikale Relativverschiebung des Blockes je Intervall
- $\delta t$  ..... Relatives zeitliches Intervall
- $\Delta t$  ..... Summe der verstrichenen Zeit seit dem Initialzustand

Die Daten zur Verschiebung und Winkelgeschwindigkeit des Blockes, aus Tabelle 34, zeigen eine erkennbare Rotation ab 15000 Berechnungsschritten. In diesem Zeitintervall hat bereits eine vertikale Verschiebung des Blockes von 54 cm stattgefunden.

Eine augenscheinlich erkennbare Verdrehung des Blockes ist erst nach 30000 Berechnungsschritten, in Abbildung 60, erkennbar.

## **7.6 Zusatzuntersuchung: Änderung des Versagensmechanismus**

Eine grundlegende Fragestellung der Untersuchungen in dieser These, befasst sich damit, ob eine Variation der Raumstellungen von Trennflächen bzw. Trennflächenscharen auch den Versagensmechanismus von Kluftkörpern (Blöcken) verändern kann. (Poisel et al., 2017)

Dies würde bedeuten, dass ein Gleiten eines Blockes zu einem Fallen wird oder ein zu steiler Fallwinkel einer Trennfläche die Stabilität eines darauf liegenden Blockes gefährden würde.

Ein wesentlicher Unterschied der Mechanismen Gleiten und Fallen, ist deren Abhängigkeit von den Scherparametern. Das Gleiten eines Blockes kann durch einen entsprechend hohen Reibungswinkel verhindert werden, wohingegen Fallen unabhängig von den Scherparametern auftritt.

Der Ansatz dieser Zusatzuntersuchung ist die Frage, ob durch die Veränderung der Trennflächenausrichtung eine Veränderung des Versagens von Kluftkörpern (Blockversagen) eintreten kann bzw. ob auf ein solches Verhalten aus den Ergebnissen der Berechnungen geschlossen werden kann. Zu diesem Zweck wurden die Daten der Rech-

nungen aus Gruppe 3 und Gruppe 4 ausgewertet, in denen eine Variation der Raumstellungen von Trennflächen berücksichtigt wurde.

### 7.6.1 Versagen von Firstblöcken – Berechnungen mit 3DEC

In den Rechnungen der Gruppen 1 und 2 (deterministisch) bewirkt eine Erhöhung des Reibungswinkels der Trennflächen, von  $25^\circ$  auf  $40^\circ$ , keine Änderung des Versagensbildes (siehe Kapitel 7, Pkt. 7.1. und 7.2).

Dies spiegelt sich nicht wieder in den Ergebnissen aus den Gruppen 3 und 4 (probabilistisch). Durch die Erhöhung von  $\phi$  von  $25^\circ$  auf  $40^\circ$  verändert sich bei diesen Berechnungen die Anzahl versagender Blöcke in der Firste.

In den Rechnungen der Gruppe 3 verringert sich die Anzahl versagender Blöcke in der Firste, von 9 auf 6 Blöcke, in Gruppe 4 von 19 auf 9 Blöcke.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass es zu einer Veränderung des Versagensmechanismus, von Fallen zu Gleiten kommt. Eine genaue Aussage ist erst durch eine kombinierte Analyse mit *Block Theorie* möglich.

### 7.6.2 Berechnungen mit Block Theorie – Rechnungen Gruppe 3

Die Rechnungen der Gruppe 3 (probabilistisch) wurden sowohl mit *Block Theorie* und *Unwedge* als auch mit *3DEC* durchgeführt.

Eine Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen wurde in *Unwedge* mit der Standard- Normalverteilung, in *3DEC* jedoch mittels linearer Verteilung durchgeführt. Trotz dieses Unterschiedes in der Verteilung, ist ein qualitativer Vergleich der Ergebnisse möglich.

Der Reibungswinkel  $\phi$  wurde in Rechnung 1.8 mit  $25^\circ$  angenommen. Das Versagen des Firstblockes resultierte in *Unwedge* mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,3% unter Berücksichtigung der Gebirgsspannungen und 100% ohne Berücksichtigung der Gebirgsspannungen. Die Erhöhung von  $\phi$  auf  $40^\circ$ , bewirkte eine Veränderung dieser Wahrscheinlichkeiten auf 95,1% mit und auf 98,3% ohne Gebirgsspannungen.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Berechnungen ohne Gebirgsspannungen hat gezeigt, dass ein Versagen abhängig ist vom Reibungswinkel in den Trennflächen. Ein Fallen von Blöcken, ohne Einwirkung eines Seitendruckes, müsste vollkommen unbeeinflusst sein durch eine Veränderung von  $\phi$ . Die Ergebnisse der Untersuchung mittels *Block Theorie* gemeinsam mit *3DEC* lassen den Schluss zu, dass es zu einer Veränderung des Versagensmechanismus, von Fallen hin zum Gleiten kommt.

### 7.6.3 Exemplarische Auswertung zur Ausarbeitung einer Methodik zur Verifikation des Versagensmechanismus

Es wurde eine exemplarische Analyse eines Firstblockes zur gesicherten Verifikation des Mechanismus des Blockversagens durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein Firstblock aus den Berechnungen mit *3DEC* herangezogen, der in Rechnung 1.8 und 1.11 ( $\varphi=25^\circ$ ) versagt hat, jedoch in der Rechnung 1.9 und 1.12 ( $\varphi=40^\circ$ ) stabil war. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Kluftkörper in Abhängigkeit von der Scherfestigkeit der Trennflächen versagt.

Der Ausgewählte Block (*3DEC*: Block ID 2614) ist in Abbildung 61 dargestellt, seine Kennwerte sind der Tabelle 35 zu entnehmen. In Tabelle 36 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 2614 aufgelistet.

Tabelle 35: Block 2614

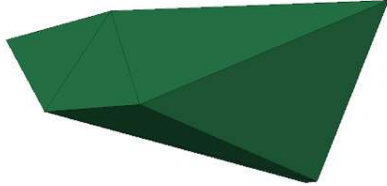
|                      |                                                                                                                        |           |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  <p>Abbildung 61: Block ID 2614</p> |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                                                        | 2614      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                                                        | C - Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                                                               | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                                                               | 55,6      |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                                                                  | 150       |

Tabelle 36: Block 2614 – konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 148                                           | 42                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 0                                             | 0                                          | FO                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 132                                           | 39                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 71                                            | 51                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 5</b> | 264                                           | 45                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 6</b> | 254                                           | 51                                         | K1                |

Zur Bestimmung des Versagensmechanismus war eine Untersuchung mit *Block Theorie* notwendig. Hierfür wurden die Raumstellungen der Trennflächen und der freien Oberfläche aus der *3DEC*- Analyse (s. Tabelle 35) im Programm *Block Theorie* eingegeben. Eine Eingabe aller sechs konstituierenden Oberflächen ergab jedoch keinen plausiblen Key Block. Unter strenger Beachtung der Block Theorie (Theorem der Entfernbareit 3.2.2), ist der Block 2614 ein verjüngter Block und kann daher auch kein Key Block sein.

Das Versagen von Block 2614 musste daher in Zusammenhang mit den ihn umgebenden Kluftkörpern untersucht werden. Aus Abbildung 62 ist ersichtlich, dass Block 2614 als Teil einer Gruppe von Kluftkörpern versagt. Diese Gruppe besteht aus den Blöcken mit der Block ID 499, 2248, 2614 und 2928.

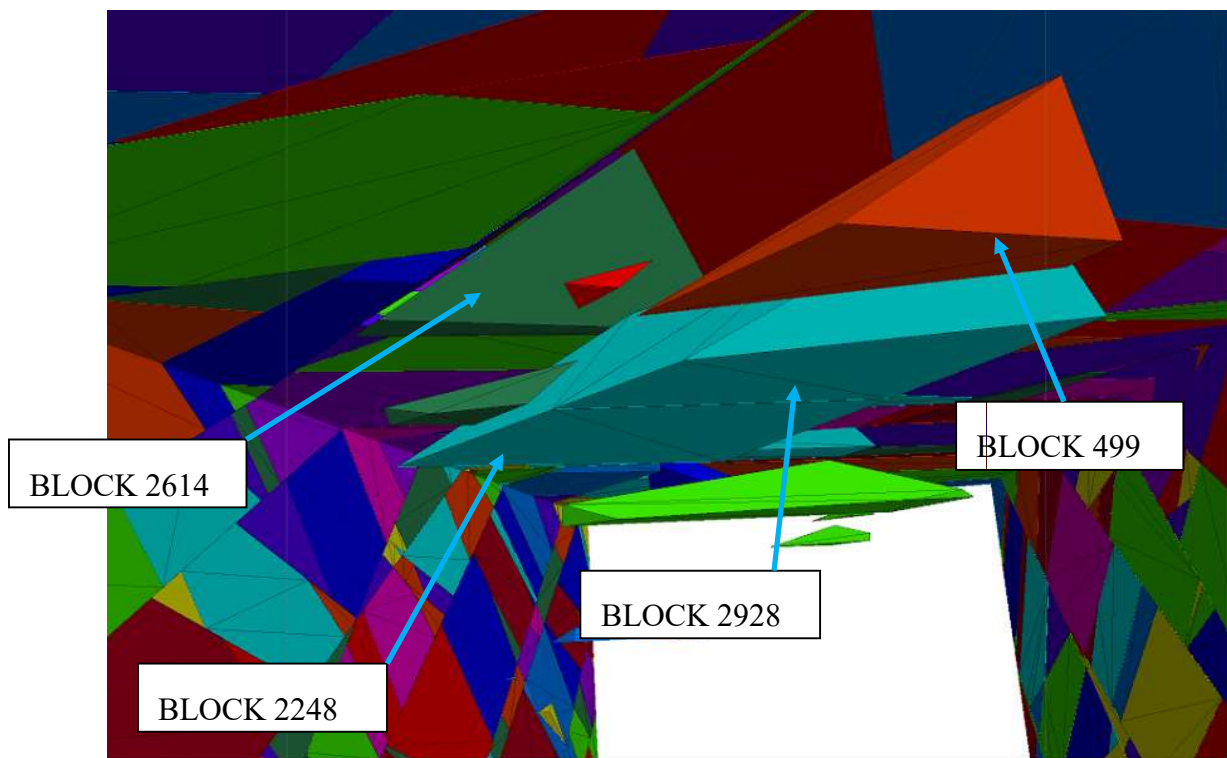


Abbildung 62: Gruppe aus den Blöcken 499, 2248, 2614 und 2928

Der Block 2614 grenzt direkt an Block 2248 und wird durch die Oberfläche 6 von diesem abgetrennt. Das Gleiten von Block 2614 wird auf Oberfläche 3 vermutet (s. Abbildung 63).



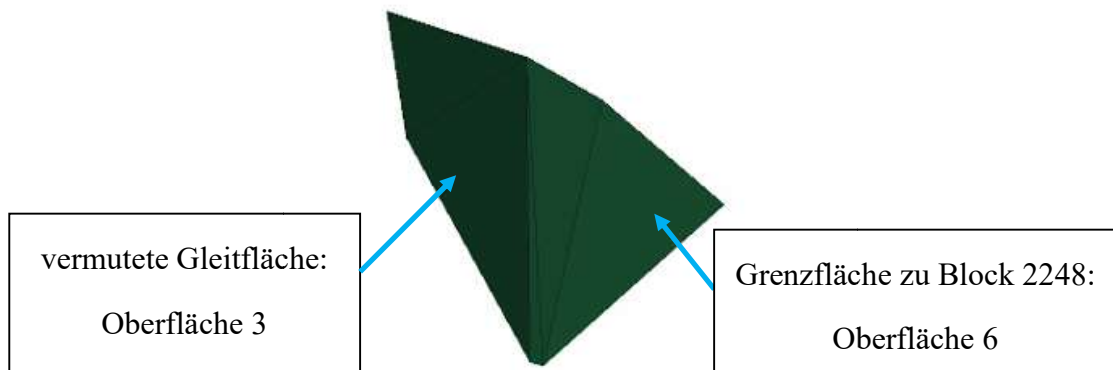


Abbildung 63: Unterseite von Block ID 2614

In der Darstellung der Blockgeschwindigkeit in Abbildung 64 sind die umgebenden Blöcke 2248 und 2928 (grün) bereits schneller als Block 2614 (orange). Daher wird vermutet, dass Block 2614 erst durch Gleiten versagt, nachdem die Blöcke 499 und 2928 in den Hohlraum gefallen sind.

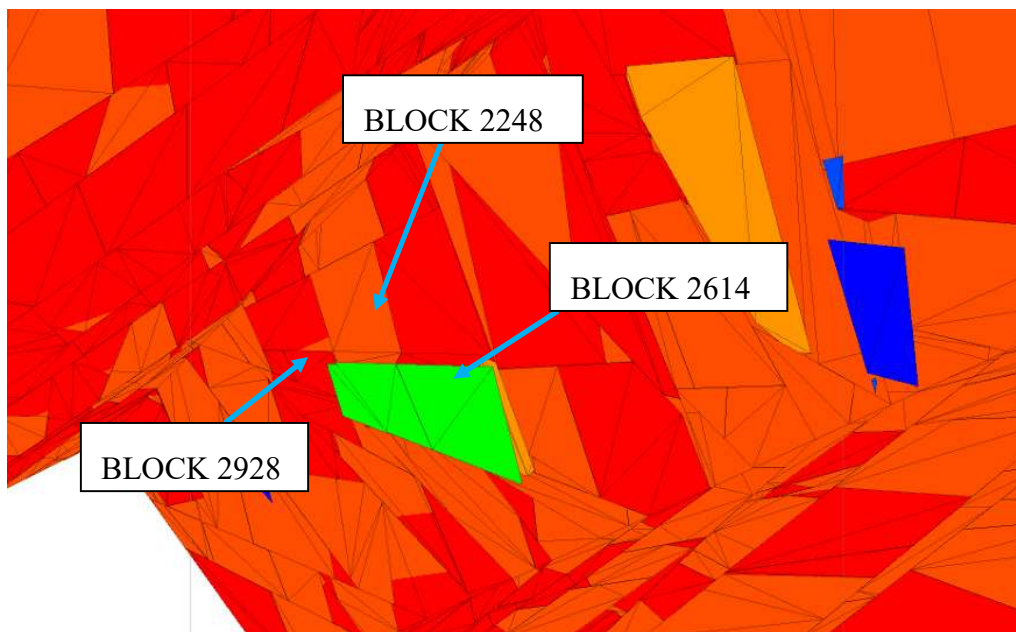


Abbildung 64: Darstellung der Geschwindigkeiten in der Blockgruppe

Durch eine erneute *Block Theorie* wurde versucht das Versagen der gesamten Blockgruppe nachzuweisen. In dieser Berechnung wurde die Oberfläche 6 (254/51) des Blockes 2614 vernachlässigt, die an den nächsten Kluftkörper der Gruppe, Block 2248, angrenzt. Der ermittelte Key Block (Block Code 1011) ist dargestellt in Abbildung 65 und versagt durch Gleiten auf Oberfläche 3 (grün dargestellt).

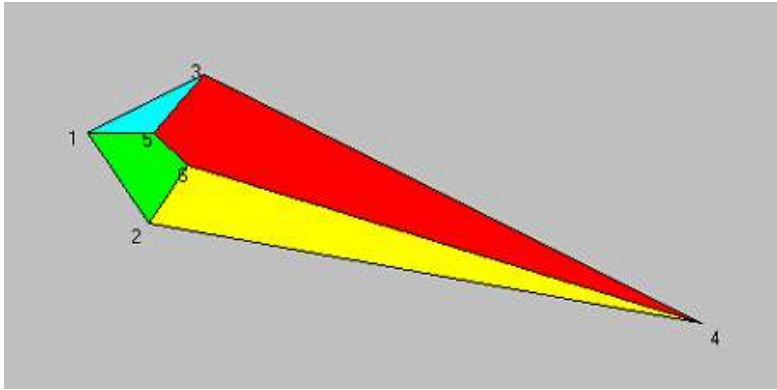


Abbildung 65: Firstblock - Block Code 1011

Der Abbildung 66 ist zu entnehmen, dass die blau markierte Kontur der Blockansammlung Ähnlichkeit zur freien Oberfläche (gelbe Oberfläche in Abbildung 65) des KB (BC 1011) aus *Block Theorie* aufweist.

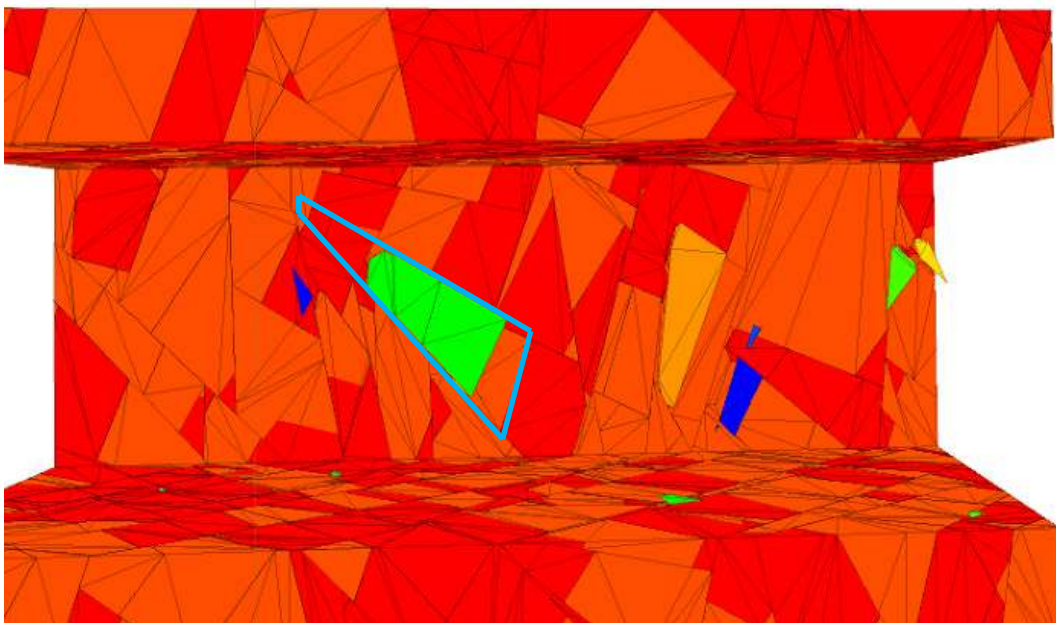


Abbildung 66: Blockgruppe – freie Oberfläche – Untersicht

Dadurch kann bestätigt werden, dass der KB (BC 1011) geometrisch der versagenden Blockgruppe (Blöcke 499, 2248, 2614 und 2928) entspricht. Da nur Block 2614 Anteil an Oberfläche 3 hat, wird für diesen auch das Versagen durch Gleiten bestätigt.

Ein Vergleich des FoS aus *Block Theorie* zeigt übereinstimmende Ergebnisse mit dem Versagen von Block 2614 aus *3DEC*. Der Block 2614 hat sich in Rechnung 1.8 und 1.10 ( $\varphi=25^\circ$ ) aus der Firste gelöst. Die vergleichende Berechnung des Key Blockes 1011 mit Block Theorie hat, unter Ansatz von  $\varphi = 25^\circ$ , ein Versagen durch Gleiten ergeben (FoS=0,58).

Durch die Erhöhung des Reibungswinkels auf  $40^\circ$ , in den Rechnungen 1.9 und 1.12 mit *3DEC*, stabilisierte sich Block 2614. Der Ansatz von  $\varphi = 40^\circ$  in der Berechnung mit *Block Theorie* ergab einen FoS von 1,04 und führte zu einer Stabilisierung des Key Blockes 1011.

Um den Versagensmechanismus aller entfernbaren Blöcke der untersuchten Kaverne gesichert nachzuweisen, müsste die beschriebene Methodik für jeden in der *3DEC* – Analyse als entferntbar identifizierten Block wiederholt werden. Zu diesem Zeitpunkt ist dies mit der verfügbaren Software jedoch mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand nicht möglich.

## 7.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung 1

Die Untersuchung 1 wurde anhand von 12 Rechnungen durchgeführt, die in vier Gruppen zu je drei Rechnungen, eingeteilt worden sind.

Die vier Gruppen der Rechnungen unterscheiden sich in der Berücksichtigung der Rotation von Blöcken und der Verteilung von Raumstellungen. Innerhalb einer Gruppe unterscheiden sich die Rechnungen durch den einheitlichen Reibungswinkel, der den Trennflächen des Modelles zugewiesen und von Rechnung zu Rechnung gesteigert worden ist.

Als Referenzrechnungen dienen die Rechnungen der Gruppe 1 (Rechnung 1.1 – Rechnung 1.3). In diesen wurde eine deterministische Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen, sowie eine rein translatorische Kinematik der Festkörper berücksichtigt.

Die Verteilung der Raumstellungen in Gruppe 2 (Rechnung 1.4 – Rechnung 1.6) wurde ebenfalls deterministisch angenommen. Eine Rotation der Blöcke wurde zugelassen. Die Rechnungen wurden ausschließlich mit *3DEC* durchgeführt, da durch die Block Theorie keine Rotation von Kluftkörpern erfasst werden kann.

In den Rechnungen der Gruppe 3 (Rechnung 1.7 – Rechnung 1.9) wurde die Variation der Raumstellungen von Trennflächen untersucht. Eine probabilistische Analyse mit *Unwedge* wurde unter Berücksichtigung einer Normalverteilung der Raumstellungen von Trennflächen durchgeführt. Da diese Verteilung mit *3DEC* nicht möglich ist, wurden die Raumstellungen der Trennflächen linear, zufolge der maximalen Abweichungen vom Mittelwert ihrer Trennflächenschar, verteilt. Die Kinematik der Kluftkörper wurde in den Rechnungen rein translatorisch angenommen.

Die Rechnungen der Gruppe 4 berücksichtigen eine Rotation von Blöcken und eine lineare Verteilung der Variation der Raumstellungen von Trennflächen. Da eine Rotation von *Unwedge* und Block Theorie nicht berücksichtigt werden kann, wurden die Rechnungen der Gruppe 4 ausschließlich mit *3DEC* durchgeführt.

Unter Ansatz eines geringen Reibungswinkels in den Trennflächen (Rechnung 1.1,  $\varphi = 20^\circ$ ) versagen in Gruppe 1 (deterministisch, Rotation gesperrt) 37 Blöcke in den Ulmen und 16 in der Firste (Berechnung mit *3DEC*). In der Ulme konnte der Größte Block lokalisiert werden. Hinsichtlich des Versagensbildes sind die Ergebnisse aus *3DEC* auch für die Block Theorie gültig.

Eine Erhöhung des Reibungswinkels auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.2), hielt ein Versagen in den Ulmen zurück. In der Firste ist es weiterhin zu einem Nachbrechen von 16 Kluftkörpern gekommen (Berechnung mit *3DEC*). Der größte Block (*3DEC*: Block ID 1053) konnte in der Firste lokalisiert werden. Auch hier sind die Ergebnisse, in Hinblick auf die Gestalt der Kluftkörper und das Versagensbild, sowohl für die Block Theorie als auch für

*3DEC* gültig. Eine weitere Erhöhung von  $\phi$  auf  $40^\circ$  bewirkt keine Veränderung der Resultate.

Eine Fixierung von Kluftkörpern in *3DEC*, die geometrisch Ähnlichkeit zu den KB aus der Berechnung mit der Block Theorie aufweisen, wurde durchgeführt um entfernbare Blöcke im Modell aus *3DEC* festzustellen. Diese Festhaltung einzelner Blöcke lieferte jedoch keine eindeutigen Ergebnisse.

Der Ansatz eines Reibungswinkels von  $20^\circ$  (Rechnung 1.4) in den Rechnungen der Gruppe 2 (deterministisch, Rotation frei), verursachte ein Nachbrechen von 26 Blöcke in der Ulme und von 29 Blöcken in der Firste. In der Firste konnte auch der größte entfernbare Block identifiziert werden.

Das Versagen von Blöcken in der Ulme wurde durch eine Erhöhung von  $\phi$  auf  $25^\circ$  verhindert (Rechnung 1.5). Die versagenden Blöcke in der Firste reduzierten sich auf 20 Kluftkörper. Der größte versagende Block in der Firste trägt die Block ID 2092. Die Steigerung des Reibungswinkels in den Trennflächen auf  $40^\circ$  hat keine Veränderung der Resultate bewirkt.

Ähnlich den Ergebnissen der Rechnungen aus Gruppe 1, erbringt eine Analyse von Key Blöcken in Gruppe 2 für *3DEC* keine eindeutigen Ergebnisse.

Berechnungen der Gruppen 1 und 2 unterscheiden sich nur durch die Berücksichtigung der Rotation. Die Ergebnisse beider Gruppen von Berechnungen zeigen unterschiedliche Resultate.

Der größte entfernbare Block in der Rechnung 1.2 ist kleiner als jener aus der Rechnung 1.5. Daher wurde eine ergänzende Analyse für Rechnung 1.5 durchgeführt, um die Kinematik des größten entfernbaren Blockes (Block ID 2092) genauer zu beurteilen. Der Untersuchung liegt die Annahme zugrunde, dass sich der maßgebliche Kluftkörper aus seiner Position herausdrehen konnte und sich dadurch aus dem Verband gelöst hat. Die Ergebnisse der ergänzenden Untersuchung haben diese Annahme jedoch widerlegt. Der untersuchte Block 2092 hat kaum rotiert, bis er 0,5 m gefallen ist.

Die Ergebnisse der Gruppe 3 (probabilistisch, Rotation gesperrt) haben, unter Ansatz von  $\phi = 20^\circ$ , eine Destabilisierung von 16 Blöcken in den Ulmen, sowie von 10 weiteren in der Firste ergeben. Der größte Block aus den Ergebnissen von *3DEC*, war in der Firste feststellbar. In den Berechnungen mit *Unwedge* wurde der größten Key Block jedoch in der Ulme festgestellt.

Die Erhöhung des Reibungswinkels in den Trennflächen auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.8) mindert die Anzahl an versagenden Blöcken ab, auf 9 Stück in der Ulme und 4 Stück in der Firste. Der größte Block (*3DEC*: Block ID 2428) konnte in der Rechnung in der Firste

lokalisiert werden. In Rechnung 1.8 stimmen die Ergebnisse aus *3DEC* und *Unwedge* qualitativ wieder überein.

Eine weitere Steigerung des Reibungswinkels auf  $40^\circ$  (Rechnung 1.9) verringert die Anzahl an versagenden Blöcken. In der Ulme versagt nur ein einziger Kluftkörper, in der Firste war ein Versagen von 6 Kluftkörpern zu erkennen. Der größte entfernbarer Block aus der Berechnung mit *3DEC*, in der Rechnung 1.8 (Block ID: 2428), ist ebenfalls gültig für Rechnung 1.9.

Blöcke die aus einer probabilistischen Verteilung von Trennflächen aus *Unwedge* gewonnen worden sind, können nicht mit Kluftkörpern aus *3DEC* verglichen werden. Die Berechnungen aus *Unwedge* geben nur einen Datensatz für den FoS und die Masse des entfernbaren Blockes aus.

Eine Analyse der Key Blöcke in *3DEC* hat keine eindeutigen Ergebnisse erbracht. Da für diese Analyse bereits in Gruppe 2 und die Gruppe 3 ähnliche Aussagen gewonnen werden konnten, wurde sie in weiteren Rechnungen nicht verfolgt.

Die Berechnungen der Gruppe 4 (probabilistisch, Rotation frei) wurden nur mit *3DEC* ausgeführt. In Rechnung 1.10 versagten in den Ulmen 14 Blöcke und in der Firste 22 Blöcke. Der größte entfernbarer Block aus der Rechnung 1.10 trägt die ID 1890 und hat in der Firste versagt.

Die Erhöhung des Reibungswinkels in den Trennflächen auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.11), reduzierte die Zahl instabiler Blöcken auf 4 Stück in der Ulme und 19 Stück in der Firste. Der größte entfernbarer Block (Block ID 1793) konnte in der Firste identifiziert werden.

Für Rechnung 1.12 wurde  $\phi$  auf  $40^\circ$  erhöht. Ergebnis war das Versagen von zwei Blöcken in der Ulme sowie 9 Kluftkörpern in der Firste. Erneut konnte Block 1793 als maßgeblich identifiziert werden.

In den Rechnungen der Gruppe 3 und der Gruppe 4 wurde für den Block 2614 eine Untersuchung des Versagensmechanismus durchgeführt. Für diesen Block, welcher in der Firste situiert war, konnte ein Versagen durch Gleiten festgestellt werden. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zum Versagen von Blöcken, die dem Trennflächensystem 1 mit deterministisch verteilten Raumstellungen entspringen. In diesen versagen die Blöcke in der Firste ausschließlich durch Fallen.

## 8 Ergebnisse - Untersuchung 2

### 8.1 Ergebnisse der Rechnung 2.1 und Rechnung 2.2

In Rechnung 2.1 haben 34 Blöcke versagt, die ausnahmslos in der Firste situiert waren und deren Masse sich zu 312 t summiert hat.

In Abbildung 67 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 2.1 und 2.2 nach 65000 Berechnungsschritten dargestellt.

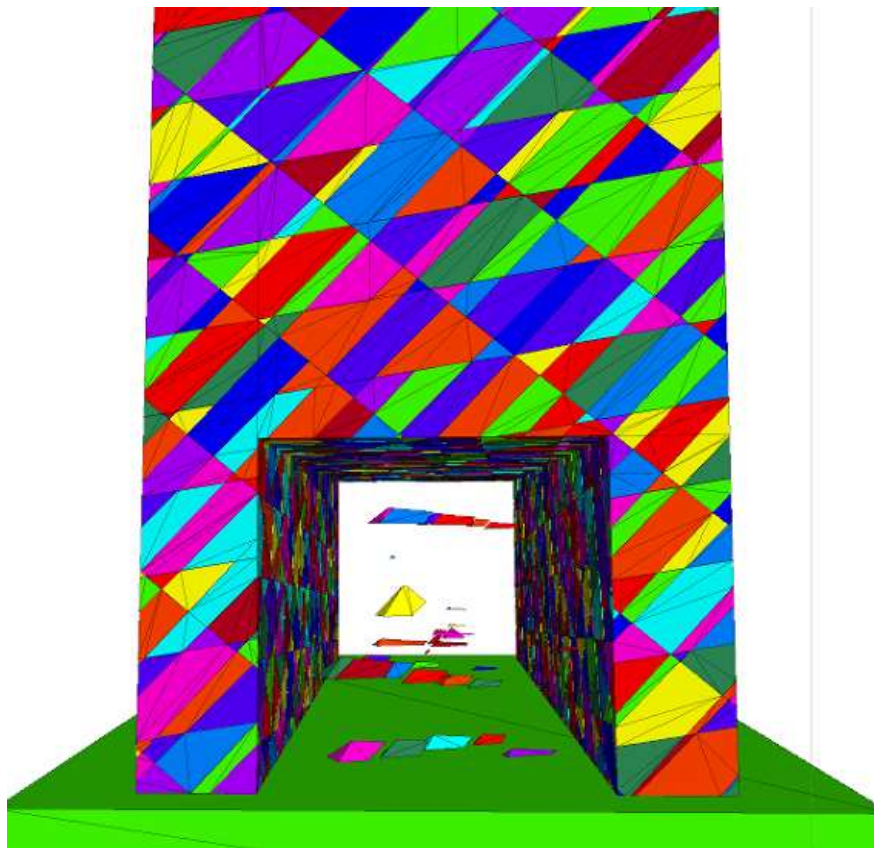


Abbildung 67: Kaverne - Rechnung 2.1 und 2.2 nach 65000 Berechnungsschritten

Die Kennwerte des größten Blockes, mit der Block ID 4885, sind in Tabelle 37 aufgelistet, in Verbindung mit der Darstellung der Blockgeometrie in Abbildung 68. In Tabelle 38 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 4885 aufgelistet.

Tabelle 37: Größter Block - Trennflächensystem 2 - Rechnung 2.1 – 3DEC

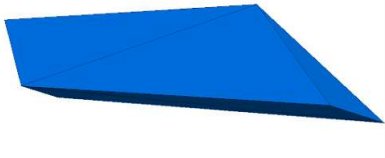
|                      |                                                                                    |           |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 68: Firstblock – Block ID 4885                                           |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                    | 4885      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                    | B – Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                           | Firste    |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                           | 14,37     |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                              | 38,8      |

Tabelle 38: Größter Block - Trennflächensystem 2 - Rechnung 2.1 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 275                                           | 45                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 163                                           | 71                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 350                                           | 45                                         | K4                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 0                                             | 0                                          | FO                |
| <b>Oberfläche 5</b> | 242                                           | 50                                         | K2                |

Durch die Abminderung der Scherparameter in den Trennflächen in Rechnung 2.2, war keine Änderung des Verhaltens im Vergleich zu Rechnung 2.1 feststellbar. Die Anzahl, Masse und Identität versagender Blöcke entspricht den Ergebnissen aus Rechnung 2.1. Folglich ist auch der maßgebliche versagende Block der Rechnung 2.2 der Block 4885.



## 8.2 Ergebnisse der Rechnung 2.3

In Rechnung 2.3 haben insgesamt 123 Blöcke versagt, deren gesamte Masse 5069 t betragen hat.

Aus diesen Blöcken konnten 22 Stück (17%) in der Firste lokalisiert werden, deren Masse 80 t (1,5%) betrug. In den Ulmen haben 105 Blöcke (83%) versagt, deren Masse sich zu 4989 t (98,5%) ergeben hat.

In Abbildung 69 ist das Modell der Kaverne aus Rechnung 2.3 nach 65000 Berechnungsschritten dargestellt.



Abbildung 69: Kaverne - Rechnung 2.3 nach 65000 Berechnungsschritten

Als größter Kluftkörper wurde Block 3518 identifiziert, der in der Ulme versagt hat. In der Tabelle 39 sind die Kennwerte dieses Blockes, mit einer Darstellung der Blockgestalt in Abbildung 70, aufgelistet. In Tabelle 40 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 3518 aufgelistet.

Tabelle 39: Größter Block - Trennflächensystem 2 - Rechnung 2.3 – 3DEC

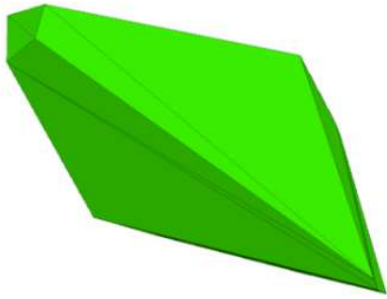
|                      |                                                                                    |           |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Größter Block</b> |  |           |
|                      | Abbildung 70: Firstblock – Block ID 3518                                           |           |
|                      | <b>Block ID</b>                                                                    | 3518      |
|                      | <b>Blocktyp</b>                                                                    | F – Block |
|                      | <b>Ort des Versagens</b>                                                           | Ulme      |
|                      | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                           | 183       |
|                      | <b>Blockmasse [t]</b>                                                              | 494       |

Tabelle 40: Größter Block - Trennflächensystem 2 - Rechnung 2.3 – 3DEC - konstituierende Oberflächen

| <b>Oberfläche</b>   | <b>Fallrichtung (<math>\alpha</math>) [°]</b> | <b>Fallwinkel (<math>\beta</math>) [°]</b> | <b>Kluftschar</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 353,5                                         | 43,3                                       | K4                |
| <b>Oberfläche 2</b> | 260,74                                        | 43,3                                       | K3                |
| <b>Oberfläche 3</b> | 209,82                                        | 58                                         | K2                |
| <b>Oberfläche 4</b> | 162,7                                         | 76                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 5</b> | 173                                           | 66                                         | K1                |
| <b>Oberfläche 6</b> | 0                                             | 180                                        | FO                |
| <b>Oberfläche 7</b> | 237                                           | 31                                         | K3                |
| <b>Oberfläche 8</b> | 347                                           | 33                                         | K4                |
| <b>Oberfläche 9</b> | 267,5                                         | 40,8                                       | K3                |

### 8.3 Zusatzuntersuchung: Versagen in der Ulme

Um den Versagensmechanismus in der Ulme der Kaverne, aus Rechnung 2.3 genauer zu untersuchen, wurde der Block 3518 (siehe Tabelle 39 und Abbildung 70) einer Analyse unterzogen. Die Raumstellungen der Blockoberflächen wurden dazu in *Block Theorie* eingegeben. Aus den resultierenden Key Blöcken konnte jedoch keine geometrische Ähnlichkeit zum Block 3518 aus *3DEC* geschlossen werden.

Aus diesem Grunde wurden der Block 5248 und 5760 derselben Analyse unterzogen, da diese in ihrer Geometrie wesentlich einfacher aufgebaut sind.

Die Kennwerte des Ulmenblockes 5248 sind in Tabelle 41, gemeinsam mit einer Darstellung seiner Gestalt in Abbildung 71, aufgelistet. In Tabelle 42 sind die konstituierenden Oberflächen des Blockes 5248 aufgelistet.

Tabelle 41: Block 5248

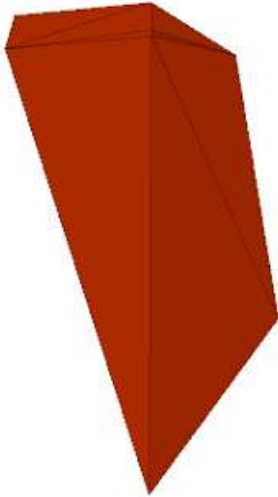
|                           |                                                                                     |           |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Untersuchter Block</b> |  |           |
|                           | Abbildung 71: Ulmenblock – Block ID 5248                                            |           |
|                           | <b>Block ID</b>                                                                     | 5248      |
|                           | <b>Blocktyp</b>                                                                     | B – Block |
|                           | <b>Ort des Versagens</b>                                                            | Ulme      |
|                           | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                            | 0,74      |
|                           | <b>Blockmasse [t]</b>                                                               | 2,005     |

Tabelle 42: Block 5248 – konstituierende Oberflächen

| Oberfläche          | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 353,5                         | 43,3                       | K4         |
| <b>Oberfläche 2</b> | 90                            | 90                         | FO         |
| <b>Oberfläche 3</b> | 209,82                        | 58                         | K2         |
| <b>Oberfläche 4</b> | 162,7                         | 76                         | K1         |
| <b>Oberfläche 5</b> | 173                           | 66                         | K1         |

Ebenso sind die Daten des Blockes 5760 in Tabelle 43 zusammengefasst, ergänzt durch die Darstellung der Blockgestalt in Abbildung 72. Die konstituierenden Oberflächen des Blockes 5760 sind in Tabelle 44 aufgelistet.

Tabelle 43: Block 5760

|                           |                                                                                     |           |  |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--|
| <b>Untersuchter Block</b> |  |           |  |
|                           | Abbildung 72: Ulmenblock – Block ID 5760                                            |           |  |
|                           | <b>Block ID</b>                                                                     | 5670      |  |
|                           | <b>Blocktyp</b>                                                                     | A – Block |  |
|                           | <b>Ort des Versagens</b>                                                            | Ulme      |  |
|                           | <b>Blockvolumen [m³]</b>                                                            | 0,345     |  |
|                           | <b>Blockmasse [t]</b>                                                               | 0,933     |  |

Tabelle 44: Block 5760 – konstituierende Oberflächen

| Oberfläche          | Fallrichtung ( $\alpha$ ) [°] | Fallwinkel ( $\beta$ ) [°] | Kluftschar |
|---------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|
| <b>Oberfläche 1</b> | 353,5                         | 43,3                       | K4         |
| <b>Oberfläche 2</b> | 260,74                        | 43,3                       | K3         |
| <b>Oberfläche 3</b> | 209,82                        | 58                         | K2         |
| <b>Oberfläche 4</b> | 162,7                         | 76                         | K1         |

Die Blöcke 5248 und 5760 wurden im Anschluss mit *Block Theorie* untersucht. Zu diesem Zweck wurden, ebenso wie für Block 3518, die Raumstellungen der konstituierenden Flächen in das Programm eingegeben. Die daraus resultierenden Blöcke haben jedoch weder eine geometrische Ähnlichkeit zu den Ausgaben aus *3DEC* gezeigt, noch wiesen die Ergebnisse einen Stabilitätsverlust der Körper aus.

## 8.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung 2

Die Untersuchung 2 besteht aus drei Rechnungen und sollte dazu dienen, ein kritisches Verhalten infolge einer Variation der Raumstellungen von Trennflächen zu analysieren. Darüber hinaus sollte die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte auf die Scherfestigkeiten der Diskontinuitäten, verglichen werden mit den Auswirkungen einer Variation der Raumstellungen von Trennflächen. Durchgeführt wurde der Hauptteil der Untersuchung nur mit *3DEC*.

Rechnung 2.1 stellt eine Referenzrechnung für die weiteren Rechnungen der Untersuchung 2 dar. Für diese Rechnung wurden die charakteristischen Werte der Scherparameter in den Trennflächen angesetzt. Die Verteilung der Raumstellung von Trennflächen wurde nicht variiert. Die Ergebnisse zeigen ein Versagen von 34 Blöcken in der Firste.

Eine Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte (gem. Eurocode 7 und Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau der ÖGG) ist für die Rechnung 2.2 durchgeführt worden. Diese ergab keine Änderung des Nachbruchverhaltens oder der Anzahl nachbrechender Blöcke, im Vergleich zu Rechnung 2.1.

Eine Variation der Raumstellungen von Trennflächen in Rechnung 2.3, führte zu einem stark veränderten Nachbrechen von Blöcken. In der Ulme konnte ein Versagen von 105 Blöcken festgestellt werden. Deren Masse betrug dabei mehr als das zehnfache der Gesamtmassen aus Rechnung 2.1 und Rechnung 2.2. In der Firste konnte ein Versagen von 22 Blöcken festgestellt werden. Deren Masse betrug jedoch nur 1,5% der Gesamtmasse der versagenden Blöcke aus Rechnung 2.3. Um das Nachbrechen in den Ulmen genauer zu untersuchen, wurden Blöcke aus der Rechnung 2.3 ergänzend mit *Block Theorie* analysiert. Daraus konnten jedoch keine eindeutigen Resultate gewonnen werden.

## 9 Zusammenfassung

Das Material Fels setzt sich zusammen aus massiven Festkörpern (Blöcke oder Kluftkörper), welche durch Trennflächen begrenzt sind. Unter der Berücksichtigung von mechanischen und geometrischen Eigenschaften der Trennflächen, ist eine Modellierung des Gefüges als Kontinuum oder als Diskontinuum möglich. Im Allgemeinen ist ein Gefüge jedoch als Diskontinuum aufzufassen.

Dieses ist dabei zumeist komplexer als ein Kontinuum und kann mithilfe analytischer und numerischer Ansätze berechnet werden. Als Proponent für analytische Verfahren kann die Block Theorie (Goodman und Shi, 1985) genannt werden, die in den Software Anwendungen *Block Theorie* und *Unwedge* implementiert ist. Ein Vertreter numerischer Methoden ist die Diskrete Elemente Methode (DEM), die im Programm *3DEC* der Itasca Consulting Group eingesetzt wird.

Die einzelnen Trennflächen eines Gefüges sind in der Natur nicht parallel, ihre Raumstellungen weisen Abweichungen zueinander auf. Am Beispiel eines Gleitkeiles in einer Böschung wurde nachgewiesen, dass diese Variation der Raumstellungen von Trennflächen einen Einfluss auf die Stabilität eines Blockes ausübt. Diese Auswirkung ist dabei so groß, dass sie ein ungünstigeres Verhalten bewirkt als die Abminderung der Scherparameter in den Trennflächen, die durch den Eurocode 7 vorgegeben wird. (Poisel et al. 2017)

In Analogie an die Berechnung dieses Gleitkeiles, wurde für eine Kaverne der Einfluss einer Variation der Raumstellungen von Trennflächen untersucht. Die Berechnungen wurden mit Block Theorie und DEM durchgeführt, deren Ergebnisse anschließend einander gegenübergestellt worden sind. Es wurde auch ein direkter Vergleich durchgeführt zwischen den Auswirkungen einer Variation der Raumstellungen von Trennflächen und einer Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Festigkeiten. Die Untersuchungen wurden für drei unterschiedliche Trennflächensysteme durchgeführt, die auf das Modell der Kaverne übertragen worden sind.

Das Trennflächensystem für die erste Untersuchung (Untersuchung 0) ist das Ergebnis einer Kartierung im Steinbruch Renz (Kolenprat, 2019). In weiterer Folge wurden die Gefügedaten für eine weitere Bearbeitung in drei Trennflächenscharen eingeteilt. Für jede der Raumstellungen der Trennflächenscharen wurden der Mittelwert und die maximale Abweichung von diesem, sowie die Standardabweichung ausgewertet.

Die Untersuchung 0 sollte zeigen, ob ein Versagen von Blöcken am Trennflächensystem 0 festzustellen ist. Als erste Rechnung wurde dazu die Rechnung 0.1 durchgeführt,

in der keine Variation der Raumstellung von Trennflächen vorgenommen worden ist. Diese Rechnung sollte als Referenzrechnung dienen. Da jedoch kein Versagen von Blöcken in dieser Referenzrechnung erkennbar war, wurden die Gefügedaten für weitere Analysen angepasst.

Um eine Trennflächensystem für weitere Berechnungen zu erhalten, wurde der Mittelwert der Fallrichtung von Trennflächenschar K1 um  $180^\circ$ , von  $104^\circ$  auf  $284^\circ$ , verändert. Diese Vorgehensweise sollte ein Versagen von Blöcken generieren. Das daraus resultierende Gefüge (Trennflächensystem 1) stellt die Grundlage der Untersuchung 1 dar.

Die Untersuchung 1 befasst sich mit der allgemeinen Auswirkung der Variation der Raumstellungen von Trennflächen. Vorrangig wurde untersucht, ob eine Änderung des Versagens von Blöcken zufolge einer Variation von Raumstellungen von Trennflächen auftritt. Die dafür erforderlichen Berechnungen wurden sowohl mit Block Theorie als auch mit DEM durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse aus beiden Berechnungsansätzen miteinander verglichen. Durch einzelne Rechnungen sollten eine Verteilung der Raumstellung von Trennflächen, wie auch die Rotation von Blöcken berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollte ein Fallen von Blöcken in den Ergebnissen identifizierbar sein. Da dieses unabhängig von den Scherparametern in den Trennflächen auftritt, fand eine schrittweise Steigerung des Reibungswinkels in den Trennflächen statt. Zur Berücksichtigung all dieser Anforderungen, wurden die Berechnungen in vier Gruppen eingeteilt, die je 3 Rechnungen beinhalten. Die Rechnungen innerhalb dieser Gruppen unterscheiden sich dabei durch den einheitlichen Reibungswinkel in den Trennflächen von  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  und  $40^\circ$ . Die Gruppen der Berechnungen unterscheiden sich durch die kinematischen Randbedingungen der Blöcke (Rotation frei oder gesperrt) und die Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen.

Als Referenzrechnungen dienen die Rechnungen der Gruppe 1 (Rechnung 1.1 – Rechnung 1.3). Diese berücksichtigen eine deterministische Verteilung der Raumstellungen von Trennflächen sowie eine rein translatorische Kinematik der Kluftkörper.

In Gruppe 2 (Rechnung 1.4 – Rechnung 1.6) wurden ebenfalls deterministisch verteilte Raumstellungen der Trennflächen angenommen, die Blockkinematik berücksichtigte jedoch auch eine Rotation. Da die klassische Block Theorie keine Rotation von Kluftkörpern zulässt, wurden die Rechnungen der Gruppe 2 nur mit *3DEC* durchgeführt.

Die Variation der Raumstellungen von Trennflächen wurde in den Rechnungen der Gruppe 3 (Rechnung 1.7 – Rechnung 1.9) untersucht. Eine probabilistische Analyse mit *Unwedge*, wurde unter Berücksichtigung einer Normalverteilung der Raumstellungen der Trennflächen durchgeführt. Da eine Normalverteilung der Raumstellungen von Trennflächen mit *3DEC* nicht umsetzbar ist, wurden diese linear verteilt. Die Kinematik der Kluftkörper wurde rein translatorisch angenommen.

Die Rechnungen der Gruppe 4 berücksichtigen, analog zu Gruppe 2, eine Rotation von Blöcken und wurden daher nur mit *3DEC* durchgeführt. Wie in den Rechnungen der Gruppe 3, sind die Trennflächen des Gefüges zufällig verteilt.

In Gruppe 1 (deterministisch, Rotation gesperrt) versagten unter Ansatz von geringer Kluftfestigkeiten ( $\varphi = 20^\circ$ ) Blöcke in den Ulmen (37 Stk.) und in der Firste (16 Stk.). Der Größte Block konnte in der Ulme lokalisiert werden. Hinsichtlich der Lokalisation des Blockversagens und der Lage des größten Blockes, sind diese Ergebnisse sowohl für *3DEC* als auch für die Block Theorie gültig.

Durch eine Steigerung des Reibungswinkels auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.2), wurde ein Versagen in den Ulmen verhindert. In der Firste versagten aber weiterhin 16 Kluftkörper. Der größte Block (*3DEC*: Block ID 1053) konnte in der Firste lokalisiert werden. Auch hier sind die Ergebnisse, in Hinblick auf die Geometrie der Kluftkörper und die Lokalisation ihres Versagens, sowohl für die Block Theorie als auch für *3DEC* gültig. Eine weitere Erhöhung von  $\varphi$  auf  $40^\circ$  hat keine Veränderung der Resultate bewirkt.

Durch eine Fixierung von Kluftkörpern in *3DEC*, die eine geometrische Ähnlichkeit zu den Key Blöcken aus der Berechnung mit Block Theorie aufweisen, wurde eine Key Block Analyse durchgeführt. Diese Festhaltung einzelner Blöcke konnte jedoch keine weiteren Blöcke am Versagen hindern.

Unter Ansatz eines Reibungswinkels von  $20^\circ$  versagten in Gruppe 2 (deterministisch, Rotation frei), 26 Blöcke in den Ulmen und 29 Blöcke in der Firste, wo auch der größte Block identifiziert werden konnte.

Ein Versagen in den Ulmen wurde durch eine Erhöhung von  $\varphi$  auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.4) verhindert. Die versagenden Blöcke in der Firste reduzierten sich auf 20 Kluftkörper. Der größte versagende Block in der Firste trug die Block ID 2092. Die Steigerung des Reibungswinkels in den Trennflächen auf  $40^\circ$  hat keine Veränderung der Resultate bewirkt.

Wie auch in den Rechnungen der Gruppe 1 hat eine Analyse von Key Blöcken in *3DEC* keine eindeutigen Ergebnisse erbracht.

Die Rechnungen der Gruppe 1 und der Gruppe 2 unterscheiden sich durch die Berücksichtigung der Rotation und zeigen unterschiedliche Resultate.

Der maßgebliche Block in der Rechnung 1.2 ist kleiner als jener aus der Rechnung 1.5. Aus diesem Grunde wurde eine Zusatzuntersuchung durchgeführt, um die Kinematik des maßgeblichen Blockes, unter Berücksichtigung der Rotation, genauer festzustellen. Dieser Untersuchung liegt die Annahme zugrunde, dass sich der maßgebliche Kluftkörper aus seiner Position herausdrehen könnte. Die Ergebnisse der ergänzenden Untersu-



chung haben jedoch aufgezeigt, dass der Block 2092 kaum rotiert, bis er 0,5 m gefallen ist.

Die Ergebnisse der Gruppe 3 (probabilistisch, Rotation gesperrt) zeigten unter Ansatz eines niedrigen Reibungswinkels ( $20^\circ$ ) eine Destabilisierung von 16 Blöcken in den Ulmen, sowie 10 weiteren in der Firste, wo auch der größte Block aus den Ergebnissen von *3DEC* feststellbar war. Die Berechnungen mit *Unwedge* zeigten den größte Key Block in der Ulme.

Eine Erhöhung des Reibungswinkels auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.8) reduzierte die Anzahl an versagenden Blöcken zu 9 Stück in der Ulme und 4 Stück in der Firste. Der größte Block (*3DEC*: Block ID 2428) konnte in der Rechnung in der Firste lokalisiert werden. In Rechnung 1.8 stimmen die Ergebnisse für das Versagensbild aus *3DEC* und *Unwedge* wieder überein.

Durch eine weitere Steigerung des Reibungswinkels auf  $40^\circ$  (Rechnung 1.9) hat sich die Anzahl von versagenden Blöcken verringert. In der Ulme hat ein Kluftkörper versagt, in der Firste war ein Versagen von 6 Kluftkörpern festzustellen. Wie in der Rechnung 1.8 wurde auch in Rechnung 1.9 der Block 2428 als größter Block identifiziert.

Blöcken die aus einer probabilistischen Verteilung von Trennflächen aus *Unwedge* gewonnen worden sind, können nicht direkt mit Kluftkörpern aus *3DEC* verglichen werden. Die Berechnungen aus *Unwedge* geben nur einen Datensatz für den FoS und die Masse des entfernbarer Blockes aus.

Eine Analyse der Key Blöcke in *3DEC* hat keine eindeutigen Ergebnisse erbracht. Da dieses Resultat bereits für die Gruppe 2 und die Gruppe 3 feststellbar war, wurde diese Analyse in weiteren Rechnungen nicht verfolgt.

Die Berechnungen der Gruppe 4 (probabilistisch, Rotation frei) wurden nur mit *3DEC* ausgeführt. Bei einem Reibungswinkel in den Trennflächen von  $20^\circ$ , haben in den Ulmen 14 Blöcke und in der Firste 22 Blöcke versagt. Der größte Block in der Berechnung trug die ID 1890, sein Versagen war in der Firste festzustellen.

Eine Erhöhung des Reibungswinkels auf  $25^\circ$  (Rechnung 1.11) reduzierte die Zahl instabiler Blöcken auf 4 Stück in der Ulme und 19 Stück in der Firste. Der größte Block (Block ID 1793) wurde in der Firste festgestellt.

In der Rechnung 1.12 wird  $\phi$  auf  $40^\circ$  erhöht. Dies führt zu einem Versagen von zwei Blöcken in der Ulme sowie 9 Kluftkörpern in der Firste. Erneut konnte Block 1793 als größter entfernbarer Kluftkörper identifiziert werden.

In den Rechnungen der Gruppe 3 und der Gruppe 4 wurden die Raumstellungen der Trennflächen variiert. Eine Erhöhung des einheitlichen Reibungswinkels in den Trennflächen führte in diesen Berechnungen zu einem abnehmenden Versagen in der Firste. In den vergleichenden Berechnungen mit Block Theorie, wurde dies durch die Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit in der Firste bestätigt.

Dieses Verhalten kann hindeuten auf eine Anhängigkeit des Versagensmechanismus der Kluftkörper von Festigkeiten der Trennflächen. Dies wäre wiederum eine Bestätigung, dass die Variation der Raumstellungen von Trennflächen, zu einer Änderung des Versagensmechanismus von Blöcken führt. Die Begründung dafür ist, dass nur das Gleiten eines Blockes, nicht jedoch ein Fallen, abhängig ist von den Scherparametern in den Trennflächen ist.

Um dies nachzuweisen, wurde eine zusätzliche Untersuchung der Ergebnisse aus *3DEC* für Block 2614 durchgeführt. Dieser versagte in den Rechnungen der Gruppe 3 und der Gruppe 4, in denen ein Reibungswinkel von  $25^\circ$  angenommen worden ist. Eine Erhöhung von  $\varphi$  auf  $40^\circ$  hat diesen Kluftkörper jedoch stabilisiert. Die Analyse erfolgte durch eine Nachrechnung der Trennflächengeometrie mit *Block Theorie*. Dadurch war es möglich den Versagensmechanismus des Kluftkörpers festzustellen. Schlussendlich konnte für den Block 2614 ein Versagen durch Gleiten auf einer Fläche ermittelt werden. Die Annahme einer Änderung des Versagensmechanismus des Kluftkörpers, von Fallen auf Gleiten, wurde dadurch bestätigt.

Die Ergebnisse der Untersuchung 1 aus Block Theorie und DEM wurden einander gegenübergestellt. Die Block Theorie stellt jeweils nur die entfernbaren Kluftkörper dar. Berechnungen mit *3DEC* (DEM) ermöglichen jedoch die Berücksichtigung von Kluftabständen und der daraus resultierenden Blockansammlung. Aus diesem Grunde ist ein Vergleich der Anzahl versagender Kluftkörper zwischen den beiden Berechnungsmodellen nicht möglich. Da die Block Theorie keine Rotation von Blöcken berücksichtigen kann, wurde diese nur in den Rechnungen der Gruppe 1 und der Gruppe 3 eingesetzt.

Der Vergleich von Geometrie (Gestalt, Kubatur, Masse) und Lokalisation maßgebender Blöcke (Versagensbild) in den einzelnen Rechnungen, zeigt übereinstimmende Ergebnisse. Da Kluftkörper in *3DEC* mehrere Trennflächen einer Schar zugewiesen bekommen können (Hein- Stumpp, 2008), bestehen im Detail Abweichungen der Geometrie von maßgeblichen Blöcken. Diese können als vernachlässigbar betrachtet werden, erfordern jedoch in manchen Fällen vertiefende Untersuchungen. Im Allgemeinen sind die aus der Block Theorie resultierenden Kluftkörper größer, als dies für die Ergebnisse von *3DEC* der Fall ist. Diese Abweichung wird jedoch nicht berücksichtigt, da große Blöcke der Block Theorie sich in *3DEC* auch aus mehreren kleineren Blöcken zusammensetzen können (siehe Pkt. 7.6.).

Der Versuch eine Kettenreaktion, durch die Fixierung von potentiellen Key Blöcken in der Berechnung mit *3DEC*, analog zum Verhalten des Kemano Tunnels (Cook et al., 1962) zu verhindern, verlief Ergebnislos. Die Fixierung einzelner Blöcke führte zu keiner Stabilisierung der gesamten Kaverne.

Zur Untersuchung der Rotation von Blöcken, wurden die Rechnungen aus der Gruppe 1 und der Gruppe 2 miteinander verglichen. Ergänzend dazu wurde eine Zusatzuntersuchung für die Rotation eines Einzelblockes durchgeführt. Dies führt zum Schluss, dass Auswirkungen der Rotation auf das Nachbruchverhalten der Blockansammlung, jedoch nicht für den Versagensmechanismus eines einzelnen Blockes feststellbar sind.

Durch die Rechnungen der Untersuchung 1 war eine Änderung des Versagensmechanismus von Fallen zu Gleiten, wie auch eine vermindertes Nachbruchverhalten, infolge der Variation der Raumstellungen von Trennflächen festzustellen. Um dieses Versagen von Kluftkörpern wie auch das Nachbruchverhalten weiter zu analysieren, wurden Berechnungen an einem weiteren Trennflächensystem durchgeführt.

Eine dritte Untersuchung (Untersuchung 2) wurde an einem gänzlich unterschiedlichen Gefüge (Trennflächensystem 2) durchgeführt. Die Eingangsdaten des Trennflächensystems 2 stammen aus der Übung für Angewandte Felsmechanik, an der Technischen Universität Wien (Poisel, 2015). Es unterscheidet sich vom Trennflächensystem 1 durch die Ausrichtungen, die Anzahl und einer Berücksichtigung der Kohäsion in den Trennflächen.

Die Untersuchung 2 setzt sich aus drei Rechnungen zusammen und sollte dazu dienen ein kritischeres Verhalten durch die Variation der Raumstellungen von Trennflächen zu untersuchen. Darüber hinaus soll die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte auf die Scherfestigkeiten der Diskontinuitäten, verglichen werden mit den Auswirkungen einer Variation der Raumstellungen von Trennflächen. Durchgeführt wurde der Hauptteil der Untersuchung nur unter Einsatz von *3DEC*.

Die erste Rechnung (Rechnung 2.1) stellt die Referenzrechnung für alle weiteren Rechnungen dar. In dieser wurden die Scherparameter in den Trennflächen mit ihrem charakteristischen Wert angesetzt. Die Verteilung der Raumstellung der Trennflächen erfolgte ohne Variation. Die Ergebnisse der Rechnung zeigten ein Versagen von 34 Blöcken in der Firste an.

Eine Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte (gem. Eurocode 7 und Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau der ÖGG) ist in der zweiten Rechnung (Rechnung 2.2) durchgeführt worden. Diese ergab keine Änderung des Versagens von Blöcken im Vergleich zu Rechnung 2.1.

Die Variation der Raumstellungen von Trennflächen, in der dritten Rechnung (Rechnung 2.3), führte zu einem stark veränderten Versagensbild. In der Ulme haben insgesamt 105 Blöcke versagt, deren Masse mehr als das zehnfache der Gesamtmassen aus Rechnung 2.1 und Rechnung 2.2 ausgemacht haben. In der Firse haben 22 Blöcke versagt, deren Masse nur 1,5% der Gesamtmasse versagender Blöcke in Rechnung 2.3, ausgemacht hat.

Das Versagen der Ulmenblöcke in Rechnung 2.3 wurde vertiefend untersucht. Daraus konnten jedoch keine schlüssigen Resultate gewonnen werden.

## 10 Schlussfolgerung

Aus den Untersuchungen ist feststellbar, dass eine Variation der Raumstellungen von Trennflächen sowohl zu einer Änderung des Versagensmechanismus als auch des Versagensbildes führen kann. Im Spezialfall der Untersuchung 1 wurde aufgezeigt, dass sich dies auch positiv auf die Stabilität von Kluftkörpern auswirken kann. Die Variation der Raumstellungen von Trennflächen kann im Allgemeinen sowohl stabilisierende als auch destabilisierende Auswirkungen auf Kluftkörper zur Folge haben.

In der geltenden Fassung der Eurocodes werden Teilsicherheitsbeiwerte auf die Scherparameter der Trennflächen angesetzt. Es wurden Berechnungen durchgeführt, um die Auswirkungen der Beaufschlagung von Scherfestigkeiten mit Teilsicherheitsbeiwerten zu untersuchen. In dieser Rechnung (Rechnung 2.2) zeigte sich keine Veränderung des Versagensmechanismus im Vergleich zur Referenzrechnung (Rechnung 2.1). Diese haben ein wesentlich günstigeres Versagensbild aufgezeigt, als Berechnungen mit einer Berücksichtigung der Variation der Raumstellungen der Trennflächen (Rechnung 2.2). Der Versagensmechanismus ist eine rein qualitative Größe. Eine Veränderung des Versagensmechanismus ist im Gegensatz zur Abminderung der Festigkeiten in den Trennflächen nicht faktorisiert.

Aus diesem Grunde sind die Raumstellungen der Trennflächen, entsprechend ihrer in der Natur vorgefundenen Abweichungen zu variieren. Dadurch soll gewährleistet sein, dass kritische Versagensmechanismen und daraus resultierende Versagensbilder eines Gefüges identifiziert werden können.

Die Ergebnisse, welche mit Block Theorie und DEM ermittelt worden sind, können in Hinblick auf ihren Versagensmechanismus und ihr qualitatives Versagensbild miteinander verglichen werden. Die Geometrie resultierender Kluftkörper ist in beiden Programmen ebenfalls vergleichbar. Besondere Beachtung gilt dabei dem Einfluss der Trennflächenabstände.

Unter Einsatz von *3DEC* wurde eine Analyse der Key Blöcke durchgeführt. Es wurden Kluftkörper fixiert, deren Gestalt Ähnlichkeit zu den Key Blöcken aus der Block Theorie aufgewiesen hat. In weiterer Folge sollte festgestellt werden, ob die Fixierung ein weiteres Nachbrechen verhindert kann. Das erwartete Ergebnis trat jedoch nicht ein. Das Versagensbild in den untersuchten Rechnungen (Rechnung 1.1, Rechnung 1.4 und Rechnung 1.7) hat sich qualitativ nicht verändert. Ein Nachbrechen von Blöcken aus Firste und Ulme war nach wie vor festzustellen. Begründung hierfür ist möglicherweise ein Gleiten von Kluftkörpern aus dem Verband, ermöglicht durch die mehrfache Zuweisung der konstituierenden Trennflächen. Bei einer Berücksichtigung der Rotation

(Rechnung 1.4), könnte ein Herausrotieren von Kluftkörpern aus dem Verband ebenfalls ein Versagen verursacht haben.

Eine Untersuchung des Rotationsverhaltens hat am Beispiel des Blockes 2092, in den Rechnungen 1.5 und 1.6 der Gruppe 2, stattgefunden. Das Versagensbild der Kaverne hat durch eine Berücksichtigung der Rotation, ein verstärktes Nachbruchverhalten zur Folge gehabt. An Block 2092 konnte jedoch kein Versagen infolge eines Herausrotierens festgestellt werden. Das initiale Versagen des Kluftkörpers wurde durch Fallen verursacht.

## Abkürzungsverzeichnis

### Kürzel mit lateinischen Buchstaben

#### Großbuchstaben

**BC:** Block Code entsprechend der Block Theorie von Goodman und Shi

**BT:** Block Theorie von Goodman und Shi

**DEM:** Discrete Element Method

**TF:** Trennfläche(n)

**TS:** Trennflächensystem

**K:** Kluftchar

**KB:** Key Block entsprechend der Block Theorie von Goodman und Shi

**NV:** Nachweisverfahren (entsprechend Eurocode 7)

**EC:** Eurocode

**FoS:** Factor of Safety

**ÖGG:** Österreichische Gesellschaft für Geomechanik

#### Kleinbuchstaben

**c:** Kohäsion

**det:** deterministisch

**m:** Mittelwert

**pf:** Probability of Failure (Versagenswahrscheinlichkeit)

**prob.:** probabilistisch

### Kürzel mit griechischen Buchstaben

**$\alpha$ :** Fallrichtung einer Trennfläche

**$\beta$ :** Fallwinkel einer Trennfläche

**$\gamma$ :** Wichte eines Materials

**$\gamma_\varphi$ :** Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungswinkel

$\gamma_c$ : Teilsicherheitsbeiwert für die Kohäsion

$\Delta_m$ : relative Abweichung vom Mittelwert

$\varphi$ : Reibungswinkel

$\sigma$ : statistische Standardabweichung



## Glossar

**Ausbruchsfläche:** Geplante, flächenhafte Begrenzung für den Ausbruch eines Hohlraumbauwerkes parallel und quer zur Vortriebsrichtung. Umfasst Firste, Ulme und Sohle sowie die Ortsbrust (bzw. Endwand bei Kavernen).

**Beanspruchungen:** (engl. Effects of Action) Auswirkungen der Einwirkungen auf ein Tragwerk

**Block (alternativ Kluftkörper):** von Trennflächen begrenzter Felskörper

**Block Theorie (klassische):** (engl. Block Theory) Von Goodman und Shi (1985) entwickeltes, analytisches Verfahren zur Bestimmung der entfernbaren Blöcke aus einem Diskontinuum. Vernachlässigt die Krümmung von Trennflächen sowie die Rotation, die Verformung und das Zerschneiden von Blöcken, wie auch deren Interaktion untereinander.

**Diskrete Elemente Methode (DEM):** Numerisches Verfahren zur Analyse eines Diskontinuums. Ermöglicht die Berücksichtigung einer Loslösung von Blöcken aus einem Diskontinuum sowie einer Block zu Block Interaktion.

**Factor of Safety (dt. Sicherheit gegen Versagen):** Kehrwert des Ausnutzungsgrades ( $\mu$ )

**Fallen:** Durch Schwerkraft und die Ausrichtung des Gefüges verursachte, translatorische Loslösung von Blöcken aus einem Gefüge, das nicht entlang einer Trennfläche erfolgt.

**Fels (Festgestein):** Gestein, dessen Eigenschaften durch die phys./chem. Bindung bestimmt ist. (Definition der ÖGG)

**Freie Oberfläche:** Halbraumfläche die Festkörper vom freien Raum (in der Natur Luft) abgrenzt. Im Gegensatz zur Trennfläche, die eine Grenze zwischen zwei Festkörpern darstellt.

**Gebirge:** Teil der Erdkruste, bestehend aus Lockergestein (Boden) und Festgestein (Fels) sowie deren Trennflächen und Hohlräume. (Definition der ÖGG)

**Gefüge (Trennflächensystem):** In situ lokalisierbares System aus einer oder mehreren Trennflächenscharen.

**Gleiten:** Translatorische Loslösung von Blöcken aus einem Gefüge, auf einer oder mehreren Flächen, die durch die Reibung beeinflusst wird.

**Hohlraumbauten:** Sammelbegriff für Tunnel, Kavernen, Schächte, Stollen etc.

**Raumstellung:** Sammelbegriff für Fallrichtungen ( $\alpha$ ) und Fallwinkel ( $\beta$ ) einer Trennfläche

**Trennfläche (Diskontinuität, ugs. auch Kluft):** Eben ausgedehnte Unterbrechung des Festgesteines. Umschließt sowohl Unterbrechungen die aus Überbeanspruchungen des Festgesteines entstanden sind (Klüfte, Harnischflächen, Störungen) wie auch jene, die durch den Entstehungsprozess des Gesteins gebildet worden sind (Schichtungen, Schieferungen). (Definition der ÖGG)

**Versagensbild:** Lokalisation und Ausmaß des Versagens, bezogen auf die Ausbruchfläche.

**Versagensmechanismus:** Mechanisches Verhalten des Gebirges, das zu einer zu starken Verformung des Ausbruchsquerschnittes in den Hohlraum führt oder zu einer kinematischen Loslösung von Gestein aus dem Verband in den Hohlraum beiträgt.

## Quellenverzeichnis

**Adam, D. (2011):** Fels- und Tunnelbau, Vorlesungsskriptum. Institut für Geotechnik, Fachbereich: Grundbau, Boden- und Felsmechanik. Technische Universität Wien

**Barton, N. (2006):** Integrated Q- logging with seismic refraction, permeability, pre-grouting, tunnel and cavern support needs and numerical modeling of performance

**Cook, J.B., J.W. Libby und J.T. Madill (1962):** “Kemano tunnel, operation and maintenance”, The Engineering Journal, Vol. 45, pp. 39 – 8

**Cravero M., G. Iabichino, F. Piana, S. Tallone (1996):** Rock block loads in a tunnel in hard jointed rock: A comparison between estimations based on outcrop and underground structural survey, Rock Mechanics, Balkema – Rotterdam

**Cundall, P. A. (1971):** A computer model for simulating progressive large scale movements in Blocky Rock Systems. In: Proceedings of the symposium of the International Society of Rock Mechanics, Nancy, Vol. 1, Paper No. II-8

**Cundall P.A. (1988):** Formulation of a three- dimensional distinct element model – Part I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25, S. 107 – 116

**Cundall P.A. und R.D. Hart (1992):** Numerical Modeling of Discontinua, Engr. Comp., 9(2), 101 – 113

**FSV (Österreichische Forschungsgesellschaft – Straße – Schiene-Verkehr) (2013):** RVS 09.01.42- Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung, Wien, FSV

**Goodman, R.E. and G. Shi (1985):** Block Theory and Its Application to Rock Engineering, New Jersey, Prentice – Hall

**Harrison J. P. (2017):** The 2020 amendment of Eurocode 7: rock mechanics and rock engineering, 66<sup>th</sup> Geomechanics Colloquium, Workshop: Rock Mechanics in Eurocode 7, Salzburg, ÖGG

**Hart R., P. Cundall and J. Lemos (1988):** Formulation of a three- dimensional distinct element model – Part II: Mechanical calculations for motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks. Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr., 25, S. 117 – 126

**Hein – Stumpp M. (2008):** Vergleichende Standsicherheitsuntersuchungen von Kavernen in geklüftetem Fels mittels Block Theorie und 3DEC, Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie der Technischen Universität Wien

**Hoek, E. (1983):** Twenty – third Rankine Lecture: Strength of jointed rock masses. Géotechnique

**Hofmann R., J. Suda, R. Poisel (2010):** Interaktion des EC 7 mit dem EC2 beim Tunnelbau, Berlin, Geomechanics and Tunneling 3, Ernst & Sohn

**ISRM (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering) (1975):** Report on the Commission on Terminology, Lisbon, 1975

**Itasca Consulting Group Inc. (2016):** 3 Dimensional Distinct Element Code – User’s Guide. Minneapolis, USA, Itasca Consulting Group

**Kolenprat, B. (2019):** Terra-Firma-Konzept – Gefahrenbereichskonzept für Felsböschungen, Dissertation Technische Universität Wien, 219 Seiten

**Kolymbas, D. (1998):** Geotechnik – Tunnelbau und Tunnelmechanik: eine systematische Einführung mit besonderer Berücksichtigung mechanischer Probleme. Springer Verlag Berlin Heidelberg

**Langer, W. (1986):** Untersuchungen zur Standsicherheit von geklüftetem Fels mittels der Block Theorie, Diplomarbeit am Institut für Ingenieurgeologie der Technischen Universität Wien

**ÖGG (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik) (2008):** Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb, Salzburg, ÖGG

**ÖGG (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik) (2013):** Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb, Salzburg, ÖGG

**ÖGG (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik) (2018):** Empfehlung für die Bemessung von Spritzbetonschalen im Hohlraumbau, Salzburg, ÖGG

**ON, Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 1990: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Ausgabe: 2013-03-15**

**ON, Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM B 1997-1. Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil 1: Allgemeine Regeln; Ausgabe: 2013-05-01**

**ON, Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM B 1997-1-1. Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik Teil 1: Allgemeine Regeln nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen; Ausgabe: 2013-09-01**

**Pacher F. (1959):** Kennziffern des Flächengefüges, Geologie und Bauwesen 24, S. 223 – 227

- Poisel, R. (2010):** Studienunterlagen zur Übung Kompassmessen, VU Geologie (LV Nr. 220.001), Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, TU Wien
- Poisel R. (2015):** Angewandte Felsmechanik – Übungsunterlagen Sommersemester 2015, Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien
- Poisel R., W. Steger und A.H. Zettler (1995):** Neue Ansätze für Standsicherheitsuntersuchungen von Tunneln, Felsbau 13
- Poisel R., A. Preh und A. H. Zettler (2004):** Rock as a continuous and as a discontinuous material – are clear definitions possible?. EUROCK 2004 & 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquium, Salzburg, ÖGG
- Poisel R., N. Hoedlmoser, B. Kolenprat, R. Hofmann (2017):** The Influence of joint orientation uncertainties on the stability of rock structures – do we need alternatives to partial factors?, 66<sup>th</sup> Geomechanics Colloquium, Workshop: Rock Mechanics in Eurocode 7, Salzburg, ÖGG
- Preh, A. (2019):** Studienunterlagen zur Vorlesung Angewandte Felsmechanik (LV Nr. 203.098), Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, TU Wien
- Schubert, W.: (2007)** Skriptum Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz
- Radoncic N.: (2012)** EC7 und RVS 9.32 – Übersicht Regelungen, Workshop 2012: „Bemessung von Stützmitteln im Tunnelbau“, Technische Universität Graz
- Wittke, W.: (1984)** Felsmechanik. Berlin, Springer Verlag