

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

# DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

## VERGLEICHENDE STANDSICHERHEITSUNTERSUCHUNG VON KAVERNEN IN GEKLÜFTETEM FELS MITTELS BLOCKTHEORIE UND 3DEC

*Stability assessments of caverns in jointed rock comparing Block Theory and 3DEC*

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

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

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

**Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Preh**

**E 203 - Institut für Ingenieurgeologie**

eingereicht an der

**Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen**

von

Mario Hein-Stumpp

0026017

Kenyongasse 23-25/714, 1070 Wien

## **Vorwort**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rainer Poisel für die Betreuung meiner Arbeit und für seinen fachlichen Rat. Seine wissenschaftlichen Ratschläge waren sehr wertvoll und haben stets zur Verbesserung der Arbeit beigetragen.

Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alexander Preh möchte ich ebenfalls einen großen Dank aussprechen, der mich in jeder Phase der Arbeit sehr sachkundig und richtungsweisend begleitet hat und mir jederzeit mit konstruktiven Ratschlägen zur Seite gestanden ist.

Weiters bedanke ich mich bei dem gesamten Team des Instituts für Ingenieurgeologie, für die freundliche Aufnahme und die exzellenten Arbeitsbedingungen, die mir zur Verfügung gestellt wurden.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden und Studienkollegen für die schöne Zeit, die wir gemeinsam erleben durften. Ganz besonders danke ich Erwin, Günther, Martin, Peter, Richard und Saimon dafür, dass sie mir sowohl in guten als auch in schwierigen Zeiten zur Seite gestanden sind.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Viktoria, die die letzten Monate so hinter mir gestanden ist, mich immer aufgemuntert hat und stets an mich geglaubt hat. Ihr Rückhalt hat sehr zum positiven Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Zuletzt möchte ich auch meinen Eltern danken, die mir durch ihre finanzielle Unterstützung dieses Studium ermöglicht haben.

## Kurzfassung

Diskontinuitäten in Form von Klüften, Störungen und Scherzonen haben einen großen Einfluss auf die Standsicherheit von Bauwerken im Festgestein. Dies trifft besonders auf große Hohlraumbauwerke wie Kavernen zu, denn das Trennflächengefüge beeinflusst den Versagensmechanismus und damit die Standsicherheit.

Für die felsmechanische Untersuchung von Kavernen können analytische oder numerische Methoden gewählt werden. Ein Vertreter der analytischen Berechnungsverfahren ist die Blocktheorie nach Goodman & Shi (1985). Mit diesem Verfahren lässt sich die Sicherheit jener Klufkörper ermitteln, die aufgrund des Trennflächengefüges entfernbar sind. Ein numerisches Verfahren zur Untersuchung von Systemen mit einer großen Zahl an Klufkörpern ist das diskontinuumsmechanische Programm 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code) der Itasca Consulting Group.

Ziel dieser Arbeit war ein Vergleich von 3DEC und der Blocktheorie anhand der Untersuchung zweier Kavernen, einer mit horizontaler Firste und einer seichtliegenden U-Bahnkaverne mit tonnenförmiger Firstfläche. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Dilatanz untersucht.

3DEC berücksichtigt sowohl die Eigenschaften der Klufkörper als auch die der Trennflächen. Für die Beschreibung des Trennflächenverhaltens steht unter anderem das "Coulomb-Slip Joint Model" zur Verfügung. Dieses Materialmodell ermöglicht auch die Berücksichtigung von Dilatanz.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Dilatanz haben gezeigt, dass bereits sehr geringe Dilatanzwinkel eine große Auswirkung auf die Stabilität eines Systems haben. Der Normalkraftanteil aufgrund von Dilatanz wird durch die Größe der Klufffläche, der Kluffsteifigkeit und jener Scherverschiebung, ab der die Dilatanz nicht mehr zunimmt, beeinflusst.

Die Untersuchungen einer Kaverne mit horizontaler Firstfläche lieferten unterschiedliche Ergebnisse. So wird in der Blocktheorie bei der Begrenzung der Blöcke jede Trennfläche nur einmal berücksichtigt. Hingegen werden viele der von 3DEC als maßgebend ausgewiesenen Blöcke zweimal von demselben Trennflächensystem begrenzt. Dadurch besitzen Blöcke parallele Begrenzungsflächen, was zu einem abweichenden Versagen führt.

3DEC liefert erst dieselben Ergebnisse wie die Blocktheorie, wenn das Mass Scaling (Berechnung des maßgeblichen Zeitschrittes mit Hilfe der durchschnittlichen Blockmasse) ausgeschaltet wird.

Bei der untersuchten U-Bahnkaverne liegen übereinstimmende Ergebnisse vor. Sowohl die Modellierung starrer als auch deformierbarer Körper führen zu derselben Blockform von aus dem Verband gleitenden Klufkörpern wie die Blocktheorie, weil es nur eine Blockgeometrie eines entfernbarer Klufkörper gibt.



## Abstract

Discontinuities such as joints, faults and shear zones have a large influence on the stability of foundations and tunnels in rock. Especially for large underground structures like caverns, joint sets have a big influence on failure mechanism and stability.

For rock mechanical analyses of caverns both analytical and numerical methods can be chosen. One representative of analytical methods is the Block Theory from Goodman & Shi (1985). This procedure enables to figure out the factor of safety for removable blocks against movement due to their joint sets location.

The discontinuum mechanics program 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code) from the Itasca Consulting Group is one numerical method for the investigation of systems with a large number of blocks.

The objective of this thesis was to compare 3DEC and Block Theory by analyzing two different caverns. One of them has a horizontal crown and the other one is a horseshoe-shaped underground station cavern with low overburden. Furthermore investigations to the effect of dilation have been done.

3DEC is considering both the behavior of blocks and the joints. For describing the joint behavior one can chose the Coulomb-Slip Joint Model which is able to consider dilation.

The studies within this thesis in terms of influence of dilation haven shown, that already a small dilation angle could have a large effect on a system's stability. The ratio of normal force due to dilation gets affected by the size of the joint plane, the normal joint stiffness and the maximal permitted shear displacement in the joints.

The analysis of a cavern with horizontal crown supplies different results. In the Block Theory for instance every block gets limited only once by each joint set. However in 3DEC the issued critical blocks get limited twice by the same joint set. Thereby blocks have parallel planes, which lead to a different failure mechanism.

To get the same results with 3DEC as with the Block Theory, it's necessary to turn off the "Mass Scaling". This has to be done in all systems where a change from a static to a dynamic behaviour is.

At the investigated underground station cavern both methods provides the same results. Both, the modelling with rigid and deformable blocks by 3DEC presenting the same block geometries as calculated by implementing the Block Theory.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Distinkte Elemente Methode</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>3 Dimensional Distinct Element Code (3DEC)</b> .....	<b>4</b>
2.1.1	Starrkörperbewegung .....	5
2.1.2	Bewegung deformierbarer Blöcke .....	7
2.1.3	Materialmodelle zur Beschreibung deformierbarer Körper .....	9
2.1.3.1	Linear elastisches, isotropes Modell .....	9
2.1.3.2	Mohr-Coulombsches Modell .....	9
2.1.4	Coulomb-Slip Joint Model zur Beschreibung der Kluffeigenschaften .....	11
<b>3</b>	<b>Die Blocktheorie von R.E. Goodman und G.-h. Shi</b> .....	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchungen zum Einfluss der Dilatanz</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1</b>	<b>Kluftkörper begrenzt durch saiger stehende Kluftflächen</b> .....	<b>16</b>
4.1.1	Modellierung .....	16
4.1.1.1	Variante 1 – frei bewegliche Randblöcke .....	18
4.1.1.2	Variante 2 – unverschiebliche Randblöcke.....	18
4.1.2	Materialkennwerte .....	18
4.1.3	Ergebnisse der Untersuchungen mit beweglichen Randblöcken .....	19
4.1.3.1	Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=0^\circ$ .....	19
4.1.3.2	Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels $\psi_{grenz}$ für Reibungswinkel $\varphi=9.5^\circ$ .....	23
4.1.3.3	Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=2^\circ$ .....	23
4.1.3.4	Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels $\psi_{grenz}$ für Reibungswinkel $\varphi=1.5^\circ$ .....	24
4.1.4	Ergebnisse der Untersuchungen mit unverschieblichen Randblöcken.....	25
<b>4.2</b>	<b>Orthogonales Kluftsystem</b> .....	<b>27</b>
4.2.1	Modellierung .....	27
4.2.1.1	Fall A – an der Kavernenlaibung gleitende Kluftkörper .....	29
4.2.1.2	Fall B – Frei Fallende Kluftkörper .....	29
4.2.2	Materialkennwerte .....	30
4.2.3	Ergebnisse der Untersuchungen eines orthogonalen Kluftsystems .....	31
4.2.3.1	Gegenüberstellung des Einflusses Modellierung Fall A – Fall B .....	31
4.2.3.2	Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=0^\circ$ .....	31
4.2.3.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Reibungswinkel $\varphi=28.1^\circ$ und $\varphi=28.2^\circ$ bei einer Dilatanz $\psi=0^\circ$ .....	33
4.2.3.4	Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=5^\circ$ .....	39
4.2.3.5	Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels $\psi_{grenz}$ für Reibungswinkel $\varphi=20^\circ$ .....	40
<b>4.3</b>	<b>Schlussfolgerungen zum Einfluss der Dilatanz</b> .....	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Stabilität einer Kaverne mit horizontaler Firstfläche</b> .....	<b>44</b>
<b>5.1</b>	<b>Materialkennwerte</b> .....	<b>44</b>
<b>5.2</b>	<b>Untersuchung mittels Blocktheorie</b> .....	<b>45</b>
5.2.1	Ergebnisse der Blocktheorieuntersuchungen .....	47

5.2.1.1	Block 1111 nach Blocktheorie .....	47
5.2.1.2	Block 1011 nach Blocktheorie .....	48
5.2.1.3	Block 1101 nach Blocktheorie .....	49
<b>5.3</b>	<b>Untersuchung mittels 3DEC .....</b>	<b>50</b>
5.3.1	Modellaufbau .....	50
5.3.2	Variation der Kluffestigkeiten .....	52
5.3.3	Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit geringen Kluffestigkeiten .....	52
5.3.4	Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit geringen Kluffestigkeiten und ohne Berücksichtigung der Rotation .....	60
5.3.5	Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit hohen Kluffestigkeiten .....	66
<b>5.4</b>	<b>Mass (Density) Scaling .....</b>	<b>73</b>
5.4.1	Versagensverhalten bei Berücksichtigung des Mass Scaling .....	74
5.4.2	Versagensverhalten ohne Berücksichtigung des Mass Scaling .....	76
5.4.3	Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit geringen Kluffestigkeiten und ohne Berücksichtigung des Mass Scaling .....	77
<b>5.5</b>	<b>Vergleich Blocktheorie - 3DEC .....</b>	<b>79</b>
<b>5.6</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>Anwendungsbeispiel: Untersuchung einer seichtliegenden, innerstädtische U-Bahnstation in geklüftetem Fels mittels 3DEC .....</b>	<b>82</b>
<b>6.1</b>	<b>Problemstellung .....</b>	<b>82</b>
<b>6.2</b>	<b>Materialkennwerte .....</b>	<b>84</b>
<b>6.3</b>	<b>Untersuchung mittels Blocktheorie .....</b>	<b>85</b>
6.3.1	Ergebnisse der Blocktheorieuntersuchungen .....	86
<b>6.4</b>	<b>Untersuchung mittels 3DEC .....</b>	<b>89</b>
6.4.1	Starrkörperbewegung .....	89
6.4.1.1	Modellaufbau .....	89
6.4.1.2	Ergebnisse der Starrkörperberechnung .....	92
6.4.1.3	Vergleich der Ergebnisse Starrkörperbewegung und Blocktheorie .....	99
6.4.2	Untersuchung mittels linear elastischen Materialmodells .....	99
6.4.2.1	Modellaufbau .....	100
6.4.2.2	Ergebnisse linear elastisches Materialmodell .....	101
6.4.2.3	Zusammenfassung linear elastisches Materialmodell .....	106
6.4.3	Untersuchungen mittels Mohr Coulombschen Materialmodells .....	107
6.4.3.1	Modellaufbau .....	107
6.4.3.2	Ergebnisse des Mohr Coulombschen Materialmodells .....	107
6.4.3.3	Zusammenfassung Mohr Coulombsches Materialmodell .....	114
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>119</b>

# 1 Einleitung

Fels unterscheidet sich von anderen Baumaterialien anhand gegebener Diskontinuitäten in Form von Klüften, Störungen und Scherzonen. Unabhängig von diesen Diskontinuitäten ist eine primäre Entscheidung zu treffen, ob für die weitere felsmechanische Untersuchung eine Analytische oder computerunterstützte Methode gewählt wird.

Für die Analytischen Berechnungen bietet sich die Blocktheorie von Goodman & Shi (1985) an. Dabei werden Klufkörper ermittelt, die aufgrund gegebener Trennflächensysteme entfernbar sind.

Die Art, Form und Häufigkeit der Diskontinuitäten entscheiden maßgeblich ob ein kontinuumsmechanisches oder einem diskontinuumsmechanisches Modell zum Einsatz kommt.

Kontinuumsmechanische Modelle sind sehr sinnvoll, wenn Fels vorliegt, welcher relativ frei von Diskontinuitäten ist, wenn er also quasi als Kontinuum betrachtet werden kann. Auch bei vorliegen einzelner, quantifizierbarer Trennflächen, findet diese Methode ihre Anwendung (Brown, 1987).

Die Eigenschaften eines geküfteten Mediums (Fels) werden oft als anisotrop beschrieben. Besitzt ein geklüfteter Fels stark anisotrope Spannungszustände, dann kann es zur Öffnung von Trennflächen kommen. Dieses Aufgehen von Trennflächen kann das Verhalten des Gesamtsystems entscheidend beeinflussen und kann mit kontinuumsmechanischen Ansätzen nicht ausreichend modelliert werden. Dafür sind diskontinuumsmechanische Verfahren besser geeignet, denn sie setzen keinen Zusammenhalt der Gesamtstruktur bei der Formänderung voraus. Die in einem Modell enthaltenen diskreten (distinkten) Elemente und/ oder Blöcke stellen für sich ein Kontinuum dar und können sich frei bewegen. Zusammengesetzt bilden diese diskreten Blöcke ein Diskontinuum. Wechselwirkungen zwischen den Blöcken entstehen, wenn die Blöcke (Elemente) in Kontakt sind, oder während der Berechnung in Kontakt treten. (Preh, 2004)

Es existiert eine Vielzahl von numerischen Verfahren, mit deren Hilfe sich diskontinuumsmechanische Fragestellungen lösen lassen. Als Beispiel sind das zweidimensionale Programm UDEC und das dreidimensionale Programm 3DEC der Itasca Consulting Group, Inc. anzugeben.

In der vorliegenden Arbeit wird das Programm 3DEC verwendet, um das Versagensverhalten von Kavernen in geklüftetem Fels zu untersuchen. Es sollen auch Untersuchungen zum Einfluss der Dilatanz angestellt werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse mit der Blocktheorie verglichen.

## 2 Distinkte Elemente Methode

Die Distinkte Elemente Methode ist ein von Cundall (1971) entwickeltes numerisches Verfahren, welches in die Gruppe der Diskreten Elemente Verfahren (Discrete Element Method – DEM) einzuordnen ist. Diese Methode findet Anwendung bei der Lösung felsmechanischer Problemstellungen und dient als Grundlage für die von der Itasca Consulting Group, Inc. angebotenen Programme UDEC, 3DEC und PFC.

Die Eigenschaften dieser Verfahren beschreibt Will (1995) wie folgt:

- Das Modell besteht aus diskreten Elementen/ Blöcken, die an sich ein Kontinuum darstellen (im Extremfall die Körner des Korngefüges).
- Viele diskrete Blöcke bilden das Diskontinuum. Wechselwirkungen untereinander entstehen, wenn Elemente/ Blöcke in Kontakt sind oder im Rechenprozess in Kontakt treten können.

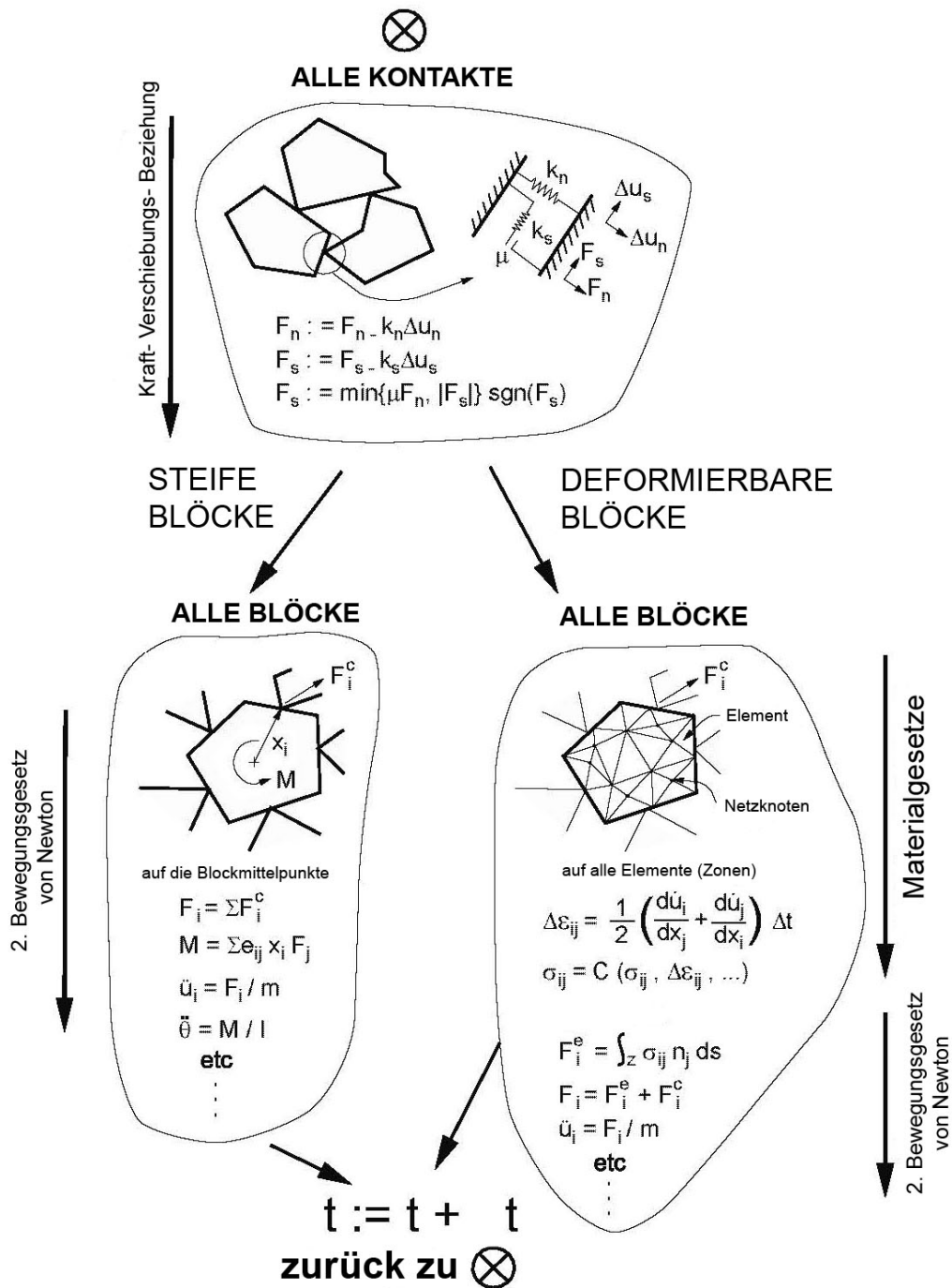
Daraus ergeben sich die wesentlichen Merkmale eines DEM Programms (Will, 1995):

Eine Beschreibung der diskreten Blöcke einschließlich ihrer Geometrie und ihres Materialverhaltens muss möglich sein. Dabei kann das Materialverhalten als starr oder verformbar angenommen werden kann. Es ist gerechtfertigt ein starres Blockmaterial anzunehmen, wenn davon ausgegangen werden kann, dass es im physikalischen System hauptsächlich zu Bewegungen in den Diskontinuitäten/ Kontakten kommt. Im Gegensatz dazu sollte die Verformbarkeit der Elemente gewährleistet sein, wenn hohe Spannungen und Verformungen der Elemente/ Blöcke zu erwarten sind.

Um die Wechselwirkung der Blöcke erfassen zu können, werden Kontakte (Interfaces) vereinbart. Diese Kontakte können als Punkt-, Linien- oder Flächenkontakt definiert sein. Des Weiteren muss die Art der Wechselwirkung zwischen den Elementen festgelegt werden, wobei für das Verhalten der Bewegung in Normalrichtung zu der Kontaktebene ein "harter" oder "weicher" Kontakt formuliert werden kann. Ein "harter" Kontakt (keine Penetration der Blöcke möglich) ist für Systeme mit geringer Reibung auf niedrigem Spannungsniveau anwendbar. In Systemen mit größerer Reibung und hohem Spannungsniveau (geklüfteter Fels) sollte jedoch der Einfluss der Normalsteifigkeit berücksichtigt werden. Dabei sollte geachtet werden, dass eine unrealistisch große Durchdringung der Blöcke vermieden wird.

Für die Ermittlung der Kontakte sind leistungsfähige Algorithmen notwendig, denn diese müssen bestimmen können welche Blöcke in Kontakt sind, während des Rechengvorgangs in Kontakt treten können oder ihren Kontakt verlieren. Es müssen Größe und Richtung der Kontaktkräfte und damit die Art der Wechselwirkung am Kontakt bestimmt werden können.

Die Distinkte Elemente Methode ist in der Gruppe der Diskreten Elemente Verfahren sicherlich einer der leistungsfähigsten numerischen Methoden.



**Abbildung 2.1:** Ablaufschema des Berechnungszyklus bei der Methode der Distinkten Elemente (gem. Itasca, 2000)

Als Berechnungsverfahren dient ein expliziter, zeitgesteuerter Algorithmus, in dem für jeden Zeitschritt wechselseitig alle Blöcke und alle Kontakte berechnet werden (vgl. Abbildung 2.1). Dabei werden unter Beachtung der vereinbarter Kontaktgesetzmäßigkeiten und Randbedingungen der Elemente/ Blöcke, schrittweise Gleichungen gelöst. Das Gleichungssystem setzt sich dabei aus Blöcken zusammen, die starr oder beweglich sein können. Außen auf den Block angreifende Kräfte führen zu translatorischen und/ oder rotierenden Bewegungen des betrachtenden Blocks.

## 2.1 3 Dimensional Distinct Element Code (3DEC)

Der 3 Dimensional Distinct Element Code (3DEC) ist ein numerisches Modellierungsverfahren basierend auf der Methode der Distinkten Elemente. Dieses Verfahren kann den diskontinuumsmechanischen Berechnungsverfahren zugeordnet werden.

In der numerischen Formulierung wird sowohl der diskrete Körper als auch dessen Kontakt zu den angrenzenden Blöcken berücksichtigt. Diese Modellierung ermöglicht es, dass sich einzelne Klufkörper aus dem Verband lösen und Spalten (Klüfte) sich öffnen können.

3DEC ermöglicht es, beliebig viele Trennflächen zu modellieren und diesen Klufteigenschaften (Kluftnormal-, Kluftparallelsteifigkeit, Kohäsion und Reibungswinkel) zuzuordnen. Die Klufkörper lassen sich sowohl als starre als auch als deformierbare Blöcke beschreiben. Eine Verwendung von starren Klufkörpern empfiehlt sich, wenn die in dem Modell auftretenden Verschiebungen größtenteils durch Bewegungen in den Kontaktflächen erzeugt werden. Lässt sich die Deformation des Materials nicht mehr vernachlässigen, kann man den Klufkörpern Materialeigenschaften zuordnen, die sowohl elastische als auch plastische Verformungen ermöglichen. Um den Klufkörpern (Blöcke) diese Verformungen zu ermöglichen, ist es notwendig, diese zu diskretisieren. Die Diskretisierung der Blöcke in tetraederförmige Zonen erfolgt über die Eingabe der mittleren Tetraederkantenlänge, vom Programm automatisch. Einhergehend mit der Feinheit der Zonierung erhöht sich die Genauigkeit der Verformungen, was aber auch dazu führt, dass die Rechenzeit stark zunimmt.

Vielflächige Körper lassen sich in 3DEC nach zwei Arten modellieren (gem. Itasca, 2007):

- Starre Körper: besitzen 6 Freiheitsgrade (3 translatorische, 3 rotatorische) und werden begrenzt von ebenen, polygonalen Oberflächen.
- Deformierbare Blöcke werden in Tetraeder unterteilt, welche an jeder einzelnen Oberfläche 3 translatorische Freiheitsgrade besitzen.

## 2.1.1 Starrkörperbewegung

Die translatorische Bewegung eines einzelnen Blocks lässt sich mittels folgender Gleichung ausdrücken:

$$\ddot{x}_i + a\dot{x}_i = \frac{F_i}{m} + g_i \quad (\text{Gl. 2.1})$$

- mit
- $\ddot{x}_i \dots$  Beschleunigung des Blockmittelpunktes,
  - $\dot{x}_i \dots$  Geschwindigkeit des Blockmittelpunktes,
  - $a \dots$  viskose Dämpfungskonstante (in Abhängigkeit zur Masse),
  - $F_i \dots$  Summe der auf den Block einwirkenden Kräfte (Resultierende aus äußeren Kräften und durch Blockkontakt entstehende Kräfte)
  - $m \dots$  Blockmasse
  - $g_i \dots$  Vektor der Erdbeschleunigung

Die Rotationsbewegung eines starren, nicht gedämpften Blocks ist durch die Eulerschen Gleichungen beschrieben, in welchen sich die Bewegung des Körpers auf die Trägheitsachsen beziehen:

$$\begin{aligned} I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 &= M_1 \\ I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 &= M_2 \\ I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 &= M_3 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

- mit
- $I_1, I_2, I_3 \dots$  Trägheitsmomente des Blocks,
  - $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_3 \dots$  Winkelbeschleunigungen um die Trägheitsachsen,
  - $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots$  Winkelgeschwindigkeiten um die Trägheitsachsen, und
  - $M_1, M_2, M_3 \dots$  auf den Block bezogene Drehmomente.

Starrkörpermodelle werden üblicherweise für quasistatische Analysen herangezogen. Aus diesem Grund können die Gleichungen für die Rotationsbewegungen vereinfacht werden. Des Weiteren kann aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten der nicht-lineare Term der (Gl. 2.2) vernachlässigt werden. Da die Trägheitskräfte im Vergleich zu den Gesamtkräften, welche auf den Körpern auftreten, klein sind, ist eine exakte Bestimmung der Hauptträgheitsachsen nicht unbedingt notwendig. Daher werden in 3DEC für die Berechnungen nur globale Achsen verwendet.

Fügt man in die vorhin beschriebenen Gleichungen einen Term für die viskose Dämpfung ein, erhält man



$$\dot{\omega}_i + \alpha \omega_i = \frac{M_i}{I} \quad (\text{Gl. 2.3})$$

wobei die Geschwindigkeiten  $\omega_i$ , und die totalen Drehmomente  $M_i$  auf die globalen Achsen bezogen werden.

Mit Hilfe einer zentralen Finite- Differenzen- Berechnung werden die Bewegungsgleichungen integriert. Die folgenden Ausdrücke beschreiben die translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt  $t$ :

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{2} \left[ \dot{x}_i \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \dot{x}_i \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \quad (\text{Gl. 2.4})$$

$$\omega_i(t) = \frac{1}{2} \left[ \omega_i \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \omega_i \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right]$$

und die Beschleunigungen werden folgendermaßen berechnet:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[ \dot{x}_i \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \dot{x}_i \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right] \quad (\text{Gl. 2.5})$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[ \omega_i \left( t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \omega_i \left( t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right]$$

Setzt man diese Ausdrücke in die Bewegungsgleichungen ein, und löst sie nach der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt  $\left[ t + \left( \frac{\Delta t}{2} \right) \right]$  auf, so erhält man:

$$\dot{x}_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[ D_1 \dot{x}_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[ \frac{F_i(t)}{m} + g_i \right] \Delta t \right] D_2 \quad (\text{Gl. 2.6})$$

$$\omega_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[ D_1 \omega_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[ \frac{M_i(t)}{m} \Delta t \right] \right] D_2 \quad (\text{Gl. 2.7})$$

mit  $D_1 = 1 - \left( \alpha \frac{\Delta t}{2} \right)$ , und

$$D_2 = \frac{1}{1 + \alpha \frac{\Delta t}{2}}$$

Die Zunahme der Translation und der Rotation lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\Delta x_i = \dot{x}_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] \Delta t \quad (\text{Gl. 2.8})$$

$$\Delta \theta_i = \omega_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] \Delta t \quad (\text{Gl. 2.9})$$

Der Schwerpunkt des Blockes wird aktualisiert mit:

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta x_i \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Die neuen Positionen der Blockeckpunkte sind:

$$x_i^v(t + \Delta t) = x_i^v(t) + \Delta x_i + e_{ijk} \Delta \theta_j [x_k^v(t) - x_k(t)] \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Für Gruppen von zusammenhängenden Blöcken werden die Bewegungsgleichungen nur für den Master- Block berechnet. Dabei werden dessen Masse, Trägheitsmoment und die Position des Schwerpunkts repräsentativ für die gesamte Gruppe herangezogen. Nachdem die Bewegung des Masterblockes ermittelt wurde, werden die neuen Positionen der Schwerpunkte und Eckpunkte der Slave- Blöcke mit Hilfe der (Gl. 2.11) berechnet.

Die Summe der Kräfte und Momente,  $F_i$  und  $M_i$  werden nach jedem Berechnungsschritt auf Null gesetzt, nachdem die Aktualisierung der Blockbewegung abgeschlossen ist.

## 2.1.2 Bewegung deformierbarer Blöcke

In vielen Fällen ist es notwendig, die Deformation der Blöcke zu berücksichtigen, das heißt sie können nicht als starr angenommen werden. 3DEC bietet die Möglichkeit, die Deformierbarkeit der Körper zu modellieren und zu berechnen.

In der Berechnung werden die deformierbaren Blöcke intern in tetraederförmige Elemente unterteilt. Dabei hat die Anzahl der Elemente, in die ein Block unterteilt ist, Einfluss auf die Genauigkeit der Deformation.

Die Eckpunkte dieser tetraederförmigen Elemente sind Netzpunkte, und die Bewegungsgleichungen dieser Punkte lassen sich folgendermaßen formulieren:

$$\ddot{u}_i = \frac{\int_x \sigma_{ij} n_j ds + F_i}{m} + g_i \quad (\text{Gl. 2.12})$$

mit:  $s \dots$  Oberfläche der eingeschlossenen Masse  $m$ , zusammengefasst auf den Netzpunkt,

$n_j \dots$  Einheitsnormalenvektor von  $s$ ,

$F_i \dots$  Resultierende aller äußeren Kräfte, bezogen auf den Netzknoten, und

$g_i \dots$  Erdbeschleunigung

Die Kräfte in den Knotenpunkten erhält man als Summe folgender drei Komponenten:

$$F_i = F_i^z + F_i^c + F_i^l \quad (\text{Gl. 2.13})$$

Dabei berücksichtigt  $F_i^l$  die von außen einwirkenden Lasten und  $F_i^c$  die Sub- Kontaktkräfte der einzelnen Netzknoten entlang der Blockgrenzen. Nachdem eine lineare Streuung der

Verschiebungen entlang jeder Fläche angenommen werden kann, können die Effekte der Sub- Kontaktkräfte durch statisch gleichwertige Kräfte, die an den Oberflächenrandpunkten angreifen, ersetzt werden. Die noch fehlende Komponente  $F_i^z$  gibt den Einfluss der internen Spannungen an und lässt sich durch

$$F_i^z = \int_c \sigma_{ij} n_j ds \quad (\text{Gl. 2.14})$$

beschreiben, wobei:

$\sigma_{ij}$  ... Spannungstensor der Zone, und

$n_j$  ... der nach außen gerichtete Einheitsnormalenvektor der Umrisslinie C, welcher der geschlossenen polygonalen Oberfläche folgt, die durch gerade Elemente der Tetraeder definiert wird.

Für jeden Netzknoten wird der dazugehörige Kraftvektor  $\sum F_i$  ermittelt. Dieser Vektor enthält die Beiträge der aufgebrachten Kräfte und des Körpereigengewichtes infolge Gravitation. Die Gravitationskräfte werden ermittelt mit

$$F_i^{(g)} = g_i m_g \quad (\text{Gl. 2.15})$$

wobei  $m_g$  die konzentrierte Anziehungsmasse im Gitterpunkt, definiert als Summe eines Drittels der Masse der anschließenden Tetraeder an den Gitterpunkt. Befinden sich der Körper in Gleichgewicht, oder in einem stabilen Fließzustand (z.B. plastisches Fließen), wird  $\sum F_i$  am Netzknoten gleich Null sein. Andernfalls wird der Knoten gemäß dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetzes beschleunigt:

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \sum F_i^{(t)} \frac{\Delta t}{m} \quad (\text{Gl. 2.16})$$

wo der Exponent den Zeitpunkt angibt, zu dem die ermittelte Variable dazugehört.

Während jedem Zeitschritt werden die Dehnungen und Rotationen verbunden zu Knotenverschiebungen in der gewöhnlichen Art:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}) \quad (\text{Gl. 2.17})$$

$$\dot{\theta}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i}) \quad (\text{Gl. 2.18})$$

Auch wenn eine stufenweise Betrachtung durchgeführt wird, beschränkt sich diese nicht nur auf kleine Dehnungen.

Die grundlegenden Beziehungen für deformierbare Blöcke werden in inkrementeller Form benutzt, um nicht-lineare Probleme leichter bearbeiten zu können. Damit erhalten die Gleichungen folgende Form:

$$\Delta \sigma_{ij}^e = \lambda \Delta \varepsilon_v \delta_{ij} + 2\mu \Delta \varepsilon_{ij} \quad (\text{Gl. 2.19})$$

mit  $\lambda, \mu \dots$  Lamesche Parameter,  
 $\Delta \sigma_{ij}^e \dots$  elastische Bestandteile des Spannungstensors,  
 $\Delta \varepsilon_{ij} \dots$  Dehnungsänderungen,  
 $\Delta \varepsilon_v = \Delta \varepsilon_{11} + \Delta \varepsilon_{22} \dots$  Bestandteile der Volumsdehnung, und  
 $\delta_{ij} \dots$  das Kronecker – Delta

## 2.1.3 Materialmodelle zur Beschreibung deformierbarer Körper

### 2.1.3.1 Linear elastisches, isotropes Modell

Das elastische, isotrope Modell ist die einfachste Form, Materialverhalten zu beschreiben. Dieses Materialmodell ist gültig für isotropes, gleichförmiges Material, welches über ein lineares Spannungs- Dehnungsverhalten ohne Entlastungshysterese verfügt. In diesem Modell erzeugt ein Dehnungszuwachs eine Erhöhung der Spannungen gemäß dem Hookeschen Gesetz:

$$\Delta \sigma_{ij} = 2G \Delta \varepsilon_{ij} + \alpha_2 \Delta \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (\text{Gl. 2.20})$$

wobei die Einsteinsche Summationskonvention gilt,  $\delta_{ij}$  das Kronecker- Delta und  $\alpha_2$  eine Materialkonstante ist, welche vom Schubmodul G und Kompressionsmodul K abhängt:

$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3} G \quad (\text{Gl. 2.21})$$

Mit der Bedingung

$$\sigma_{ij}^N = \sigma_{ij} + \Delta \sigma_{ij} \quad (\text{Gl. 2.22})$$

erhält man die neuen Spannungen.

### 2.1.3.2 Mohr-Coulombsches Modell

Das Mohr- Coulombsche Modell ist in der Fels- und Bodenmechanik das gebräuchlichste Materialmodell, um Plastizitäten zu beschreiben. In 3DEC kommt zur Beschreibung der Versagensbedingung ein Mohr-Coulomb Modell mit Zugabriss zum Einsatz.

Verallgemeinerte Spannungs- und Dehnungskomponenten:

Der inkrementelle Ausdruck für das Hookesche Gesetz bezogen auf die verallgemeinerten Spannungen und Spannungszunahmen lautet:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \alpha_1\Delta\varepsilon_1^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_2^e + \Delta\varepsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_2 &= \alpha_1\Delta\varepsilon_2^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_3 &= \alpha_1\Delta\varepsilon_3^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_2^e) \end{aligned} \tag{Gl. 2.23}$$

Dabei sind  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  Materialkonstante, welche mittels Schubmodul  $G$  und Kompressionsmodul  $K$  definiert werden:

$$\alpha_1 = K + \frac{4}{3}G \tag{Gl. 2.24}$$

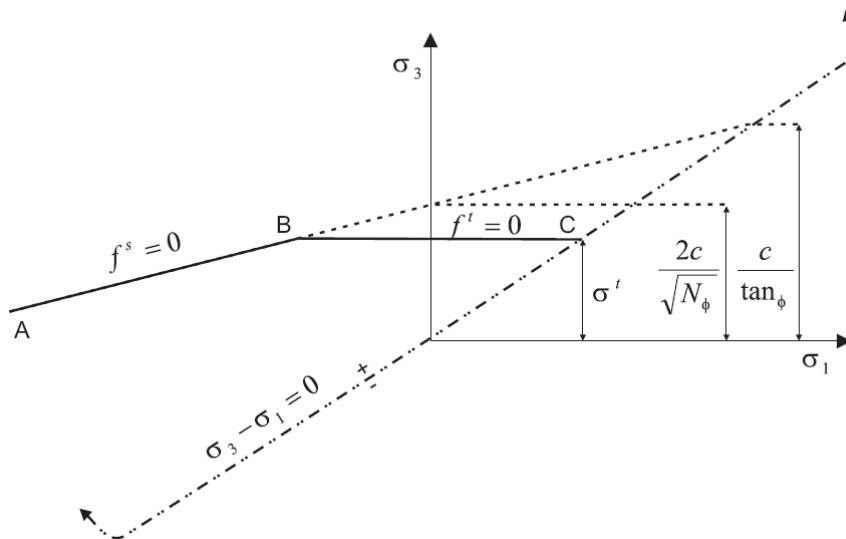
$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G \tag{Gl. 2.25}$$

Für eine einfachere Handhabung der Versagensbedingung werden die Hauptspannungen der Größe nach geordnet, d.h.

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \tag{Gl. 2.26}$$

$\sigma_1$  ist die kleinste und  $\sigma_3$  die größte der Normalspannungen, wobei Druckspannungen ein negatives Vorzeichen besitzen.

Diese Anordnung ermöglicht es, das Mohr- Coulombsche Kriterium sehr einfach graphisch darzustellen, wie in Abbildung 2.2 gezeigt wird.



**Abbildung 2.2:** Mohr- Coulombsches Versagenskriterium

Die Bruchlinie  $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$  ist definiert als Scherversagen zwischen den Punkten A und B durch das Mohr-Coulomb- Kriterium  $f^s = 0$  mit:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \tag{Gl. 2.27}$$

und als Zugversagen von B nach C durch ein Spannungsversagenskriterium in der Form  $f^t = 0$  mit

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (\text{Gl. 2.28})$$

Wobei  $\varphi$  der Reibungswinkel,  $c$  die Kohäsion,  $\sigma^t$  die Zugfestigkeit und

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (\text{Gl. 2.29})$$

ist.

Entsprechend des Schnittpunktes der gerade Linien  $f^s = 0$  und  $\sigma_1 = \sigma_3$  in der  $f(\sigma_1, \sigma_3)$  - Ebene kann die Zugspannung des Materials nicht den Wert von  $\sigma_3$  überschreiten. Der Maximalwert der Zugspannung ist durch

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \varphi} \quad (\text{Gl. 2.30})$$

definiert.

Mittels der Potentialfunktion  $g^S$  wird plastisches Fließen, entsprechend eines nicht dazugehörigen Gesetzes, definiert und besitzt folgende Form:

$$g^S = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (\text{Gl. 2.31})$$

wobei  $\psi$  der Dilatationswinkel und

$$N_\psi = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)} \quad (\text{Gl. 2.32})$$

ist.

### 2.1.4 Coulomb-Slip Joint Model zur Beschreibung der Klufteigenschaften

Das Kluftverhalten wird in 3DEC hauptsächlich mit Hilfe des verallgemeinerten Coulombschen Schergesetzes wiedergegeben, da dieses die einfachste Form der Kluftmodellierung liefert. Dieses Gesetz lässt sich sowohl bei Sub- Kontakten zwischen starren als auch zwischen deformierbaren Blöcken anwenden. In der Modellierung wird das Scher- und das Zugversagen als auch die Dilatanz der Klüfte berücksichtigt.

Im elastischen Bereich wird das Verhalten durch die Kluftnormal- und Kluftschersteifigkeit,  $K_n$  und  $K_s$  bestimmt. Diese Steifigkeiten lassen sich aus folgenden Beziehungen ermitteln:

$$\Delta F^n = -K_n \Delta U^n A_c \quad (\text{Gl. 2.33})$$

$$\Delta F_i^s = -K_s \Delta U_i^s A_c \quad (\text{Gl. 2.34})$$

Für eine intakte Kluft (eine Kluft ohne vorangegangenen Gleit- oder Trennbewegungen), wird die Zugkraft begrenzt mit

$$T_{\max} = -TA_c \quad (\text{Gl. 2.35})$$

wobei  $T$  die Zugkraft der Kluft ist.

Die maximal mögliche Scherkraft ist gegeben durch

$$F_{\max}^S = cA_c + F^n \tan \varphi \quad (\text{Gl. 2.36})$$

wobei  $c$  und  $\varphi$  die Kohäsion und den Reibungswinkel der Kluft angeben.

Wird der Beginn von Versagen an einem Sub- Kontakt festgestellt, egal ob Zug- oder Scherversagen, dann wird die Zugkraft und die Kohäsion mit Null angenommen:

$$T_{\max} = 0 \quad (\text{Gl. 2.37})$$

$$F_{\max}^S = F^n \tan \varphi \quad (\text{Gl. 2.38})$$

Dieser augenblickliche Verlust von Festigkeit nähert sich dem „Verschiebungs-Schwächungs-“ Verhalten einer Kluft.

Die neuen Kontaktkräfte werden nach folgender Art berichtigt (die Normaldruckkraft ist positiv):

Bei Zugversagen:

$$\text{Wenn } F^n < T_{\max}, \text{ dann ist } F^n = 0 \text{ und } F_i^s = 0 \quad (\text{Gl. 2.39})$$

Bei Scherversagen:

$$\text{Wenn } F^s > T_{\max}, \text{ dann ist } F_i^s = F_i^s \frac{F_{\max}^s}{F^s} \quad (\text{Gl. 2.40})$$

wobei die Größe der Scherkraft  $F_s$  folgendermaßen definiert ist:

$$F^s = (F_i^s F_i^s)^{1/2} \quad (\text{Gl. 2.41})$$

Dilatanz tritt nur auf, wenn es zu einem Gleiten in den Trennflächen kommt. Die Größe des Scherverschiebungsinkrements  $\Delta U^s$  wird ermittelt mit:

$$\Delta U^s = (\Delta U_i^s \Delta U_i^s)^{1/2} \quad (\text{Gl. 2.42})$$

Diese Verschiebung führt zu einer Dilatanz von

$$\Delta U^n(\text{dil}) = \Delta U^s \tan \psi \quad (\text{Gl. 2.43})$$

mit dem Dilatationswinkel  $\psi$ .

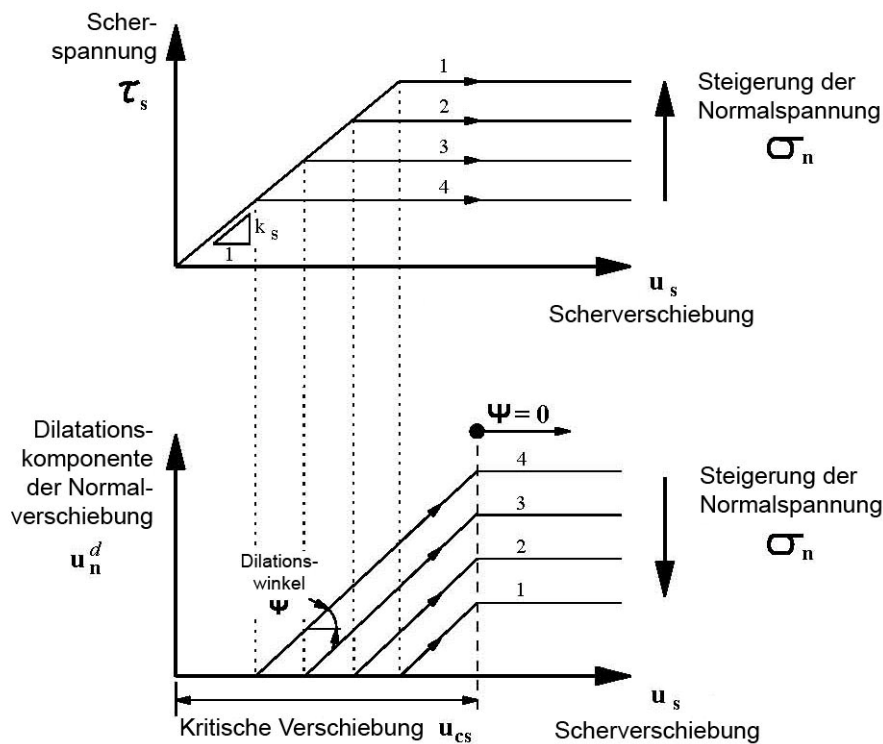
Die Normalkraft muss korrigiert werden, um den Einfluss der Dilatanz zu berücksichtigen:

$$F^n = F^n + K_n A_c \Delta U^s \tan \psi \tag{Gl. 2.44}$$

Bei den in der Natur vorkommenden, realen Klüften kommt es zu einer Reduktion des Dilatationswinkels wenn der Restscherwinkel der Kluft erreicht wird. In 3DEC ist es möglich, die Dilatanz der Klüfte für eine bestimmte Zeit zu verhindern in dem eine begrenzte Scherverschiebung  $U_{lim}^s$  vorgeschrieben wird. Wenn die Scherverschiebung  $U_{lim}^s$  überschritten wird, wird der Dilatationswinkel Null gesetzt.

Die Dilatanz ist eine Funktion der Scherrichtung und sie steigt wenn das Inkrement der Scherverschiebung in die gleiche Richtung zeigt wie die gesamte Scherverschiebung. Zeigt hingegen das Inkrement in die entgegengesetzte Richtung, nimmt die resultierende Scherverschiebung ab.

Abbildung 2.3 beschreibt das "Coulomb-Slip Joint Model" für den Fall, dass die Kluftkohäsion Null ist.



**Abbildung 2.3:** Kluftmodell nach Coulomb (im Fall von Kohäsion in der Kluft = 0) (gem. Itasca, 2007)



### 3 Die Blocktheorie von R.E. Goodman und G.-h. Shi

Mit der Blocktheorie liefert Goodman ein Werkzeug zur Lösung von Block- Kluft Interaktionen bei Ausbrüchen. Einsetzbar ist die Analyseverfahren vor allem in Fels, wo die Bewegung eines Blockes, wie z.B. Gleiten auf einer Trennfläche, den maßgebenden Versagensmechanismus darstellt. Das Ziel ist es, kritische Blöcke zu finden, die aufgrund der beteiligten Trennflächen und der Ausbruchsfläche die Standsicherheit gefährden können. Da diese Analysen aufwendig sind, werden folgende Vereinfachungen getroffen, um ein praktikables Werkzeug zur Verfügung zu haben (Goodman, 1985):

- Alle Trennflächen werden als eben angenommen, weil mit Hilfe dieser Annahme es möglich ist, lineare Vektorgleichungen für die Block- Morphologie aufzustellen.
- Es wird angenommen, dass die Trennflächen durch das gesamte Untersuchungsgebiet hindurch laufen, dh. Diskontinuitäten enden nicht innerhalb der Region des „Key-Blocks“. Dies führt dazu, dass alle Blöcke durch die bestehenden Trennflächen definiert sind und es keiner weiteren Klüfte bedarf zur Ermittlung der Blockbewegung.
- Blöcke werden durch das Trennflächengefüge bestimmt und sind als starr angenommen. Das bedeutet, dass keine Blockdeformation und –zerstörung in die Berechnung einfließt. Der „Key-Block“ wird zur Gänze über die Geometrie und die Topologie bestimmt. Bei einer möglichen späteren Stabilitätsuntersuchung des „Key-Blocks“ können die Festigkeitseigenschaften der Diskontinuitäten berücksichtigt werden.
- Die Diskontinuitäten und die Ausbruchsfläche werden angenommen und als Eingangswerte festgelegt. Ist die Raumstellung einer Kluftschar einer Streuung unterworfen, so ist repräsentativ für diese Schar eine Orientierung festzulegen. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik kann der Einfluss der Streuung ermittelt werden.

In einem ersten Schritt werden alle Kluftkörper bestimmt, die sich durch das Trennflächengefüge ergeben. Anschließend werden jene Kluftkörper bestimmt, die bei gegebener freier Oberfläche aus dem Kluftkörperverband entfernbar sind, ohne andere Kluftkörper entfernen zu müssen. Wenn ein Kluftkörper aus dem Verband entfernt wird und dadurch eine Kettenreaktion auslöst, die dann das System zum Zusammenbruch bringt, werden diese Körper auch als „Key-Blocks“ bezeichnet.

Nachdem die entfernbar Blöcke ermittelt wurden, wird mit Hilfe rein geometrischer Zusammenhänge untersucht, wie sich der entfernbar Kluftkörper kinematisch verhält. Es ist von Interesse, ob der Block von allen Trennflächen abhebt (fällt) oder ob er auf einer bzw. zwei Trennflächen gleitet.

Ist einmal das Versagensverhalten des entfernbaren Blockes bestimmt, kann ein Sicherheitsbeiwert bestimmt werden. Erst in diesem Untersuchungsstadium fließen die Kluffestigkeiten wie Kohäsion  $c$  und Reibungswinkel  $\varphi$  ein. Mit Hilfe des Sicherheitsbeiwertes lassen sich in weiterer Folge benötigte Sicherungsmittel, wie z.B. Anker berechnen.

Sind für die zu untersuchende Problemstellung keine Kluftabstände bekannt, wird der Sicherheitsbeiwert für die ungünstigste Blockgröße ermittelt. Dabei können Blöcke entstehen, die den gesamten Untersuchungsraum überspannen.

## 4 Untersuchungen zum Einfluss der Dilatanz

Das Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss der Dilatanz in Bezug auf die Grenzreibung und das Grenzgleichgewicht zu ermitteln. Im Rahmen der mittels 3DEC durchgeführten Berechnungen wurden zwei Modelle aufgebaut. Für die erste Untersuchung wurde ein rechteckiger Einzelblock mit saiger stehenden Kluffflächen modelliert der in der Mitte der Firstfläche liegt. In der zweiten Modellierung wurde der Dilatanz einfluss an einem orthogonalen Kluftsystem untersucht.

Diese Untersuchungen sollen Aufschluss geben wie groß der Einfluss der Dilatanz ist, wenn für die Berücksichtigung der Trennflächeneigenschaften das "Coulomb-Slip Joint Model" verwendet wird.

### 4.1 Kluffkörper begrenzt durch saiger stehende Kluffflächen

Die erste Untersuchung erfolgte an einem rechteckigen Einzelblock mit saiger stehenden Trennflächen. Diese Modellierung wurde gewählt, um das reine Fallen des Blockes simulieren zu können. Saiger stehende Kluffflächen sollen verhindern, dass Normalkräfte in den Scherflächen auftreten und damit ein Scherwiderstand erzeugen können.

Bei einer Modellierung mittels des „Coulomb-Slip Joint Models“ werden die entstehenden Normalkräfte aus zwei Bestandteilen zusammengesetzt. Der eine Anteil wird durch den Reibungswinkel  $\varphi$  hervorgerufen, der zweite durch die Dilatanz  $\psi$ .

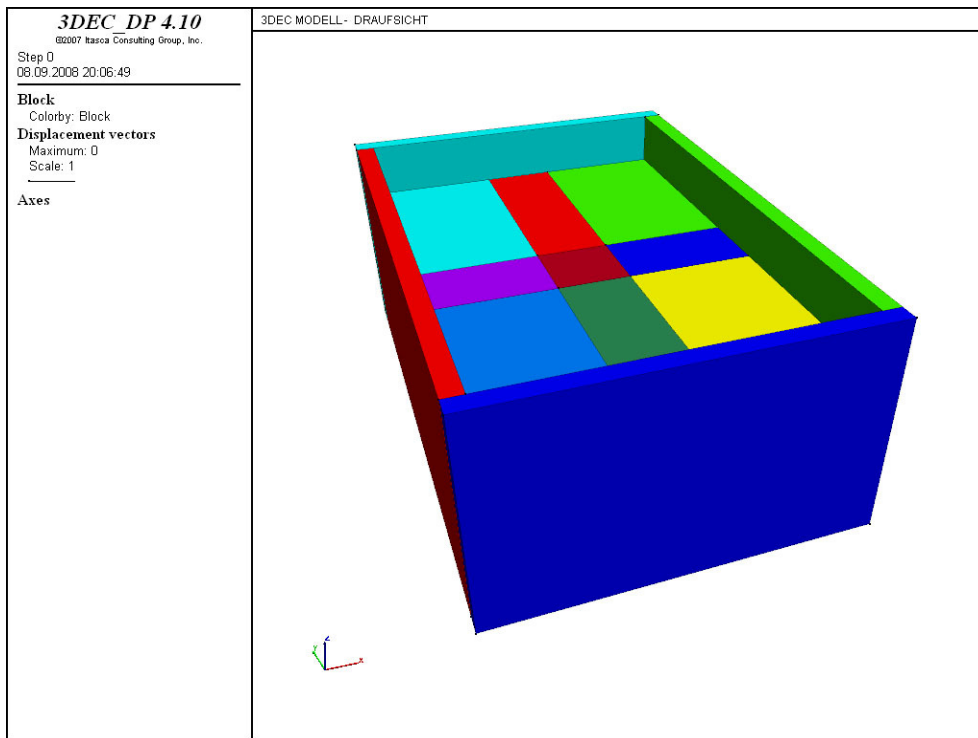
#### 4.1.1 Modellierung

Modelliert wurde eine 30 m breite, 100 m lange und 25 m hohe Kaverne mit einem rechteckigen, einzelnen Kluffkörper in der Mitte der Firstfläche. Die Abbildung 4.1 zeigt das verwendete Modell in einer axonometrischen Darstellung von oben. Der zu untersuchende Kluffkörper besitzt einen quadratischen Grundriss mit einer Kantenlänge von 20 m und eine Höhe von 15 m.

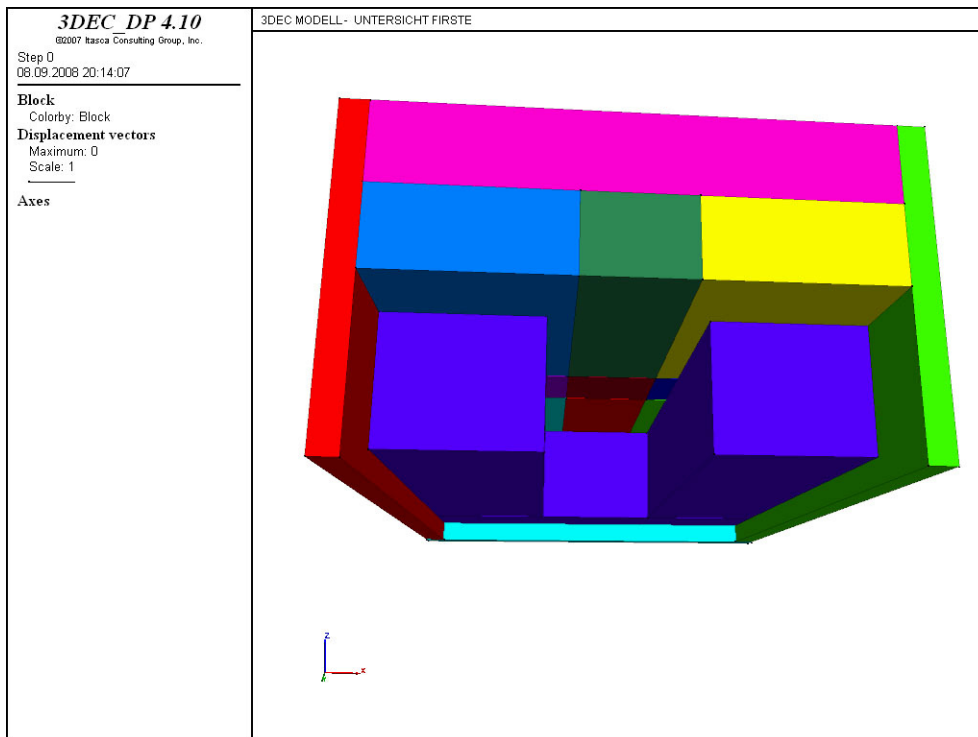
Die Randbedingungen wurden mit Hilfe von 5 m dicken, scheibenförmigen, unverschieblichen Kluffkörpern modelliert, welche das Modell seitlich und am Boden begrenzen (siehe Abbildung 4.1)

Um nur den Einfluss des Firstbereiches zu berücksichtigen, wurden die Kavernenwände ebenfalls als unverschiebliche Kluffkörper ausgebildet. Diese dienen als Widerlager für den 15 m mächtigen und geklüfteten Firstbereich, in dem der zu untersuchende Einzelblock liegt. Im Modell wurde der Untersuchungsbereich noch von einer 15 m dicken, klufffreien Schicht abgedeckt. Diese soll das Rotationsvermögen der Randblöcke minimieren, die den zu

untersuchenden Einzelblock umschließenden. Abbildung 4.2 zeigt einen Querschnitt durch das Modell.



**Abbildung 4.1:** 3DEC Modell - rechteckiger Einzelblock mit saiger stehenden Kluffflächen (Blick auf das Modell, Abdeckplatte ausgeblendet)



**Abbildung 4.2:** 3DEC Modell – rechteckiger Einzelblock mit saiger stehenden Kluffflächen in einem Querschnitt (Bodenplatte ausgeblendet)

Im Rahmen der Untersuchungen wurden für die Modellierung der Randblöcke zwei Varianten gewählt. In einem Fall wurden die Randblöcke frei beweglich und im zweiten als unverschieblich angenommen.

#### 4.1.1.1 Variante 1 – frei bewegliche Randblöcke

Die Situierung des Einzelblockes in der Mitte der Firstfläche machte es erforderlich, den Modellkörper mit Trennflächen zu durchziehen um den Block zu formen. Durch diesen Vorgang sind neue Klufkörper entstanden, die als Randblöcke den zu untersuchenden Block umschließen (siehe Abbildung 4.1). In Variante 1 wurden diese Blöcke als frei beweglich angenommen. Dies führte während den Berechnungen dazu, dass sie neben translatorischen auch rotatorische Bewegungen durchführen können.

#### 4.1.1.2 Variante 2 – unverschiebliche Randblöcke

In Variante 2 werden bis auf den zu untersuchenden Klufkörper in Firstmitte alle Blöcke unverschieblich modelliert. Somit können die den Untersuchungskörper umgebenden Randblöcke keine Rotationsbewegungen ausüben. In diesem Fall bleiben die saiger stehenden Klufflächen währen der gesamten Rechendauer parallel zueinander.

### 4.1.2 Materialkennwerte

In den 3DEC Berechnungen wurde den Blöcken Starrkörperbewegung zugewiesen. Das Verformungsverhalten der Trennflächen wurde mit Hilfe des "Coulomb-Slip Joint Model" beschrieben.

Zur Beschreibung starrer Körper findet lediglich die Materialdichte der Blöcke Eingang. In den Modellen wurde als Gestein ein Kalkglimmerschiefer angenommen.

Dichte (Blöcke):                      Kalkglimmerschiefer:                       $\rho$                       = 2700                      [kg/m<sup>3</sup>]

Die Eigenschaften der Trennflächen wurden über den Reibungswinkel  $\varphi$  und die Dilatanz  $\psi$  ausgedrückt. Die Größe dieser Werte wurde in den einzelnen Untersuchungen variiert. Der Einfluss der Dilatanz wurde über die maximalen Scherverschiebungen in den Klüften gesteuert. in den meisten Fällen wurde die Dilatanz bei Verschiebungen bis 0.5 m berücksichtigt. Überschritten die Scherverschiebungen diesen Wert, gab es keinen weiteren Dilatanzeinfluss.

Des Weiteren wurden den Trennflächen Klufteigenschaften zugewiesen. Diese blieben in allen Berechnungen unverändert.

Klufteigenschaften:                      Normal zur Kluftebene:         $j_{kn}$      = 1.0E+9        [N/m<sup>2</sup>]  
   Parallel zur Kluftebene:         $s_{kn}$      = 1.0E+9        [N/m<sup>2</sup>]

Alle Untersuchungen erfolgten ohne Kohäsionseinfluss.

### 4.1.3 Ergebnisse der Untersuchungen mit beweglichen Randblöcken

#### 4.1.3.1 Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=0^\circ$

In einer ersten Untersuchung wurde jener Reibungswinkel ermittelt, bei welchem der Einzelblock ohne Dilatanz einfluss nicht mehr aus der Firste fällt. Diese Ermittlung wurde iterativ durchgeführt. Die Abschätzung des Reibungswinkels erfolgte entweder über die maximal auftretende Blockverschiebung oder über die Rechenschritte die der Klufkörper benötigt um auf die Sohle aufzuschlagen. Wurde eine Blockverschiebung als Ergebnis ausgelesen, war die Wahl für den Reibungswinkel zu hoch. Es hat sich bereits ein stabiler Zustand eingestellt. Ergab jedoch die Untersuchung eine Anzahl von Rechenschritten, dann wurde der Reibungswinkel zu niedrig angesetzt.

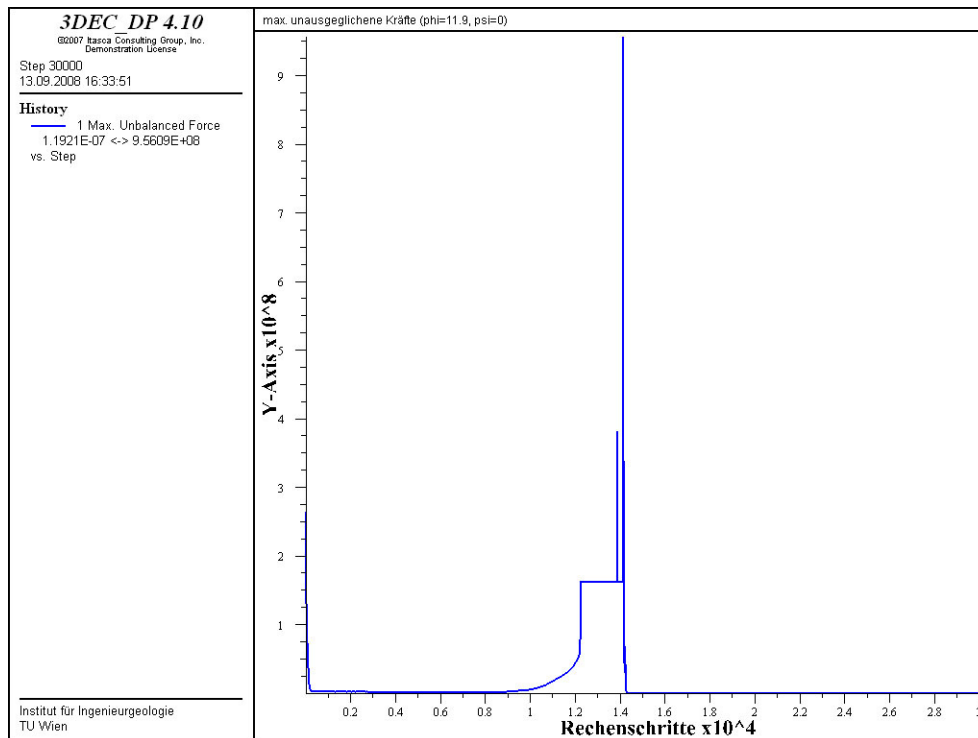
Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ $^\circ$ ]	max. Blockverschiebung [m]
1	10	3640 <sup>a</sup>
2	11.5	6490 <sup>a</sup>
3	11.6	7090 <sup>a</sup>
4	11.7	7980 <sup>a</sup>
5	11.8	9670 <sup>a</sup>
6	11.9	12270 <sup>a</sup>
7	12	3.01
8	20	0.014

**Tabelle 4.1:** Ermittlung des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{grenz}$  für den Fall Dilatanz  $\psi=0^\circ$

Wie die Zusammenstellung der Ergebnisse in Tabelle 4.1 zeigt, wurde als Grenzreibungswinkel  $\varphi=12^\circ$  ermittelt. Bei diesem Reibungswinkel stellt sich nach etwa 16000 Schritten ein stabiler Zustand ein, welcher nicht weiter zunimmt. Die maximal auftretenden Blockverschiebungen liegen bei rund 3 Meter. Beträgt hingegen  $\varphi=11.9^\circ$ , gleitet

<sup>a</sup> Benötigte Rechenschritte bis zum Auftreffen des Blockes auf der Sohle

der Kluftkörper aus dem Verband heraus und schlägt auf der Sohle auf. Der Zeitpunkt des Auftreffens auf der Kavernensohle wurde mittels des Verlaufs der maximal unausgeglichenen Kraft ermittelt (siehe Abbildung 4.3). Nach etwas mehr als 12000 Rechenschritten trifft der Block auf der Kavernensohle auf.



**Abbildung 4.3:** Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft für  $\varphi=11.9^\circ$  und  $\psi=0^\circ$

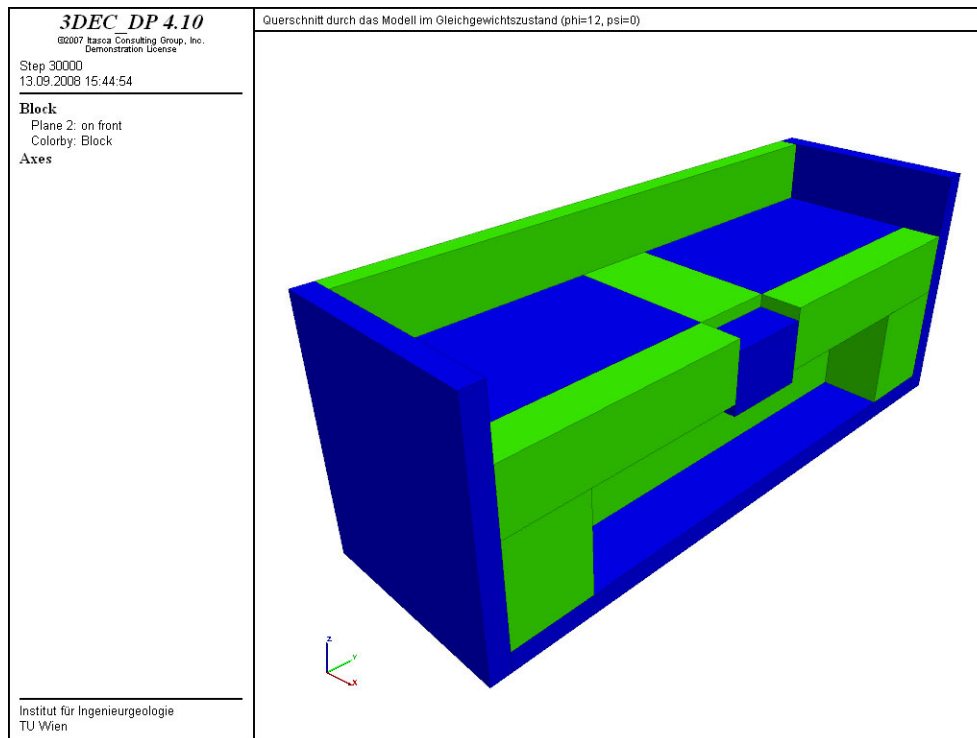
Abbildung 4.4 zeigt die Lage des Einzelblockes nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes für den Grenzreibungswinkel  $\varphi_{\text{grenz}} = 12^\circ$  in einem Längsschnitt durch das Modell. Bei einem Reibungswinkel  $\varphi$  über  $12^\circ$  treten in den Trennflächen so hohe Normalkräfte auf, dass der Block vor dem kompletten Herausgleiten gehindert wird. Wie sehr sich die Größe des Reibungswinkels auf die Vertikalverschiebungen auswirkt, zeigt die Tatsache, dass bei einem Reibungswinkel von  $20^\circ$  die maximal auftretenden Blockverschiebungen 1 cm betragen.

Neben dem Kluffreibungswinkel beeinflusst das Rotationsvermögen der Randblöcke die auftretenden Normalkräfte in den Klüften. Eine Rotation des beweglichen Randblockes zum Kluftkörper hin, erzeugt zusätzliche Normalkräfte, wodurch die Scherfestigkeit in der Kluffläche erhöht wird.

Die Rotationen der Randblöcke führen zu Schub- und Normalspannungen in den Trennflächen. In Abbildung 4.5 ist die Verteilung der Normalspannungen als Konturplot dargestellt. Die größten Spannungen treten in den Klüften zwischen Randblock und Widerlagerkörper auf, mit dem Maximum im Bereich der Kavernenwand. Diese Kante dient als Rotationsachse um die sich der Randblock verdreht. Durch die Rotation des

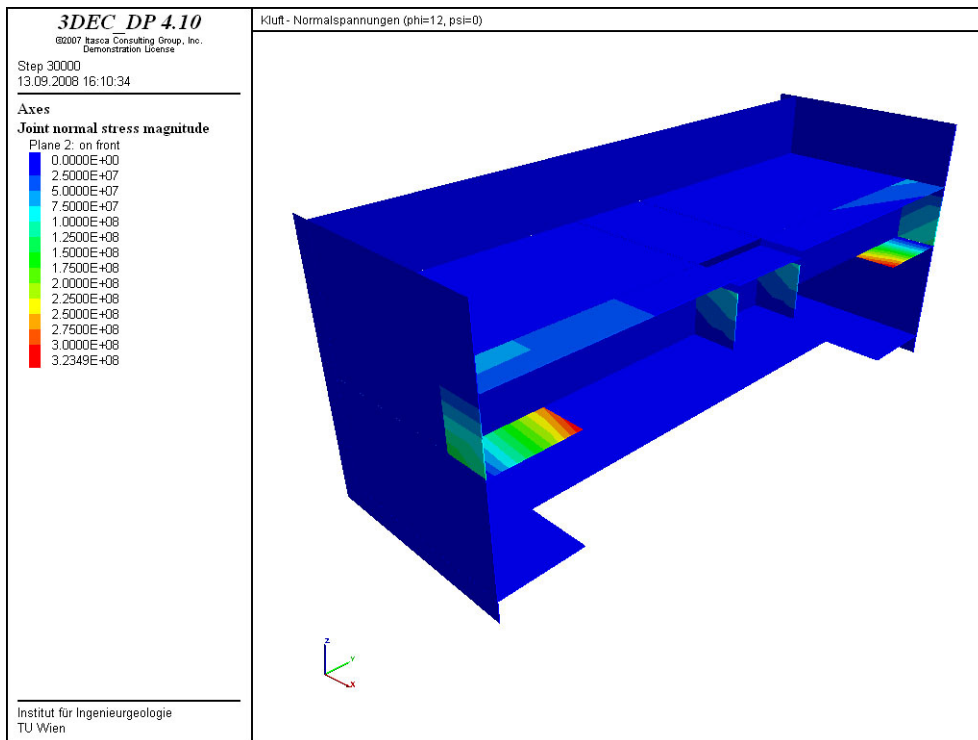
Randblockes treten auch Normalspannungen in den Trennflächen zu der Abdeckplatte auf. Der herausgleitende Kluffkörper besitzt die größten Normalspannungen im oberen Bereich. und Abbildung 4.6 sind die auftretenden Spannungen in den Trennflächen dargestellt.

Abbildung 4.6 zeigt die auftretenden Schubspannungen in den Trennflächen, nachdem sich für den Grenzreibungswinkel Gleichgewicht eingestellt hat. Die Gestalt der Spannungsverteilung ist ident mit den Kluffnormalspannungen, jedoch sind die Werte geringer.

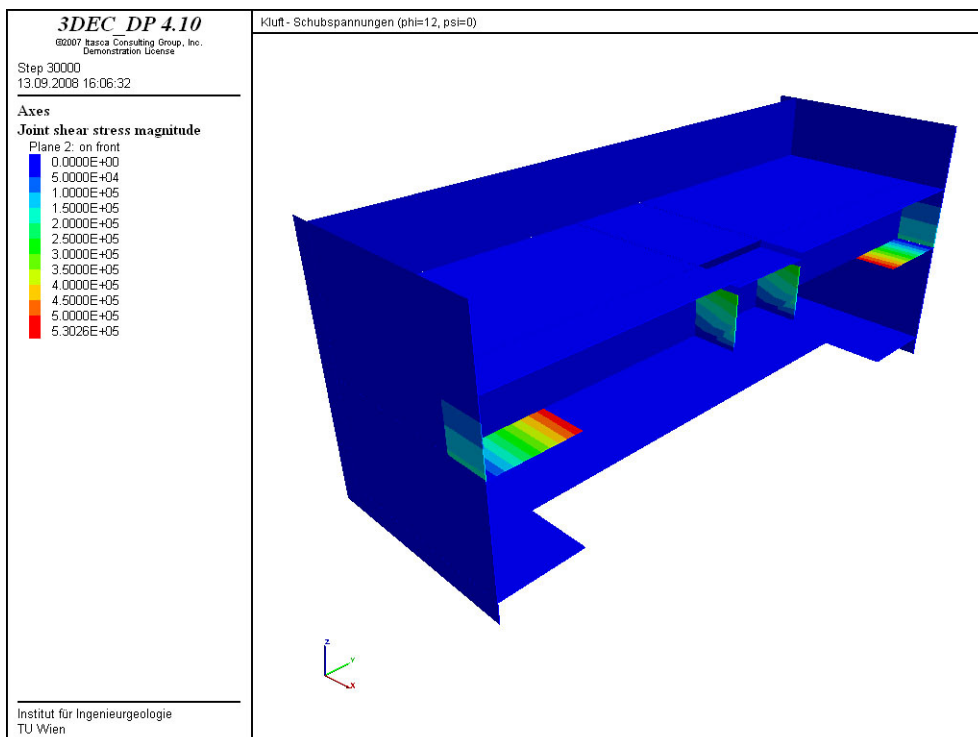


**Abbildung 4.4:** Längsschnitt durch das Modell für den Reibungswinkel  $\phi=12^\circ$  und Dilatanz  $\psi=0$  (nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes)





**Abbildung 4.5:** Konturplot der Kluftnormalspannungen für den Reibungswinkel  $\varphi = 12^\circ$  (bewegliche Randblöcke)



**Abbildung 4.6:** Konturplot der Kluftschubspannungen für den Reibungswinkel  $\varphi = 12^\circ$  (bewegliche Randblöcke)

#### 4.1.3.2 Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels $\psi_{grenz}$ für Reibungswinkel $\varphi=9.5^\circ$

Wie die Ergebnisse in Kapitel 4.1.3.1 gezeigt haben, beträgt der Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}=12^\circ$ , wenn keine Dilatanz in den Klüften wirkt. Aus diesem Grund wurde für die Ermittlung eines Grenzdilatanzwinkels  $\psi_{grenz}$  ein Reibungswinkel von  $9.5^\circ$  gewählt, da für diesen Fall ohne Dilatanzeinfluss Versagen auftreten würde. Die Grenzwertermittlung wurde wieder iterativ durchgeführt. Die zulässigen Scherverschiebungen in den Klüften wurden mit 0.5 m begrenzt. Ab diesem Zeitpunkt gab es keinen Dilatanzeinfluss mehr.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Die erste Berechnung wurde mit einem Dilatanzwinkel  $\psi=2^\circ$  durchgeführt. Ein  $\varphi=9.5^\circ$  und ein  $\psi=2^\circ$  führen zu einem stabilen Zustand. Die maximale Blockverschiebung beträgt gerade einmal 3 cm. Nach mehreren Untersuchungsdurchgängen wurde festgestellt, dass der Grenzdilatanzwinkel  $\psi_{grenz}$  zwischen  $0^\circ$  und  $0.5^\circ$  liegt. Bei einem Dilatanzwinkel  $\psi=0.5^\circ$  liegt ein stabiler Zustand vor.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ $^\circ$ ]	Dilatanz $\psi$ [ $^\circ$ ]	Max. Blockverschiebung [m]
1	9.5	2	0.029
2	9.5	1	0.045
3	9.5	0.5	0.085
4	9.5	0	3410 <sup>a</sup>

**Tabelle 4.2:** Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels  $\psi_{grenz}$  für den Fall  $\varphi = 9.5^\circ$

Diese Untersuchung hat gezeigt, dass schon das Vorliegen eines sehr kleinen Dilatanzwinkel ein instabiles System in einen stabilen Zustand überführen kann.

Bei Betrachtung der mathematischen Formulierung des "Coulomb-Slip Joint Model" (vgl. Kapitel 2.1.4) ist ersichtlich, dass eine wirkende Dilatanz mit der Kluffläche und der in der Trennfläche auftretenden Kluffsteifigkeit multipliziert wird. Da die Kluffflächen und Kluffsteifigkeiten in dem vorliegenden Fall eine nicht vernachlässigbare Größe besitzen, entsteht durch die wirkende Dilatanz ein sehr hoher Normalkraftanteil in den Trennflächen, der den Block stabilisiert.

#### 4.1.3.3 Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=2^\circ$

Als Gegenstück zur vorhergegangenen Ermittlung wurde der Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}$  für eine gegebene Dilatanz von  $\psi=2^\circ$  ermittelt. Die Dilatanz wurde bis zu einer maximalen Scherverschiebung von 0.5 m in den Klüften berücksichtigt. Wie die in Tabelle 4.3

<sup>a</sup> Benötigte Rechenschritte bis zum Auftreffen des Blockes auf der Sohle

aufgelisteten Ergebnisse zeigen, stellte sich der Grenzreibungswinkel bei  $\varphi_{grenz}=1.5^\circ$  ein, wenn die einwirkende Dilatanz  $\psi=2^\circ$  beträgt. Die dabei auftretenden Blockverschiebungen betragen rund 40 cm.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ $^\circ$ ]	Dilatanz $\psi$ [ $^\circ$ ]	Max. Blockverschiebung [m]
1	5	2	0.09
2	2	2	0.28
3	1.5	2	0.41
4	1	2	3860 <sup>a</sup>
5	0.5	2	2460 <sup>a</sup>

**Tabelle 4.3:** Ermittlung des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{grenz}$  für den Fall Dilatanz  $\psi=2^\circ$

Bei einem Dilatanzwinkel von  $\psi=2^\circ$  wurde als Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}=1.5^\circ$  ermittelt. Dies würde bedeuten dass assoziierte Fließregel vorliegen würde. Damit würde aber die viskoplastische Volumendehnung überschätzt (Wittke, 1999). Aus diesem Grund sollte nie ein Dilatanzwinkel gewählt werden der größer als der Reibungswinkel ist.

#### 4.1.3.4 Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels $\psi_{grenz}$ für Reibungswinkel $\varphi=1.5^\circ$

In den bisherigen Untersuchungen wurde der Einfluss der Dilatanz bis zu einer maximalen Scherverschiebung von 0.50 Meter berücksichtigt. Bei überschreiten dieses Wertes fand die Dilatanz keine weitere Berücksichtigung in der Berechnung. Da aber die zulässigen Scherverschiebungen in den Trennflächen den Dilatanzeinfluss steuern, wurden in einer weiteren Untersuchung die maximalen Scherverschiebungen mit 0.25 m begrenzt

Durchgeführt wurden diese Berechnungen für den vorhin ermittelten Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}=1.5^\circ$ . Dies ermöglichte einen direkten Vergleich wie sehr die Begrenzung der Scherverschiebungen auf den Dilatanzwinkel Einfluss nimmt.

Wie die Ergebnisse in der Tabelle 4.4 zeigen, gleitet bei einem Dilatanzwinkel von  $\psi=2^\circ$  der Kluttkörper aus der Firste. Auch bei einem  $\psi$  von  $3^\circ$  kommt es noch zu einem Versagen. Erst bei einem Dilatanzwinkel von  $\psi=5^\circ$  stellt sich für einen Reibungswinkel von  $\varphi=1.5^\circ$  ein stabiler Zustand ein. Der Grenzdilatanzwinkel  $\psi_{grenz}$  liegt somit zwischen  $3^\circ$  und  $5^\circ$ .

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ $^\circ$ ]	Dilatanz $\psi$ [ $^\circ$ ]	Max. Blockverschiebung [m]
1	1.5	2	2950 <sup>a</sup>
2	1.5	3	6500 <sup>a</sup>
3	1.5	5	0.18

**Tabelle 4.4:** Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels  $\psi_{grenz}$  für den Fall  $\varphi=1.5$  (maximal zulässige Scherverschiebung in den Trennflächen 0.25 m)

Diese Untersuchung hat gezeigt, dass die Größe der zulässigen Scherverschiebung in den Trennflächen einen großen Einfluss auf den zu ermittelten Grenzdilatanzwinkel  $\psi_{\text{grenz}}$  hat. So ergibt eine Reduzierung der maximal zulässigen Scherverschiebung um die Hälfte einen ca. doppelt so großen Dilatanzwinkel.

Es wird aber darauf hingewiesen, dass bei Vorliegen eines größer Dilatanz- als Reibungswinkels die viskoplastische Volumendehnung der Trennflächen überschätzt wird. Aus diesem Grund sollte der Dilatanzwinkel nicht größer als der Reibungswinkel angesetzt werden.

#### 4.1.4 Ergebnisse der Untersuchungen mit unverschieblichen Randblöcken

Eine Fixierung der Randblöcke führt dazu, dass während des Berechnungsdurchganges keine Blöcke Rotationen durchführen können. Somit bleiben die den Kluttkörper umgebenden Trennflächen die ganze Zeit parallel. Diese Modellierung führt dazu, dass es auch bei veränderlichen Reibungs- und Dilatanzwinkel zu keiner Veränderung der Ergebnisse kommt. Es entstehen keine Normalkräfte in den Trennflächen die den Einzelblock zurückhalten können.

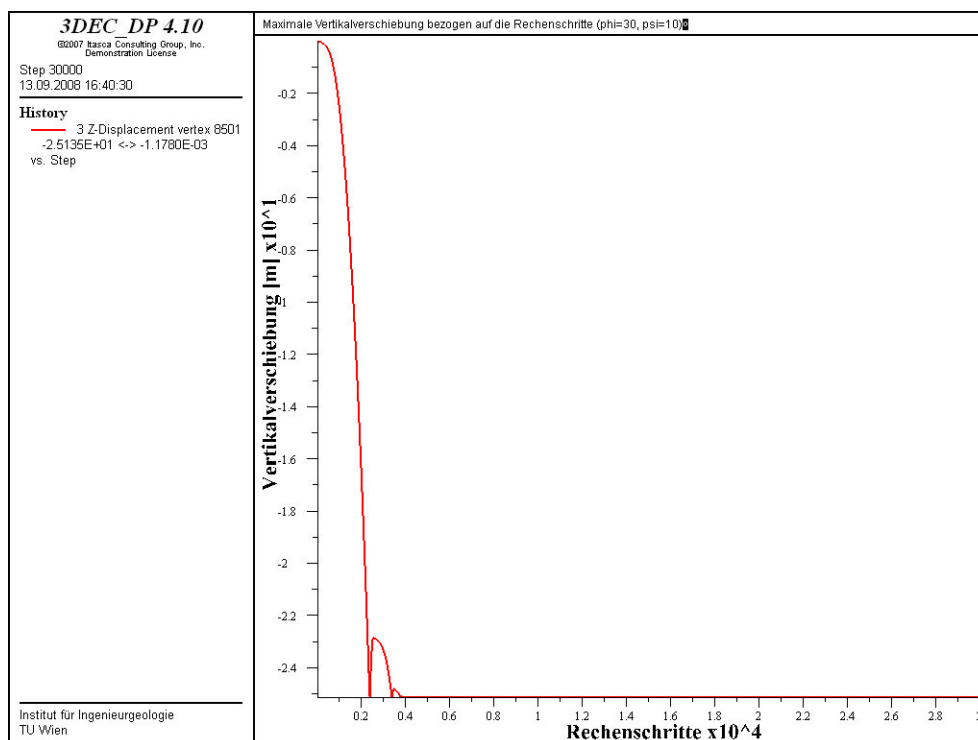
Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ ° ]	Dilatanz $\psi$ [ ° ]	Anzahl Rechenschritte
30 – 5	30	5	2370
30 – 10	30	10	2370
30 – 20	30	20	2370
30 – 30	30	30	2370
60 – 5	60	5	2370
60 – 10	60	10	2370
60 – 20	60	20	2370
60 – 30	60	30	2370
0 - 0	0	0	2370
0 - 60	0	60	2370
0 – 90	0	90	2370
50 - 10	50	10	2370
90 - 0	90	0	2370
90 - 90	90	90	2370

**Tabelle 4.5:** Untersuchungsergebnisse für den Einzelblock bei Variation von  $\varphi$  und  $\psi$  (bei unverschieblichen Randblöcken)

Im Zuge der Untersuchungen wurden Reibungs- und Dilatanzwinkel in den unterschiedlichsten Formen kombiniert, wie in Tabelle 4.5 zu sehen ist. Es ist egal in welchem Verhältnis  $\varphi$  und  $\psi$  zueinander stehen, der Block schlägt immer nach exakt gleich vielen Rechenschritten auf der Sohle auf.

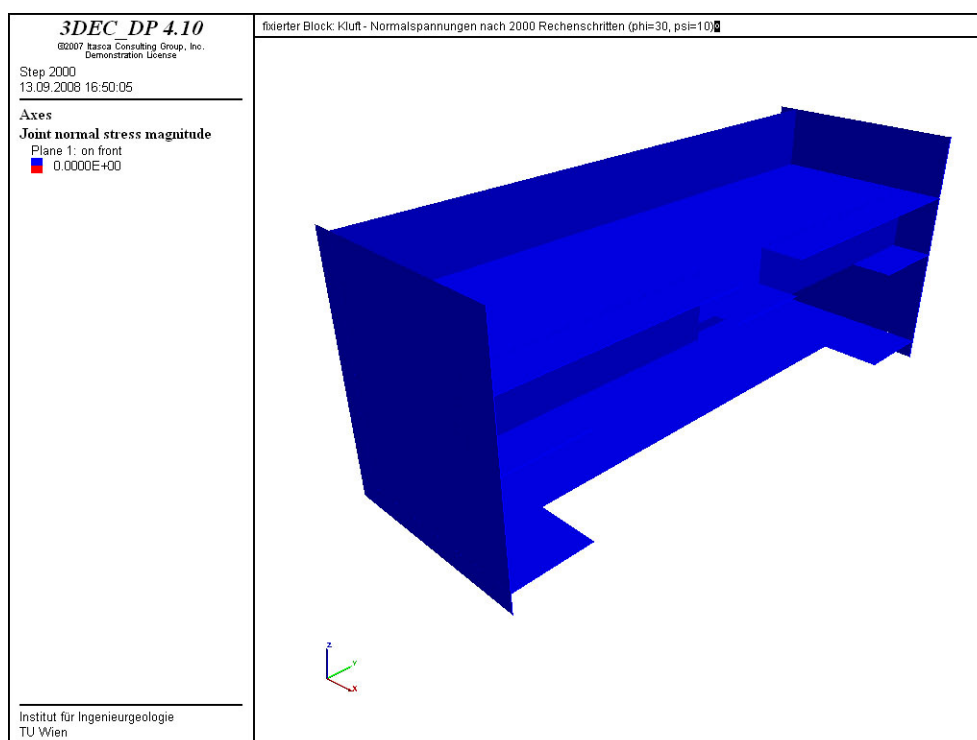
Im Rahmen der Untersuchung wurde eine maximale Scherverschiebung von 0.5 m in den Klüften zugelassen, darüber wurde kein Dilatanz Einfluss mehr berücksichtigt.

Exemplarisch für alle durchgeführten Untersuchungen ist in Abbildung 4.7 der Verlauf der maximalen Vertikalverschiebungen für einen Reibungswinkel  $\varphi=30^\circ$  und einer Dilatanz  $\psi=10^\circ$  dargestellt. Der Verlauf ist auf die Rechenzeit bezogen. Wie ersichtlich ist, trifft der Block nach 2370 Rechenschritten auf der Sohle auf.



**Abbildung 4.7:** maximale Vertikalverschiebung bezogen auf die Rechenzeit für  $\varphi = 30^\circ$  und  $\psi = 10^\circ$  (bei unverschieblichen Randblöcken)

In Abbildung 4.8 ist die Klüftnormalspannungsverteilung mit Hilfe eines Konturplots visualisiert. Wie anhand der farblichen Skalierung zu erkennen ist, treten in den Trennflächen keine Normalspannungen auf. Somit ist sichergestellt, dass die Randblöcke keine Rotationen erfahren haben. Bei dieser Modellierungsvariante treten auch keine Schubspannungen in den Klüften auf.



**Abbildung 4.8:** Normalspannungsverteilung in den Klüften nach 20000 Rechenschritten für  $\varphi = 30^\circ$  und  $\psi = 10^\circ$  (bei unverschieblichen Randblöcken)

## 4.2 Orthogonales Klufsystem

Ausgehend von den in Kapitel 4.1 beschriebenen Untersuchungen wurde in weiterer Folge ein orthogonales Klufsystem analysiert. Es wurde versucht, zu ermitteln wie sich einwirkende Dilatanz auf das Ergebnis auswirken, und ob Grenzwerte angegeben werden können.

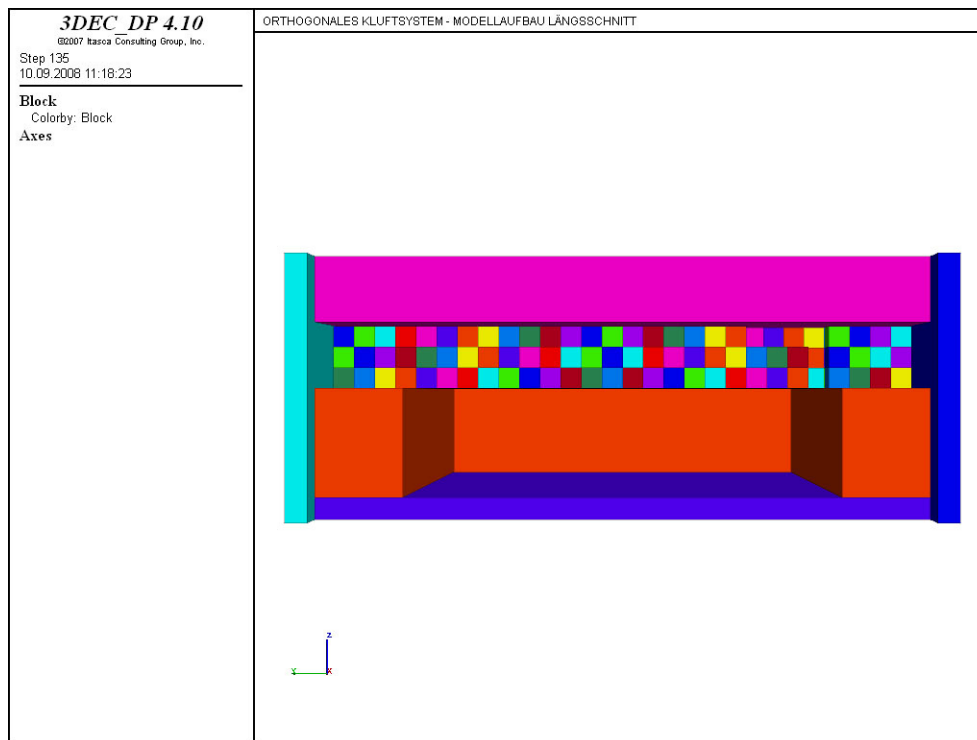
### 4.2.1 Modellierung

Für die Modellierung wurde der im Rahmen der Einzelblockanalyse (vgl. Kapitel 4.1.1) gebildete Modellkörper herangezogen und adaptiert. Über der  $30 \times 100 \times 25$  m großen Kaverne wurde ein 15 m mächtiger, orthogonaler Klufkörper ausgebildet. Die Klüfte wurden durch drei vorliegende Trennflächensysteme gebildet, welche in Tabelle 4.6 angeführt sind. Diese Raumstellungen und Klufabstände führen zu würfelförmigen Blöcken mit einer Kantenlänge von 5 m. Die Widerlagerbereiche und die über dem orthogonalen Klufsystem liegende Abdeckplatte wurden im Modell beibehalten.

Kluft	Fallrichtung [ ° ]	Fallwinkel [ ° ]	Kluftabstand [m]
K1	180	90	5.0
K2	90	90	5.0
K3	0	0	5.0

**Tabelle 4.6:**Orthogonale Trennflächensysteme – Geometrische Kennwerte

Abbildung 4.9 zeigt das zu untersuchende Modell in einem Längsschnitt.

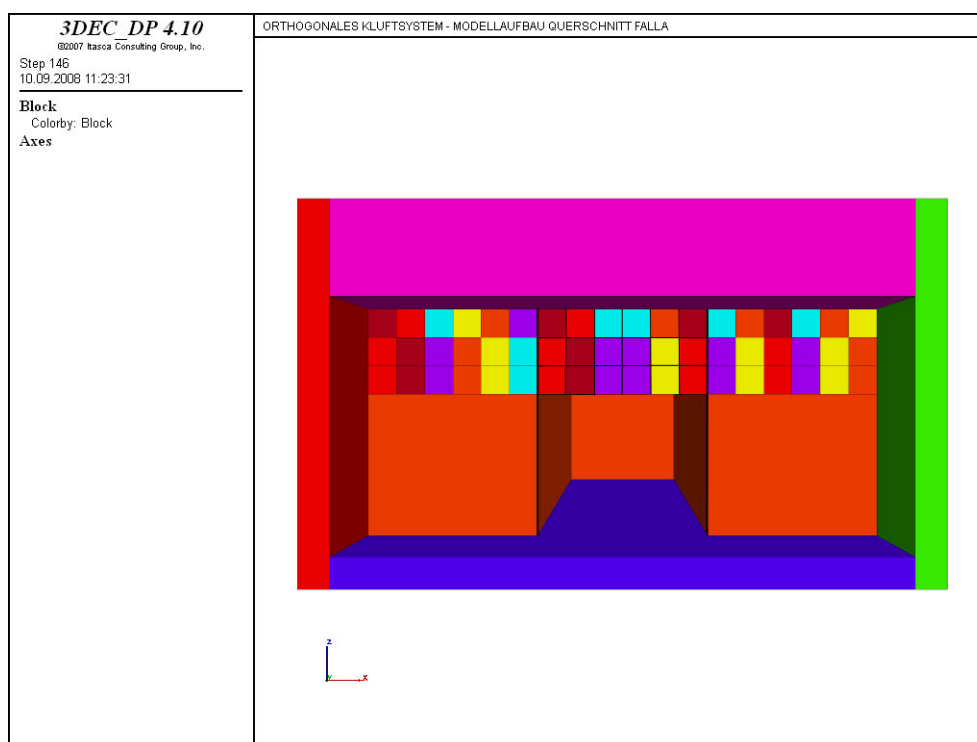


**Abbildung 4.9:** 3DEC Modell – orthogonales Kluftsystem, Längsschnitt durch das Modell

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei verschiedene Möglichkeiten der Trennflächenanordnung untersucht. Es sollte ermittelt werden, ob sich das Versagensverhalten ändert wenn die Kavernenwände als Trennflächen im Kluftsystem weiter laufen (Fall A). Zum Vergleich dazu sind die Blöcke im Fall B um eine halbe Kantenlänge versetzt. Beim Herausgleiten aus der Firstfläche entsteht kein Gleiten entlang der Kavernenwände.

#### 4.2.1.1 Fall A – an der Kavernenlaibung gleitende Kluftkörper

Im Fall A ist das orthogonale Kluftsystem so ausgerichtet, dass beim Herauslösen der Blöcke aus der Firstfläche welche an der Kavernenwand gleiten. Wie in Abbildung 4.10 zu erkennen ist, läuft die Kavernenlaibung als Trennfläche im Kluftsystem weiter. Dies führt dazu dass im Randbereich der Kaverne die Kluftkörper keine Rotationen durchführen.

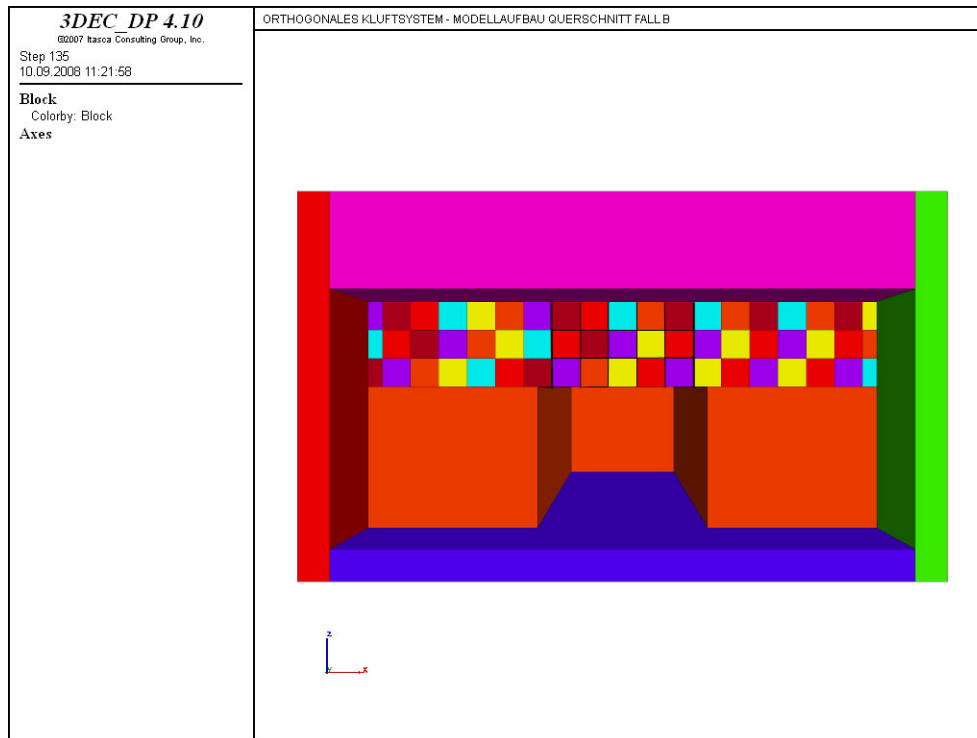


**Abbildung 4.10:** Anordnung der Trennflächen Fall A

#### 4.2.1.2 Fall B – Frei Fallende Kluftkörper

Im Fall B wurden die Kluftkörper um eine halbe Würfelbreite versetzt. Diese Anordnung soll es ermöglichen, dass nach dem Herauslösen die Blöcke frei fallen können und nicht an der Kavernenwand hinab gleiten und dadurch vielleicht einen stabilen Zustand erreichen. Durch die, wie in Abbildung 4.11 zu erkennen ist, Verrückung der Blöcke um 2.5 Meter können Kluftkörper im Bereich der Kavernenlaibung Rotationen durchführen.





**Abbildung 4.11:** Anordnung der Trennflächen Fall B

## 4.2.2 Materialkennwerte

Im Zuge der numerischen Untersuchungen mit 3DEC wurden die Blöcke als starre Körper ausgebildet. Für die Modellierung des Trennflächenverhaltens wurde das “Coulomb-Slip Joint Model“ verwendet.

Bei den Blöcken wurde als Materialeigenschaft die Blockdichte berücksichtigt. Als Gestein wurde wieder ein Kalkglimmerschiefer gewählt.

Dichte (Blöcke):                      Kalkglimmerschiefer:                       $\rho$                       = 2700                      [kg/m<sup>3</sup>]

Zur Beschreibung der Trennflächeneigenschaften wurden die Materialkennwerte  $\varphi$  und  $\psi$  herangezogen. Im Rahmen der Grenzwertbestimmung  $\varphi_{grenz}$  und  $\psi_{grenz}$  wurden diese Werte variiert. Der Dilatanzeinfluss wurde über die maximalen Scherverschiebungen in den Trennflächen gesteuert. In den meisten Untersuchungsfällen wurde die Dilatanz  $\psi$  bis zu einer Verschiebung von 0.5 m berücksichtigt. Kommt es zu einer Überschreitung dieser zulässigen Scherverschiebungen in den Trennflächen, wird in der weiteren Berechnung die Dilatanz Null gesetzt (vgl. Abbildung 2.3).

Die Beschreibung des elastischen Kluftverhaltens erfolgte mit den Kluftsteifigkeiten. Wenn in den Ergebnissen nicht gesondert darauf hingewiesen wird, wurden folgende Werte im Zuge der Untersuchungen berücksichtigt:

Kluftsteifigkeiten:	Normal zur Kluftebene:	$j_{kn}$	= 1.0E+9	[N/m <sup>2</sup> ]
	Parallel zur Kluftebene:	$s_{kn}$	= 1,0E+9	[N/m <sup>2</sup> ]

Die Berechnungen erfolgten ohne Einfluss einer Kohäsion in den Trennflächen.

### 4.2.3 Ergebnisse der Untersuchungen eines orthogonalen Kluftsystems

#### 4.2.3.1 Gegenüberstellung des Einflusses Modellierung Fall A – Fall B

Diese Untersuchung sollte Aufschluss geben wie sehr sich die Anordnung der Kluftkörper im Untersuchungsgebiet auf das Ergebnis auswirken kann. Zu diesem Zweck wurden Berechnungen mit einem Reibungswinkel  $\varphi=30^\circ$  und einem Dilatanzwinkel  $\psi=0^\circ$  einmal mit Modellierungsfall A und einmal mit Fall B durchgeführt. Die Dilatanz wurde bis zum Auftreten von maximalen Scherverschiebungen von 0.5 m berücksichtigt.

In beiden Fällen tritt nach einiger Zeit ein stabiler Zustand ein und es kommt zu keinem Versagen. Wie anhand der Ergebnisse in Tabelle 4.7 zu sehen ist, macht es sehr wohl einen Unterschied ob die Kluftkörper nach dem Fall A oder Fall B angeordnet sind. Eine Anordnung gemäß Fall B führt zu rund 20 Prozent größeren Maximalverschiebungen.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	Dilatanz $\psi$ [°]	Max. Blockverschiebung [m]
Fall A	30	0	1.91
Fall B	30	0	2.32

**Tabelle 4.7:** Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung Fall A – Fall B für den Reibungswinkel  $\varphi=30^\circ$  und einem Dilatanzwinkel  $\psi=0^\circ$

Ausgehend von diesem Ergebnis wurde in den weiteren Untersuchungen nur der Modellierungsfall B betrachtet, da dieser zu größeren Verschiebungen der Kluftkörper führt und somit eine kritischere Anordnung der Blöcke darstellt.

#### 4.2.3.2 Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{grenz}$ für Dilatanz $\psi=0^\circ$

In einer ersten Versuchsreihe wurde der Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}$  für den Fall Dilatanzwinkel  $\psi=0^\circ$  ermittelt. Die Untersuchung wurde am Modellaufbau Fall B durchgeführt.

Der Grenzreibungswinkel wurde iterativ ermittelt. Begonnen wurde mit einem Reibungswinkel  $\varphi=30^\circ$ . Bei diesem Reibungswinkel liegt bereits ein stabiler Zustand vor. Die maximalen Blockverschiebungen betragen rund 2.3 m. In einer zweiten Abschätzung wurde für den Reibungswinkel  $\varphi=20^\circ$  gewählt. Da es in diesem Fall zu einem Versagen kam, die

ersten Blöcke trafen nach 4220 Schritten auf der Sohle auf, wurden für die weiteren Versuche Werte zwischen  $\varphi=20^\circ$  und  $\varphi=30^\circ$  gewählt. Als Grenzreibungswinkel wurde  $\varphi_{\text{grenz}}=28.2^\circ$  ermittelt. In Tabelle 4.8 sind die Ergebnisse der Grenzwertbestimmung für  $\varphi_{\text{grenz}}$  aufgelistet.

Als Ergebnis wurden die maximalen Blockverschiebungen ausgewiesen, wenn ein stabiler Zustand vorliegt, oder die benötigten Rechenschritte bis der erste herausfallende Kluffkörper auf der Kavernensohle auftritt.

Liegt der Grenzreibungswinkel  $\varphi_{\text{grenz}}$  vor, dann stellt sich von selbst ein stabiler Zustand ein, auch wenn dabei schon erhebliche Verschiebungen vorliegen.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ $^\circ$ ]	Dilatanz $\psi$ [ $^\circ$ ]	Max. Blockverschiebung [m]
1	20	0	4220 <sup>a</sup>
2	25	0	8450 <sup>a</sup>
3	27	0	9500 <sup>a</sup>
4	28	0	15600 <sup>a</sup>
5	28.1	0	12000 <sup>a</sup>
6	28.2	0	3.07
7	28.3	0	3.14
8	28.5	0	2.91
9	29	0	2.60
10	30	0	2.32

**Tabelle 4.8:** orthogonales Kluffsystem – Ermittlung des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{\text{grenz}}$  für den Fall  $\psi = 0^\circ$

Bei vorliegen des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{\text{grenz}}=28.2^\circ$  beträgt die maximale Blockverschiebung rund 3 m. Diese haben sich nach etwa 4500 Schritten eingestellt und nahmen mit zunehmender Rechendauer nicht weiter zu. Es hat sich ein stabiler Zustand gebildet.

Der Unterschied zwischen stabilem Zustand und dem Versagenszustand wird anhand der Reibungswinkel  $\varphi=28.2^\circ$  (stabil) und  $\varphi=28.1^\circ$  (Versagen) erläutert.

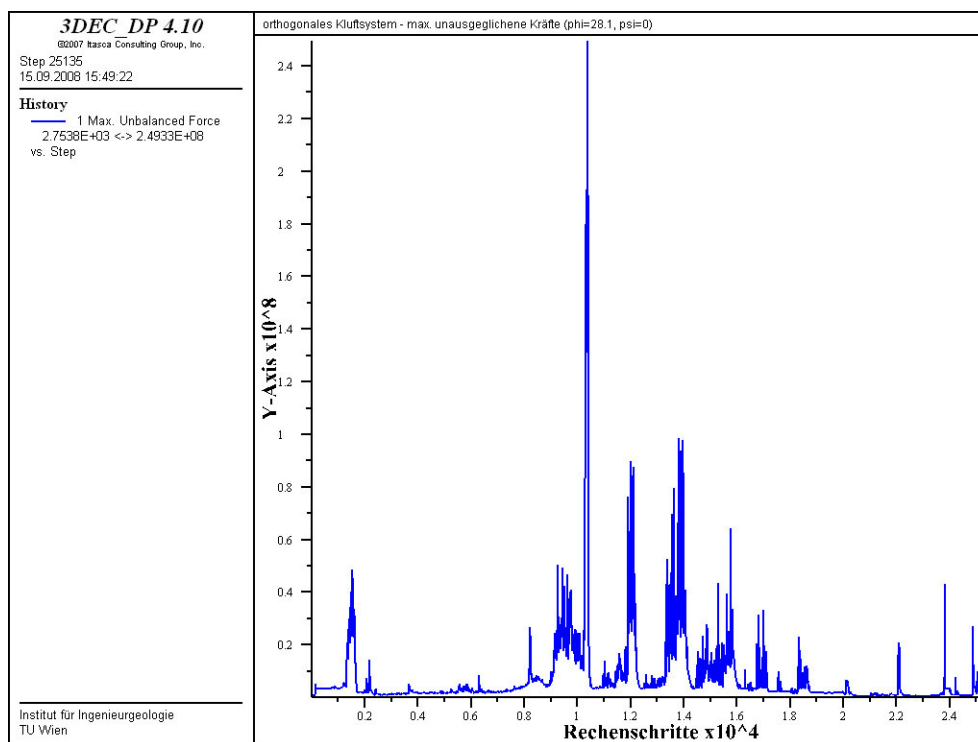
In beiden Fällen wurden die Ergebnisse nach 25000 Rechenschritte analysiert.

<sup>a</sup> Benötigte Rechenschritte bis zum Auftreffen der ersten Blöcke auf der Sohle

#### 4.2.3.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Reibungswinkel $\varphi=28.1^\circ$ und $\varphi=28.2^\circ$ bei einer Dilatanz $\psi=0^\circ$

Als erstes werden die Ergebnisse für den Reibungswinkel  $\varphi=28.1^\circ$  näher erläutert.

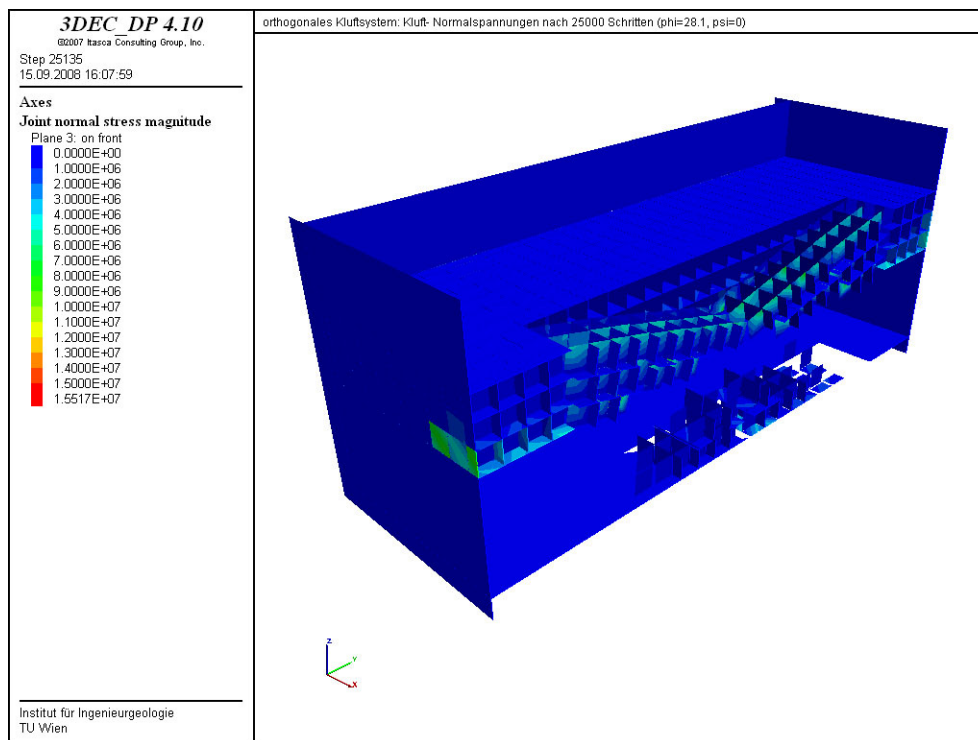
Anhand des Verlaufes der maximal unausgeglichenen Kraft (vgl. Abbildung 4.12) ist zu erkennen, dass die ersten Blöcke nach rund 10000 Rechenschritte auf der Sohle auftreffen. Mit fortlaufender Berechnungszeit fallen weitere Blöcke aus der Firste, was anhand der starken Ausschläge in der Grafik erkennbar ist. Des Weiteren ist ersichtlich, dass am Ende der Untersuchungszeit (nach 25000 Rechenschritte) noch kein Ruhezustand eingetreten ist und Blöcke noch in Bewegung sind.



**Abbildung 4.12:** Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft für  $\varphi = 28.1^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$  (orthogonales Kluftsystem)

Dass nach 25000 Schritten in den Trennflächen Normalspannungen auftreten, ist in Abbildung 4.13 zu erkennen. Normalspannungen treten in jenen Bereichen auf, wo Blöcke aufgrund des Herausfallens und den dabei auftretenden Rotationsbewegungen aneinander gedrückt werden. Die wirkenden Normalkräfte sind mitverantwortlich, dass das System zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig versagt hat. Bei einem Vergleich der in diesem Fall wirkenden Normalspannungen mit jenen für den Grenzreibungswinkel  $\varphi=28.2^\circ$  zeigt, dass die hier vorliegenden Spannungen geringer sind als im Gleichgewichtszustand. Dies liegt

unter anderem auch daran, dass im vorliegenden Fall nach 25000 Rechenschritten sich noch kein stabiler Zustand eingestellt hat und Blöcke noch immer in Bewegung sind.



**Abbildung 4.13:** Normalspannungsverteilung in den Klüften nach 25000 Rechenschritten für  $\varphi = 28.1^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$  (orthogonales Kluftsystem)



**Abbildung 4.14:** Längsschnitt durch das Modell – Lage der Blöcke inkl. Verschiebungsvektoren nach 25000 Rechenschritten für  $\varphi = 28.1^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$

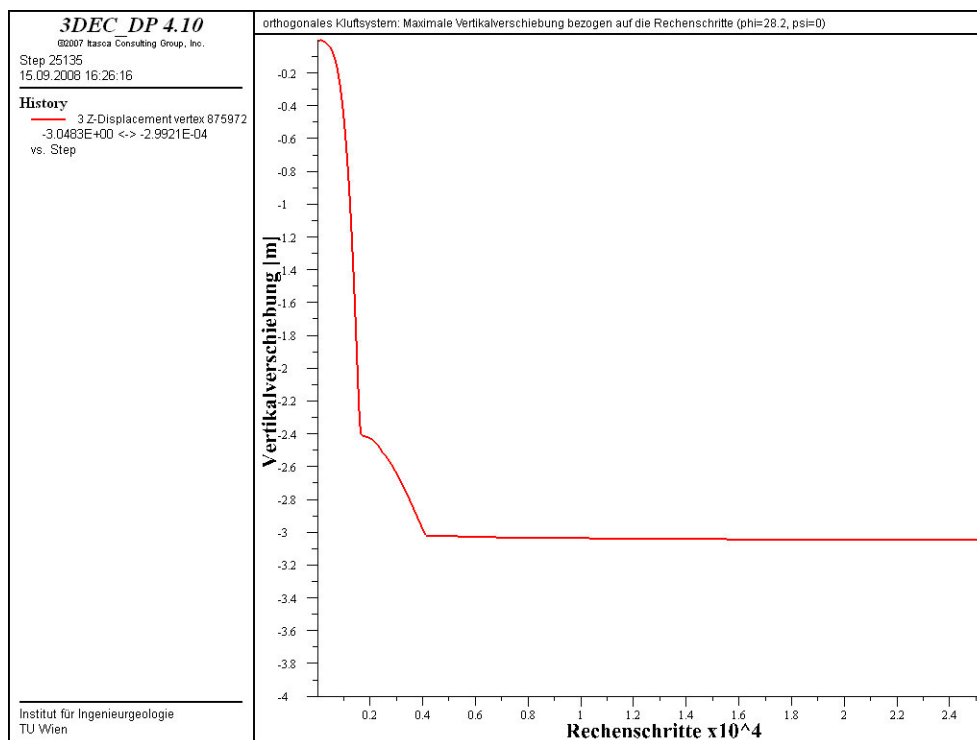
Dass Blöcke sich am Ende des Untersuchungszeitraumes (25000 Rechenschritte) noch immer bewegen, kann an Hand eines Längsschnittes durch das Modell gezeigt werden (vgl. Abbildung 4.14). Auf Grund der nicht ausreichenden Normalkräfte in den Trennflächen fallen immer mehr Blöcke aus dem Verband und es stellt sich keine Gleichgewichtszustand ein. Wird die Berechnung weiter fortgeführt, werden alle Blöcke am Boden liegen.

Am Herausgleiten beteiligen sich nur jene Blöcke, welche direkt über dem Hohlraum liegen. Wie in Abbildung 4.14 zu erkennen ist, bleiben die Blöcke über den Widerlagerbereichen in ihrer ursprünglichen Position liegen.

Ob ein Reibungswinkel von  $\varphi=28.1^\circ$  zu einem Firstversagen führt, wird auch durch die Wahl der Modellierung der Trennflächenanordnung mitbestimmt (Fall A oder Fall B). Wie groß dieser Einfluss sein kann, wurde schon in Kapitel 4.2.3.1 behandelt.

Den vorliegenden Ergebnissen für den Versagenszustand werden in weiterer Folge jene für einen Reibungswinkel  $\varphi=28.2^\circ$  gegenübergestellt.

Bei vorliegen eines Reibungswinkels von  $\varphi=28.2^\circ$  und einem Dilatanzwinkel  $\psi=0^\circ$ , stellt sich nach einer Rechenzeit von etwa 4500 Schritten ein stabiler Zustand ein. Bei Erreichen dieses Zustandes betragen die maximale Verschiebungen in der Firste rund 3 Meter. Wie anhand des Abbildung 4.15 dargestellten Verschiebungs- Zeitverlaufes zu erkennen ist, nehmen die Maximalverschiebungen nicht weiter zu.

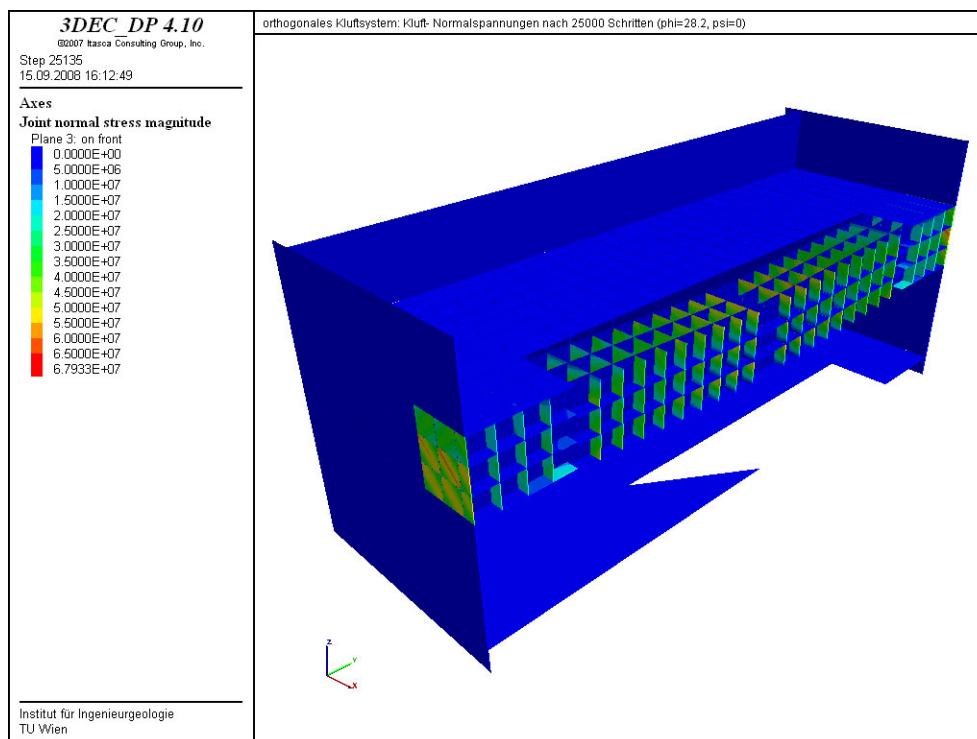


**Abbildung 4.15:** Maximalen Vertikalverschiebungen bezogen auf die Rechenschritte für  $\varphi = 28.2^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$

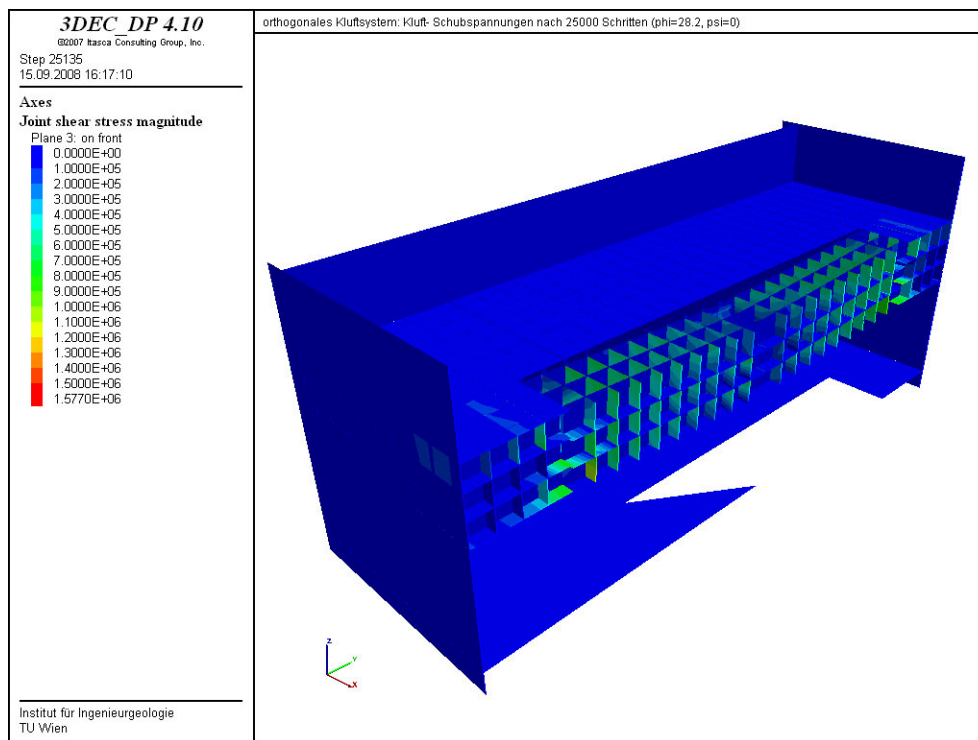
Ein höherer Kluffreibungswinkel führt zu höheren Normalkräften in den Trennflächen. In Abbildung 4.16 sind die auftretenden Normalspannungen im Gleichgewichtszustand dargestellt. Im vorliegenden Fall sind die wirkenden Normalspannungen um etwa den Faktor 4 größer als für den Reibungswinkel  $\varphi=28.1^\circ$ .

Die Rotationsbewegungen führen dazu, dass die Blöcke in den oberen Bereichen zusammengedrückt werden. Durch die höheren Kluffestigkeiten entsteht eine Verzahnung in den Trennflächen die das Herausgleiten der Kluffkörper verhindert.

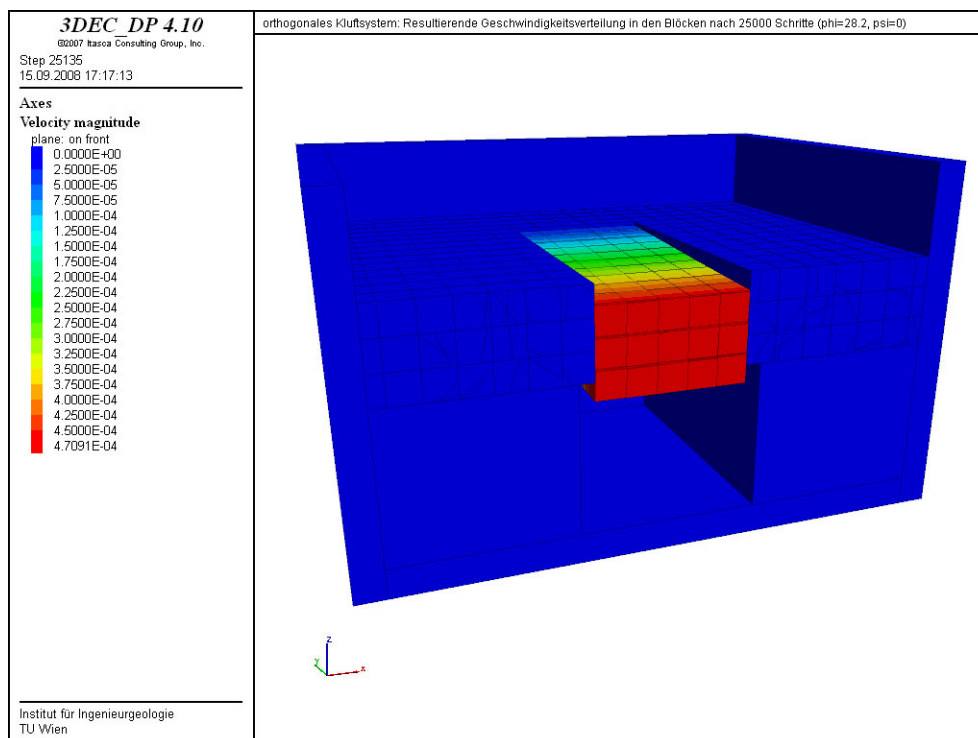
Bei Vorliegen eines stabilisierten Zustandes treten in den Trennflächen auch Schubspannungen auf, wie Abbildung 4.17 zeigt. Die maximalen Schubspannungen sind ein Vielfaches geringer als die wirkenden Kluffnormalspannungen.



**Abbildung 4.16:** Normalspannungsverteilung in den Klüften nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes für  $\varphi = 28.2^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$  (orthogonales Kluffsystem)



**Abbildung 4.17:** Schubspannungsverteilung in den Klüften nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes für  $\varphi = 28.2^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$  (orthogonales Klufsystem)

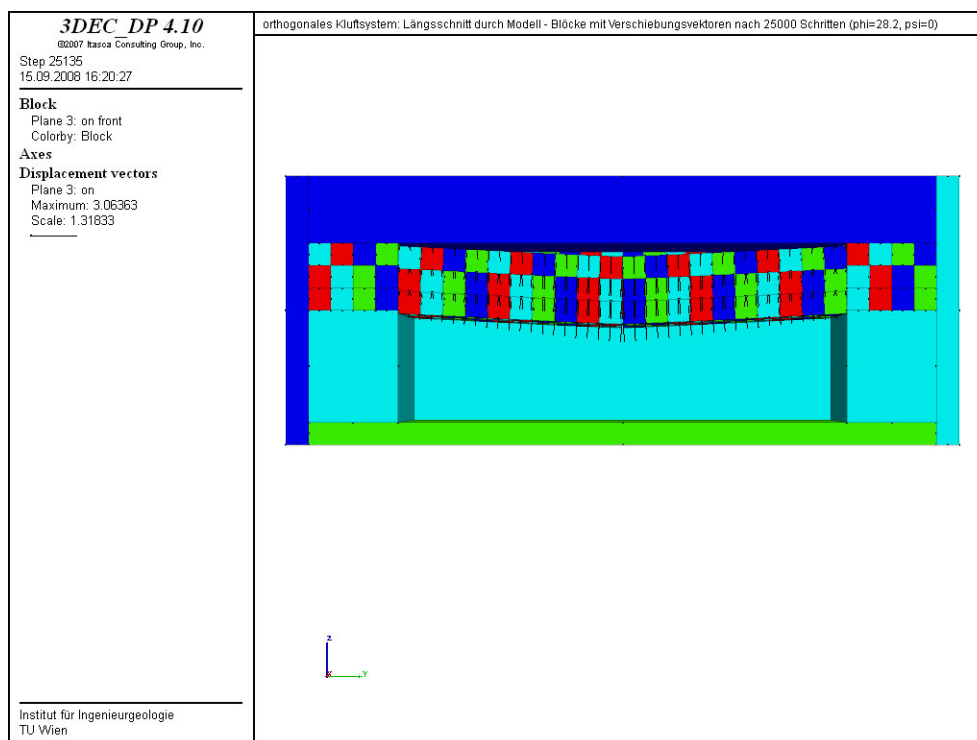


**Abbildung 4.18:** Resultierende Geschwindigkeitsverteilung in den Blöcken nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes für  $\varphi = 28.2^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$  (Querschnitt)



In Abbildung 4.18 ist die resultierende Geschwindigkeitsverteilung in den Blöcken mit Hilfe eines Konturplots dargestellt. Diese Abbildung zeigt, wie stark das vorliegende Ergebnis durch die Blockrotation beeinflusst wird. In der Firstmitte weist das orthogonale Kluftsystem die größten Geschwindigkeiten auf. Die dadurch hervorgerufenen Rotationen führen zu höheren Kontaktkräften in den oberen Bereichen der Blöcke, was wiederum zu höheren Normalkräften führt. Wie schon erwähnt wurde, führten diese Normalkräfte in den Trennflächen dazu, dass sich das System nach einiger Zeit von selbst stabilisiert hat.

Welche Lage die Kluftkörper einnehmen nachdem sie den Gleichgewichtszustand erreicht haben, ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Diese Abbildung zeigt einen Längsschnitt durch das Modell mit den vorliegenden Blockpositionen nach 25000 Rechenschritten. Die größten Vertikalverschiebungen treten in der Mitte der Kaverne auf. Wie anhand der Verschiebungsvektoren der Blöcke zu erkennen ist, besitzen die Kluftkörper mit den größten Verschiebungen auch einen beachtlichen Verdrehungsanteil. Diese Rotationen haben die Normalkräfte in den Trennflächen verstärkt und dazu beigetragen, dass sich das System stabilisiert.



**Abbildung 4.19:** Längsschnitt durch das Modell – Lage der Blöcke inkl. Verschiebungsvektoren nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes für  $\varphi = 28.2^\circ$  und  $\psi = 0^\circ$

#### 4.2.3.4 Ermittlung des Grenzreibungswinkels $\varphi_{\text{grenz}}$ für Dilatanz $\psi=5^\circ$

In dieser Versuchsreihe wurde der Grenzreibungswinkel  $\varphi_{\text{grenz}}$  gesucht, bei dem das System bei vorliegen einer Dilatanz von  $\psi=5^\circ$  einen stabilen Zustand einnimmt. Die einwirkende Dilatanz wurde bis zu einer maximalen Scherverschiebung von 0.5 m berücksichtigt. Bei überschreiten dieses Wertes sind die Verschiebungen nur mehr vom Reibungswinkel  $\varphi$  abhängig.

Die Ergebnisse der iterativen Grenzwertbestimmung sind in Tabelle 4.10 angegeben. Als Untersuchungsergebnis wurden die maximalen Blockverschiebungen bzw. die benötigten Rechenschritte bis zum Auftreffen auf die Kavernensohle ausgegeben.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [ $^\circ$ ]	Dilatanz $\psi$ [ $^\circ$ ]	Max. Blockverschiebung [m]
1	0	5	
2	1	5	
3	3	5	5700 <sup>a</sup>
4	4	5	19400 <sup>a</sup>
5	5	5	0.51

**Tabelle 4.9:** orthogonales Kluftsystem – Ermittlung des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{\text{grenz}}$  für den Fall  $\psi=5^\circ$  (maximal zulässige Scherverschiebung in den Trennflächen 0.5 m)

Für die Versuchsreihen mit einem Reibungswinkel von  $\varphi=0^\circ$  und  $\varphi=1^\circ$  konnten keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden, da in diesen Fällen die Blöcke durch das Modell durch diffundiert sind. Dies war ein Anzeichen dafür, dass der Reibungswinkel im Verhältnis zur wirkenden Dilatanz zu gering gewählt wurde. Bei den Reibungswinkeln  $\varphi=3^\circ$  und  $\varphi=4^\circ$  kommt es zu einem Versagen des Systems. Der Grenzreibungswinkel wurde mit  $\varphi=5^\circ$  ermittelt. Die dabei auftretende Maximalverschiebung beträgt 0.51 m.

Da in vorangegangenen Untersuchungen bereits festgestellt wurde, dass die maximal zulässigen Scherverschiebungen in den Trennflächen das Ergebnis beeinflussen können, wurde in einer weiteren Untersuchung diese mit 0.25 m begrenzt. Wie das in Tabelle 4.10 vorliegende Ergebnis zeigt, würde bei einem Reibungswinkel  $\varphi=5^\circ$  und einer Dilatanz  $\psi=5^\circ$  Versagen eintreten. Somit wird der Grenzreibungswinkel  $\varphi_{\text{grenz}}$  bei einer gegebenen Dilatanz  $\psi=5^\circ$  auch von den maximal zulässigen Scherverschiebungen beeinflusst.

<sup>a</sup> Benötigte Rechenschritte bis zum Auftreffen der ersten Blöcke auf der Sohle

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	Dilatanz $\psi$ [°]	Max. Blockverschiebung [m]
1	5	5	~7700 <sup>a</sup>

**Tabelle 4.10:** orthogonales Kluftsystem – Ermittlung des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{grenz}$  für den Fall  $\psi=5^\circ$  (maximal zulässige Scherverschiebung in den Trennflächen 0.25 m)

Nachdem bereits gezeigt wurde, dass die Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}$  und die maximalen Blockverschiebungen von den maximalen Scherverschiebungen in den Trennflächen beeinflusst werden können, wurde in der folgenden Untersuchung die Scherverschiebung nicht begrenzt. Somit wurde über die gesamte Rechenzeit der Dilatanzeinfluss mitberücksichtigt, egal ob 0.25 oder 0.5 an Scherverschiebungen überschritten wurden.

Wie das Ergebnis in Tabelle 4.11 zeigt, kommt es zu den gleichen Blockverschiebungen wie bei Begrenzung der zulässigen Scherverschiebungen mit 0.5 m.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	Dilatanz $\psi$ [°]	Max. Blockverschiebung [m]
1	5	5	0.51

**Tabelle 4.11:** orthogonales Kluftsystem – Ermittlung des Grenzreibungswinkels  $\varphi_{grenz}$  für den Fall  $\psi=5^\circ$  (ohne Begrenzung der Scherverschiebung in den Trennflächen)

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass ein ermittelter Grenzreibungswinkel  $\varphi_{grenz}$  auch davon abhängt, bis zu welchen Scherverschiebungen in den Trennflächen eine Dilatanz wirkt. So führen geringe zulässige Scherverschiebungen dazu, dass ein System versagen kann, wo hingegen bei entsprechend höherer Wahl das System stabil sein kann.

Eine berücksichtigte Dilatanz hat großen Einfluss auf das Versagensverhalten. Da schon geringe Dilatanzwinkel große Auswirkungen haben können, ist umfangreiches Wissen über die Kluftigenschaften erforderlich um nicht zu hoch angesetzte Materialparameter einfließen zu lassen.

#### 4.2.3.5 Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels $\psi_{grenz}$ für Reibungswinkel $\varphi=20^\circ$

Wie die in Kapitel 4.2.3.2 beschriebenen Untersuchungen gezeigt haben, tritt bei vorliegen eines Reibungswinkels  $\varphi=20^\circ$  und eines Dilatanzwinkels  $\psi=0^\circ$  vollständiges Firstversagen auf. Aus diesem Grund wurde für den Kluftreibungswinkel  $\varphi=20^\circ$  der dazugehörige Grenzdilatanzwinkel  $\psi_{grenz}$  ermittelt. In den durchgeführten Berechnungen wurde ein Dilatanzeinfluss bis zum Auftreten maximaler Scherverschiebungen von 0.5 m berücksichtigt. Die Kluftsteifigkeiten wurden mit  $1.0E+9$  N/m<sup>2</sup> normal und parallel zur Kluftebenen festgesetzt.

In Tabelle 4.12 sind die Ergebnisse der Grenzwertermittlung zusammengefasst.

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	Dilatanz $\psi$ [°]	Max. Blockverschiebung [m]
1	20	2	0.22
2	20	0.5	1.46
3	20	0.4	1.96
4	20	0.3	2.42
5	20	0.2	~9500 <sup>a</sup>

**Tabelle 4.12:** orthogonales Kluftsystem – Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels  $\psi_{grenz}$  für den Fall  $\varphi=20^\circ$  (Kluftsteifigkeiten  $1.0E+9$  N/m<sup>2</sup>)

Die erste Untersuchung wurde mit einem Dilatanzwinkel von  $\psi=2^\circ$  durchgeführt. Nach rund 1000 Rechenschritten stellte sich ein Gleichgewichtszustand ein. Die dabei auftretenden Maximalverschiebungen betragen 0.22 Meter.

Im nächsten Durchgang wurde als Dilatanzwinkel  $\psi=0.5^\circ$  gewählt. Die maximalen Verschiebungen betragen 1.46 m und wurden nach rund 2700 Rechenschritten erreicht.

Als Grenzdilatanzwinkel wurde  $\psi_{grenz}=0.3^\circ$  ermittelt. Für diesen Fall betragen die Verschiebungen 2.42 Meter. Liegt hingegen ein Dilatanzwinkel von  $\psi=0.2^\circ$  vor, versagt das Kluftsystem. Es vergehen rund 9500 Rechenschritte bis die ersten Blöcke auf der Sohle aufschlagen.

Aufgrund der Tatsache, dass die gewählten Kluftsteifigkeiten einen großen Einfluss auf die wirkenden Normalkräfte in den Trennflächen haben (vgl. Kapitel 2.1.4) wurden in einer abschließenden Versuchsreihe die Kluftsteifigkeiten mit  $1.0E+8$  N/m<sup>2</sup> gewählt. Die anderen Materialkennwerte zur Beschreibung der Kluftigenschaften wurden beibehalten.

Wie die in Tabelle 4.13 aufgelisteten Ergebnisse zeigen, kommt es bei Dilatanzwinkel von  $\psi=2^\circ$  und  $\psi=5^\circ$  zum Versagen des Kluftsystems. Dies wird alleine durch die um eine Zehnerpotenz herabgesetzten Kluftsteifigkeiten hervorgerufen. Erst für den untersuchten Fall das der Dilatanzwinkel  $\psi=10^\circ$  beträgt, liegt ein stabiler Zustand vor. Der gesuchte Grenzdilatanzwinkel  $\psi_{grenz}$  liegt somit zwischen  $5^\circ$  und  $10^\circ$ .

Untersuchung	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	Dilatanz $\psi$ [°]	Max. Blockverschiebung [m]
1	20	2	1870 <sup>a</sup>
2	20	5	~2100 <sup>a</sup>
3	20	10	0.53
4	20	15	0.37

**Tabelle 4.13:** orthogonales Kluftsystem – Ermittlung des Grenzdilatanzwinkels  $\psi_{grenz}$  für den Fall  $\varphi=20^\circ$  (Kluftsteifigkeiten  $1.0E+8$  N/m<sup>2</sup>)

<sup>a</sup> Benötigte Rechenschritte bis zum Auftreffen der ersten Blöcke auf der Sohle

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Grenzwert für die Dilatanz  $\psi_{\text{grenz}}$  sehr stark von den angesetzten Kluffsteifigkeiten abhängt. Wenn viele Blöcke gleichzeitig aus einem orthogonalen Kluftsystem gleiten und dabei Rotationen durchführen, entstehen in den Trennflächen Normalkräfte. Diese Kräfte werden von mehreren Faktoren beeinflusst. Auf der einen Seite einmal vom Kluffreibungswinkel  $\varphi$ . Wird auch einen Dilatanz berücksichtigt, fließt auch die Größe der Klufffläche und die Kluffsteifigkeit mit in die Berechnung ein. Aus diesem Grund ist es erforderlich die Kluffsteifigkeiten und den Dilatanzwinkel richtig abzuschätzen, da diese Werte die auftretenden Normalkräfte wesentlich beeinflussen.

### 4.3 Schlussfolgerungen zum Einfluss der Dilatanz

Das Materialverhalten von Trennflächen lässt sich mit dem „Coulomb-Slip Joint Model“ beschreiben. Dieses Modell ermöglicht es, neben der Kohäsion und den Reibungswinkel auch die Dilatanz zu berücksichtigen.

Die Untersuchungen am Kluftkörper mit saiger stehenden Trennflächen haben gezeigt, dass bei unverschieblichen Nachbarblöcken die Dilatanz keinen Einfluss hat auf das Verformungsverhalten. Ebenso wenig beeinflusst der Reibungswinkel  $\varphi$  das Ergebnis (siehe Tabelle 4.5). Reibungswinkel und Dilatanz wirken sich auf das Versagensverhalten nur aus, wenn Normalkräfte in den Trennflächen wirken.

Normalkräfte entstehen z.B., wenn Blöcke rotieren können und gegeneinander drücken. In diesen Fällen ist oft ein erhöhter Reibungswinkel ausreichend, um einen Block am Herausgleiten zu hindern und ihn zu stabilisieren. Bei Kombinationen von Reibungswinkel und Dilatanz reichen oft schon geringe Dilatanzwinkel aus, um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Eine in der Berechnung berücksichtigte Dilatanz erzeugt sehr schnell einen sehr hohen Normalkraftanteil in den Trennflächen. Neben dem Dilatanzwinkel wirken sich auch die Größe der Klufffläche und die gewählte Kluffsteifigkeit  $j_{kn}$  auf die erzeugte Normalkraft aus. Eine richtige Einschätzung der Größe dieser Werte ist sehr wichtig, denn Dilatanz und Kluffsteifigkeit können dazu führen, dass ein System stabil ist oder aber dass es versagt.

Bei der Berücksichtigung von Dilatanz haben auch die maximal zulässigen Scherverschiebungen in den Trennflächen Einfluss. Werden festgelegte Verschiebungswerte überschritten, wird in der weiteren Berechnung keine Dilatanz mehr berücksichtigt. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, kann für eine maximal zulässige Scherverschiebung von 0.5 m das Kluftsystem stabil sein, für 0.25 m hingegen bereits versagt es.

Des Weiteren sollte der Dilatanzeinfluss nicht überschätzt werden. Wie schon Wittke gezeigt hat, sollte die Größe des Dilatanzwinkel nie über die des Reibungswinkels liegen, damit würde nur die viskoplastische Volumendehnung der Klüfte überschätzt (Wittke, 1999).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine berücksichtigte Dilatanz sehr hohen Einfluss auf das Versagensverhalten eines Modells hat. Daher ist es wichtig, den Dilatanzwinkel richtig abzuschätzen und auch zu berücksichtigen bis zu welchen maximalen Scherverschiebungen in den Klüften eine Dilatanz wirken kann. Des Weiteren wird die durch die Dilatanz erzeugte Normalkraft durch die Kluftsteifigkeit beeinflusst.

## 5 Stabilität einer Kaverne mit horizontaler Firstfläche

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, den Versagensmechanismus (entfernbarer Klufkörper, Versagensablauf) einer Kaverne mit horizontaler Firste mittels 3DEC zu ermitteln und die Ergebnisse mit denen der Blocktheorie zu vergleichen. Für die Berechnung wurde das im Rahmen der Übung aus Angewandte Felsmechanik am Institut für Ingenieurgeologie, TU-Wien behandelte Beispiel einer 30x100 m großen Kaverne herangezogen (Poisel, 2003). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde in 3DEC eine Berechnung mit starren Klufkörpern durchgeführt.

### 5.1 Materialkennwerte

Die Kaverne liegt im Bereich des Kalkglimmerschiefers und ist von vier Trennflächensystemen durchzogen. Für die 3DEC Untersuchung wurden die Trennflächenabstände mit 5 bzw. 6 m festgelegt. In der Blocktheorieanalyse fanden keine Klufabstände Eingang. In Tabelle 5.1 sind die geometrischen Kennwerte der Trennflächensysteme angegeben.

Sowohl in den Darstellungen der Blocktheorie als auch jenen von 3DEC zeigt die positive y-Achse in Richtung Norden. Die positive x-Achse entspricht Osten.

Kluft	Fallrichtung [°]	Fallwinkel [°]	Kluftabstand [m]
K1	163	71	5.0
K2	243	50	6.0
K3	275	45	5.0
K4	350	43	6.0

**Tabelle 5.1:** Trennflächensysteme – Geometrische Kennwerte

In den 3DEC Berechnungen wurden die Blöcke als starre Körper modelliert und den Trennflächen wurde das "Coulomb-Slip Joint Model" zugewiesen. Für die Beschreibung der Blockeigenschaften wurde die Dichte herangezogen.

Dichte (Blöcke):                      Kalkglimmerschiefer:                       $\rho$                       = 2700                      [kg/m<sup>3</sup>]

Die Trennflächen wurden mit den Materialkennwerten Kohäsion  $c$ , Reibungswinkel  $\varphi$  und den Klufsteifigkeiten  $j_{kn}$  und  $s_{kn}$  beschrieben. Eine Dilatanz und eine Zugfestigkeit wurden in den Trennflächen nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der 3DEC Berechnungen wurden die Kluffestigkeiten  $c$  und  $\varphi$  variiert. In der ersten Untersuchung wurden dieselben Kluffestigkeiten wie in der Blocktheorie Berechnung verwendet (siehe Tabelle 5.2), welche in weiterer Folge auch als geringe Kluffestigigkeiten bezeichnet werden.

Kluft	Reibungswinkel $\varphi$ [ ° ]	Kohäsion $c$ [ MPa ]
K1	15	0.04
K2	30	0.4
K3	30	0.4
K4	25	0.1

**Tabelle 5.2:** geringe Kluffestigkeiten

In einer zweiten 3DEC Modellierung wurden die Kluffestigkeiten sehr hoch gewählt (siehe Tabelle 5.3). Diese hoch gesetzten Kluffestigkeiten sollen dazu beitragen, dass sich nur fallende Körper ausbilden können. Gleitende Blöcke sollen auf Grund des hohen Reibungswiderstandes zurückgehalten werden.

Kluft	Reibungswinkel $\varphi$ [ ° ]	Kohäsion $c$ [ MPa ]
K1	60	50
K2	60	50
K3	60	50
K4	60	50

**Tabelle 5.3:** hohe Kluffestigkeiten

In beiden Modellierungsfällen wurden für die Kluffestigkeiten die in Tabelle 5.4 angegebenen Werte verwendet.

Kluffestigigkeiten		
Normal zur Kluffebene $j_{kn}$	[N/m <sup>2</sup> ]	1.0E+9
Parallel zur Kluffebene $s_{kn}$	[N/m <sup>2</sup> ]	1.0E+9

**Tabelle 5.4:** Kluffestigigkeiten

## 5.2 Untersuchung mittels Blocktheorie

Für die Blocktheorieuntersuchungen wurden die in Tabelle 5.1 angegebenen Trennflächensysteme verwendet. Als fünfte Ebene wurde die horizontale Firste, als freie Oberfläche berücksichtigt. Die Abbildung 5.1 zeigt die Kluffpyramiden in einer



Grundrissprojektion, einschließlich der ausgewiesenen Blockcodes. In Abbildung 5.2 werden die Bewegungsrichtungen der einzelnen Blöcke angegeben.

In einem ersten Schritt wurden alle entfernbaren Blöcke ermittelt, die sich aufgrund der gegebenen Trennflächen bilden können. Diese entfernbaren Blöcke wurden auch als "Key-Blocks" bezeichnet. Als Versagensmechanismus kann Gleiten oder Fallen auftreten. Bei den gleitenden Blöcken war von Interesse, auf welchen Trennflächen sie aus dem Verband gleiten.

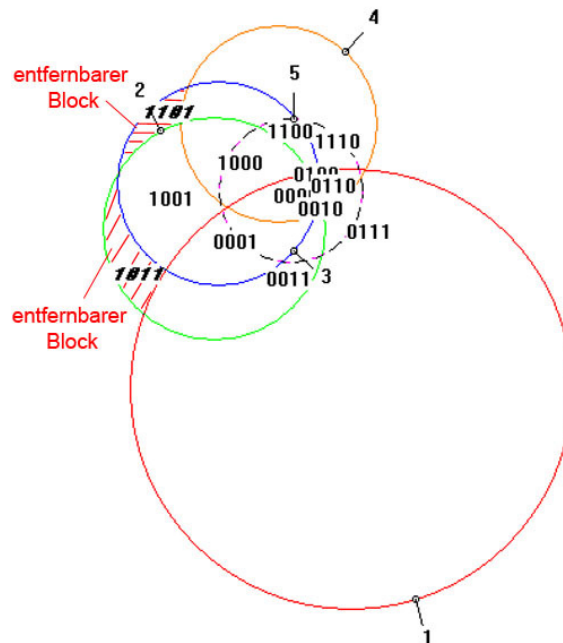


Abbildung 5.1: Klufthyperpyramiden in einer Grundrissprojektion

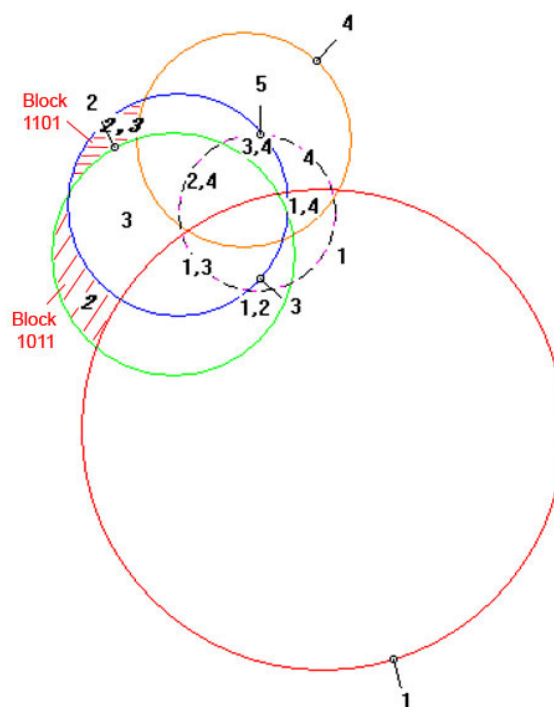


Abbildung 5.2: Bewegungsrichtung der Klufthyperpyramiden

In einem zweiten Schritt wurde die Versagenssicherheit der „Key-Blocks“ ermittelt. Dafür war es erforderlich, die entfernbareren Blöcke auf ihre maximal mögliche Größe aufzuweiten, um das ungünstigste Blockgewicht zu erhalten. In dem hier untersuchten Beispiel ergaben sich Blöcke mit Längsausdehnungen von bis zu 30 Meter. Dabei überspannt ein Block die gesamte Kavernenbreite. Unter Berücksichtigung des Maximalgewichtes eines Blockes und den Kluffestigkeiten wurden Versagenssicherheiten der „Key-Blocks“ bestimmt. Die dafür verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Unter Berücksichtigung erforderlicher Sicherheiten können die notwendigen Ankerkräfte ermittelt werden, was aber im Zuge dieser Untersuchung nicht durchgeführt wurde.

### 5.2.1 Ergebnisse der Blocktheorieuntersuchungen

Die Untersuchung mittels der Blocktheorie hat drei entfernbarere Blöcke ausgewiesen. Diese würden ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen aus der Firste herausfallen oder auf einer oder mehrer Trennflächen herausgleiten. In Tabelle 5.5 sind die drei entfernbareren Blöcke aufgelistet. Der Verschiebungsvektor der Blöcke wurde mittels Fallrichtung und Fallwinkel angegeben. Weiters sind die ermittelten Sicherheiten für die ungünstigste Blockgröße angeführt.

Block	Verschiebungsvektor		Versagensmechanismus	Sicherheit
	Fallrichtung [ ° ]	Fallwinkel [ ° ]		
1111			Herausfallen	0
1011	243	50	Gleiten auf K2	0.97
1101	276	45	Gleiten auf K2 und K3	5.38

**Tabelle 5.5:** entfernbarere Blöcke nach Blocktheorie

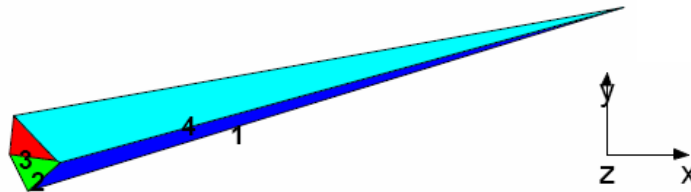
Im Folgenden werden die drei „Key-Blocks“ näher erläutert. Für die Darstellungen wurden Draufsichten und Ansichten der Firstfläche herangezogen.

Für die Vergleiche mit 3DEC wurde vor allem der Block 1111 herangezogen, da dieser den kritischsten Versagensmechanismus und die geringste Sicherheit aufweist.

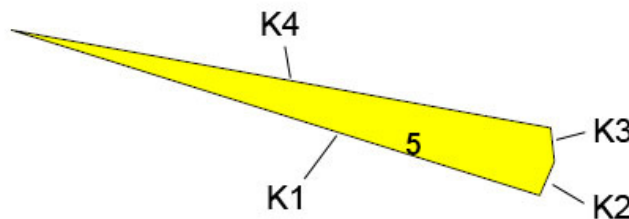
#### 5.2.1.1 Block 1111 nach Blocktheorie

Der Block 1111 fällt aus der Firste heraus und besitzt daher die Sicherheit Null. Abbildung 5.3 zeigt ihn in einer Draufsicht. Die Firstfläche ist in dieser Darstellung nicht sichtbar, da sie vom Körper verdeckt wird. Bei dem Block 1111 handelt es sich um einen sehr schlanken, pyramidenförmigen Körper. Aufgrund der Anordnung der begrenzenden Trennflächen K1 bis

K4 kann er frei aus dem Verband fallen. In Abbildung 5.4 ist die freie Oberfläche (Fläche 5) des Körpers in einer Ansicht dargestellt.



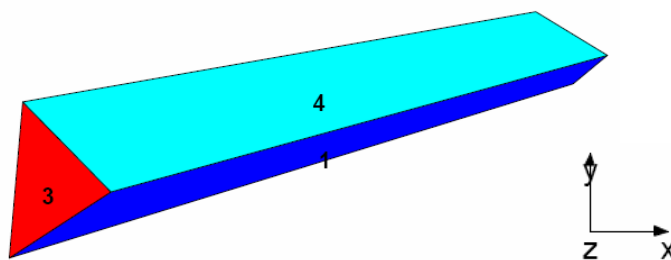
**Abbildung 5.3:** Block 1111 nach Blocktheorie (Draufsicht)



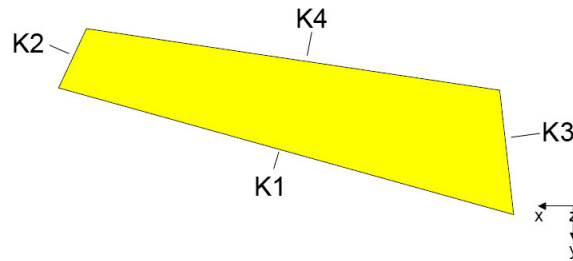
**Abbildung 5.4:** Freie Oberfläche Block 1111 nach Blocktheorie (Untersicht Firstfläche)

### 5.2.1.2 Block 1011 nach Blocktheorie

Der Block 1011 gleitet auf der Trennfläche K2 aus dem Verband heraus. Abbildung 5.5 zeigt ihn in einer Draufsicht. Liegt ein Block 1011 in seiner maximalen Größe vor, dann besitzt dieser eine Sicherheit von 0.97 gegen Versagen, welche durch die vorliegenden Scherfestigkeiten der Trennflächen beeinflusst wird. Dieser Sicherheitsfaktor würde Sicherungsmaßnahmen z.B. in Form von Ankern erforderlich machen. Die freie Oberfläche des Blockes besitzt die in Abbildung 5.6 dargestellte Form. Wie anhand beider Abbildungen zu erkennen ist, tritt jede Trennfläche nur einmal als Begrenzung des Blockes auf. In den von 3DEC ermittelten Blöcken können manchen Trennflächen auch zweimal als Blockbegrenzung auftreten.



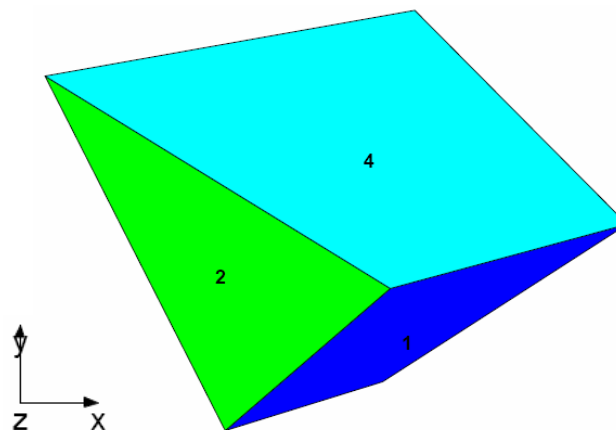
**Abbildung 5.5:** Block 1011 nach Blocktheorie (Draufsicht)



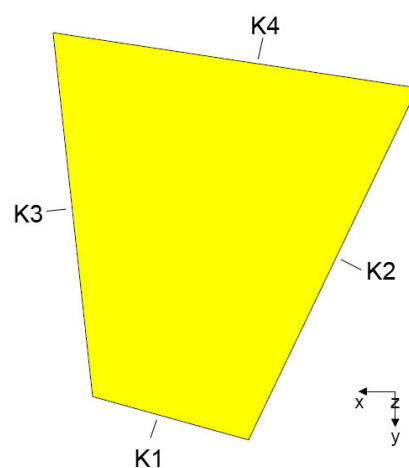
**Abbildung 5.6:** Freie Oberfläche Block 1011 nach Blocktheorie (Untersicht Firstfläche)

### 5.2.1.3 Block 1101 nach Blocktheorie

Der dritte von der Blocktheorie als entfernbar ausgewiesene Block besitzt die Bezeichnung 1101. Dieser gleitet auf den Trennflächen K2 und K3 und besitzt bei Berücksichtigung der Kluffestigkeiten eine Sicherheit von über 3. Eine Draufsicht auf den Block 1101 ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die freie Oberfläche (Firstfläche) ist in dieser Darstellung vollständig vom Körper verdeckt. Abbildung 5.8 zeigt die Firstfläche des Blockes in einer Ansicht.



**Abbildung 5.7:** Block 1101 nach Blocktheorie (Draufsicht)



**Abbildung 5.8:** Freie Oberfläche Block 1101 nach Blocktheorie (Untersicht Firstfläche)

## 5.3 Untersuchung mittels 3DEC

In den 3DEC Berechnungen wurden nur starre Kluffkörper untersucht. Dies ermöglichte eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der Blocktheorie. Da aber in 3DEC die Blöcke Rotations- und Translationsbewegungen durchführen können, wurden in einem Untersuchungsdurchgang die rotatorischen Blockbewegungen unterdrückt. Des Weiteren wurde der Einfluss der Kluffestigkeiten auf das Versagensverhalten untersucht.

### 5.3.1 Modellaufbau

Für die numerische Untersuchung mittels 3DEC wurde ein 80x140x55 m großes Modell gewählt. Die Randbedingungen wurden mit Hilfe von 5 m dicken, scheibenförmigen, unverschieblichen Kluffkörpern modelliert, welche das Modell seitlich und am Boden begrenzen (siehe Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10). Im Rahmen der Berechnungen wurde nur das Firstverhalten untersucht. Aus diesem Grund wurden die Ulmen ebenfalls mittels unverschieblicher Kluffkörper modelliert. Diese fungieren als Widerlager für den zu untersuchenden Firstbereich. Sohlkörper wurde keiner ausgebildet.

Die 30x100 Meter große Kaverne wurde in der Mitte des Modells situiert. Ihr wurde eine Höhe von 25 Meter zugewiesen.

Der zu untersuchende Firstbereich weist eine Mächtigkeit von 30 Meter auf und wird durch die in Tabelle 5.1 angegebenen Trennflächensystemen durchtrennt.

Abbildung 5.9 zeigt einen Längsschnitt und Abbildung 5.10 einen Querschnitt durch den Modellkörper. Dabei zeigt die positive y- Achse in Richtung Norden. Diese Orientierung ist für alle weiteren Abbildungen gültig.

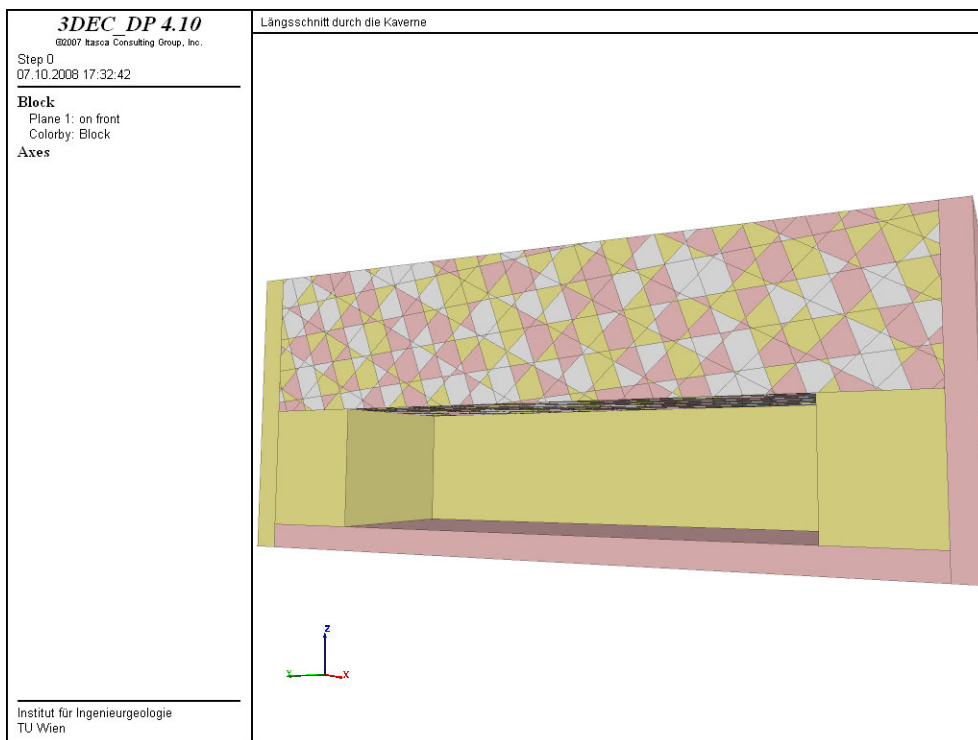


Abbildung 5.9: Längsschnitt durch die Kaverne

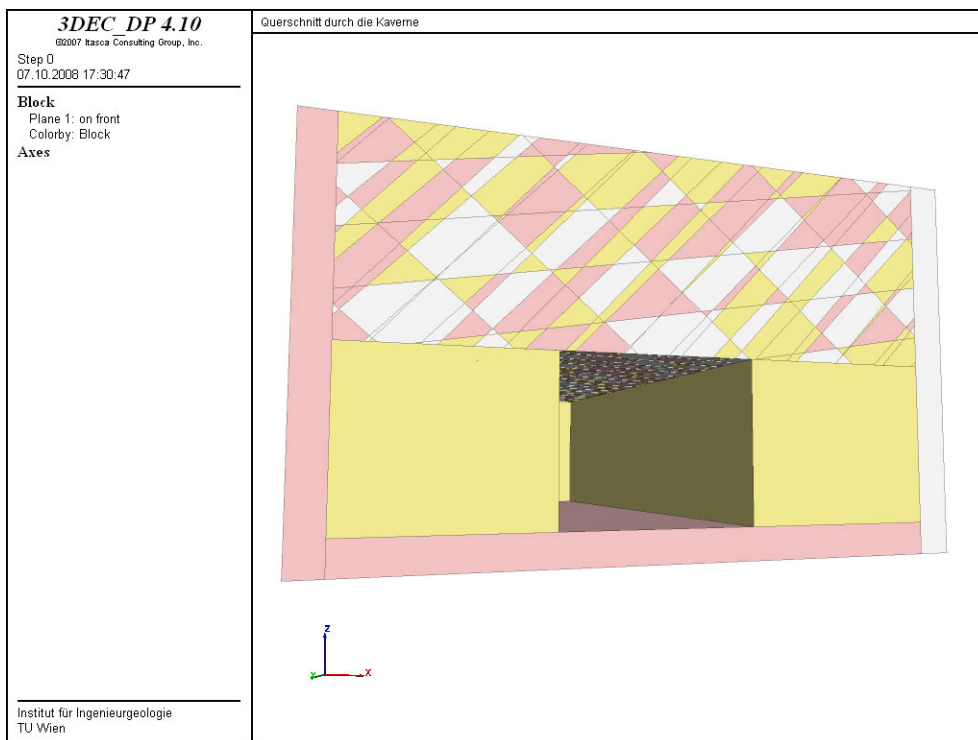
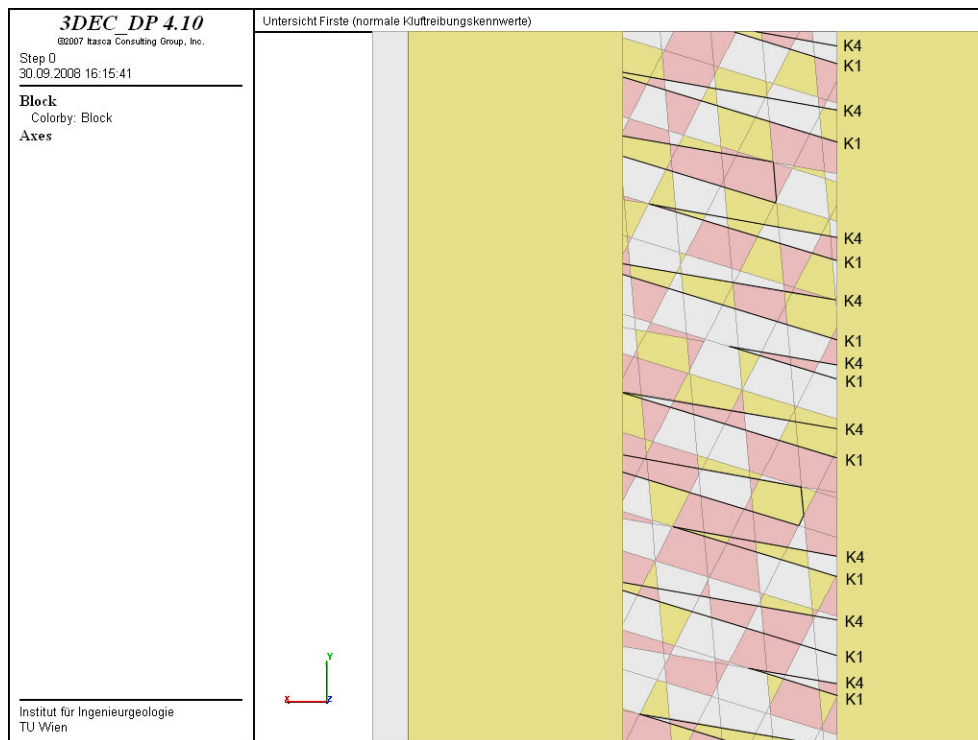


Abbildung 5.10: Querschnitt durch die Kaverne

### 5.3.2 Variation der Kluffestigkeiten

In einer ersten Untersuchung mit 3DEC wurden dieselben Kluffestigkeiten wie für die Blocktheorie Berechnung herangezogen (vgl. Tabelle 5.2). Diese geringen Kluffestigkeiten führten zu einem stark abweichenden Ergebnis. Aus diesem Grund wurde versucht, in einer zweiten Berechnung die Rotation der Blöcke zu unterdrücken. Dies geschah mit einer ins Programm integrierten FISH- Routine, die nach jedem Berechnungsschritt die entstandene Rotation Null setzte. Da dies nicht den gewünschten Effekt erzielte, wurden in einem weiteren Berechnungsdurchgang sehr hohe Kluffestigkeiten angesetzt. Mit Hilfe der hohen Kluffestigkeiten sollten sich frei herausfallende Blöcke bilden, die eine ähnliche Form wie Block 1111 aus der Blocktheorie besitzen (vgl. Kapitel 5.2.1.1). In Abbildung 5.11 sind Blockgruppen gekennzeichnet, die aufgrund ihrer Trennflächenanordnung herausfallen sollen.



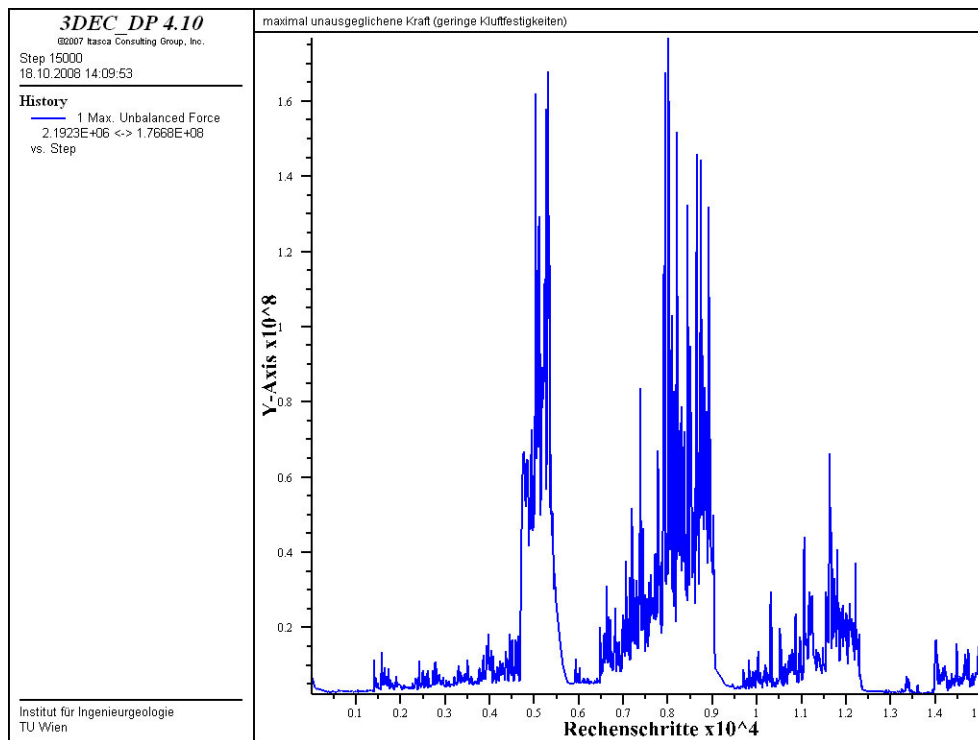
**Abbildung 5.11:** entfernbare Blockgruppen bei vorliegenden Trennflächensystemen

### 5.3.3 Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit geringen Kluffestigkeiten

Bei der Stabilitätsuntersuchung mit geringen Kluffestigkeiten wurden zur Beschreibung der Trennflächeneigenschaften die Werte aus Tabelle 5.2 herangezogen. Dabei handelt es sich um dieselben Werte wie in der Blocktheorie Untersuchung. Die Kluffestigkeiten wurden mit den Werten aus Tabelle 5.4 beschrieben.

Bei der 3DEC Untersuchung wurden nur Rotations- und Translationsbewegungen der Blöcke berücksichtigt. Für den Vergleich mit der Blocktheorie war hauptsächlich das Anfangsverhalten von Interesse. Aus diesem Grund wurde die Berechnung nach 15000 Rechenschritten abgebrochen. In Abbildung 5.12 ist der Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft dargestellt.

Wie zu erkennen ist, liegt am Ende des gewählten Rechenzeitraumes noch kein stabiler Zustand vor, es sind Blöcke in Bewegung.



**Abbildung 5.12:** Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft (geringe Kluffestigkeiten)

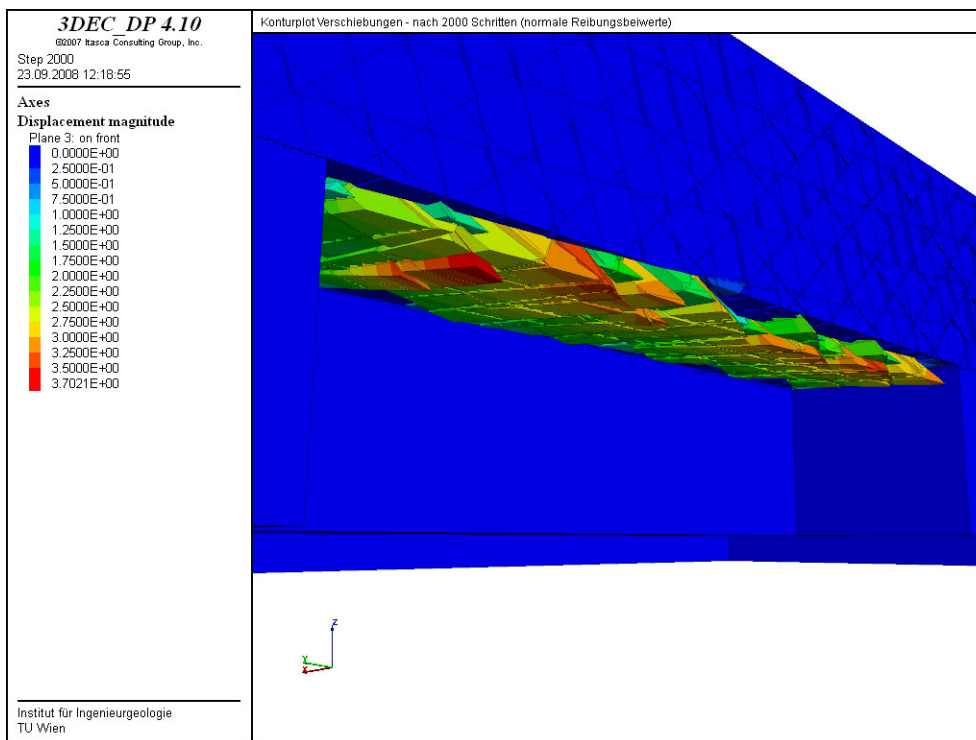
Die ersten Blöcke treffen nach etwa 5000 Schritten auf der Sohle auf. Eine große Anzahl von Blöcken benötigt 7000 bis 9000 Rechenschritten bis zum Auftreffen.

Von Interesse war, welche Art von Versagen vorliegt und welche Blöcke sich als erstes aus dem Verband lösen. Anhand von Schnitten durch die Kaverne wurde versucht das Bewegungsmuster des gesamten Blockverbandes zu ermitteln. Dabei wurden die Blockverschiebungen mit Hilfe von Konturplots visualisiert. In Abbildung 5.13 sind die Verschiebungen nach 2000 Rechenschritten dargestellt. Die Orange bis Rot gefärbten Bereiche sind jene, die zum dargestellten Berechnungszeitpunkt die größten Gesamtverschiebungen aufweisen.

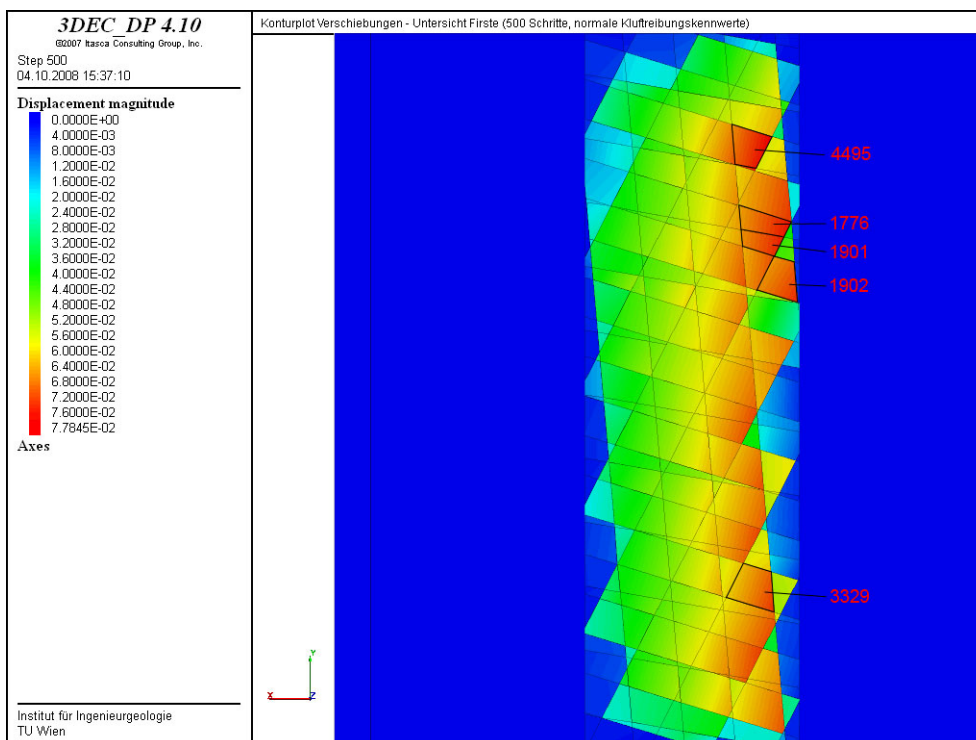
Bereits nach 2000 Schritten liegen die größten Blockverschiebungen bereits bei rund 3.7 Meter. Da der gesamte Firstbereich hohe Verschiebungen aufweist, wurde versucht das Anfangsverhalten und die Versagensmechanismen zu ermitteln. In Abbildung 5.14 sind die



Verschiebungen in der Firstfläche nach 500 Rechenschritten mit Hilfe eines Konturplots dargestellt.



**Abbildung 5.13:** Lage der Blöcke nach 2000 Rechenschritten (Größe der Verschiebungen farblich dargestellt)



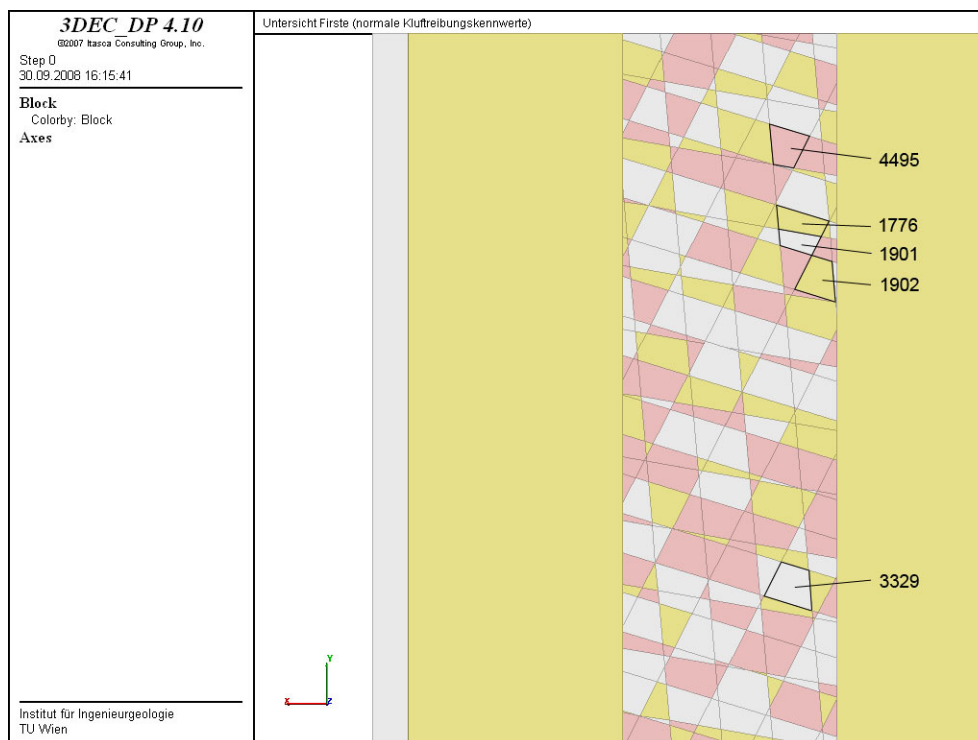
**Abbildung 5.14:** Konturplot der Verschiebungen in der Firstfläche nach 500 Schritten (geringe Kluffestigkeiten)

Ausgehend von den vorliegenden Verschiebungen in der Firstfläche wurden fünf Blöcke im Detail analysiert. Dabei handelt es sich um jene Blöcke, die nach 500 Schritten die größten Einzelverschiebungen aufweisen. Dieser frühe Untersuchungszeitpunkt ermöglicht es, die Ergebnisse leichter mit der Blocktheorie zu vergleichen, da diese nur das Anfangsverhalten als Versagensmechanismus ausgibt. Zu diesem frühen Zeitpunkt der 3DEC Berechnung waren die Einflüsse durch Blockrotationen sehr gering.

In weiterer folge werden diese fünf Blöcke auch als maßgebliche Blöcke bezeichnet, da sie sich als erstes aus dem Verband lösen und daher das kritischste Anfangsverhalten aufweisen. Die maximalen Blockverschiebungen der einzelnen Blöcke sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst, wobei die Verschiebungen absteigend sortiert sind (Block 4495 weist den Maximalwert auf).

Block ID	Maximale Blockverschiebung [cm]
4495	7.78
1776	7.64
1901	7.51
1902	7.42
3329	7.35

**Tabelle 5.6:** Einzelblockverschiebung der maßgebenden Blöcke nach 500 Rechenschritten (geringe Kluffestigkeiten)



**Abbildung 5.15:** maßgebenden Blöcke der Firstfläche (nach 500 Rechenschritten, geringe Kluffestigkeiten)

Abbildung 5.15 zeigt die genauen Positionen der maßgebenden Blöcke im Firstverband. Von großem Interesse sind vor allem die geometrischen Formen dieser Blöcke, von welchen Trennflächen sie begrenzt werden und welche Versagensform sie aufweisen. Um einen Eindruck über das Bewegungsverhalten der fünf untersuchten Blöcke zu erhalten, wurden für jeden einzelnen Block die Rotations- und Translationsgeschwindigkeit ermittelt (Tabelle 5.7). Mit Hilfe der Geschwindigkeitsvektoren wurden die Verschiebungsvektoren der Blöcke bestimmt. Für die Beschreibung der Bewegungsrichtung wurden Fallrichtung und Fallwinkel herangezogen, welche aus den Vektoren der Translationsgeschwindigkeiten berechnet wurden.

Block ID	Rotationsgeschwindigkeit [°/s]			Translationsgeschwindigkeit [m/s]		
	x	y	z	x	y	z
4495	0,00368	-0,01612	0,00103	-0,1173	-0,0519	-0,4664
1776	0,00005	-0,01283	-0,00146	-0,1832	-0,0372	-0,4082
1901	-0,00011	-0,01280	-0,00134	-0,1556	-0,0338	-0,4357
1902	0,00575	-0,00911	-0,00759	-0,1058	0,0345	-0,4423
3329	0,00357	-0,01280	-0,00005	-0,1157	-0,0384	-0,3987

**Tabelle 5.7:** Rotations- und Translationsgeschwindigkeiten der maßgebenden Blöcke

In Tabelle 5.8 sind die Verschiebungsvektoren der einzelnen Blöcke angegeben. Diese Ergebnisse sollen helfen den Versagensmechanismus der Blöcke zu bestimmen und eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Blocktheorie Untersuchung ermöglichen.

Block ID	Verschiebungsvektor	
	Fallrichtung [ ° ]	Fallwinkel [ ° ]
4495	246.1	74.6
1776	258.5	65.4
1901	257.7	69.9
1902	288.0	75.9
3329	251.6	73.0

**Tabelle 5.8:** Verschiebungsvektoren der maßgebenden Blöcke (geringe Kluffestigkeiten)

Zur genaueren Analyse wurden die Blöcke mit der ID-Nummer 1776, 1901 und 1902 betrachtet. Diese drei ausgewählten Blöcke ähneln in ihren geometrischen Formen jenen entfernbaren Blöcken, welche die Blocktheorie angibt. Im Gegensatz zur Blocktheorie können bei den in 3DEC gebildeten Blöcken Kluffscharen ein zweites Mal bei der Blockbegrenzung auftreten. Aus diesem Grund können größere geometrische

Abweichungen auftreten. Trotz dieses Unterschiedes wurde versucht zu ermitteln ob ähnliche Blockformen ähnliche Versagensmuster aufweisen.

Block 1776 weist in seinen Ansätzen eine Ähnlichkeit mit Block 1111 (nach Blocktheorie) auf. Eine der größten geometrischen Unterschiede ist die Tatsache, dass Block 1776 in seiner Gesamtheit nicht die Form einer Pyramide besitzt, sondern ein unbestimmtes Vieleck ist und sich in positive x- Richtung sogar vergrößert, was genau gegensätzlich zu Block 1111 ist. Wenn die angrenzenden Blöcke in die Analyse miteinbezogen werden (markierter Bereich in Abbildung 5.17), ist zu erkennen, dass ein zusammengesetzter Block in keiner Weise die geometrische Form des Blockes 1111 ergeben würde. Im Bereich der freien Oberfläche (Firste) ist sogar die Begrenzung des Blockes 1776 durch die Klüfte K1 und K4 vertauscht, was ein Grund ist dass der markierte Bereich (vgl. Abbildung 5.17) keine dreieckige Form einnimmt.

Bei Betrachtung der vorliegenden Rotationswinkel (vgl. Tabelle 5.7) ist zu erkennen, dass die Bewegung um die y-Achse um eine Zehnerpotenz höher ist, als die Bewegungen um die x- und z-Achse. Diese Rotationsbewegung und die aufgelisteten Geschwindigkeiten in x- und z- Richtung führen zu dem Verschiebungsbild wie in Abbildung 5.16 gezeigt.

Block 1776 führt während dem Herausgleiten eine Rotationsbewegung um die y-Achse durch, überlagert mit einer großen Bewegung in vertikaler Richtung (negative z- Richtung). Die ermittelte Fallrichtung lässt auf ein Gleiten auf der Fläche K2 und K3 schließen, wobei der dazugehörige Fallwinkel von  $65.4^\circ$  doch auch ein Indiz für einen starken fallenden Anteil ist.

Zusammengefasst muss festgestellt werden, dass der Block 1176 sowohl gleitende als auch eine fallende Bewegung durchführt. Die geometrische Form besitzt noch ansatzweise Ähnlichkeiten mit Block 1111 aus der Blocktheorie- Untersuchung, aber das Versagensverhalten besitzt Bestandteile aller drei als „Key- Blocks“ ausgewiesenen Blöcke.

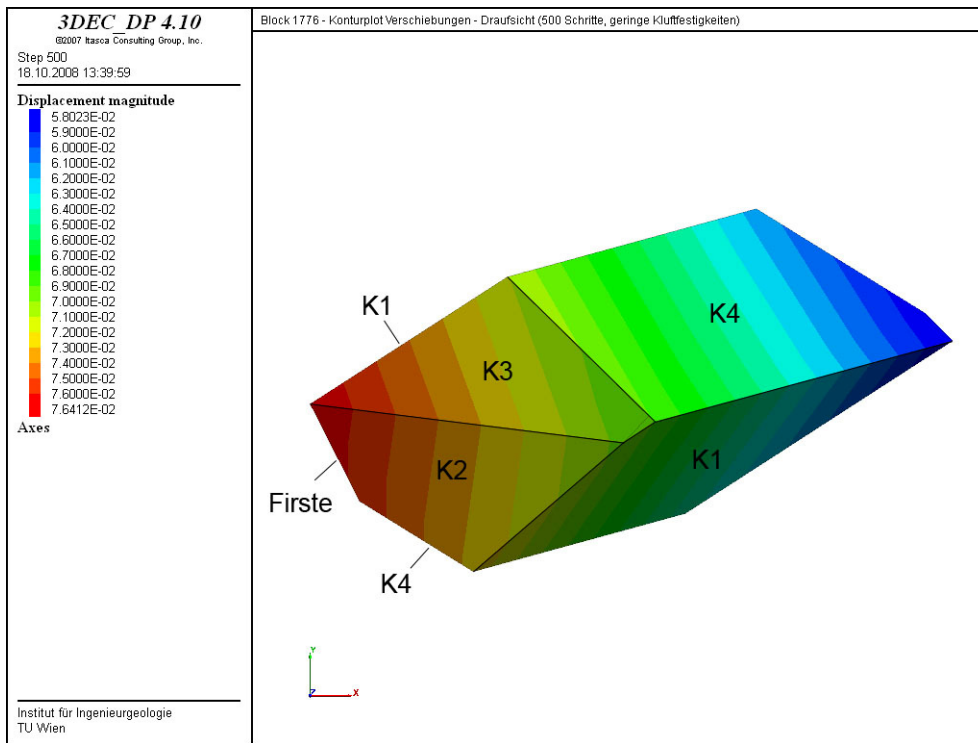


Abbildung 5.16: Konturplot der Verschiebungen des Blockes 1776 nach 500 Schritten (Draufsicht)

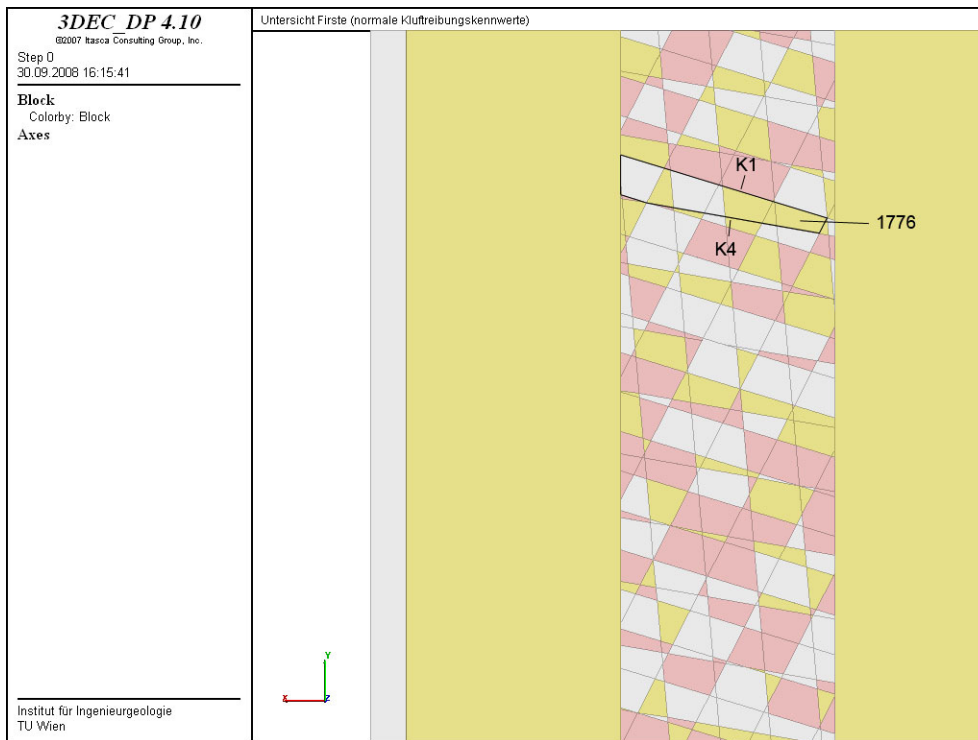
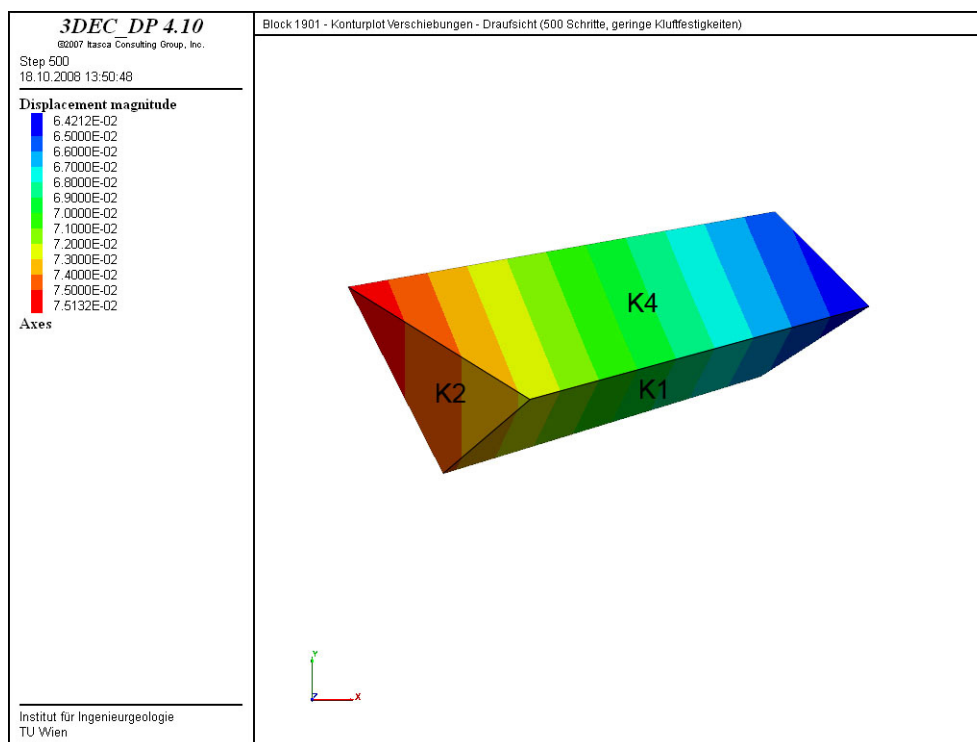


Abbildung 5.17: Block 1776 mit angrenzenden, durch Klüfte K1 und K4 begrenzten Blöcken (markierter Bereich)

Block 1901 wurde ausgewählt, weil seine geometrischen Form (siehe Abbildung 5.18) eine große Ähnlichkeit mit Block 1101 aus der Blocktheorie aufweist. Obwohl beide Blöcke von den gleichen Trennflächen begrenzt werden, besitzen sie einen voneinander abweichenden Versagensmechanismus.

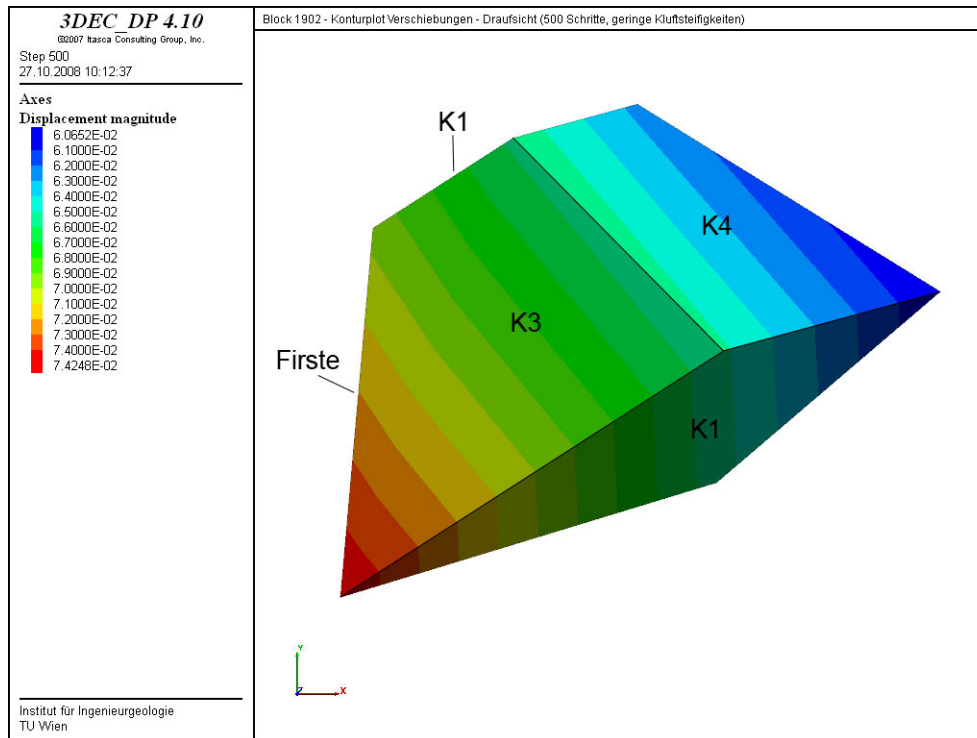
Wie in Tabelle 5.7 zu sehen ist, führt Block 1901 ebenfalls eine um eine Zehnerpotenz stärkere Rotation um die y-Achse durch. Bei Betrachtung der richtungsabhängigen Geschwindigkeitsvektoren ist eindeutig zu erkennen, dass die größte Bewegung in Richtung negativer z- Achse stattfindet, also eine vertikale Bewegung in den Hohlraum. Des Weiteren liegt eine eindeutige Bewegung in negative x- Richtung (Westen) vor.

Zusammengefasst ergeben diese einzelnen Bestandteile wieder eine Bewegung die aus einer Rotation, einem Gleiten und Fallen besteht. Die ermittelte Fallrichtung von  $257.7^\circ$  lässt nicht exakt darauf schließen das der Block 1901 auf den Trennflächen K2 und/oder K3 gleitet, denn auch der Fallwinkel von  $69.9^\circ$  weicht stark von den der Klüften K2 und K3 ab (vgl. Tabelle 5.8). Der vorliegende Fallwinkel zeigt doch schon sehr ausgeprägt in die negative z- Richtung.



**Abbildung 5.18:** Konturplot der Verschiebungen des Blockes 1901 nach 500 Schritten (Draufsicht)

Der Block 1902 wird von denselben Trennflächen wie Block 1011 (aus der Blocktheorie-Untersuchung) begrenzt. Jedoch in zwei Punkten unterscheiden sie sich. Der von 3DEC ausgewiesene Block wird zweimal von der Trennfläche K1 begrenzt und aufgrund der vorliegenden Kluffabstände entstand ein eher kubischer Block.



**Abbildung 5.19:** Konturplot der Verschiebungen des Blockes 1902 nach 500 Schritten (Draufsicht)

### 5.3.4 Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit geringen Kluffestigkeiten und ohne Berücksichtigung der Rotation

Die in Kapitel 5.3.3 beschriebenen Untersuchungsergebnisse beinhalten Translations- und Rotationsbewegungen der Blöcke. Da aber die Blocktheorie keine Rotation berücksichtigt, wurde in einem weiteren Schritt versucht, den Rotationseinfluss in der 3DEC Berechnung zu reduzieren um vergleichbarere Ergebnisse zu erhalten.

Aus diesem Grund wurde eine Routine in die Berechnung eingebaut. Diese FISH-Funktion ermöglichte es, nach jedem Berechnungsschritt die vorliegende Blockrotation Null zu setzen. Ein Zurücksetzen auf den Ausgangswert war nicht möglich. Wie aber anhand der vorliegenden Ergebnisse ersichtlich ist, wurde sie weitestgehend eliminiert.

Die schon in der vorhergehenden Berechnung (vgl. Kapitel 5.3.3) benutzten Materialparameter wurden beibehalten.

In Abbildung 5.20 ist der Verlauf der max. unausgeglichenen Kraft für diesen Berechnungsfall dargestellt. Bei einem Vergleich mit dem Ergebnis bei Berücksichtigung der Rotation ist zu erkennen, dass der Verlauf ähnlich ist, jedoch sind die Spitzen zeitlich etwas versetzt.

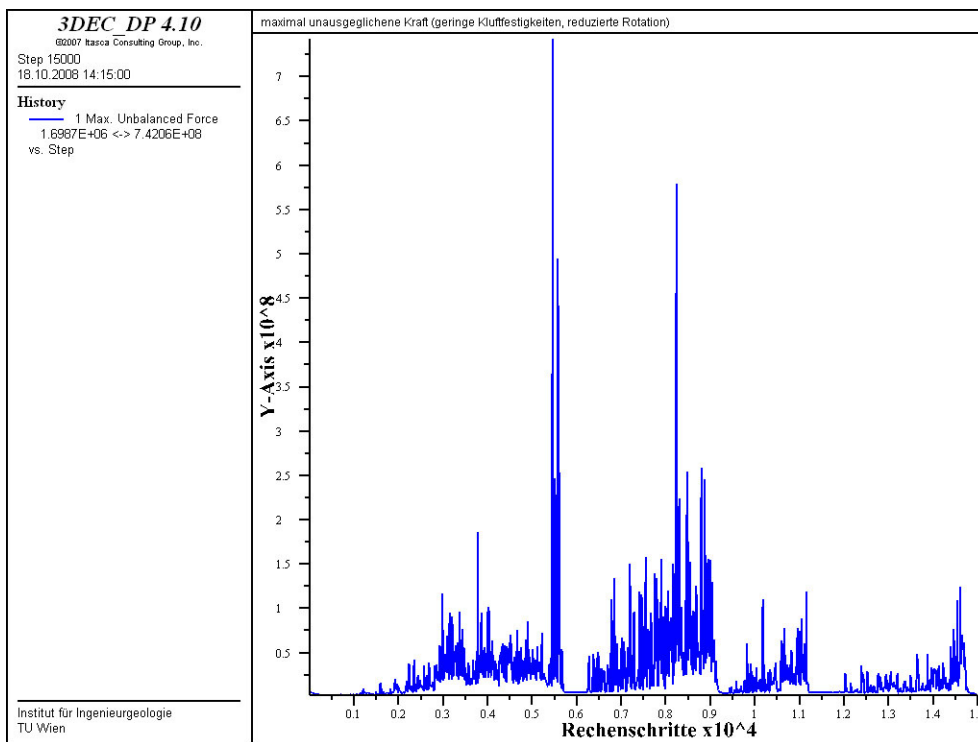


Abbildung 5.20: Verlauf der maximal unausgeglichene Kraft (geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)

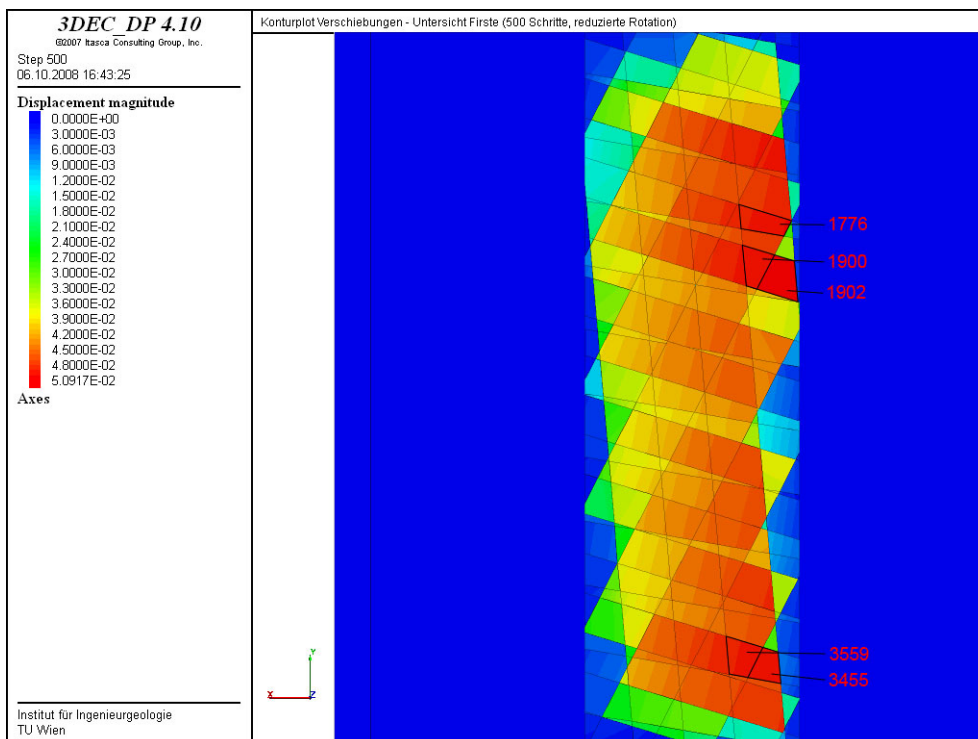


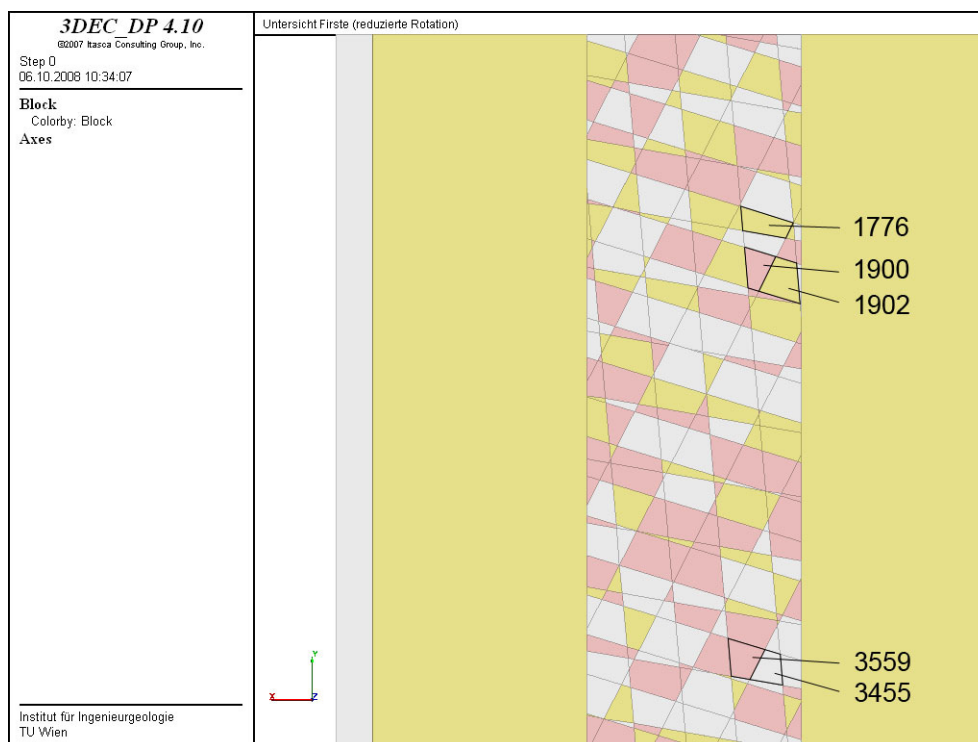
Abbildung 5.21: Konturplot der Verschiebungen in der Firstfläche nach 500 Schritten (geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)



Für die detaillierteren Untersuchungen wurden die resultierenden Verschiebungen in der Firstfläche nach 500 Rechenschritten herangezogen (siehe Abbildung 5.21). Wie die Abbildung zeigt, weisen die meisten frei beweglichen Blöcke der Firste eine Verschiebung zwischen einem und fünf Zentimeter zu diesem Zeitpunkt auf. Lediglich Blöcke die nicht vollständig über der freien Firstfläche zum liegen kommen, besitzen geringere Werte. Diese Bereiche sind in der Abbildung Blau dargestellt.

Eine Reduktion der Rotation bewirkt zwar geringere Verschiebungen, aber trotzdem sind fast alle Blöcke in Bewegung, egal welche geometrische Form sie besitzen.

Das Versagensverhalten wird anhand der markierten Blöcke in Abbildung 5.22 ermittelt. Diese Blöcke weisen nach 500 Schritten die größten Blockverschiebungen auf. Wie anhand der in Tabelle 5.9 angegebenen Verschiebungen zu erkennen ist, fallen die Maximalwerte (bei gleicher Rechenzeit) um etwa 35 Prozent geringer aus als wenn eine vollständige Rotation der Blöcke zugelassen wird (vgl. Tabelle 5.6). Für die Blöcke 1776 und 1902 liegen direkte Vergleiche vor, da sie in beiden Untersuchungsfällen als maßgeblich ausgewiesen wurden.



**Abbildung 5.22:** maßgebenden Blöcke der Firstfläche (nach 500 Rechenschritten, geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)

Block ID	Maximale Blockverschiebung [cm]
1902	5.09
1776	5.00
1900	5.00
3455	4.97
3559	4.96

**Tabelle 5.9:** Einzelblockverschiebung der maßgebenden Blöcke nach 500 Rechenschritten (geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)

Zur Beschreibung der Versagensmechanismen der fünf Blöcke wurden wieder die Rotations- und Translationsgeschwindigkeiten herangezogen. Die ausgelesenen Rotationsgeschwindigkeiten dienen in erster Linie zur Kontrolle wie weit sich die Rotationsbewegung der Blöcke reduzieren ließ.

Mit Hilfe der Translationsgeschwindigkeiten wurden wieder die Verschiebungsvektoren der Blöcke ermittelt.

Block ID	Rotationsgeschwindigkeit [°/s]			Translationsgeschwindigkeit [m/s]		
	x	y	z	x	y	z
1902	0,00018	-0,00096	-0,00008	-0,1754	-0,0545	-0,2574
1776	0,00033	-0,00113	0,00006	-0,1842	-0,0614	-0,2479
1900	0,00021	-0,00138	-0,00007	-0,1717	-0,0503	-0,2495
3455	0,00018	-0,00078	-0,00009	-0,1735	-0,0492	-0,2715
3559	0,00013	-0,00111	0,00004	-0,1723	-0,0476	-0,2692

**Tabelle 5.10:** Rotations- und Translationsgeschwindigkeiten der maßgebenden Blöcke bei reduzierter Rotationsbewegungen

Wie anhand der in Tabelle 5.10 angegebenen Rotationsgeschwindigkeiten ersichtlich ist, war es möglich die Rotationen der Blöcke stark zu reduzieren. Gänzlich ausgeschaltet konnten sie nicht werden, aber ihr Einfluss ist vernachlässigbar. Alle fünf Blöcke führen die größte Rotationsbewegung um die y-Achse durch. Bei den Translationsgeschwindigkeiten weisen jene in x- und z-Richtung die größten Werte auf, wobei jene in Richtung der negativen z-Achse die ausgeprägtesten sind.

Bei einem Vergleich der Geschwindigkeitsvektoren der Untersuchungen mit vollständiger und reduzierter Rotation (vgl. Tabelle 5.7) ist zu erkennen, dass zwar die Translationsgeschwindigkeiten in z-Richtung noch immer die dominierenden sind, jedoch die Werte fast nur mehr die Hälfte aufweisen.

In Tabelle 5.11 werden die Verschiebungsvektoren der fünf maßgeblichen Blöcke mit Hilfe von Fallrichtung und Fallwinkel angegeben. Dabei ist zu erkennen, dass die Fallrichtungen

dieser fünf Blöcke im Maximalfall gerade einmal um  $3^\circ$  auseinander liegen. Die Fallwinkel variieren maximal um  $4.5^\circ$ .

Bei einem Vergleich der beiden Berechnungen (mit und ohne Berücksichtigung der Blockrotation) ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der Fallwinkel um  $16.5^\circ$  abweichen. Die Reduzierung der Rotation bewirkt eine Verflachung der Fallwinkel.

Block ID	Verschiebungsvektor	
	Fallrichtung [ $^\circ$ ]	Fallwinkel [ $^\circ$ ]
1902	252.8	54.5
1776	251.6	51.9
1900	253.7	54.4
3455	254.2	56.4
3559	254.6	56.4

**Tabelle 5.11:** Verschiebungsvektoren der maßgebenden Blöcke (geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)

Stellt man nun die in Tabelle 5.11 ermittelten Fallwinkel denen aus der Blocktheorie-Untersuchung gegenüber, ist zu erkennen, dass die hier vorliegenden Fallwinkel (Bandbreite  $51.9^\circ - 56.4^\circ$ ) gerade einmal zwischen  $2^\circ$  und  $6^\circ$  von dem des Blockes 1011 abweichen. Jedoch besitzen einige der mittels 3DEC ermittelten Blöcke Geometrien, die eher den Blöcken 1101 und 1111 entsprechen und daher zu ganz anderen Fallwinkel führen müssten, im Extremfall sogar einen Fallwinkel von  $90^\circ$  aufweisen müssten.

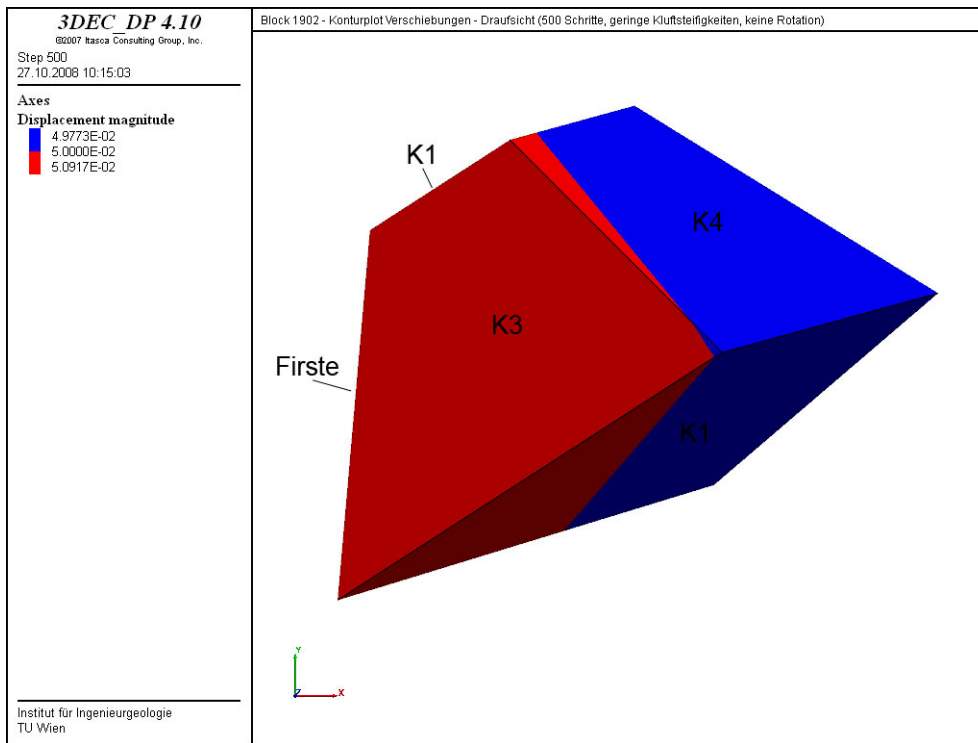
So gesehen bewirkt eine Reduzierung der Rotation nur in einigen Fällen eine Annäherung der Ergebnisse an die mit der Blocktheorie ermittelten.

Die Blockbewegungen werden anhand der Blöcke 1902 und 3455 näher erläutert.

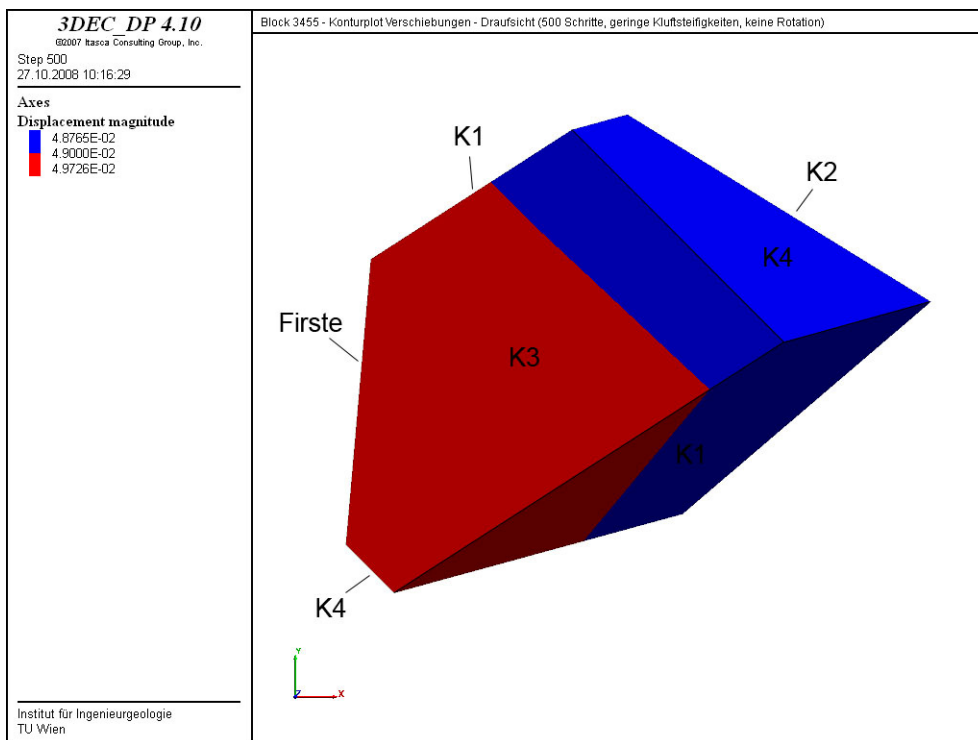
Die begrenzenden Trennflächen umschließen den Block 1902 (vgl. Abbildung 5.23) in gleicher Weise wie den Block 1011 (Blocktheorie), lediglich die Kluff K1 tritt ein zweites Mal auf. Der ermittelte Fallwinkel weicht in etwa um  $10^\circ$  und die Fallrichtung um  $4.5^\circ$  ab.

Block 3455 (vgl. Abbildung 5.24) besitzt fast die gleiche geometrische Form wie Block 1902, jedoch wird er von der Kluff K4 auch ein zweites Mal begrenzt, wenn auch nur in kleinem Ausmaß.

Der geringe, verbleibende Teil der Rotation tritt am stärksten um die y-Achse auf, wie schon bei den Untersuchungen mit vollständiger Rotation. Anhand des Verschiebungs-Konturplots der beiden angegebenen Blöcke (Abbildung 5.23 und Abbildung 5.24) lässt sich erkennen, dass die Blöcke nur mehr ein sehr geringer Rotationsteil die Blockverschiebung beeinflusst. Es tritt vor allem eine Bewegung in negative z- Richtung, als in den Hohlraum, ein. Die zweite dominierende Bewegungsrichtung ist in negative x- Richtung (Westen). Diese Geschwindigkeitsvektoren sind um ca. 35 Prozent geringer sind als jene in z- Richtung.



**Abbildung 5.23:** Konturplot der Verschiebungen des Blockes 1902 nach 500 Schritten (Draufsicht, geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)



**Abbildung 5.24:** Konturplot der Verschiebungen des Blockes 3455 nach 500 Schritten (Draufsicht, geringe Kluffestigkeiten, ohne Blockrotation)

### 5.3.5 Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit hohen Kluffestigkeiten

Nachdem bei den Berechnungsdurchgängen mit geringen Kluffestigkeiten (vgl. Kapitel 5.3.3 und 5.3.4) keine Blöcke als maßgeblich ausgewiesen wurden, die die Form des Blockes 1111 (aus der Blocktheorie) besitzen, wurde eine weitere Untersuchung mit hohen Kluffestigkeiten durchgeführt. Diese sehr hoch gewählten Reibungsbeiwerte sollen dazu führen, dass sich nur Blöcke aus dem Verband lösen, die frei fallen können, also von der Form und dem Versagensverhalten dem Block 1111 (vgl. Abbildung 5.3) entsprechen. Als Kluffestigkeiten wurden die in Tabelle 5.3 angegebenen Werte verwendet. Das elastische Verhalten der Trennflächen wurde mit Hilfe der in Tabelle 5.4 angegebenen Kluffestigkeiten beschrieben.

Wie schon in den vorangegangenen Berechnungen, wurden auch bei dieser Untersuchung ausschließlich Starrkörperbewegungen berücksichtigt. Im Gegensatz zur Untersuchung mit den geringen Kluffestigkeiten (vgl. Kapitel 5.3.3 und 5.3.4) kommt es in dem vorliegenden Fall nicht zu einem kompletten Firstversagen. Aus diesem Grund wurde diese Simulation nicht nach 15000 Rechenschritten abgebrochen, sondern es wurde geschaut ob sich ein stabiler Zustand einstellt. Wie anhand des Verlaufes der maximal unausgeglichenen Kraft (vgl. Abbildung 5.25) zu erkennen ist, stellt sich etwa nach 50000 Schritten dieser stabile Zustand ein. Dies zeigt, dass bei Verwendung sehr hoher Werte für die Kluffestigkeiten sich das System von selbst stabilisiert, ohne des Einsatzes jeglicher Stützmaßnahmen.

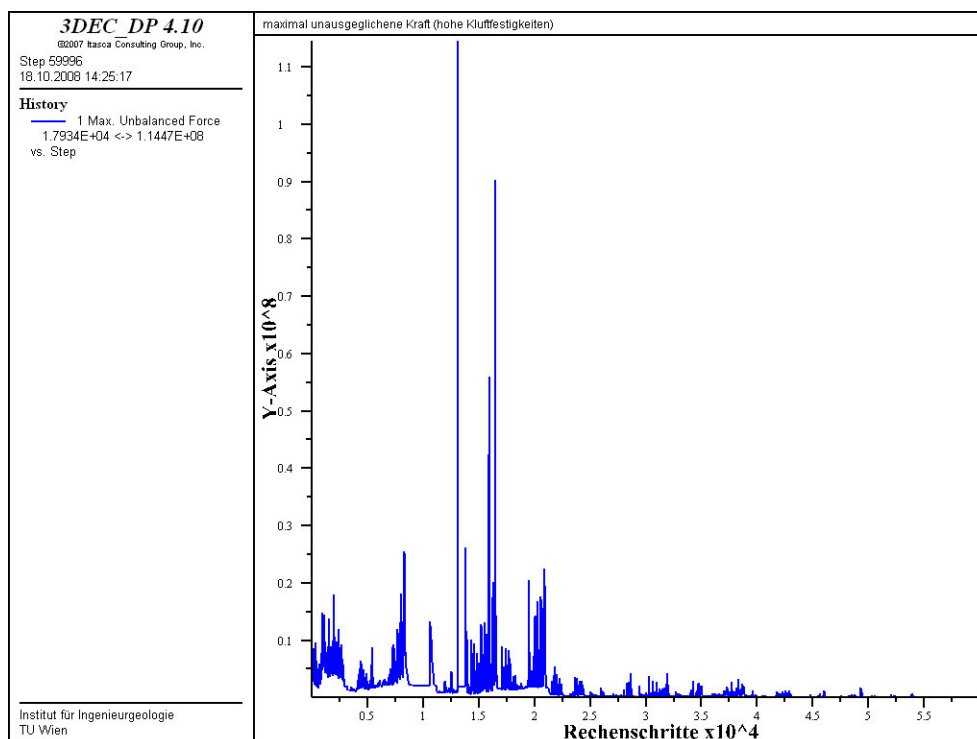
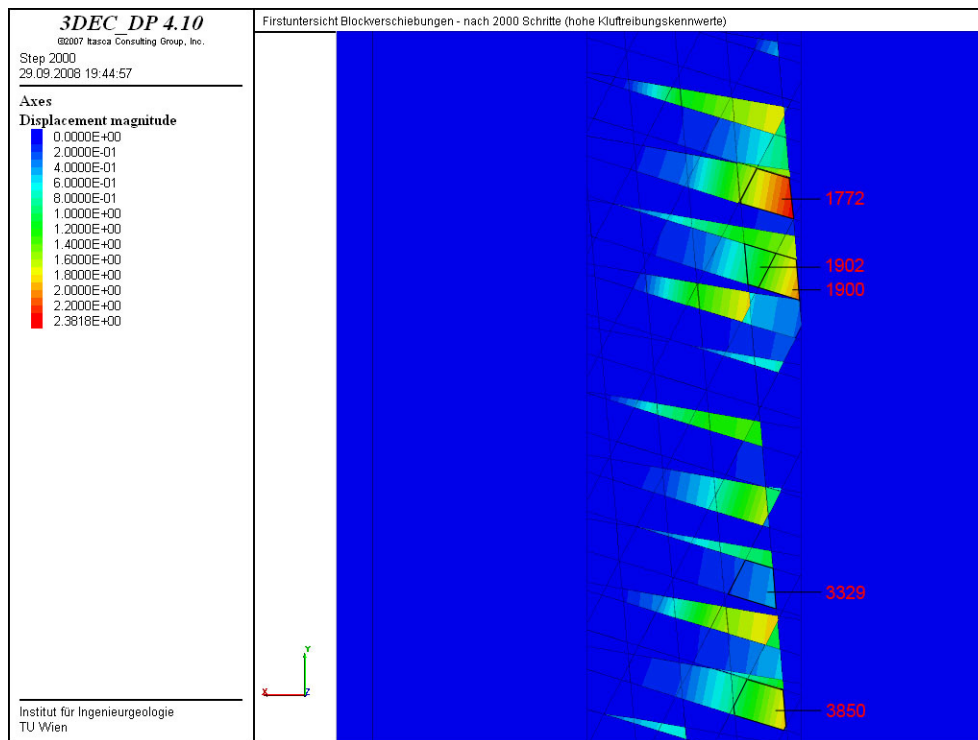


Abbildung 5.25: Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft (hohe Kluffestigkeiten)

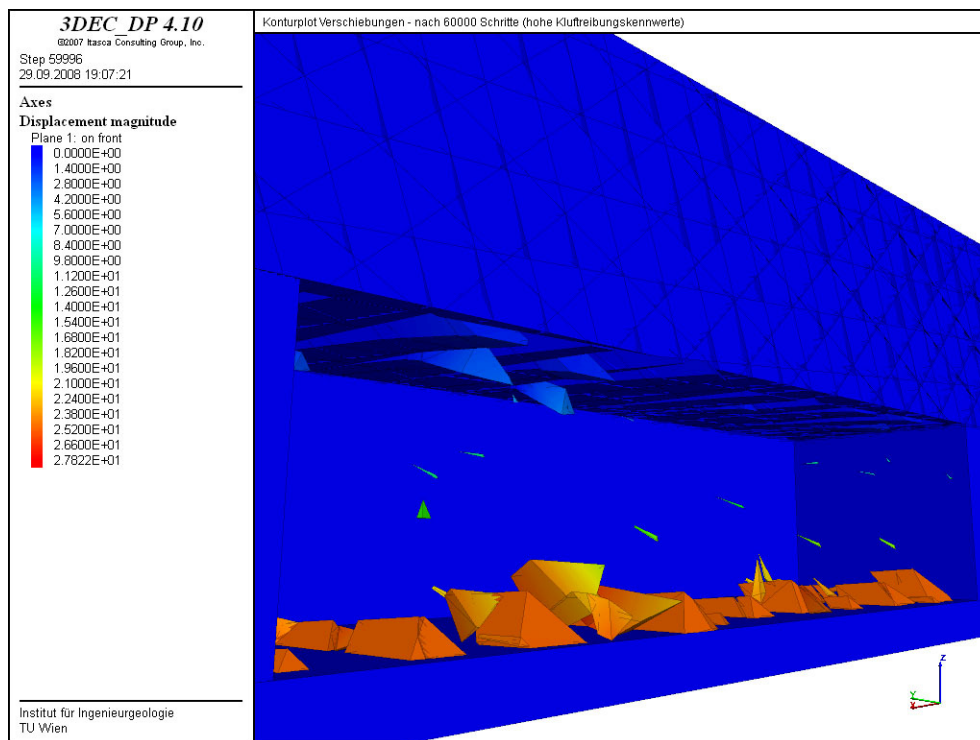
Dass bei hohen Kluffsteifigkeiten nur bestimmte Bereiche aus der Firste herausfallen werden zeigte sich bereits nach 2000 Rechenschritten, wie in Abbildung 5.26 ersichtlich ist. Neben ein paar vereinzelt Blöcken besitzen die meisten sich herauslösenden Blockgruppen dieselbe geometrische Form wie der Block 1111 aus der Blocktheorie. Dies ist an den rötlich bis grün eingefärbt Bereichen zu erkennen. Würden jedoch die Verschiebungsbilder nach 500 Schritten für die Analyse herangezogen, würden zum Teil andere Blockgruppen als entfernbar ausgewiesen werden (siehe Abbildung 5.28).



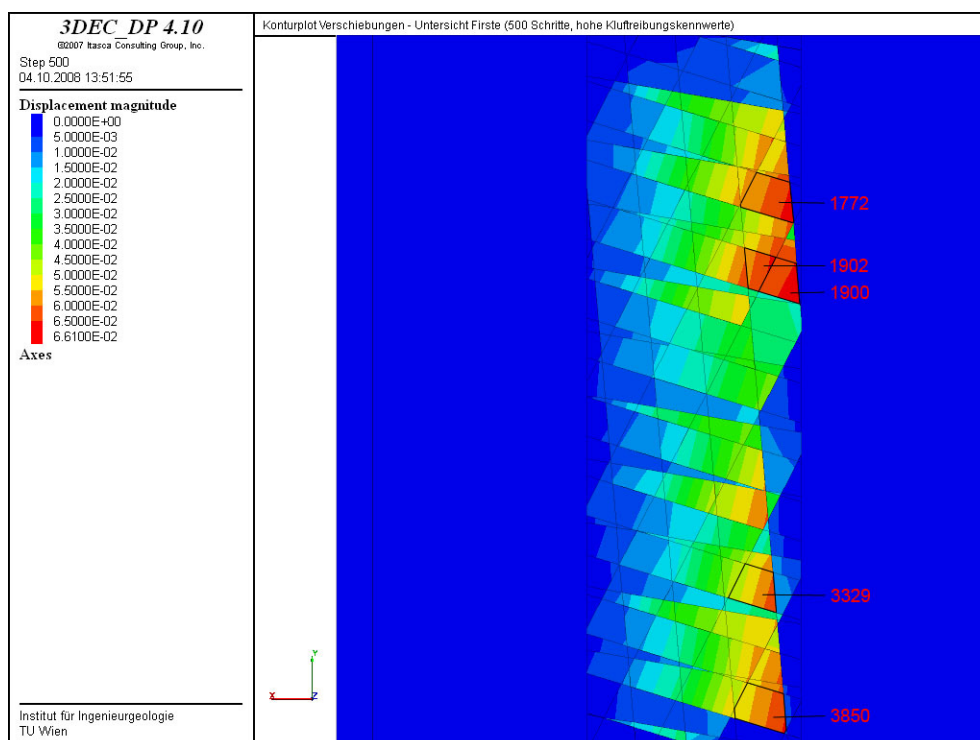
**Abbildung 5.26:** resultierende Firstverschiebung nach 2000 Rechenschritten (Untersicht, hohe Kluffestigkeiten)

Abbildung 5.27 zeigt einen Schnitt durch das Modell am Ende der Untersuchungsdauer (60000 Rechenschritte). Im Firstbereich sind nur geringe Verschiebungen aufgetreten und das System ist von sich aus in einen stabilen Zustand übergegangen. Es sind nur einzelne Blockgruppen aus der Firste herausgefallen. Die aus der Firste heraushängenden Blöcke haben sich verkeilt und verharren in dieser Position.

In Abbildung 5.28 sind die auftretenden Verschiebungen im Firstbereich nach 500 Schritten dargestellt. Die fünf Blöcke mit größten Verschiebungen zu diesem Zeitpunkt sind markiert und wurden genauer untersucht.



**Abbildung 5.27:** Lage der Blöcke überlagert mit den Verschiebungen (farblich dargestellt) nach 60000 Rechenschritten



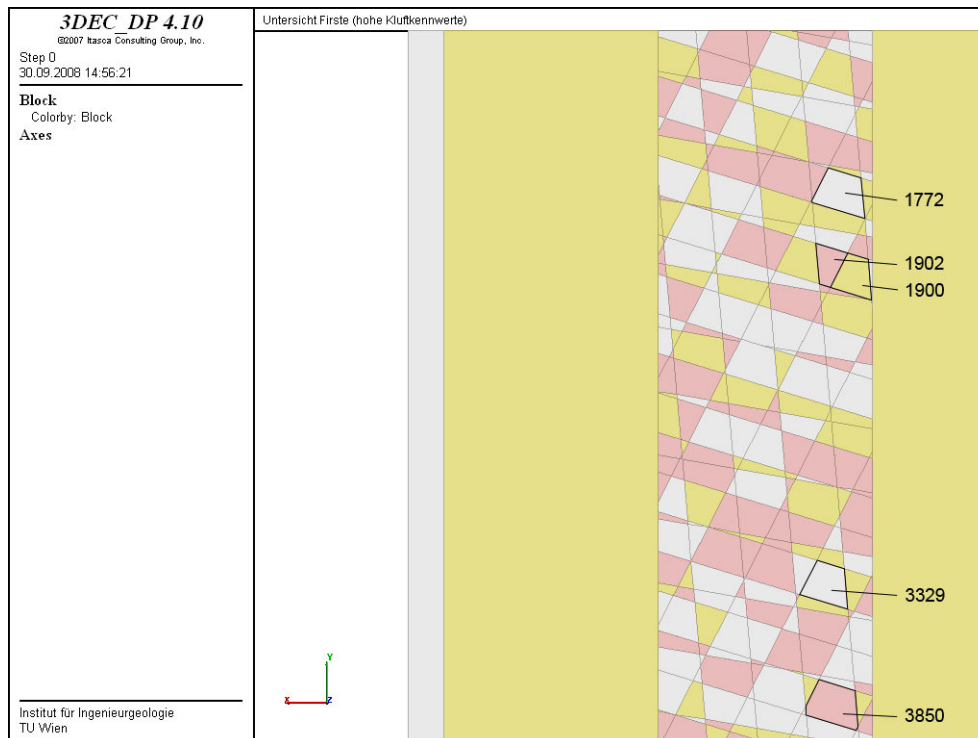
**Abbildung 5.28:** resultierende Firstverschiebung nach 500 Rechenschritten (Untersicht, hohe Kluffestigkeiten)

In Tabelle 5.12 sind die ermittelten Einzelblockverschiebungen der fünf maßgeblichen Blöcke aufgelistet. Bei einem Vergleich mit den beiden vorangegangenen Untersuchungen (geringe Kluffestigkeiten mit und ohne Blockrotation) ist zu erkennen, dass die hier vorliegenden Verschiebungen betragsmäßig zwischen den beiden anderen liegen. Die Untersuchungen mit berücksichtigter Blockrotation lieferten größere Blockverschiebungen und die ohne Rotationseinfluss führten zu geringeren Verschiebungen der Blöcke.

Block ID	Maximale Blockverschiebung [cm]
1902	6.61
1772	6.46
1900	6.32
3850	6.25
3329	6.18

**Tabelle 5.12:** Einzelblockverschiebung der maßgebenden Blöcke nach 500 Rechenschritten (hohe Kluffestigkeiten)

Abbildung 5.29 zeigt noch einmal die exakte Lage der maßgeblichen fünf Blöcke bei Vorliegen hoher Kluffestigkeiten. Zum analysierten Zeitpunkt (500 Schritte) war keiner der maßgeblichen Blöcke Teil der in Abbildung 5.11 ausgewiesenen Zonen, die auf Grund ihrer Trennflächenanordnung herausfallen müssten.



**Abbildung 5.29:** Untersicht der Firste mit Kennzeichnung der maßgebenden Blöcke (nach 500 Rechenschritten, hohe Kluffestigkeiten)



Für die Bestimmung der vorliegenden Versagensmechanismen der maßgebenden Blöcke wurden wieder die Rotations- und Translationsgeschwindigkeiten ausgewertet. Die in Tabelle 5.13 aufgelisteten Werte wurden nach 500 Rechenschritten ermittelt.

Block ID	Rotationsgeschwindigkeit [%/s]			Translationsgeschwindigkeit [m/s]		
	x	y	z	x	y	z
1902	0,00501	-0,01311	-0,00174	-0,0380	-0,0160	-0,3779
1772	0,00293	-0,01044	-0,00156	-0,0303	-0,0141	-0,3819
1900	0,00507	-0,02073	-0,00141	-0,0132	-0,0207	-0,3237
3850	0,00372	-0,02062	-0,00241	-0,0189	-0,0252	-0,3345
3329	0,00591	-0,02417	-0,00061	0,0005	-0,0111	-0,2683

**Tabelle 5.13:** Rotationsbewegung und Geschwindigkeitsverteilung der fünf maßgeblichen Blöcke

Bei den fünf ausgewerteten Blöcken sind die Rotationen um die y-Achse maßgebend. Die größten Translationsgeschwindigkeiten liegen wieder in negativer z-Richtung vor. In x- und y-Richtung bewegen sich die Geschwindigkeiten in einer selben Größenordnung, aber um mehr als eine Zehnerpotenz geringer als in z-Richtung.

Geringere Geschwindigkeitsvektoren in x- und y-Richtung sind ein Anzeichen dafür, dass vor allem eine fallende Bewegung vorliegt. Dies spiegelt sich an den Fallwinkeln der Verschiebungsvektoren der einzelnen Blöcke wieder, wie in Tabelle 5.14 ersichtlich ist. Die Fallwinkel der fünf ausgewerteten Blöcke variieren im Maximalfall um 3,8°.

Die Fallrichtungen der einzelnen Verschiebungsvektoren unterliegen größeren Differenzen, so beträgt der geringste Winkel 177,6° und der größte 247,2°.

Lediglich die Verschiebungsrichtung der ausgewerteten Blöcke 1772 und 1902 bewegt sich in der Größenordnung der Fallrichtung der Trennfläche K2.

Block ID	Verschiebungsvektor	
	Fallrichtung [ ° ]	Fallwinkel [ ° ]
1902	247.2	83.8
1772	245.0	85.0
1900	212.5	85.7
3850	216.8	84.6
3329	177.6	87.6

**Tabelle 5.14:** Verschiebungsvektoren der maßgebenden Blöcke (hohe Kluffestigkeiten)

Für eine genauere Beschreibung der Blockbewegungen wurden die Blöcke mit der ID-Nummer 1900 und 3850 ausgewählt.

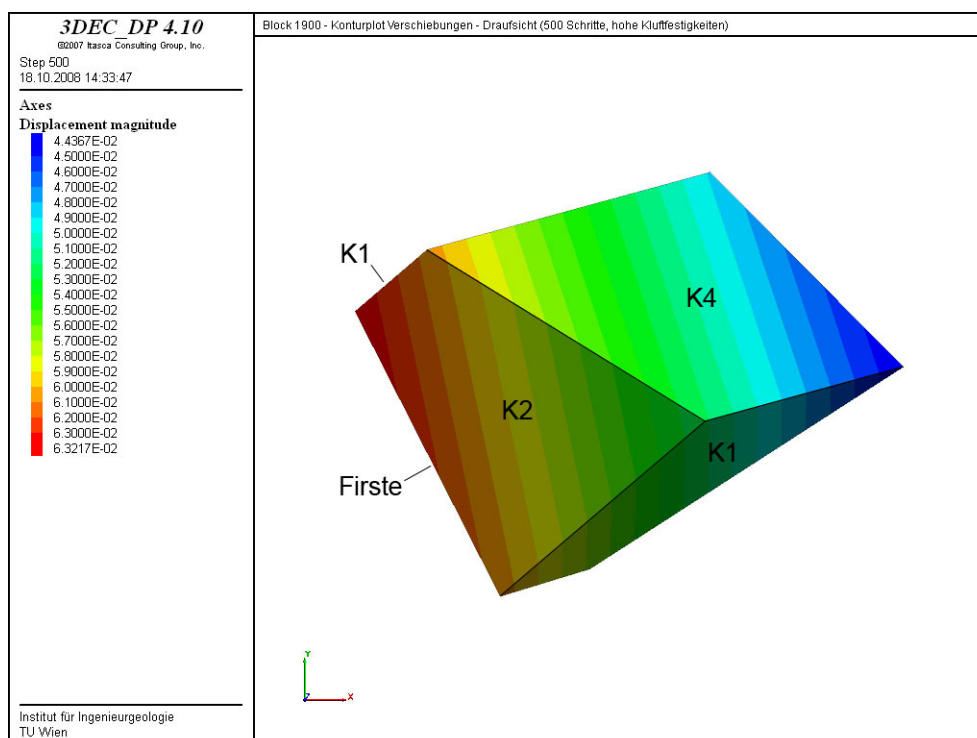
Die geometrische Form des Blockes 1900 (siehe Abbildung 5.30) besitzt Ähnlichkeiten mit Block 1101 aus der Blocktheorie. Wie schon in den vorangegangenen 3DEC

Untersuchungen treten manche Trennflächen mehr als einmal als Begrenzung auf. In dem hier vorliegenden Fall wird der Block zweimal durch K1 begrenzt. Der Fallwinkel des Verschiebungsvektor zeigt fast senkrecht in den Hohlraum. Daraus kann geschlossen werden, dass hauptsächlich eine fallende Bewegung vorliegt. Die Rotationsbewegung um die y-Achse ist ca. viermal größer als um die x-Achse. Dies führt zu einer verstärkten Rotationsbewegung in x-Richtung.

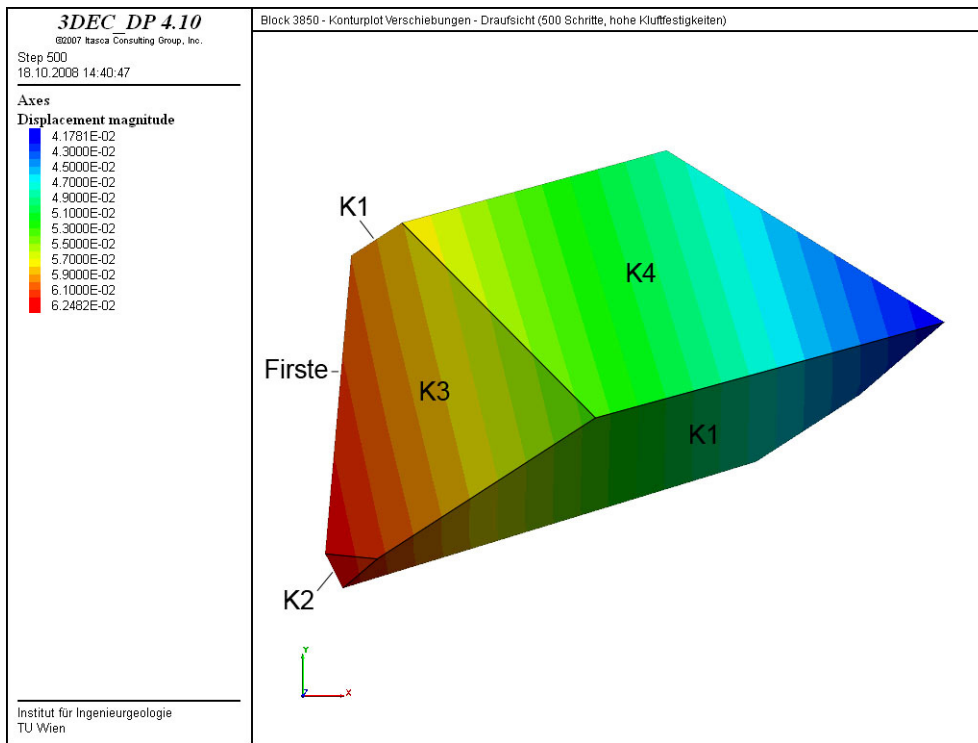
Der Blöcke 3850 (siehe Abbildung 5.31) ist geometrisch ebenfalls dem Block 1011 (Blocktheorie) am ähnlichsten, wird jedoch von der Kluft K1 ein zweites Mal begrenzt. Anhand des ermittelten Verschiebungsvektors lässt sich nicht eindeutig ein Gleiten auf der Trennflächen K2 ausmachen, da die Fallrichtung um rund  $25^\circ$  abweicht. Der Fallwinkel des Verschiebungsvektors weicht um ca.  $5^\circ$  von der Vertikalen ab. Somit kann gesagt werden, dass der Block aus dem Verband fällt.

Von den auftretenden Rotationsbewegungen ist jene um die y-Achse maßgebend. Wie anhand des Konturplots der Verschiebungen zu erkennen ist, vollführt der Block 3850 eine Rotationsbewegung in x- und y- Richtung gleichermaßen.

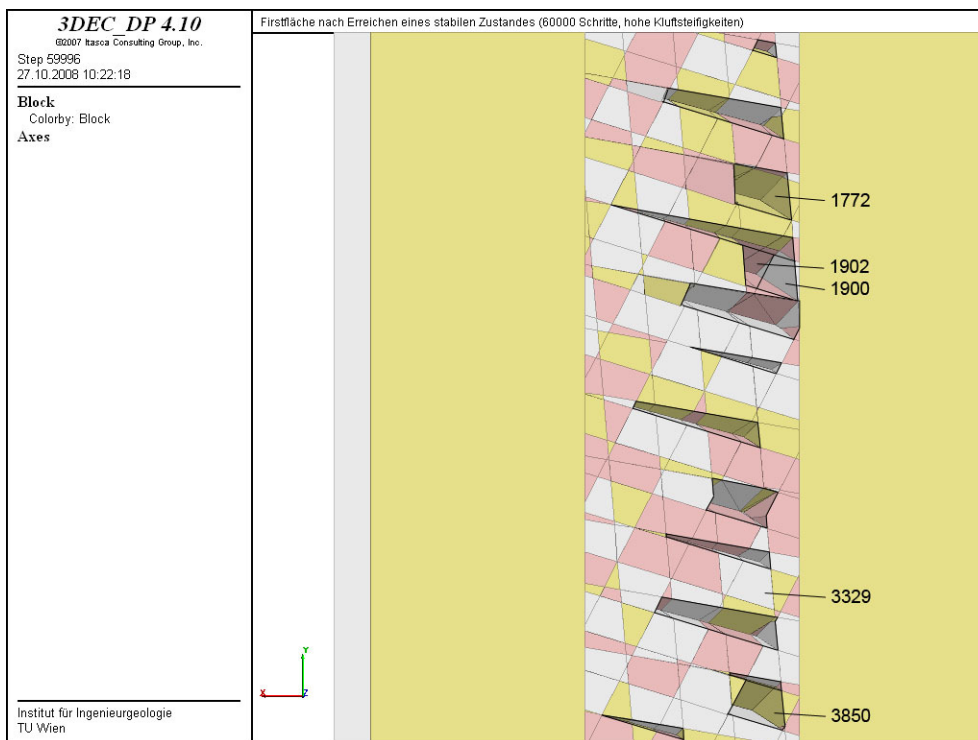
Von der geometrischen Form her müssten beide Blöcke "Gleiten auf K2" als Versagensmechanismus ausweisen, tatsächlich liegt Fallen aus der Firste vor.



**Abbildung 5.30:** Konturplot der Verschiebungen des Blockes 1900 nach 500 Schritten (Draufsicht, hohe Kluffestigkeiten)



**Abbildung 5.31:** Konturplot der Verschiebungen des Blockes 3850 nach 500 Schritten (Draufsicht, hohe Kluffestigkeiten)



**Abbildung 5.32:** Firstfläche nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes (60000 Rechenschritte, hohe Kluffestigkeiten)

Abbildung 5.32 zeigt die Firstfläche, nachdem ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde. Ein großer Teil der herausgelösten Blöcke sind Bestandteil jener Zonen, die auf Grund des Trennflächensystems herausfallen müssen. Jedoch sind diese Bereiche nicht vollständig herausgefallen. Von den maßgeblichen Blöcken (nach 500 Schritten) haben sich jene vier herausgelöst, die direkt neben einer der entfernbareren Zonen liegen.

Bei Verwendung hoher Kluffestigkeiten bilden sich auch mittels 3DEC jene Zonen aus, die von der Blocktheorie mit "Fallend" bezeichnet werden.

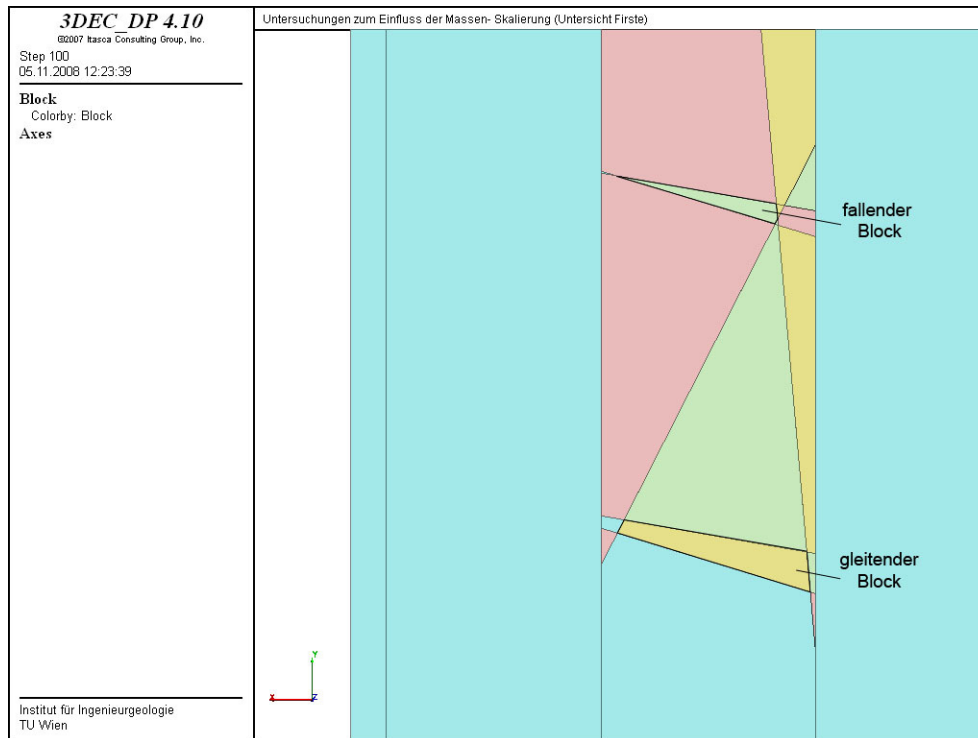
## 5.4 Mass (Density) Scaling

In allen drei Modellierungsvarianten (siehe Kapitel 5.3.3 bis 5.3.5) werden nach 500 Schritten maßgebliche Blöcke ausgewiesen, die nicht Teil der dargestellten Zonen in Abbildung 5.11 sind. Blöcke dieser Zonen müssten aber in der Berechnung zu jedem Zeitpunkt die größten Verschiebungen aufweisen, da diese frei herausfallen.

Hingegen besitzen vor allem Blöcke mit großer Masse die größten Verschiebungen, unabhängig davon, ob sie in ihrer Bewegung durch einen anderen Block gehindert werden. Zu unterschiedlichen Berechnungsschritten werden unterschiedliche Blöcke als maßgebend ausgewiesen. Dies würde darauf schließen lassen, dass ein Block einen anderen überholen würde, was physikalisch nicht möglich ist. Wie schon Galileo Galilei 1638 in „*Discorsi e dimostrazioni matematiche*“ bewiesen hat, ist der freie Fall bei Vernachlässigung des Luftwiderstandes nicht massenabhängig und aus diesem Grund kann ein Körper nicht schneller als ein anderer fallen.

Zur Untersuchung des Einflusses der „Massen- Skalierung“ wurden ein fallender und ein gleitender Block analysiert, welche sich zur gleichen Zeit aus dem Verband lösen. Zur Beschreibung der geometrischen Form wurden die Blöcke 1111 und 1011 aus der Blocktheorie verwendet (vgl. Abbildung 5.33). Die beiden untersuchten Blöcke sind unterschiedlich groß und verfügen daher auch über differenzierte Massen. Der fallende Block wurde als der kleinere der beiden modelliert.

In der ersten Modellierung wurde wie bei den Kavernenberechnungen (vgl. Kapitel 5.3.3 bis 5.3.5) das Mass Scaling mitberücksichtigt. Gemäß dem 3DEC- Handbuch (Itasca, 2007) lässt sich durch die Skalierung der Massen die Rechenzeit gering halten. Dies ist auch solange zulässig, solange es sich um ein statisches System handelt. Wechselt jedoch das System von einem statischen Zustand in einen dynamischen, dann ist es erforderlich, das Mass Scaling auszuschalten. Dies hat vor allem zu erfolgen, wenn große Verschiebungen auftreten.



**Abbildung 5.33:** Untersicht Firstfläche - Untersuchungen zum Einfluss des Mass Scaling

### 5.4.1 Versagensverhalten bei Berücksichtigung des Mass Scaling

Die Bestimmung des Versagensverhaltens erfolgte anhand der Blockverschiebungen, welche mit Hilfe von Konturplots ausgegeben wurden. Bereits nach einer Rechenzeit von 1000 Schritten besitzt der gleitende Block die größeren Maximalverschiebungen (siehe Abbildung 5.34), obwohl dieser Block zu Beginn auf einer Trennfläche herausgleiten muss, bevor er ins Fallen übergehen kann. Eigentlich müsste der fallende Block die größten Verschiebungen aufweisen, denn dieser kann ohne Behinderung von Beginn an fallen. Schon zu diesem Zeitpunkt ist erkennbar, dass bei der Berechnung die Masse der Blöcke einen Einfluss auf das Versagensverhalten hat.

In Abbildung 5.35 ist die Lage der Blöcke nach 10000 Schritten dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt liegt der gleitende Block bereits auf der Sohle. Der frei fallende Block hat sich erst aus der Firste gelöst und fällt gerade in Richtung Sohle.

Da diese Berechnung ein nicht zufrieden stellendes Ergebnis geliefert hat, wurde in einer weiteren Modellierung das Mass Scaling ausgeschaltet.

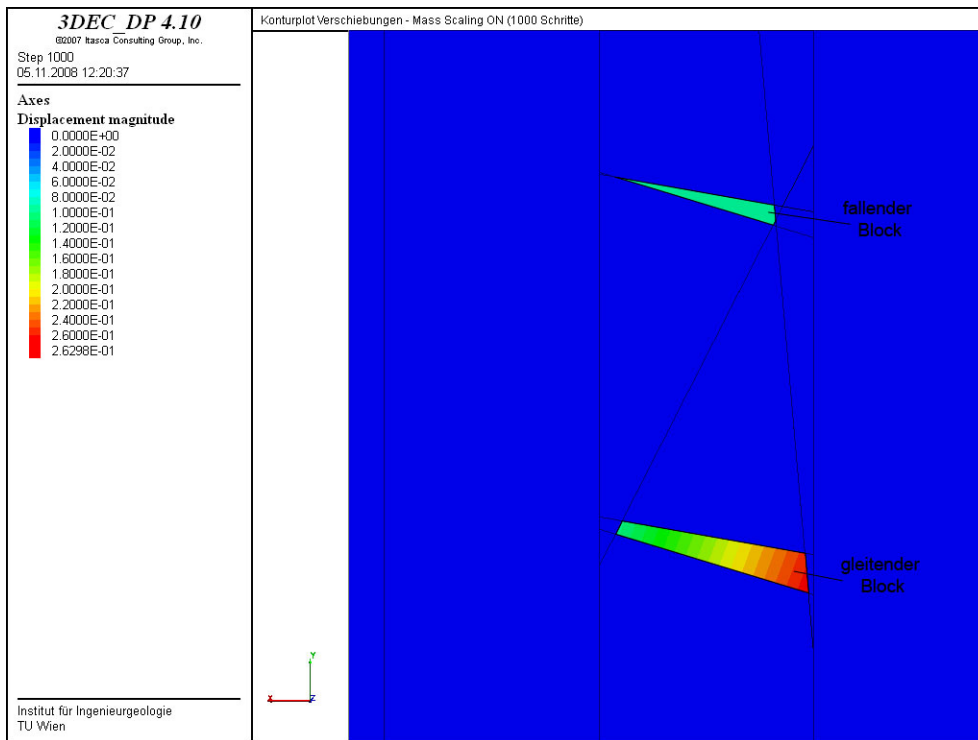


Abbildung 5.34: resultierende Verschiebung der Blöcke nach 1000 Schritten (mit Mass Scaling)

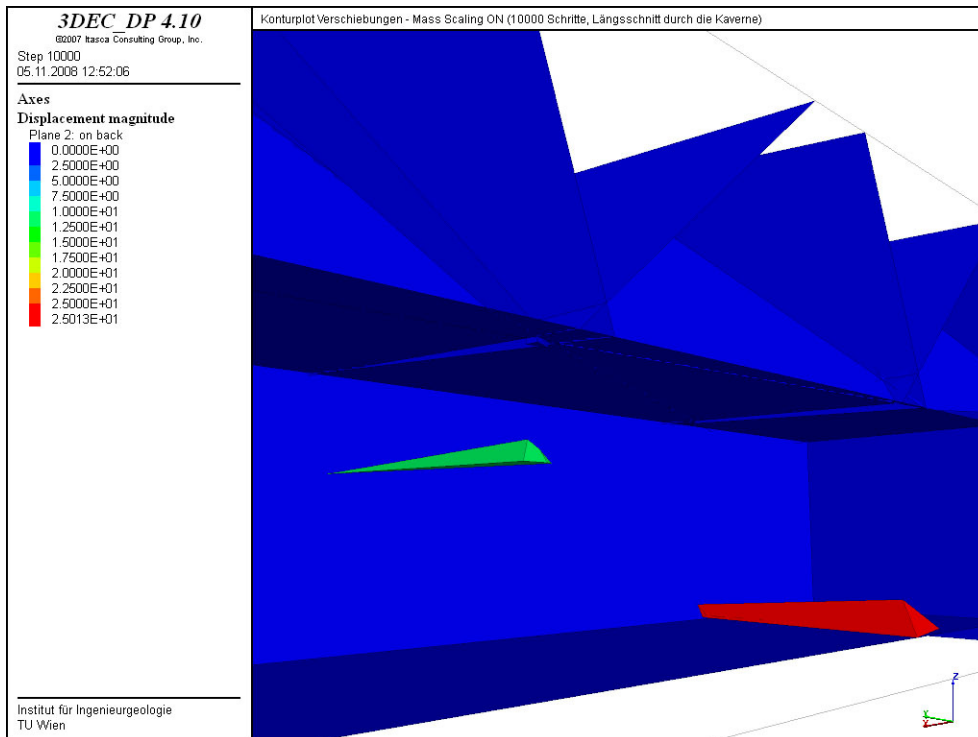
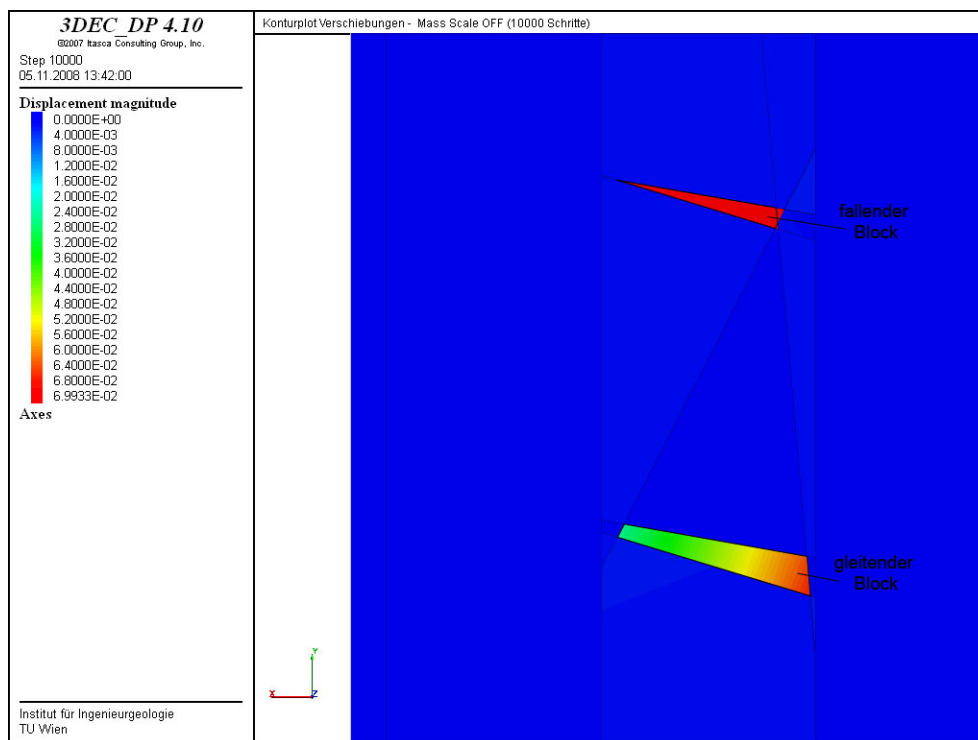


Abbildung 5.35: Lage der Blöcke nach 10000 Schritten bei Berücksichtigung des Mass Scaling

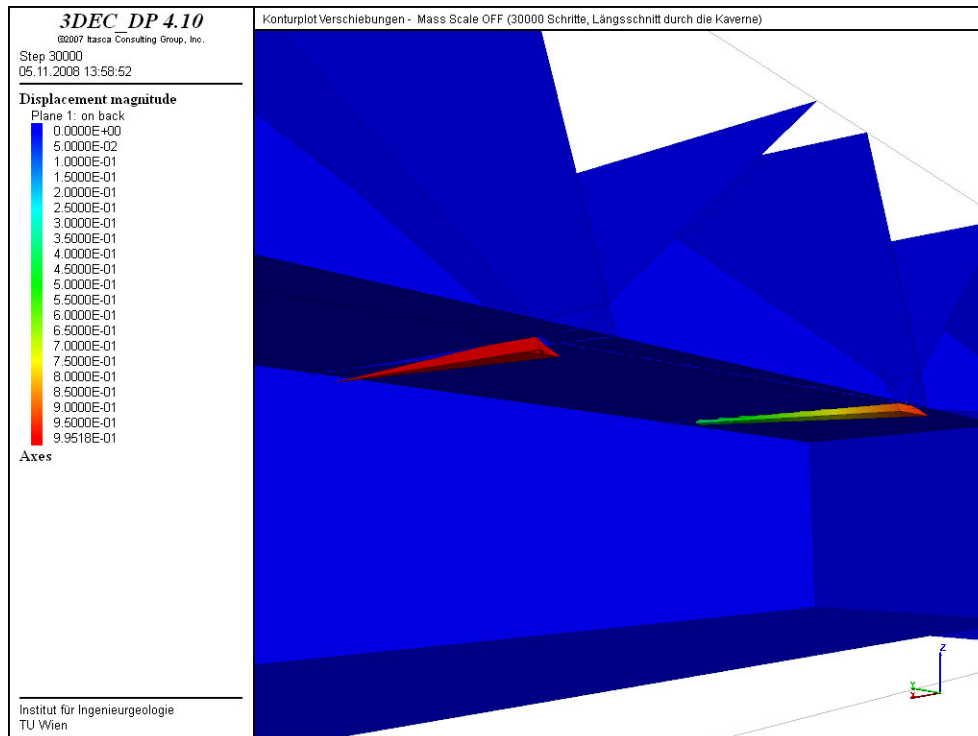
## 5.4.2 Versagensverhalten ohne Berücksichtigung des Mass Scaling

Wird in der Modellierung das Mass Scaling ausgeschaltet, werden bis zum Erreichen aussagekräftiger Ergebnisse mehr Rechenschritte benötigt.

Bereits zu Beginn der Berechnungen weist der fallende Block die größten Verschiebungen auf, gemäß den physikalischen Grundsätzen. Wie in Abbildung 5.36 ersichtlich ist, führt der gleitende Block auch eine Bewegung in Richtung negativer x- Achse durch. Er gleitet also an der Trennfläche K2 aus dem Verband. Dies entspricht genau dem Verhalten der Blocktheorie- Untersuchung. Auch zu einem späteren Simulationszeitpunkt besitzt der fallende Block die größten Verschiebungen, wie in Abbildung 5.37 zu erkennen ist. Somit stellt der fallende Block den Block mit der geringsten Sicherheit dar.



**Abbildung 5.36:** resultierende Verschiebung der Blöcke nach 10000 Schritten (ohne Mass Scaling)



**Abbildung 5.37:** Lage der Blöcke nach 30000 Schritten ohne Berücksichtigung des Mass Scaling

### 5.4.3 Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen mit geringen Kluffestigkeiten und ohne Berücksichtigung des Mass Scaling

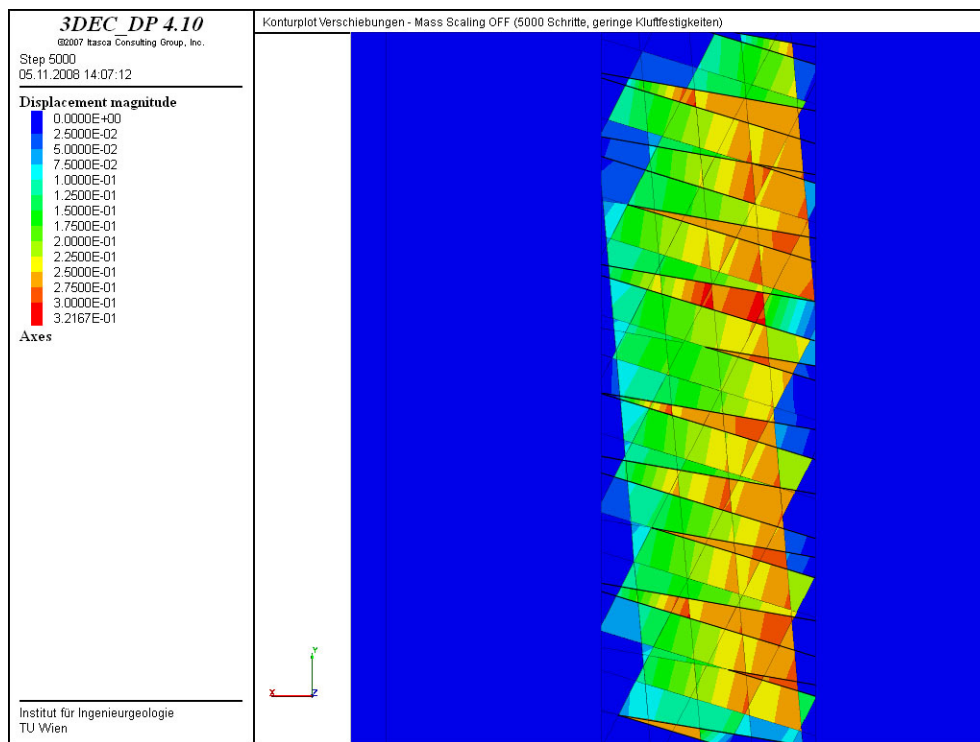
Die in den Kapiteln 5.4.1 und 5.4.2 beschriebenen Untersuchungsergebnisse wurden bei der Kaverne mit horizontaler Firste angewandt. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Mal eine Stabilitätsuntersuchung mit geringen Kluffestigkeiten durchgeführt, jedoch mit ausgeschalteter Massen- Skalierung. Dies führte dazu, dass nun die maßgebenden Blöcke Teil der in Abbildung 5.11 gekennzeichneten Zonen sind, jenen Bereichen also, die herausfallen müssten. Wie in Abbildung 5.38 zu erkennen ist, bilden sich diese Bereiche bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt aus (5000 Schritte). Jene Blöcke, die auf Grund ihrer Geometrie herausfallen müssen, weisen die größten Verschiebungen auf. Somit liegt ein übereinstimmendes Ergebnis mit der Blocktheorie vor.

Auch nach 20000 Rechenschritten besitzen dieselben Blöcke die größten Verschiebungen (siehe Abbildung 5.39). Die Blöcke mit den größten Verschiebungen weisen dieselbe geometrische Form wie die Blöcke 1011, 1101 und 1111 aus der Blocktheorie auf. Wie in der Abbildung 5.39 ersichtlich ist, kann sich ein Block der Form 1111 auch aus mehreren Blöcken der Gestalt 1011 und 1101 zusammensetzen.

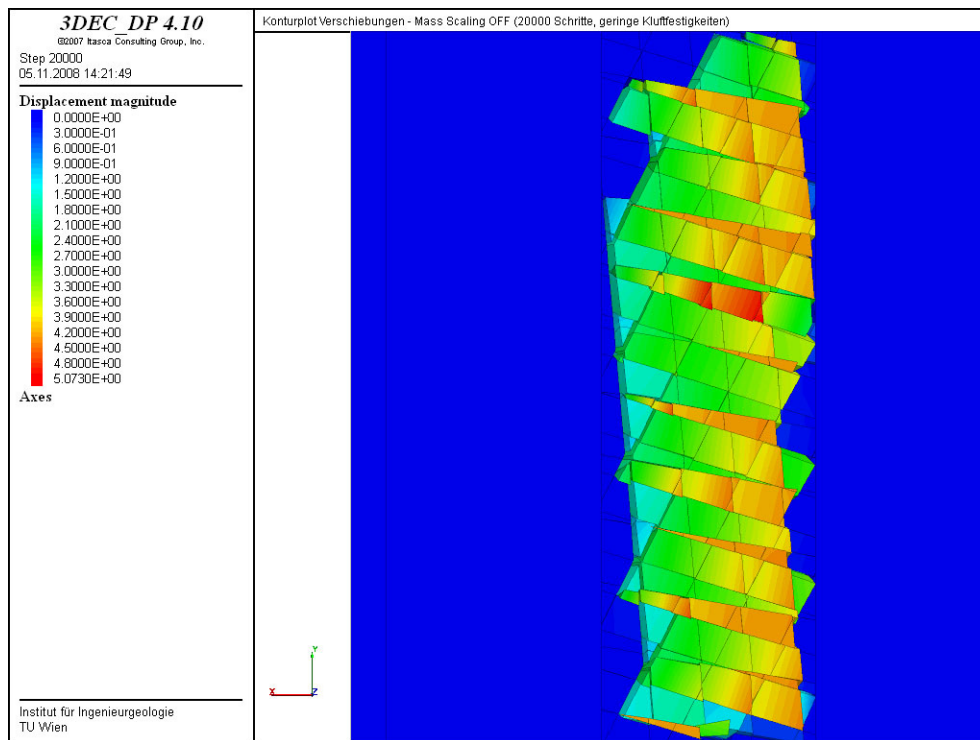
Des Weiteren ist zu erkennen, dass der gesamte Firstbereich Verformungen aufweist. Nachdem sich nach 20000 Schritten noch kein stabiler Zustand eingestellt hat, ist mit dem



Versagen der gesamten Firste zu rechnen. Aus Zeitgründen wurde die Berechnung nach 20000 Schritten abgebrochen.



**Abbildung 5.38:** resultierende Firstverschiebung nach 5000 Rechenschritten (Untersicht, geringe Kluffestigkeiten, ohne Mass Scaling)



**Abbildung 5.39:** resultierende Firstverschiebung nach 20000 Rechenschritten (Untersicht, geringe Kluffestigkeiten, ohne Mass Scaling)

## 5.5 Vergleich Blocktheorie - 3DEC

Die in Kapitel 5.1 angeführten vier Trennflächensystemen führen bei einer Untersuchung mittels Blocktheorie zu drei entfernbaren Blöcken. Alleine durch die vorliegenden Raumstellungen der Klüfte werden diese Blöcke geformt. Der Versagensmechanismus entsteht durch die Anordnung der Trennflächen untereinander. Es wurde jeder "Key- Block" separat und nicht in einem Verband mehrerer mitwirkender Blöcke untersucht.

In der 3DEC Untersuchung wurde neben der Raumstellung der Trennflächensysteme auch ein Kluftabstand berücksichtigt, der in den vorliegenden Untersuchungen mit 5 bzw. 6 Meter gewählt wurde. Dieser Kluftabstand führt dazu, dass der zu untersuchende Firstbereich aus einem Blockverband besteht, der viele Blöcke unterschiedlichster Form hervorbringt.

Zur Ermittlung der vorliegenden Versagensmechanismen wurden die Berechnungsergebnisse nach 500 Schritten herangezogen. Für die Vergleichbarkeit mit der Blocktheorie war das Anfangsverhalten der Blöcke erforderlich. Die Analysen erfolgten an den fünf Blöcken mit den größten Verschiebungen zu diesem Zeitpunkt.

In den ersten drei Modellierungsfällen (Kapitel 5.3.3 bis 5.3.5) wurde das Mass Scaling berücksichtigt. Die in diesen Untersuchungsfällen ermittelten maßgeblichen Blöcke sind in der Tabelle 5.15 gegenübergestellt, beginnend mit den Blöcken mit der größten Verschiebung.

Geringe Kluftfestigkeit		Hohe Kluftfestigkeit
mit Rotation	Ohne Rotation	mit Rotation
4495	1902	1902
1776	1776	1772
1901	1900	1900
1902	3455	3850
3329	3559	3329

**Tabelle 5.15:** Maßgebende fünf Blöcke der untersuchten drei Fälle

Diese Gegenüberstellung zeigt, dass einige Blöcke in zwei oder sogar in allen drei 3DEC Untersuchungsfällen als maßgebender Block ausgewiesen wurden. Der Block 1902 war in allen drei untersuchten Fällen unter jenen fünf Blöcken mit den größten Verschiebungen nach 500 Schritten. Die geometrische Form des Blockes weist Ähnlichkeiten mit Block 1011 der Blocktheorie auf. Er ist lediglich gedrungener Gestalt und wird von der Trennfläche K1 zweimal begrenzt.

In der Blocktheorie wurde für den Block 1011 als Versagensverhalten „Gleiten auf K2“ ermittelt. Der Verschiebungsvektor des Blockes ist daher der Fallvektor von K2 und hat die Fallrichtung 243° und den Fallwinkel 50°.

In Tabelle 5.16 sind für den Block 1902 die ermittelten Maximalverschiebungen nach 500 Schritten in den unterschiedlichen Modellierungsfällen gegenübergestellt.

<b>Geringe Kluffestigkeit</b>		<b>Hohe Kluffestigkeit</b>
<b>mit Rotation</b>	<b>Ohne Rotation</b>	<b>mit Rotation</b>
7.42	5.09	6.61

**Tabelle 5.16:** Gegenüberstellung der Maximalverschiebung Block 1902

Neben den differierenden Maximalverschiebungen weisen die drei Untersuchungsfälle auch unterschiedliche Verschiebungsvektoren für den Block 1902 aus, wie Tabelle 5.17 zeigt.

<b>Untersuchungsfall</b>	<b>Verschiebungsvektor</b>	
	<b>Fallrichtung [ ° ]</b>	<b>Fallwinkel [ ° ]</b>
geringe Kluffestigkeit, mit Rotation	288.0	75.9
geringe Kluffestigkeit, ohne Rotation	252.8	54.5
hohe Kluffestigkeit, mit Rotation	247.2	83.8

**Tabelle 5.17:** Gegenüberstellung der Verschiebungsvektoren Block 1902

Von den drei untersuchten Fällen weist lediglich der Verschiebungsvektor für den Fall geringer Kluffestigkeiten und ohne Rotationseinfluss die vergleichbarsten Werte mit der Blocktheorie auf. In den beiden anderen Fällen weichen die Werte für den Verschiebungsvektor stark von dem des Blockes 1011 ab.

Bei den anderen im Detail untersuchten Blöcken kommt es zu keinen Übereinstimmungen zwischen 3DEC und Blocktheorie.

Wird hingegen in der 3DEC Modellierung das Mass Scaling ausgeschaltet, liegen übereinstimmende Ergebnisse mit der Blocktheorie vor. Jene Zonen, die auf Grund der Trennflächenanordnung herausfallen müssen, besitzen zu jedem Untersuchungszeitpunkt die größten Verschiebungen. Somit sind diese Blöcke auch jene mit der geringsten Standsicherheit. Diese entfernbareren Zonen setzen sich aus drei verschiedenen Blockformen zusammen, welche genau den entfernbareren Blöcken aus der Blocktheorie entsprechen.

Die in den ersten drei 3DEC Untersuchungen (siehe Kapitel 5.3.3 bis 5.3.5) ermittelten maßgeblichen Blöcken wurden nicht mehr als kritisch ausgewiesen. Diese Blöcke bewegen sich erst, wenn sich die entfernbareren Zonen aus dem Verband gelöst haben.

## 5.6 Schlussfolgerungen

Die 3DEC Untersuchungen haben zur Blocktheorie differierende Ergebnisse geliefert, wenn bei der Berechnung ein Mass Scaling berücksichtigt wurde. Lediglich bei ausgeschalteten Mass Scaling werden idente Ergebnisse ausgewiesen.

Wird in der Modellierung eine "Massen Skalierung" berücksichtigt, werden Blöcke als maßgebend ausgewiesen, die von zwei Trennflächen mit derselben Orientierung begrenzt werden. Hingegen weist die Blocktheorie nur Blöcke aus, die von jedem Trennflächensystem nur einmal begrenzt werden. Da in den Berechnungen keine Dilatanz berücksichtigt wurde, konnten diese Blöcke leicht aus dem Verband gleiten. Eine Berücksichtigung der Dilatanz würde dazu führen, dass Körper mit parallelen Begrenzungsflächen einen sehr großen Scherwiderstand überwinden müssten und damit nicht mehr als maßgebende Blöcke ausgewiesen würden.

Eine Unterdrückung der Rotation hat nicht dazu geführt, dass andere maßgebende Blöcke ausgewiesen wurden. Die kritischen Blöcke verfügen weiterhin über parallele Begrenzungsflächen. Bei den Verschiebungsvektoren wurden Werte ermittelt, deren Fallwinkel zwischen  $2^\circ$  und  $6^\circ$  von Block 1011 abweicht, jedoch sind einige Blöcke von der Form her eher dem Block 1101 zuzuordnen.

Werden in 3DEC hohe Kluffestigkeiten benutzt, fallen Blockgruppen aus dem Verband, die die Form des entfernbaren Blockes 1111 aus der Blocktheorie aufweisen (siehe Abbildung 5.32). Die hoch angesetzten Kluffestigkeiten sind dafür verantwortlich, dass sich diese fallenden Blöcke ausbilden können. Diese herausfallenden Blockgruppen setzen sich aus Blöcken zusammen, deren geometrische Formen jenen der Blöcke 1011 und 1101 sehr ähnlich sind. Die Blöcke 1011 und 1101 sind somit Bestandteile des fallenden Blockes 1111.

In allen drei Modellierungsvarianten mit Mass Scaling werden nach 500 Schritten nicht fallende Blöcke als maßgeblich ausgewiesen.

Erst bei unterdrückter "Massen Skalierung" werden von 3DEC dieselben Blöcke als kritisch ausgewiesen wie von der Blocktheorie. Ein Mass Scaling ist nur solange zulässig, solange es sich um ein mehr oder weniger statisches System handelt. Wechselt jedoch das System von einem quasistatischen Zustand in einen dynamischen, dann ist es erforderlich, das Mass Scaling auszuschalten. Dies hat vor allem zu erfolgen, wenn große Verschiebungen auftreten.

Auf Grund der Tatsache, dass in den 3DEC Berechnungen auch bei ausgeschaltetem Mass Scaling Blöcke mit parallelen Begrenzungsflächen große Verschiebungen aufweisen, wäre es sinnvoll, weitere Untersuchungen mit der Berücksichtigung der Dilatanz durchzuführen.

## 6 Anwendungsbeispiel: Untersuchung einer seichtliegenden, innerstädtische U- Bahnstation in geklüftetem Fels mittels 3DEC

### 6.1 Problemstellung

Zur Untersuchung kommt eine innerstädtische U-Bahnkaverne im geklüftetem Fels. Die Größe wurde anhand des erforderlichen Platzbedarfs der einzelnen Stationsbestandteile frei gewählt. Es wurde auch angenommen, dass die zulaufenden Streckentunnel übereinander zum liegen kommen. In den letzten Jahren wurden in vielen Städten auf der ganzen Welt eingleisige Streckentunnels mittels Tunnelbohrmaschine gebaut. Für die Abschätzung dieser Tunnels wurden folgende Vergleichswerte herangezogen:

Projekt	Durchmesser TBM [m]
Singapur – Circle Line <sup>a</sup>	6.60
Bangkok <sup>a</sup>	6.46
Rom – Linie B1 <sup>a</sup>	6.77
Singapur – Subway C <sup>a</sup>	6.55
Duisburg – U-Bahn <sup>a</sup>	6.52
Wien – Linie U1 (1. Ausbauphase) <sup>b</sup>	6.10
Wien – Linie U1 – Erweiterung Kagran <sup>b</sup>	6.81

**Tabelle 6.1:** Außendurchmesser eingleisiger TBM- U-Bahntunnel

Für die Streckentunnel wurde ein Außendurchmesser von 6.75 Meter angenommen. Die übereinander liegenden Streckentunnel machen Seitenbahnsteige in der Station erforderlich. Deren Breite sollte zwischen 3.5 und 4.5 Meter liegen (Knoflacher, 1992). Der Zugang zu den einzelnen Stationsebenen erfolgt mittels Aufzügen, Rolltreppen und Stiegen. Bei der Abschätzung der Kavernenbreite wurde für den Zugangsbereich 7 Meter berücksichtigt. Zusammen ergeben all diese erforderlichen Flächen eine Kavernenbreite von 19 Meter.

Bei der Ermittlung der Kavernenhöhe wurden die beiden Bahnsteigsebenen und ein Verteilergeschoss mit diversen Betriebsräumen berücksichtigt. Dies ergibt eine Höhe von 22 Meter.

Für die Abschätzung der Kavernenlänge wurden die durchschnittlichen Zugslängen von U-Bahngarnituren diverser Großstädte herangezogen (Hinkel, 2004).

<sup>a</sup> (Firma Herrenknecht, 2008)

<sup>b</sup> (Wiener Linien, 2006)

Stadt	Wagenanzahl	Bahnsteiglänge [m]
Wien	6	120
Lisabon	4 - 6	70 – 105
Athen (Erweiterung Linie 2)		110 – 140
Rom (Linie A)	6	120
Rom (Linie B)	8	150
Paris (Linie 14)	7	120
Moskau	8	155
New York		160 – 187
Washington, DC	8	183
Santiago de Chile	5 - 8	83 – 131
Singapur	6	138
Hongkong	8	181.5

**Tabelle 6.2:** Bahnsteiglängen weltweiter U-Bahnsysteme

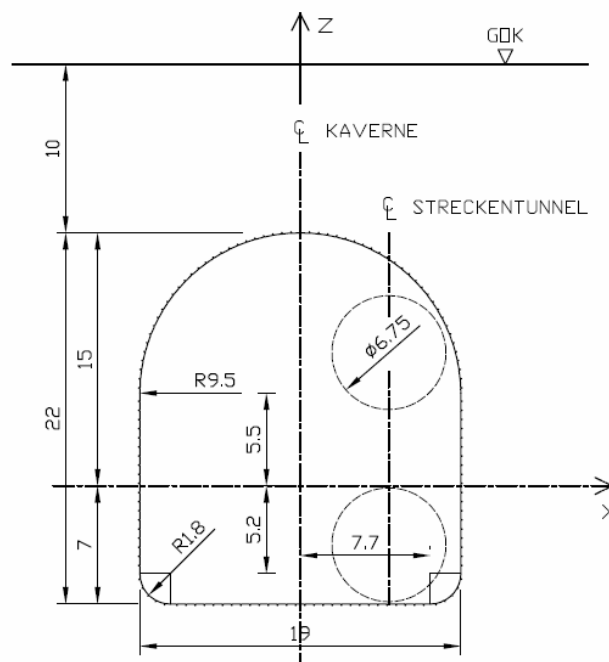
Ausgehend von den in Tabelle 6.2 angeführten Bahnsteiglängen ausgewählter U-Bahnsysteme wurde die Kavernenlänge mit 150 Meter festgelegt.

Somit ergibt sich für die Kaverne eine Abmessung von 19x150x22 Meter.

Da U-Bahnstation oft an neuralgischen Punkten situiert werden, kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass die Station unter bestehenden Gebäuden zum liegen kommt.

Es wurde die Annahme getroffen, dass die Kaverne 10 Meter Überdeckung besitzt und von einem 20-geschossigen Gebäude belastet wird.

Abbildung 6.1 zeigt einen Schnitt durch die Kaverne mit all ihren Abmessungen.



**Abbildung 6.1:** Querschnitt durch die Kaverne

Das Ziel der numerischen Untersuchungen ist es, den Versagensmechanismus (entfernbarer Klufkörper, Versagensablauf) der beschriebenen Kaverne mittels 3DEC zu ermitteln und die Ergebnisse mit jenen der Blocktheorie zu vergleichen. Im Zuge der 3DEC Berechnungen soll auch der Einfluss der Blockmodellierung analysiert werden. Zu diesem Zweck werden die Blöcke in einem Fall als starre Körper und in zwei Fällen als deformierbare Körper beschrieben. Zur Beschreibung der deformierbaren Blockeigenschaften kommen einmal ein linear elastisches und einmal das Mohr Coulombsche Materialmodell zum Einsatz. In einem ersten Schritt sollen die Ergebnisse der Starrkörperbewegung mit jener der Blocktheorie verglichen werden. Weiterführende wird auch ein Vergleich zwischen den drei Modellierungsfällen in 3DEC und der Blocktheorie angestellt.

## 6.2 Materialkennwerte

Die Kaverne liegt in geklüftetem Fels welcher von drei Trennflächensystemen durchtrennt wird. Die Orientierungen und die Trennflächenabstände sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. In allen 3DEC Abbildungen zeigt die positive y- Achse in Richtung Norden.

Kluft	Fallrichtung [ ° ]	Fallwinkel [ ° ]	Kluftabstand [m]
K1	235	45	2.8
K2	195	60	2.2
K3	80	45	1.8

**Tabelle 6.3:** Trennflächensysteme – Geometrische Kennwerte

Das gewählte Gestein ist Gneis. Die Materialkennwerte zur Beschreibung der Blöcke und der Klüfte sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

		Blöcke	Klüfte
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2700	-
E-Modul	[N/m <sup>2</sup> ]	2.0E+10	-
Querdehnzahl $\nu$	[ - ]	0.25	-
Kohäsion $c$	[N/m <sup>2</sup> ]	12.0E+6	3.0E+5
Reibungswinkel $\varphi$	[ ° ]	38	30
Zugspannung $\sigma_t$	[N/m <sup>2</sup> ]	8.0E+6	-

**Tabelle 6.4:** Materialeigenschaften für die Blöcke und Klüfte

3DEC verwendet zur Beschreibung der elastischen Materialkennwerte den Schubmodul  $G$  und den Kompressionsmodul  $K$ . Diese Parameter lassen sich über folgende Beziehungen aus den gegebenen Werten  $E$  und  $\nu$  ermittelt (Mang, Hofstetter, 2000):

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

In den 3DEC Untersuchungen wurde für die Beschreibung der Klufteigenschaften das "Coulomb-Slip Joint Model" verwendet. Dabei wird das elastische Verhalten der Trennflächen mit Hilfe von Kluffteifigkeiten beschrieben. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 6.5 angegeben.

Kluffteifigkeiten		
Normal zur Klufftebene $j_{kn}$	[N/m <sup>2</sup> ]	1.0E+9
Parallel zur Klufftebene $s_{kn}$	[N/m <sup>2</sup> ]	1.0E+9

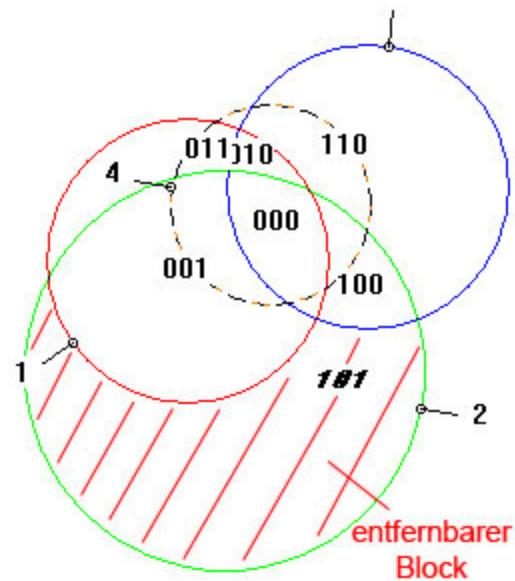
**Tabelle 6.5:** Kluffteifigkeiten

Die hier angegebene Materialkennwerte wurden sowohl für die Blocktheorie Untersuchung als auch für die 3DEC Modellierungen verwendet.

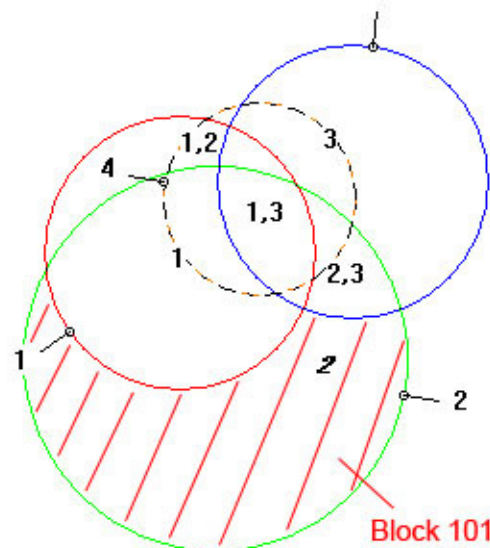
### 6.3 Untersuchung mittels Blocktheorie

Die Blocktheorie wurde herangezogen, um einen ersten Überblick zu bekommen, welche Blöcke sich bei den gegebenen Trennflächensystemen bilden können. Die Untersuchung erfolgte mit den in Tabelle 6.3 gegebenen Orientierungen der Trennflächen und als vierte Ebene die freie Oberfläche, die Firste. Da es sich bei dem untersuchten Beispiel um eine gerundete Firstfläche handelt, wurde die Raumstellung der freien Oberfläche variiert. In der ersten Blocktheorie Berechnung wurde eine horizontale Firstfläche angenommen. Die bei dieser Anordnung ermittelten Kluffpyramiden sind in Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 in einer Grundrissprojektion dargestellt. Eine horizontale freie Oberfläche soll den Bereich in der Firstmitte widerspiegeln. Um auch den restlichen Firstbereich mittels der Blocktheorie analysieren zu können wurde in zwei weiteren Untersuchungen die freie Oberfläche mit einem Fallwinkel von 45° angenommen. Die Raumstellung wurde parallel der Kavernenlängsachse mit 90° und 270° gewählt.





**Abbildung 6.2:** Kluftpyramiden in einer Grundrissprojektion (horizontale Firstfläche)



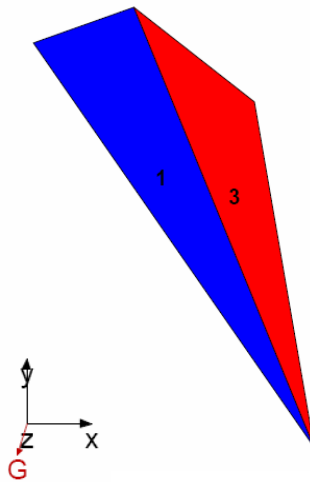
**Abbildung 6.3:** Bewegungsrichtung der Kluftpyramiden (horizontale Firstfläche)

Für die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der 3DEC Untersuchungen waren nur die geometrischen Formen der entfernbaren Blöcke von Interesse. Aus diesem Grund wurden auch keine Sicherheiten und damit einhergehend erforderliche Ausbauwiderstände ermittelt.

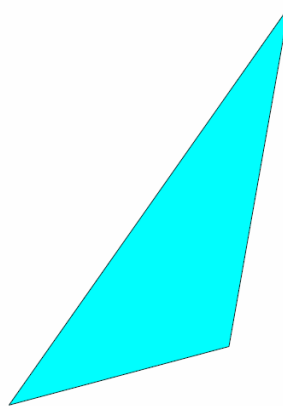
### 6.3.1 Ergebnisse der Blocktheorieuntersuchungen

Beim Vorliegen einer horizontalen Firstfläche weist die Untersuchung mittels der Blocktheorie lediglich den Block 101 als entfernbar aus. Dieser Block gleitet auf der Trennfläche K2 heraus (siehe Abbildung 6.3). Die vorliegenden Trennflächensysteme lieferten keine weiteren entfernbaren Blöcke. Da die freie Oberfläche nur in der Firstmitte

horizontal ist, ist die ermittelte Blockform nur für diesen Bereich gültig. Abbildung 6.4 zeigt den Block 101 in einer Draufsicht und in Abbildung 6.5 ist die in Firstfläche des Blockes dargestellt.



**Abbildung 6.4:** Block 101 nach Blocktheorie (Draufsicht)



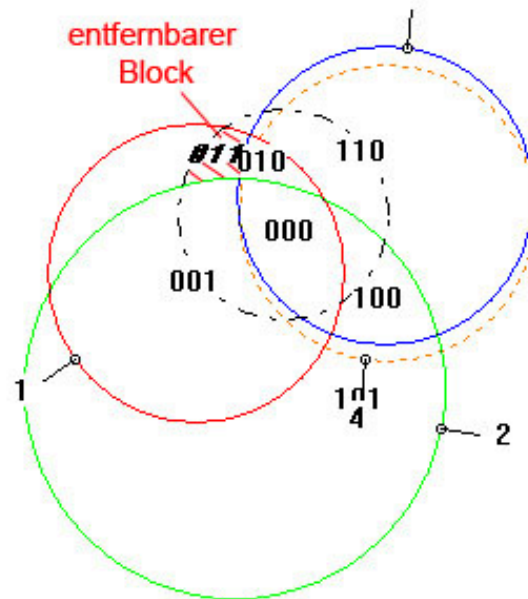
**Abbildung 6.5:** Ansicht Firstfläche Block 101

Der Verschiebungsvektor des Blockes 101 setzt sich folgendermaßen zusammen:

Fallrichtung:  $195^\circ$

Fallwinkel:  $60^\circ$

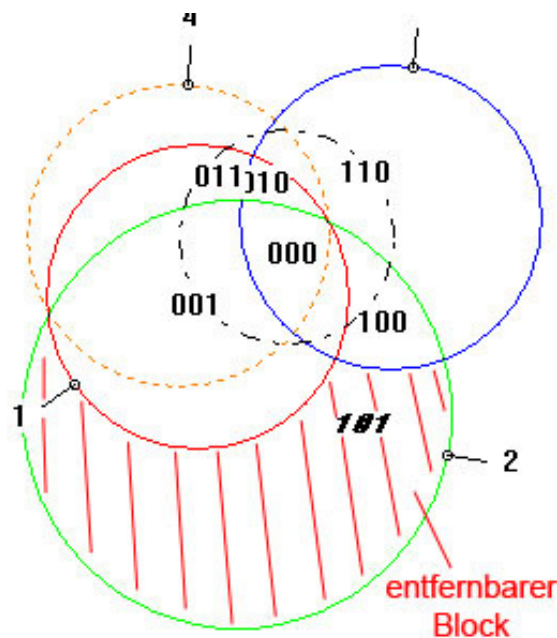
In einer weiteren Untersuchung wurde die freie Oberfläche mit einer Fallrichtung von  $90^\circ$  und einem Fallwinkel von  $45^\circ$  festgelegt. Mit dieser Anordnung sollte der ausgerundete Bereich der Firste analysiert werden. Wie an Hand der Klufftpyramiden in Abbildung 6.6 zu erkennen ist, wurde der Block 011 als entfernenbar ausgewiesen. Dieser Block könnte auf den Trennflächen K1 und K2 aus dem Verband gleiten, was aber auf Grund einer ermittelten Sicherheit von über 10 unwahrscheinlich ist. Daher wurde dieser Block nicht näher analysiert.



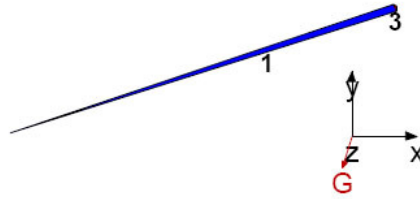
**Abbildung 6.6:** Klüftpyramiden in einer Grundrissprojektion (freie Oberfläche: Fallrichtung  $90^\circ$ , Fallwinkel  $45^\circ$ )

Für die Modellierung der gegenüberliegenden Firstseite wurde die freie Oberfläche mit einer Fallrichtung von  $270^\circ$  und der Fallwinkel mit  $45^\circ$  gewählt. Diese Anordnung weist ebenfalls einen Block mit dem Blockcode 101 als entfernbar aus. Als Versagensmodus liegt Gleiten auf der Trennfläche K2 vor.

Abbildung 6.7 zeigt die ermittelten Klüftpyramiden in einer Grundrissprojektion.



**Abbildung 6.7:** Klüftpyramiden in einer Grundrissprojektion (freie Oberfläche: Fallrichtung  $270^\circ$ , Fallwinkel  $45^\circ$ )



**Abbildung 6.8:** entfernbare Block 101 bei einer freien Oberfläche mit Fallrichtung  $270^\circ$  und Fallwinkel  $45^\circ$  (Draufsicht)

In Abbildung 6.8 ist der entfernbare Block 101 für den Fall, dass die freie Oberfläche eine Fallrichtung von  $270^\circ$  und einen Fallwinkel von  $45^\circ$  besitzt, in einer Draufsicht dargestellt. Wie zu erkennen ist, weist der Block eine sehr schlanke, lang gestreckte Form auf. Auf Grund der Tatsache, dass die Gleitfläche K2 bei dieser Blockform sehr groß ist und dadurch große Reibungswiderstände aufweist, liegt die Sicherheit gegen Herausgleiten über 10. In den Vergleichen mit 3DEC wurde in weiterer Folge nur der Block 101 (horizontale Firstfläche) herangezogen.

## 6.4 Untersuchung mittels 3DEC

### 6.4.1 Starrkörperbewegung

In diesem Modell wurden nur starre Blöcke modelliert, die durch die in Tabelle 6.3 gegebenen Trennflächensysteme begrenzt sind. Zur Beschreibung der Blockeigenschaften wurde die Dichte  $\rho$  aus Tabelle 6.4 herangezogen. Das Trennflächenverhalten wurde über den Reibungswinkel  $\varphi$ , die Kohäsion  $c$  und die Kluffsteifigkeiten  $j_{kn}$  und  $s_{kn}$  ausgedrückt (vgl. Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5). Bei einer Berechnung mit starren Körpern können die Blöcke nur Translations- und Rotationsbewegungen durchführen.

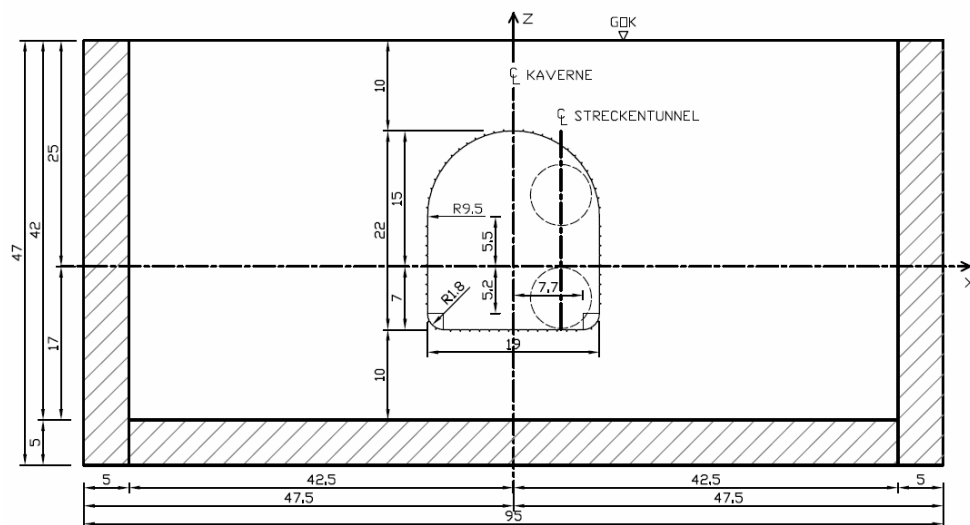
#### 6.4.1.1 Modellaufbau

Für die numerische Untersuchung mittels 3DEC wurde ein  $85 \times 100 \times 42$  m großes Modell gewählt. Das Modell bildet nicht die vollständige Kavernenlänge von 150 Meter ab. Der geringe Trennflächenabstand und die damit einhergehende hohe Blockanzahl haben es erforderlich gemacht, die modellierte Kavernenlänge auf 70 m zu reduzieren, um die Rechenzeit gering zu halten. Eine nicht vollständige Abbildung der Kaverne war möglich, da sich die entstehenden Blockformen wiederholen. In der Modellierung wurden beide Kavernenstirnflächen berücksichtigt.

Die Randbedingungen wurden mit Hilfe von 5 m dicken, scheibenförmigen, unverschieblichen Kluffkörpern modelliert, welche das Modell seitlich und am Boden begrenzen.

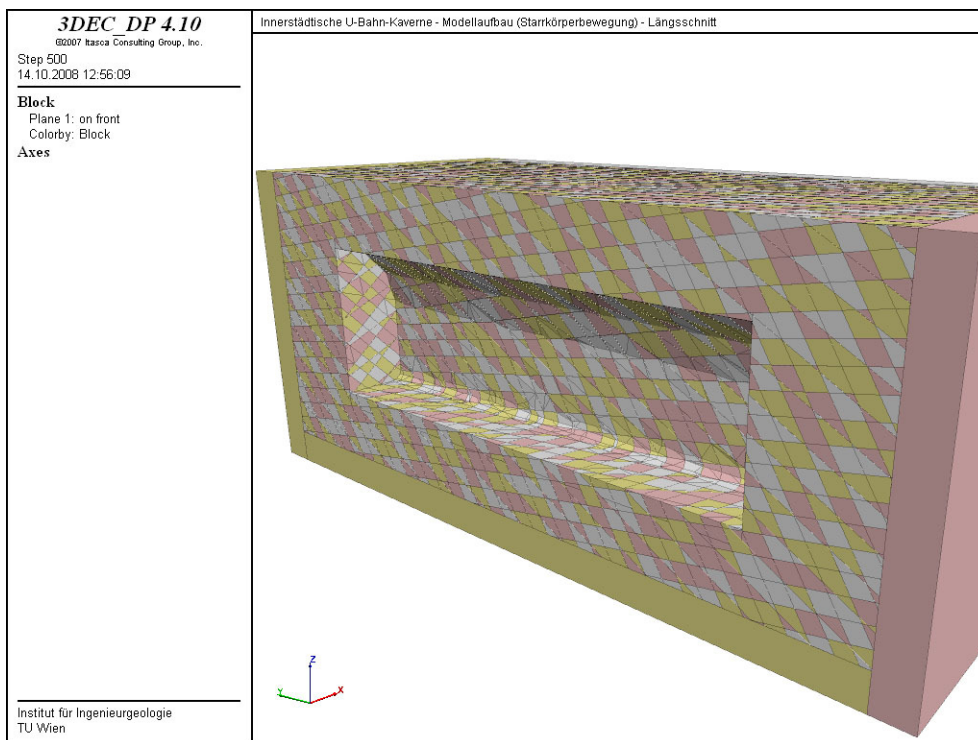
Die durch die Überbauung hervorgerufenen Lasten wurden mit Hilfe einer Auflast von 250 kN/m<sup>2</sup> berücksichtigt. Diese wurde über das gesamte Modell gleichmäßig aufgebracht.

Die Lage der Kaverne im Modell zeigt Abbildung 6.9 in einem Querschnitt. Lagemäßig ist die Kaverne mittig im Modell situiert. Die Überlagerung von 10 Meter ist in ihrer tatsächlichen Mächtigkeit modelliert. Da von der Kavernensole keine großen Einflüsse erwartet wurden, wurde dieser Bereich mit einer Stärke von 10 Meter berücksichtigt.

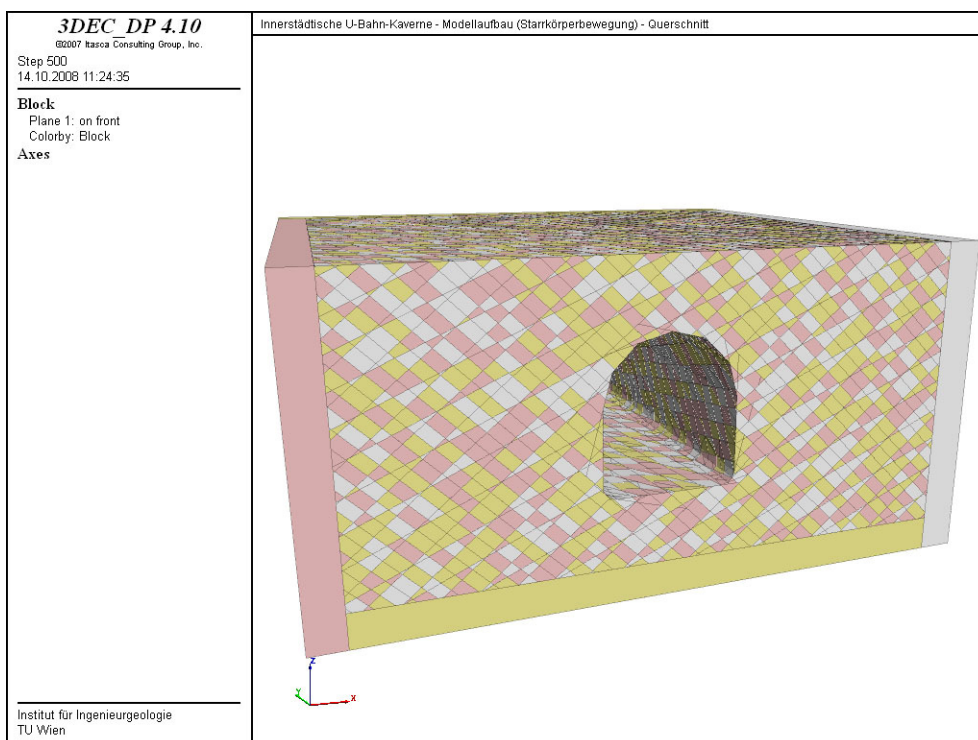


**Abbildung 6.9:** Querschnitt durch den Modellkörper für die Untersuchung mittels starrer Körper

Die Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 zeigen das 3DEC Modell in einem Längs- und Querschnitt. Sowohl seitlicher der Kaverne als auch an den Stirnseiten wurde ein ausreichender Abstand zum Modellrand eingehalten. Die Scheiben an den Seiten und am Boden bilden die Randbedingungen ab.



**Abbildung 6.10:** Längsschnitt durch die Kaverne



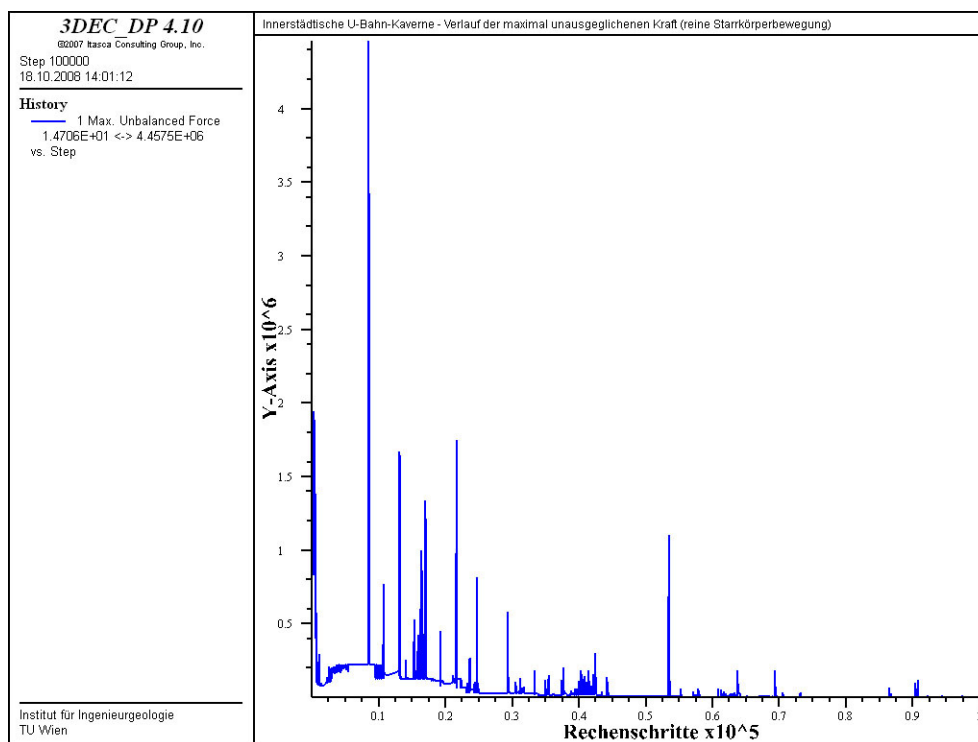
**Abbildung 6.11:** Querschnitt durch die Kaverne

### 6.4.1.2 Ergebnisse der Starrkörperberechnung

Um eine Aussage über das Gesamtverhalten der Kaverne treffen zu können, wurde die Berechnung so lange durchgeführt, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Aus diesem Grund wurde während der Berechnung der Verlauf der unausgeglichene Kraft aufgezeichnet (vgl. Abbildung 6.12). Die hohen Ausschläge im Verlauf zeigen besondere Ereignisse an, wie zum Beispiel das Herauslösen aus dem Verband oder das Auftreffen von Blöcken auf der Kavernensohle.

Bei einer detaillierten Durchsicht der Simulationsergebnisse war festzustellen, dass die ersten Blöcke erst nach 10000 bis 15000 Rechenschritten auf der Sohle auftreffen. So gesehen stellt der größte Ausschlag nach rund 8000 Schritten kein Auftreffen eines Blockes auf der Sohle dar.

Der verhältnismäßig ruhige Verlauf lässt sich damit erklären, dass das System relativ stabil ist. Bei der vorliegenden Modellgeometrie fallen rund 20 Blöcke aus der Firste, welche im weiteren näher untersucht wurden.



**Abbildung 6.12:** Verlauf der maximalen unausgeglichene Kraft (reine Starrkörperbewegung)

In Abbildung 6.13 sind jene Blöcke markiert, die sich während des Untersuchungszeitraumes aus dem Verband lösen. Die weiterführenden Analysen haben ergeben, dass es bei vier zusammenhängenden Bereichen zum Herausgleiten von Blöcken kommt. Diese Bereiche sind mit Blockgruppe 1 bis 4 gekennzeichnet. Des Weiteren wurden jene fünf Einzelblöcke

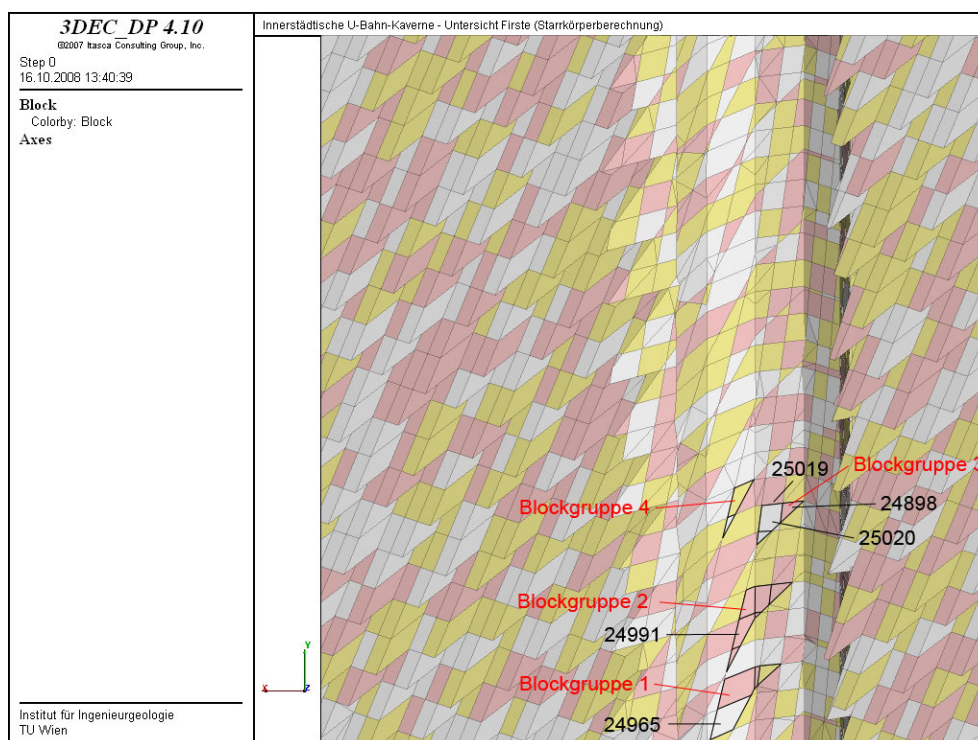


hervorgehoben, die zum untersuchten Zeitpunkt (1000 Rechenschritte) die größte Verschiebung aufweisen.

Für diese fünf maßgebenden Blöcke sind die maximalen Blockverschiebungen (nach 1000 Rechenschritten) in Tabelle 6.6 angegeben. Diese Werte sind exemplarisch für alle herausgleitenden Blöcke, denn die übrigen besitzen Verschiebungen in der Größenordnung von 4.30 bis 5.20 cm.

Block ID	Maximale Blockverschiebung [cm]
24965	5.96
25020	5.61
25019	5.57
24898	5.29
24991	5.24

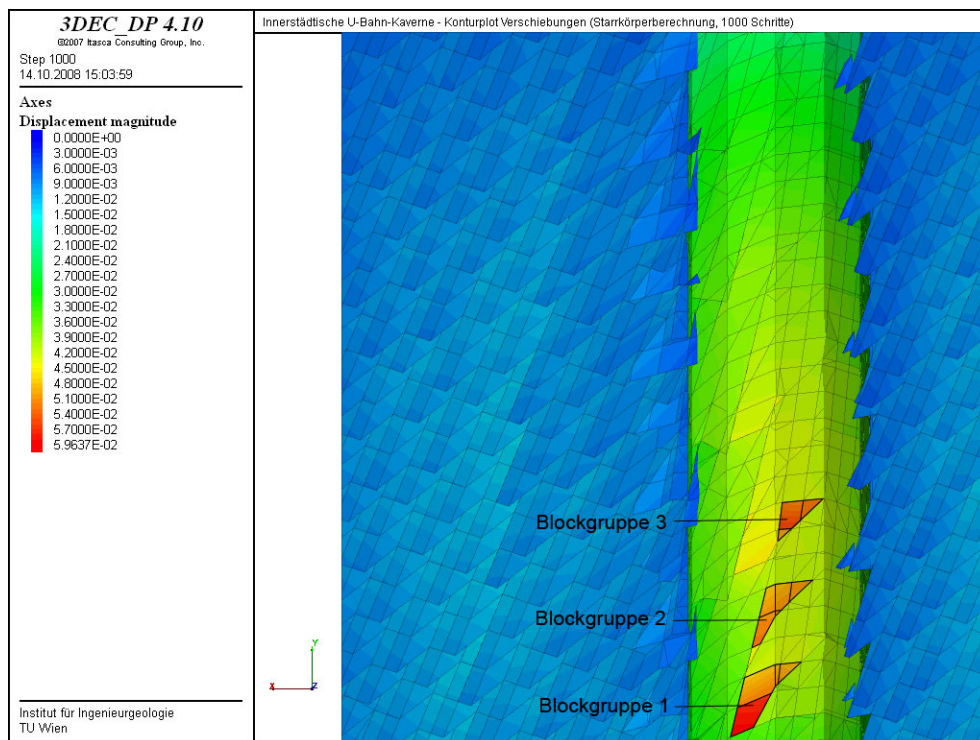
**Tabelle 6.6:** Maximale Blockverschiebung nach 1000 Rechenschritten



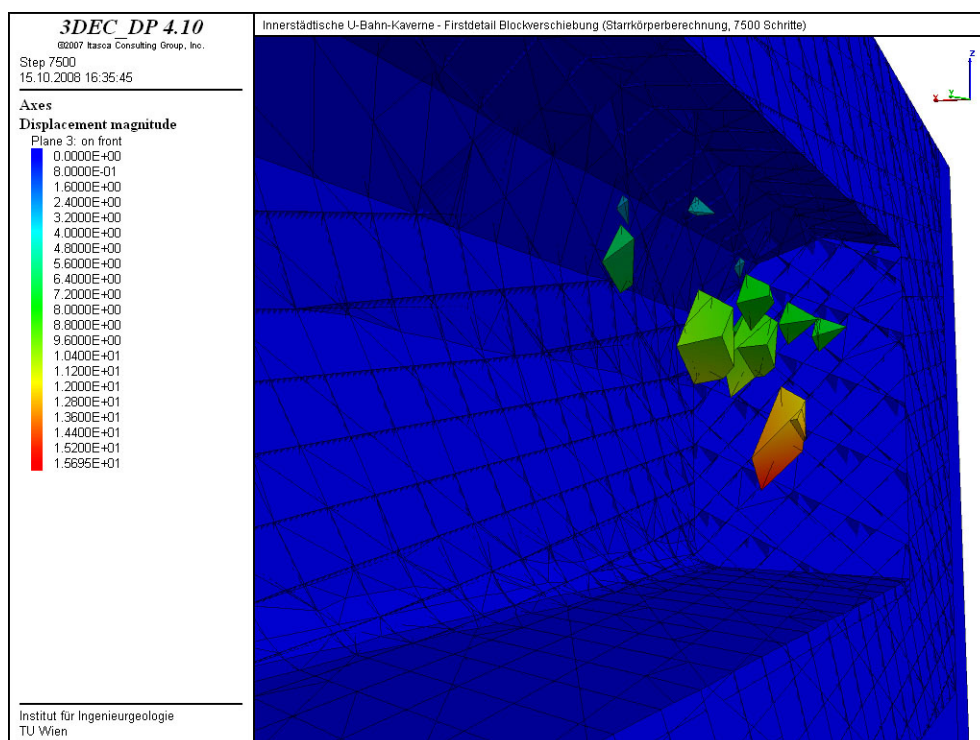
**Abbildung 6.13:** Untersicht Firste mit Kennzeichnung der herausgleitenden Blöcke (reine Starrkörperbewegung)

Abbildung 6.14 zeigt das Verschiebungsbild zum untersuchten Zeitpunkt. Dabei handelt es sich um einen horizontalen Schnitt durch das Modell mit Blick in positiver z- Richtung. Wie anhand der farblichen Schattierungen zu erkennen ist, treten Verschiebungen vor allem im Firstbereich auf. Die mit Blockgruppe 1 bis 3 gekennzeichneten Bereiche besitzen von Beginn an die größten Verschiebungen.





**Abbildung 6.14:** Resultierende Blockverschiebung nach 1000 Rechenschritte (Untersicht, reine Starrkörperbewegung)



**Abbildung 6.15:** Schnitt durch Kaverne mit fallenden Blöcken (7500 Schritte, reine Starrkörperbewegung)

Dass es sich bei den in Abbildung 6.14 gekennzeichneten Bereichen um wesentliche Versagenszonen handelt, zeigt auch Abbildung 6.15. Dieser Schnitt durch die Kaverne zeigt bereits fallende Blöcke (nach 7500 Rechenschritten), alle aus den vier gekennzeichneten Blockgruppen. Anhand der farblichen Abstufung ist zu sehen, dass manche Blöcke sich schneller aus dem Verband gelöst haben und daher vor den anderen auf der Sohle auftreffen. Nachdem sich die Blöcke aus den Blockgruppen 1 bis 4 herausgelöst haben, stellt sich ein stabiler Zustand ein. Es treten keinen weiteren Verschiebungen auf, weder in der Firste noch in den Ulmen.

Bei der Einzelblockanalyse wurden jene herausgleitenden Blöcke, die nebeneinander liegen, zu Blockgruppen zusammengefasst. Im Folgenden wurden jene drei Blockgruppen (1 bis 3) näher betrachtet, die schon nach 1000 Rechenschritten erkennbar waren. Bei fortgeschrittener Rechenzeit bildet sich eine vierte Gruppe aus, auf welche nicht näher eingegangen wird, da sie vom Ausmaß her geringer ist, als die hier vorgestellten.

Wie anhand der resultierenden Blockverschiebungen zu erkennen ist, bleiben die Blöcke während des Herausgleitens eigenständig. Zum untersuchten Zeitpunkt besitzt jeder Block einer Gruppe eine unterschiedlich große Verschiebung.

Um eine Aussage über den Versagenszustand treffen zu können, wurden für die fünf Einzelblöcke mit den größten Verschiebungen die Rotations- und Translationsgeschwindigkeiten ermittelt (Tabelle 6.7).

Block ID	Rotationsgeschwindigkeit [%/s]			Translationsgeschwindigkeit [m/s]		
	x	y	z	x	y	z
24965	0,00820	-0,00097	0,00346	-0,0134	-0,0400	-0,1067
25020	0	0	0	0	0	0
25019	-0,00755	-0,03547	-0,06209	0,0107	0,0012	0,0024
24898	0,01401	0,00891	-0,00455	-0,0067	-0,0237	-0,0410
24991	0,00734	-0,00272	0,00403	0,0001	-0,0256	-0,0758

**Tabelle 6.7:** Rotationsbewegung und Geschwindigkeitsverteilung der fünf maßgebenden Blöcke

Wie anhand Tabelle 6.7 ersichtlich ist, besitzen die ausgewerteten Blöcke nur eine sehr geringe Rotationsgeschwindigkeit. Es kristallisiert sich auch keine Hauptrotationsachse heraus, jeder Block besitzt für sich eine, wenn auch schwach ausgeprägte, Hauptrotationsrichtung. Im Gegensatz dazu weisen die Translationsgeschwindigkeiten die z-Richtung als maßgebend aus, gefolgt von der y- Richtung.

Eine Bewegung in Richtung negativer y- und z- Achse würde bedeuten, dass ein Gleiten auf der Trennfläche K2 (195/60) vorliegt.

Um eine genauere Aussage über die Bewegungsrichtung der Einzelblöcke treffen zu können, wurden mit Hilfe der ausgelesenen Translationsgeschwindigkeiten die Verschiebungsvektoren der einzelnen Blöcke ermittelt. Diese Vektoren werden durch Fallrichtung und Fallwinkel angegeben (Tabelle 6.8).

Block ID	Verschiebungsvektor	
	Fallrichtung [ ° ]	Fallwinkel [ ° ]
24965	198.5	68.4
25020	-	-
25019	83.6	-12.6 <sup>a</sup>
24898	195.8	59.0
24991	179.8	71.3

**Tabelle 6.8:** Verschiebungsvektoren der fünf maßgebenden Blöcke (Starrkörperbewegung)

Fallrichtung und Fallwinkel des Verschiebungsvektors von Block 24898 sind ident mit jenen der Trennfläche K2. Bei den Blöcken 24965 und 24991 weichen die Werte der Verschiebungsvektoren um etwa 10 bis 15 Prozent ab, dennoch kann gesagt werden, dass auch diese Blöcke auf K2 gleiten.

3DEC gab beim Auslesen der Rotations- und Translationsgeschwindigkeit der Blöcke nicht für jeden Einzelblock Werte an. Dies liegt daran, dass manche Blöcke während des Herausgleitens miteinander verbunden bleiben. Bei diesen zusammenhängenden Blöcken wurden nur für einen Block Werte angegeben.

Die Blöcke 25019 und 25020 sind solche Blöcke, die während des Fallens verbunden bleiben. In den drei Blockgruppen gibt es noch weitere zusammenhängende Blöcke, wie die Aufstellung in Tabelle 6.9 zeigt.

Blockgruppe	Zusammenhängende Blöcke
1	24933 + 24934
	24973 + 24974
2	24991 + 24992
	25000 + 25001
3	25019 + 25020

**Tabelle 6.9:** zusammenhängende Blöcke

Abbildung 6.16 bis Abbildung 6.18 zeigen die Verschiebungsbilder der Blockgruppen 1 bis 3 in einer Draufsicht. Jede dieser Gruppen setzt sich aus mehreren Einzelblöcken zusammen.

<sup>a</sup> Der Block 25019 bewegt sich nach oben

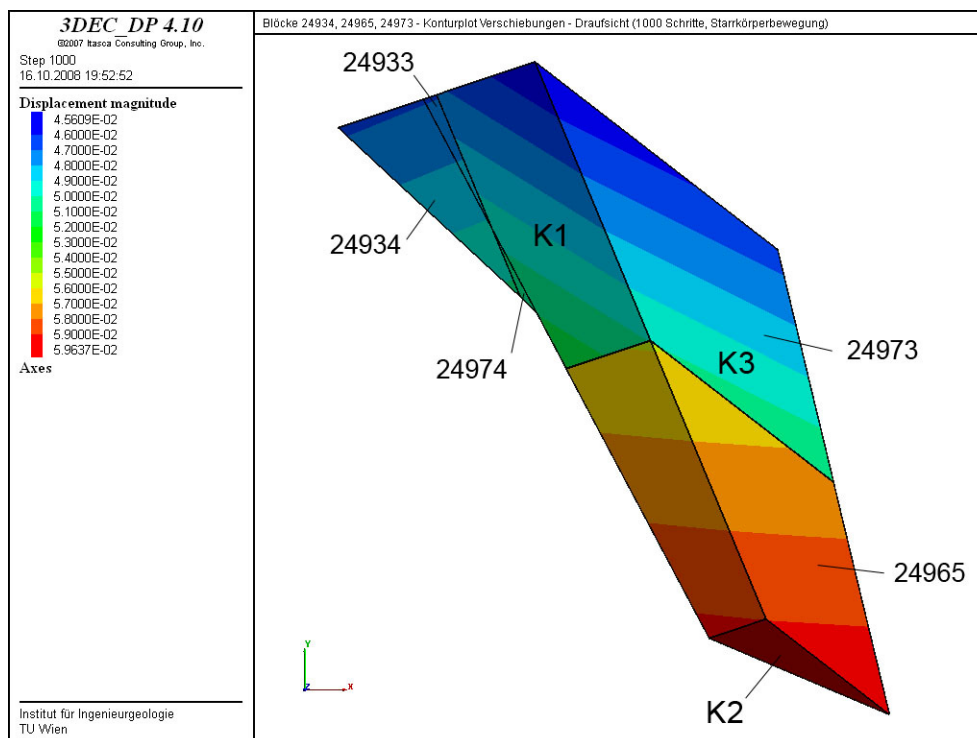
Zum ausgewerteten Zeitpunkt verfügt jeder einzelne Block, innerhalb einer Gruppe, über eine unterschiedlich große Verschiebung.

Anhand der farblichen Abstufung ist zu erkennen, dass z.B. Block 24965 der Blockgruppe 1 zum Betrachtungszeitpunkt die größten Verschiebungen besitzt. Bei Blockgruppe 1 liegen zwischen Minimal- und Maximalverschiebung 1.4cm, was rund 25 Prozent entspricht.

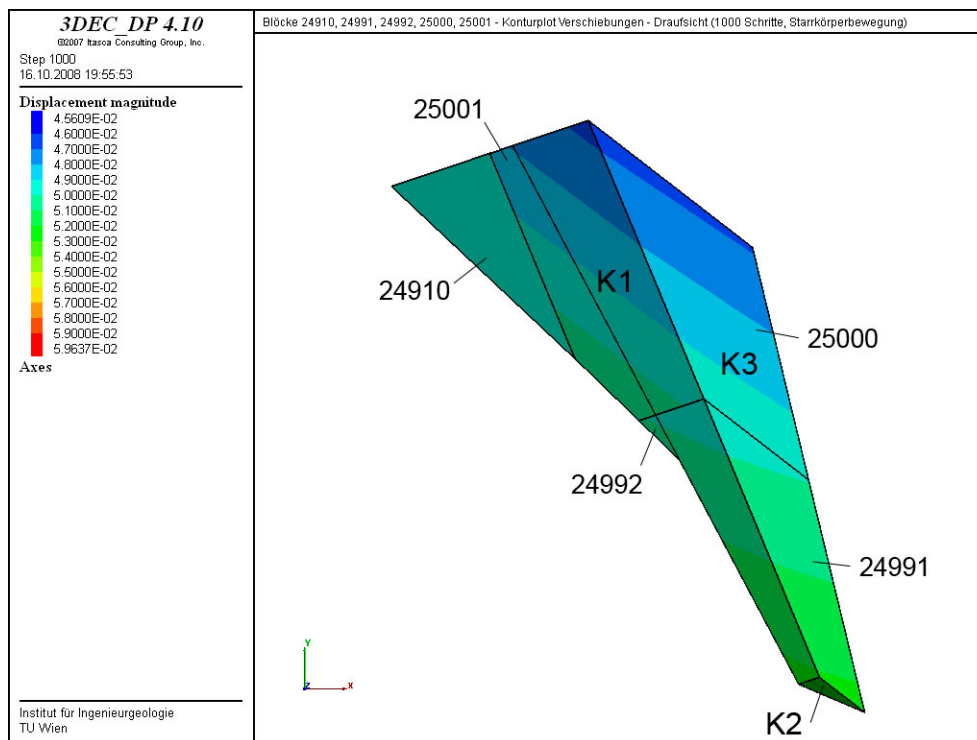
In Blockgruppe 2 besitzt Block 24991 die größte Verschiebung und in Blockgruppe 3 sind es die Blöcke 25019 und 25020, welche als zusammenhängende Blöcke gleiten.

Da die einzelnen Blöcke hauptsächlich auf K2 gleiten, besitzen sie zu einem bestimmten Zeitpunkt unterschiedlich große Verschiebungen.

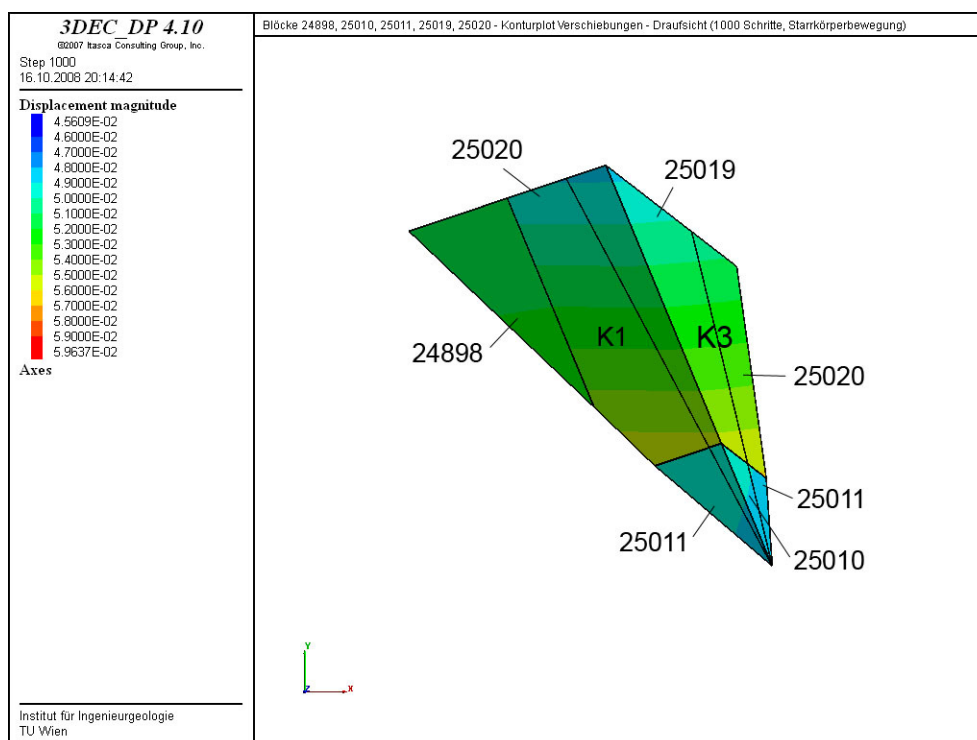
Alle drei Blockgruppen haben gemeinsam, dass sie durch die Trennflächen K1, K2 und K3 begrenzt werden.



**Abbildung 6.16:** Blöcke der Blockgruppe 1 mit auftretenden Verschiebungen (1000 Rechenschritte, Starrkörperbewegung)



**Abbildung 6.17:** Blöcke der Blockgruppe 2 mit auftretenden Verschiebungen (1000 Rechenschritte, Starrkörperbewegung)



**Abbildung 6.18:** Blöcke der Blockgruppe 3 mit auftretenden Verschiebungen (1000 Rechenschritte, Starrkörperbewegung)

### 6.4.1.3 Vergleich der Ergebnisse Starrkörperbewegung und Blocktheorie

Der Vergleich der 3DEC-Ergebnisse mit jenen der Blocktheorie Untersuchung zeigt gute Übereinstimmungen.

So besitzen die aus mehreren Einzelblöcken zusammengesetzten Blockgruppen fast identische Gestalt wie Block 101 aus der Blocktheorie. Die Blockgruppe 3 und die Blockgruppe 4 sind sogar von gleicher Form. Bei den Blockgruppen 1 und 2 kommt es zu einigen Abweichungen, aber grundsätzlich entsprechen sie geometrisch ebenfalls Block 101. Bei einem Vergleich der ermittelten Versagenszustände gibt es in vielen Fällen ebenfalls Übereinstimmungen. So gleitet der in der Blocktheorie ermittelte Block 101 auf der Trennfläche K2. Ein Blick auf die berechneten Verschiebungsvektoren der Einzelblöcke (vgl. Tabelle 6.8) zeigt, dass die meisten Blöcke ebenfalls auf K2 gleiten. Der Verschiebungsvektor von Block 24898 ist sogar identisch, bei den anderen Blöcken kommt es zu kleinen Abweichungen in der Größenordnung von 10 bis 15 Prozent, die durch Rotationen verursacht werden.

Zu Beginn des Herausgleiten treten hauptsächlich translatorische Bewegungen, überwiegend in y- und z- Richtung, auf. Die Rotationsbewegungen sind zu diesem Zeitpunkt (nach 1000 Rechenschritten) von vernachlässigbarer Größe. Mit Fortdauer der Simulation nehmen die rotatorischen Bewegungsanteile zu, was aber nicht näher analysiert wurde, da bei einer Gegenüberstellung mit der Blocktheorie nur das Anfangsverhalten von Bedeutung ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass 3DEC und die Blocktheorie dieselben Blockgeometrien als kritisch ausweist.

### 6.4.2 Untersuchung mittels linear elastischen Materialmodells

Da sich Blöcke nicht nur starr verhalten, sondern auch Deformationen erleiden können, wurde in der 3DEC Untersuchung ein linear elastisches Verhalten der Körper berücksichtigt. Dies bedurfte einiger Modifikation des in der Starrkörperberechnung benutzten Modells, wie in Kapitel 6.4.2.1 beschrieben wird. Für die Beschreibung der deformierbaren Kluttkörper wurden die Materialkennwerte  $\rho$ ,  $E$  und  $\nu$  (Werte gemäß Tabelle 6.4) berücksichtigt. Die Klufteigenschaften wurden mittels des Reibungswinkels  $\varphi$ , der Kohäsion  $c$  und den Kluffsteifigkeiten  $j_{kn}$  und  $s_{kn}$  beschrieben (Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5).

Die Berechnung soll Aufschluss geben, ob hauptsächlich ein Versagen der Trennflächen vorliegt, oder ob es auch zu Verformungen der Blöcke kommt.

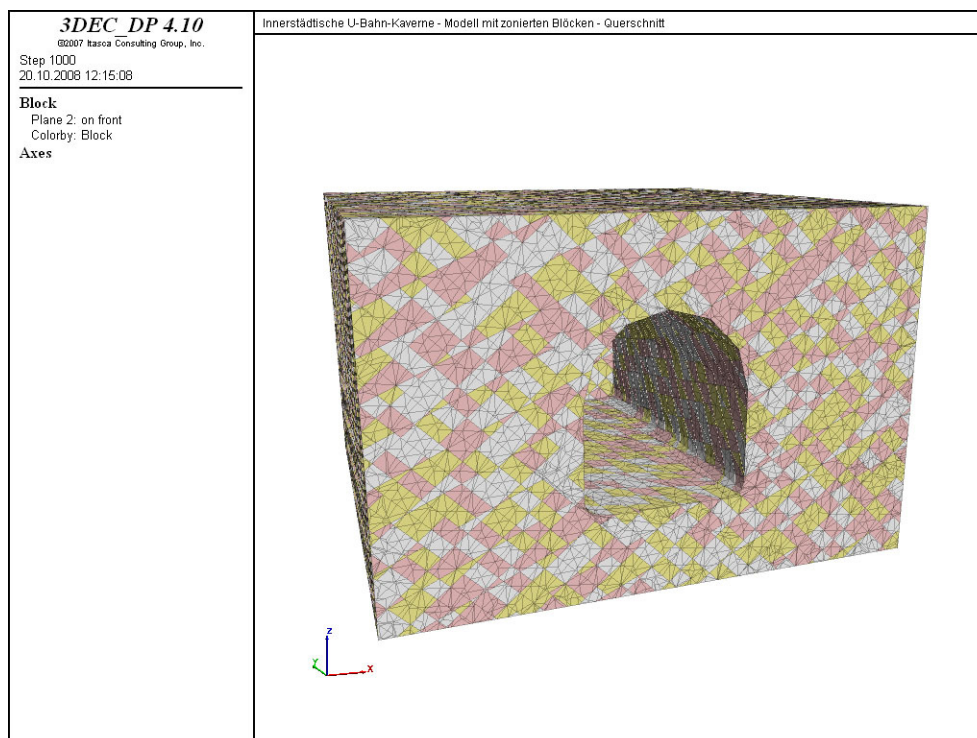
### 6.4.2.1 Modellaufbau

Für die numerische Berechnung des elastischen Materialverhaltens wurde der in der Starrkörperberechnung benutzte Modellkörper adaptiert. So wurde seine geometrische Ausdehnung auf 63x100x42 m reduziert, um die Rechenzeit zu reduzieren. Die durch die drei Trennflächensysteme gebildeten Blöcke wurden in tetraederförmige Zonen unterteilt, um ein elastisches Blockverhalten zu ermöglichen. Die Tetraeder besitzen eine maximale Kantenlänge von 1.5 Meter.

Bei der zu untersuchenden Kaverne wurde die Länge auf 60 m reduziert. Somit ergibt sich eine Kavernengeometrie von 19x60x22 m im Modell. Im Firstbereich trägt die geringste Überlagerungshöhe 10 Meter. Die durch eine mögliche Überbauung entstehende Belastung wurde mit 250 kN/m<sup>2</sup> angenommen. Diese Auflast wurde über den gesamten Modellbereich aufgebracht.

Im Gegensatz zur Starrkörperberechnung wurden die Randbedingungen durch die Einschränkung der Freiheitsgrade der Netzknoten an den Modellrändern definiert. An den seitlichen Modellrändern wurden die Bewegungen in x- und y- Richtung, an der Grundfläche in alle drei Richtungen gesperrt.

Abbildung 6.19 zeigt den in tetraederförmige Zonen unterteilten Modellkörper in einem Querschnitt. Die berücksichtigten Randbedingungen werden in dieser Abbildung nicht dargestellt.



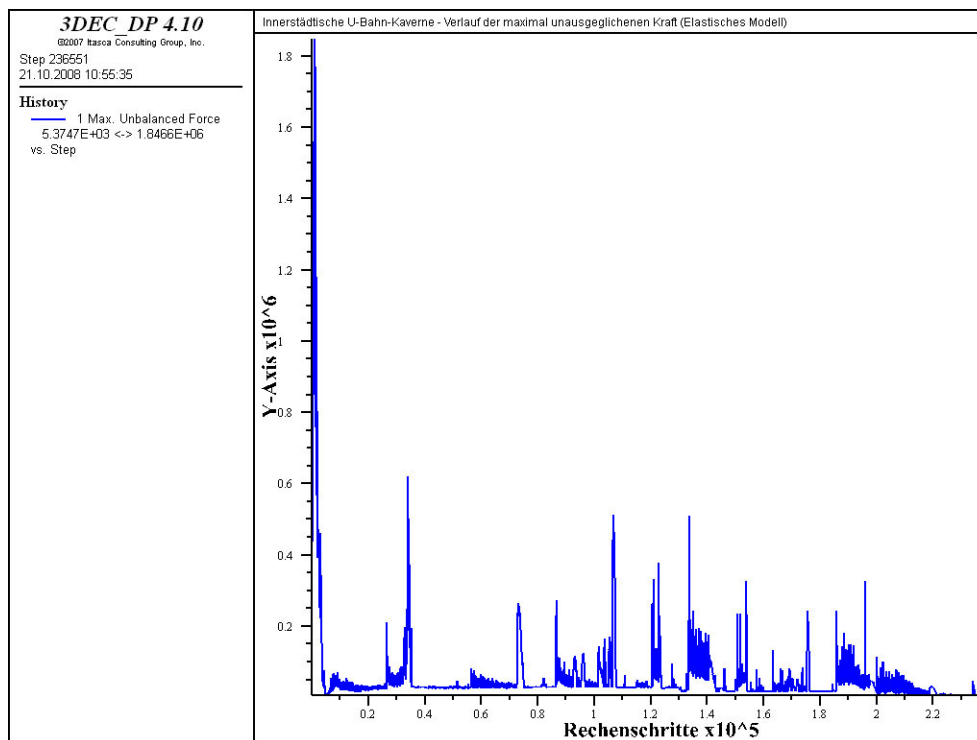
**Abbildung 6.19:** Querschnitt durch Modellkörper (mit Zonierung) – linear elastisches Materialmodell



Für die Modellierung kamen zwei verschiedene Materialmodelle zum Einsatz. Die Blöcke wurden mit linear elastischen Materialverhalten modelliert und den Trennflächen wurde das "Coulomb-Slip Joint Model" zugewiesen.

#### 6.4.2.2 Ergebnisse linear elastisches Materialmodell

Die erforderliche Rechendauer wurde an Hand des Verlaufs der unausgeglichene Kraft, festgelegt. (siehe Abbildung 6.20). So ist zu erkennen, dass nach etwa 200000 Schritten eine Stabilisierung eintritt. Daher wurde nach rund 235000 Rechenschritten die Simulation beendet, auch wenn noch kleine Blöcke in fallender Bewegung sind. Da sich die letzten Blöcke schon nach 100000 Schritten aus dem Verband gelöst haben, war eine Weiterführung der Berechnung nicht notwendig.



**Abbildung 6.20:** Verlauf der maximal unausgeglichene Kraft (linear elastisches Materialmodell)

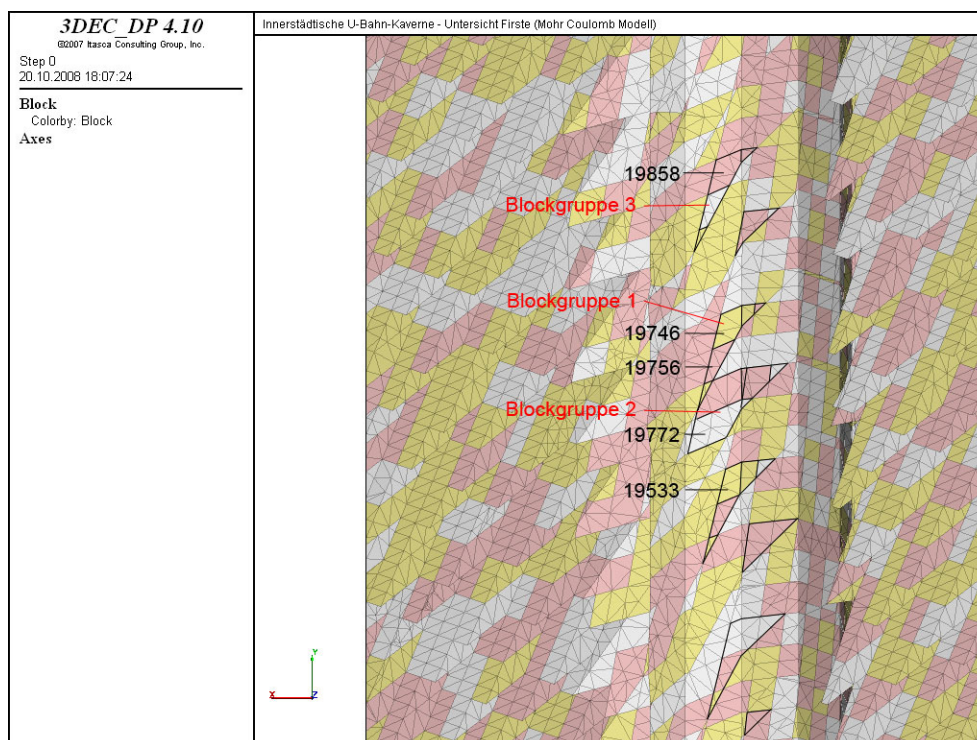
Bei der Durchsicht der Untersuchungsergebnisse wurden zwei wesentliche Unterschiede zu den Ergebnissen der Starrkörperberechnung festgestellt. So fallen beispielsweise mehr Blockgruppen aus der Firste, und es gleiten zwei Gruppen von Blöcken aus der nördlichen Stirnwand der Kaverne.

Diese aus der Wand gleitenden Blöcke schlagen auch als erstes auf der Kavernensole auf. Die Blöcke der Gruppe S1 benötigen für den zu überwindenden Abstand von rund fünf Meter etwa 35000 Schritte. Als nächstes treffen die Blöcke der zweiten aus der Wand gleitenden Gruppe S2 auf. Dies geschieht nach rund 75000 Schritten, wie auch am Kraftverlauf



erkennbar ist. Die ersten Blöcke aus dem Firstbereich benötigen zwischen 100000 bis 150000 Rechenschritte bis sie auf der Sohle auftreffen. Dies lässt sich auch anhand der höheren Ausschläge im Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft ablesen. Der Großteil der herausfallenden Firstblöcke trifft nach 100000 bis 200000 Schritten auf. Danach kommt es zu einer Beruhigung im Kraftverlauf, lediglich die kleinen Ausschläge deuten darauf hin, dass noch Blöcke in Bewegung sind.

Bei der verwendeten Kavernengeometrie fallen acht Blockgruppen aus der Firste, bevor das System in einen stabilen Zustand übergeht. Exemplarisch für diese ermittelten Gruppen wurden die drei mit den größten Anfangsverschiebungen genauer untersucht. Die Lage der aus dem Firstbereich herausfallenden Blockgruppen ist in Abbildung 6.21 ersichtlich. Besonders gekennzeichnet sind jene drei Gruppen, die im Anschluss genauer analysiert wurden. Des Weiteren sind jene fünf Einzelblöcke markiert, die nach einer Rechenzeit von 5000 beziehungsweise 10000 Schritten die größten Maximalverschiebungen aufweisen.



**Abbildung 6.21:** Untersicht Firste mit Kennzeichnung der herausfallenden Blöcke (linear elastisches Materialmodell)

Sowohl nach 5000 als auch nach 10000 Schritten besitzen dieselben fünf Blöcke die größten Maximalverschiebungen. Die ermittelten Verschiebungsgrößen sind in Tabelle 6.10 aufgelistet. Werden die Werte absteigend sortiert, ist zu erkennen, dass nach 10000 Rechenschritten eine leicht veränderte Reihenfolge vorliegt. So besitzt nicht mehr Block 19533 die drittgrößten Verschiebungen, sondern der Block 19858.

In beiden untersuchten Fällen weißt Block 19746 den Maximalwert auf. Er ist somit der erste Block, der sich aus dem Verband löst. Die zweitgrößten Verschiebungswerte besitzt Block 19772, welcher Teil der Blockgruppe 2 ist. In der Reihung an dritter Stelle liegt Block 19533 nach 5000 und Block 19858 nach 10000 Schritten. Beide Blöcke gehören unterschiedlichen Blockgruppen an, sind aber in ihrer jeweiligen Gruppe der Block mit der größten Verschiebung zum betrachteten Zeitpunkt. An vierter Stelle der Reihung befindet sich der Block 19756. Dieser gehört zur Blockgruppe 1. Zu den untersuchten Zeitpunkten besitzt er die zweithöchsten Verschiebungen seiner Gruppe.

Anhand der ermittelten Einzelblockverschiebungen ist zu erkennen, dass jede Gruppe einen maßgebenden Block besitzt, der das Herausfallen initiiert. In den analysierten Blockgruppen sind es immer die Blöcke mit der größten Masse.

Block ID	Maximale Einzelblockverschiebung [cm]	
	5000 Schritte	10000 Schritte
19746	7.71	30.09
19772	6.94	26.08
19533	6.65	21.16
19756	6.63	22.88
19858	6.58	24.24

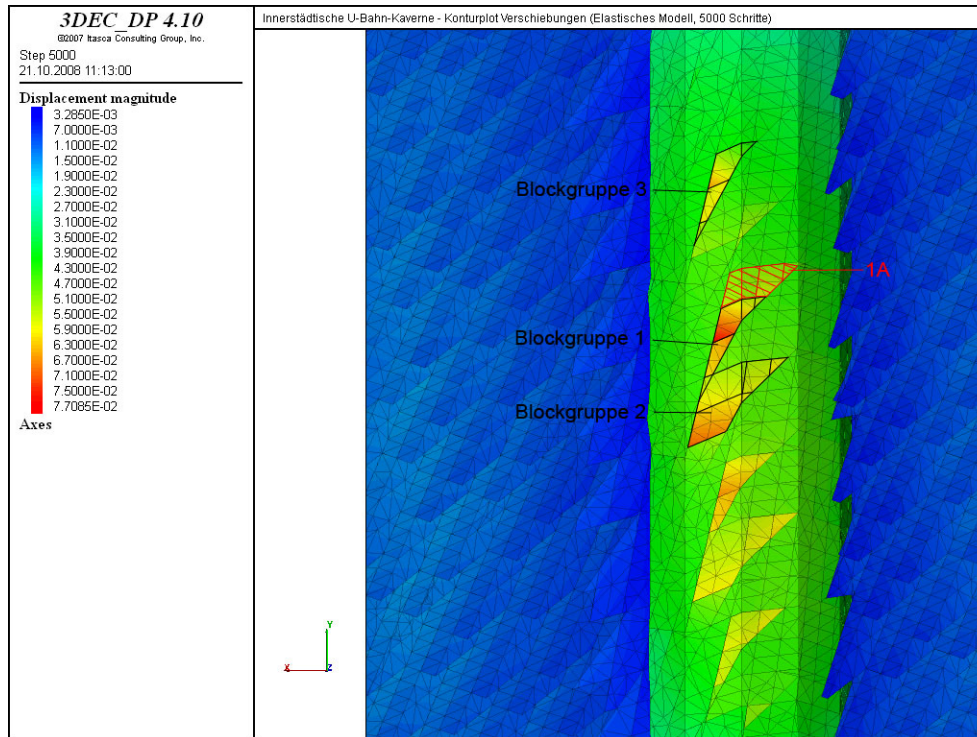
**Tabelle 6.10:** Maximale Blockverschiebung nach 5000 und 10000 Rechenschritten

Das Firstverhalten wurde mit Hilfe von Verschiebungsbildern untersucht. Abbildung 6.22 zeigt die Firstverschiebungen nach 5000 Rechenschritten. Zu diesem Zeitpunkt liegen die Verschiebungen der Firste zwischen 3.5 und 7.7 cm. Die sich aus dem Verband herauslösenden Blöcke sind schon erkennbar, da sie höhere Verschiebungen aufweisen als ihre angrenzenden Blöcke. Die mit Blockgruppe 1 bis 3 gekennzeichneten Bereiche besitzen zum Untersuchungszeitpunkt die größten Einzelblockverschiebungen.

Dass nicht alle Blöcke herausfallen müssen, die hohe Anfangsverschiebungen aufweisen, zeigt der mit 1A gekennzeichnete Bereich. Nach 5000 Schritten liegen die Verschiebungen dieser Blöcke in einen Bereich von 5.3 bis 5.7 cm. Damit sind diese Werte um rund 25 Prozent höher als die allgemeinen Firstverschiebungen. Mit Fortdauer der Rechenzeit nehmen die Verschiebungen der einzelnen Blöcke des Bereiches 1A weiter zu, bis sie mit rund 47 cm ihren Maximalwert gefunden haben. Dieser Wert wird nach einer Rechendauer von etwa 50000 Schritten erreicht und nimmt bis zum Untersuchungsende nicht weiter zu. Somit kann davon ausgegangen werden, dass diese Blöcke einen stabilen Zustand erreicht haben.

Die allgemeine Firstverschiebung beträgt etwa 4 cm und stellt sich bereits nach rund 2000 Rechenschritten ein. Mit zunehmender Rechenzeit kommt es zu keiner weiteren Zunahme. Es hat sich ein stabiler Zustand eingestellt.

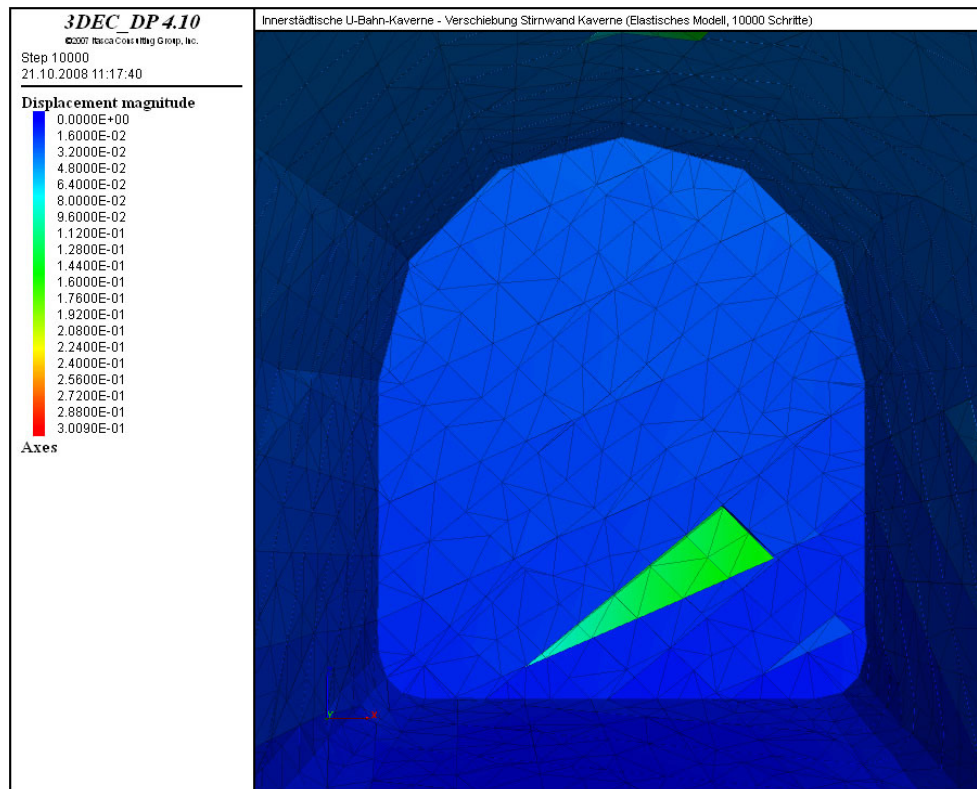
Zu Beendigung der Untersuchung (nach 236550 Schritten) haben sich alle in Abbildung 6.22 erkennbaren Blockgruppen aus der Firste gelöst und sind größtenteils bereits auf der Kavernensohle aufgetroffen.



**Abbildung 6.22:** Resultierende Verschiebungen nach 5000 Rechenschritten (linear elastisches Materialmodell)

Neben den herausfallenden Firstblöcken gibt es auch eine aus der nördlichen Stirnwand herausgleitende Blockgruppe. Abbildung 6.23 zeigt die Lage der Blockgruppe nach 10000 Rechenschritten. Die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Blockverschiebungen betragen zwischen 10 und 20 cm und wurden mit Hilfe eines Konturplots dargestellt.

Der geringe Abstand zur Sohle führt dazu, dass diese Gruppe nach rund 50000 Schritten als Erstes auf der Sohle auftrifft.



**Abbildung 6.23:** nördliche Stirnwand der Kaverne mit herausgleitenden Blöcken (linear elastisches Materialmodell)

In welcher Position sich die einzelnen Blöcke nach 100000 Schritten befinden, zeigt die Abbildung 6.24 in einem Längsschnitt durch die Kaverne. Anhand der farblichen Abstufung lässt sich erkennen, welche Blöcke den weitesten Weg zurückgelegt haben. Rot entspricht dabei eine große Entfernung und Hellblau eine geringe. Dem zufolge befindet sich Block 19772 kurz vor dem Auftreffen auf die Sohle. Nach ihm werden die Blöcke 19746, 19858 und 19533 aufschlagen.

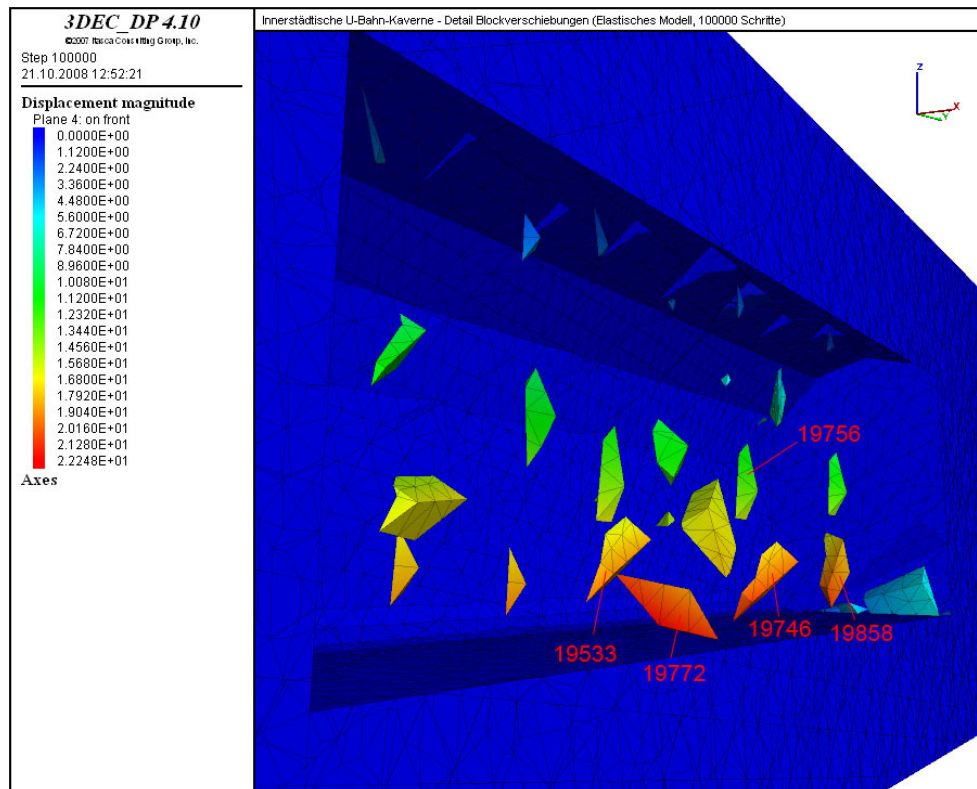
Die ersten Blöcke, die die Sohle berührt haben, sind jene aus der nördlichen Stirnwand (rechter Rand der Abbildung). Da diese nur eine Distanz von rund fünf Metern überwinden mussten, sind sie in Hellblau gehalten.

Einige Blöcke bleiben während des Fallens miteinander verbunden. So sind beispielsweise bei den Blöcken 19533, 19746 und 19858 kleinere Blöcke angehaftet, die die gesamte Fallbewegung mitmachen. Diese anhaftenden Blöcke sind aber Teil der ausgewiesenen Blockgruppen.

Nach dem Herauslösen aus der Firse vollführen die Blöcke eine Drehbewegung, um in die durch die Gravitation hervorgerufene freie Lage zu gelangen.

Nach einer Rechendauer von 100000 Schritten haben sich bereits alle herausfallenden Blöcke aus dem Firstverband gelöst. Die letzten Blöcke befinden sich noch in Firstnähe und werden auch nach Beendigung der Untersuchung (nach 236550 Schritten) noch nicht auf der Sohle aufgetroffen sein.





**Abbildung 6.24:** Längsschnitt durch Kaverne mit fallenden Blöcken (100000 Schritte, linear elastisches Materialmodell)

Eine Analyse der drei ausgewählten Blockgruppen erfolgt im Kapitel 6.4.3.2, da beide verwendeten Materialmodelle dieselben Gruppen ausweisen.

### 6.4.2.3 Zusammenfassung linear elastisches Materialmodell

Bei einer Berechnung mittels linear elastischen Materialmodells bilden sich acht Blockgruppen, die aus der Firste herausfallen. All diese Gruppen befinden sich im Bereich der Mittelachse der Kaverne. Eine weitere Gruppe von Blöcken gleitet aus der nördlichen Stirnwand.

Von der geometrischen Form sind alle Gruppen gleicher Gestalt, sowohl die in der Firste, als auch jene in der Stirnwand. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Blocktheorie und der Starrkörperbewegung zeigt, dass in allen Fällen der gleiche Körper versagt und auch weitestgehend den selben Versagensmechanismus besitzt, nämlich Gleiten auf der Trennfläche K2.

Bei der Berechnung mittels linear elastischen Materialmodells wurden keine gravierenden Deformationen der Blöcke festgestellt. Für das Herausfallen der einzelnen Blockgruppen war alleine das Trennflächenversagen verantwortlich.

Die auftretenden Firstverschiebungen betragen im Mittel 4 cm. Diese Maximalwerte lagen bereits nach rund 2000 Schritten vor.

Bis zum Vorliegen eines eindeutigen Ergebnisses waren mehr als 230000 Rechenschritte notwendig. Die große Anzahl an Netzknoten führte dazu, dass für Berechnung rund 140 Stunden notwendig waren.

### **6.4.3 Untersuchungen mittels Mohr Coulombschen Materialmodells**

In der durchgeführten 3DEC Untersuchung wurden deformierbare Klufkörper modelliert, deren plastisches Verhalten mit Hilfe des Mohr Coulombschen Materialmodells beschrieben wurde. Dabei wurden die in Kapitel 6.2 angeführten Materialkennwerte berücksichtigt. Für die Beschreibung des Klufverhaltens wurde das "Coulomb-Slip Joint Model" verwendet.

#### **6.4.3.1 Modellaufbau**

Für die numerische Untersuchung mittels des Mohr Coulombschen Materialmodells wurde das in Kapitel 6.4.2.1 beschriebene Modell verwendet. Es wurden keine Modifikationen vorgenommen.

#### **6.4.3.2 Ergebnisse des Mohr Coulombschen Materialmodells**

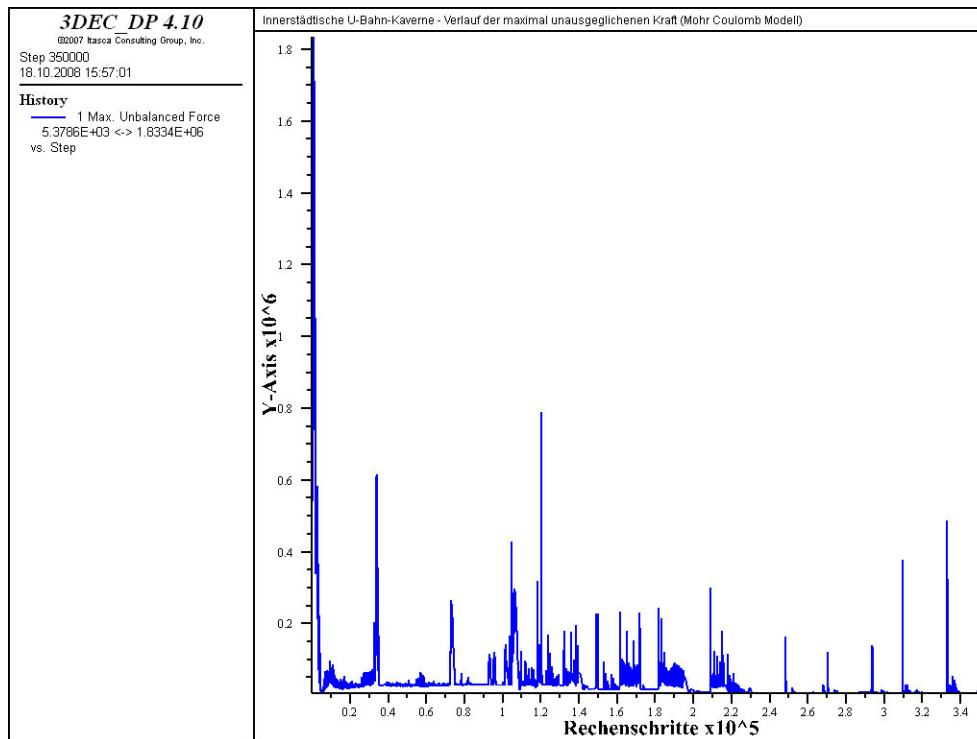
Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass sich dieselben Blöcke herauslösen wie bei der Berechnung mittels linear elastischen Materialmodells (siehe Abbildung 6.21). Aus diesem Grund wurden dieselben Einzelblöcke und Blockgruppen detailliert untersucht.

Die 3DEC- Untersuchung wurde nach einer Rechendauer von 350000 Schritten beendet, wie der Verlauf der unausgeglichene Kraft zeigt (siehe Abbildung 6.25). Obwohl zu diesem Zeitpunkt der Kraftverlauf starke Ausschläge aufweist, wurde es nicht als Notwendig erachtet die Berechnung weiter fortzusetzen. Am Ende der Untersuchungszeit trafen nur mehr aus der Firse fallende Blöcke auf der Sohle auf. Aufgrund der Tatsache, dass sich die letzten Blöcke nach rund 100000 Rechenschritten gelöst haben, konnte die Berechnung nach 350000 Schritten beendet werden.

Als erstes schlugen die Blöcke der aus der nördlichen Stirnwand gleitenden Blockgruppe auf der Kavernensohle auf. Die Blöcke der Gruppe S1 trafen nach etwa 35000 und die der Gruppe S2 nach rund 75000 Schritten auf.

Nach etwa 100000 Rechenschritten schlugen die ersten Blöcke aus dem Firstbereich ein. Der Großteil der fallenden Firstblöcke benötigte für das Überwinden der Kavernenhöhe von 22 Meter zwischen 100000 und 220000 Schritte. Danach nehmen die Ausschläge im Verlauf der unausgeglichene Kraft wieder ab, weil nur mehr vereinzelt Blöcke aufschlagen.

Zum Untersuchungsende waren nur mehr wenige Blöcke in Bewegung. Da sich zu diesem Zeitpunkt schon ein stabiler Zustand eingestellt hat, wurde das Auftreffen der letzten Blöcke nicht abgewartet.



**Abbildung 6.25:** Verlauf der maximal unausgeglichenen Kraft (Mohr Coulombsches Materialmodell)

In Tabelle 6.11 sind die maximalen Einzelblockverschiebungen nach 5000 und 10000 Schritten aufgelistet. Zu beidem Untersuchungszeitpunkten besitzen dieselben fünf Blöcke die größten Verschiebungswerte.

Der zur Blockgruppe 1 gehörende Block 19746 weist in beiden Fällen den Maximalwert auf. Dieser Block löst sich als erster aus der Firstfläche. Als Block mit den zweithöchsten Verschiebungswerten wurde Block 19772 ermittelt.

An dritter Stelle befindet sich Block 19858 mit einer maximalen Verschiebung von 6.75 cm, nach 5000 Schritten. Damit besitzt er zu diesem Zeitpunkt eine um rund 13 Prozent geringere Maximalverschiebung als der Block 19746. Nach 10000 Schritten beträgt die Differenz bereits 17 Prozent. Daraus lässt sich erkennen dass Block 19746 vor 19858 auf der Kavernensole auftreten wird.

Der Block 19756 wurde mit den vierthöchsten Verschiebungswerten ausgewiesen und besitzt in der Blockgruppe 1 die zweithöchsten Verschiebungen. Anhand der unterschiedlichen Verschiebungswerte der Blöcke 19746 und 19756 lässt sich erkennen, dass sie nicht gemeinsam herausfallen werden, sondern jeder Block für sich alleine, obwohl sie direkt nebeneinander liegen wie in Abbildung 6.28 zu sehen ist.

Von den fünf angegebenen Einzelblöcken besitzen vier von ihnen die größten Verschiebungswerte ihrer Blockgruppe. Sie können somit als die auslösenden Blöcke angesehen werden, die für das Herausgleiten der gesamten Gruppe verantwortlich sind.

Block ID	Maximale Einzelblockverschiebung [cm]	
	5000 Schritte	10000 Schritte
19746	7.75	30.07
19772	6.96	26.57
19858	6.75	24.98
19756	6.69	22.88
19533	6.62	21.05

**Tabelle 6.11:** Maximale Blockverschiebung nach 5000 und 10000 Rechenschritten (Materialmodell Mohr Coulomb)

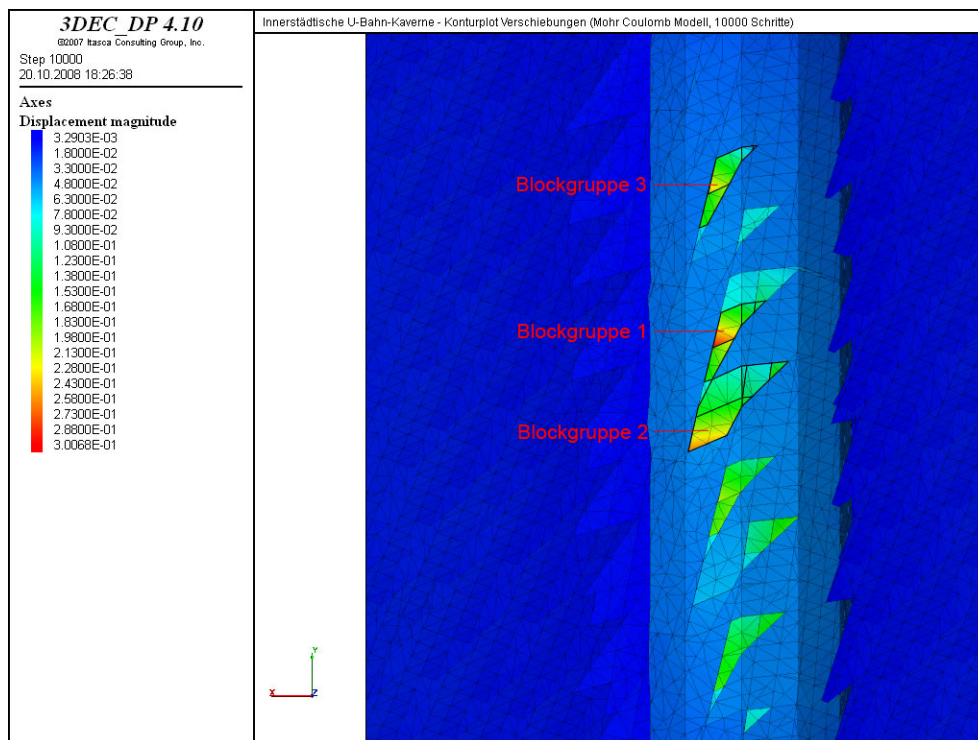
Nach 10000 Rechenschritten lässt sich schon erkennen welche Blöcke herausfallen werden. Wie in Abbildung 6.26 ersichtlich ist, besitzen die herausfallenden Blockgruppen schon höhere Maximalverschiebungen als die umliegenden Blöcke im Firstbereich. So bewegen sich die Einzelblockverschiebungen in einer Bandbreite zwischen 10 und 30 cm, wo hingegen die allgemeinen Firstsetzungen sich bei 4 cm eingependelt haben. Die allgemeine Firstverschiebung von 4 cm hat sich bereits nach etwa 2000 Schritten eingestellt und nahm bei zunehmender Rechendauer nicht weiter zu.

Die gekennzeichneten Blockgruppen 1 bis 3 besitzen zum Untersuchungszeitpunkt jene Blöcke mit den größten Einzelverschiebungen. In den Abbildung 6.28 bis Abbildung 6.30 sind diese drei Gruppen in einer Draufsicht dargestellt.

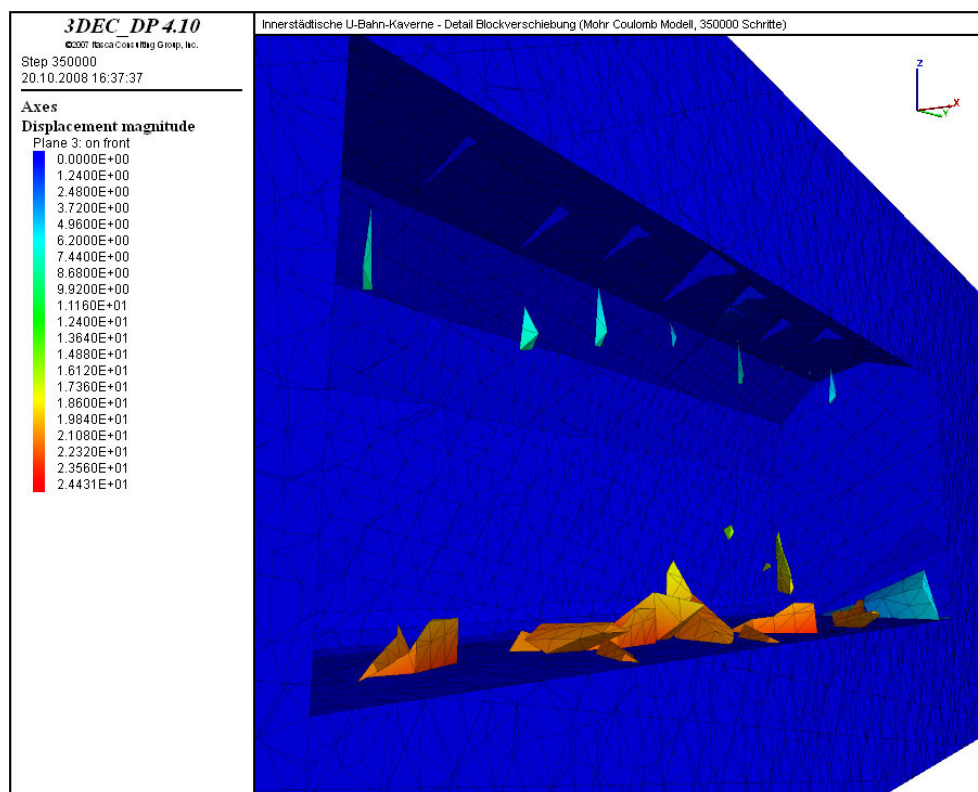
Die in Abbildung 6.26 erkennbaren Blockgruppen lösen sich mit zunehmender Rechendauer vollständig aus dem Firstverband heraus und fallen auf die Sohle. Abbildung 6.27 zeigt die Lage der Blöcke zum Ende der Untersuchung. Bis auf ein paar vereinzelte Blöcke befinden sich fast alle auf der Kavernensohle.

Nach dem Herauslösen aus der Firste verdrehten sich die Blöcke, um in die gravitationsbedingte freie Lage zu gelangen. In dieser gedrehten Lage verharrten sie auch während des Fallens bis zum Auftreffen auf die Sohle. Nach dem Aufkommen kippen die Blöcke in eine stabile Lage, in der sie liegen bleiben.





**Abbildung 6.26:** Resultierende Verschiebungen nach 10000 Rechenschritten (Mohr Coulombsches Materialmodell)



**Abbildung 6.27:** Längsschnitt durch Kaverne mit fallenden Blöcken (350000 Schritte, Mohr Coulombsches Materialmodell)

Bei den in den Abbildung 6.28 bis Abbildung 6.30 dargestellten Blockgruppen handelt es sich um jene, die sich als erstes aus der Firste lösen. Sowohl bei der Berechnung mittels linear elastischen als auch mit dem Mohr Coulombschen Materialmodell wurden dieselben Gruppen ausgewiesen.

Jede Blockgruppe setzt sich aus mehreren Einzelblöcken zusammen, die zum Teil alleine oder auch in einem Verband herausgleiten.

Abbildung 6.28 zeigt die Blockgruppe 1 in einer Draufsicht nach 10000 Rechenschritten. Zu diesem Zeitpunkt hatten sich die einzelnen Blöcke noch nicht voneinander getrennt, lediglich kleine Verschiebungen lagen vor. Diese wurden mit Hilfe eines Konturplots dargestellt. Anhand der farblichen Skalierung ist zu erkennen, dass der Block 19746 schon in Richtung freie Oberfläche (Firste) gleitet. Eine Auswertung der zu einem späteren Rechenzeitpunkt vorliegenden Ergebnisse hat gezeigt, dass der Block 19747 bis zum Auftreffen auf der Sohle an den Block 19746 geheftet bleibt.

Die Blockgruppe 2 setzt sich aus einer größeren Anzahl von Einzelblöcken zusammen, als die Gruppe 1. Der an die Trennfläche K2 angrenzende, nicht dargestellte, Block gleitet nicht heraus, auch nicht zu einem späteren Zeitpunkt. Somit entspricht die in Abbildung 6.29 dargestellte Form der endgültigen.

Nach 10000 Schritten besitzt die Blockgruppe 3 den Einzelblock mit der dritthöchsten Einzelverschiebung, nämlich den Block 19858. Die Größe seiner Verschiebung ist in Abbildung 6.30 ersichtlich, welche im Bereich der Trennfläche zum angrenzenden Block 19853 die größte Ausdehnung aufweist. Es lässt sich bereits ein Gleiten auf K2, in Richtung der freien Oberfläche erkennen.

Zum Untersuchungsende besteht die Blockgruppe 3 aus vier Einzelblöcken.

Alle drei Gruppen haben gemeinsam, dass sie durch die selbe Trennflächenanordnung begrenzt werden und dadurch Blöcke ähnlicher Gestalt entstehen. Diese Form weisen auch die anderen aus der Firste herausgleitenden Gruppen auf.

Bei der Benutzung eines linear elastischen, beziehungsweise eines Mohr Coulombschen Materialmodells bilden sich zwei Blockgruppen in der nördlichen Firstfläche aus, die herausgleiten.

Abbildung 6.31 zeigt die größere dieser beiden Blockgruppen in einer Draufsicht. Die Blockgruppe S1 setzt sich in Summe aus fünf Einzelblöcken zusammen. Die Blöcke gleiten auf der Trennfläche K2 (in der Abbildung durch die Blöcke verdeckt) aus der Wand heraus, in Richtung der Kaverne. Während dem Herausgleiten bleiben die einzelnen Blöcke miteinander verbunden. Nachdem Auftreffen auf der Sohle löst sich der Block 6338 aus dem Verband und kippt bis zum Erreichen einer neuen stabilen Lage.

Die Blockgruppe S2 gleitet ebenfalls auf der Trennfläche K2 aus der Stirnwand heraus. Diese Gruppe besteht insgesamt aus zwei Einzelblöcken.

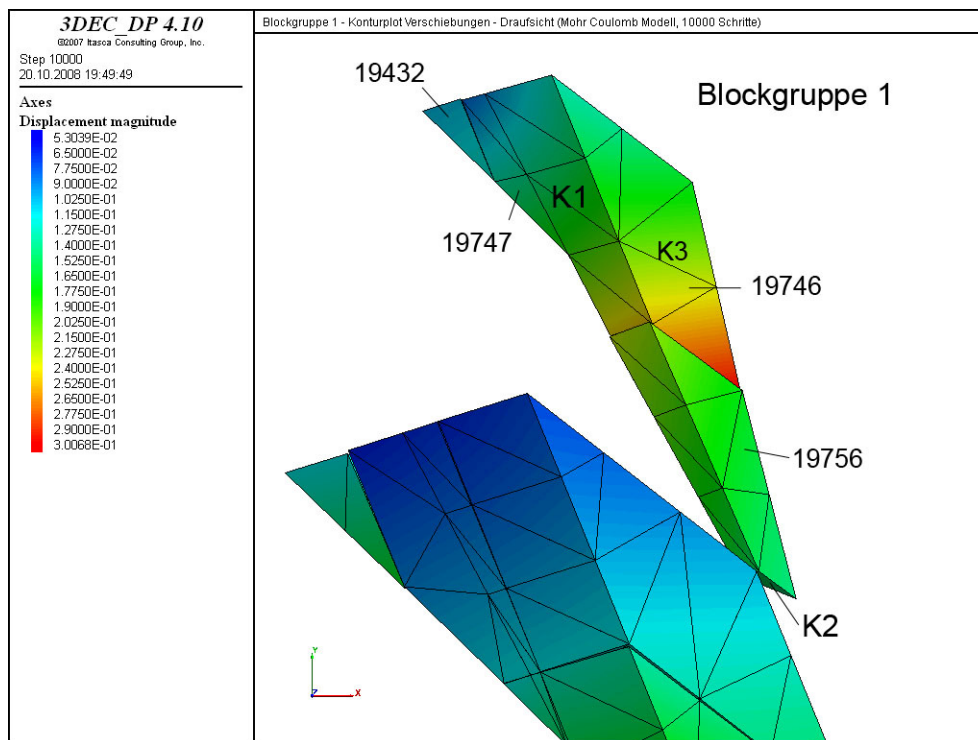


Abbildung 6.28: Blockgruppe 1

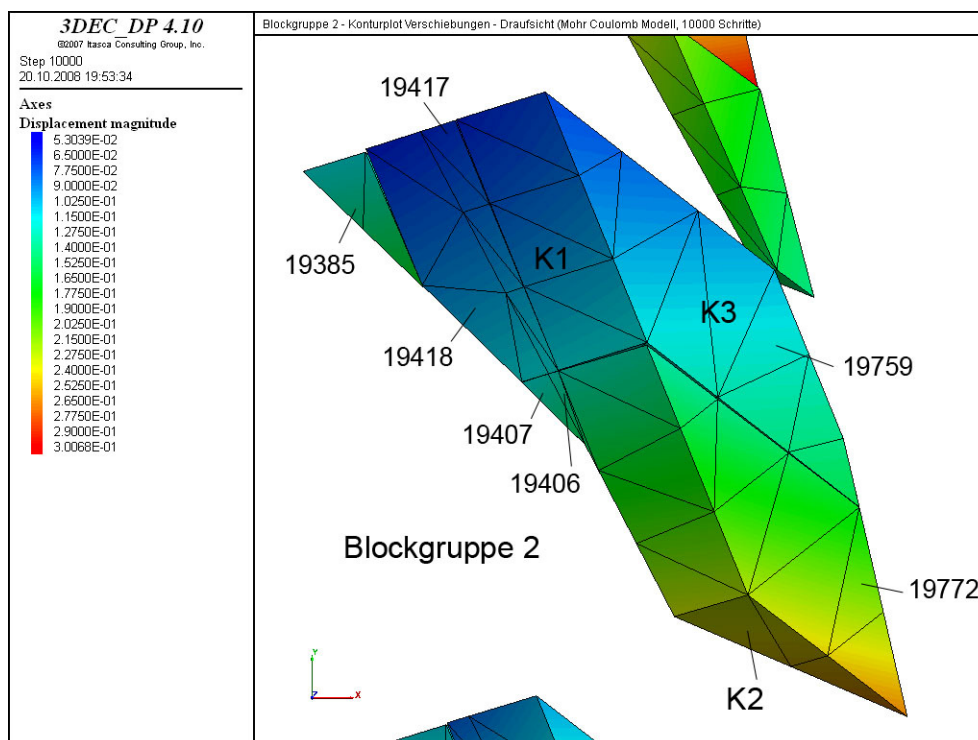


Abbildung 6.29: Blockgruppe 2

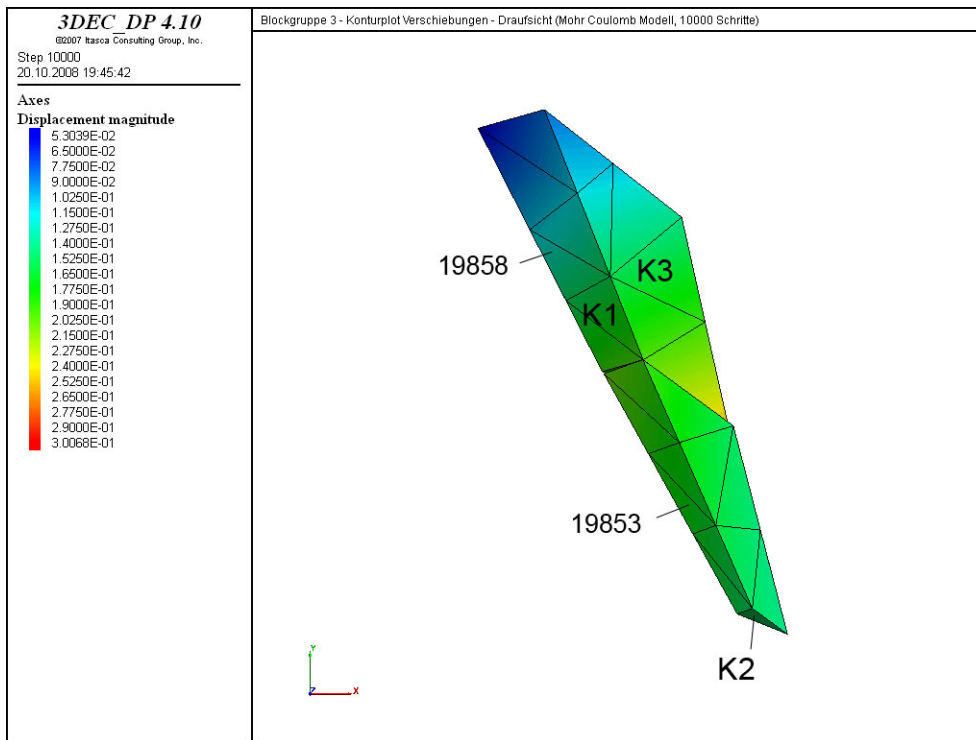


Abbildung 6.30: Blockgruppe 3

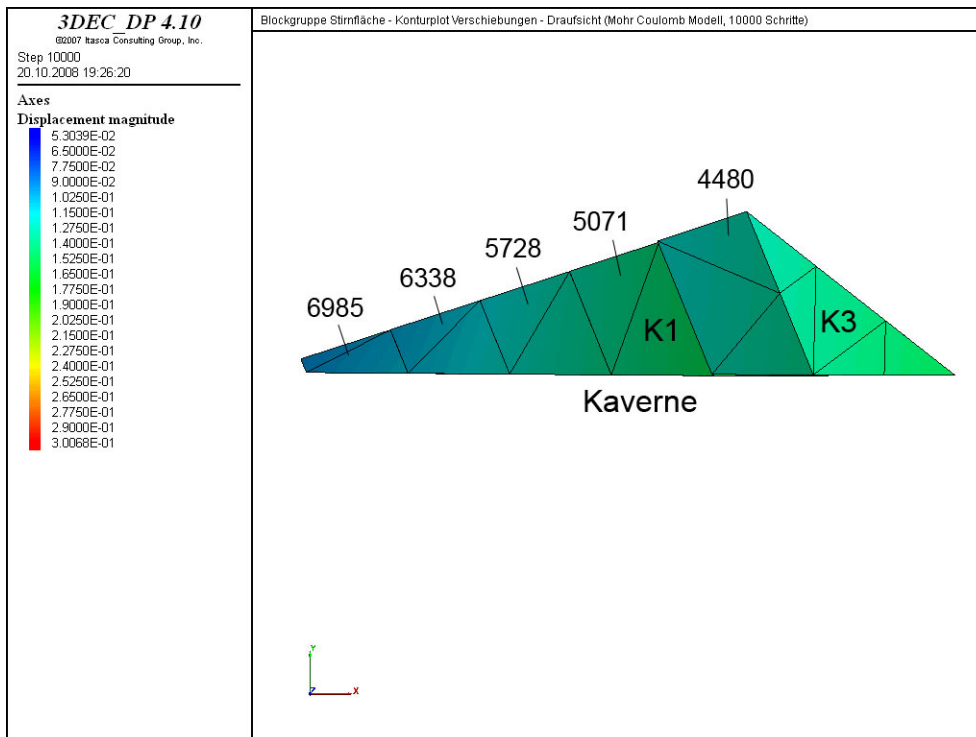


Abbildung 6.31: Blockgruppe S1

### 6.4.3.3 Zusammenfassung Mohr Coulombsches Materialmodell

Die Untersuchung mittels des Mohr Coulombschen Materialmodells hat acht Blockgruppen in der Firste, und zwei in der nördlichen Stirnwand ausgewiesen, die sich aus dem Verband lösen. Diese herausgleitenden Gruppen sind exakt dieselben, wie sie die Berechnungen mittels linear elastischen Materialmodells ergeben haben.

Wie die ausgewerteten Verschiebungsbilder gezeigt haben, bilden sich die herausgleitenden Gruppen schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt aus. Nach 5000 bis 10000 Schritten sind sie bereits sehr gut erkennbar. Ihre Verschiebungen sind zum Teil schon fünf bis sechs Mal so groß wie die der restlichen, nicht herausgleitenden Blöcke.

Aufgrund der geringeren Fallhöhe trafen als erstes die Blöcke aus der Stirnwand auf der Sohle auf. Die ersten Blöcke aus dem Firstbereich schlugen nach rund 10000 Rechenschritten auf. Nachdem sich zu diesem Zeitpunkt bereits alle Blöcke gelöst haben, die herausfallen, konnte die Berechnung nach 350000 Schritten beendet werden.

Bis auf die herausfallenden Bereiche bleibt das System stabil. In der Firste stellten sich Deformationen in der Größenordnung von 4 cm ein, welche bereits nach rund 2000 Schritten erreicht wurden und nicht weiter zunahmten.

Die sich lösenden Blockgruppen sind alle von ähnlicher geometrischer Gestalt und sie gleiten alle auf der Trennfläche K2 heraus. Dieses Ergebnis hat auch die Untersuchung mit der Blocktheorie ergeben.

Auf Grund der Tatsache, dass bei der Berechnung mittels des Mohr Coulombschen Materialmodells dieselben Blöcke herausgleiten wie bei Verwendung eines linear elastischen Materialmodells, lässt darauf schließen, dass nur in den Trennflächen Versagen vorliegt. In den Blöcken kommt es zu keinen plastischen Deformationen.

## 7 Zusammenfassung

Fels unterscheidet sich von anderen Baumaterialien anhand gegebener Diskontinuitäten in Form von Klüften, Störungen und Scherzonen. Die Art, Form und Häufigkeit der Diskontinuitäten sind entscheidende Kriterien, ob ein diskontinuumsmechanisches Modell zum Einsatz kommt. Diese Form der Modellierung ermöglicht es, diskrete Scherverschiebungen von Trennflächen zu berücksichtigen, denn dies hat einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten. Die in einem diskontinuumsmechanischen Modell enthaltenen, diskreten Elemente stellen für sich ein Kontinuum dar und können sich frei bewegen. Zusammengesetzt bilden diese diskreten Blöcke ein Diskontinuum. Wechselwirkungen zwischen den Blöcken entstehen, wenn die Blöcke in Kontakt sind (Preh, 2004).

In diskontinuumsmechanischen Modellen werden die Kluffkörper als starr oder deformierbar beschrieben und an den Trennflächen werden Kontaktbedingungen berücksichtigt. Eine wichtige Eigenschaft von Trennflächen ist die Dilatanz (Volumsvergrößerung bei irreversiblen Verschiebungen).

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde der Einfluss der Dilatanz in Bezug auf Grenzreibung und Grenzgleichgewicht mit dem Programm 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code) untersucht. Für die Modellierung der Kluffeigenschaften wurde das "Coulomb-Slip Joint Model" verwendet. Dieses Modell ermöglicht es, neben der Kohäsion und dem Reibungswinkel auch die Dilatanz zu berücksichtigen. Im Rahmen der 3DEC Berechnungen wurden zwei Modelle aufgebaut.

Die Untersuchungen am Kluffkörper mit saiger stehenden Trennflächen haben gezeigt, dass bei unverschieblichen Randblöcken sowohl Dilatanz als auch Reibungswinkel keinen Einfluss auf das Verschiebungsverhalten haben. Reibungswinkel und Dilatanz wirken sich auf das Versagensverhalten nur aus, wenn Normalkräfte in den Trennflächen wirken.

Normalkräfte entstehen, wenn Blöcke rotieren können und gegeneinander drücken. In diesen Fällen reicht oft schon ein erhöhter Reibungswinkel aus, um einen Block am Herausgleiten zu hindern. Treten Dilatanz und Reibungswinkel in Kombination auf, führen schon sehr geringe Dilatanzwinkel zu hohen Normalkräften in den Trennflächen, die das System stabilisieren.

Der Dilatanzwinkel wird direkt beeinflusst von der Klufffläche, der Kluffsteifigkeit normal auf die Klufffläche  $j_{kn}$  und jener Scherverschiebung, ab der die Dilatanz nicht mehr zunimmt. Dieser direkte Zusammenhang dreier Materialkennwerte macht es erforderlich, genaue Kenntnis über ihre Größen zu besitzen.

Die Untersuchungen zum Dilatanz Einfluss haben ergeben, dass Systeme mit berücksichtigter Dilatanz wesentlich stabiler sind. Damit ein falsch gewählter Dilatanzwinkel

nicht einen stabilen Zustand vortäuscht, wurde bei den Modellierungen der Kavernen keine Dilatanz berücksichtigt.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde der Versagensmechanismus einer Kaverne mit horizontaler Firste mit 3DEC untersucht und die Ergebnisse mit der Blocktheorie verglichen. Die Untersuchungen wurden an einer 30x100x25 m großen Kaverne durchgeführt, die in einem geklüftetem Fels liegt. Die Blocktheorie wies drei entfernbarere Blöcke aus.

In der ersten Modellierung mit 3DEC wurden geringe Kluffestigkeiten berücksichtigt. Diese führten dazu, dass am Ende der Berechnung die Firste versagt. Die als maßgebend ausgewiesenen Blöcke sind nicht ident mit jenen der Blocktheorie. So werden viele der Blöcke von einem Trennflächensystem ein zweites Mal begrenzt. Hingegen wird in der Blocktheorie bei der Ermittlung der entfernbareren Blöcke jede Trennfläche nur einmal berücksichtigt. Die Bestimmung der Versagensmechanismen hat gezeigt, dass die ausgewählten Blöcke schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt (500 Berechnungsschritte) Rotationen um die y-Achse durchführen und dass die translatorischen Bewegungen überwiegend in negative z-Richtung (vertikal nach unten) zeigen. Die Bewegungsrichtungen der maßgebenden Blöcke würden auf ein Gleiten auf den Trennflächen K2 bzw. K3 deuten, jedoch sind die Fallwinkel der berechneten Verschiebungsvektoren wesentlich größer als die der Trennflächen K2 und K3.

Wie sich an Hand der Untersuchungen zum Einfluss des Mass Scaling (Berechnung des maßgeblichen Zeitschrittes mit Hilfe der durchschnittlichen Blockmasse) herausstellte, führte die berücksichtigte "Massen- Skalierung" zu den abweichenden Ergebnissen. Wird hingegen das Mass Scaling explizit in der 3DEC Modellierung ausgeschaltet, liefern 3DEC und die Blocktheorie dieselben Ergebnisse. Jene Zonen, die auf Grund ihrer Trennflächenanordnung frei herausfallen müssen, besitzen zu allen Untersuchungszeitpunkten die größten Verschiebungen. Das ausgeschaltete Mass Scaling führt dazu, dass nicht mehr die größten Blöcke die maßgeblichen Verschiebungen aufweisen, sondern jene, die sich ungehindert aus dem Verband lösen können.

Im zweiten Modellierungsfall wurde die Blockrotation unterdrückt, da diese von der Blocktheorie auch nicht berücksichtigt wird. Die maßgeblichen Blöcke besitzen dieselben geometrischen Formen wie die mit der ersten Modellierung ausgewiesenen Blöcke. Eine Unterdrückung der Rotation hat dazu geführt, dass die Verschiebungen nach 500 Schritten um ca. 35 Prozent geringer sind als mit berücksichtigter Rotation. Die Bewegungsrichtung der Blöcke liegt im Mittel bei  $253^\circ$  und die dazugehörigen Fallwinkel betragen im Mittel  $54^\circ$ . Als Versagensmechanismus liegt Gleiten auf der Trennfläche K2 vor. Die Blocktheorie weist mit diesem Versagensmechanismus den Block 1011 aus. Bei den mittels 3DEC ermittelten maßgeblichen Blöcken, weisen hingegen einige Blöcke eher die Gestalt des Blockes 1101 auf, obwohl der Versagensmechanismus dem Block 1011 entsprechen würde.

Am Ende der Berechnung konnte sich kein stabiler Zustand einstellen und es kam zum Versagen der Firste.

In einem dritten Modellierungsfall wurden „hohe Kluffestigkeiten“ berücksichtigt. Dies führt dazu, dass aus dem Verband Blockgruppen fallen, die die Form des entfernbaren Blockes 1111 aus der Blocktheorie aufweisen. Diese herausfallenden Blockgruppen setzten sich aus Blöcken zusammen, deren geometrische Formen die der Blöcke 1011 und 1101 sehr ähnlich sind. Die Blöcke 1011 und 1101 sind somit Bestandteile des fallenden Blockes 1111.

Nachdem sich die Blockgruppen herausgelöst hatten, stellte sich ein stabiler Zustand ein und es kam nicht zum Versagen der gesamten Firste.

Die Untersuchungen der Kaverne mit horizontaler Firstfläche haben gezeigt, dass es bei großen Verschiebungen erforderlich ist, die „Massen- Skalierung“ in der 3DEC Modellierung auszuschalten. Ein Mass Scaling ist nur solange zulässig, solange es sich um ein quasistatisches System handelt. Wechselt jedoch das System von einem statischen Zustand in einen dynamischen, dann ist es erforderlich, das Mass Scaling auszuschalten.

Auf Grund der Tatsache, dass in den 3DEC Berechnungen auch bei ausgeschalteten Mass Scaling Blöcke mit parallelen Begrenzungsflächen große Verschiebungen aufweisen, wäre es sinnvoll, weitere Untersuchungen mit der Berücksichtigung der Dilatanz durchzuführen.

Im dritten Teil dieser Arbeit wurde das Verformungsverhalten einer seichtliegenden U-Bahnkaverne in geklüftetem Fels analysiert. Die numerischen Untersuchungen erfolgten wieder mit 3DEC. Dabei wurden in der Berechnung die Blöcke einmal als starre Körper und einmal als deformierbare Körper modelliert. Zur Beschreibung der deformierbaren Blockeigenschaften wurde einmal ein linear elastisches und einmal ein Mohr Coulomb Materialmodell verwendet. Den Trennflächen wurde das „Coulomb-Slip Joint Model“ zugewiesen.

Zu Vergleichszwecken wurde das Trennflächengefüge mit der Blocktheorie analysiert. Diese weist einen Block 101 als entfernenbar auf, welcher auf der Trennfläche K2 gleitet.

Die Berechnung mit starren Körpern weist vier zusammengesetzte Blockgruppen aus, die aus der Firstfläche gleiten. Diese Gruppen besitzen fast identische Gestalt wie der mittels Blocktheorie ermittelte Block. Die durchgeführte Einzelblockanalyse hat ergeben, dass die meisten Blöcke auf der Trennfläche K2 gleiten. Zu Beginn des Herausgleitens treten hauptsächlich translatorische Bewegungen, überwiegend in y- und z- Richtung, auf. Die Rotationsbewegungen sind zu diesem Zeitpunkt (nach 1000 Rechenschritten) von vernachlässigbarer Größe.

Nach dem Herausgleiten dieser vier Blockgruppen stellt sich ein stabiler Zustand ein und es lösen sich keine weiteren Blöcke aus dem Verband.

Bei der Untersuchung mit linear elastischen Materialmodell haben sich in der Firste acht Blockgruppen gebildet, die herausgleiten. Weitere zwei lösen sich aus der nördlichen



Stirnwand. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Blocktheorie und der Starrkörperbewegung zeigt, dass in allen Fällen der gleiche Körper versagt und auch weitestgehend denselben Versagensmechanismus besitzt, nämlich Gleiten auf der Trennfläche K2. Bei der Berechnung mittels linear elastischen Materialmodells wurden keine wesentlichen Blockdeformationen festgestellt. Für das Herausgleiten der einzelnen Blockgruppen war alleine das Trennflächenversagen verantwortlich.

Die Untersuchung mit dem Mohr Coulombschen Materialmodell lieferte dieselben Ergebnisse wie die Berechnung mit linear elastischen Modell. Es gleiten dieselben Blöcke aus dem Verband und es stellen sich auch gleich große Verschiebungen ein.

Plastische Deformationen der Blöcke wurden nicht festgestellt. Die Blockgruppen gleiten aufgrund eines Trennflächenversagens aus dem Verband.

Alle drei Modellierungsfälle weisen dieselbe Blockform als kritisch aus. Diese ist identisch mit jener, die mittels Blocktheorie ermittelt wurde.

## 8 Literaturverzeichnis

Brown, E.T: (1987). *Analytical and computational methods in engineering rock mechanics*. London, Allen & Unwin, pp. 3 – 4

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, France, Vol. 1, Paper No. II-8.

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

Firma Herrenknecht (2008). *Homepage; [www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de)*, Abrufdatum 24.10.2008

Hinkel W.J., Treiber K., Valenta G., Liebsch H. (2004). *U-Bahn - gestern - heute - morgen von 1863 bis 2010*, Wien, N.J. Schmid Verlag

Itasca (2000). *UDEC (Universal Distinct Element Code) User's Guide*. Minneapolis, Itasca Consulting Group, Inc.

Itasca (2007). *3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code) User's Guide*. Minneapolis, Itasca Consulting Group, Inc.

Knoflacher, H. (1992). *Studienblätter zur Vorlesung: Verkehrsplanung*. Institut für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Technische Universität Wien

Mang, H. und G. Hofstetter (2000). *Festigkeitslehre*. Wien, Springer Verlag

Poisel, R. (2003). *Studienblätter zur Übung: Angewandte Felsmechanik*, Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien

Preh, A. (2004). *Modellierung des Verhaltens von Massenbewegungen bei großen Verschiebungen mit Hilfe des Particle Flow Codes (PFC)*. Dissertation, Institut für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien, S. 23 – 24

Wiener Linien (2006). *Die Linie U1 - Geschichte - Technik - Zukunft*, Wien, Wiener Linien GmbH & Co KG, 1030 Wien

Will, J (1995). *Die Diskrete Elemente Methode (DEM) und ihre Anwendung in der Felsmechanik*. Mitteilung des Instituts für Strukturmechanik – Bauhaus Universität Weimar, Festschrift Prof. Harald Zrost, No. 95-1, S. 11.1 – 5.11.13

Wittke, W. (1999). *Tunnelstatik – Grundlagen*, Essen, Verlag Glückauf GmbH