

Diplomarbeit

Einfluss des Trennflächenabstands auf die Stabilität eines belasteten Felskeils

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Influence of joint spacing on the stability of a loaded rock wedge

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Alexander Prantl, BSc, BSc

Matr.Nr.: 00019380

Betreuung: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alexander Preh**
Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Ingenieurgeologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/220-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Jänner 2025



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

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei meiner Familie, meinen Freunden und meinen Studienkollegen bedanken, die mich während meines Studiums unterstützt haben. Ein besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Sonja für ihre tatkräftige Unterstützung und ihr großes Verständnis.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Alexander Preh für seine fachliche Expertise und wertvollen Ratschläge während meiner Diplomarbeit. Ihre Geduld und Anleitung waren entscheidend für die erfolgreiche Durchführung und Optimierung meiner Forschung.

Ebenso danke ich Herrn Emmanouil Fleris, MSc, für die Unterstützung bei der Anwendung der Softwareprogramme. Ihre Unterstützung war für den Abschluss dieser Arbeit von großer Bedeutung.

Abschließend danke ich allen Kommilitonen, die mich während des Schreibprozesses unterstützt haben, sowie meiner Familie und meinen Freunden für ihre unermüdliche Ermutigung und Unterstützung während dieser anspruchsvollen Zeit. Euer Vertrauen in meine Fähigkeiten hat mir die notwendige Motivation gegeben, um mein Bestes zu geben.

„Life doesn't require that we be the best, only that we try our best.“ (H. Jackson Brown Jr.)

Kurzfassung

Keilgleiten zählt zu den häufigsten Versagensarten bei Festgesteinsböschungen, insbesondere bei Böschungen mit gut entwickelten Kluftsystemen. Dies gilt im Speziellen für Gründungen in der Nähe von Felsböschungen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein von Wyllie (1992) publiziertes Beispiel herangezogen und vertiefenden Analysen unterzogen. Der den Analysen zugrunde liegende Felskeil nach Wyllie wird durch zwei sich schneidende Trennflächen und einen Zugriss entlang der Oberseite des Keils definiert.

Zur Ermittlung des Einflusses des Trennflächenscharenabstands und der Kohäsion auf die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen wurden zwei Softwareprogramme verwendet, die unterschiedliche Berechnungsmethoden anwenden. Das erste Programm, SWEDGE (entwickelt von Rocscience), basiert auf dem Prinzip des Grenzgleichgewichts und berücksichtigt Gesteinsparameter wie Kohäsion und Reibungswinkel, jedoch keine Trennflächenscharen. Die zweite Software, 3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code), entwickelt von der Itasca Consulting Group, nutzt die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) und bezieht Gesteinsparameter sowie Trennflächenscharenabstände detailliert in die Analyse des Versagensmechanismus ein.

In der Untersuchung wurden verschiedene Keilmodelle betrachtet. Zunächst wurde der größtmögliche Keil untersucht, der durch die keilbildenden Trennflächen entsteht. Anschließend wurden Trennflächenscharenabstände von 3 m, 2 m, 1,5 m und 1 m sowie Kohäsionen von 100 kPa für die erste Keilfläche und 50 kPa für die zweite Keilfläche berücksichtigt. Nachfolgend wurden die Kohäsionswerte verdoppelt und die Untersuchung wiederholt. Auf diese Weise wurde der Einfluss des Trennflächenscharenabstands und der Kohäsion auf die Sohldruckspannungen untersucht.

Neben der maximal aufnehmbaren Sohldruckspannung wurden auch die ableitende Keilhöhe und das Keilvolumen ermittelt. Zudem wurde der Einfluss der Trennflächenscharenabstände auf den Versagensmechanismus analysiert.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Trennflächenabstand einen entscheidenden Einfluss auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung hat. Mit zunehmender Zerlegung des Gebirges (infolge des geringeren Trennflächenabstandes) sinken die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung, die Keilhöhe (Höhe des bewegten Bereichs) und das Keilvolumen.

Schlagworte: Keilgleiten, Trennflächensystem, Diskrete-Element-Methode (DEM), Grenzgleichgewicht, Felsböschung

Abstract

Wedge sliding is one of the most common failure types in rock slopes, especially in slopes with well-developed joint systems. This is particularly relevant for foundations located near rock slopes. In this thesis, an example published by Wyllie (1992) was used and subjected to detailed analysis. The rock wedge analyzed is defined by two intersecting joint planes and a tension crack along the top of the wedge.

To study the effect of joint spacing and cohesion on the bearing capacity, two software programs with different calculation methods were used. The first program, SWEDGE (developed by Rocscience), is based on the limit equilibrium method and considers rock properties such as cohesion and friction angle, but not joint spacing. The second program, 3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code), developed by Itasca Consulting Group, uses the distinct element method (DEM) and includes both rock properties and joint spacing in detail when analyzing the failure mechanism.

Several wedge models were analyzed in the study. First, the largest possible wedge, formed by the intersecting joint planes, was examined. Then, joint spacings of 3 m, 2 m, 1.5 m, and 1 m were evaluated, along with cohesion values of 100 kPa for the first joint plane and 50 kPa for the second joint plane. These cohesion values were then doubled, and the analysis was repeated. This approach allowed for an assessment of the influence of joint spacing and cohesion on contact stresses.

In addition to the bearing capacity, the sliding wedge height and wedge volume were also determined. The effect of joint spacing on the failure mechanism was further analyzed.

The results show that joint spacing significantly affects the bearing capacity. As the rock mass becomes more fragmented (due to smaller joint spacing), the bearing capacity, the wedge height (height of the moving area), and the wedge volume all decrease.

Keywords: wedge sliding, joint system, distinct element method (DEM), limit equilibrium, rock slope

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Klassifikation von Gesteinen	9
2.2	Gesteinseigenschaften	10
2.3	Trennflächen	10
2.4	Kluftsysteme	12
2.5	Gebirge und Gebirgsart	12
2.6	Gebirgsdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trennflächenneigung	13
2.7	Rechnerische Untersuchung der Standsicherheit einer Felsböschung	14
3	Versagensmechanismen von Felsböschungen	16
3.1	Gleiten	16
3.2	Keilgleiten	17
3.3	Kippen von Kluftkörpern	17
3.4	Rotationsgleiten	18
4	Berechnungsmethoden von SWEDGE und 3DEC	19
4.1	SWEDGE	19
4.2	3DEC	20
5	Untersucher Felskeil	21
6	Modellierung	24
6.1	Modellierung mittels Grenzgleichgewichtsverfahren (SWEDGE)	24
6.2	Modellierung mittels DEM (3DEC)	25
7	Durchgeführte Untersuchungen	34
7.1	Untersuchungen mit SWEDGE	34
7.1.1	Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 100 und 50 kPa	34
7.1.2	Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 200 und 100 kPa	34
7.2	Untersuchungen mit 3DEC	35
7.2.1	Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 100 und 50 kPa	35
7.2.2	Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 200 und 100 kPa	50
8	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	66
8.1	Analyse der mittels Grenzgleichgewichtsverfahren (SWEDGE) ermittelten Ergebnisse	66
8.2	Analyse der mittels 3DEC ermittelten Ergebnisse	68
8.2.1	Ergebnisse mit Kohäsionseinstellungen von 100/50 kPa	68
8.2.2	Ergebnisse mit Kohäsionseinstellungen von 200/100 kPa	70
9	Gegenüberstellung der Ergebnisse	73
9.1	Vergleich der ermittelten maximalen Sohldruckspannungen	73

9.2	Vergleich der ermittelten Keilhöhen	76
9.3	Vergleich der ermittelten Keilvolumina	77
9.4	Vergleich der Versagensmechanismen	78
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	80
10.1	Zusammenfassung	80
10.2	Schlussfolgerung und Ausblick	81

Kapitel 1

Einleitung

Keilgleiten ist eine der häufigsten Versagensarten in geotechnischen Konstruktionen, insbesondere bei Böschungen, die durch gut entwickelte Kluftsysteme gekennzeichnet sind. Diese Problematik hat erhebliche Auswirkungen auf die Stabilität und Sicherheit von Bauwerken und geotechnischen Projekten. Studien von Hoek und Bray (1981) zeigen, dass Keilgleiten besonders in geologisch komplexen Umgebungen mit gut entwickelten Kluftsystemen auftritt. Diese Erkenntnisse sind nach wie vor relevant, da Ingenieure und Planer weiterhin mit der Stabilität von Felsböschungen konfrontiert sind. Wyllie (1992) betont in *Foundations on Rock*, dass eine präzise Analyse von Felsböschungen unerlässlich ist, um die Stabilität von Keilblöcken zuverlässig beurteilen zu können.

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht den Einfluss des Trennflächenscharenabstands und der Kohäsion auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung in Felsböschungen. Dabei werden sowohl die Abstände der Trennflächenscharen als auch die mechanischen Eigenschaften des Gesteins und deren Auswirkungen auf die Sohldruckspannungen analysiert. Ein zentrales Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, wie die Konfiguration der Trennflächen – insbesondere deren Abstand und Kohäsion – das Verhalten und die Stabilität der Keilblöcke beeinflusst. Zudem wird die Variation der abgleitenden Keilhöhe und des Keilvolumens in Abhängigkeit vom Trennflächenscharenabstand untersucht, um den Zusammenhang zwischen diesen Faktoren und der maximal aufnehmbaren Sohldruckspannung zu verdeutlichen.

Zur Analyse dieser Fragestellungen werden zwei Softwareprogramme verwendet, die unterschiedliche Berechnungsmethoden zur Untersuchung von Keilgleiten bieten. Das erste Programm, SWEDGE, entwickelt von Rocscience, basiert auf der Grenzgleichgewichtsmethode und berücksichtigt keine detaillierten Trennflächenscharenabstände. Diese Methode eignet sich gut für schnelle Berechnungen, bietet jedoch nur begrenzte Einblicke in die genaue Trennflächenkonfiguration. Das zweite Programm, 3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code), entwickelt von der Itasca Consulting Group, verwendet die Diskrete-Element-Methode (DEM). Diese ermöglicht eine detaillierte Modellierung der Trennflächen und Kluftabstände und erlaubt so eine präzise Analyse der Auswirkungen der Trennflächengeometrie auf die Stabilität des Keilblocks.

Die Untersuchung umfasst die Analyse mehrerer Keilmodelle. Zunächst wird das Keilmodell betrachtet, das infolge der keilbildenden Trennflächen entsteht. Anschließend werden Trennflächenscharen mit Abständen von 3 m, 2 m, 1,5 m und 1 m untersucht. Diese Untersuchungen werden zunächst mit Kohäsionswerten von 100 kPa für die erste Keilfläche und 50 kPa für die zweite Keilfläche durchgeführt. Danach werden die Kohäsionswerte verdoppelt, sodass in der zweiten Untersuchung die Kohäsion auf 200 kPa für die erste Keilfläche und 100 kPa für die zweite Keilfläche erhöht wird. Die Ergebnisse werden grafisch dargestellt, um die Auswirkungen der Trennflächenscharenabstände und der Kohäsion auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung zu visualisieren. Ziel der Untersuchung ist es, ein besseres Verständnis des Einflusses des Trennflächenscharenabstands sowie der Veränderung der Kohäsion auf die Sohldruckspannung zu erlangen. Zudem soll der Zusammenhang zwischen Sohldruckspannung, Keilhöhe, Keilvolumen und dem abgleitenden Keilgefüge aufgezeigt werden.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die Diplomarbeit zum Thema Versagensmechanismus Keilgleiten bei Felsböschungen behandelt. Zentrale geotechnische Begriffe werden definiert, einschließlich der Eigenschaften von Gestein, der Trennflächenscharen und deren Abständen sowie der Kluftsysteme. Die Konzepte der Kohäsion und des Reibungswinkels werden erläutert und deren Einfluss auf die Stabilität von Keilblöcken beschrieben. Darüber hinaus werden verschiedene Versagensarten vorgestellt, wobei der Fokus auf dem Keilgleiten liegt. Abschließend wird die Berechnung von Sicherheitsfaktoren behandelt, insbesondere unter Verwendung der Fellenius-Methode und des Mohr-Coulomb-Kriteriums, um die Stabilität von Keilblöcken zu bewerten.

2.1 Klassifikation von Gesteinen

Die ÖNORM B 2203-1:2001 bietet eine strukturierte Klassifikation von Gesteinen für Erdbauarbeiten und Landschaftsbau. Sie dient der einheitlichen Beschreibung von Gesteinen, insbesondere im Hinblick auf ihre physikalischen Eigenschaften und geotechnische Eignung. Laut ÖNORM B 2203-1 werden die folgenden Begriffe erläutert:

Festgestein: Festgestein ist ein Mineralgemenge, dessen Eigenschaften hauptsächlich durch seine physikalisch-chemische Bindung bestimmt werden.

Lockergestein: Lockergestein bezeichnet eine Anhäufung von anorganischen und verschiedenen körnigen Feststoffen, die fallweise auch organische Beimengungen enthalten kann. Die Eigenschaften von Lockergestein werden vorwiegend durch die Kornzusammensetzung, die Lagerungsdichte und den Wassergehalt bestimmt.

Gebirge: Unter Gebirge wird ein Teil der Erdkruste verstanden, der aus Festgestein (Fels) oder Lockergestein (Boden) besteht. Dazu zählen auch die Anisotropien, Trennflächen sowie Hohlräume, die mit flüssigen oder gasförmigen Bestandteilen gefüllt sein können.

2.2 Gesteinseigenschaften

Nach Terzaghi und Peck (1967) erläutern die Autoren in ihrem Buch "Soil Mechanics in Engineering Practice" eine Vielzahl von Gesteinseigenschaften, die für die Ingenieurgeologie von wesentlicher Bedeutung sind. Sie klassifizieren Gesteine anhand der folgenden Merkmale:

Kohäsion: Kohäsion ist die innere Festigkeit eines Gesteins, die durch die Bindungskräfte zwischen den Gesteinspartikeln bestimmt wird. Sie spielt eine wesentliche Rolle bei der Stabilität von Gesteinsmassen, insbesondere bei der Entstehung von Rutschungen oder Keilgleiten.

Reibungswinkel: Der Reibungswinkel ist der Winkel, unter dem Gesteinspartikel gegen Scherkräfte Widerstand leisten. Er wird durch die interne Reibung zwischen den Partikeln bestimmt und hat einen direkten Einfluss auf die Scherfestigkeit und somit auf die Stabilität von Gesteinsmassen.

Porosität: Die Porosität beschreibt den Anteil des Volumens eines Gesteins, der von Hohlräumen oder Poren eingenommen wird. Sie beeinflusst die mechanischen Eigenschaften und die Stabilität des Gesteins.

Permeabilität: Permeabilität ist die Fähigkeit eines Gesteins, Flüssigkeiten oder Gase durchzulassen. Sie beeinflusst die Wasseraufnahme und -abgabe und kann die Festigkeit und Stabilität von Gesteinsmassen beeinträchtigen.

Verwitterungsgrad: Der Verwitterungsgrad beschreibt den Zustand eines Gesteins im Hinblick auf seine physikalische und chemische Zersetzung durch Umwelteinflüsse.

Kluft- und Schichtstruktur: Diese beschreibt die räumliche Anordnung von Brüchen, Kluften und Schichten im Gestein. Solche Strukturen beeinflussen die Stabilität und das Verhalten des Gesteins unter Last.

2.3 Trennflächen

Hoek und Bray (1981) definieren Trennflächen als geologische Schwächezonen innerhalb von Gesteinsmassen, die das kontinuierliche Gebirge unterbrechen. Diese Trennflächen, auch als Diskontinuitätsflächen bezeichnet, beeinflussen direkt die Verformbarkeit, Festigkeit und Durchlässigkeit des Gebirges. Sie unterteilen diese unterbrochenen Flächen hinsichtlich ihrer Entstehung und Größe in verschiedene Arten von Trennflächen. Eine Übersicht der Trennflächenarten, einschließlich ihrer Diskontinuitätskennzeichnung und Entstehung, ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Trennflächenart	Diskontinuität	Kennzeichnung	Entstehung
Sedimentäre Schichtung (ss)	Schichtung	Lagenweiser Aufbau von Sedimentgesteinen, gekennzeichnet durch verschiedene Bedingungen.	Entsteht durch Ablagerungen „Schicht auf Schicht“, beeinflusst durch Wasserspiegel.
Schieferung (s)	Schieferung	Plattige oder stengelartige Anordnung von Mineralen (z.B. Glimmer).	Resultiert aus Stoffumlagerungen unter Druck/Temperatur.
Fugen und Klüfte	Bruchflächen	Trennflächen im Gestein mit aufgehobenem Zusammenhalt.	Entstehen durch Überbeanspruchung (z.B. Tektonik).
Schicht- und Schieferungsklüfte	Spezielle Trennflächen	Entstehen durch das „Aufgehen“ von Schichtflächen.	Resultat mechanischer Einwirkungen, die Strukturen destabilisieren.

Tab. 2.1: Arten von Trennflächen

Attewell und Farmer (2012) untersuchen die Auswirkungen der Orientierung von Trennflächen auf die geotechnische Stabilität und betonen die entscheidende Rolle der Raumstellung dieser Trennflächen für die Verformbarkeit, Standsicherheit und das Gleitverhalten des Gebirges. Die Orientierung der Trennflächen beeinflusst erheblich die Eigenschaften des Gebirges und bestimmt maßgeblich dessen Standsicherheit, Gleitverhalten sowie Druckfestigkeit.

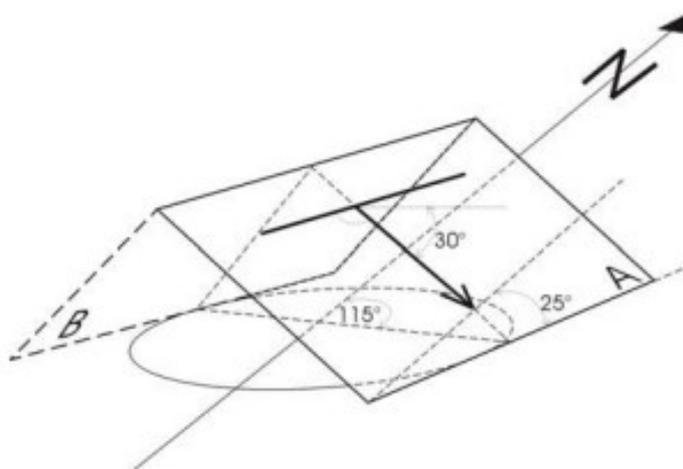


Abb. 2.1: Orientierung von Trennflächen mittels Kompassmessung (R. Poisel 2020/2021).

Die Orientierung von Trennflächen wird präzise durch den Fallwinkel, die Fallrichtung sowie das Streichen beschrieben. Während der Fallwinkel den Neigungsgrad der Trennfläche angibt,

beschreibt das Streichen die horizontale Ausrichtung der Fläche. In der obenstehenden Abbildung (Abb. 2.1) wird die Orientierung einer Trennfläche mittels Kompassmessung schematisch dargestellt.

2.4 Kluftsysteme

Goodman (1980) behandelt in seinem Buch "Introduction to Rock Mechanics" die Bedeutung von Kluftsystemen in Felsmassen und deren Einfluss auf die Stabilität von Bauwerken wie Tunneln und Stützmauern. Er erklärt, wie Kluftsysteme als Diskontinuitäten die mechanischen Eigenschaften von Gesteinen beeinflussen. Die Abstände zwischen Kluftsystemen können variieren: Weitständige Kluftsysteme haben Abstände von über 2 Metern und treten oft in sehr festen Gesteinen wie Granit oder Basalt auf. Mittelständige Kluftsysteme weisen Abstände von 0,6 bis 2 Metern auf und sind typisch für weniger dichte Gesteine wie Sandstein oder Schiefer. Engständige Kluftsysteme haben Abstände kleiner als 0,6 Meter und finden sich häufig in stark zerklüfteten oder verwitterten Gesteinen. Sehr engständige Kluftsysteme, bei denen die Abstände kleiner als 20 cm sind, treten oft in stark deformierten oder schwachen Gesteinen wie Sedimentgesteinen oder stark tektonisch beanspruchten Bereichen auf.

2.5 Gebirge und Gebirgsart

Nach der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) (2013), die die Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb herausgegeben hat, werden nachstehende Begriffe wie folgt definiert:

Gebirge: Teil der Erdkruste, aufgebaut aus Gestein(en), einschließlich Trennflächen und Hohlräumen mit Füllungen aus flüssigen oder gasförmigen Bestandteilen; oft mit anisotropen Eigenschaften.

Gebirgsart: Gebirgsvolumen, das in seinen maßgebenden, das geotechnische Verhalten beeinflussenden Eigenschaften innerhalb einer festzulegenden Bandbreite gleichartig ist.

Anmerkung: Der Größenmaßstab der räumlichen Erstreckung einer Gebirgsart ist im Rahmen der Planung zu definieren und hat den Größenbezug zum geplanten Bauwerk zu berücksichtigen (vgl. ebd.).

2.6 Gebirgsdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Trennflächenneigung

Die Gebirgsdruckfestigkeit, wie von Wittke (2013) erläutert, hängt von verschiedenen Faktoren ab, insbesondere der Gesteinsart, der Porosität und der tektonischen Belastung. Auch die Orientierung der Trennflächen spielt eine wichtige Rolle, da Trennflächen, die in bestimmten Winkeln zur Hauptspannungsrichtung stehen, die Stabilität des Gebirges beeinträchtigen können. Zur Bestimmung der Festigkeit wird häufig das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium herangezogen. Wittke (2013) beschreibt, dass dieses Kriterium davon ausgeht, dass die Gesteinsschichten miteinander verwachsen sind und eine Kohäsion aufweisen. Sobald die Kohäsion zwischen den Trennflächen überwunden wird, bleibt eine Restscherfestigkeit, die sich aus dem Reibungswinkel zwischen den Trennflächen ableitet. In der Abbildung (Abb. 2.2) wird gezeigt, wie die Gebirgsfestigkeit von der Orientierung der Trennflächen und der Belastungsrichtung abhängt. Die Festigkeit ist am größten, wenn die Belastungsrichtung parallel oder orthogonal zur Trennflächenorientierung verläuft, da in diesen Ausrichtungen die Trennflächen die Spannungen am effektivsten aufnehmen können. Bei einem Winkel von 60° zur Belastungsrichtung ist die Festigkeit am niedrigsten, da die Spannungen nicht optimal ausgerichtet sind und das Gleitverhalten der Gesteinsflächen begünstigt wird, was zu einer verringerten Scherfestigkeit führt.

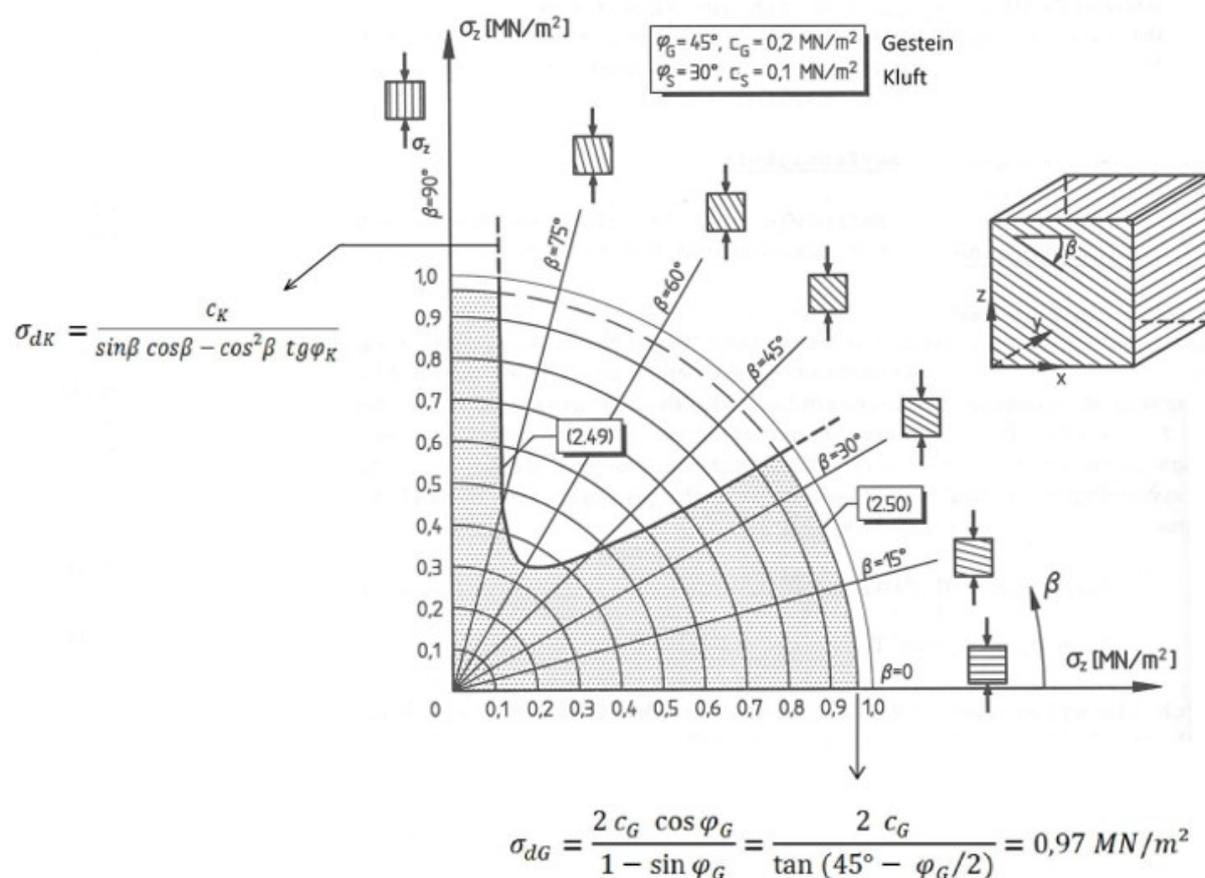


Abb. 2.2: Gebirgsdruckfestigkeit beeinflusst durch Trennflächenorientierung (Wittke, 2013)

2.7 Rechnerische Untersuchung der Standsicherheit einer Felsböschung

Mohr-Coulombsche Bruchbedingung

Mohr (1900) formulierte, dass das Versagen von Materialien bei Scherung durch die Kombination von Scherspannung und Normalspannung beschrieben werden kann. Er führte den „Mohr’schen Spannungskreis“ ein, um Spannungen zu visualisieren und zu analysieren. Das klassische Mohr-Coulomb-Kriterium, das für die Beschreibung des Versagens von Materialien unter Scher- und Normalbelastungen verwendet wird, kann in folgender Form ausgedrückt werden:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi)$$

Die geometrische Interpretation des Mohr-Coulomb-Kriteriums wird häufig durch den Mohr-Kreis veranschaulicht. Der in der nachstehenden Abbildung (Abb. 2.3) visualisierte Mohr-Kreis zeigt, wie die Scherspannung (τ) und die Normalspannung (σ_n) zusammenwirken, um die Bedingungen für das Materialversagen zu beschreiben.

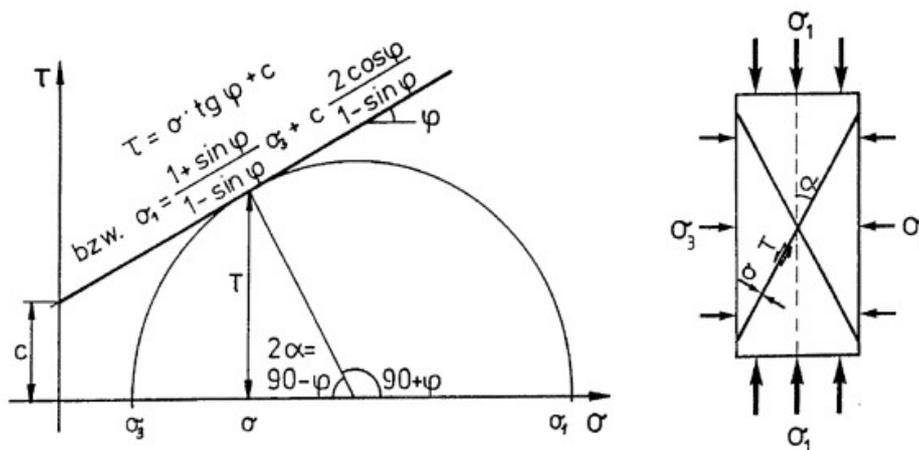


Abb. 2.3: Mohr-Coulombsches Bruchkriterium (aus Preh, 2022)

Berechnung des Sicherheitsfaktors

Fellenius (1936) entwickelte die sogenannte „Fellenius-Methode“, ein Verfahren zur Bewertung der Stabilität von Böschungen und anderen geotechnischen Strukturen. Diese Methode basiert auf der Analyse von Kräften und Momenten, um den Sicherheitsfaktor zu berechnen. Sie nimmt an, dass das Versagen entlang einer gleitenden Fläche erfolgt und berücksichtigt sowohl die Scherfestigkeit des Materials als auch die Geometrie der Schichtungen. Der Sicherheitsfaktor FoS gibt an, wie stabil die Struktur gegenüber einem möglichen Versagen ist und stellt das Verhältnis von stabilisierenden zu destabilisierenden Kräften dar.

Die grundlegende Formel zur Berechnung des Sicherheitsfaktors FoS lautet:

$$FoS = \frac{F_{\text{destabilisierend}}}{F_{\text{stabilisierend}}} \quad (2.1)$$

In dieser Formel beschreibt $F_{\text{destabilisierend}}$ die Kräfte, die das Gebirgssystem destabilisieren, und $F_{\text{stabilisierend}}$ die Kräfte, die stabilisierend wirken. Diese Kräfte hängen von Parametern wie der Kohäsion, dem Reibungswinkel φ , der Länge der Gleitfläche und dem Gewicht des Felsenmaterials ab.

Kapitel 3

Versagensmechanismen von Felsböschungen

In diesem Kapitel wird die Standsicherheit von Felsböschungen thematisiert und die häufigsten Versagensarten erläutert. Es wird untersucht, welche Versagensart eintritt und unter welchen Bedingungen eine Felsböschung instabil wird. Zudem wird der Zeitpunkt und die Umstände des Versagenseintritts behandelt, um ein besseres Verständnis der Mechanismen zu vermitteln, die zur Instabilität führen. Welche Versagensart eintritt, ist maßgeblich von der Ausrichtung der Hangfläche und der Orientierung der Diskontinuität abhängig (Hoek & Bray, 1981).

3.1 Gleiten

Das Abgleiten von Kluffkörpern in Felsböschungen tritt häufig auf, insbesondere wenn die Trennflächen sichtbar sind und der Winkel der Schichten flacher als der Neigungswinkel der Böschung ist. In solchen Fällen können Scherkräfte die Festigkeit der Trennflächen überschreiten, was zu Abrutschungen führt. Witterungseinflüsse wie Regen erhöhen den Wasserdruck in den Scherfugen und verringern den Scherwiderstand. Zudem beeinflusst die Neigungsrichtung der Trennflächen die Standsicherheit. Für einen planaren Ausfall muss der Winkel zwischen der Gleitfläche und der Kluffkörperausrichtung mindestens 20 Grad betragen (vgl. Wyllie, 1998).

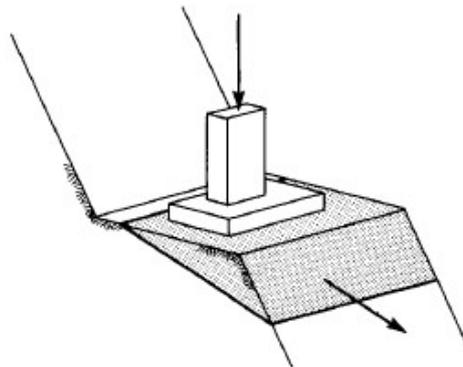


Abb. 3.1: Gleiten eines Kluffkörpers auf einer Trennfläche (Wyllie, 1998)

3.2 Keilgleiten

Keilversagen tritt auf, wenn ein Kluftkörper auf zwei Trennflächen gleitet. Dieses Versagen geschieht, wenn der Winkel zwischen den Schnittpunkten der beiden Kluftscharen kleiner ist als der Neigungswinkel der Böschung. Die Anordnung der Trennflächen kann jedoch die Standsicherheit des Keils verbessern. Insbesondere kann die Position der zweiten Trennfläche das Abrutschen des Blocks in Richtung der Falllinie verhindern (vgl. Wiesinger, 2023).

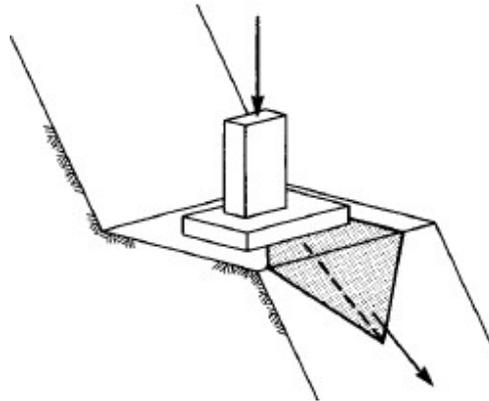


Abb. 3.2: Gleiten eines Kluftkörpers auf zwei Trennfläche (Wyllie, 1998)

3.3 Kippen von Kluftkörpern

Beim Kippen lösen sich Teile des Gesteins in einer Rotationsbewegung vom Gebirge, wenn die Trennflächen steil und parallel zum Hang stehen. Der Schwerpunkt des kippenden Gesteinspakets liegt über der Rotationsachse, was zu Biegebeanspruchungen und Zugrissen führen kann. Kluftwasser kann zusätzlichen Druck erzeugen und die Stabilität beeinträchtigen. Die Geometrie des Gesteins und die Eigenschaften der Trennflächen sind entscheidend für die Standsicherheit (vgl. Waibel, 2008). Es gibt zwei Arten des Kippens:

Blockkippen: Hierbei lösen sich große Gesteinsblöcke, die intakt bleiben, von der Felswand. Die Stabilität hängt von der Größe des Blocks und der Neigung der Trennflächen ab.

Biegekippen: Diese Form des Kippens führt zu Verformungen des Gesteins. Biegebeanspruchungen können Risse verursachen, insbesondere bei kleineren Gesteinsfragmenten. Die Struktur der Trennflächen spielt dabei eine wesentliche Rolle.

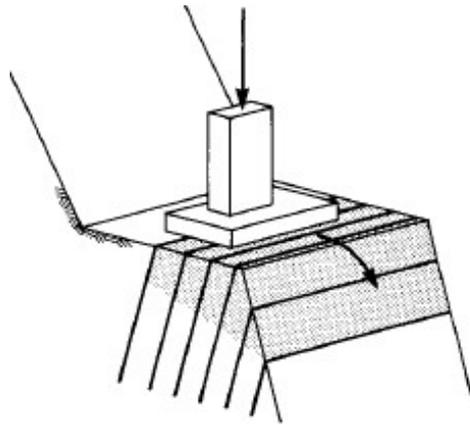


Abb. 3.3: Kippen von tafelförmigen Klüftkörpern (Wyllie, 1998)

3.4 Rotationsgleiten

Diese Versagensarten treten bei stark zerklüftetem und verwittertem Gestein auf, dessen Klüftkörper wesentlich kleiner sind als die Böschung. Aufgrund des hohen Zerlegungsgrads weist das Gestein eine geringe Festigkeit auf, während die räumliche Anordnung der Trennflächen nur einen geringen Einfluss hat. Dieses Verhalten ähnelt dem Versagen einer Lockergesteinsböschung, das in Form eines Gleitkreises erfolgt (vgl. Poisel und Preh, 2004).

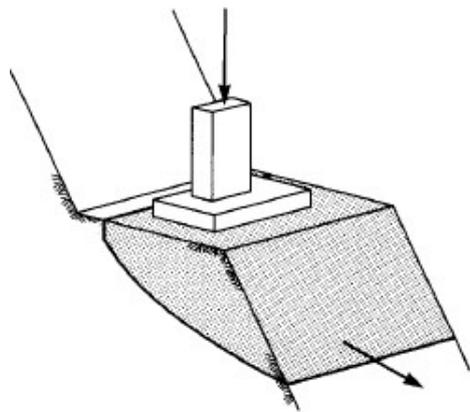


Abb. 3.4: Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen Gleitfläche (Wyllie, 1998)

Kapitel 4

Berechnungsmethoden von SWEDGE und 3DEC

In diesem Kapitel werden die Berechnungsmethoden der Softwareprogramme SWEDGE und 3DEC behandelt, die im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendet wurden. Während SWEDGE hauptsächlich zur Stabilitätsanalyse von Felsböschungen dient und keine Verformungen berechnen kann, bietet 3DEC umfassende Möglichkeiten zur Analyse sowohl der Stabilität als auch der Verformungen in geotechnischen Anwendungen. Beide Programme sind essentielle Werkzeuge zur Bewertung von Felsböschungen und der Felsmechanik.

4.1 SWEDGE

SWEDGE ist eine Software zur Analyse der Stabilität von Keilen in Felswänden, die auf den von Hoek und Bray (1981) veröffentlichten Gleichungen basiert. Diese Gleichungen sind entscheidend für die Berechnung des Sicherheitsfaktors (FoS, „Factor of Safety“), der das Verhältnis zwischen stabilisierenden und treibenden Kräften beschreibt, die auf einen potenziellen Felskeil wirken. Die Kräfte wirken dabei im Schwerpunkt des Keils, was eine präzise Analyse der Stabilität ermöglicht. Der Sicherheitsfaktor wird verwendet, um die Stabilität eines Keils zu bewerten. Ein FoS größer als 1 ($FoS > 1$) zeigt an, dass die stabilisierenden Kräfte die treibenden Kräfte überwiegen, wodurch der Keil als stabil gilt und unter den gegebenen Bedingungen nicht versagen wird. Im Gegensatz dazu weist ein FoS kleiner als 1 ($FoS < 1$) auf eine instabile Situation hin, in der der Keil wahrscheinlich versagen wird. Die Berechnung des FoS erfolgt durch die Analyse verschiedener Faktoren, darunter die Geometrie des Keils, Materialeigenschaften und die Lasten, die auf ihn einwirken. SWEDGE bietet mehrere Analysemethoden zur Beurteilung der Keilstabilität. Bei der deterministischen Analyse wird angenommen, dass alle Eingabeparameter genau bekannt sind, was es ermöglicht, den Sicherheitsfaktor für einen einzelnen Keil zu berechnen. In Verbindung mit dieser Methode kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, bei der einzelne Parameter innerhalb eines definierten Bereichs variiert werden, um deren Einfluss auf den Sicherheitsfaktor zu untersuchen. Zusätzlich ermöglicht die probabilistische Analyse die Eingabe statistischer Informationen, um Unsicherheiten in der Fugenausrichtung und Scherfestigkeit zu berücksichtigen. Dies führt zu einer Verteilung des Sicherheitsfaktors und zur Berechnung einer Ausfallwahrscheinlichkeit. Ein weiteres wichtiges Merkmal von SWEDGE ist die Kombinationsanalyse, bei der mehrere Kluftebenausrichtungen definiert werden können. Zudem sind verschiedene Kluftmodelle möglich, wie beispielsweise das Modell von Barton und Bandis. Dieses Modell berücksichtigt die Abhängigkeit der Spannungen vom Verschiebungsweg und beschreibt das elastisch-plastische Verhalten von Gesteinsklüften. Es ermöglicht eine realistischere Simulation des Scher- und Normalverhaltens von Klüften unter Belastung und berücksichtigt spezifische Eigenschaften von Gesteinsklüften (vgl. Rocscience, n.d).

4.2 3DEC

Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) wurde von Cundall in den 1960er Jahren entwickelt, um das Verhalten von Felsen unter verschiedenen Belastungen zu simulieren. Dabei wird der Felsen als ein System aus einzelnen Blöcken betrachtet, die miteinander interagieren. Dies unterscheidet sich von der traditionellen Kontinuumsmechanik, die den Felsen als durchgehendes Material behandelt. Cundall und Strack (1979) stellten ein Modell vor, das speziell die Wechselwirkungen zwischen Blöcken beschrieb. Dieses Modell wurde später in der Software 3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code) umgesetzt, die speziell für die dreidimensionale Simulation von Blocksystemen in Felsen entwickelt wurde. In 3DEC werden die Blöcke durch ihre Interaktionen modelliert, und es wird berücksichtigt, wie sie sich bewegen und miteinander in Kontakt treten. Für starre Blöcke wird die Bewegung berechnet, ohne dass eine Verformung des Materials angenommen wird. Diese Berechnungen sind besonders nützlich, wenn die Bewegungen der Blöcke klein sind und vor allem entlang von Rissen oder Brüchen auftreten. Für verformbare Blöcke wird die Deformation des Materials berücksichtigt. Hierbei wird jeder Block in kleinere Teile unterteilt, um das Verhalten bei Belastung besser zu verstehen. Diese Verformungen werden mit elastischen und elasto-plastischen Modellen beschrieben. Der Berechnungszyklus in 3DEC verwendet einen dynamischen Algorithmus, um die Bewegungen und Wechselwirkungen der Blöcke zu berechnen. Dieser Zyklus erfolgt in wiederholten Schritten (Steps), bei denen in jedem Schritt die Position und Bewegung der Blöcke unter Berücksichtigung der Kräfte an den Kontaktstellen berechnet und aktualisiert wird. Die neuen Positionen und Kräfte werden dann für den nächsten Berechnungsschritt verwendet. Der Berechnungszyklus wird in der nachstehenden Abbildung (Abb. 4.1) dargestellt. Diese Methode ermöglicht es, das Verhalten von Felsen unter verschiedenen Bedingungen realistisch zu simulieren und potenzielle Instabilitäten oder Ausfälle wie Erdbeben oder Felsstürze zu erkennen (vgl. Itasca, n.d).

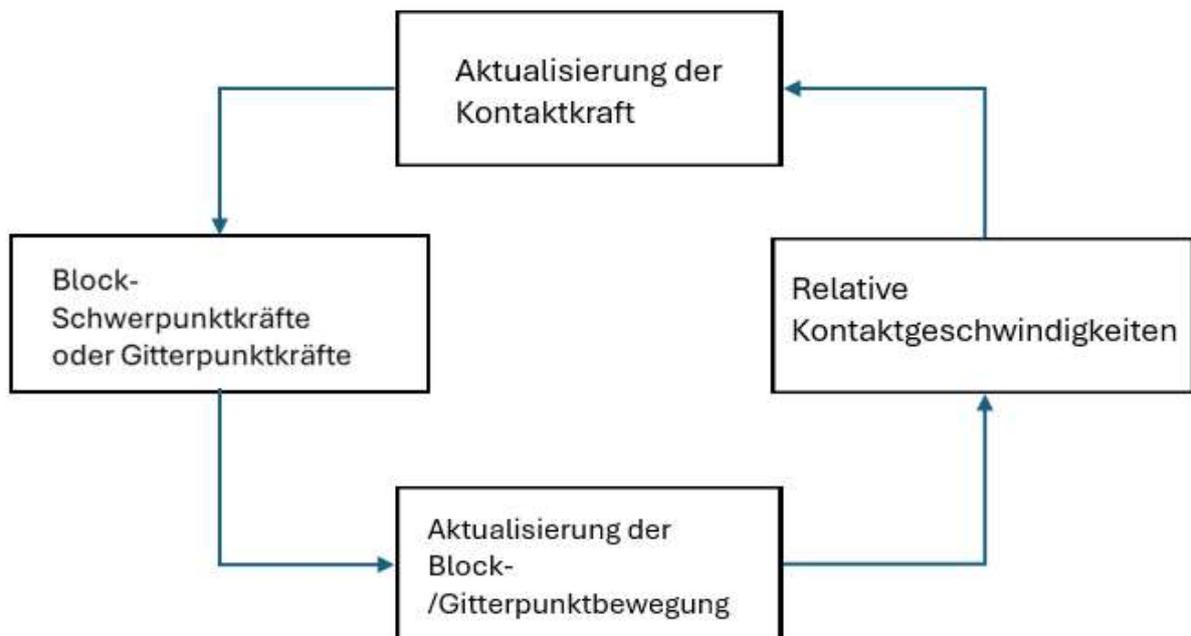


Abb. 4.1: Berechnungskreislauf der Diskreten-Elemente-Methode (Itasca, n.d)

Kapitel 5

Untersuchter Felskeil

Wyllie (2004) untersucht in seinem Buch *Foundations on Rock* auf Seite 187 im Beispiel 6.2 die Stabilitätsanalyse eines Keilblocks (wedge failure stability analysis), der als Fundament eines Brückenpfeilers dient. Dieser Brückenpfeiler übt eine vertikale Last von 4 MN auf den Keilblock aus. Die geologischen Verhältnisse werden durch zwei sich kreuzende Schichtflächen bestimmt. Insgesamt wird der Keilblock durch drei keilbildende Flächen gebildet: Keilfläche 1 hat einen Fallwinkel von 65° und eine Fallrichtung von 245° , Keilfläche 2 einen Fallwinkel von 85° und eine Fallrichtung von 135° , und die Zugrissfläche bildet die hintere Begrenzung des Keils mit einem Fallwinkel von 80° und einer Fallrichtung von 180° . Zusätzlich beeinflussen zwei weitere Flächen die Geometrie und Stabilität des Keilblocks: die Böschungsfläche, die die äußere Begrenzung des Hangs definiert, mit einem Fallwinkel von 75° und einer Fallrichtung von 200° , sowie die obere Keilfläche, die parallel zur Böschung verläuft, mit einem Fallwinkel von 0° und einer Fallrichtung von 200° . Das zugehörige Gefügediagramm (Abb. 5.1) zeigt die räumliche Orientierung der Keilflächen sowie der Zugrissfläche und veranschaulicht die Geometrie des Keils im Raum.

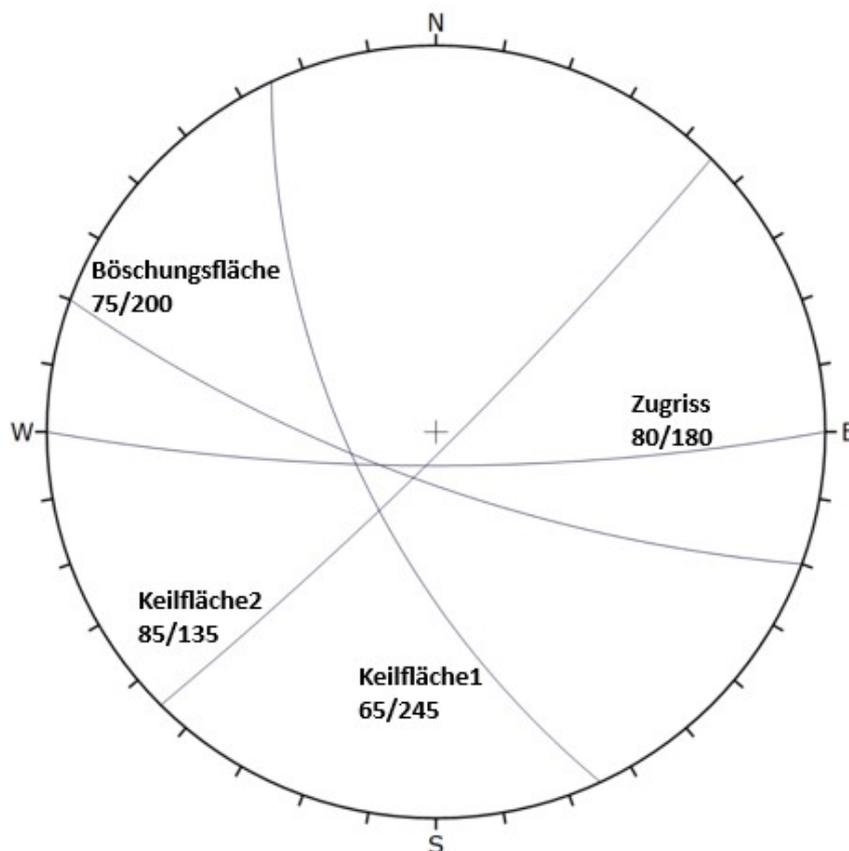


Abb. 5.1: Gefügediagramm

Die Geometrie des Keilmodells setzt sich wie folgt zusammen: Die vertikale Höhe des Keils beträgt 50 Meter, und der Abstand zur Spannungsrisssfläche entlang der oberen Schichtfläche misst 6 Meter. Die Scherfestigkeit der Trennflächen wird durch den Reibungswinkel und die Kohäsion bestimmt. Da eine der Trennflächen mit Tonfüllung versehen ist, ist ihre Scherfestigkeit geringer als die der sauberen Fuge der anderen keilbildenden Fläche. Das Gewicht des Keils wird basierend auf dem Volumen und der Dichte des Gesteins berechnet, die 25 kN/m^3 beträgt, was 2500 kg/m^3 entspricht. Es wird angenommen, dass das Fundament trocken ist, sodass kein zusätzlicher Wasserdruck auf den Keil wirkt. Die Stabilisierungsanalyse erfolgt durch Berechnung der Kräfte und Momente, die auf den Keilblock wirken. Die vertikale Last von 4 MN verstärkt die potenzielle Instabilität. Der Sicherheitsfaktor dieser Konstruktion ergibt sich aus dem Verhältnis der haltenden zu den treibenden Kräften. In diesem Beispiel nach Wyllie (2004) beträgt der Sicherheitsfaktor ohne auf den Keil wirkende Fundamentlast $1,73$. Wird jedoch die vertikale Fundamentlast angewendet, sinkt der Sicherheitsfaktor auf $1,2$. In der nachstehenden Abbildung (Abb. 5.2) wird das Keilmodell aus Beispiel 6.2 nach Wyllie (2004) visualisiert.

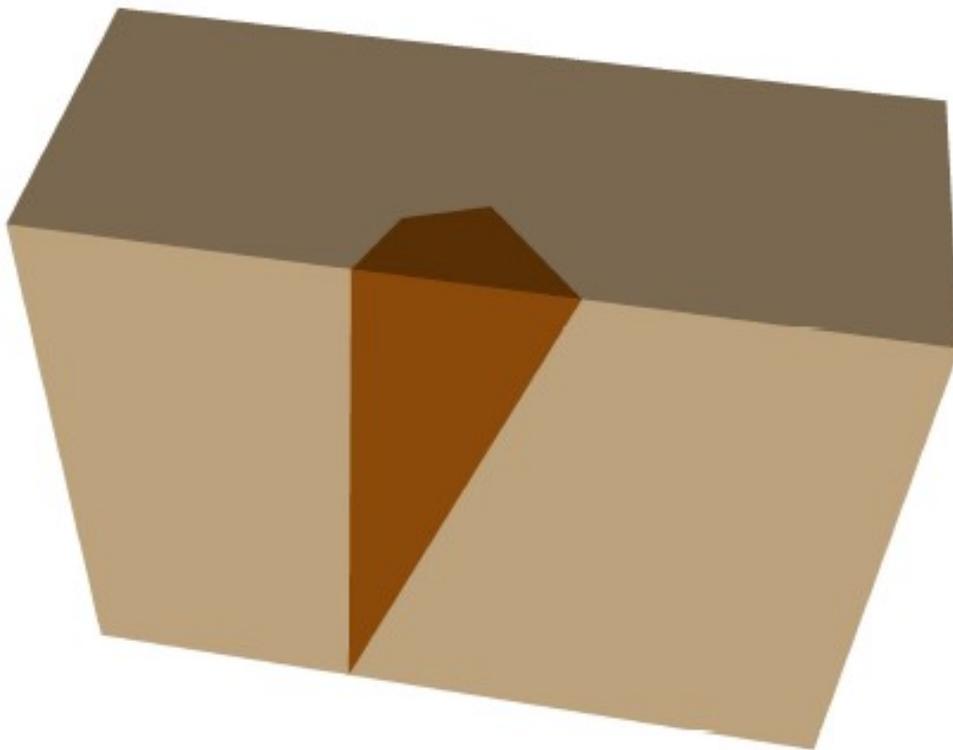


Abb. 5.2: Keilgeometrie in SWEDGE erstellt

In der nachstehenden Tabelle (Tab. 5.1) sind die wesentlichen Modellparameter des Keilblocks aufgelistet, die für die Stabilitätsanalyse verwendet werden. Die Tabelle enthält spezifische Werte für die keilbildenden Trennflächen, einschließlich der Reibungswinkel und der Kohäsionen. Die Winkel sind alle in Grad angegeben und die Kohäsion in kPa. Diese Parameter sind unter anderem für die Bewertung der Stabilität des Keilblocks von Bedeutung, da sie die geometrischen und mechanischen Eigenschaften der relevanten Flächen beschreiben.

Fläche	Fallwinkel [°]	Fallrichtung [°]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kPa]
Böschungfläche	75	200		
Obere Keilfläche	0	200		
Zugriss	80	180		
Keilfläche 1	65	245	35	100
Keilfläche 2	85	135	20	50

Tab. 5.1: Modellparameter des Keilblocks

Kapitel 6

Modellierung

6.1 Modellierung mittels Grenzwertverfahren (SWEDGE)

Für die Erstellung eines neuen Projekts wurde zunächst eine neue Datei in SWEDGE angelegt. Nach dem Öffnen erschien ein Standard-Keilmodell mit den Ansichten OBEN, VORNE, SEITE und PERSPEKTIVE, die eine umfassende visuelle Darstellung des Modells ermöglichten. Die Standardeingabedaten wurden durch spezifische Werte aus Wyllie (2004), Beispiel 6.2 ersetzt, um das Modell an die Anforderungen der geplanten Analyse anzupassen. Im Rahmen der deterministischen Analyse wurde die Geometrie der Hangfläche zunächst durch Festlegung von Neigung und Ausrichtung definiert. Anschließend wurden die Parameter der keilbildenden Trennflächen eingegeben, darunter Fallrichtung und Fallwinkel. Ergänzend wurden die Reibungswinkel und Kohäsionswerte für jede Trennfläche spezifiziert. Um zusätzliche Belastungen zu berücksichtigen, wurde eine Einzellast im Schwerpunkt des Keils eingebracht. Nach der vollständigen Eingabe aller relevanten Parameter wurde die Geometrie und Orientierung des Keils in der 3D-Keilansicht überprüft. Diese dreidimensionale Darstellung, kombiniert mit orthogonalen Projektionen, ermöglichte eine präzise visuelle Validierung der Modellparameter. Auf Basis der eingegebenen Daten berechnete SWEDGE automatisch den Sicherheitsfaktor (FoS). Die Ergebnisse, einschließlich des berechneten FoS, wurden im Keilinformationsfeld der Seitenleiste angezeigt. Zusätzlich bot der Info Viewer eine detaillierte Übersicht der Eingabe- und Ergebnisdaten. Das erstellte Keilmodell wird in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 6.1) dargestellt.

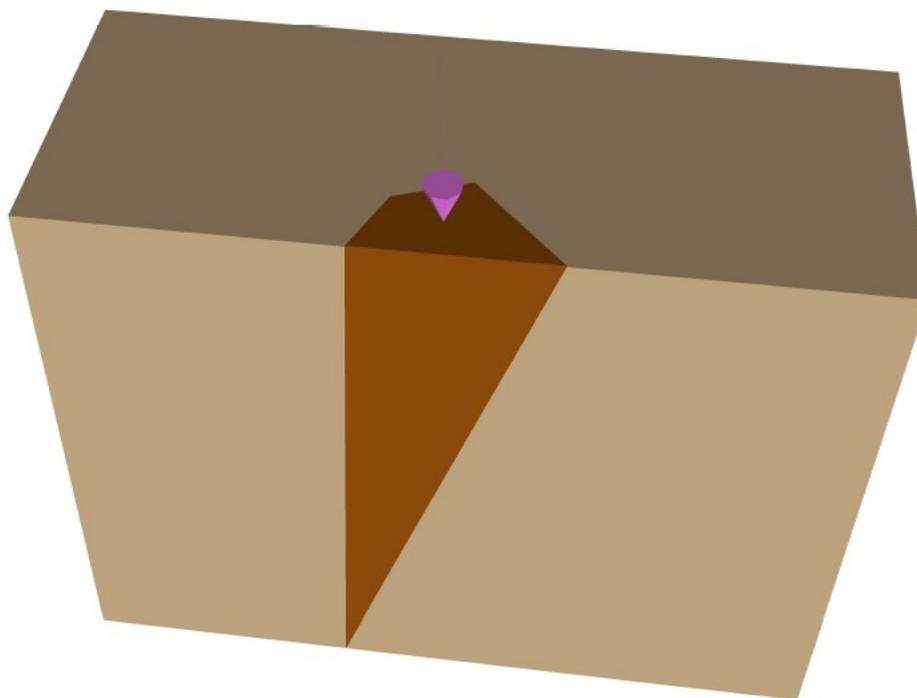


Abb. 6.1: Darstellung der Keilgeometrie unter Einwirkung einer Einzellast

6.2 Modellierung mittels DEM (3DEC)

Die Modellierung in 3DEC erfolgte durch ein Skript, das befehlsbasierte Eingaben mit FISH-Skripting (Fortran-ähnliche Programmiersprache) kombiniert. Bei der befehlsbasierten Modellierung werden Textbefehle direkt an 3DEC übermittelt, um die Modellgeometrie, die Materialeigenschaften und die Randbedingungen zu definieren. Das FISH-Skripting hingegen ermöglicht eine Automatisierung komplexer Modellierungsprozesse (vgl. Itasca, n.d.).

Im Folgenden wird der Modellierungsprozess anhand des in Abb. 6.5 dargestellten Eingabeskripts beschrieben: Die Modellierung beginnt mit der Konstruktion des Fundaments in Form eines rechteckigen Blocks mit den Abmessungen $9,8 \times 2,5 \times 1$ Meter. Der Block wird mit dem Befehl `block create brick 1.0 10.8 2 4.5 25 26` erzeugt. Dieser Block wird der Gruppe "Region 1" zugeordnet, einem räumlichen Bereich innerhalb des Modells. Im nächsten Schritt wird das Modell durch einen größeren Block mit den Abmessungen $80 \times 80 \times 55$ Meter erweitert, der den Untergrund simuliert. Dieser Block erstreckt sich von den Koordinaten $-40, 40, -40, 40, 40, -30$ und wird der Gruppe "Region 2" zugeordnet, die den Hauptbereich der Simulation darstellt. In der nachfolgenden Abbildung (Abb. 6.2) ist das Fundament, in grün eingefärbt, und das Untergrundmodell (Felswand rot dargestellt) dargestellt.

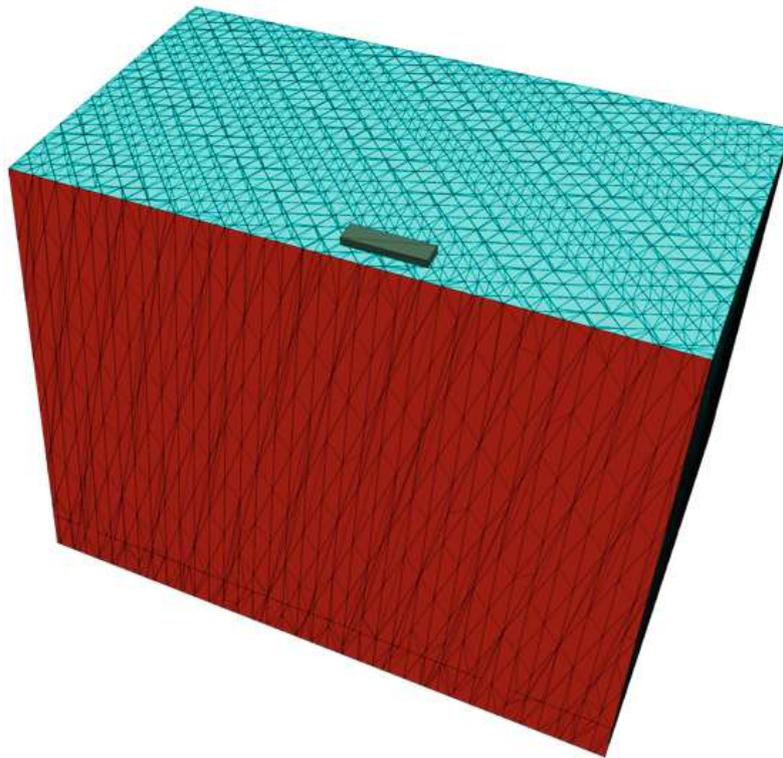


Abb. 6.2: Modellgeometrie mit aufliegender Fundamentplatte

Die eigentliche Modellgeometrie wird aus dem initialen Block mithilfe von Ebenen geschnitten. Die Felswand wird durch ihre Ebene mit einer Fallrichtung von 200° und einem Fallwinkel von 75° erzeugt. Die obere Begrenzung des Modells (Kopf der Felswand) wird mithilfe einer weiteren Ebene mit einer Fallrichtung von 200° und einem Fallwinkel von 0° erstellt. Diese Ebenen werden mit dem Befehl `block cut joint-set` in 3DEC erstellt. Nicht benötigte Bereiche oberhalb der relevanten Ebenen werden mit dem Befehl `block delete range plane above` entfernt. Anschließend werden die drei keilbildenden Trennflächenscharen mit den `block cut joint-set`-Befehlen erstellt. Diese haben Fallwinkel von 65° , 85° und 80° sowie Fallrichtungen von 245° , 135° und 180° für die Keilflächen 1 und 2 sowie den Zugriss. Die daraus entstehende Keilgeometrie wurde der Gruppe "Region 3" zugeordnet. Diese Region, die den größtmöglichen Keilblock repräsentiert, wird später im Modell ausgeblendet, da sie lediglich zum Vergleich des bewegten Bereichs mit der größtmöglichen Keilgeometrie notwendig ist.

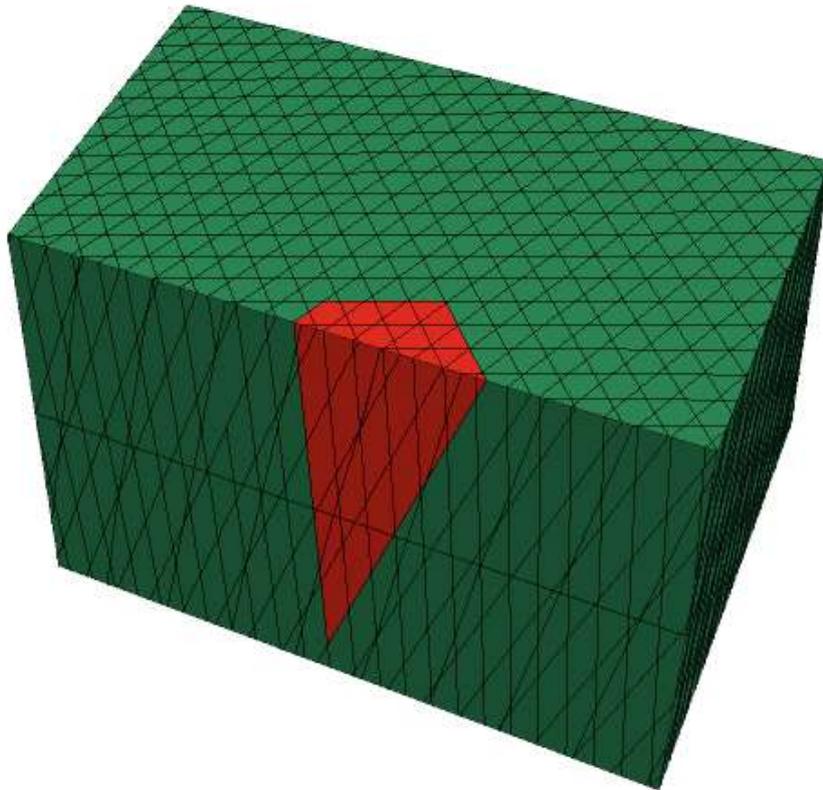


Abb. 6.3: Modell mit Keilausbildung laut Angabe

Zur Modellierung der Randbedingungen werden die Blöcke an den Randbereichen in X-, Y- und Z-Richtung fixiert. In der X-Richtung werden die Randbereiche von 37 bis 40 Metern und von -40 bis -37 Metern fixiert, wobei in beiden Fällen ein Randbereich von jeweils 3 Metern berücksichtigt wird. In der Y-Richtung erfolgt die Fixierung ebenfalls in den Randbereichen von 37 bis 40 Metern. In der Z-Richtung werden die Randbereiche von -31 bis -26 Metern stabilisiert. Diese Fixierungen stellen sicher, dass das Modell in den relevanten Achsen stabil bleibt. Darüber hinaus wird im Modell die Schwerkraft mit $9,81 \text{ m/s}^2$ berücksichtigt. Die Dichte der Blöcke wird mit 2500 kg/m^3 festgelegt, während die Dichte der Fundamentplatte mit 100 kg/m^3 angesetzt wird. In der nachstehenden Abbildung (Abb. 6.4) ist das Modell mit fixierten Randbereichen und aufliegender Fundamentplatte dargestellt.

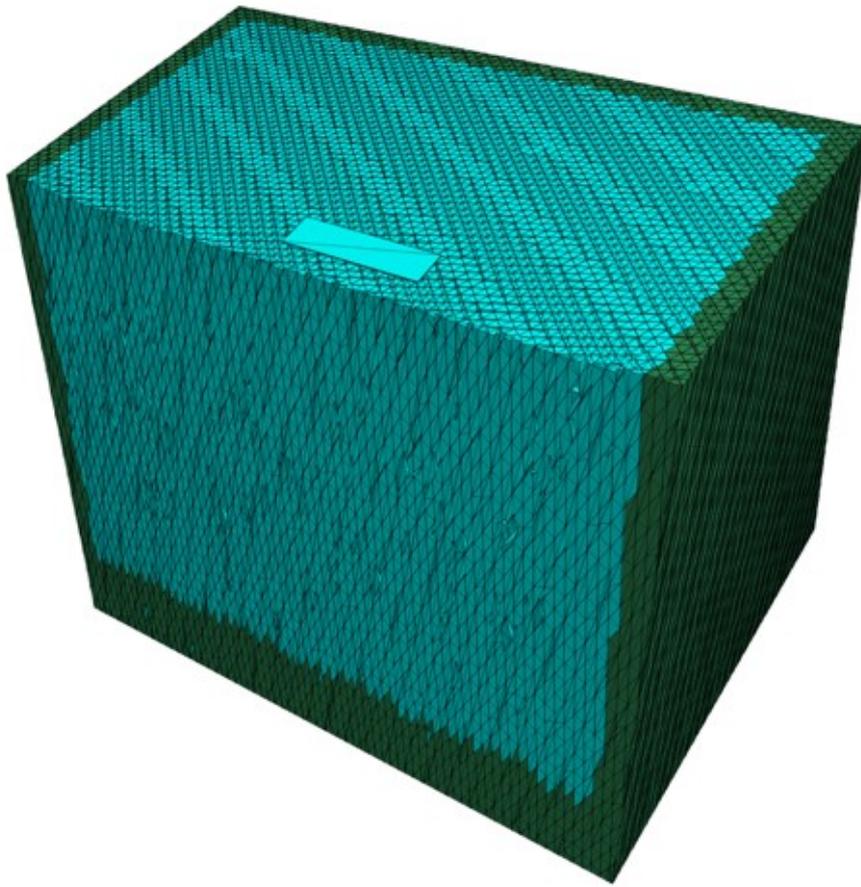


Abb. 6.4: Modell mit Randbedingungen (fixierte Blöcke grün dargestellt)

Um das Kontaktverhalten zwischen den Blöcken präzise zu simulieren, werden Unterkontakte erzeugt, und das Mohr-Coulomb-Modell wird zur Modellierung der Trennflächen verwendet. Dabei werden sowohl Reibung als auch Kohäsion berücksichtigt. Zur Anpassung der Festigkeitsparameter an den Kontakten kommt eine FISH-Funktion namens „Strength-Reduce“ zum Einsatz, die Reibung und Kohäsion an den Blockgrenzen reduziert. Mit dem Befehl `block contact prop` werden schließlich die physikalischen Eigenschaften der Kontakte festgelegt. Dieser Befehl definiert wichtige Kontaktparameter wie die Normalkontaktsteifigkeit, Scherkontaktsteifigkeit, Reibung und Kohäsion. Diese Parameter sind entscheidend für die präzise Simulation des Verhaltens der Blöcke unter verschiedenen Belastungen und beschreiben das Materialverhalten sowohl in Bezug auf Steifigkeit als auch Festigkeit. In weiterer Folge wird der initiale Gleichgewichtszustand mit dem Befehl `model solve elastic` berechnet. Sobald dieser Zustand erreicht ist, wird das Modell gespeichert, um die Ergebnisse zu dokumentieren und später darauf zugreifen zu können. In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 6.5 und 6.6) wird das für die Erstellung des Keilmodells verwendete Skript mit den Befehlen dargestellt.

```

;---Fundamentplatte
block create brick 1.0 10.8 2 4.5 25 26
block group 'region1'
;---Modell
block create brick -40 40 -40 40 -30 25
block hide group 'region1'
block group 'region2'
;---Hang (Slope)
block cut join-set dip-direction 180 dip 75 origin 0,0,25
;---Obere Fläche
;block cut join-set dip-direction 180 dip 0 origin 0,0,25
;---Entfernen aller Bereiche oberhalb der Hangfläche
180 dip 75 origin 0,0,0
;---Fuge 1
block cut join-set dip-direction 225 dip 65 origin 0,0,0 spacing 0.0 jointset-id 1
;---Fuge 2
block cut join-set dip-direction 115 dip 85 origin 0,0,0 spacing 0.0 jointset-id 2
;---Zugriss
block cut join-set dip-direction 160 dip 80 origin 0,0,0 spacing 0.0 jointset-id 3
;---Deaktivieren der Ansicht für Region 2
;block fix range group 'region2'
block hide off

;---Definition des Keils
block hide range plane below dip-direction 225 dip 65 origin 0,0,0
;---Definition des Keils
block hide range plane below dip-direction 115 dip 85 origin 0,0,0
;---Definition des Keils
block hide range plane below dip-direction 160 dip 80 origin 0,0,0

;---Keil als Region 1 definieren
block group 'region3' slot 1
block hide off
block hide group 'region3'
block group 'region4' slot 1
block hide off

block cut join-set dip-direction 160 dip 0 origin 0,0,-25

;---Fixierung der Ränder des Modells
block fix range position-x 37,40
block fix range position-x -40,-37
block fix range position-y 37,40
block fix range position-z -31,-26

;---Schwerkraft aktivieren
model gravity 9.81

;---Materialeigenschaften
;Blöcke
block property density 2500.0 ;bulk [b_mod] shear [s_mod]
block property density 100.0 range group 'region1'
block contact generate-subcontacts

```

Abb. 6.5: Kommandos zur dreidimensionalen Modellierung des Keils – Teil 1

```

;---Materialmodell für Fugen
; Coulomb-Schermodell
block contact jmodel assign mohr

;---Festigkeitsreduktion (FISH-Funktion)
;-----
fish define Strength_Reduc (Fric_old,Coh_old,_RF)
| Fric_new=math.atan(math.tan (Fric_old*math.degrad)/_RF)/math.degrad
| Coh_new=Coh_old/_RF
| RF=_RF
end
;-----

block contact prop stiffness-norm 1e8 stiffness-shear 1e8 friction 20.0 cohesion 50e3 ...
cohesion-residual=50e3
block contact material-table default property stiffness-norm 1e8 stiffness-shear 1e8 ...
friction 20.0 cohesion 50e3 cohesion-residual=50e3

;---Festigkeitsreduktion
[Strength_Reduc(35.0, 100e3, 1.0)]
[RF]
block contact prop stiffness-norm 1e8 stiffness-shear 1e8 friction=[Fric_new] ...
cohesion=[Coh_new] cohesion-residual=[Coh_new] range joint-set 1

[Strength_Reduc(20.0, 50e3, 1.0)]
block contact prop stiffness-norm 1e8 stiffness-shear 1e8 friction=[Fric_new] ...
cohesion=[Coh_new] cohesion-residual=[Coh_new] range joint-set 2

;---Abspeichern
model solve elastic
block contact reset disp
block gridpoint ini disp 0,0,0

```

Abb. 6.6: Kommandos zur dreidimensionalen Modellierung des Keils – Teil 2

Um eine bereits erstellte Keilgeometrie zu belasten und die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung zu ermitteln, wird das Skript verwendet, das in der nachstehenden Abbildung (Abb. 6.8) dargestellt ist. Zunächst wird das zuvor abgespeicherte Keilmodell mit dem Befehl `model restore` geladen, um die Berechnungen fortzusetzen. Nachdem das Modell geladen wurde, werden die aus der Berechnung des initialen Gleichgewichts resultierenden Verschiebungen mit dem Befehl `block contact reset disp` zurückgesetzt, um sicherzustellen, dass die weiteren Berechnungen keine vorangegangenen Setzungen enthalten. Anschließend werden an den Eckpunkten der starren Fundamentplatte Messpunkte für das Monitoring der Verschiebungen sowie die Geschwindigkeiten in der Z-Richtung festgelegt. Diese Referenzpunkte sind wichtig, um die Auswirkungen der Belastung auf das Modell präzise zu überwachen und zu dokumentieren. Sie dienen der kontinuierlichen Erfassung der Verschiebungen und Geschwindigkeiten während der Simulation.

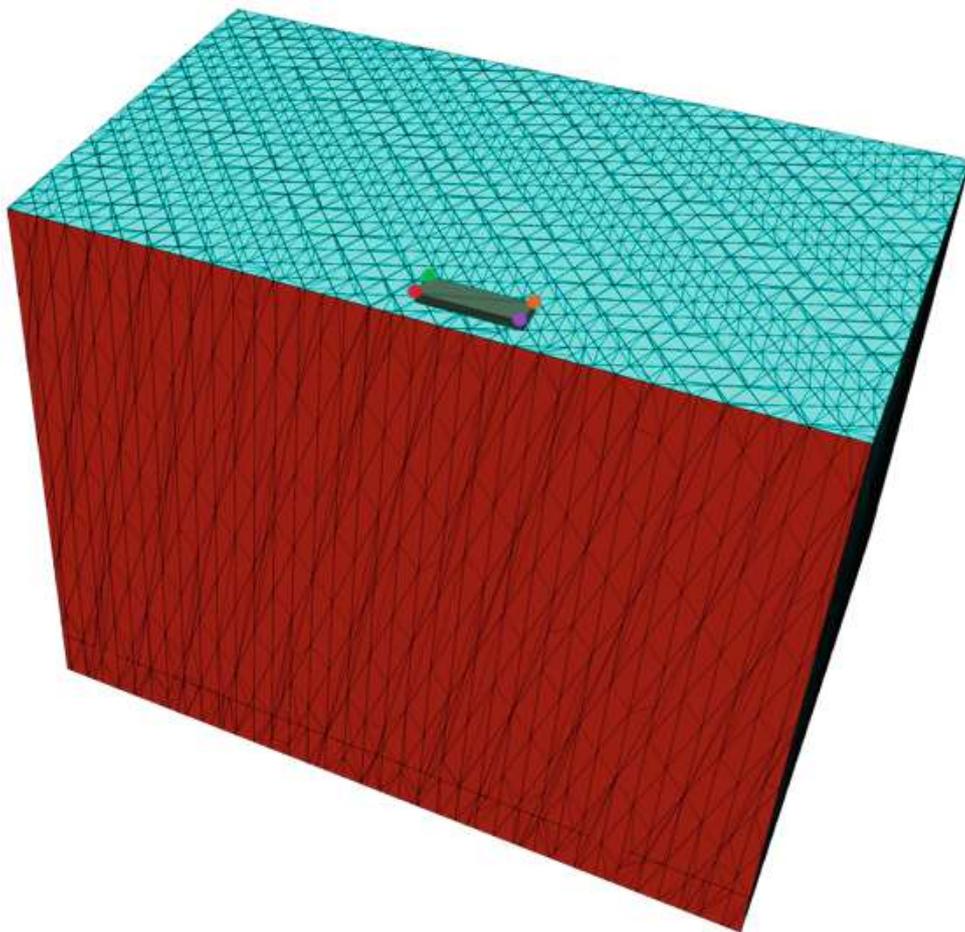


Abb. 6.7: Fundamentplatte mit den Referenzpunkten an den Eckpunkten

Im nächsten Schritt wird die Oberfläche des Fundaments mit dem Befehl `block face group 'Fundament'` gruppiert bzw. erfasst. Dieser Bereich wird später für die Anwendung der Belastung genutzt. Es folgt die schrittweise Anwendung einer konstanten Belastung auf die Fundamentfläche. Mithilfe der Funktion `block face apply stress-zz` wird die Belastung in mehreren Phasen aufgebracht. Zunächst wird eine Belastung von $-1,0e6$ aufgebracht, gefolgt von einer weiteren Belastung von $-1,0e6$, dann $-0,5e6$ und abschließend $-0,25e6$. Dies ergibt eine kumulierte Sohldruckspannung von $-2,75e6$, was $-2,75$ MPa in der negativen Z-Richtung entspricht. Dieser schrittweise Prozess ermöglicht es, die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung iterativ zu ermitteln. Nach der schrittweisen Anwendung der Belastung wird das Modell mit dem Befehl `model save` gespeichert, um die Berechnungen und Ergebnisse zu dokumentieren und für eine spätere Auswertung bereitzuhalten. Dieser strukturierte Prozess stellt sicher, dass das Modell korrekt belastet wird und alle erforderlichen Schritte für eine umfassende Belastungsanalyse systematisch ausgeführt werden.

```

;---Laden des Keilmodells
model restore "Wyllie_Geometrie_0m.sav"

;---Setzt die Verschiebungsdaten der Kontakte zurück
block contact reset disp

;---Messpunkte für Verschiebung und Geschwindigkeit
block history velocity-z position (12.5 7 25.01)
block history velocity-z position (-3.5 3 25)
block history velocity-z position (-3.5 7 25)
block history velocity-z position (12.5 3 25.01)

block history displacement-z position (12.5 7 25.01)
block history displacement-z position (-3.5 3 25)
block history displacement-z position (-3.5 7 25)
block history displacement-z position (12.5 3 25.01)

;---Definiert eine Fundamentfläche im z-Bereich
block face group 'Fundament' range pos-z 25.9 26.1

;---1 Anwenden der ersten Belastung
;---Simuliert 2000 Schritte für die Berechnung der Reaktion
block face apply stress-zz -0.25e6 range group 'Fundament'
model step 2000

;---2 Anwenden der ersten Belastung
block face apply stress-zz -0.5e6 range group 'Fundament'
model step 2000

;---3 Anwenden der ersten Belastung
block face apply stress-zz -1.0e6 range group 'Fundament'
model step 2000

;---4 Anwenden der ersten Belastung
block face apply stress-zz -1.0e6 range group 'Fundament'
model step 2000

;---Speichern des Modells
model save "RESULT_Wyllie_0m_meu.sav" compres

```

Abb. 6.8: Kommandos zur Belastung des dreidimensionalen Keilmodells

Kapitel 7

Durchgeführte Untersuchungen

In diesem Kapitel werden Untersuchungen des Keilmodells mit den Softwaretools SWEDGE und 3DEC durchgeführt. Bei SWEDGE wird die Kohäsion variiert, um die Belastungswerte zu ermitteln, bei denen sich das Keilmodell im Grenzgleichgewicht befindet. Anschließend werden die Sohldruckspannungen berechnet. In 3DEC werden zusätzlich zur Kohäsion auch Trennflächenscharen eingeführt und deren Abstände variiert, um die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung zu bestimmen. Darüber hinaus wird das kollabierte Keilmodell analysiert und das Volumen der abgleitenden Keilflächen dokumentiert.

7.1 Untersuchungen mit SWEDGE

7.1.1 Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 100 und 50 kPa

In dieser Untersuchung wurden die in Kapitel 5 beschriebenen Modellparameter berücksichtigt. Die Parameter für Kohäsion und Reibungswinkel betragen 100 kPa und 35° für die erste Keilfläche sowie 50 kPa und 20° für die zweite Keilfläche.

Um mit diesem Keilmodell und den angegebenen Parametern ein Grenzgleichgewicht zu erreichen, war eine Belastung von 73,5 MN erforderlich, die in Form einer im Schwerpunkt angreifenden Einzellast aufgebracht wurde. Die Umrechnung dieser Belastung in eine Sohldruckspannung erfolgte durch Division der Belastung von 73,5 MN durch die Fläche der oberen Keilfläche, die mit $94,108 \text{ m}^2$ berechnet wurde. Daraus ergab sich eine aufnehmbare Sohldruckspannung von 0,781 MPa. Der in SWEDGE dargestellte Versagensmechanismus, der in der nachstehenden Abbildung (Abb. 7.1) veranschaulicht ist, zeigt ein Abgleiten des Keilblocks entlang der Schnittlinien der beiden keilbildenden Trennflächen. Das Keilvolumen wurde bei dieser Untersuchung mit $1857,32 \text{ m}^3$ berechnet.

7.1.2 Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 200 und 100 kPa

In dieser Untersuchung wurden die Kohäsionswerte für beide keilbildenden Trennflächen verdoppelt, während die Reibungswinkel unverändert blieben. Für die erste Keilfläche wurde die Kohäsion von 100 kPa auf 200 kPa erhöht, bei einem Reibungswinkel von 35° . Für die zweite Keilfläche wurde die Kohäsion von 50 kPa auf 100 kPa gesteigert, bei einem Reibungswinkel von 20° . Um das Keilmodell ins Grenzgleichgewicht zu bringen, war eine Belastung von 196,68 MN auf die Keilfläche erforderlich. Die Umrechnung dieser Belastung in eine aufnehmbare Sohldruckspannung erfolgte durch Division der Belastung durch die obere Keilfläche von $94,108 \text{ m}^2$, was eine Sohldruckspannung von 2,09 MPa ergab. Der Versagensmechanismus in SWEDGE zeigt das Gleiten entlang der Schnittlinien der beiden keilbildenden Trennflächen. Das Keilvolumen wurde mit $1857,32 \text{ m}^3$ berechnet und in der folgenden Abbildung (Abb. 7.1) dargestellt.

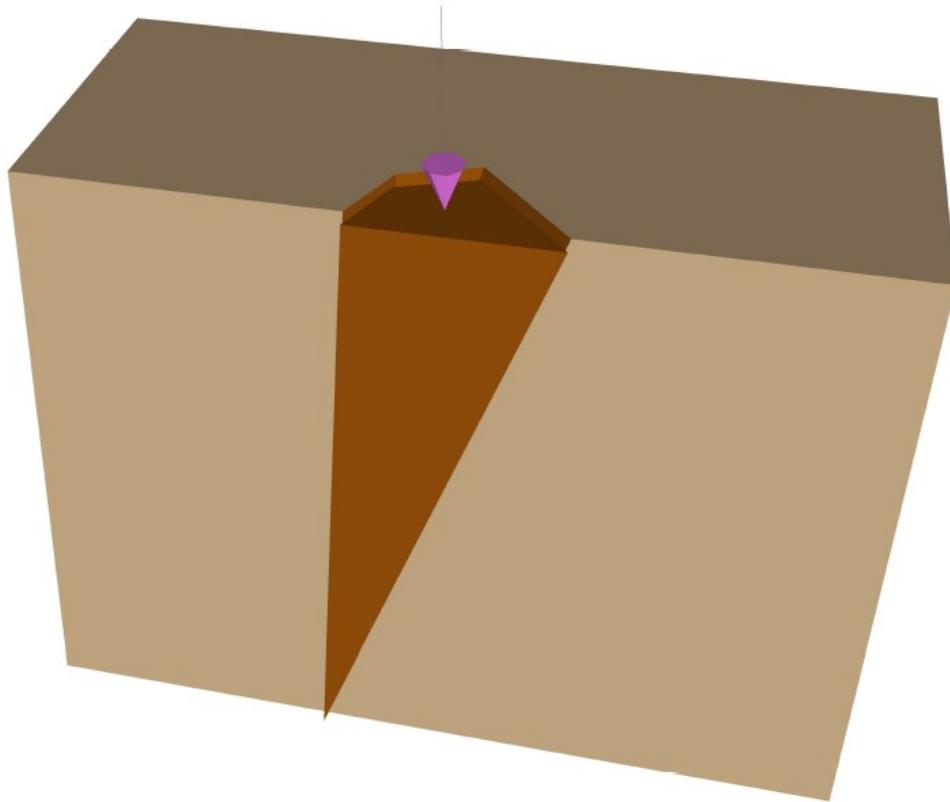


Abb. 7.1: Versagensmechanismus: Gleiten entlang der keilbildenden Trennflächen

7.2 Untersuchungen mit 3DEC

7.2.1 Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 100 und 50 kPa

Die Kohäsion und der Reibungswinkel für die erste Keilfläche wurden auf 100 kPa bzw. 35° und für die zweite Keilfläche auf 50 kPa bzw. 20° festgelegt. Während diese Werte für Kohäsion und Reibungswinkel in diesem Untersuchungsdurchlauf konstant blieben, variierte der Abstand der Trennflächenscharen. Zunächst wurde der Keilblock untersucht, der infolge der keilbildenden Trennflächen entstanden war. In der weiteren Folge wurden im Keilmodell Trennflächenscharen erstellt, deren Abstände schrittweise auf 3 Meter, 2 Meter, 1,5 Meter und schließlich 1 Meter verringert wurden. Neben der Bestimmung der maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen wurden auch der Versagensmechanismus dokumentiert sowie die Keilhöhe und das Volumen des abgleitenden Keilblocks ermittelt.

7.2.1.1 Untersuchung des Keilblocks durch keilbildende Trennflächen

Bei dieser Analyse wurde der größtmögliche Keilblock modelliert, der aufgrund der keilbildenden Trennflächen und der gegebenen Böschungshöhe von 50 m entstehen konnte. Die Stabilität des Keils bei zunehmender Belastung (stabil oder in Bewegung), die alle 2000 Berechnungsschritte erhöht wurde, wurde anhand der Geschwindigkeitsverläufe an den Referenzpunkten der Fundamentplatte beurteilt. Darüber hinaus wurde der Versagensmechanismus des modellierten Felskeils mittels Konturplot in verschiedenen Ansichten dargestellt, ebenso wie der Versagensmechanismus und das abgleitende Keilvolumen dokumentiert.

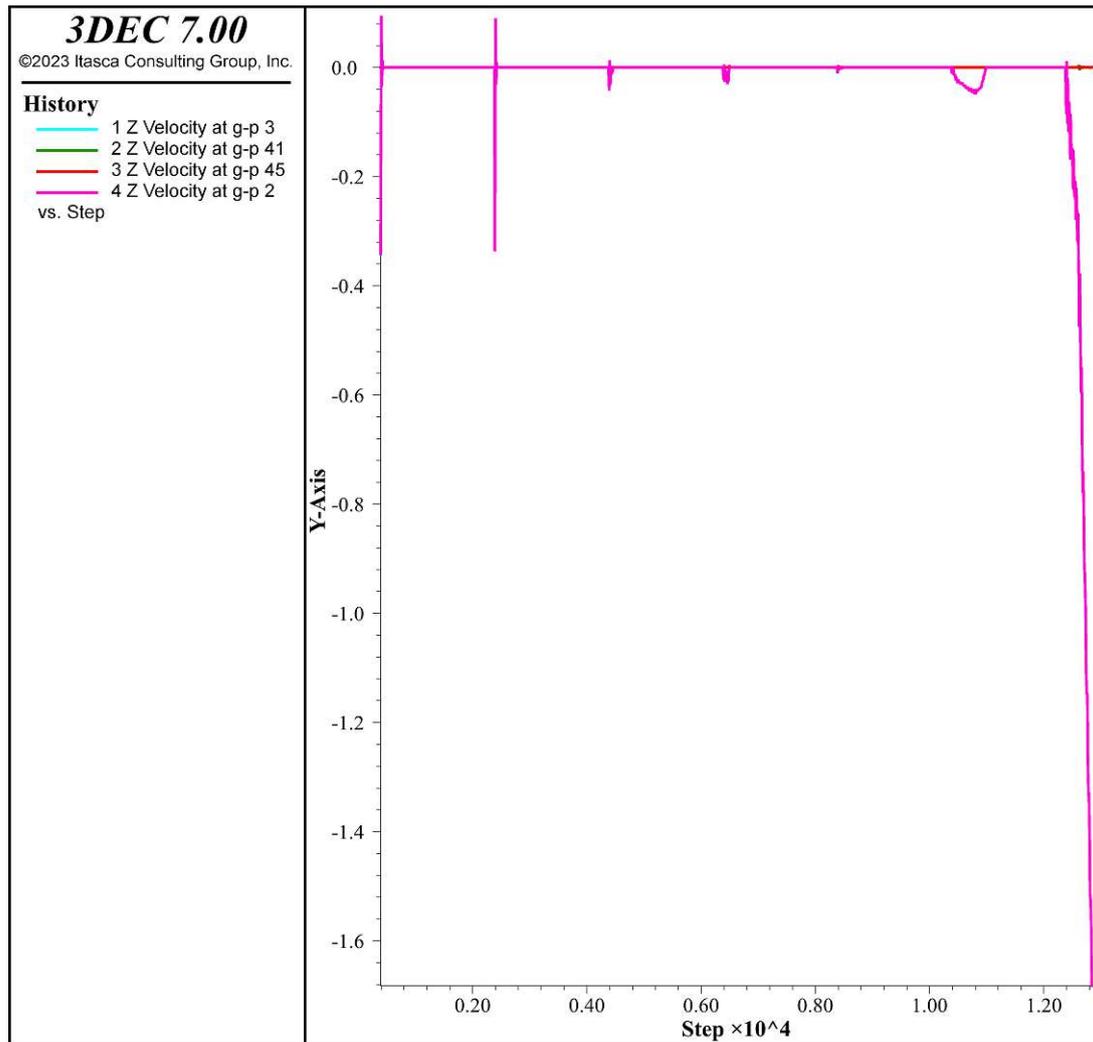


Abb. 7.2: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der Abbildung (Abb. 7.2) ist der Geschwindigkeitsverlauf der Referenzpunkte an der Fundamentplatte mit zunehmender Fundamentlast dargestellt. Jede Lastaufbringung hat zu einem Ausschlag bei den Geschwindigkeiten geführt, mit Maximalwerten von 0,12 m/s in positiver und -0,35 m/s in negativer Richtung. Da im Keilmodell nur die keilbildenden Trennflächenscharen vorhanden waren, kam es nur zu einer geringen Konsolidierung, was sich im sofortigen Rückgang der Geschwindigkeiten in die Ruhelage gezeigt hat. In dieser Untersuchung wurde die Belastung durch das Fundament ausgehend von 0,125 MPa in vier Schritten zusätzlich mit 0,25 MPa, 0,375

MPa, 1 MPa und 1,25 MPa gesteigert. Das Keilmodell konnte somit eine kumulierte Sohldruckspannung von 3 MPa aufnehmen. Bei weiterer Belastungssteigerung sind die Geschwindigkeiten auf -1,65 m/s gestiegen, was auf ein Versagen der Gründung hingewiesen hat. In den Abbildungen (Abb. 7.3, 7.4) sind verschiedene Ansichten des Keilmodells zu sehen, die das Abgleiten des Keilblocks verdeutlichen. Die abgleitende Keilhöhe betrug 50 Meter, das Volumen des Keils wurde mit 1.857,32 m³ ermittelt.

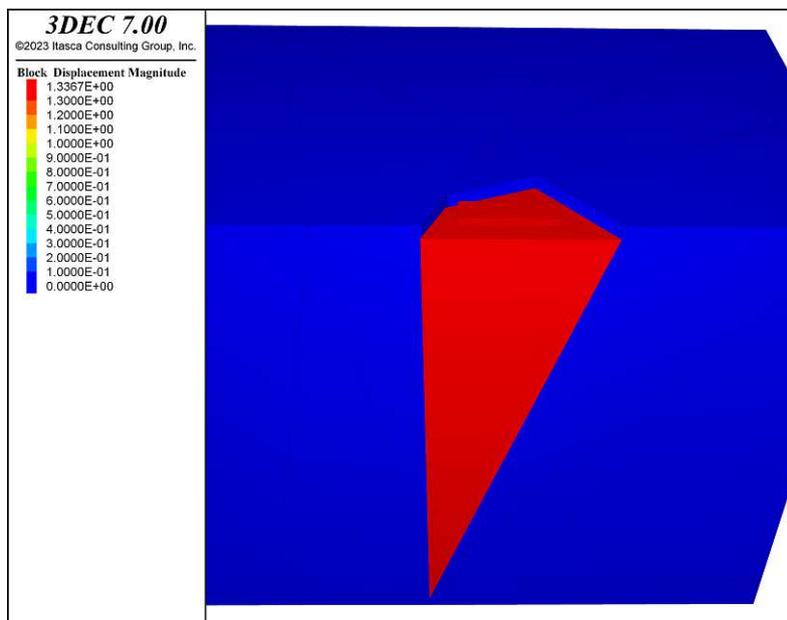


Abb. 7.3: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

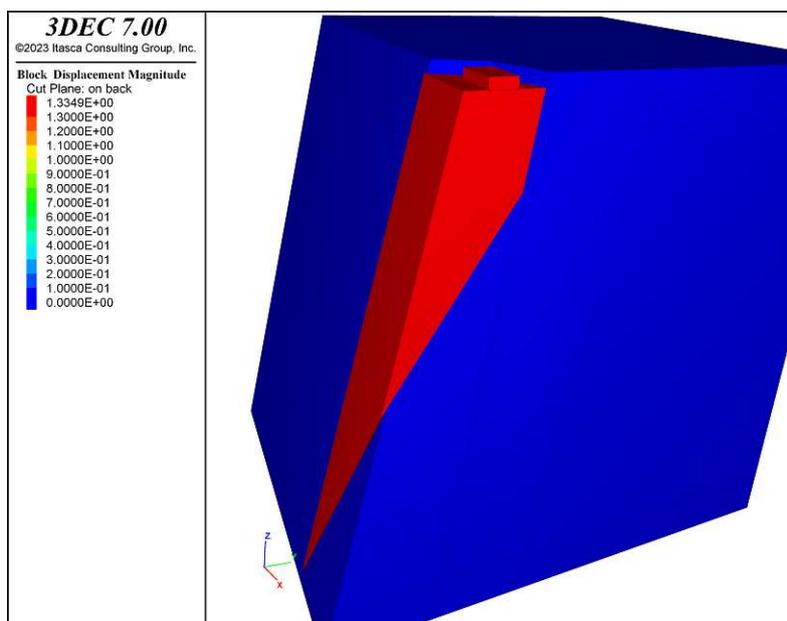


Abb. 7.4: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

Die nächste Abbildung (Abb. 7.5) zeigte das Keilmodell in zwei verschiedenen Einstellungen aus der Draufsicht. Dabei wurde deutlich, dass der gesamte Bereich, der durch die keilbildenden Trennflächen entstanden war, vollständig abgeglitten ist. Dieser Bereich war deutlich größer als die aufliegende Fundamentplatte und verdeutlichte die Ausbreitung des Versagens über die direkt belastete Fläche hinaus. Der abgleitende Keilblock blieb zusammenhängend und zeigte dieselbe Verschiebung wie die Fundamentplatte, wobei beide eine homogene Verschiebung von 1,3 Metern aufwiesen. Dies unterstrich die gleichmäßige Bewegungsübertragung zwischen Fundamentplatte und Keilblock sowie die Rolle der keilbildenden Trennflächen im Versagensmechanismus.

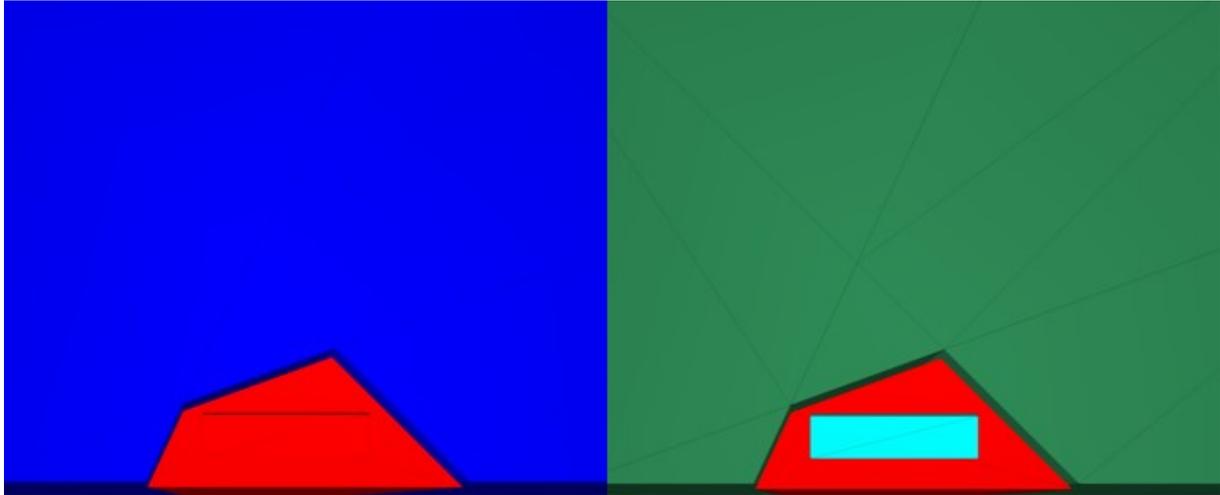


Abb. 7.5: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.1.2 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 3 Metern

Bei dieser Untersuchung wurde das Keilmodell mit Trennflächenscharen und einem Trennflächenabstand von 3 Metern analysiert. Zunächst wurden die Geschwindigkeitsverläufe der zugewiesenen Eckpunkte der Fundamentplatte unter steigender Belastung aufgezeichnet. Anschließend wurden Konturplots der Verschiebungen durch verschiedene Ansichten sowie der Versagensmechanismus, die ableitende Keilhöhe und das ermittelte Keilvolumen dokumentiert.

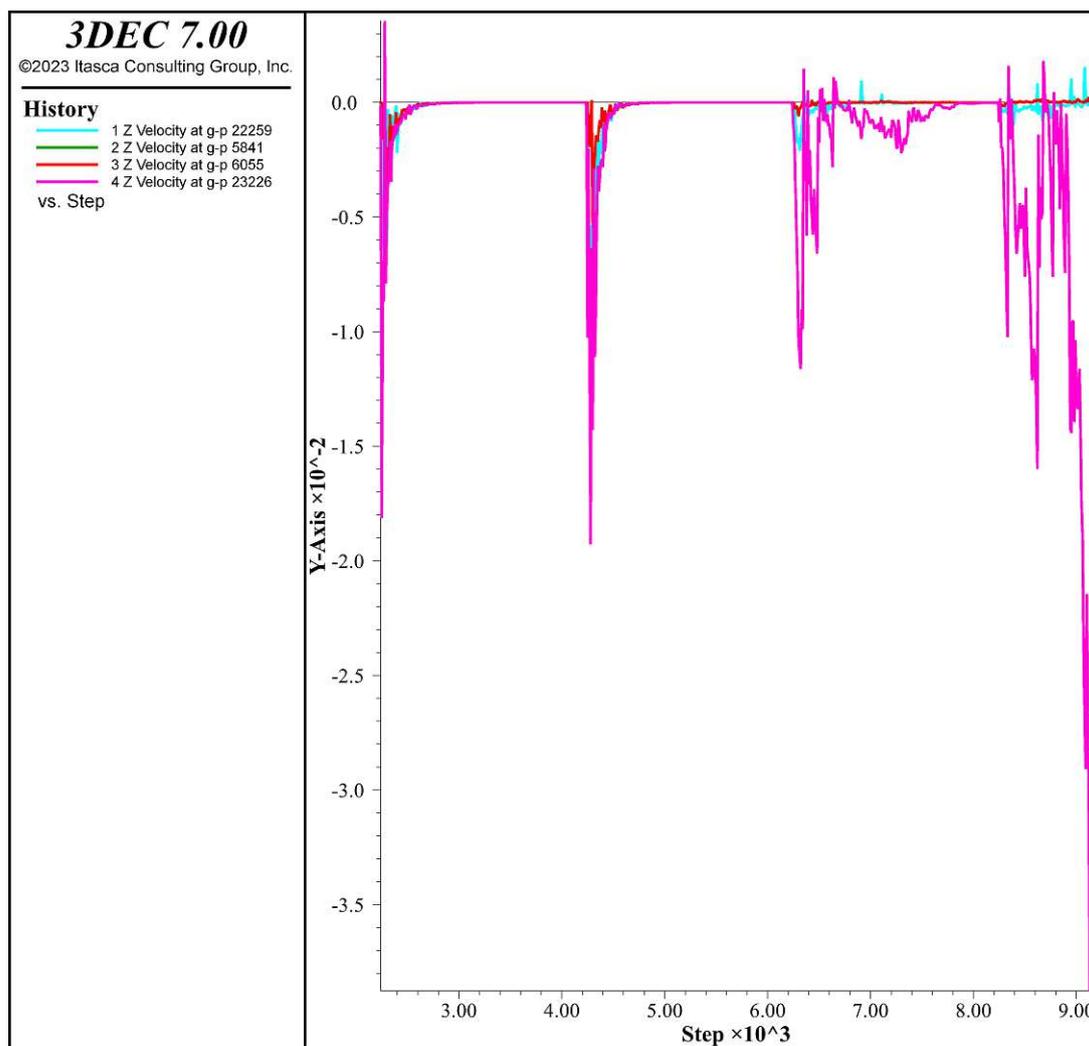


Abb. 7.6: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der Abbildung (Abb. 7.6) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Fundamentplatte mit den Referenzpunkten infolge gesteigerter Belastungen bei einem Trennflächenscharenabstand von 3 Metern dargestellt. Die Grafik zeigte deutliche Geschwindigkeitsausschläge in die negative und positive Z-Richtung mit Maximalwerten von -2 m/s und 3,5 m/s. Diese Ausschläge wurden durch die Trennflächenscharen abgefangen, was sich in einem verzögerten Rückgang in die Ruhelage zeigte, der erst nach mehreren Berechnungsschritten eintrat. Drei Belastungsstufen von 0,25 MPa, 1 MPa und 1 MPa wurden im Abstand von 2000 Berechnungsschritten aufgebracht, wodurch eine kumulierte Sohldruckspannung von 2,25 MPa erreicht wurde. Eine weitere Laststeigerung

führte zu Geschwindigkeiten von bis zu -4 m/s, die nicht mehr in die Ruhelage zurückkehrten und das Versagen der Gründung belegten. Der Versagensmechanismus des Felskeils wurde in einem Konturplot der Verschiebungen in der Vorder- und der Schnittansicht (Abb. 7.7, 7.8) gezeigt. Diese verdeutlichten das initiale Abgleiten. Die abgleitende Keilhöhe betrug etwa 33 Meter (2/3 der Modellhöhe), das Volumen wurde mit $1.801,60$ m³ ermittelt.

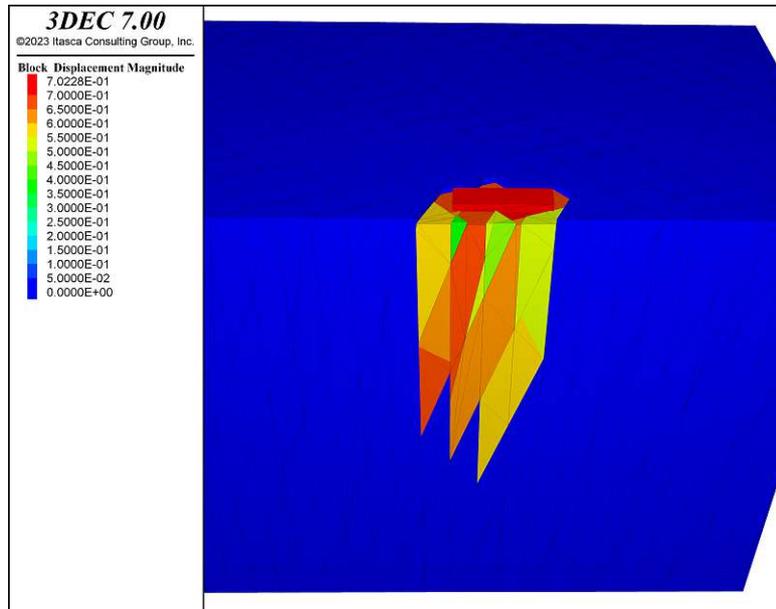


Abb. 7.7: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

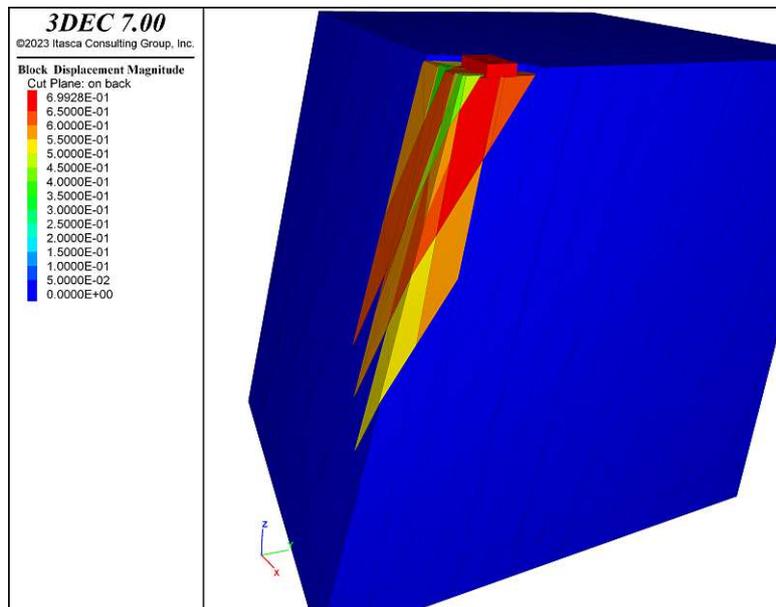


Abb. 7.8: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

Die nächste Abbildung (Abb. 7.9) zeigt das Keilmodell in zwei Draufsicht-Ansichten. Es ist erkennbar, dass Teile des initialen Keils verblieben sind, während die belasteten Bereiche der Fundamentplatte sowie angrenzende Bereiche abgeglitten sind. Die Fundamentplatte und die direkt von ihr belasteten Bereiche wiesen eine homogene Verschiebung von etwa 0,7 Metern auf, während die nicht direkt belasteten Bereiche eine sehr inhomogene Verschiebung zeigten, was auf eine starke Zerklüftung des Gefüges hinweisen könnte.

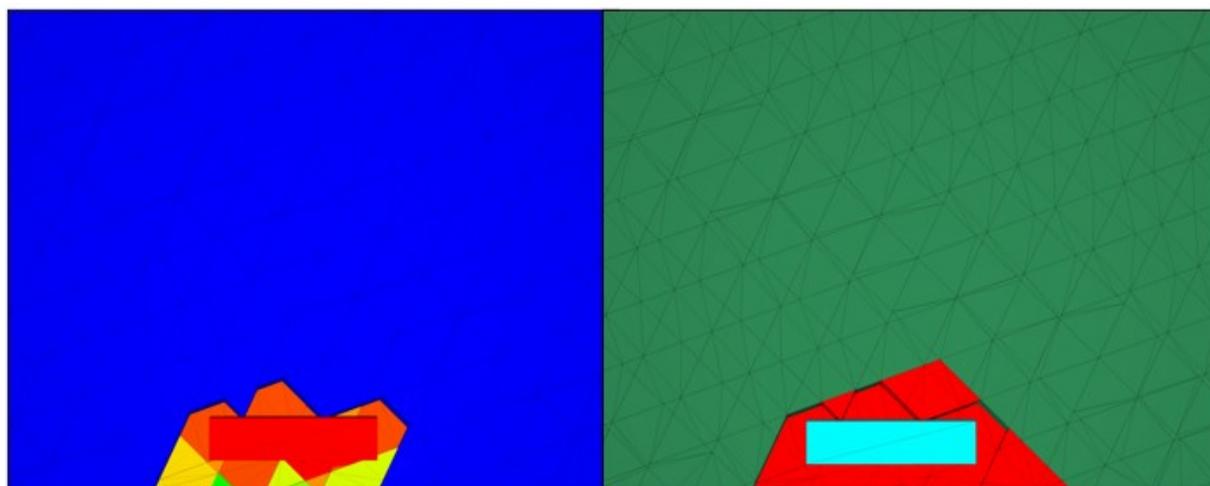


Abb. 7.9: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.1.3 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 2 Metern

Bei dieser Untersuchung wurde das Keilmodell bei einem Trennflächenscharenabstand von 2 Metern analysiert. Im ersten Schritt wurden die Geschwindigkeitsverläufe der Eckpunkte der Fundamentplatte infolge einer alle 2000 Berechnungsschritte steigenden Belastung dargestellt. In der weiteren Folge wurden Konturplots in verschiedenen Ansichten mit den Verschiebungen des Keilmodells abgebildet. Zusätzlich wurden der Versagensmechanismus, die abgleitende Keilhöhe und das Keilvolumen dokumentiert.

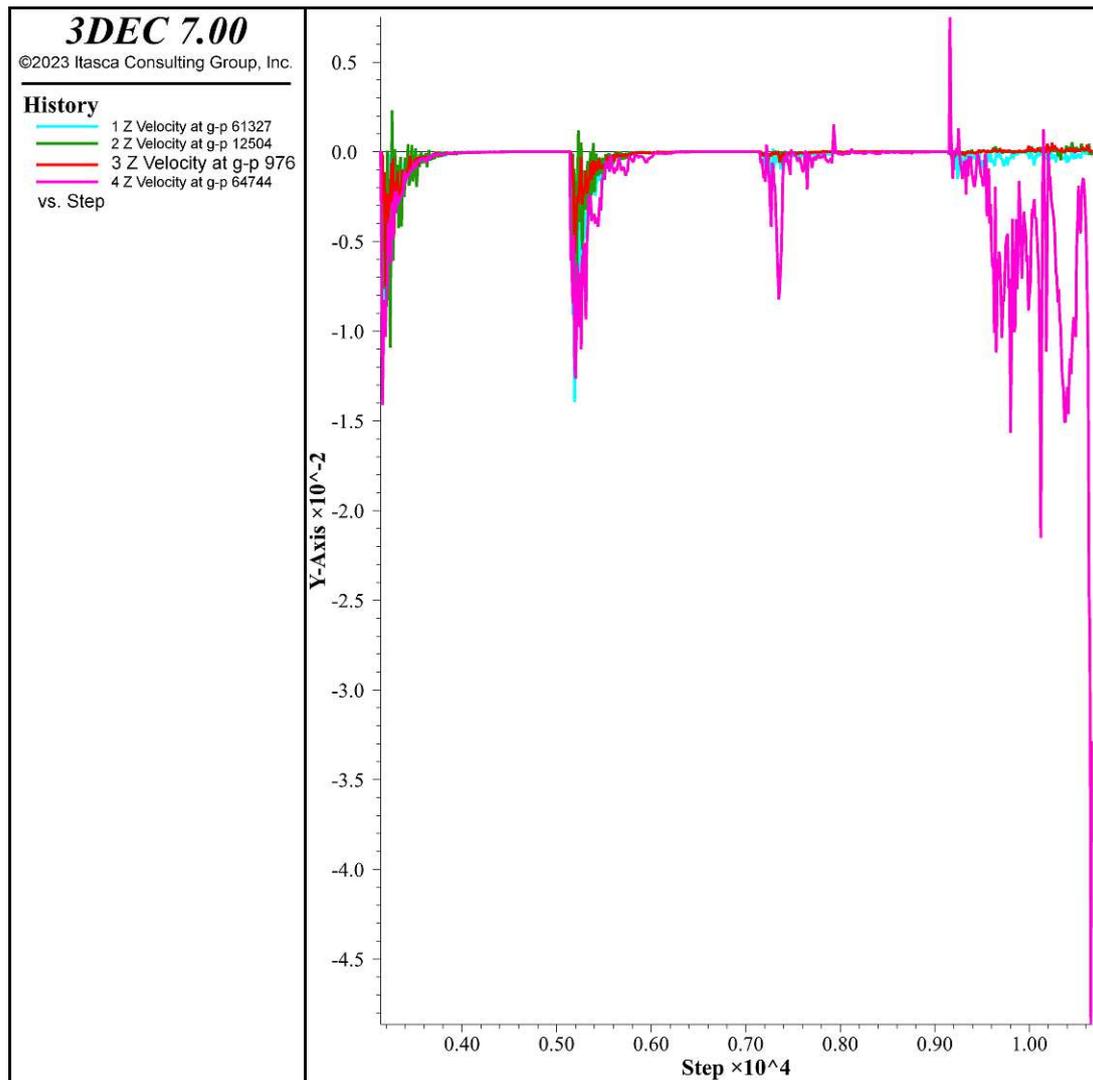


Abb. 7.10: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der obenstehenden Abbildung (Abb. 7.10) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Eckpunkte der Fundamentplatte dargestellt. Die Grafik zeigte die Geschwindigkeitsverläufe in Abhängigkeit von den Berechnungsschritten. Es waren kurze Ausschläge der Geschwindigkeit in die positive Z-Richtung mit etwa 0,8 m/s und in die negative Z-Richtung mit etwa -1,5 m/s als Reaktion auf die Lastaufbringung zu erkennen. Aufgrund der 2 Meter auseinanderliegenden Trennflächenscharen kam es zu Konsolidierungen und anschließender Verfestigung des Gefüges, was durch den Rückgang

der Geschwindigkeiten erst nach mehreren Berechnungsschritten deutlich wurde. Bei den ersten drei Belastungsstufen von 0,125 MPa, 1 MPa und 1 MPa konnte das Keilmodell eine kumulierte maximale Sohldruckspannung von 2,125 MPa tragen. Mit der nächsten Laststeigerung stiegen die Geschwindigkeiten in die negative Z-Richtung stark an und kehrten nicht mehr in die Ruhelage zurück, was auf das Versagen der Gründung hinwies. In den folgenden Abbildungen (Abb. 7.11, 7.12) wurde das anfängliche Abgleiten des Keilblocks dargestellt. Die abgeschätzte Höhe des abgleitenden Keilblocks betrug etwa 31 Meter, was etwa 5/8 der Gesamthöhe des Keilmodells entspricht. Das Volumen des abgleitenden Keils wurde auf 1.743,2 m³ berechnet.

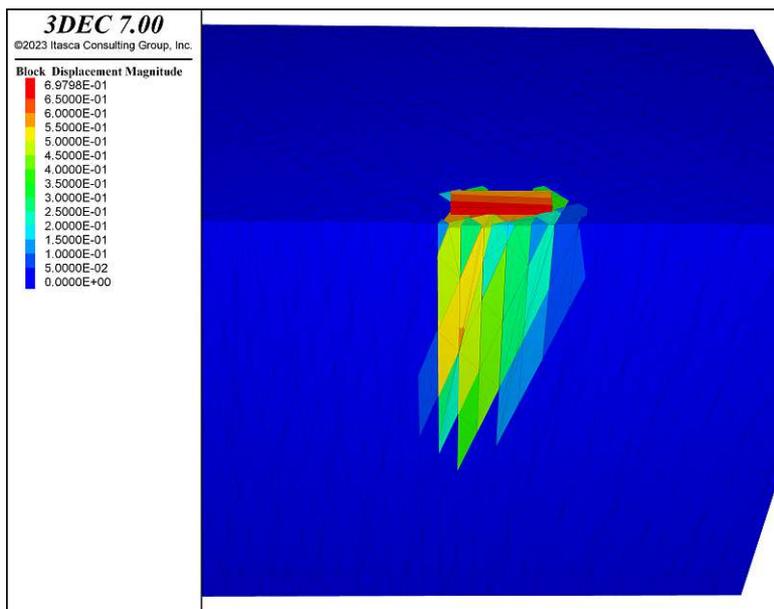


Abb. 7.11: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

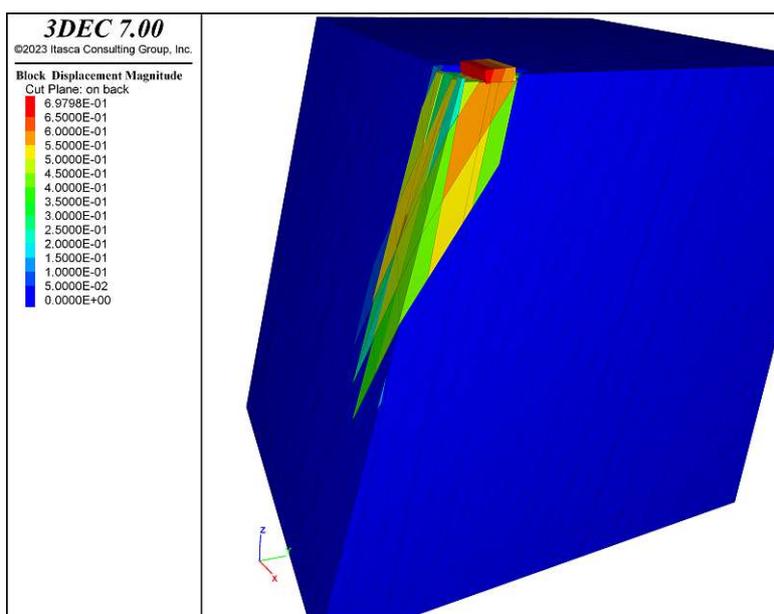


Abb. 7.12: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

Die nächste Abbildung (Abb. 7.13) zeigt deutlich, dass die aufliegende Fundamentplatte unterschiedliche Verschiebungen erfahren hatte. Die Bereiche der Platte, die näher an der Böschungfläche lagen, wiesen Verschiebungen von bis zu 0,69 Metern auf, was größere Verschiebungen waren als die hinteren Bereiche der Fundamentplatte, die nur 0,6 Meter verschoben wurden. Dies deutete auf ein Kippen der Fundamentplatte hin. Teile der keilbildenden Trennflächen verblieben in ihrer ursprünglichen Position. Dennoch gleitete ein größerer Bereich ab, als von der Fundamentplatte belastet worden war. Der abgleitende Keilblock wies starke Inhomogenitäten bei den Verschiebungen auf, was auf eine starke Zerklüftung des Gefüges hinwies.

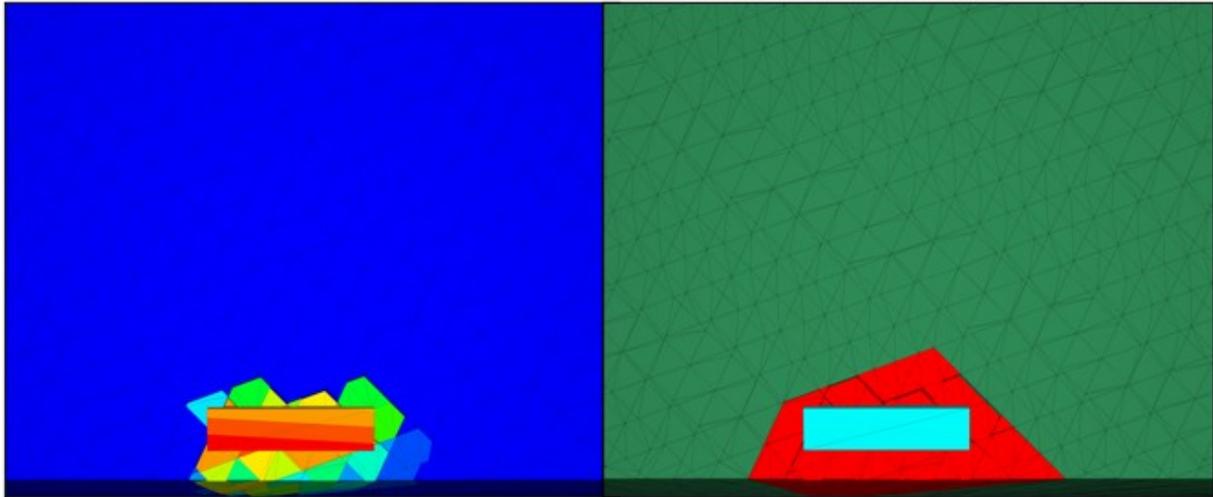


Abb. 7.13: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.1.4 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 1,5 Metern

In dieser Untersuchung wurde der Keilblock erneut angepasst, und der Abstand der Trennflächenscharen auf 1,5 Meter verkürzt. Zunächst wurden die aufgezeichneten Geschwindigkeiten infolge der gesteigerten Belastung, die alle 2000 Berechnungsschritte erfolgte, dargestellt. Anschließend wurden Konturplots in verschiedenen Ansichten der Verschiebungen abgebildet. Zusätzlich wurde der Versagensmechanismus, die ableitende Keilhöhe und das Keilvolumen dokumentiert.

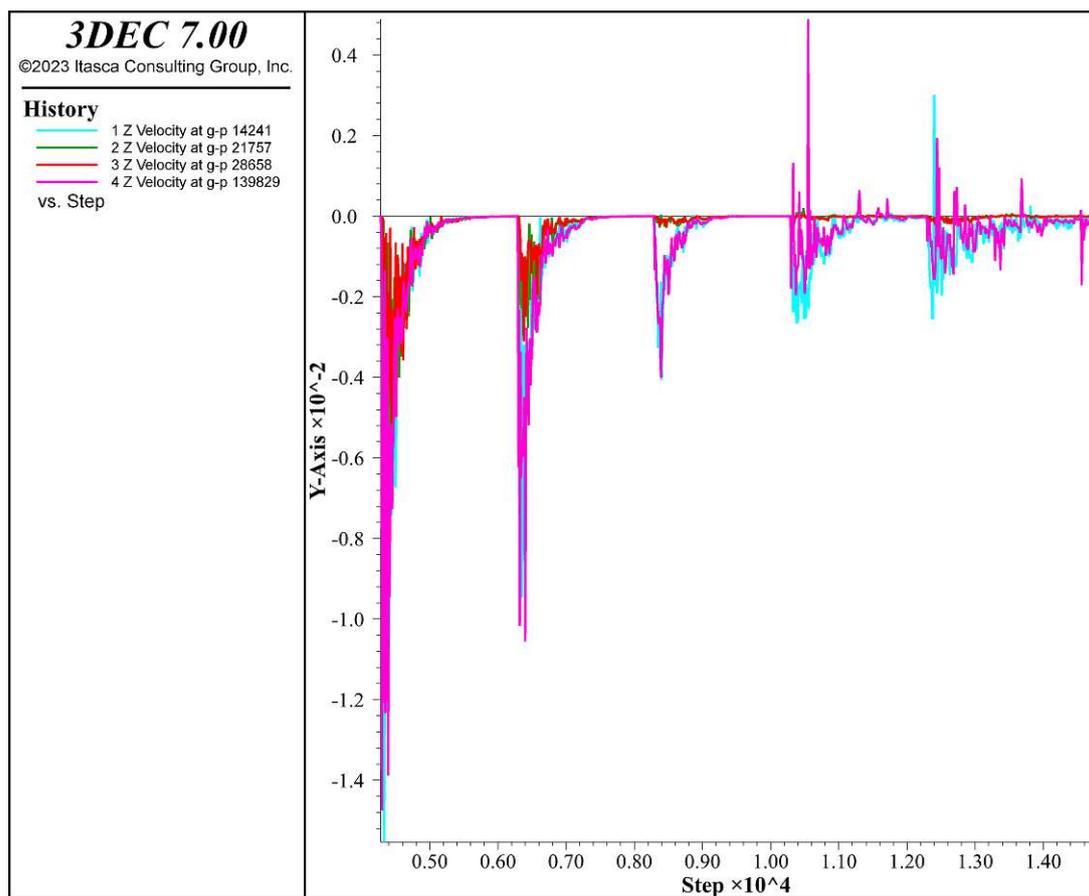


Abb. 7.14: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der obenstehenden Abbildung (Abb. 7.14) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Eckpunkte der Fundamentplatte infolge einer steigenden Belastung dargestellt. Die Grafik zeigte deutliche Ausschläge der Geschwindigkeit in beide Z-Richtungen, mit nahezu -1,5 m/s in die negative Z-Richtung und geringeren Geschwindigkeiten von 0,5 m/s in die positive Z-Richtung als Reaktion auf die Lastaufbringung. Aufgrund des verringerten Abstands der Trennflächenscharen kam es zu intensiveren Konsolidierungen und Verfestigungen, wodurch die Geschwindigkeiten erst nach mehreren Berechnungsschritten in die Ruhelage zurückkehrten. Bei den ersten vier Belastungsstufen von 0,125 MPa, 0,25 MPa, 0,5 MPa und 1 MPa konnte das Keilmodell eine kumulierte maximale Sohldruckspannung von 1,75 MPa tragen. Mit der nächsten Laststeigerung stiegen die Geschwindigkeiten jedoch weiter an und kehrten nicht mehr in die Ruhelage zurück, was auf ein Versagen der Gründung hindeutete. In den Abbildungen (Abb. 7.15, 7.16) wurden verschiedene Ansichten des Keilmodells dargestellt, die die Gesamtverschiebung des Keilblocks

verdeutlichten. Die Höhe des abgleitenden Keilblocks betrug rund 25 Meter, was etwa der Hälfte der Gesamthöhe des Keilmodells von 50 Metern entsprach. Das Volumen des abgleitenden Keils wurde mit $1.701,48 \text{ m}^3$ berechnet.

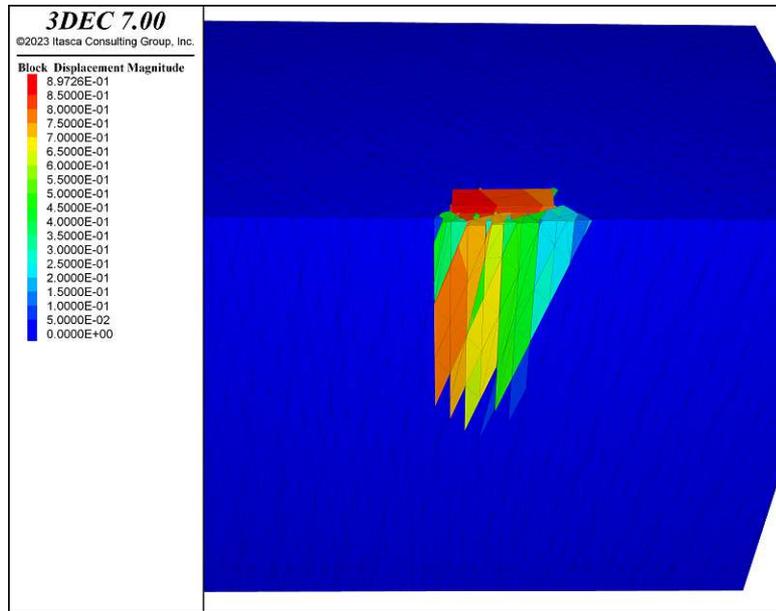


Abb. 7.15: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

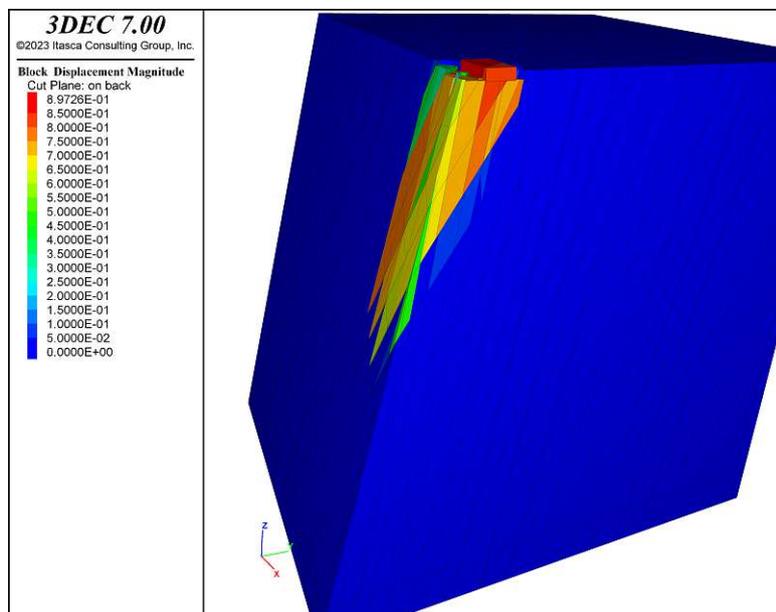


Abb. 7.16: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

In der nachstehenden Abbildung (siehe Abb. 7.17) wurden zwei Draufsichten des Keilmodells mit aufliegender Fundamentplatte dargestellt. Die Fundamentplatte zeigte Verschiebungen von etwa 0,75 Metern auf der rechten Seite bis zu 0,9 Metern auf der gegenüberliegenden linken Seite. Dieser Verschiebungsverlauf deutete auf ein Kippen der Fundamentplatte entlang der Längsachse hin. Teile der Keilflächen, die durch die keilbildenden Trennflächen gebildet worden waren, blieben in ihrer ursprünglichen Position. Die Bereiche, die abglitten, aber nicht direkt von der Fundamentplatte belastet wurden, zeigten kleinere, inhomogene Verschiebungen, was auf eine Zerklüftung des Gefüges hinwies.

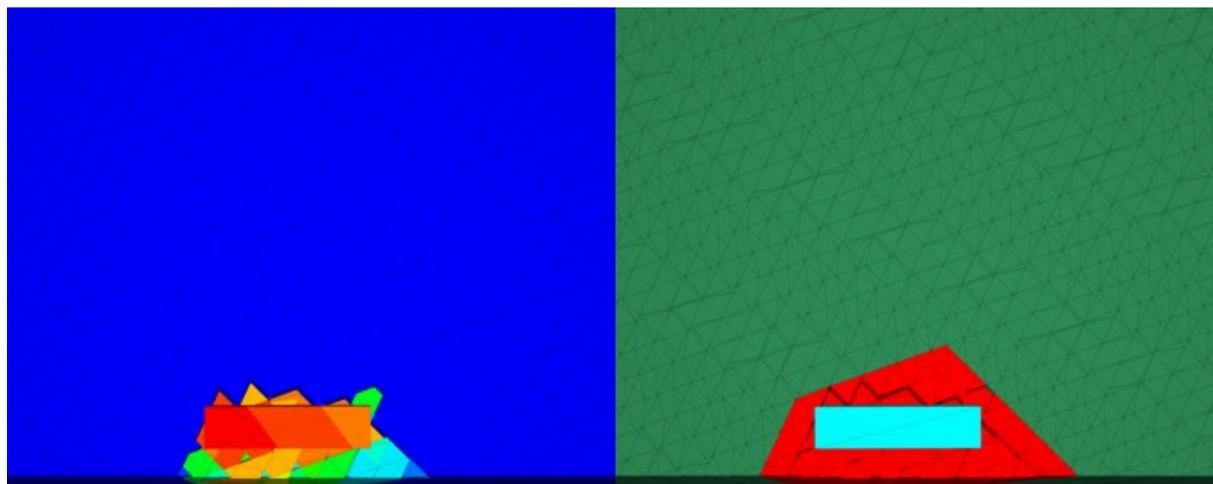


Abb. 7.17: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.1.5 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 1 Metern

In diesem abschließenden Durchlauf der Testreihe wurde der Keilblock erneut angepasst, der Trennflächenscharabstand auf 1 Meter reduziert und analysiert. Zunächst wurden die Geschwindigkeitsverläufe der Fundamentplatte aufgezeichnet, nachdem nach 2000 Berechnungsschritten eine erneute Steigerung der Belastung aufgebracht wurde. Anschließend wurden die Konturplots mit der Verschiebung des Keilmodells in verschiedenen Ansichten sowie der Versagensmechanismus, die abgleitende Keilhöhe und das Volumen des abgleitenden Keils erfasst und dokumentiert.

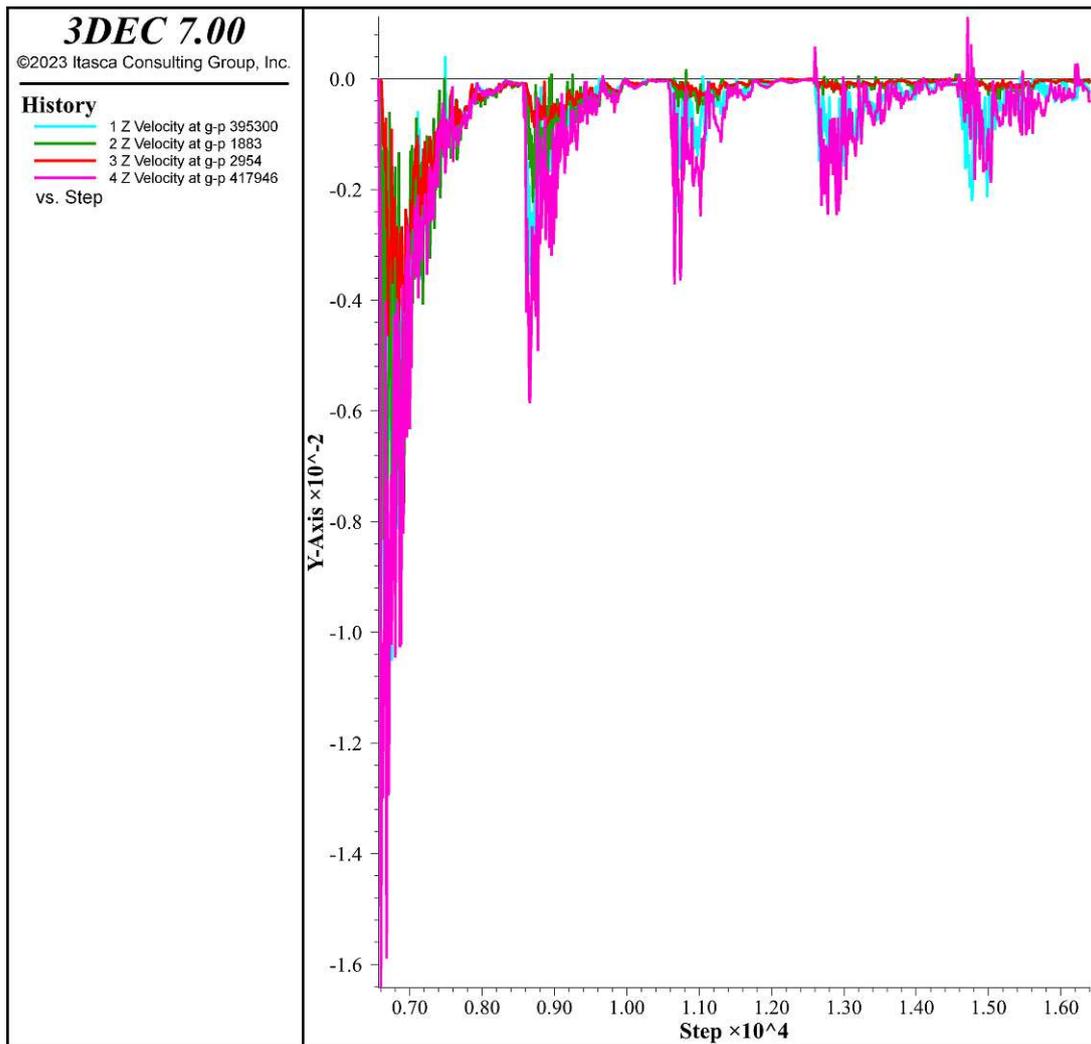


Abb. 7.18: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der Abbildung (Abb. 7.18) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Fundamentplatte infolge einer steigenden Lastaufbringung dargestellt. Die Grafik zeigte starke Ausschläge der Geschwindigkeit in die negative Z-Richtung mit mehr als 1,6 m/s sowie kleinere Ausschläge in die positive Z-Richtung mit etwa 0,12 m/s. Der geringe Abstand der Trennflächenscharen führte zu einer deutlichen Konsolidierung und Verfestigung des Gefüges, die sich erst nach zahlreichen Berechnungsschritten stabilisierte. Dies zeigte sich daran, dass die Geschwindigkeiten häufig erst nach vielen Berechnungsschritten merklich abklagen. Bei den ersten vier Belastungsstufen von

0,125 MPa, 0,125 MPa, 0,25 MPa und 1 MPa konnte das Keilmodell eine kumulierte maximale Sohldruckspannung von 1,5 MPa tragen. Mit der nächsten Laststeigerung kehrten die Geschwindigkeiten jedoch nicht mehr in die Ruhelage zurück, was auf ein Versagen der Gründung hinwies. In den Abbildungen (Abb. 7.19, 7.20) wurden die Gesamtverschiebungen der Fundamentplatte sowie des Keilmodells dargestellt. Die abgleitende Keilhöhe und das Volumen wurden mit etwa 23 Metern und 1.648 m³ berechnet.

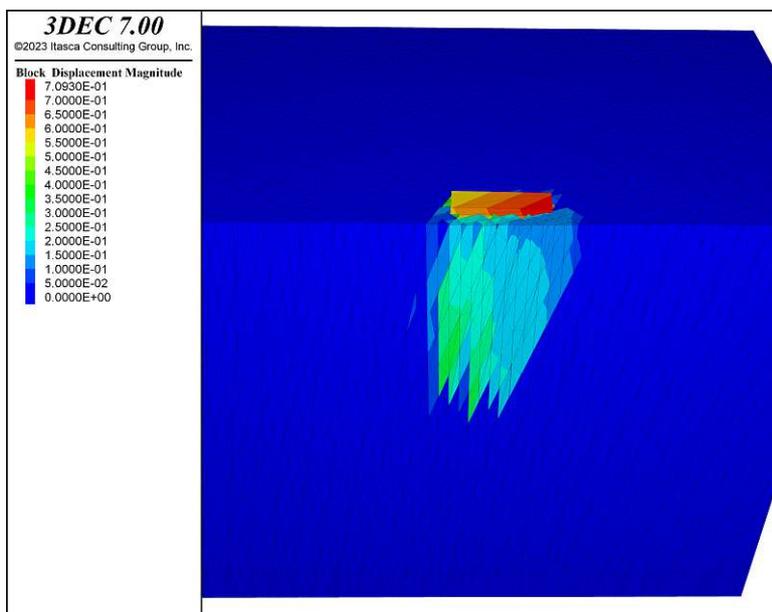


Abb. 7.19: Gesamtverschiebung des Keilblocks in der Vorderansicht

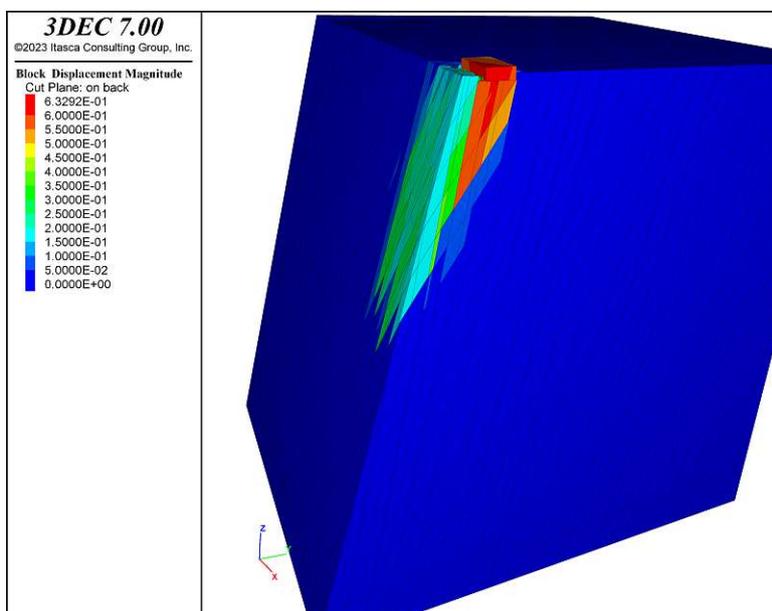


Abb. 7.20: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

In der Draufsicht der nächsten Abbildung (Abb. 7.21) ist zu erkennen, dass die Fundamentplatte unterschiedlich stark verschoben ist. Der vordere rechte Bereich erreicht Verschiebungen von bis zu 0,7 Metern, während der hintere linke Bereich etwa 0,6 Meter aufweist, was auf ein diagonales Kippen der Fundamentplatte hindeutet. Der abgleitende Bereich ist deutlich kleiner als der ursprünglich durch die keilbildenden Flächen definierte Keil. Die abgleitenden Bereiche an den Seiten und der hinteren Seite des Keilmodells sind nur geringfügig größer als die Fundamentplatte.

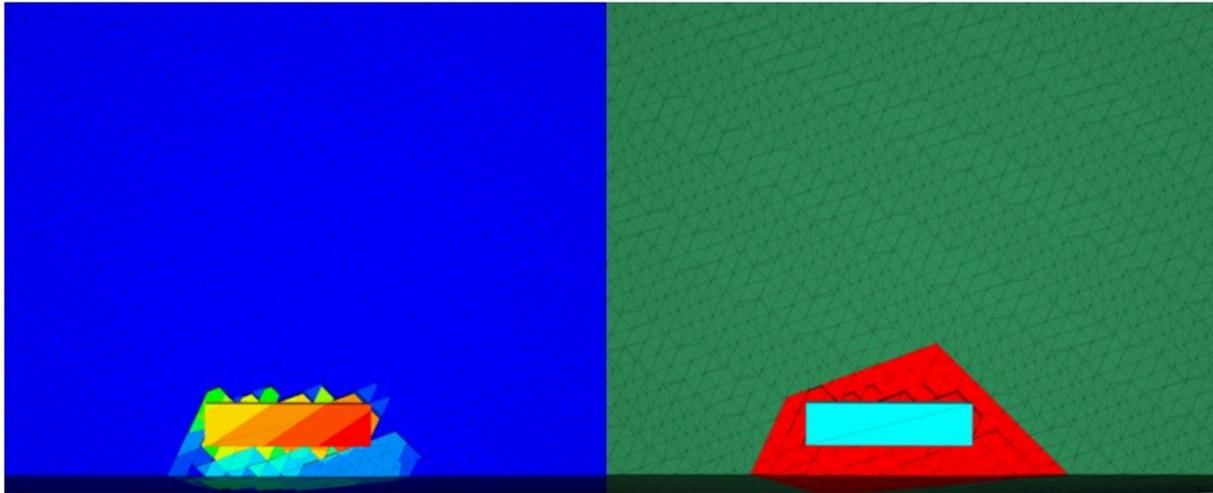


Abb. 7.21: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.2 Sohldruckspannungen bei Kohäsionseinstellungen von 200 und 100 kPa

In dieser Untersuchung wurde das in Kapitel 5 beschriebene Keilmodell mithilfe von 3DEC analysiert. Die Kohäsion der ersten Keilfläche wurde von 100 kPa auf 200 kPa und die der zweiten Keilfläche von 50 kPa auf 100 kPa erhöht. Der Reibungswinkel blieb bei 35° für die erste und 20° für die zweite Keilfläche. Die Werte für Kohäsion und Reibungswinkel wurden für alle Untersuchungsdurchläufe konstant gehalten, während die Abstände der Trennflächenscharen variiert wurden. Zunächst wurde der Keilblock analysiert, der durch die keilbildenden Trennflächen entstanden war. Anschließend wurden Trennflächenscharen eingefügt, deren Abstände schrittweise auf 3 Meter, 2 Meter, 1,5 Meter und schließlich 1 Meter reduziert wurden. Neben der Ermittlung der maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen wurden auch der Versagensmechanismus, die abgleitende Keilhöhe sowie das Volumen des abgleitenden Keilblocks untersucht und dokumentiert.

7.2.2.1 Untersuchung des Keilblocks durch keilbildende Trennflächen

Bei dieser Analyse wurde der größtmögliche Keilblock modelliert, der aufgrund der keilbildenden Trennflächen und der gegebenen Böschungshöhe von 50 m entstehen konnte. Die Stabilität des Keils bei zunehmender Belastung (die alle 2000 Berechnungsschritte erhöht wurde) wurde anhand der Geschwindigkeitsverläufe an den Referenzpunkten der Fundamentplatte beurteilt. Darüber hinaus wurde der Versagensmechanismus des modellierten Felskeils mittels Konturplots in verschiedenen Ansichten dargestellt und sowohl der Versagensmechanismus als auch das abgleitende Keilvolumen und die Keilhöhe dokumentiert.

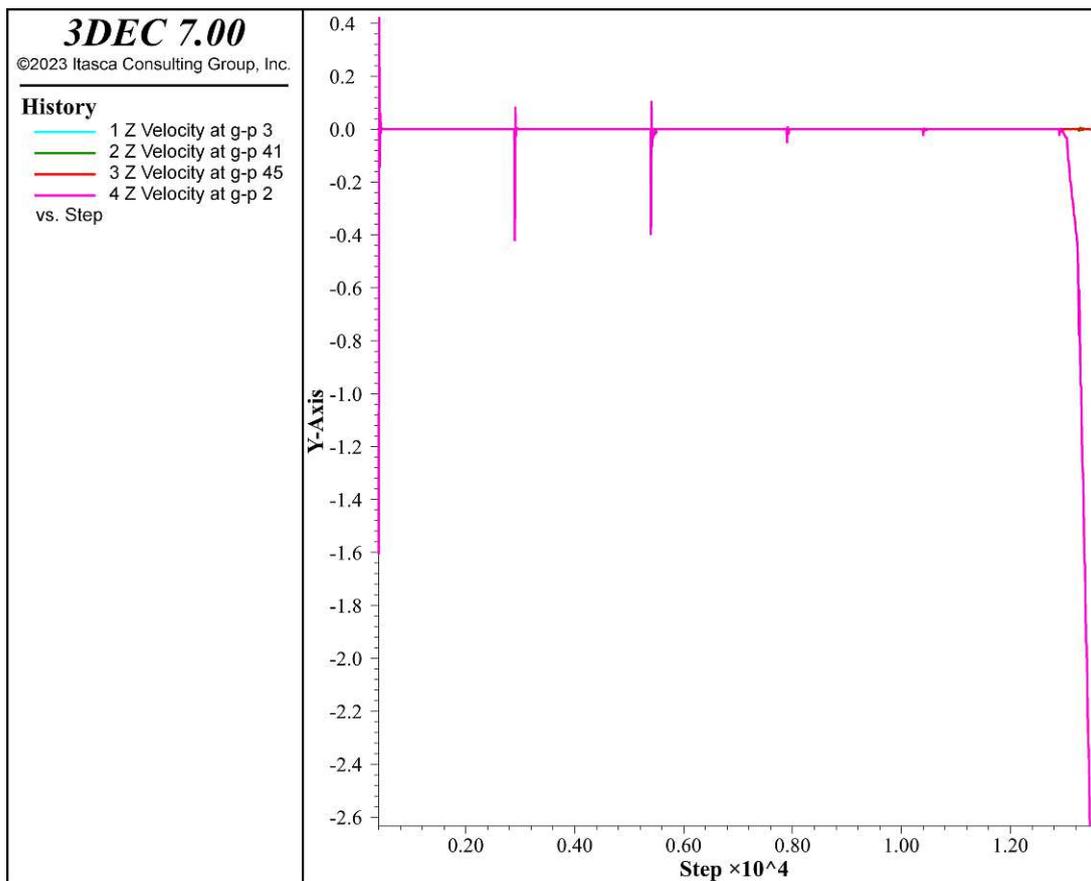


Abb. 7.22: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der Abbildung (Abb. 7.22) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Referenzpunkte an der Fundamentplatte mit zunehmender Fundamentlast dargestellt. Jede Lastaufbringung führte zu einem Ausschlag bei den Geschwindigkeiten, mit Maximalwerten von 0,4 m/s bis -1,6 m/s in negativer Richtung. Da im Keilmodell nur die keilbildenden Trennflächenscharen vorhanden waren, kam es nur zu einer geringen Konsolidierung, was sich im sofortigen Rückgang der Geschwindigkeiten in die Ruhelage zeigte. In dieser Untersuchung wurden fünf Belastungsstufen von 0,125 MPa, 0,25 MPa, 1 MPa, 2 MPa und 4 MPa aufgebracht. Das Keilmodell konnte eine kumulierte Sohldruckspannung von 7,375 MPa aufnehmen. Bei weiterer Belastungssteigerung stiegen die Geschwindigkeiten auf -2,6 m/s, was auf ein Versagen der Gründung hinwies. In den Abbildungen (Abb. 7.23, 7.24) sind verschiedene Ansichten des Keilmodells zu sehen, die

das Abgleiten des Keilblocks verdeutlichen. Die abgleitende Keilhöhe betrug 50 Meter, und das Volumen des Keils wurde mit 1.857,32 m³ ermittelt.

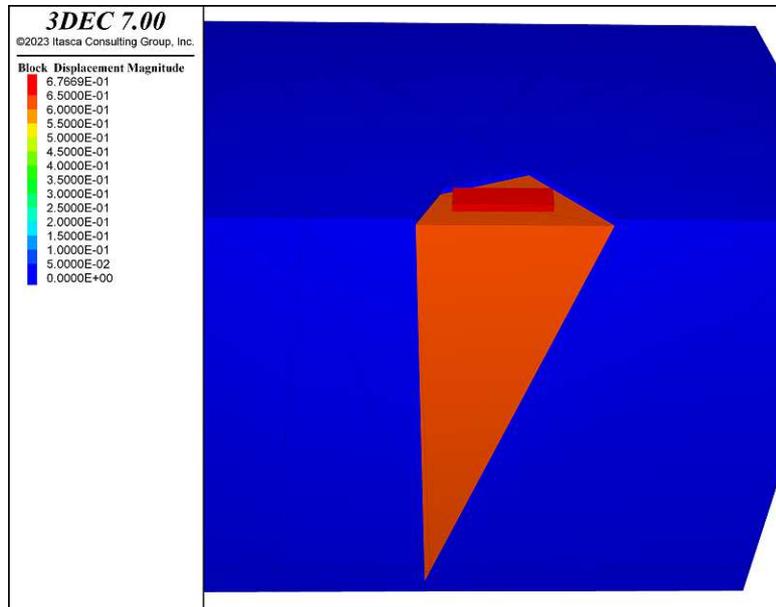


Abb. 7.23: initiales Versagen, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

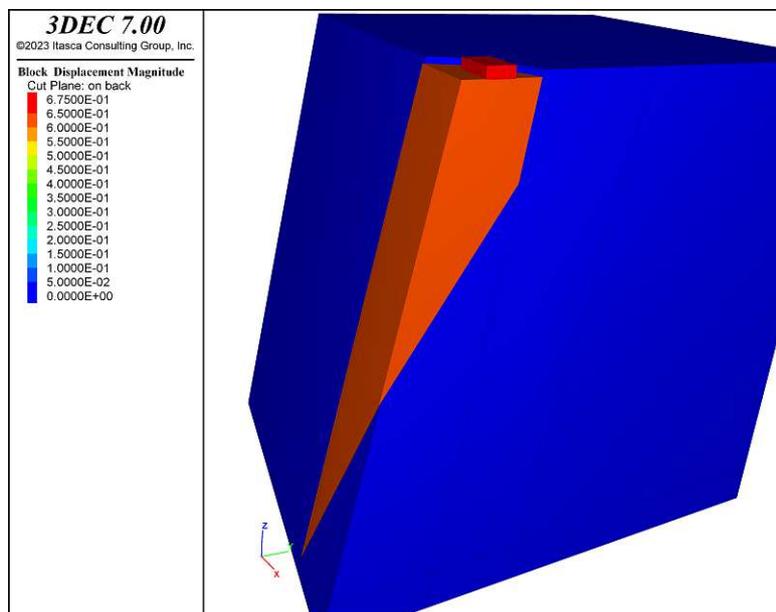


Abb. 7.24: initiales Versagen, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

Die nächste Abbildung (Abb. 7.25) zeigte das Keilmodell in zwei verschiedenen Einstellungen aus der Draufsicht. Es wurde deutlich, dass der gesamte Bereich, der durch die keilbildenden Trennflächen entstanden war, vollständig abglitt. Dieser Bereich war deutlich größer als die aufliegende Fundamentplatte und verdeutlichte die Ausbreitung des Versagens über die direkt belastete Fläche hinaus. Der abgleitende Keilblock blieb zusammenhängend und zeigte dieselbe Verschiebung wie die Fundamentplatte, wobei beide eine homogene Verschiebung von 1,3 Metern aufwiesen. Dies unterstrich die gleichmäßige Bewegungsübertragung zwischen Fundamentplatte und Keilblock sowie die Rolle der keilbildenden Trennflächen beim Versagensmechanismus.

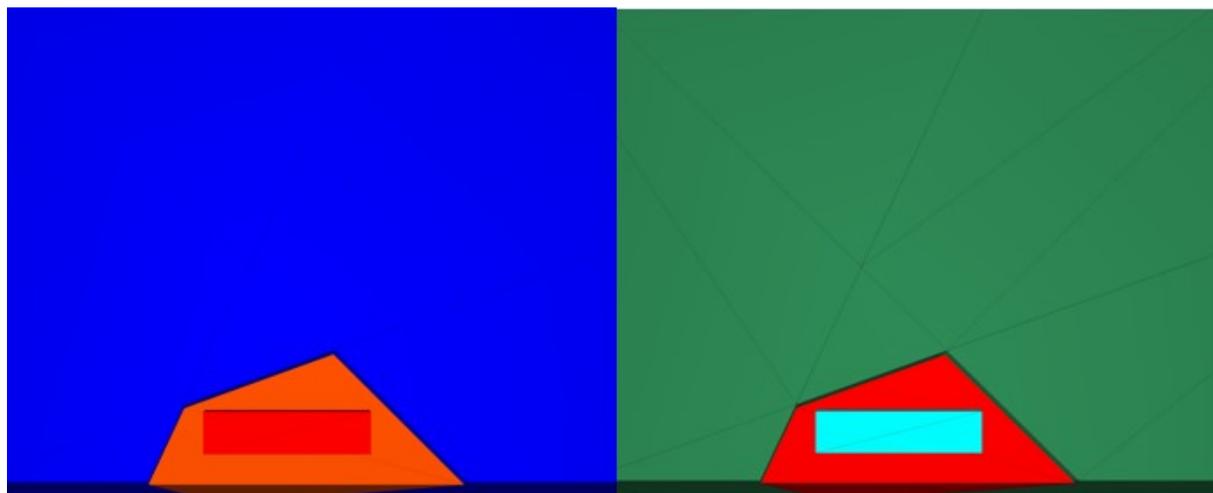


Abb. 7.25: Draufsicht, links: bewegte Blöcke (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.2.2 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 3 Metern

Bei dieser Untersuchung wurde der Keilblock bei einem Trennflächenscharenabstand von 3 Metern untersucht. Zunächst wurden die Geschwindigkeitsverläufe der zugewiesenen Eckpunkte der Fundamentplatte unter gesteigerter Belastung aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden Konturplots erstellt, die die Verschiebungen in unterschiedlichen Ansichten zeigten und den Versagensmechanismus darstellten. Ebenso wurden die abgleitende Keilhöhe und das abgleitende Keilvolumen dokumentiert.

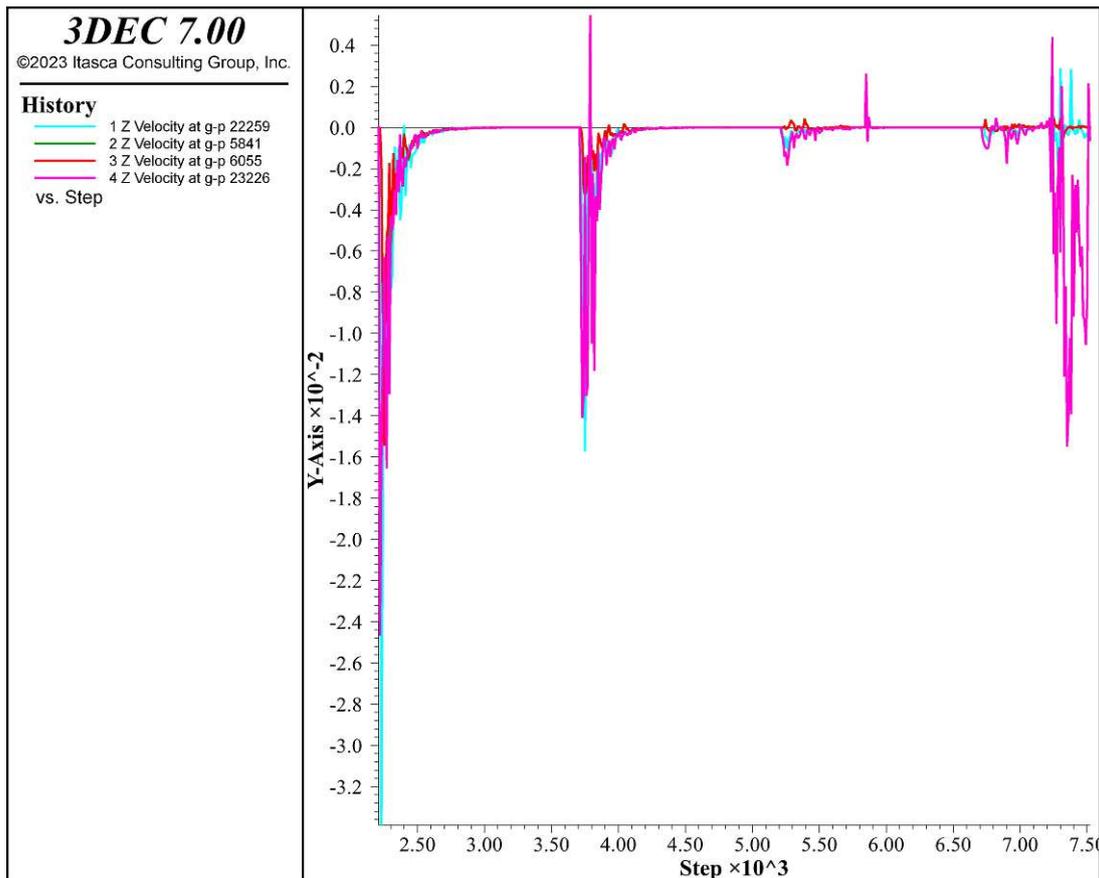


Abb. 7.26: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der oben dargestellten Abbildung (Abb. 7.26) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Referenzpunkte an der Fundamentplatte in Reaktion auf erhöhte Belastungen gezeigt. Wie aus der Grafik hervorging, führte jede Lastaufbringung zu einem signifikanten Anstieg der Geschwindigkeit von mehr als 3,2 m/s in die negative Z-Richtung, begleitet von weniger ausgeprägten Ausschlägen in die positive Z-Richtung mit über 0,4 m/s. Durch die Einführung von Trennflächenscharen mit Abständen von 3 Metern kam es zu einer Verdichtung mit anschließender Verfestigung des Trennflächengefüges. Dies äußerte sich in einem verzögerten Rückgang der Geschwindigkeiten in die Ruhelage, der erst nach mehreren Berechnungsschritten eintrat. In dieser Untersuchung wurden vier Belastungsstufen von 0,125 MPa, 0,25 MPa, 2 MPa und 3 MPa aufgebracht. Das Keilmodell konnte eine kumulierte Sohlruckspannung von 5,25 MPa aufnehmen, bevor es zum Versagen der Gründung kam. In den Abbildungen (Abb. 7.27, 7.28) wurden verschiedene Ansichten des Keilmodells dargestellt, die die initiale Gesamtverschiebung des Keilblocks zeigten.

Die abgleitende Höhe des Keilblocks betrug etwa 33 Meter, was rund zwei Dritteln der 50 Meter Gesamthöhe entsprach. Das Volumen des abgleitenden Keilblocks wurde mit 1.801,60 m³ berechnet.

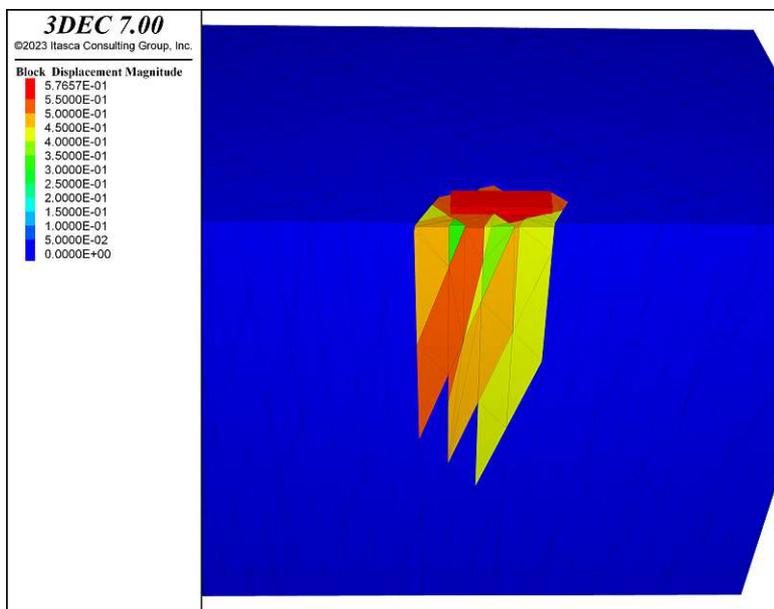


Abb. 7.27: initiales Versagen, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

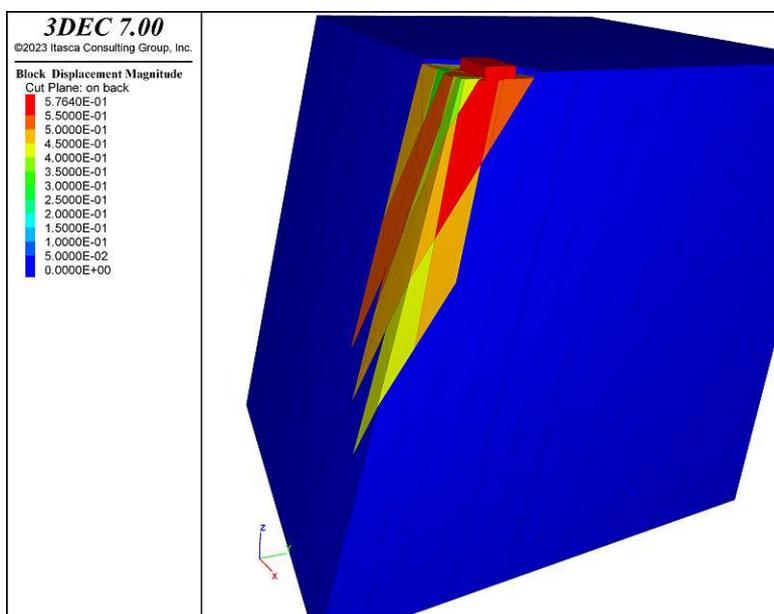


Abb. 7.28: initiales Versagen, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

In der nachfolgenden Abbildung (Abb. 7.29), die das Keilmodell in zwei unterschiedlichen Draufsichten zeigte, wurde deutlich, dass größere Bereiche der keilbildenden Trennflächen, die nicht direkt von der Fundamentplatte belastet wurden, in ihrer ursprünglichen Position verblieben. Der abgleitende Keilblock fiel daher kleiner aus als der initiale Keilblock, dennoch glitt ein größerer Bereich ab, als von der Platte tatsächlich belastet wurde. Während die Fundamentplatte und das darunter liegende Gefüge eine konstante Verschiebung von etwa 0,58 Metern aufwiesen, zeigten die unbelasteten Bereiche eine sehr inhomogene Verschiebung, was auf eine starke Zerklüftung des Gefüges hindeuten konnte.

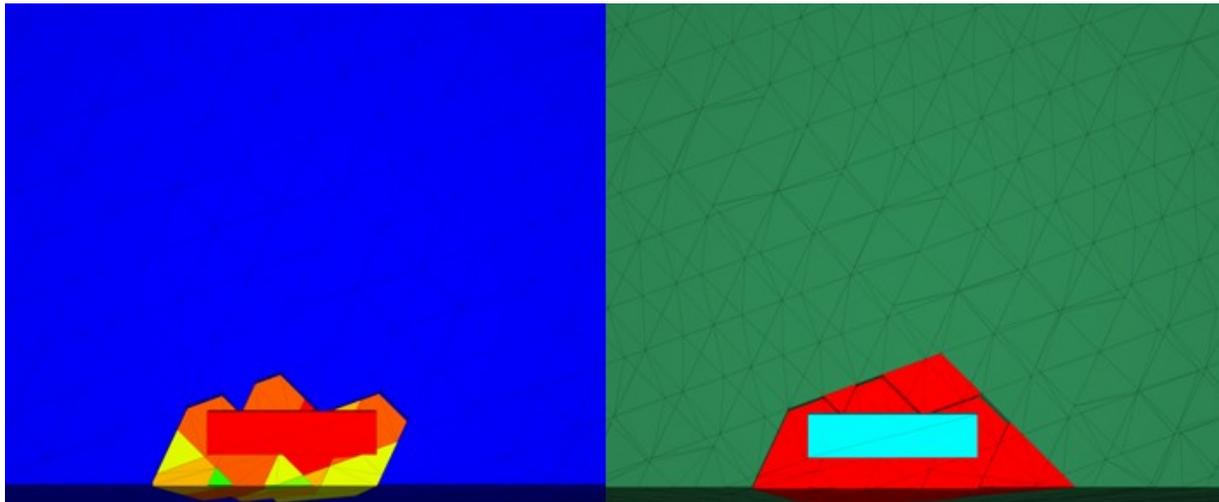


Abb. 7.29: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.2.3 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 2 Metern

Bei diesem Durchlauf wurde der Keilblock mit einem Trennflächenscharenabstand von 2 Metern untersucht. Zunächst wurden die Geschwindigkeitsverläufe an den zugewiesenen Eckpunkten der Fundamentplatte unter steigender Belastung aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde der Versagensmechanismus des modellierten Felskeils mittels Konturplots der Verschiebungen in der Vorderansicht und der Schnittansicht dargestellt. Der Versagensmechanismus sowie das abgleitende Keilvolumen wurden ebenfalls dokumentiert.

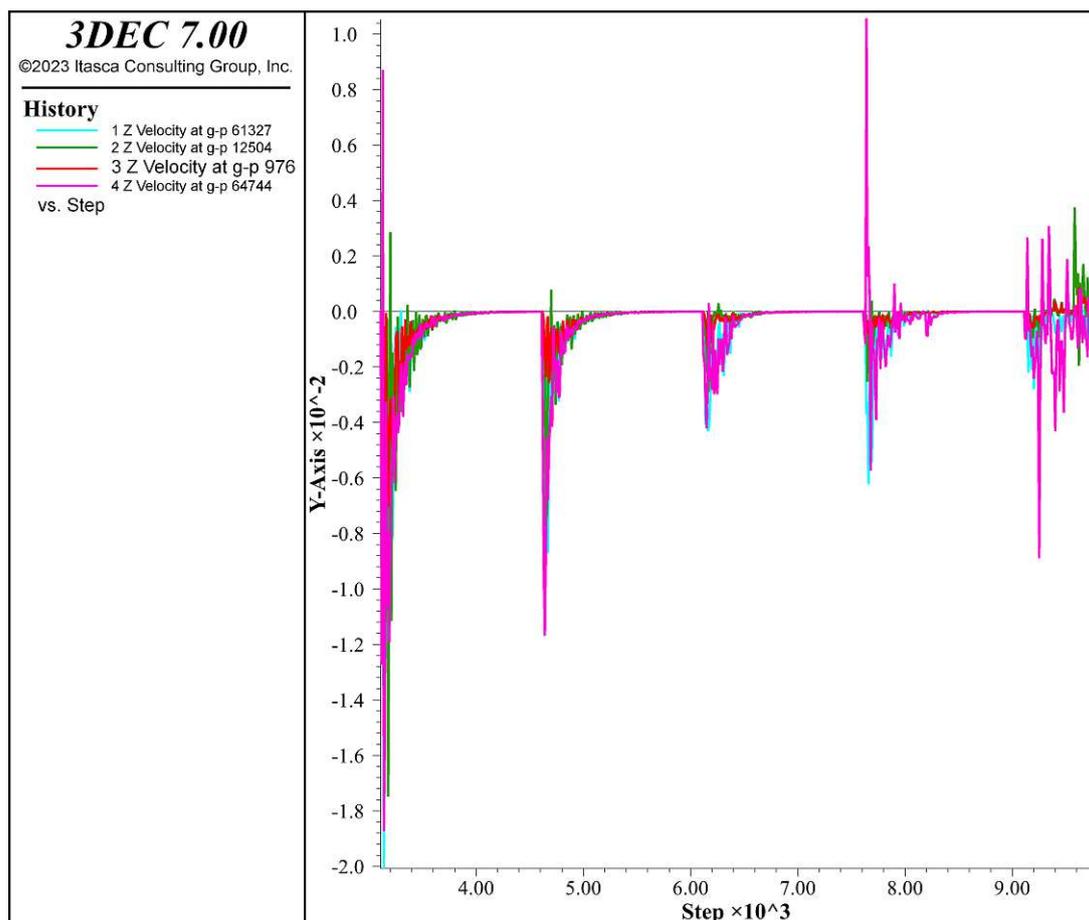


Abb. 7.30: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der dargestellten Abbildung (Abb. 7.30) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Referenzpunkte auf der Fundamentplatte unter Lastaufbringung gezeigt. Aus der Grafik ging hervor, dass jede Lastaufbringung zu einem signifikanten Anstieg der Geschwindigkeit in die negative sowie die positive Z-Richtung führte, mit Spitzenwerten von bis zu -2 m/s und 1 m/s. Durch die Einführung von Trennflächenscharen mit einem Abstand von 2 Metern kam es zunächst zu einer Verdichtung und anschließend zu einer Verfestigung des Trennflächengefüges. Dies äußerte sich in einem verzögerten Abklingen der Geschwindigkeiten, bis schließlich die Ruhelage erreicht wurde. Dieser Prozess benötigte mehrere Berechnungsschritte. Im Rahmen der Untersuchung wurden vier Belastungsstufen von 0,5 MPa, 0,5 MPa, 1 MPa und 2 MPa aufgebracht, wodurch eine maximale kumulierte Sohldruckspannung von 4 MPa erreicht wurde. Eine erneute Laststeigerung führte

zum Versagen der Gründung, was durch das Fehlen eines Rückgangs der Geschwindigkeiten in die Ruhelage deutlich wurde. Die Abbildungen (Abb. 7.31, 7.32) zeigten verschiedene Ansichten des Keilmodells sowie die resultierende initiale Gesamtverschiebung des Keilblocks. Die abgleitende Keilhöhe betrug ca. 31 Meter, was etwa 5/8 der Gesamthöhe des initialen Keilmodells von 50 Metern entsprach. Das Volumen des abgleitenden Keils wurde mit $1.737,7 \text{ m}^3$ berechnet.

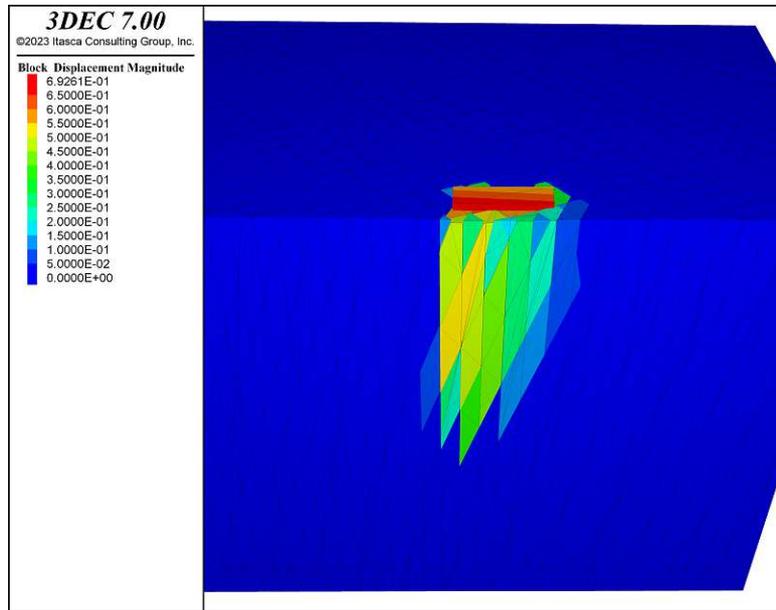


Abb. 7.31: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

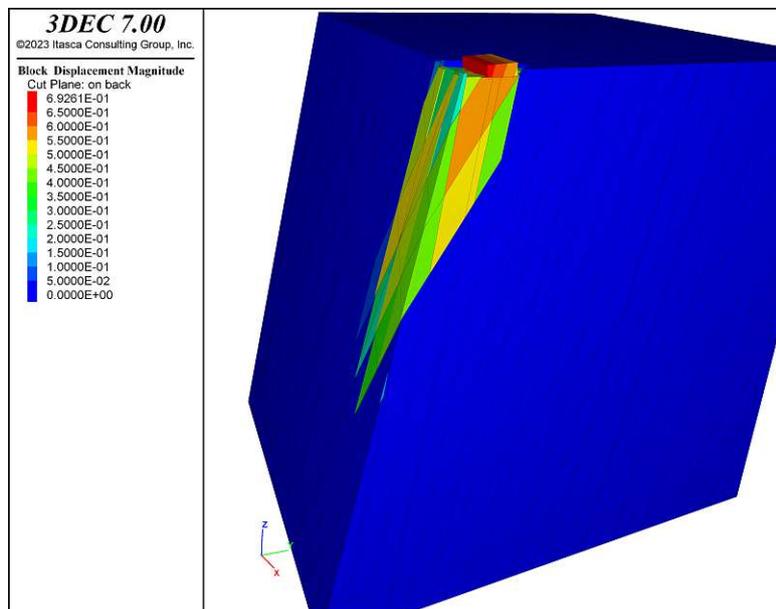


Abb. 7.32: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

In der nachfolgenden Draufsicht (siehe Abb. 7.33) wurde das Keilmodell von oben visualisiert. Es war ersichtlich, dass nicht mehr alle Bereiche der keilbildenden Trennflächen abglitten, sondern verblieben. Die Bereiche, die von der Fundamentplatte belastet wurden, sowie die Fundamentplatte selbst zeigten eine inhomogene Verschiebung. Die Verschiebung an der Fundamentplatte auf der Böschungsseite betrug etwa 0,69 Meter, während auf der gegenüberliegenden Seite eine Verschiebung von 0,55 Metern zu beobachten war. Dies deutete auf ein Kippen der Fundamentplatte hin. Auch die Bereiche, die nicht von der Fundamentplatte belastet wurden und abglitten, zeigten eine sehr inhomogene Verschiebung, worauf eine Zerklüftung des Gefüges geschlossen werden konnte.

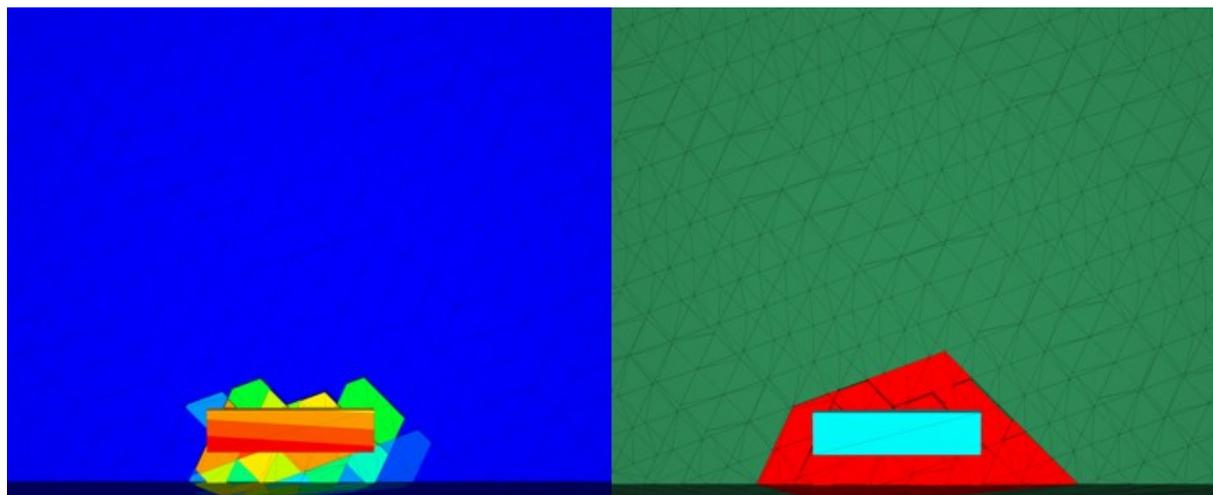


Abb. 7.33: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.2.4 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 1,5 Metern

Bei diesem Durchlauf in 3DEC wurde der Keilblock mit einem Trennflächenscharenabstand von 1,5 Metern untersucht. Zunächst wurden die Geschwindigkeitsverläufe an den zugewiesenen Eckpunkten der Fundamentplatte bei einer Steigerung der Belastung alle 2000 Berechnungsschritte aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde der Versagensmechanismus des modellierten Felskeils mittels Konturplots der Verschiebungen in der Vorder-, Schnitt- und Draufsicht dargestellt. Der Versagensmechanismus sowie das abgleitende Keilvolumen und die Keilhöhe wurden ebenfalls dokumentiert.

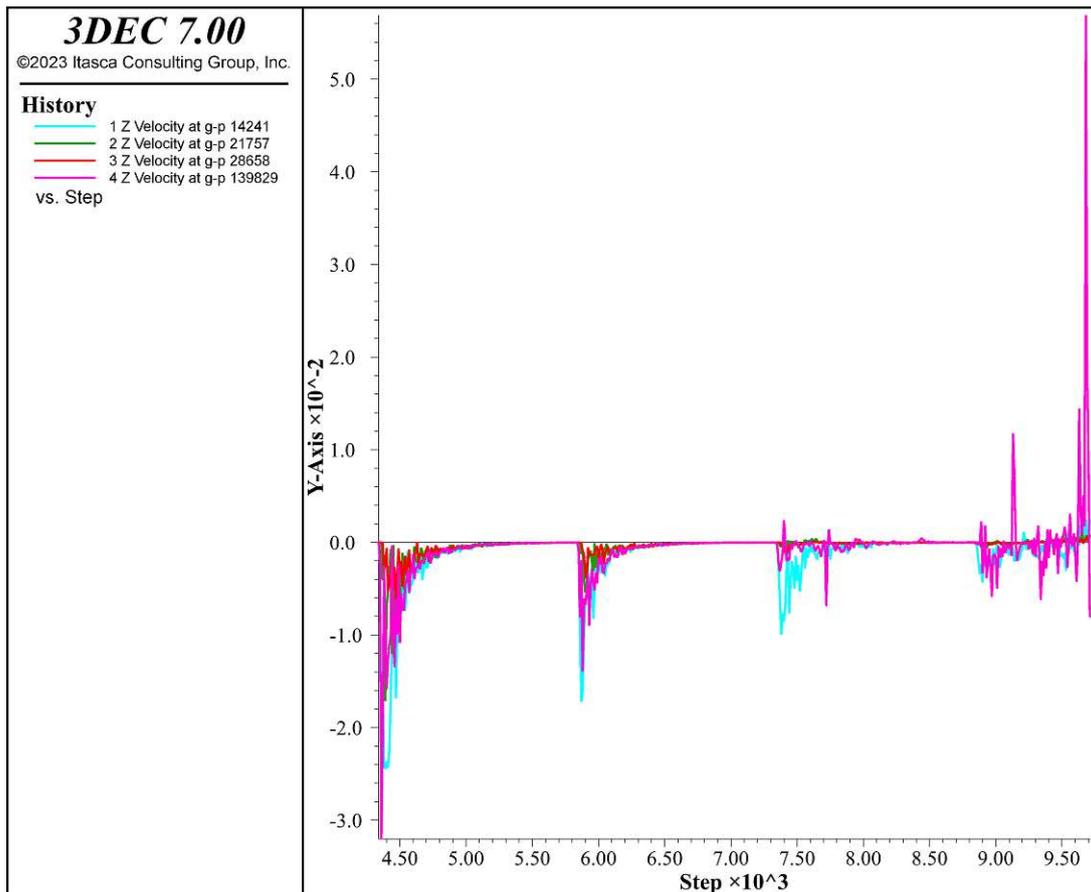


Abb. 7.34: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der oberen Abbildung (Abb. 7.34) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Fundamentplatte mit den Referenzpunkten infolge gesteigerter Belastungen bei einem Trennflächenscharenabstand von 1,5 Metern dargestellt. Wie aus der Grafik hervorging, führte jede Lastaufbringung zu einem signifikanten Anstieg der Geschwindigkeit sowohl in die negative Z-Richtung mit bis zu 3,2 m/s als auch in die positive Z-Richtung mit bis zu 5,7 m/s. Diese Geschwindigkeiten wurden durch Trennflächenscharen, durch Konsolidierung und Verfestigung, abgefangen. Dies äußerte sich in einem verzögerten Rückgang der Geschwindigkeiten in die Ruhelage, der erst nach mehreren Berechnungsschritten eintrat. In dieser Untersuchung wurden vier Belastungsstufen von 0,25 MPa, 0,5 MPa, 1 MPa und 2 MPa aufgebracht, was eine maximal aufnehmbare kumulierte Sohldruckspannung von 3,75 MPa ergab. Durch das Aufbringen einer erneuten Laststeigerung kam es zu einem erneuten Anstieg der Geschwindigkeiten, die jedoch nicht mehr in die Ruhelage

zurückkehrten und somit ein Versagen der Gründung anzeigte. In den Abbildungen (Abb. 7.35, 7.36) wurden eine Vorderansicht sowie eine Schnittansicht des Keilmodells dargestellt, die das anfängliche Abgleiten des Keilblocks zeigten. Die abgleitende Höhe des Keilblocks betrug etwa 25 Meter, was der Hälfte der Gesamthöhe des Keilmodells von 50 Metern entsprach. Das Volumen des abgleitenden Keils wurde mit $1.645,3 \text{ m}^3$ ermittelt.

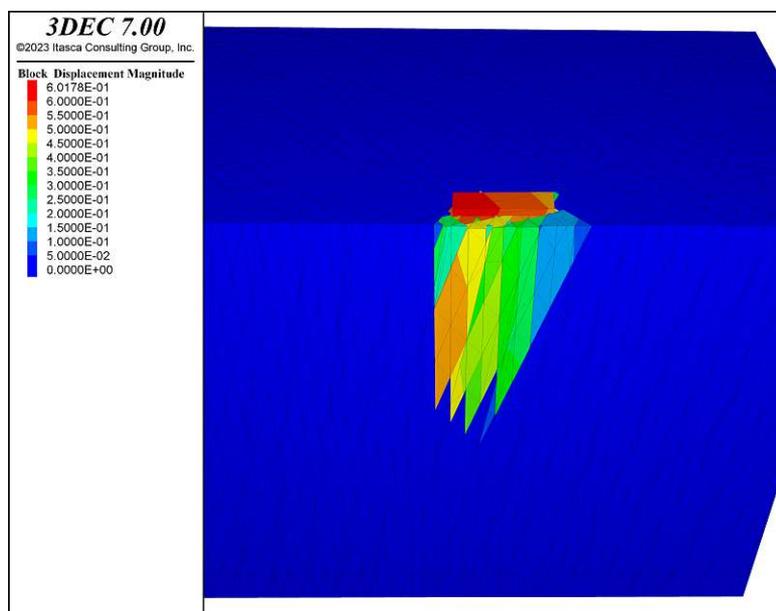


Abb. 7.35: Gesamtverschiebung des Keilblocks in der Vorderansicht

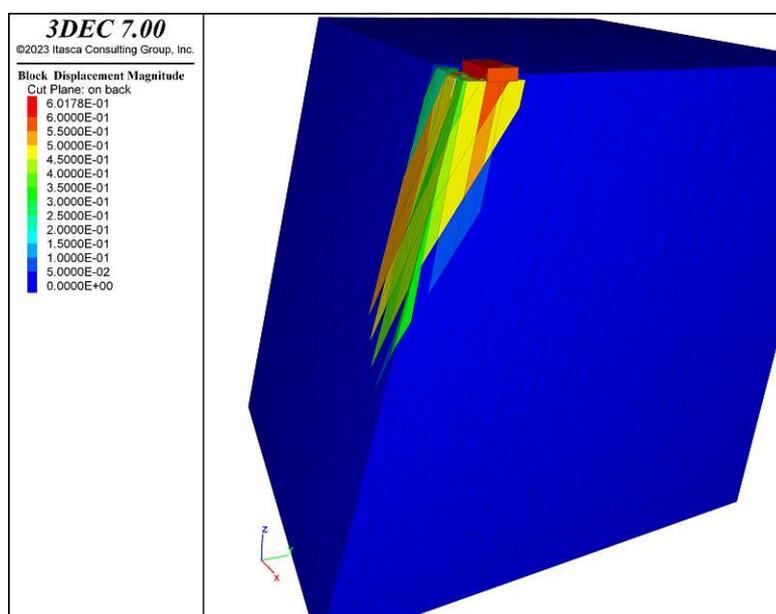


Abb. 7.36: Gesamtverschiebung des Keilblocks in der zentralen Schnittansicht

Die nächste Abbildung (Abb. 7.37) zeigte das Keilmodell in zwei verschiedenen Einstellungen aus der Draufsicht. Es war erkennbar, dass Teile des initialen Keils verblieben und somit nicht mehr alle Bereiche der keilbildenden Trennflächen abglitten. Die Bereiche, die von der Fundamentplatte belastet wurden, sowie die Fundamentplatte selbst, zeigten eine inhomogene Verschiebung. Die Verschiebung an der linken Fundamentplattenseite betrug bis zu 0,6 Meter, während auf der rechten Seite eine geringere Verschiebung von 0,5 Metern zu beobachten war. Dies deutete auf ein Kippen entlang der langen Achse hin. Der abgleitende Keilblock wies starke Inhomogenitäten bei den Verschiebungen auf, was auf eine starke Zerklüftung hindeutete.

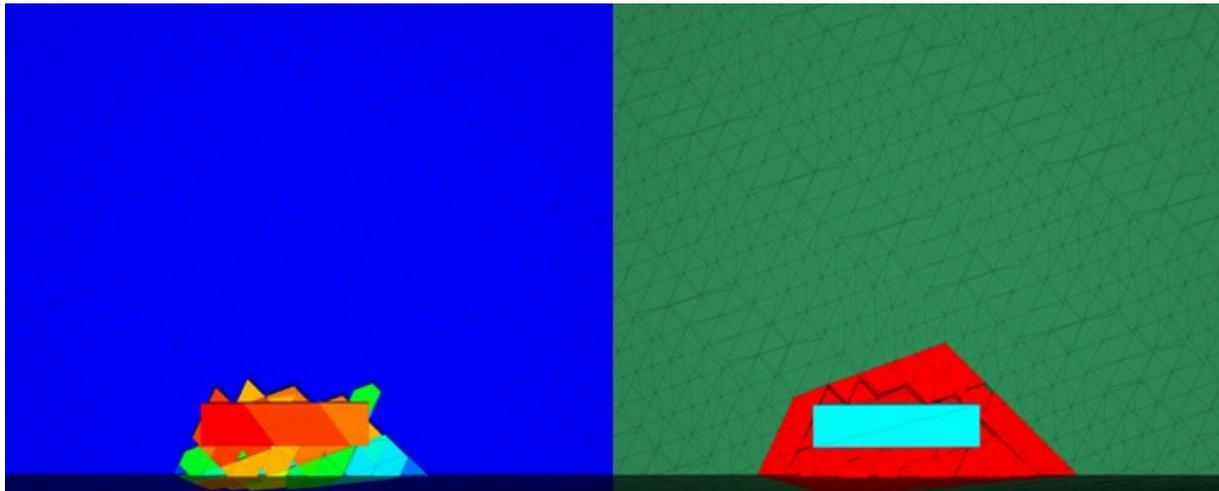


Abb. 7.37: Draufsicht, links: bewegter Blöck (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

7.2.2.5 Untersuchung des Keilblocks bei einem Trennflächenscharenabstand von 1 Metern

In diesem abschließenden Durchlauf der Testreihe wurde der Keilblock erneut angepasst, der Trennflächenscharenabstand auf 1 Meter reduziert und analysiert. Zunächst wurden die Geschwindigkeitsverläufe der Fundamentplatte aufgezeichnet, nachdem nach 2000 Berechnungsschritten die Belastung erneut gesteigert wurde. Anschließend wurden die Konturplots des Keilmodells in verschiedenen Ansichten dargestellt, und der Versagensmechanismus sowie die abgleitende Keilhöhe und das Volumen des abgleitenden Keils dokumentiert.

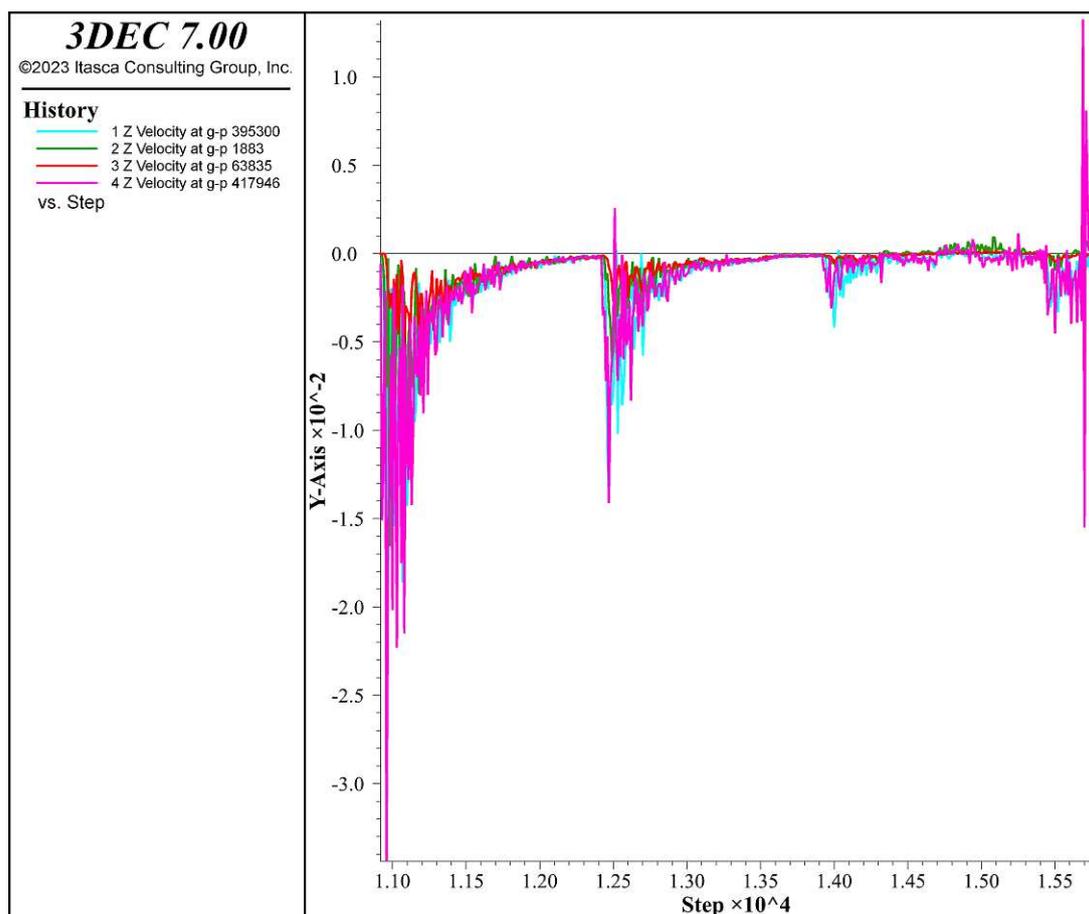


Abb. 7.38: Vertikalgeschwindigkeiten [m] (y-Achse) vs. Berechnungsschritte (x-Achse) unter Belastung

In der Abbildung (Abb. 7.38) wurde der Geschwindigkeitsverlauf der Fundamentplatte mit den Referenzpunkten infolge gesteigerter Belastungen bei einem Trennflächenscharenabstand von 1 Meter dargestellt. Wie aus der Grafik hervorging, kam es im Zuge der erhöhten Lastaufbringung zu Geschwindigkeitsausschlägen in die negative und positive Z-Richtung. Die Maximalwerte lagen dabei bei 3,2 m/s in der negativen Z-Richtung und 5,8 m/s in der positiven Z-Richtung. Diese Geschwindigkeiten wurden durch die Trennflächenscharen durch Konsolidierung und Verfestigung abgefangen. Dies äußerte sich in einem verzögerten Rückgang der Geschwindigkeiten in die Ruhelage, der erst nach mehreren Berechnungsschritten eintrat. In dieser Untersuchung wurden vier Belastungsstufen von 0,125 MPa, 0,25 MPa, 1 MPa und 2 MPa aufgebracht, was eine maximal aufnehmbare kumulierte Sohldruckspannung von 3,25 MPa ergab. Eine weitere Steigerung führte zum Versagen der Gründung. In den Abbildungen (Abb. 7.39, 7.40) sind eine Vorderansicht

sowie eine Schnittansicht des Keilmodells dargestellt, die das initiale Abgleiten des Keilblocks zeigten. Die abgleitende Höhe des Keilblocks betrug etwa 13 Meter, was weniger als die Hälfte der Gesamthöhe des Keilmodells von 50 Metern entsprach. Das Volumen des abgleitenden Keils wurde mit 1.558 m^3 ermittelt.

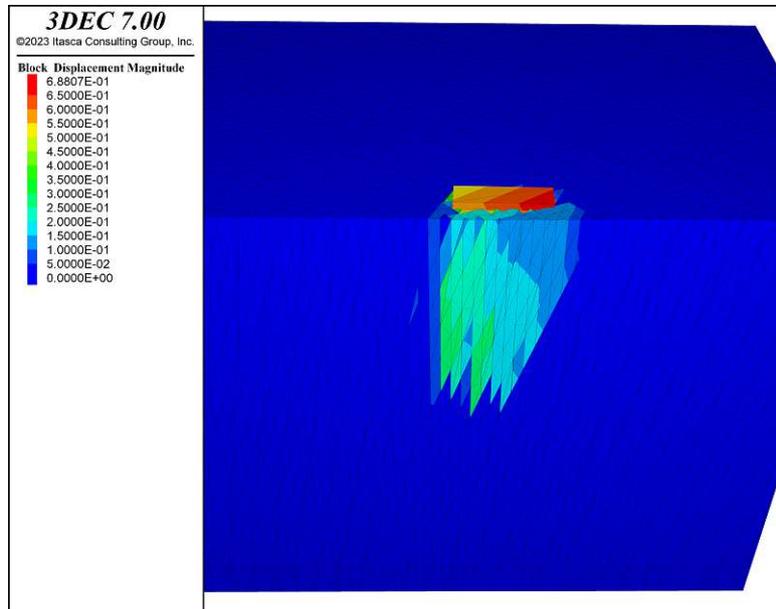


Abb. 7.39: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], Vorderansicht

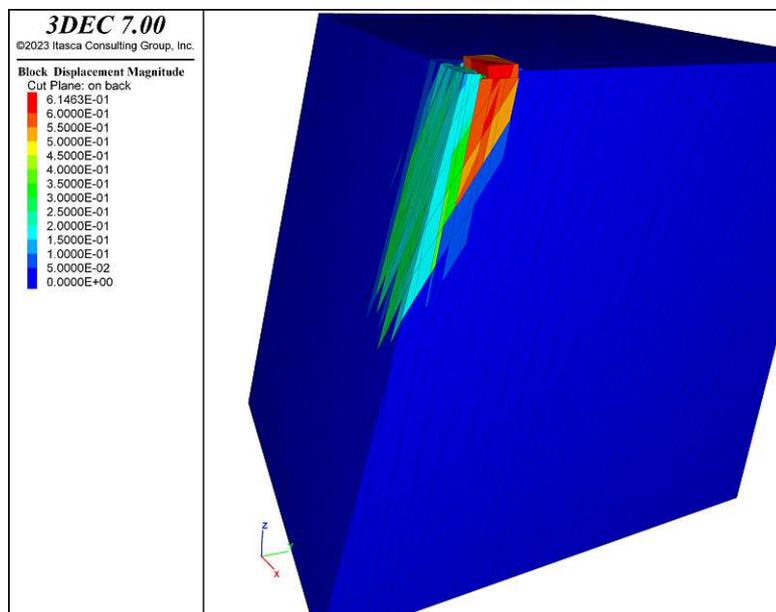


Abb. 7.40: initiales Versagen des Keilblocks, Konturplot der Verschiebungen [m], zentraler Schnitt durch das Modell

Die nächste Abbildung (Abb. 7.41) zeigt das Keilmodell in zwei verschiedenen DraufoSichten. Es ist erkennbar, dass Teile des initialen Keils verbleiben, während nur die Bereiche des Keilmodells abgleiten, die unmittelbar von der Fundamentplatte belastet werden oder im Zuge dessen mit abgleiten. Die Bereiche, die von der Fundamentplatte belastet werden, zeigen eine deutlich größere Verschiebung als die anderen abgleitenden Bereiche. Die Fundamentplatte selbst weist eine inhomogene Verschiebung auf, die von hinten links mit 0,55 Metern bis rechts vorne an der Böschungsseite mit 0,68 Metern reicht, was auf ein Kippen über die Diagonale hindeutet. Der abgleitende Keilblock zeigt erhebliche Unterschiede zwischen den belasteten und den unbelasteten Bereichen, was auf eine ausgeprägte Zerklüftung des Gefüges hindeutet.

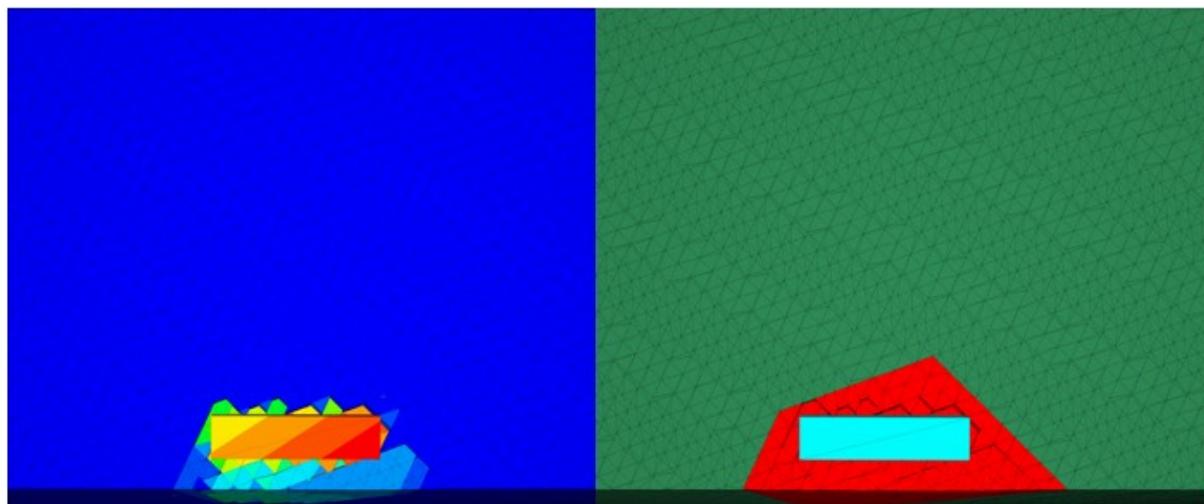


Abb. 7.41: Draufsicht, links: bewegter Block (Konturplot der Verschiebungen, blau = stabil), rechts: Geometrie des größtmöglichen Keils dargestellt durch seine Blockgruppe

Kapitel 8

Analyse und Bewertung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die zuvor ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen aus SWEDGE und 3DEC miteinander verglichen. Dabei stehen die ermittelten maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen in Abhängigkeit von den Modellparametern im Fokus. Darüber hinaus wird die ableitende Keilhöhe und das Keilvolumen betrachtet.

8.1 Analyse der mittels Grenzgleichgewichtsverfahren (SWEDGE) ermittelten Ergebnisse

Wie bereits in Abschnitt 7 beschrieben, wurden die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen unter verschiedenen Kohäsionseinstellungen ermittelt. Für eine Kohäsion von 100 kPa an der ersten Keilfläche und 50 kPa an der zweiten Keilfläche ergab sich eine maximale Sohldruckspannung von 0,781 MPa sowie ein ableitendes Keilvolumen von 1857,32 m³. Durch eine Verdoppelung der Kohäsion auf 200 kPa für die erste Keilfläche und 100 kPa für die zweite Keilfläche konnte die Sohldruckspannung auf 2,09 MPa gesteigert werden.

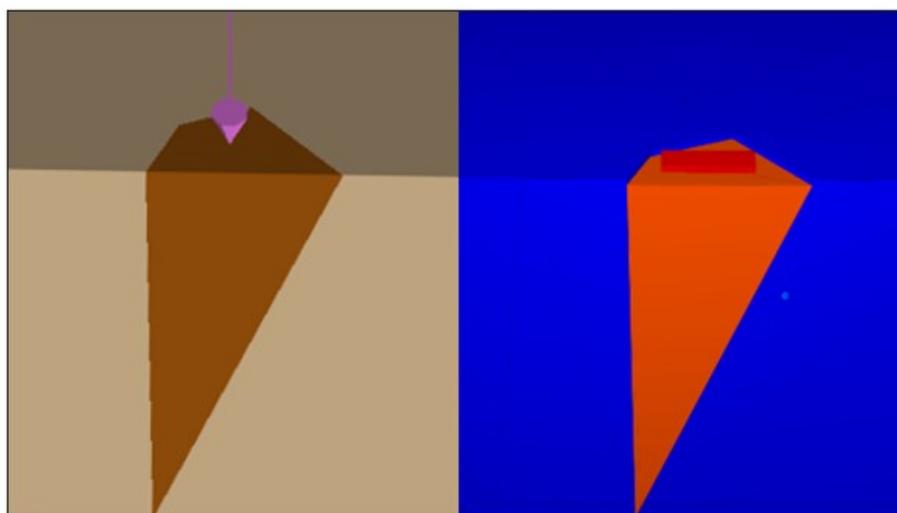


Abb. 8.1: Einzellast vs. Flächenlast auf Keilmodelle

Wie in der obenstehenden Abbildung (Abb. 8.1) ersichtlich, zeigt das linke Bild das Keilmodell in SWEDGE, das infolge einer Einzellast belastet wurde, während das rechte Bild das Keilmodell in 3DEC unter einer Flächenlast darstellt. Da in der Software SWEDGE die Belastung nur als im Schwerpunkt angreifende Einzellast modelliert werden kann und somit nicht direkt mit den Werten aus 3DEC vergleichbar ist, wurde die ermittelte Sohldruckspannung mithilfe eines Flächenfaktors an die Bedingungen von 3DEC angepasst. Die obere Keilfläche in SWEDGE

betrug $94,108 \text{ m}^2$, während die Fundamentplatte in 3DEC eine Fläche von $24,5 \text{ m}^2$ aufwies, was zu einem Flächenfaktor von 3,84 führte. Nach der Anpassung ergab sich im ersten Fall eine Sohldruckspannung von $0,781 \text{ MPa}$, die mithilfe des Flächenfaktors auf 3 MPa korrigiert wurde. Im Fall mit verdoppelter Kohäsion betrug die Sohldruckspannung $2,09 \text{ MPa}$, die entsprechend auf $8,04 \text{ MPa}$ korrigiert wurde. Das abgeleitete Keilvolumen betrug in beiden untersuchten Fällen, unabhängig von der Kohäsion, $1857,32 \text{ m}^3$. Diese Werte für die ermittelten Sohldruckspannungen sind in der nachstehenden Abbildung (Abb. 8.2) dargestellt. Eine vollständige Zusammenfassung aller ermittelten Werte kann der nachstehenden Tabelle (Tab. 8.1) entnommen werden.

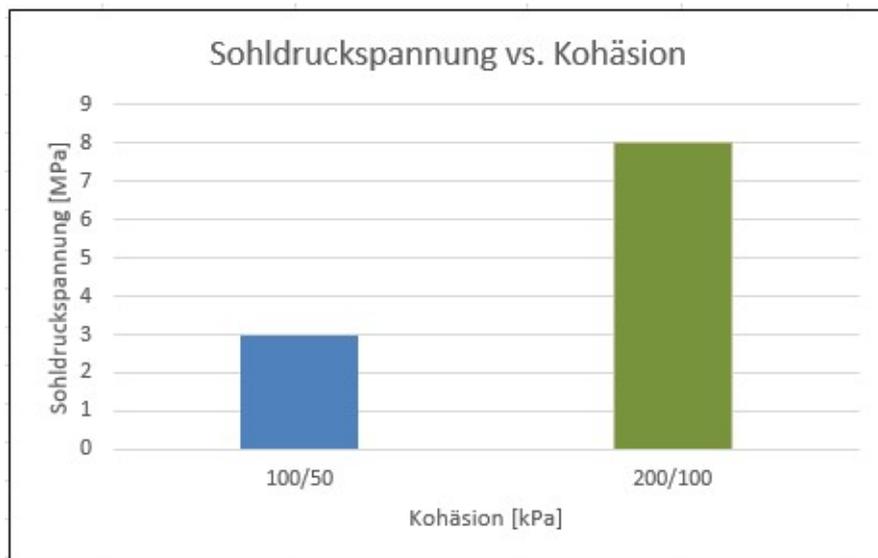


Abb. 8.2: Aufnehmbare Sohldruckspannung in Abhängigkeit der Kohäsion

Kohäsion [kPa]	Sohldruckspannung [MPa]	Keilhöhe [m]	Keilvolumen [m^3]
100/50	3,00	50,00	1857,32
200/100	8,04	50,00	1857,32

Tab. 8.1: Modellparameter des Keilblocks in Abhängigkeit der Kohäsion

8.2 Analyse der mittels 3DEC ermittelten Ergebnisse

Die im Abschnitt 7 ermittelten Werte aus den Untersuchungen werden weiter aufbereitet und visualisiert, um eine übersichtliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Zunächst werden die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen für Kohäsionseinstellungen von 100 kPa an der ersten Keilfläche und 50 kPa an der zweiten Keilfläche dargestellt. Dies umfasst die Ergebnisse für den initialen Keil sowie für Trennflächenscharen mit Abständen von 3 m, 2 m, 1,5 m und 1 m, ergänzt durch die zugehörigen Keilvolumina und die Keilhöhe des abgeglittenen Keilblocks. Anschließend werden die Ergebnisse für Kohäsionseinstellungen von 200 kPa an der ersten Keilfläche und 100 kPa an der zweiten Keilfläche für die genannten Trennflächenscharenabstände präsentiert. Dabei werden ebenfalls die zugehörigen abgleitenden Keilvolumina und die Keilhöhe dargestellt.

8.2.1 Ergebnisse mit Kohäsionseinstellungen von 100/50 kPa

Die in den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 8.3, 8.4 und 8.5) dargestellten Diagramme zeigen die ermittelten Werte bei einer Kohäsion von 100 kPa und 50 kPa, die in Abhängigkeit vom Abstand der Trennflächenscharen ermittelt wurden. Zunächst werden die Werte für die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen dargestellt. Anschließend werden die abgleitende Keilhöhe sowie das ermittelte Keilvolumen visualisiert. Neben der grafischen Darstellung sind die Werte in einer Tabelle (Tab. 8.2) zusammengefasst.

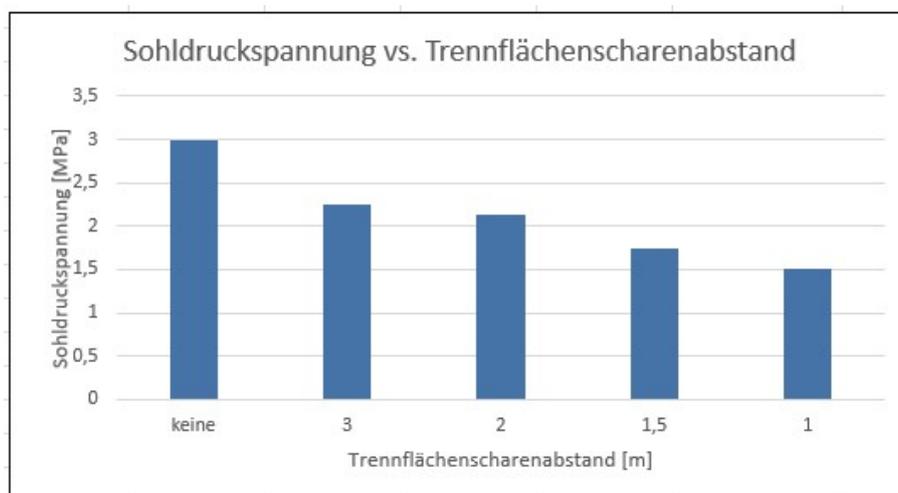


Abb. 8.3: Sohldruckspannung in Abhängigkeit der Trennflächenscharenabstände

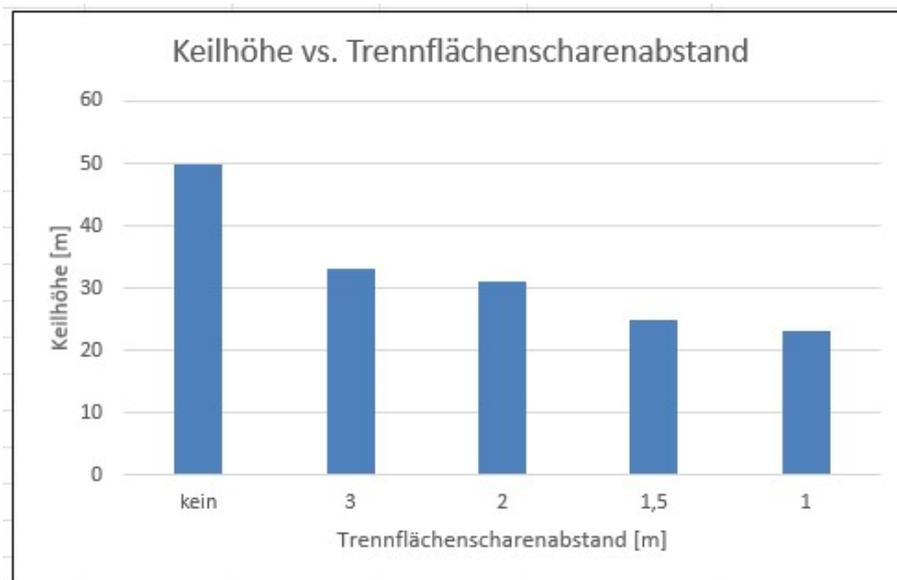


Abb. 8.4: Ermittelte Keilhöhe vs. Trennflächenscharenabstand

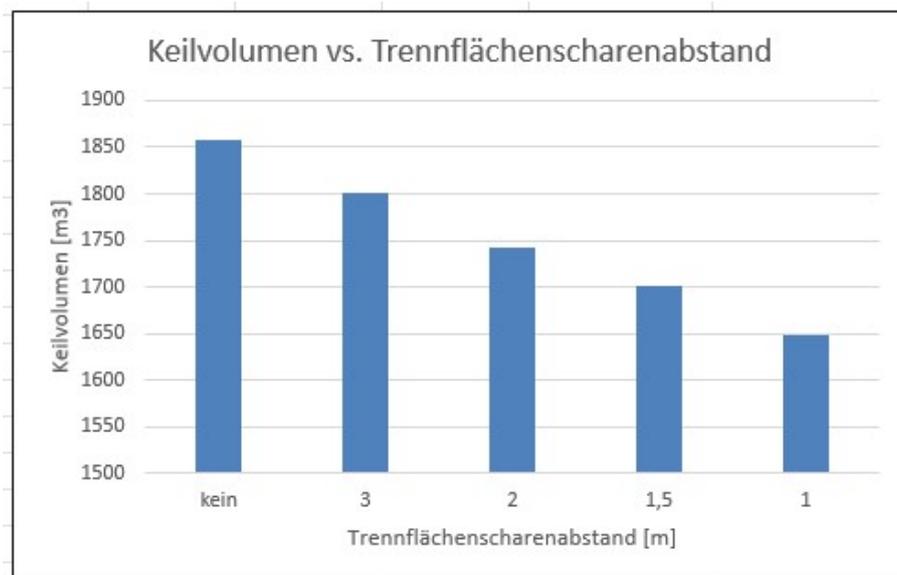


Abb. 8.5: Abgeleitetes Keilvolumen vs. Trennflächenscharenabstand

Trennflächenscharenabstand [m]	Sohldruckspannung [MPa]	Keilhöhe [m]	Keilvolumen [m ³]
Initialer Keil	3,00	50,00	1857,32
3	2,25	33,00	1801,60
2	2,13	31,00	1743,20
1,5	1,75	25,00	1701,48
1	1,50	23,00	1648,24

Tab. 8.2: Modellparameter des Keilblocks in Abhängigkeit vom Trennflächenscharenabstand

8.2.2 Ergebnisse mit Kohäsionseinstellungen von 200/100 kPa

In den folgenden Abbildungen (Abb. 8.6, 8.7 und 8.8) sind die ermittelten Werte für eine Kohäsion von 200 kPa und 100 kPa in Abhängigkeit vom Abstand der Trennflächenscharen dargestellt. Zunächst werden die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen gezeigt. Im Anschluss daran folgen die Visualisierungen der ableitenden Keilhöhe und des berechneten Keilvolumens. Ergänzend zur grafischen Darstellung sind die entsprechenden Werte in einer Tabelle (Tab.8.3) zusammengefasst.

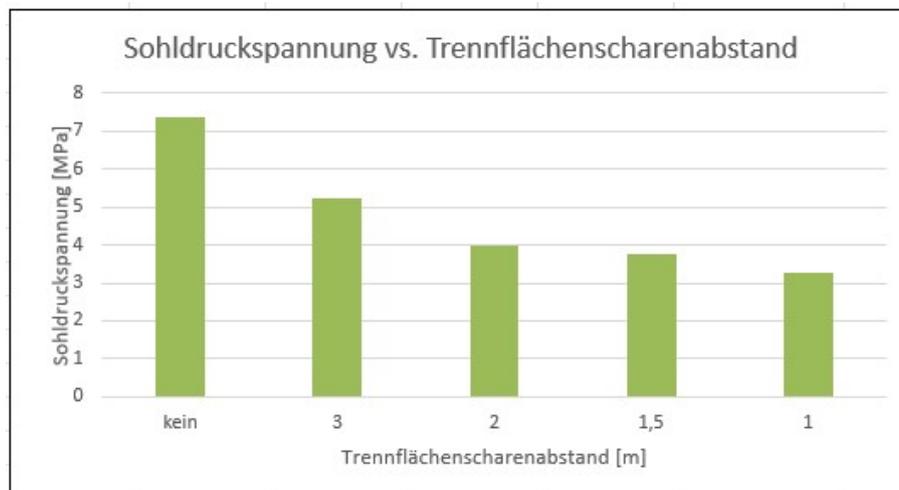


Abb. 8.6: Sohldruckspannung in Abhängigkeit der Trennflächenscharenabstände

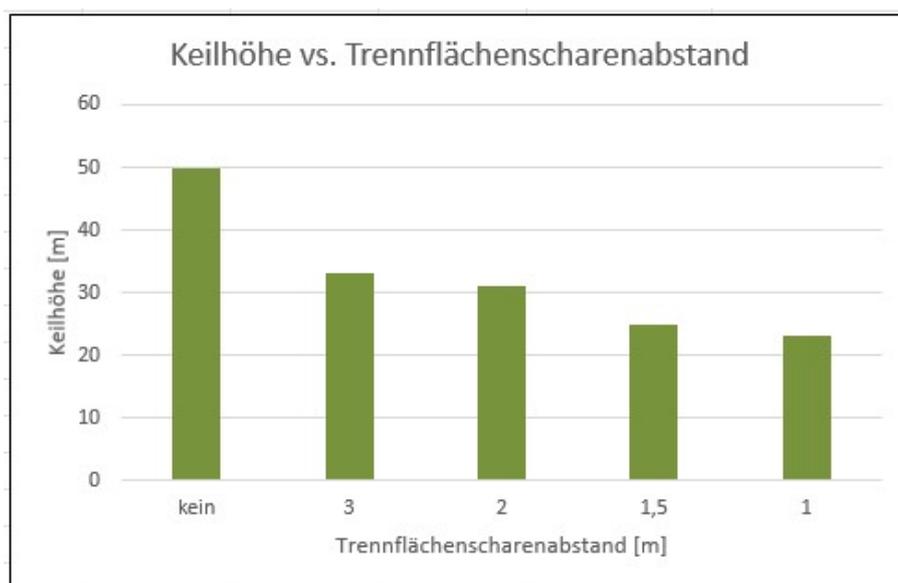


Abb. 8.7: Ermittelte Keilhöhe vs. Trennflächenscharenabstand

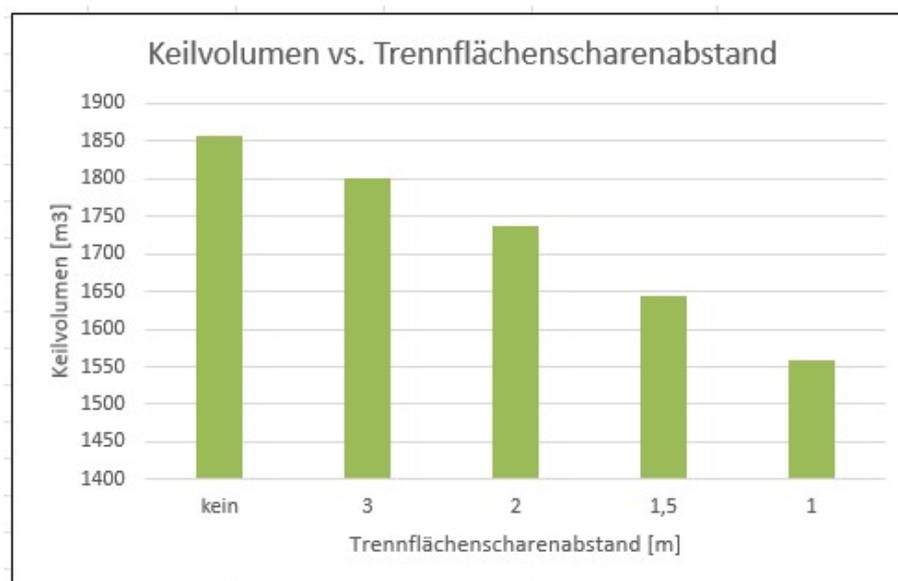


Abb. 8.8: Abgeleitetes Keilvolumen vs. Trennflächenscharenabstand

Trennflächen- scharenabstand [m]	Sohldruck- spannung [MPa]	Keilhöhe [m]	Keilvolumen [m ³]
Initialer Keil	7,375	50,00	1857,32
3	5,25	33,00	1801,60
2	4	31,00	1737,7
1,5	3,75	25,00	1645,3
1	3,25	23,00	1558

Tab. 8.3: Modellparameter des Keilblocks in Abhängigkeit vom Trennflächenscharenabstand

Kapitel 9

Gegenüberstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Softwareprogramme SWEDGE und 3DEC verglichen, insbesondere im Hinblick auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung. Zudem wird der Einfluss einer Verdoppelung der Kohäsion auf die Ergebnisse untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Analyse der ableitenden Keilhöhe, des Keilvolumens und der Keilblockstruktur, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Programme sowie deren Auswirkungen auf die Resultate zu verdeutlichen.

9.1 Vergleich der ermittelten maximalen Sohldruckspannungen

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Sohldruckspannungen der eingesetzten Softwareprogramme einander gegenübergestellt. Zunächst werden die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen aus den Untersuchungen mit einer Kohäsionseinstellung von 100 kPa für die erste Keilfläche und 50 kPa für die zweite Keilfläche dargestellt. Anschließend folgen die Ergebnisse bei verdoppelter Kohäsion, also 200 kPa für die erste und 100 kPa für die zweite Keilfläche.

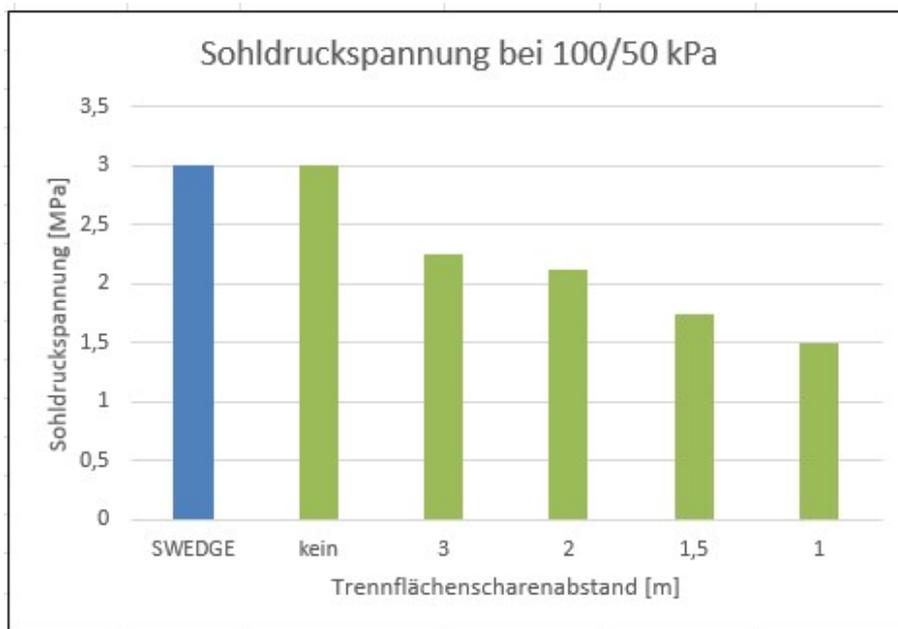


Abb. 9.1: max. Sohldruckspannung vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa

Wie in der obenstehenden Abbildung (Abb. 9.1) ersichtlich, sind die ermittelten Werte für die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung für SWEDGE in Blau und die Werte aus 3DEC in Grün dargestellt. Für den initialen Keil ohne Trennflächenscharen konnte sowohl in SWEDGE als

auch in 3DEC eine maximale Sohldruckspannung von 3 MPa ermittelt werden. Zudem ist erkennbar, dass die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung bei Einführung von Trennflächenscharen und einer Verringerung der Abstände kontinuierlich abnimmt. So sinkt die Sohldruckspannung von 2,25 MPa bei einem Abstand von 3 Metern auf 1,5 MPa bei 1 Meter.

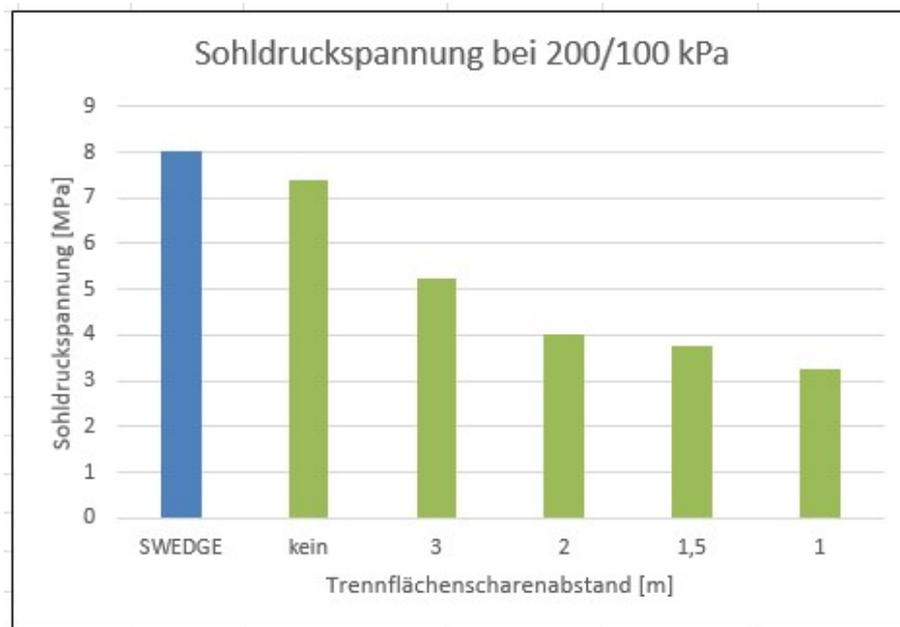


Abb. 9.2: max. Sohldruckspannung vs. Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa

In Abbildung (Abb. 9.2) sind die ermittelten Werte für die gesteigerte Kohäsion in Blau für SWEDGE und in Grün für 3DEC dargestellt. Für den Keil ohne Trennflächenscharen wurde in SWEDGE eine maximale Sohldruckspannung von 8,04 MPa ermittelt, während der gleiche Keil in 3DEC eine geringere Sohldruckspannung von 7,375 MPa aufwies. Der Einfluss der Trennflächenscharen ist in dieser Abbildung ebenfalls deutlich erkennbar. Bei einem Abstand von 3 Metern wurde in 3DEC eine maximale aufnehmbare Sohldruckspannung von 5,25 MPa gemessen. Bei einem Abstand der Trennflächenscharen von 1 Meter konnte das Keilmodell jedoch nur noch 3,25 MPa tragen.

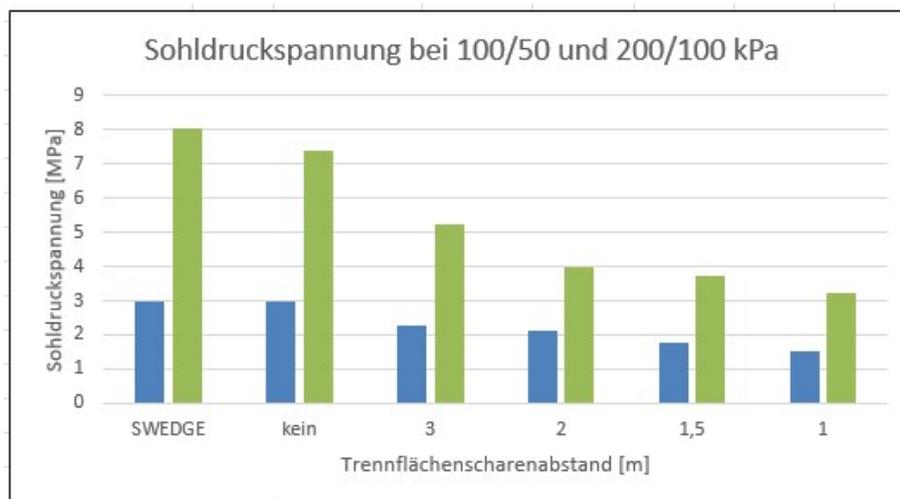


Abb. 9.3: max. Sohldruckspannung vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 und 200/100 kPa

In der obenstehenden Abbildung (Abb. 9.3) sind die in den vorherigen Abbildungen (Abb. 9.1 und 9.2) gezeigten Werte zusammengefasst und visualisiert. Aus diesem Diagramm wird der Einfluss der Verdoppelung der Kohäsion auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung deutlich ersichtlich. So konnte das Keilmodell in SWEDGE bei einer Kohäsionseinstellung von 100/50 kPa eine maximale Sohldruckspannung von 3 MPa aufnehmen, während dieser Wert bei verdoppelter Kohäsion (200/100 kPa) auf 8,04 MPa anstieg. Ein ähnlicher Einfluss war auch bei 3DEC erkennbar: Hier stieg der Wert von 3 MPa bei normaler Kohäsion auf 7,375 MPa bei verdoppelter Kohäsion, also mehr als das Doppelte. Trotz der Steigerung der Kohäsion war der Einfluss der Abstände der Trennflächenscharen deutlich spürbar, was bei beiden Kohäsionseinstellungen zu einer signifikanten Reduktion der maximalen Sohldruckspannung führte, ähnlich wie bei der ursprünglichen Kohäsionseinstellung.

9.2 Vergleich der ermittelten Keilhöhen

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Keilhöhen des abgleitenden Keilblocks infolge einer Überbelastung dargestellt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kohäsion keinen signifikanten Einfluss auf die ausgebildete Keilhöhe hat. Daher werden die Ergebnisse für Kohäsioneinstellungen von 100/50 kPa sowie für die verdoppelte Kohäsion von 200 kPa für die erste Keilfläche und 100 kPa für die zweite Keilfläche zusammengefasst.

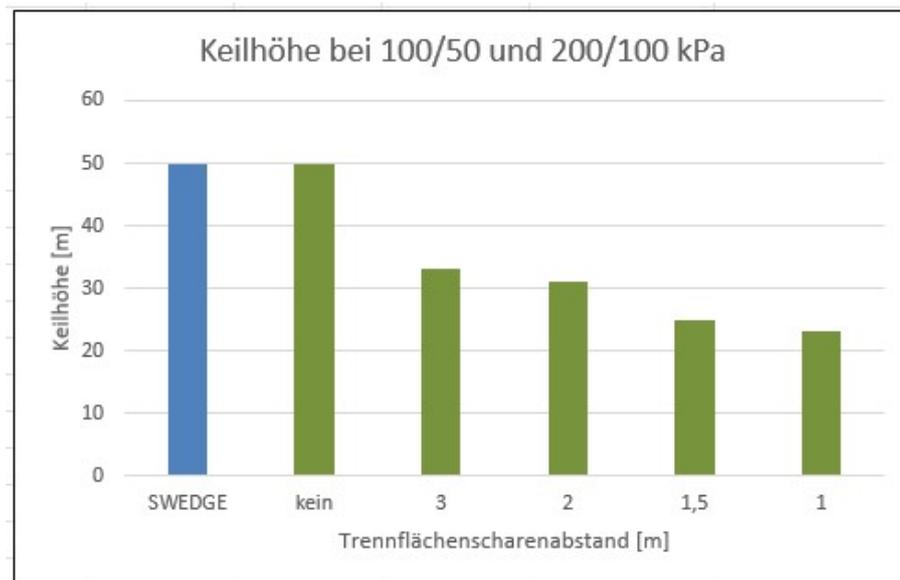


Abb. 9.4: Keilhöhe vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 und 200/100 kPa

Die obenstehende Abbildung (Abb. 9.4) zeigt in Blau die Keilhöhe, die sich bei einer Überbelastung in SWEDGE einstellt, und in Grün die entsprechenden Werte aus 3DEC. Während der Keil, der sich aus den keilbildenden Trennflächen ergab, eine Höhe von 50 Metern aufwies, die bei beiden Softwareprogrammen identisch ist, zeigt sich der Einfluss der Trennflächenscharen. Es ist ersichtlich, dass bei einem verkleinerten Abstand der Trennflächenscharen die Höhe des abgleitenden Keilblocks von 33 Metern bei einem Abstand der Trennflächenscharen von 3 Metern auf 23 Meter bei einem Abstand von 1 Meter absank.

9.3 Vergleich der ermittelten Keilvolumina

In diesem Abschnitt werden die Keilvolumina aus SWEDGE und 3DEC verglichen, die aufgrund der Überbelastung abgeglitten sind. Zunächst werden die Werte mit normaler Kohäsion abgebildet, anschließend werden die Werte bei verdoppelter Kohäsion gegenübergestellt.

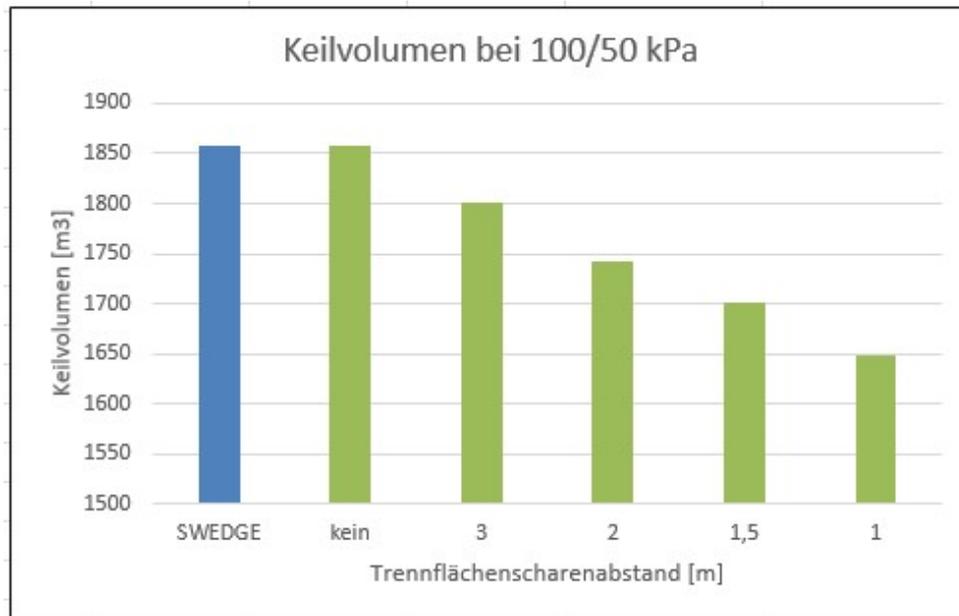


Abb. 9.5: Abgeleitendes Keilvolumen nach SWEDGE u. 3DEC bei 100/50 kPa Kohäsion

Die dargestellte Abbildung (Abb. 9.5) zeigt die Keilvolumina, die infolge einer Überbelastung aus dem Keilmodell abgeleitet, bei Kohäsionseinstellungen von 100/50 kPa. Für den Keilblock, der sich aus den keilbildenden Trennflächen einstellt, wurde sowohl in SWEDGE (in Blau) als auch in 3DEC (in Grün) das gleiche Keilvolumen von 1857,32 m³ ermittelt. Mit der Einführung von Trennflächenscharen nahm das Keilvolumen kontinuierlich ab. So konnte das abgeleitende Keilvolumen bei einem Abstand von 3 Metern noch mit 1801,32 m³ ermittelt werden, und bei einer Verringerung des Abstands der Trennflächenscharen auf 1 Meter ergab sich das abgeleitende Keilvolumen nur noch auf 1648,24 m³.

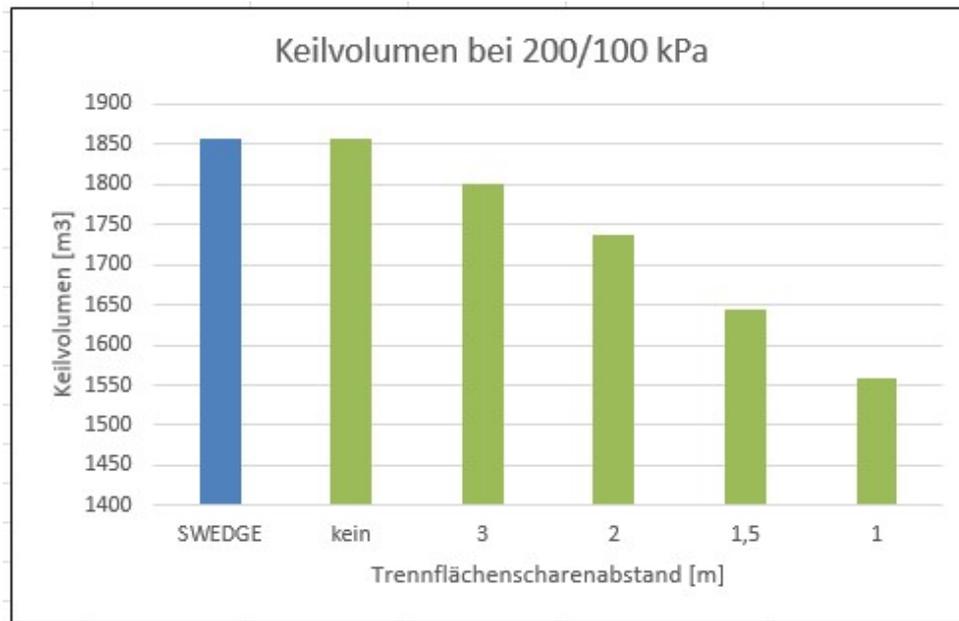


Abb. 9.6: Abgeleitendes Keilvolumen nach SWEDGE u. 3DEC bei 200/100 kPa Kohäsion

In dieser Abbildung (Abb. 9.6) werden die Keilvolumina bei einer Kohäsionseinstellung von 200 kPa für die erste Keilfüge und 100 kPa für die zweite Keilfüge dargestellt. Auch in dieser Abbildung wurde bei den durch die keilbildenden Trennflächen in SWEDGE (in Blau) und 3DEC (in Grün) ein abgeleitendes Keilblockvolumen von 1857,32 m³ erfasst. Ähnliche Werte und eine mit der Verringerung des Trennflächenscharenabstands einhergehende Reduzierung des abgeleitenden Keilvolumens ergaben die Aufzeichnungen der Untersuchungen.

9.4 Vergleich der Versagensmechanismen

In diesem Abschnitt wird auf die gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss von Trennflächenscharen auf den abgeleitenden Keilblock eingegangen. Um den Einfluss der Trennflächenscharen sichtbar zu machen, werden ausgewählte abgeleitende Keilblöcke aus dem vorherigen Kapitel 6.2 herangezogen.

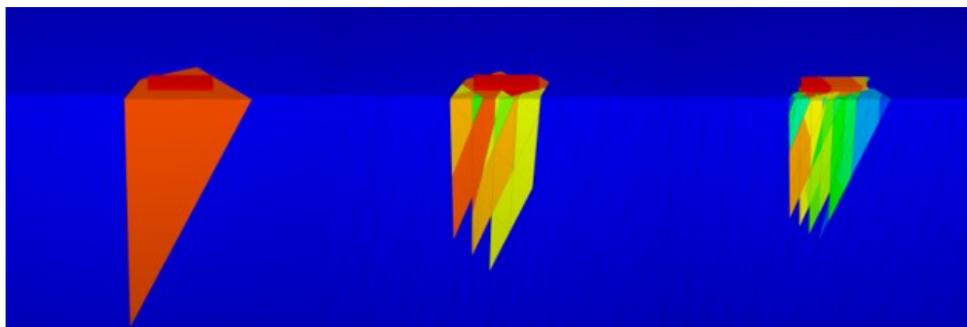


Abb. 9.7: Gegenüberstellung des initialen Versagens: links – größtmöglicher Block, mitte - bei einem Trennflächenabstand von 3 m, rechts - bei einem Trennflächenabstand von 1,5 m

Die Abbildung (Abb. 9.7) zeigt, dass mit Verringerung der Trennflächenscharenabstände die Inhomogenität der Verschiebungen zunimmt und das Gefüge sowohl bei 100/50 kPa als auch bei 200/100 kPa stärkere Zerklüftungen aufweist.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

10.1 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Untersuchungen an einem Keilmodell haben wertvolle Erkenntnisse geliefert. Zum einen wurden mithilfe der eingesetzten Softwareprogramme SWEDGE und 3DEC die maximal aufnehmbaren Sohldruckspannungen ermittelt. Bei der Software SWEDGE, die keine Modellierung von Trennflächenscharen erlaubt, wurde die Berechnung über eine im Schwerpunkt angreifende Einzellast sowie den Sicherheitsfaktor (FoS) durchgeführt, der das Grenzgleichgewicht beschreibt.

Andererseits wurde das Softwareprogramm 3DEC eingesetzt, ein komplexes Werkzeug, das neben geotechnischen Parametern wie Kohäsion und Reibungswinkel auch die Trennflächenscharenabstände in den Berechnungsprozess integriert. Für diese Untersuchungen wurde das Modell mit einer steifen Fundamentplatte belastet. Die Ergebnisse konnten nach einer Umrechnung mithilfe des Flächenkorrekturfaktors miteinander verglichen werden.

Die ermittelten Ergebnisse für die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung waren bei den Keilmodellen, die aus den keilbildenden Trennflächen hervorgingen, in beiden Softwareprogrammen hinsichtlich der Sohldruckspannungen, der Keilhöhe und des abgleitenden Keilvolumens identisch. Dies galt bei einer Kohäsion von 100/50 kPa mit einem maximalen Sohldruck von 3 MPa und einem Keilvolumen von 1857,32 m³. Bei einer Verdopplung der Kohäsion auf 200/100 kPa lagen die Werte für die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung mit 8,04 MPa bei SWEDGE und 7,375 MPa bei 3DEC weiterhin relativ nahe beieinander. Deutliche Unterschiede traten jedoch bei der Einführung von Trennflächenscharen auf, die in der Software SWEDGE nicht berücksichtigt werden. So konnte bei einer Kohäsion von 100/50 kPa und einem Trennflächenscharenabstand von 1 Meter nur noch die Hälfte der Sohldruckspannung aufgenommen werden, die beim ursprünglichen Keilmodell ermittelt wurde. Ein ähnlicher Einfluss des Trennflächenscharenabstands zeigte sich auch bei verdoppelter Kohäsion: Hier sank die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung von 7,375 MPa beim Keil mit den keilbildenden Trennflächen auf 3,25 MPa bei einem Trennflächenscharenabstand von 1 Meter.

In 3DEC war der Einfluss des Trennflächenscharenabstands auf das abgleitende Keilvolumen deutlich nachvollziehbar. In den durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass eine Verringerung der Trennflächenscharenabstände zu einer Abnahme der maximal aufnehmbaren Sohldruckspannung führte, gleichzeitig jedoch auch die Keilhöhe und das abgleitende Keilvolumen verringert wurden. Ein kleineres Keilvolumen reduzierte nicht nur die treibenden Kräfte durch das geringere Gewicht, sondern führte auch zu einer Verringerung der Keilflächen. Dadurch nahmen auch die rückhaltenden Kräfte, die durch die Kohäsion bedingt sind ab. Zudem wurde in den Untersuchungen festgestellt, dass bei einem reduzierten Trennflächenscharenabstand die Keilflächen stärker zerklüftet waren und mehr Bruchflächen aufwiesen. Infolgedessen bildeten die

Keilflächen keine so großen zusammenhängenden Bereiche mehr. Diese Erkenntnis erklärt die beobachtete Abnahme der maximal aufnehmbaren Sohldruckspannung.

Die Ergebnisse haben zudem gezeigt, dass der Einsatz von SWEDGE für Keilmodelle mit Trennflächenscharen nicht die optimale Wahl darstellt. Wie aus den Untersuchungen hervorgeht, hat der Trennflächenscharenabstand einen erheblichen Einfluss auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung, was bei SWEDGE aufgrund der fehlenden Berücksichtigung dieser Parameter in den Berechnungen nicht adäquat erfasst wird. Daher bietet die Software 3DEC für solche Modelle, bei denen Trennflächen eine Rolle spielen, eine deutlich präzisere und realistischere Analyse der maximalen aufnehmbaren Sohldruckspannungen.

10.2 Schlussfolgerung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit haben gezeigt, dass der Trennflächenscharenabstand einen entscheidenden Einfluss auf die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung hat, insbesondere bei der Analyse des Mechanismus Keilversagen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass bei Einsatz eines Grenzgleichgewichtsverfahrens wie bei der Software SWEDGE, wo diese Trennflächenscharenabstände nicht berücksichtigt werden können, die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung überschätzt wird. Im Vergleich dazu bietet die Software 3DEC, die diese Parameter in die Berechnungen einbezieht, eine deutlich verbesserte Analyse, insbesondere bei komplexeren geotechnischen Szenarien.

Die Analysen zeigen auch, dass sich der Versagensmechanismus mit abnehmendem Trennflächenabstand, d.h. mit zunehmender Zerlegung, verändert. Die Keilhöhe und das bewegte Volumen nehmen ab. Die Ausdehnung des bewegten Bereichs wird zunehmend von der Größe und der Form der starren Fundamentplatte mitbestimmt. Die Annahme, dass der in Bezug auf die Böschungshöhe größtmögliche Block der maßgebliche Block (Keil) ist, ist nicht mehr zutreffend.

Da bei der konventionellen Anwendung von Grenzgleichgewichtsverfahren, wie SWEDGE, immer der größtmögliche Block in Bezug auf die Böschungshöhe konstruiert wird, ist der Einfluss von Trennflächenscharenabständen künftig stärker zu beachten. Die Auswirkungen auf die Stabilität und die maximal aufnehmbare Sohldruckspannung dürfen nicht unterschätzt werden.

Darüber hinaus wird es entscheidend sein, dass weitere Untersuchungen und Modellierungen den Zusammenhang zwischen Trennflächenscharenabständen und den mechanischen Eigenschaften des Gesteins vertiefen. Die Untersuchung der Zerklüftung und der Verformung der Keilflächen bei unterschiedlichen Trennflächenscharenabständen eröffnet neue Perspektiven für die Entwicklung noch präziserer geotechnischer Berechnungen. Diese können nicht nur die Fundamentplanung verbessern, sondern auch das Risiko von Versagensarten wie Keilgleiten in verschiedenen geotechnischen Szenarien verringern.

Langfristig wird die kontinuierliche Weiterentwicklung von Softwaretools und die Integration neuer geotechnischer Parameter eine Schlüsselrolle spielen, um den sich verändernden geotechnischen Bedingungen, etwa im Zusammenhang mit dem Klimawandel oder der Erschließung neuer Baugebiete, gerecht zu werden. Es ist zu erwarten, dass die Integration realistischerer Modelle, die alle relevanten Parameter wie Trennflächenscharenabstände und deren Einfluss auf die Tragfähigkeit von Gestein berücksichtigen, zu einer zuverlässigeren Vorhersage und besseren

Planung von Bauvorhaben führen wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Erkenntnisse dieser Diplomarbeit die Notwendigkeit betonen, geotechnische Modellierungen kontinuierlich zu hinterfragen und die verwendeten Softwaretools auf ihre Eignung für die Berücksichtigung komplexer Parameter wie Trennflächenscharenabstände zu überprüfen. Dies wird sowohl für die Genauigkeit zukünftiger Berechnungen als auch für die Sicherheit und Stabilität von Bauprojekten in geotechnisch anspruchsvollen Gebieten von zentraler Bedeutung sein.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Orientierung von Trennflächen mittels Kompassmessung	11
2.2	Zusammenhang von Trennflächenorientierung und Gebirgsdruckfestigkeit	13
2.3	Mohr-Coulombsches Bruchkriterium	14
3.1	Gleiten eines Kluftkörpers auf einer Trennfläche	16
3.2	Gleiten eines Kluftkörpers auf zwei Trennfläche	17
3.3	Kippen von tafelförmigen Kluftkörpern	18
3.4	Gleiten eines Bruchkörpers auf einer muschelförmigen Gleitfläche	18
4.1	Berechnungskreislauf der Diskreten-Elemente-Methode (DEM)	20
5.1	Gefügediagramm	21
5.2	Keilgeometrie in SWEDGE erstellt	22
6.1	Darstellung der Keilgeometrie unter Einwirkung einer Einzellast	25
6.2	Modellgeometrie mit aufliegender Fundamentplatte	26
6.3	Modell mit Keilausbildung laut Angabe	27
6.4	Modell mit Randbedingungen (fixierte Blöcke grün dargestellt)	28
6.5	Kommandos zur dreidimensionalen Modellierung des Keils – Teil 1	29
6.6	Kommandos zur dreidimensionalen Modellierung des Keils – Teil 2	30
6.7	Fundamentplatte mit den Referenzpunkten an den Eckpunkten	31
6.8	Kommandos zur Belastung des dreidimensionalen Keilmodells	33
7.1	Versagensmechanismus: Gleiten entlang der keilbildenden Trennflächen	35
7.2	Geschwindigkeitsverlauf des initialen Keils bei 100/50 kPa	36
7.3	Vorderansicht des initialen Keils bei 100/50 kPa	37
7.4	Schnittansicht des initialen Keils bei 100/50 kPa	37
7.5	Draufsicht des initialen Keils bei 100/50 kPa	38
7.6	Geschwindigkeitsverlauf bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	39
7.7	Vorderansicht bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	40
7.8	Schnittansicht bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	40
7.9	DrauFoSicht bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	41
7.10	Geschwindigkeitsverlauf bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	42
7.11	Vorderansicht bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	43
7.12	Schnittansicht bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	43
7.13	DrauFoSicht bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	44
7.14	Geschwindigkeitsverlauf bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	45
7.15	Vorderansicht bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	46
7.16	Schnittansicht bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	46
7.17	DrauFoSicht bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	47
7.18	Geschwindigkeitsverlauf bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	48
7.19	Vorderansicht bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	49
7.20	Schnittansicht bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	49

7.21	DrauFoSicht bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	50
7.22	Geschwindigkeitsverlauf des initialen Keils bei 200/100 kPa	51
7.23	Vorderansicht des initialen Keils bei 200/100 kPa	52
7.24	Schnittansicht des initialen Keils bei 200/100 kPa	52
7.25	DrauFoSicht des initialen Keils bei 200/100 kPa	53
7.26	Geschwindigkeitsverlauf bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa .	54
7.27	Vorderansicht bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	55
7.28	Schnittansicht bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	55
7.29	DrauFoSicht bei 3 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	56
7.30	Geschwindigkeitsverlauf bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa . .	57
7.31	Vorderansicht bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	58
7.32	Schnittansicht bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	58
7.33	DrauFoSicht bei 2 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	59
7.34	Geschwindigkeitsverlauf bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa .	60
7.35	Vorderansicht bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	61
7.36	Schnittansicht bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	61
7.37	DrauFoSicht bei 1,5 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	62
7.38	Geschwindigkeitsverlauf bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa . .	63
7.39	Vorderansicht bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	64
7.40	Schnittansicht bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	64
7.41	DrauFoSicht bei 1 m Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	65
8.1	Einzellast vs. Flächenlast auf Keilmodelle	66
8.2	Aufnehmbare Sohldruckspannungen nach SWEDGE	67
8.3	Sohldruckspannung bei 100/50 kPa	68
8.4	Keilhöhe vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	69
8.5	Keilvolumen vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	69
8.6	Sohldruckspannung bei 200/100 kPa	70
8.7	Keilhöhe vs. Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	71
8.8	Keilvolumen vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	71
9.1	max. Sohldruckspannung vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 kPa	73
9.2	max. Sohldruckspannung vs. Trennflächenscharenabstand bei 200/100 kPa	74
9.3	max. Sohldruckspannung vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 und 200/100 kPa	75
9.4	Keilhöhe vs. Trennflächenscharenabstand bei 100/50 und 200/100 kPa	76
9.5	Keilvolumen nach SWEDGE u. 3DEC bei 100/50 kPa Kohäsion	77
9.6	Keilvolumen nach SWEDGE u. 3DEC bei 200/100 kPa Kohäsion	78
9.7	Initialer Keilblock, Keilblock bei 3 und 1,5 Meter Trennflächenscharenabstand .	78

Tabellenverzeichnis

2.1	Arten von Trennflächen	11
5.1	Modellparameter des Keilblocks	23
8.1	Modellparameter des Keilblocks bei 100/50 u. 200/100 kPa	67
8.2	Modellparameter des Keilblocks bei 100/50 kPa	70
8.3	Modellparameter des Keilblocks bei 200/100 kPa	72

Literatur

ATTEWELL, P. B., FARMER, I. W. (2012): *Principles of Engineering Geology*, illustriert, Springer Science Business Media, Berlin. ISBN: 978-9400957077.

AUSTRIAN STANDARDS INTERNATIONAL (2017): *ÖNORM B 2203-1: Erdbauarbeiten im Landschaftsbau - Begriffe, Anforderungen und Ausführung*, number B 2203-1, Vienna.

AYDAN, Ö. (2019): *Felsmechanik und Felsbau: Band 2: Anwendungen der Felsmechanik - Felsbau*, 1. Auflage, CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9780367822309>

CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L. (1979): *A discrete numerical model for granular assemblies*, *Geotechnique*, 29(1), 47-65.

FELLENIUS, W. (1936): *Stability of Earth Slopes*. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 23(1), 36-54. <https://doi.org/10.1061/JBOCEQ.0000001>

HAUPTVOGEL, D., SISSON, V. (2023): *The Story of Earth: An Observational Guide*, 2nd edition, UH Libraries, Houston, TX. <https://uhlibraries.pressbooks.pub/historicalgeologylab/>

HOEK, E., BRAY, J. W. (1981): *Rock Slope Engineering*, 3rd edition, Institution of Mining and Metallurgy, London. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.03.003>

HOLLERER, H. (2009): *Untersuchungen zur Ermittlung von Einwirkungen auf Drahtgitter und Drahtseilnetze von Fels- und Hangsicherungen*, Doctoral dissertation, Technische Universität Wien.

ITASCA INTERNATIONAL, INC. (n.d.): *3DEC: Three-Dimensional Distinct Element Code for Geotechnical Analysis of Soil, Rock, and Structural Dynamics*. Abgerufen am 1. September 2024, von <https://www.itascainternational.com/software/3dec>

MOHR, C. (1900): *Die mechanischen Eigenschaften der Verformung und des Bruchs von Festkörpern*. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06228-4>

ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (ÖGG) (2013): *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*, 1. Auflage, ÖGG, Salzburg. <http://www.oegg.at>

POISSEL, R. (2015): *Unterlagen zur Geologieübung – Kompassmessen (WS 2015/16)*, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien. Verfügbar unter: <http://www.ig.tuwien.ac.at> [Zugriff: 2. Dezember 2024].

PRATSCHER, S. (2020): *Die Beurteilung der Standsicherheit der Gründung hoher Einzellasten an Felskanten*, Doctoral dissertation, Wien. <https://doi.org/10.34726/hss.2020.71468>

PREH, A. (2022): *Angewandte Felsmechanik. Skriptum zur Vorlesung 203.098*, Wien: Technische Universität Wien.

ROCSCIENCE (n.d.): *SWEDGE Overview*. Available at: <https://www.rocscience.com/> [Accessed 24 August 2024].

TERZAGHI, K., PECK, R. B., MESRI, G. (1996): *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley Sons. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(286))

WAIBEL, C. P. (2008): *Böschungen und konstruktive Hangsicherungen: Systematik, Entwurf, Berechnung und Konstruktion* [Diploma Thesis, Technische Universität Wien]. [repositUM. https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-28081](https://resolver.obvsg.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-28081)

WIKIPEDIA CONTRIBUTORS (n.d.): *Schergesetz*. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Abgerufen am 13. Januar 2025, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Schergesetz>

WIESINGER, L. (2023): *Synthetic-rock-mass Modell und das Terra-Firma-Konzept: Gegenüberstellung bei der Ermittlung des Gefahrenbereiches an der Böschungsoberkante*, Doctoral dissertation, Wien. <https://doi.org/10.34726/hss.2023.113323>

WYLLIE, D. C. (1999): *Foundations on Rock: Engineering Practice*, 2nd edition, CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781482295009>

WITTKÉ, W. (2013): *Felsmechanik: Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels*, Springer-Verlag.