



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Fakultät: Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Studiengang: Master Geowissenschaften (MGEO)

THEMA DER MASTERARBEIT:

3D-Modellierung einer Felsformation nahe Hřensko im Elbsandsteingebirge zur Bewertung der Standsicherheit bei Betrachtung verschiedener Verwitterungsszenarien

TITLE OF THE MASTER THESIS:

3D modeling of a rock formation near Hřensko in the Elbsandsteingebirge to assess the stability by consideration of different weathering scenarios

bearbeitet von: Lena-Sophie Franz

zur Erlangung des akademischen Grades: Master of Science

1. Prüfer / Gutachter: Dr. rer. nat. Martin Herbst
2. Prüfer / Gutachter: Dr.-Ing. Jörn Wichert

Übergabetermin des Masterarbeitthemas: 23.02.2021

Abgabetermin der Masterarbeit: 23.08.2021

Prof. Dr. O. Elicki
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Dr. M. Herbst
Prüfer/Gutachter

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterarbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt zu haben. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und nicht veröffentlicht.

Freiberg, 12.05.2021

Ort, Datum

Frag

Unterschrift

Kurzfassung

Im Elbsandsteingebirge stellen Massenbewegungen ein großes Gefährdungspotenzial für Sachgüter und die menschliche Gesundheit dar. Das deutsch-tschechische Projekt „Georisks“ greift die Thematik auf und liefert diverse Untersuchungen in gefährdeten Gebieten der Sächsisch-Böhmischen Schweiz. In diesem Zusammenhang erfolgt in der vorliegenden Masterarbeit die 3D-Modellierung einer Felsformation bei Hřensko unter Verwendung der Software Rhinoceros 3D und dem Griddle Plug-in. Anschließende numerische Simulationen im Itasca-Programm 3DEC führen zur Beantwortung der Frage, inwiefern sich verschiedene Verwitterungsvorgänge auf die Standsicherheit des Felsens auswirken. Es wird ein kurzer Überblick über die (ingenieur-) geologischen Bedingungen sowie zu Massenbewegungen im Untersuchungsgebiet geliefert. Die Arbeit konzentriert sich auf die geotechnische Modellierung der Formation aus Geometriedaten vom Laserscan zur Erstellung eines 3D-Blockmodells. Weiterhin erfolgt eine detaillierte Darstellung der numerischen Simulationen, bestehend aus c - φ - σ_t -Reduktionen von Gesteinsmatrix und/oder Trennflächen sowie einer Verwitterung durch Kluftwasser und Frostsprengung. Im Ergebnis konnten die Standsicherheitsfaktoren der Verwitterungsszenarien ermittelt und von Felssturz gefährdete Bereiche bestimmt werden. Es zeigt sich, dass globales Versagen ausgeschlossen ist, jedoch kleinere Ablösungen auf der Westseite sowie an der Felsspitze bei fortschreitender Verwitterung wahrscheinlich sind.

Abstract

Mass movements pose a major hazard potential for material goods and the human health in the Elbe Sandstone Mountains. The German-Czech project “Georisks” deals with that topic and provides various investigations at risk areas in the Saxon-Bohemian Switzerland. In this context, the presented master’s thesis involves the 3D modeling of a rock formation near Hřensko by use of the Rhinoceros 3D software and the Griddle Plug-in. Subsequent numerical simulations using the Itasca program 3DEC lead to an answer to the question, in which way different weathering processes affect the stability of the rock formation. A brief overview of the (engineering-) geological conditions and on mass movements in the study area is provided. The thesis focuses on the geotechnical modeling of the rock formation utilizing geometry data from laser scanning to create a 3D block model. Furthermore, a detailed presentation of the numerical simulations is given, consisting of c - φ - σ_t -reductions of the rock matrix and/or the joint faces as well as weathering processes due to fissure water and frost blasting. As a result, the stability factors of the weathering scenarios could be determined, and areas endangered by rockslides identified. It turns out that global failure is impossible, but minor dissolutions at the west side and at the top of the formation are likely as weathering proceeds.

I Inhaltsverzeichnis

II Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	4
III Formel- und Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung und Motivation	8
2 Überblick	9
2.1 Standort der Untersuchungen.....	9
2.2 Geologischer Hintergrund.....	10
2.3 Verwitterung und Erosion von Elbsandstein	13
2.4 Massenbewegungen im Elbsandsteingebirge	14
2.5 Gesteinsparameter	16
3 Methodik.....	17
4 Gesteinsmechanische 3D-Modellierung.....	18
4.1 Grundlagen zu Rhinoceros 3D und Griddle.....	18
4.2 Erarbeitung des numerischen Modells (3D-Blockmodell)	20
4.2.1 Felsgeometrie und Volumenkörper	20
4.2.2 Trennflächengefüge und Volumennetz	23
5 Numerische Berechnung.....	27
5.1 Grundlagen zum Programm 3DEC.....	27
5.2 Initialmodell (Grundspannungszustand)	29
5.3 $c - \varphi - \sigma_t$ - Reduktion.....	34
5.3.1 Matrix und Trennflächen	34
5.3.2 Matrix	39
5.3.3 Trennflächen	43
5.4 Spezielle Verwitterungsszenarien.....	47
5.4.1 Verwitterung unterhalb der Felsspitze sowie ausgewählter TF.....	47
5.4.2 Eindringen von Wasser in Klüfte	57
5.4.3 Frostsprengung	61

I Inhaltsverzeichnis

6 Abgeleitete Ergebnisse und Interpretation	65
7 Zusammenfassung	69
IV Literatur- und Quellenverzeichnis	72
V Anhang.....	74
A Initialmodell	74
B $c - \varphi - \sigma_t$ - Reduktion	75
C Spezielle Verwitterungsszenarien	77

II Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 2.1: Lage der Felsformation	9
Abb. 2.2: Heutige Ausdehnung der Kreide in Sachsen und den angrenzenden Gebieten	10
Abb. 2.3: Geologische Einheiten im Gebiet um Hřensko	12
Abb. 2.4: Verteilung erfasster Massenbewegungen in Sachsen bis 2016	14
Abb. 4.1: Oberflächenmodelle aus 3 verschiedenen Parametersätzen vom Laserscan	21
Abb. 4.2: Offener Flächenkörper der Felsformation in Rhino	22
Abb. 4.3: Erzeugter Volumenkörper der Felsformation in Rhino	22
Abb. 4.4: Geländefotos zum Trennflächengefüge	23
Abb. 4.5: Polylinien und Polyflächen zur Erarbeitung des Trennflächensystems	24
Abb. 4.6: Felsspitze im Gelände (links) und im Rhino-Modell (rechts)	24
Abb. 4.7: Erstellte Polyflächen für die verstärkte Verwitterung unterhalb der Felsspitze	25
Abb. 4.8: Finales Gesamtmodell – mit feiner und grober Oberflächenstruktur	25
Abb. 4.9: Erarbeitetes Blockmodell in 3DEC	26
Abb. 4.10: SO-Ansicht des Blockmodells mit Geländefoto überlagert	26
Abb. 5.1: Anfangs- und Randbedingungen des numerischen Modells und Kontrollpunkte ...	30
Abb. 5.2: Ergebnis der ersten Initialisierung nach 80 000 Rechenschritten	31
Abb. 5.3: Vergleich der TF-Öffnung vom ersten und finalen Initialmodell	31
Abb. 5.4: Ergebnis der finalen Initialisierung nach 40 000 Rechenschritten	33
Abb. 5.5: Sz. 1 – max. unausgeglichene Kraft	35
Abb. 5.6: Sz. 1 – Ergebnis der Reduktion bis RF 2.50 nach 900 000 Schritten	36
Abb. 5.7: Sz. 1 – TF-Öffnung nach 500 000 Schritten (RF 2)	37
Abb. 5.8: Sz. 1 – Vergleich der TF-Öffnung von RF 2 und RF 2.5	38
Abb. 5.9: Sz. 1 – Blockbewegung nach 500 000 Schritten (RF 2)	38
Abb. 5.10: Sz. 2 – max. unausgeglichene Kraft	40
Abb. 5.11: Sz. 2 – Ergebnis der Reduktion bis RF 5.50 nach 550 000 Schritten	41
Abb. 5.12: Sz. 2 – Blockbewegung nach 390 000 Schritten (RF 5)	41
Abb. 5.13: Sz. 2 – TF-Öffnung nach 550 000 Schritten (RF 5.50)	42

II Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 5.14: Sz. 3 – max. unausgeglichene Kraft	44
Abb. 5.15: Sz. 3 – Ergebnis der Reduktion bis RF 3.50 nach 1 460 000 Schritten	45
Abb. 5.16: Sz. 3 – TF-Öffnung nach dem RF 2 und dem RF 3	45
Abb. 5.17: Sz. 3 – TF-Öffnung im Konturbild der Verschiebungen für RF 3	46
Abb. 5.18: Sz. 3 – Blockbewegung nach 1 100 000 Schritten (RF 3)	46
Abb. 5.19: Sz. 4 – Blöcke der verstärkten Verwitterung	47
Abb. 5.20: Sz. 4 – reduzierte TF-Abschnitte	48
Abb. 5.21: Sz. 4 – max. unausgeglichene Kraft	49
Abb. 5.22: Sz. 4 – Ergebnis der Reduktion bis RF 5.25 nach 760 000 Schritten	50
Abb. 5.23: Sz. 4 – Diagramme der Kontrollpunkte P2-P6 nach RF 5.25	50
Abb. 5.24: Sz. 4 – Vergleich der Verschiebung in verschiedenen Reduktionsphasen	51
Abb. 5.25: Sz. 4 – Vergleich der Blockbewegung der Felsspitze	52
Abb. 5.26: Sz. 4 – Vergleich der TF-Öffnung an der Felsspitze	53
Abb. 5.27: Sz. 4 – Vergleich der TF-Öffnungen & Verschiebungen reduzierter Bereiche	54
Abb. 5.28: Sz. 4 – Blockbewegung der reduzierten Felsbereiche (RF 5)	54
Abb. 5.29: Sz. 4 – erweiterte Auswahl reduzierter TF-Abschnitte	55
Abb. 5.30: Sz. 4 – TF-Öffnung und Verschiebung an der Felsspitze (Variante 2)	56
Abb. 5.31: Sz. 4 – TF-Öffnung und Verschiebung reduzierter Bereiche (Variante 2)	56
Abb. 5.32: Sz. 5 – Darstellung der Schritte von wassergesättigten Klüften	57
Abb. 5.33: Sz. 5 – Verlaufsdiagramme von Fall 1 und Fall 2	58
Abb. 5.34: Sz. 5 – Konturbilder der Verschiebungen für Fall 1 und Fall 2	59
Abb. 5.35: Sz. 5 – TF-Öffnung aller Schritte für Fall 1 und Fall 2	60
Abb. 5.36: Sz. 5 – Blockbewegung am Ende der Simulation	60
Abb. 5.37: Sz. 6 – Darstellung der Frosttiefen	61
Abb. 5.38: Sz. 6 – Versagenszustand bei 10 kPa Frostsprengdruck	62
Abb. 5.39: Sz. 6 – TF-Öffnung bei 50 kPa Frostsprengdruck	64
Abb. 5.40: Sz. 6 – Konturbild der Verschiebungen bei 50 kPa Frostsprengdruck	64
Abb. V.1: Blöcke mit geringem Blockvolumen im Grundspannungszustand	74
Abb. V.2: Sz. 1 – SE-Ansicht der Verschiebungen > 0.1 m (RF 2.5)	76

II Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. V.3: Sz. 1 – N-Ansicht der Verschiebungen > 0.1 m (RF 2.5)	76
Abb. V.4: Sz. 4 – TF-Öffnung nicht reduzierter Bereiche (RF 5.25)	77
Abb. V.5: Sz. 4 – max. unausgeglichene Kraft für Variante 2	77
Abb. V.6: Sz. 4 – Ergebnis der Reduktion (RF 5.25) Variante 2	78
Abb. V.7: Sz. 5 – TF-Öffnung reduzierter Bereiche aller Schritte für Fall 1 und 2.....	78
Abb. V.8: Sz. 6 – Versagenszustand aller TF bei 50 kPa Frostsprengdruck	79
Tabelle 2.1: Kennwerte der Sandsteinmatrix für die Simulation in 3DEC	16
Tabelle 2.2: Kennwerte der Trennflächen für die Simulation in 3DEC	16
Tabelle 3.1: Verwitterungsszenarien der numerischen Berechnungen.....	17
Tabelle 4.1: Auswahl wichtiger Werkzeuge in Rhino	18
Tabelle 5.1: Neue Kennwerte für geschlossene Trennflächen zur Simulation in 3DEC	32
Tabelle 5.2: Festigkeitswerte ausgewählter Klüfte unter Porenwasserdruck	57
Tabelle 6.1: Ermittelte Sicherheitsfaktoren und max. Verschiebung der Szenarien 1 bis 4...	65
Tabelle V.1: Reduzierte Festigkeitskennwerte entsprechend dem Reduktionsfaktor	75

III Formel- und Abkürzungsverzeichnis

(1) Formel 5.1: Reduktion Kohäsion.....	34
(2) Formel 5.2: Reduktion Zugfestigkeit	34
(3) Formel 5.3: Reduktion Reibungswinkel	34

3DEC	3-Dimensional Distinct Element Code
Fm	Formation
GOK	Geländeoberkante
GSZ	Grundspannungszustand
RF, rf	Reduktionsfaktor
SF	Sicherheitsfaktor
Sz.	Szenario
TF	Trennfläche

1 Einleitung und Motivation

Mit seinen hohen Felstürmen und schroffen Wänden ist das Elbsandsteingebirge ein beliebtes Ausflugs- und Wandergebiet in Deutschland und der Tschechischen Republik. Die markanten Felsformationen locken zahlreiche Besucher in das Mittelgebirge an der Elbe, stellen dabei aber gleichzeitig ein Risiko für die Sicherheit von Menschen und Sachgütern dar. Eine Vielzahl an kleineren und größeren Massenbewegungen, wie beispielsweise Steinschläge und Gerölllawinen, werden jährlich in der Sächsisch-Böhmischen Schweiz registriert. Erst Anfang des Jahres 2021 ereignete sich nahe Bad Schandau ein Felssturz, bei dem ein Gesteinsblock von etwa sieben Kubikmetern zu Boden stürzte, wie die lokalen Medien berichteten [1].

Das deutsch-tschechische Projekt „Georisks“ greift die Thematik der Felsstürze im Elbsandsteingebirge auf und liefert eine umfassende Untersuchung sowie Überwachung potenziell gefährdeter Bereiche. Dabei wurden unter anderem ingenieurgeologische Modelle erstellt, um die Standsicherheit an ausgewählten Lokalisationen beurteilen zu können. Die fachlichen Arbeiten im Projekt unterliegen den Ämtern der Karlsuniversität Prag sowie der TU Bergakademie Freiberg. Weitere Informationen dazu sind auf der offiziellen Webseite zu finden (elbe-labe-georisiko.eu). [2]

Im Rahmen des Projekts beschäftigt sich die vorliegende Masterarbeit mit der Standsicherheit einer Felsformation nahe der Ortschaft Hřensko in der Böhmisches Schweiz. Die Notwendigkeit der Begutachtung ergibt sich aus der Lage des Felsens direkt an der Hauptverbindungsstraße sowie einem potenziellen Felsversagen. Deshalb wurde in einem geotechnischen 3D-Modell mit Hilfe von numerischen Berechnungen untersucht, wie sich die Standsicherheit hinsichtlich verschiedener Verwitterungsszenarien verändert. Die Generierung des Modells erfolgte über die Software Rhinoceros 3D und dem Griddle Plug-in von Itasca. Anschließend sind im Itasca-Programm 3DEC Verwitterungsszenarien simuliert worden. Die Ergebnisse der Standsicherheitsbewertung erlauben abschließend eine Einschätzung des Gefährdungspotenzials der Felsformation bei Hřensko. Dadurch können frühzeitig notwendige Maßnahmen zur Sicherung sowie Überwachung getroffen und das Risiko eines Felssturzes minimiert werden.

Die vorliegende Arbeit liefert zu Beginn einen kurzen Überblick über die Lokalisation sowie die (ingenieur-) geologischen Bedingungen im Elbsandsteingebirge. Der Fokus liegt jedoch auf der geotechnischen Modellierung des Felsens in Rhino und den anschließenden numerischen Simulationen zur Standsicherheit in 3DEC. Die Auswertung der Ergebnisse führt zu einer Einschätzung des Gefährdungsrisikos.

2 Überblick

2.1 Standort der Untersuchungen

Das Elbsandsteingebirge ist ein Mittelgebirge an der deutsch-tschechischen Grenze. Der deutsche Teil wird als Sächsische Schweiz bezeichnet und liegt im Südosten von Sachsen. Als Böhmisches Schweiz versteht sich der tschechische Teil im Nordosten von Nordböhmen.

Die untersuchte Felsformation ist nahe der Ortschaft Hřensko in der Böhmischen Schweiz zu finden. In Abb. 2.1 ist die geographische Lage und die Form des Felsen veranschaulicht. Hřensko (dt. Herrnskretschen) liegt unmittelbar hinter der Grenze zu Deutschland an der Mündung des Flusses Kamenice (dt. Kamnitz) in die Elbe. Zum nächstgelegenen Ort Schmilka (Dtl.) sind es etwa 2 km Luftlinie nach Norden. Die einzige Hauptverbindungsstraße zwischen Deutschland und Tschechien im Raum Elbe passiert als B-172 Schmilka und als I-62 Hřensko. Direkt an der I-62 befindet sich der Fels wenige Hundert Meter nördlich von Hřensko. Die räumliche Ausdehnung der Formation beträgt ca. 10 m von NW nach SO und ca. 20 m von NO nach SW. Die Höhe umfasst von der Straße bis zur Felsspitze etwas über 20 m.



Abb. 2.1: Lage der Felsformation - Kartendarstellung und Luftbildaufnahme (Quelle: GOOGLE MAPS, 2021), Geländeaufnahmen (Quelle: J. WICHERT)

2.2 Geologischer Hintergrund

Das Elbsandsteingebirge entwickelte sich zu Beginn der Oberkreide vor ca. 100.5 Millionen Jahren mit dem Vorstoß des Kreidemeeres in die heutige obere Elbtalzone. Dabei wurde eine schmale Verbindung zwischen dem nördlichen Boreal und der südlichen Tethys geschaffen. Die Begrenzung der Meerenge erfolgte im Osten durch die Westsudetische Insel und im Westen durch die Mitteleuropäische Insel. Der schmalste Bereich der Meerenge wird heute durch die sächsische Elbtalkreide gebildet, welche im SO direkt in das Nordböhmische Kreidebecken übergeht. Aus Abb. 2.2 wird ersichtlich, dass das Gebiet der Modellierung bei Hřensko am Übergang zwischen Elbtalkreide und Nordböhmischer Kreide liegt. [3]

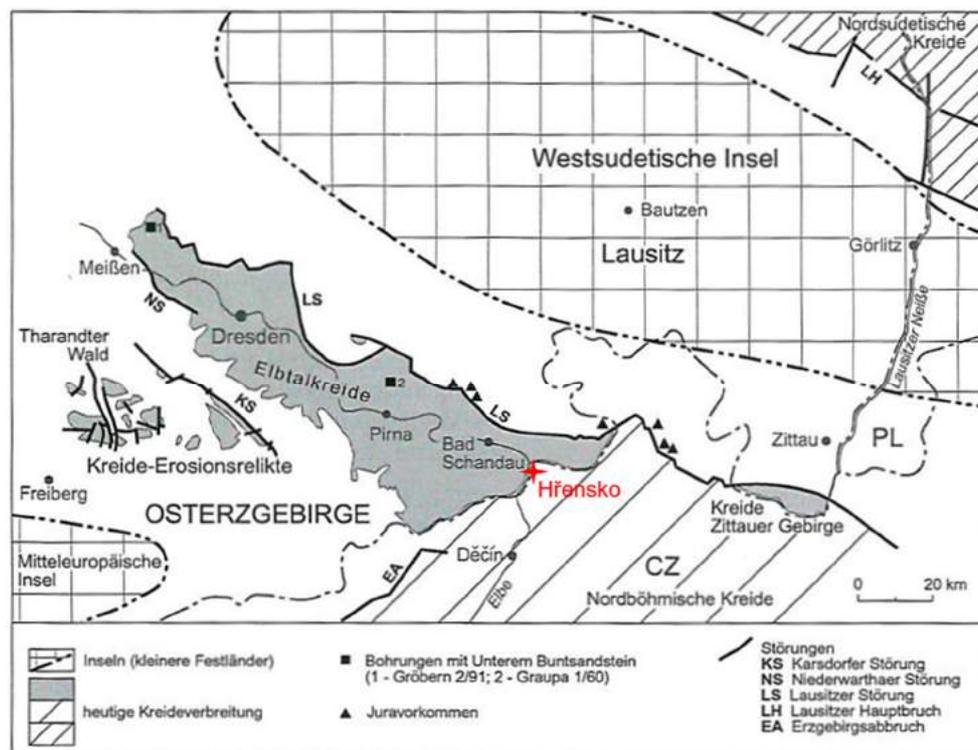


Abb. 2.2: Heutige Ausdehnung der Kreide in Sachsen und den angrenzenden Gebieten (Quelle: verändert nach PÄLCHEN & WALTER, 2011)

Die Störungslinie der Lausitzer Überschiebung trennt sowohl die Elbtal- als auch die Nordböhmische Kreide im NO vom Granit des Lausitzer Blocks. Im SW bildet der Erzgebirgsabbruch die Grenze zwischen Nordböhmischer Kreide und metamorphen Gesteinen des Osterzgebirges. Die kretazischen Sedimente des Elbsandsteingebirges sind Ablagerungen aus dem Cenomanium bis Santonium und liegen überwiegend diskordant präkambrischen und paläozoischen Einheiten auf. [3]

Für das Elbsandsteingebirge sind Ablagerungen einer rein sandigen Fazies charakteristisch, welche in verschiedene Formationen unterteilt wird. Die Abfolge der Elbtalkreide beginnt im Cenomanium mit der Niederschöna Fm und erreicht – über die Oberhäslich, die Schmilka und die Postelwitzer Fm – im Mittel-Coniacium die Schrammstein Fm [3].

Eine geologische Karte zum Untersuchungsgebiet liefert Abb. 2.3, welche auf den geologischen Karten des tschechischen geologischen Dienstes basiert [4]. Demnach stehen bei Hřensko neben der Oberkreide auch Ablagerungen aus dem Quartär an. Bei den quartären Einheiten handelt es sich um pleistozänen Löss und Lösslehme sowie holozäne fluviatile Ablagerungen. Die größte Verbreitung weist jedoch die Oberkreide auf. Es sind Ablagerungen aus dem Mittel-Turonium anstehend. Diese umfassen die obere Bílá hora Formation und im Hangenden die Jizera Formation. Dabei wird die Bílá hora Fm gleichgesetzt mit der Schmilka Fm der Elbtalkreide. Die Jizera Fm entspricht somit der Postelwitzer Fm. Beide Einheiten sind charakterisiert durch überwiegend mittel- bis grobkörnige Quarzsandsteine und werden nachfolgend genauer beschrieben.

Ab dem Turonium ist das Elbsandsteingebirge von verschiedenen Transgressions- und Regressionsphasen geprägt. Die Einheiten sind daher bis in das Coniacium marin und werden für die sächsische Elbtalkreide in drei unterschiedliche Formationen unterteilt.

Die Schmilka Fm enthält Ablagerungen vom Unter- bis tieferen Mittel-Turonium und ist durch Quarzsandsteine mit Schrägschichtungen gekennzeichnet. Die Strukturen im Gestein weisen auf eine strömungsgeprägte Sedimentation mit SO-Strömung aus Richtung Tethys hin. Im Unter-Turonium erfolgte die maximale Überflutung der Elbtalzone. Die Postelwitz Fm umfasst den größten Teil des Mittel-Turoniums. Es treten gebankte, fein- bis mittelkörnige Quarzsandsteine von unterschiedlicher Mächtigkeit auf. Kleinbankige Einheiten kommen als Hangverflachungen vor, großbankige sind wandbildend. Das Bindemittel der Gesteine ist schluffig-tonig oder kieselig. Die Schrammstein Fm tritt vom höheren Mittel-Turonium bis ins Mittel-Coniacium mit massiven, großbankigen und wandbildenden Quarzsandsteinen auf. [3]

Das im Elbsandsteingebirge bestehende orthogonale Trennflächensystem wird durch vertikale Klüfte und in etwa horizontale Schichtflächen gebildet. Trennflächen sind Diskontinuitäten, entlang denen sich die mechanischen Eigenschaften im Gestein verändern. In die Gebirgseigenschaften fließen die Merkmale des Gesteins und die der Trennflächen mit ein. Die Klufflächensysteme im Elbsandsteingebirge sind ebenfalls orthogonal zueinander. Tektonische Prozesse verursachten durch Druck- und Zugspannungen eine Klüftung des Sandsteins während der Lausitzer Überschiebung in der höheren Oberkreide und während der Heraushebung des Erzgebirges im Tertiär [3]. Es werden 2 Hauptkluftsysteme unterschieden, welche in etwa senkrecht zueinander orientiert sind. Das Lausitzer Hauptkluftsystem verläuft parallel zur NW-SO streichenden Lausitzer Störung. Das erzgebirgische Hauptkluftsystem verläuft parallel zur Störungslinie des Erzgebirgsabbruchs mit einem Streichen von NO-SW. Die Klüfte stellen Gangbarkeiten für Niederschlagswässer im Gestein dar, wodurch Verwitterungs- und Erosionsprozesse begünstigt werden. [5]

Geologische Karte von Hřensko (Tschechische Republik)

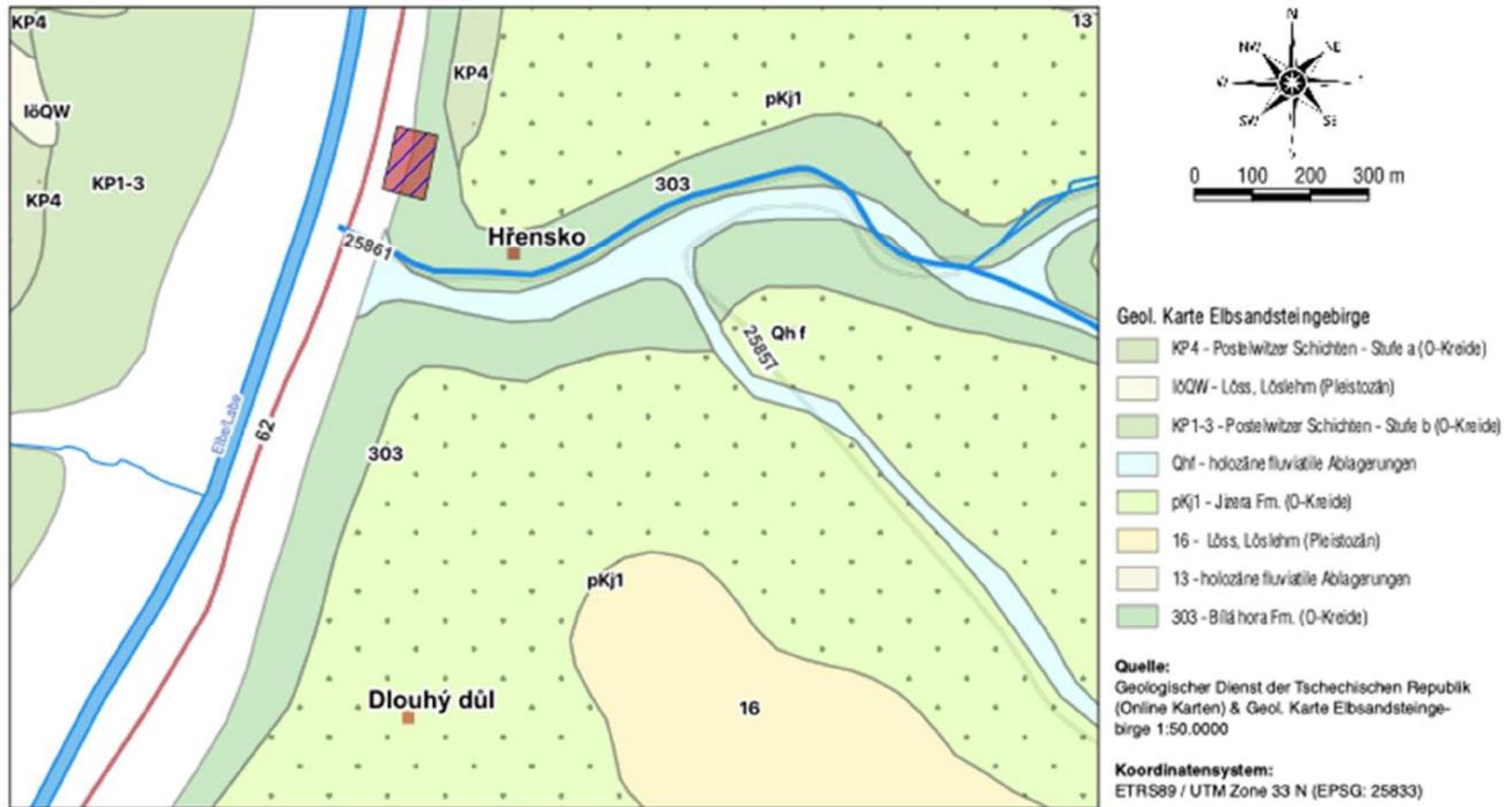


Abb. 2.3: Geologische Einheiten im Gebiet um Hřensko – rotes Kästchen: Lage der modellierten Felsformation (Quelle: TSCHECHISCHER GEOLOGISCHER DIENST, 2021)

2.3 Verwitterung und Erosion von Elbsandstein

Das ausgeprägte Landschaftsrelief im Elbsandsteingebirge ist das Ergebnis von Jahrmillionen andauernden Erosionsvorgängen. Bereits im Tertiär und dann verstärkt im Quartär kam es zur Abtragung der Oberflächenablagerungen bis auf das Niveau der turonen Quarzsandsteine. Die Turonsandsteine sind zwar homogen und kompakt, aufgrund des orthogonalen Trennflächengefüges im Elbsandsteingebirge allerdings auch brüchig und intensiv zerklüftet, weshalb die Bezeichnung als (Turon-) Quadersandsteine gängig ist. Die Wegsamkeiten der Klüfte im Gestein führten zu einer raschen Tiefenerosion überwiegend durch Wasserläufe. Ein anschauliches Beispiel dafür ist der Fluss Kamenice bei Hřensko, dessen Flussbett tief in die Landschaft eingeschnitten und durch engstehende, steile Wände charakterisiert ist. [6]

Neben der Tiefenerosion kam es durch Seitenerosion zur Abtragung gering verfestigter Bereiche und Schichtflächen im Sandstein. Dadurch bildeten sich großräumige Reliefformen heraus, wie beispielsweise Felstürme, -wände und -überhänge, aber auch Felsplateaus und Landzungen. Kleinräumige Reliefformen umfassen z.B. Wabenstrukturen oder kleinere Aushöhlungen im Felsen. [6]

Bezüglich der Verwitterung nehmen laut RAST [5] im Elbsandsteingebirge die chemischen Prozesse die Hauptrolle ein. Die mechanische Verwitterung wirkt somit lediglich untergeordnet und unterstützend mit Vorgängen wie etwa Frostsprengung, Abschleifung durch windbewegte Sandkörner (Korrasion) oder Lockerung von Gesteinsmaterial durch die Vegetation. Dagegen ist die chemische Verwitterung beispielsweise für die Bildung von Wabenstrukturen oder die Schichtauswitterung verantwortlich. Das Gestein kann dabei durch chemische Prozesse sowohl lokal verfestigt als auch aufgelockert und abgelöst werden. Die weniger verfestigten Bereiche sowie das herausgelöste Material werden anschließend erodiert.

Im Quartär führte die Verwitterung der anstehenden Gesteine ebenso zur Akkumulation des abgetragenen Materials. Dabei wurden vor allem durch Wind transportierter Löss sowie fluviatile Sedimente abgelagert (vgl. Abb. 2.3) [6].

Die natürlichen Verwitterungs- und Ablagerungsprozesse dauern aktuell weiter an. Von großer Bedeutung ist darunter auch die Thematik der Massenbewegungen. Eine Änderung des natürlichen Kräftegleichgewichts z.B. durch Verwitterung oder Erosion kann Bewegungen am Hang hervorrufen. Im Elbsandsteingebirge ist das Landschaftsbild daher insbesondere von Felsstürzen geprägt [6].

2.4 Massenbewegungen im Elbsandsteingebirge

Bei Massenbewegungen handelt es sich um eine gravitationsbedingte Verlagerung von Locker- und/oder Festgesteinsmassen hervorgerufen durch eine Veränderung im natürlichen Kräftegleichgewicht. Die Bewegung der Gesteinsmassen erfolgt dabei an Hängen oder Böschungen entweder schnell oder langsam, jedoch stets aus einer höheren in eine tiefere Lage. [7]

Im Freistaat Sachsen sind Massenbewegungen laut DOMMASCHK [8] vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie typisch für den Mittelgebirgsraum. Die meisten Ereignisse konzentrieren sich dabei auf das Elbsandsteingebirge, wie es in Abb. 2.4 ersichtlich ist.

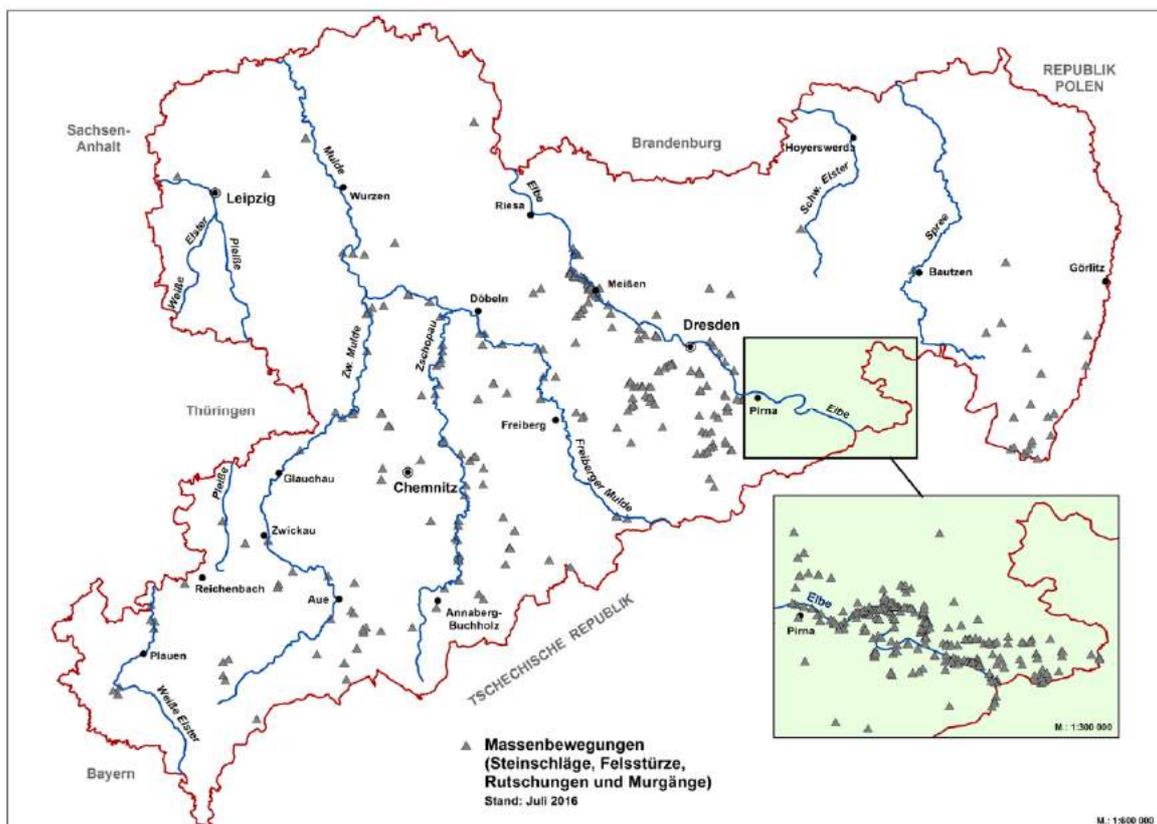


Abb. 2.4: Verteilung erfasster Massenbewegungen in Sachsen bis 2016 (Quelle: LFULG/L.ABMANN, 2021)

Die Tagung der Gesellschaft für Geologische Wissenschaften der DDR von 1973 liefert einen Beitrag von G. JOHNSEN zu Massenbewegungen in der Sächsischen Schweiz [9]. Demnach treten im Elbsandsteingebirge an den Felshängen Bewegungen des Fallens und des Kriechens auf. Das Kriechen ist aufgrund der geologischen Bedingungen eher auf die linkselbischen Gebiete beschränkt. Wohingegen Fallbewegungen im gesamten Elbsandsteingebirge allgegenwärtig sind. Die Größenordnung reicht von regelmäßig auftretenden Steinschlägen bis zu Felsstürzen. Dabei sind letztere der dominierende Bewegungstyp, welcher nur ab und an auftritt, aber oft große Schäden an Schutzgütern

verursacht. Einen Einfluss auf die Initialisierung der Bewegung nehmen die Witterungsbedingungen, sodass insbesondere im Winterhalbjahr aufgrund von Frostsprengung oder nach größeren Niederschlagsmengen Felssturzereignisse stattfinden. Weiterhin spielen die morphologischen sowie die (hydro-)geologischen Gegebenheiten eine entscheidende Rolle. Die horizontale Gliederung des Elbsandsteins erfolgt durch tonig-mergelige Schichten von unterschiedlicher Mächtigkeit. Entlang dieser Schichten staut sich Wasser, welches den gut durchlässigen, geklüfteten Sandstein durchfließt und führt zu einer verstärkten Verwitterung der tonig-mergeligen Lagen. Die Aufstandsfläche der darüberliegenden Sandsteinblöcke wird verringert und Überhänge können sich herausbilden. Erreicht die Verwitterung entlang der Schichtflächen das orthogonale Klufflächengefüge oder wird das natürliche Kräftegleichgewicht durch andere Faktoren gestört, dann kann es zu einem Herauslösen von Felsmaterial aus dem Massiv und gravitationsbedingt zum Absturz kommen. Zu den weiteren Faktoren können z.B. die Sprengwirkung des Wurzelwachstums in Klüften oder die Hebelwirkung von Bäumen bei Windbelastung gezählt werden. Zusätzlich entscheidet die Lage des Klufflächensystems zum Streichen des Felshanges, ob ein Herauslösen begünstigt oder durch ein Verkeilen eher behindert wird.

Eine Vielzahl an Massenbewegungen im Elbsandsteingebirge sind von GLINIÖRZ [10] dokumentiert worden. GLINIÖRZ erfasst einen Zeitraum von 1757 bis 2002 und geht auf den entstandenen Personen- und Sachschaden sowie die Art des Ereignisses ein. Neben Haldenrutschungen und Bergstürzen werden besonders häufig Felsstürze aufgezeigt. Auch in und um Hřensko sind mehrere Felsstürze bekannt wie beispielsweise der Felsabbruch vom 01.05.1998 bei dem 3 Tonnen Gestein an der Kirche niedergingen [10].

Weitere Hinweise zum Thema Massenbewegungen im Elbsandsteingebirge liefern verschiedene Arbeiten aus dem Projekt „Georisks“ [2]. Diese stehen auf der offiziellen Internetseite unter Downloads frei zur Verfügung.

2.5 Gesteinsparameter

Die Eigenschaften eines Gesteins werden durch Parameter beschrieben. Für die Simulationen zur Standsicherheit sind gesteinsphysikalische Parameter wie zum Beispiel die Zugfestigkeit und die Scherfestigkeit, mit Kohäsion und Reibungswinkel, von Bedeutung.

Dem Material in Hřensko sind die gesteinsphysikalischen Kennwerte der Felsformation „Großer Wehlturm“ zugeordnet worden, da keine eigens ermittelten Werte vorliegen.

Der „Große Wehlturm“ befindet sich nahe der Basteibrücke in der Sächsischen Schweiz und besteht aus Quarzsandsteinen der Oberkreide. Zwar ist der Fels durch die untere Schrammstein Fm aufgebaut, ähnelt hinsichtlich der Gesteinsmatrix mit seiner großbankigen, wandbildenden Erscheinung der kieselig gebundenen Quarzsandsteine allerdings dem Modellgebiet bei Hřensko und wird daher auf dieses übertragen. Die Bestimmung der Gesteinskennwerte erfolgte im Labor unter anderem durch Druck- und Zugversuche, welche im Rahmen eines Projektes von 2007-2009 an der TU Bergakademie Freiberg vom Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau durchgeführt wurden. Weitere Angaben dazu können dem Abschlussbericht von KONIETZKY ET AL. [11] entnommen werden.

Die Materialkennwerte zur Gesteinsmatrix sind in Tabelle 2.1 aufgeführt und entsprechen den Laborergebnissen zum „Großen Wehlturm“. Einzig die Poissonzahl ist, dem Material Sandstein sowie den im Labor bestimmten Werten entsprechend, der vorliegenden Arbeit hinzugefügt worden. In Abgleich mit den ermittelten Matrixkennwerten stellen die Parameter der Trennfläche nach KONIETZKY ET AL. [11] Erfahrungswerte dar. Diese sind in Tabelle 2.2 aufgezeigt. Der Dilatanzwinkel wurde mit einem Wert von 5° angenommen.

Tabelle 2.1: Kennwerte der Sandsteinmatrix für die Simulation in 3DEC (Quelle: KONIETZKY ET AL., 2009)

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Matrix - Sandstein
Dichte	ρ	kg/m ³	1900
E-Modul	E	Pa	2e+09
Poissonzahl	ν	-	0.3
Kohäsion	c	Pa	0.73e+06
Reibungswinkel	φ	°	40
einaxiale Zugfestigkeit	σ_t	Pa	42e+03

Tabelle 2.2: Kennwerte der Trennflächen für die Simulation in 3DEC (Quelle: KONIETZKY ET AL., 2009)

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Trennfläche - Sandstein
Kohäsion	c	Pa	2e+03
Reibungswinkel	φ	°	30
einaxiale Zugfestigkeit	σ_t	Pa	2e+03
Dilatanzwinkel	ψ	°	5

3 Methodik

Anhand eines geomechanischen 3D-Modells wird die Standsicherheit der Felsformation bei Hřrensko unter verschiedenen Verwitterungsszenarien beurteilt. Dazu erfolgte zuerst die 3D-Modellierung der Felsformation mit Hilfe der Software Rhinoceros sowie dem Griddle Plug-in von Itasca. Anschließend sind numerische Berechnungen im Itasca-Programm 3DEC durchgeführt worden.

Zur Erzeugung eines dreidimensionalen Abbilds der Felsformation wurde ein Volumenkörper aus Geometriedaten vom Laserscanning aufgebaut. Die Vermessung der Felsformation mittels Laserscan und die Aufbereitung der gewonnenen Geometriedaten haben die Kooperationspartner aus Tschechien übernommen, sodass für die weiteren Arbeitsschritte die 3D-Oberflächenstruktur bereits zur Verfügung stand.

Damit die Geometriedaten in 3DEC verarbeitet werden können, ist im ersten Schritt eine Aufarbeitung der Modellstruktur durch Rhinoceros 3D notwendig. Aus der Oberflächenstruktur ist ein geschlossener Körper und anschließend ein Polygonnetz erzeugt worden. Das Trennflächensystem musste händisch eingefügt werden, da der Laserscan lediglich die Außenfläche widerspiegelt. Mittels Griddle Plug-in konnte, durch das Verbinden der Polygonnetze von Felsoberfläche und Trennflächen sowie der Erzeugung eines Volumennetzes, das numerische 3D-Modell erarbeitet werden.

Der zweite Arbeitsabschnitt umfasst die numerischen Berechnungen zur Standsicherheit bei fortschreitender Verwitterung. Dazu wurde als Erstes der Grundspannungszustand initialisiert. Anschließend sind verschiedene Verwitterungsszenarien simuliert und der jeweilige Standsicherheitsfaktor bestimmt worden. Die einzelnen Szenarien sind in Tabelle 3.1 gelistet.

Tabelle 3.1: Verwitterungsszenarien der numerischen Berechnungen

Gesamtsystem		Szenario	3DEC SAV-Dateien
c – ϕ – σ_t – Reduktion (ohne Porenwasser)	von Matrix und Trennflächen	1	rf_
	der Matrix	2	Mat_rf_
	des Trennflächensystems	3	TF_rf_
besonders gefährdeter Abschnitte			
Verwitterung an der Felsspitze und einzelner TF (ohne H ₂ O)		4	2Verw_rf_
Eindringen von Wasser in ausgewählte Klüfte		5	Pw-1/2-Abs-
Frostverwitterung		6	Frost50-Abs-

4 Gesteinsmechanische 3D-Modellierung

4.1 Grundlagen zu Rhinoceros 3D und Griddle

Die Modellierung der Felsformation bei Hřensko erfolgte mit Hilfe der Software Rhinoceros 3D des US-amerikanischen Unternehmens Robert McNeel & Associates. Das Programm ist 1980 entwickelt und durch mehrere Verbesserungen erweitert worden. Für die Modellierung der Hřensko-Felsformation wurde mit der Version Rhino 6 gearbeitet.

Die Software ermöglicht es, Objektflächen über eine mathematische Darstellung zu einem 3-dimensionalen Modell zu verarbeiten. Dabei können Objektflächen in Rhino direkt erzeugt und bearbeitet werden. Das 3D-Modell wird auf dem Rechner 2-dimensional abgebildet. [12]

Damit das 3D-Modell für die numerischen Berechnungen im Programm 3DEC eingesetzt werden kann, muss ein Polygonnetz des Volumenkörpers vorliegen. In Rhino lässt sich für die Oberfläche eines Objekts ein erstes Polygonnetz (polygon mesh) erzeugen und bearbeiten. Zudem gibt es das von der Firma Itasca entwickelte Griddle Plug-in für Rhino zur Erzeugung nutzbarer Volumenvernetzungen für die Programme der Itasca-Familie, wie etwa 3DEC und FLAC3D. Griddle liefert Werkzeuge, um mit Oberflächen- und Volumennetzen zu arbeiten. Für die Nutzung in 3DEC ermöglicht der Plug-in u. a. eine unkomplizierte, schnelle Neuvernetzung von Oberflächen und das Erzeugen von Volumengittern. Es werden unstrukturierte Netze erstellt, welche durch eine unregelmäßige Konnektivität zwischen einzelnen Netzelementen gekennzeichnet sind. Dadurch sind die Elemente selbst i. d. R. unterschiedlich geformt. [13]

Eine Auswahl der zur Bearbeitung nötigen und hilfreichen Griddle- sowie Rhino-Werkzeuge, wie z. B. wichtige Mesh Tools, sind in Tabelle 4.1 gelistet.

Tabelle 4.1: Auswahl wichtiger Werkzeuge in Rhino (Quelle: ITASCA CONSULTING GROUP, 2021; McNEEL EUROPE, 2021)

Symbol	Werkzeug	Erklärung
	Mesh	Polygonnetz aus einer Oberfläche erzeugen
	DeleteMeshFaces	löschen ausgewählter Netzflächen
	PatchSingleFace	hinzufügen einer Netzfläche
	ShowEdges	offene Kanten des Objekts farbig markieren
	ColorizeObjects	ausgewählte Objekte farbig markieren
	CurveThroughPt	Kurve durch ausgewählte Punkte legen
	GInt (<i>Griddle surface mesh intersector</i>)	verschneiden von Oberflächennetzen, um ein konformes Netz zu erzeugen
	GSurf (<i>Griddle surface remesher</i>)	Neuvernetzung unstrukturierter Oberflächennetze mit spezifischen Parametern
	GVol (<i>Griddle volume mesher</i>)	Erzeugung unstrukturierter, tetraedrischer oder hex-dominanter Volumennetze

Die zur Erarbeitung des numerischen 3D-Modells eingesetzten Griddle-Werkzeuge *GInt*, *GSurf* und *GVol* sollen nachfolgend genauer vorgestellt werden. Eine ausführliche Beschreibung zum Plug-in mit allen weiteren Anwendungen liefert das Benutzerhandbuch [13]. Wie aus Tabelle 4.1 entnommen werden kann, erfolgt durch das *GInt*-Werkzeug das Verschneiden von Oberflächennetzen. Das Ziel dahinter ist die Erzeugung eines konformen Netzes, d.h. die Kanten und Knotenpunkte von aufeinandertreffenden Netzelementen (faces) werden lückenlos von allen dorthin verbundenen Netzelementen geteilt. Ein konformes Oberflächennetz ist Voraussetzung, um mit *GSurf* und *GVol* weiterzuarbeiten und über diese wiederum ein einheitliches Netz zu erhalten. Für die numerische Simulation ist das konforme Netz notwendig, weil dadurch die Daten zwischen den Netzknoten und -elementen nicht erst interpoliert werden müssen. Die Berechnungen sind somit schneller und genauer. Das Verschneiden von aufeinandertreffenden Oberflächennetzen durch *GInt* erfordert zur Verbesserung der Netzqualität eine Neuvernetzung. Dazu wird das *GSurf*-Werkzeug angewandt. Die Neuvernetzung unstrukturierter Oberflächennetze dient der Erzeugung eines höherwertigeren Netzes mit benutzerdefinierten Parametern, wie z. B. der minimalen und maximalen Netzkantenlänge. *GSurf* wird daher auch zur Verbesserung der ersten Netzerzeugung von Oberflächen mittels Rhino genutzt (vgl. Tabelle 4.1 *Mesh*-Werkzeug). Das qualitativ hochwertige Oberflächennetz ist gleichmäßiger und einheitlicher als vor der Neuvernetzung und erforderlich zur Erzeugung eines ebenso hochwertigen Volumennetzes. Das konforme Volumennetz für die numerische Simulation wird über das *GVol*-Werkzeug anhand ausgewählter Oberflächennetze erstellt. Dabei erfolgt die Vernetzung zu einem unstrukturierten, tetraedrischen oder hex-dominanten Volumen. Innerhalb des gesamten Volumenkörpers können einzelne Volumenblöcke durch den Verlauf von Oberflächennetzen voneinander abgetrennt vorliegen. Diese Oberflächen repräsentieren das Trennflächengefüge, z. B. Klüfte oder Verwerfungen. Die Volumenblöcke dagegen stellen die diskreten Gesteinsblöcke dar. [13]

4.2 Erarbeitung des numerischen Modells (3D-Blockmodell)

4.2.1 Felsgeometrie und Volumenkörper

Die Vermessung der Felsgeometrie erfolgte im Gelände mittels Triangulation über Laserscan. Das Laserscanning sowie das Post-Processing sind vom tschechischen Projektpartner durchgeführt und die Geometriedaten anschließend über einen Algorithmus zur Abbildung der Oberfläche so weit aufbereitet worden, dass ein erstes Oberflächennetzmodell zur Verfügung stand. Der Algorithmus ermöglicht die Bereinigung der Geometriedaten von Fehlmessungen, wie etwa durch verdeckenden Bewuchs. Das Vorhandensein von Vegetation am und auf dem Felsmassiv ist auf den Geländefotos der Abb. 2.1 ersichtlich.

Die Daten vom Laserscan sind für drei verschiedene Parametersätze auf ein entsprechendes Oberflächennetz übertragen worden. Die Netze – fein, mittel und grob – sind in Abb. 4.1 dargestellt. Das feine Modell liefert die exakteste Abbildung der Felsformation, ist dadurch für die weiteren Arbeitsschritte und Berechnungen allerdings auch am aufwendigsten. Das grobe Modell ist bereits zu sehr geglättet. Die Trennflächen sind entlang der Oberfläche kaum noch nachvollziehbar und erschweren damit das Einfügen des Trennflächensystems. Aus diesen Gründen wurde mit dem mittleren Oberflächenmodell des Laserscans weitergearbeitet. Trotz des bereinigenden Algorithmus im Post-Processing sind stellenweise Artefakte der Vegetation im Modell noch vorhanden. Diese überflüssigen Netzelemente sind in Abb. 4.1 als gelbe Bereiche sichtbar und markieren die Stellen, an denen der Algorithmus den Bewuchs nicht eindeutig vom Felsmassiv unterscheiden und abtrennen konnte. Weiterhin treten einige Löcher im Netz auf. Bei den Löchern handelt es sich um nicht messbare Bereiche während des Laserscans, z.B. aufgrund verdeckender Vegetation. Von Hand müssen die Löcher erst geschlossen sowie die überflüssigen Elemente entfernt werden, bevor ein konformes Oberflächennetz erzeugt werden kann. Nachfolgend sind die ersten Schritte zur Entwicklung des numerischen Blockmodells über die Software Rhino genauer beschrieben.

Zuerst wurden, mit Hilfe der unter Kapitel 4.1 genannten Mesh-Tools, die im Modell auftretenden Netzlöcher geschlossen und die überflüssigen Flächen entfernt. Das überarbeitete Modell ist im Rhino Plot in der Abb. 4.2 dargestellt. Die x-Achse der Darstellung verläuft in Richtung Osten, die z-Achse gibt die Höhe der Felsformation wieder. Der Flächenkörper ist am Boden und am Übergang zum erweiterten Felsmassiv noch nicht geschlossen. In der Abbildung ist der offene Rand des Objekts rot markiert. Entlang der gelben Linie wurde das Modell eingekürzt, da der überstehende Bodenbereich für die numerischen Berechnungen nicht relevant ist. Somit konnte die Modellgröße auf das notwendigste reduziert werden, um den Rechenaufwand der Standsicherheitsprüfung so gering wie möglich zu halten.

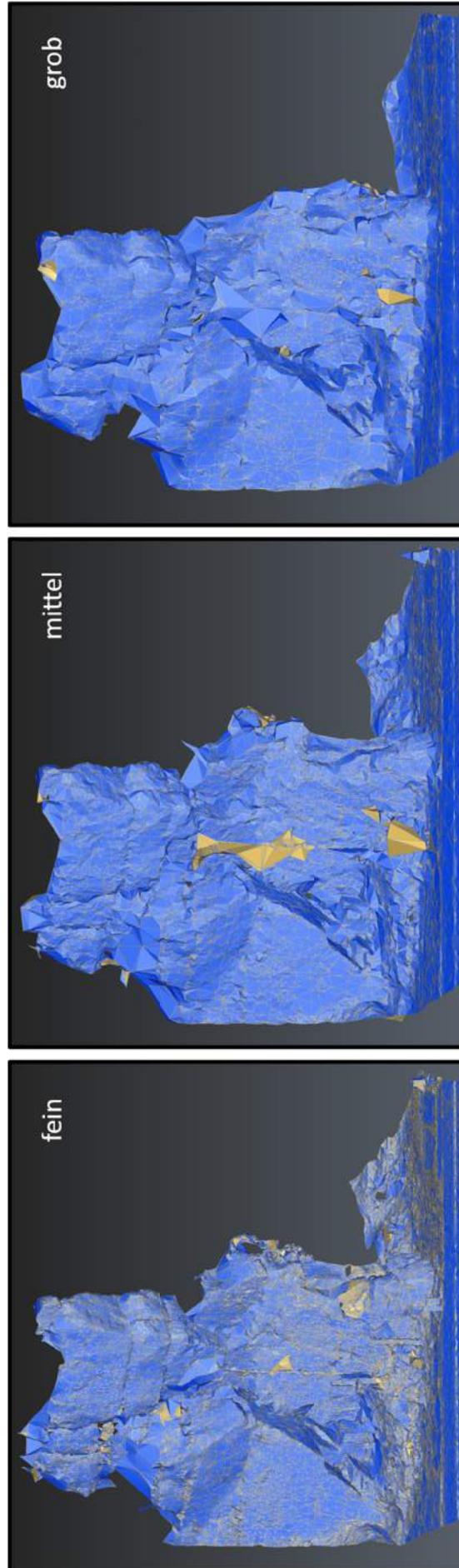


Abb. 4.1: Oberflächenmodelle aus 3 verschiedenen Parametersätzen vom Laserscan

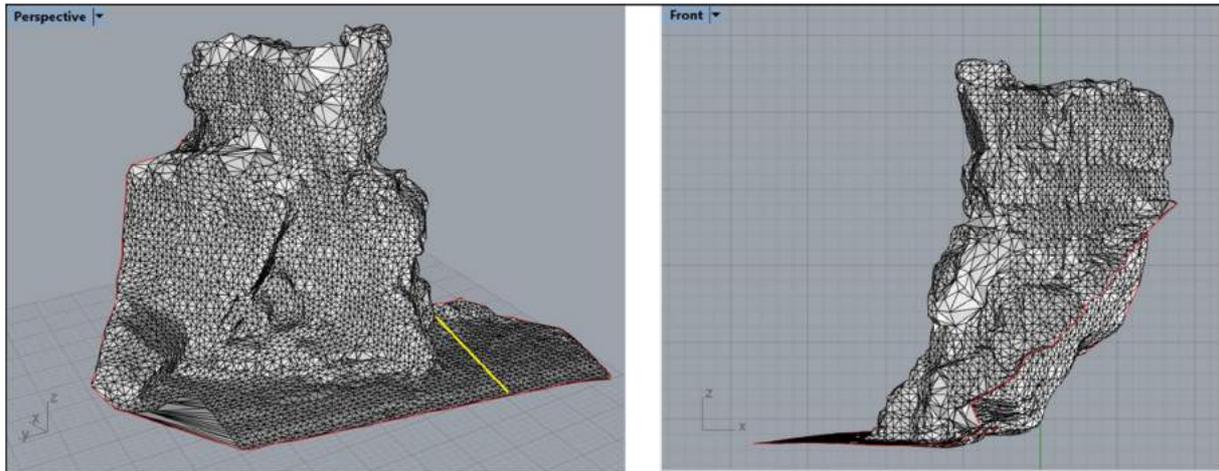


Abb. 4.2: Offener Flächenkörper der Felsformation in Rhino

Zur Erzeugung eines Volumenkörpers ist das Modell im nächsten Schritt geschlossen worden. Dafür wurde der Rand des Objekts dupliziert und in z-Richtung vertikal nach unten verlängert. Über eine horizontale Linie ließen sich die entstandenen Wände in der gewünschten Tiefe schneiden. Unterhalb der Horizontalen wurden die Flächen entfernt. Für die restlichen, am Objektrand liegenden Wände wurde ein Mesh erstellt. Danach konnten die Meshs von Objekt und Wänden miteinander verbunden und der Boden geschlossen werden. Der erzeugte Volumenkörper ist in Abb. 4.3 dargestellt. Mit Hilfe des Griddle Surface Remesher wurde das Polygonnetz der Oberfläche angepasst und geglättet. Anschließend ist das Trennflächensystem eingearbeitet worden.

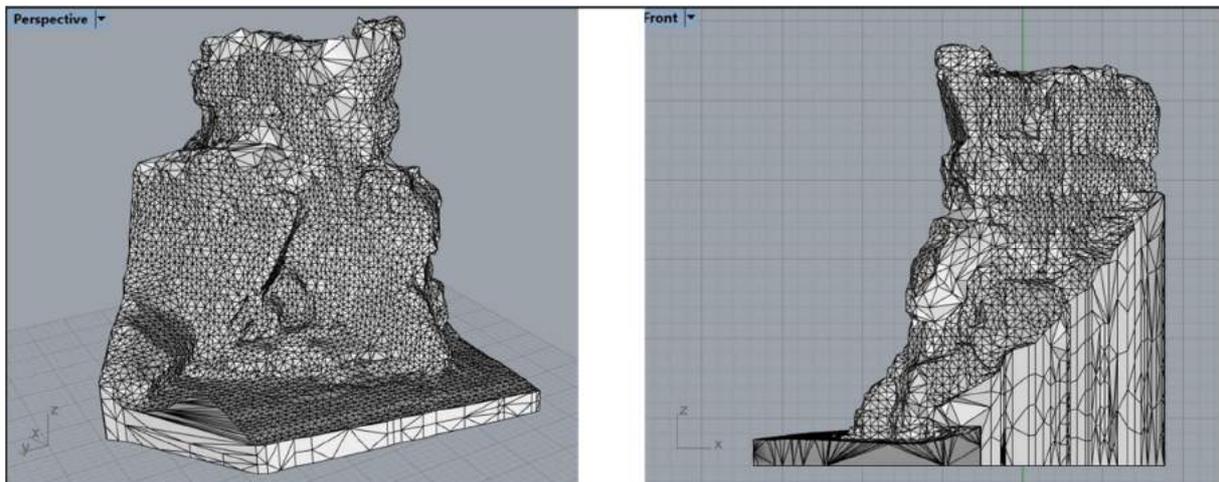


Abb. 4.3: Erzeugter Volumenkörper der Felsformation in Rhino

4.2.2 Trennflächengefüge und Volumennetz

Die gewonnenen Geometriedaten aus dem Laserscan bilden lediglich die Außenfläche der Felsformation ab. Aus diesem Grund musste das Trennflächensystem manuell in das Rhino-Modell eingefügt werden. Die Lage relevanter Trennflächen ist anhand der äußeren Geometrie sowie mit Hilfe von Geländefotos erarbeitet worden. Entsprechend der tektonischen Verhältnisse im Elbsandsteingebirge verlaufen die Trennflächen überwiegend horizontal und vertikal. Dadurch wird die Felsformation in einzelne Blöcke unterteilt. Die Gliederung des Felsmassives lässt sich besonders gut anhand der Geländefotos der Abb. 2.1 sowie in Abb. 4.4 erkennen. Hierbei sei erneut auf die üppige Vegetation am Felsen verwiesen und die Notwendigkeit das Oberflächenmodell von dieser zu bereinigen.



Abb. 4.4: Geländefotos zum Trennflächengefüge (Quelle: J. WICHERT)

Das Trennflächensystem ist in Rhino über Polylinien und Polyflächen erstellt worden, sodass danach ein Oberflächennetz erzeugt und mit dem Gesamtmodell verschnitten werden konnte. Entlang der äußeren Geometrie ist für jede Trennfläche eine geschlossene Polylinie durch ausgewählte Punkte rings um das Objekt gelegt worden. Anschließend ließen sich mittels der Linien Polyflächen erstellen. Einzelne Flächen-Abschnitte sind miteinander verbunden worden, sodass jede Trennfläche durch eine einzige Polyfläche repräsentiert wird.

Die Abb. 4.5 zeigt die erstellten Linien und Flächen des Trennflächengefüges. Die Polylinien sind in Gelb verdeutlicht und auf der linken Bildhälfte im Oberflächenmodell, auf der rechten zusammen mit den Polyflächen abgebildet. Es sind insgesamt 7 horizontale und 10 vertikale Trennflächen in das Modell eingearbeitet worden. Damit ist die Vollständigkeit des Trennflächengefüges nicht gegeben. Allerdings wurden absichtlich nur relevante Klüfte und Schichtflächen erfasst, die augenscheinlich bedeutsam für mögliche Bewegungen von gefährdeten Bereichen sind. Bei einer detaillierteren Betrachtung des gesamten Felsmassives müssen alle Trennflächen in das Modell eingearbeitet werden.

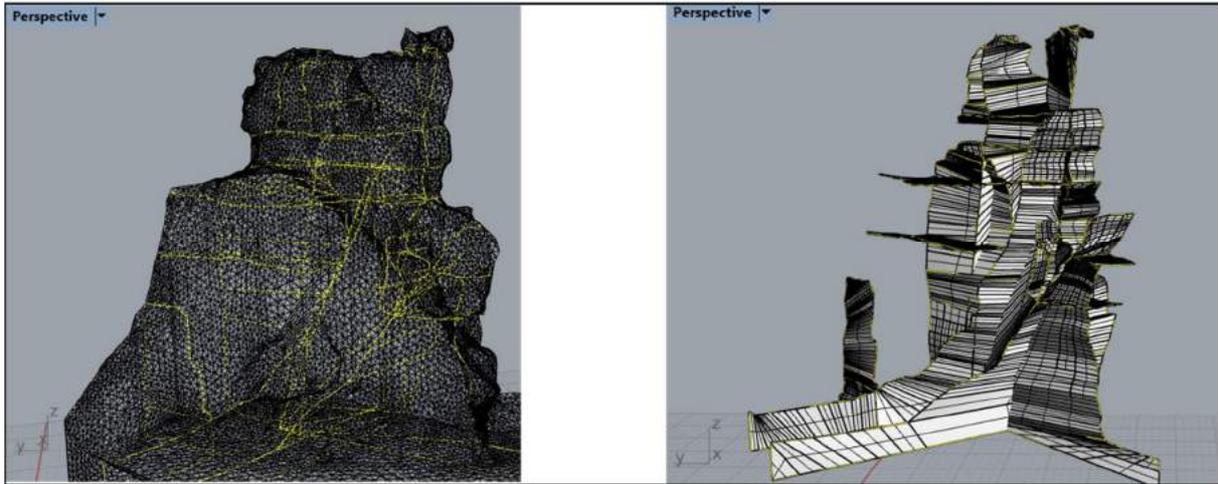


Abb. 4.5: Polylinien und Polyflächen zur Erarbeitung des Trennflächensystems

Zusätzlich zum eigentlichen Trennflächensystem ist direkt unterhalb der Felsspitze eine weitere Abtrennung eingearbeitet worden. Aufgrund der exponierten Lage der Felsspitze wird dieser Bereich als besonders gefährdeter Abschnitt betrachtet. Damit das Szenario 4 der verstärkten Verwitterung (vgl. Tabelle 3.1) in 3DEC simuliert werden kann, müssen die späteren Verwitterungsflächen bereits in Rhino erzeugt werden. Dabei kann die Abtrennung ebenso als genauere Ausarbeitung der tatsächlichen Verwitterungsfläche betrachtet werden. Der Vergleich von Geländefoto und Rhino-Modell in Abb. 4.6 zeigt, dass die Aufstandsfläche der Felsspitze im Modell weniger intensiv eingeschnitten ist als in der Realität. Die Ursache dafür liegt in der Vernetzung. Demnach sind die Totbereiche vom Laserscan nach der Netzerzeugung viel glatter als in der Natur. Zudem sorgt die wiederholte Neuvernetzung durch *GSurf* für ein Glätten des Oberflächennetzes. Zur besseren Darstellung der natürlichen Bedingungen soll die Aufstandsfläche der Spitze durch zusätzliche Trennflächen verringert werden. In der Abb. 4.7 sind die erstellten Verwitterungsflächen unterhalb der Felsspitze farbig gekennzeichnet und reichen an der breitesten Stelle etwa 1.50 m tief in den Felsen hinein.

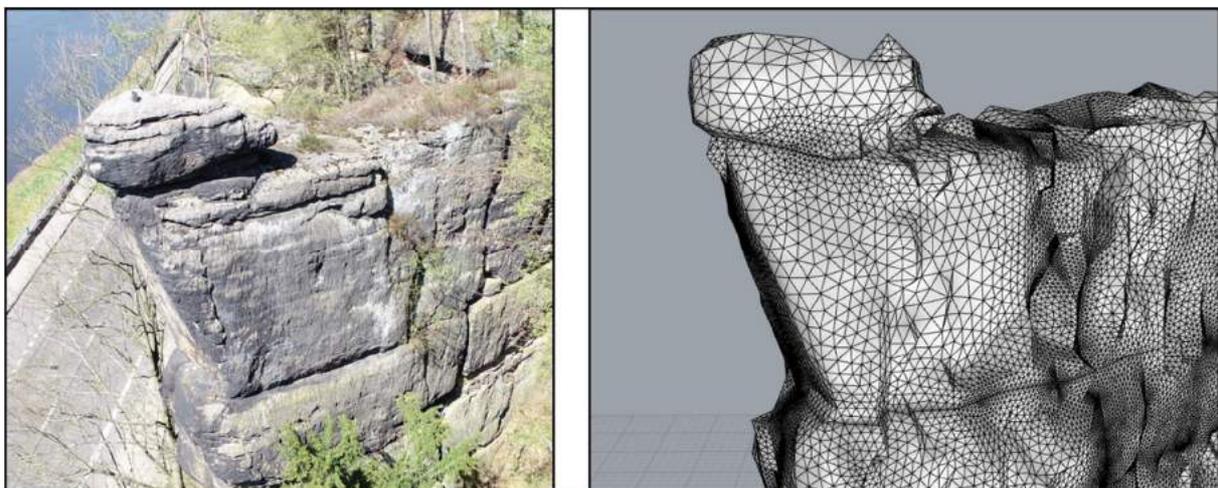


Abb. 4.6: Felsspitze im Gelände (links) und im Rhino-Modell (rechts) (Geländefoto Quelle: J. WICHERT)

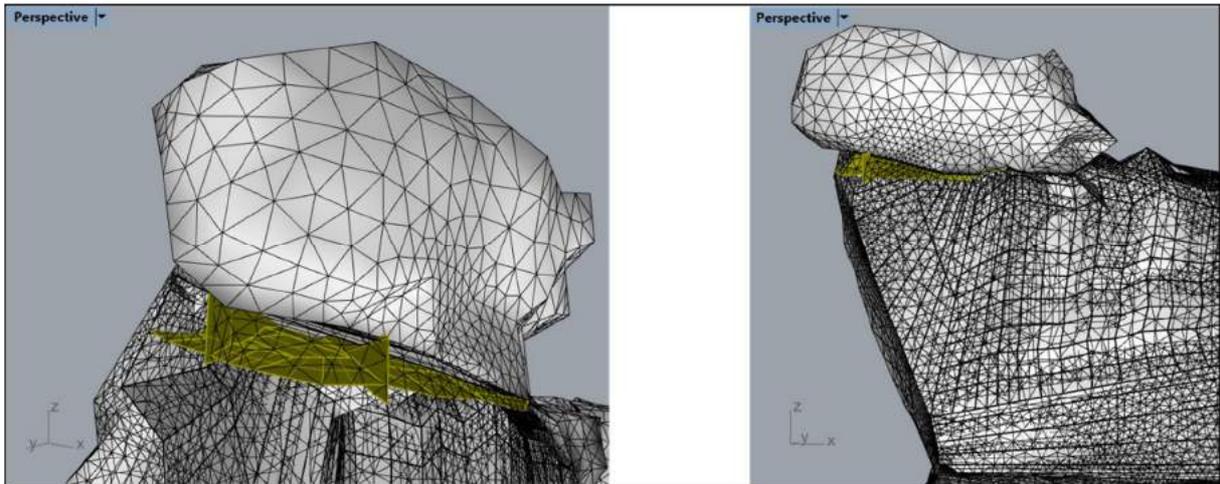


Abb. 4.7: Erstellte Polyflächen für die verstärkte Verwitterung unterhalb der Felsspitze

Für die einzelnen Polyflächen sind im nächsten Schritt Oberflächennetze erzeugt und über den Griddle Plug-in mit dem Mesh der äußeren Geometrie verschnitten worden. Dadurch erfolgte eine Unterteilung des Gesamtmodells in einzelne Blöcke entsprechend dem Trennflächengefüge. Das verbundene Oberflächennetz wurde unter Anwendung der Mesh-Tools überarbeitet, sodass weder Überschneidungen noch Lücken eine fehlerhafte Netzstruktur hervorrufen. Außerdem wurde das Netz regelmäßig mittels *GSurf* angepasst.

Nachdem alle relevanten Trennflächen in das Oberflächennetz integriert werden konnten, folgte die Erzeugung eines Volumennetzes für die weitere Arbeit in 3DEC.

Im ersten Schritt sind dem finalen Mesh über den *Griddle surface remesher* spezifische Parameter zugewiesen worden, um verschiedene Auflösungen der Oberflächenstruktur zu erzeugen. Dabei gilt: Je feiner das Modell, desto genauer ist die Darstellung der natürlichen Gegebenheiten. Je gröber das Modell, desto kleiner ist der Rechenaufwand der numerischen Simulationen. Daher sollte die Auflösung so grob wie möglich, aber so fein wie nötig gehalten werden. In der Abb. 4.8 ist eine feine und eine grobe Oberflächenstruktur dargestellt.

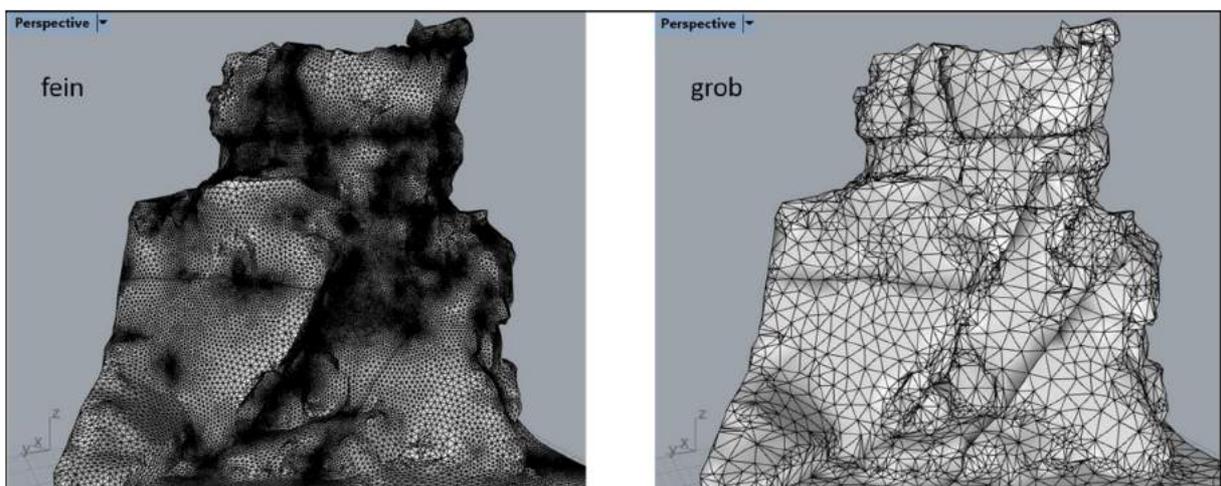


Abb. 4.8: Finales Gesamtmodell – mit feiner und grober Oberflächenstruktur

Zur Erstellung des numerischen Berechnungsmodells wurde ein Mittelweg zwischen grober und feiner Struktur gewählt und daraus das Volumennetz für 3DEC erzeugt. Über den Plug-in wurde der *Griddle volume mesher* auf das Oberflächennetz angewandt, um ein unstrukturiertes, tetraedrisches Volumennetz zu erstellen. Dazu muss das bereitgestellte Oberflächennetz fehlerfrei sein. Auftretende Fehler sind etwa Netzlöcher, überlappende Netzelemente sowie fehlerhafte Überschneidungen. Bei der Ausführung von *GVol* werden diese Fehler automatisch identifiziert und als „Meshing_Errors“ abgespeichert. Unter Einsatz der Mesh-Tools sind die fehlerhaften Bereiche im Oberflächennetz manuell zu korrigieren. Anschließend muss der Vorgang in der Regel einige Male wiederholt werden, bis ein konformes Volumennetz erzeugt werden kann. Die Ausgabe des Volumennetzes wird in ein für 3DEC lesbares Datenformat exportiert.

Nach dem Import der Datei in 3DEC ergibt sich das in Abb. 4.9 dargestellte 3D-Blockmodell. Die diskreten Blöcke sind farblich voneinander getrennt. Die Unterteilung erfolgt anhand des Trennflächensystems. Insgesamt wird das Modell aus 40 Blöcken aufgebaut. In der Abb. 4.10 ist zum Vergleich das Blockmodell in der SO-Ansicht einer Geländeaufnahme überlagert.

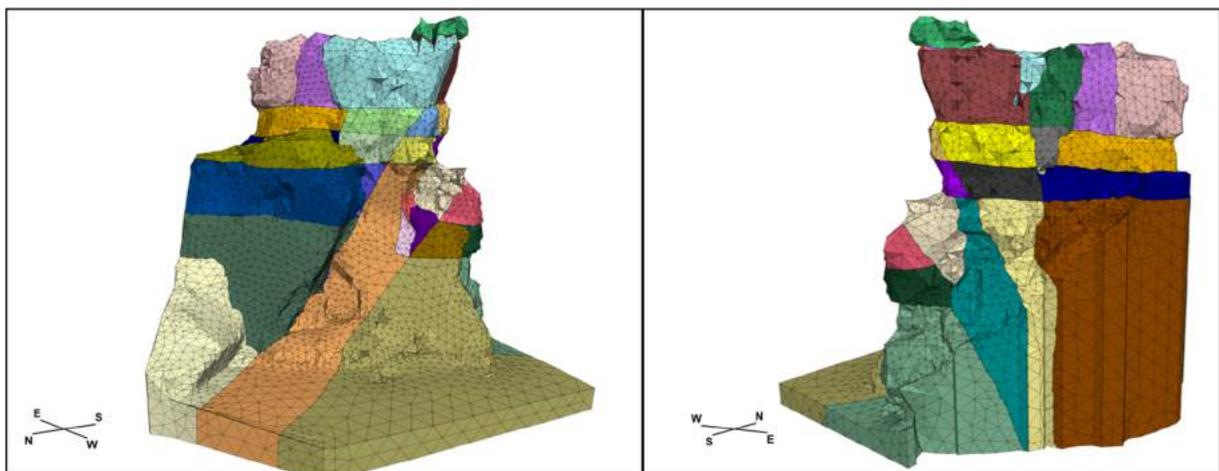


Abb. 4.9: Erarbeitetes Blockmodell in 3DEC



Abb. 4.10: SO-Ansicht des Blockmodells mit Geländefoto überlagert (Geländefoto Quelle: J. WICHERT)

5 Numerische Berechnung

5.1 Grundlagen zum Programm 3DEC

Die Software 3DEC ist ein numerisches Berechnungsprogramm des US-amerikanischen Unternehmens Itasca Consulting Group, Inc., welches unter Anwendung der Distinct-Element-Method (DEM) die Modellierung von 3-dimensionalen diskontinuierlichen Modellen erlaubt. Dabei kann es sich bei dem Modell z. B. um eine geklüftete Gesteinsmasse handeln. Die DEM selbst wurde 1971 von Cundall eingeführt und 1988 in Zusammenarbeit mit der Itasca-Group auf das Programm 3DEC angewandt. In der vorliegenden Arbeit wurde das Programm benutzt, um die Simulationen am Fels bei Hřensko durchzuführen. [14]

In 3DEC wird die Reaktion des Diskontinuumsmodells auf eine statische oder eine dynamische Belastung simuliert. Dafür liefert die Software vorprogrammierte Materialverhaltensmuster sowohl für das Medium als auch für die Diskontinuitäten. Die Diskontinuitäten unterteilen das Medium in voneinander getrennte Blöcke und werden als Randbedingungen zwischen diesen behandelt. Entlang der Diskontinuitäten sind Verschiebungen und Rotationen der einzelnen Blöcke möglich. In 3DEC sind die diskreten Blöcke entweder starr oder verformbar und werden zu einem Diskontinuumsmodell zusammengestellt. Verformbare Blöcke unterteilt das Programm in ein Netz aus Einzelementen (zones). Diese können sich, entsprechend dem vorgegebenen Spannungs-Dehnungs-Gesetz, unabhängig voneinander bewegen. Dabei erfolgt zudem eine Relativbewegung der Diskontinuitäten in Normal- und Scherrichtung. Große Bewegungen und Deformationen des Blockmodells lassen sich in 3DEC sehr gut simulieren, da das Programm auf einer Bewegungsgleichung der Lagrange-Funktionen beruht. Zur direkten Lösung der Bewegungsgleichung verwendet 3DEC explizite Zeitschritte basierend auf der DEM. Neben Verschiebung und Rotation ermöglicht die DEM zudem eine vollständige Abtrennung einzelner Elemente vom Modell. Neue Kontakte werden während des Rechenvorgangs automatisch erkannt und den Netzelementen neu zugewiesen. [14]

Für die Simulationen stehen eine Reihe an programmeigenen Kommandos zur Verfügung. Darüber hinaus ist es dem Benutzer möglich, eigene Befehlsfunktionen zu erstellen, um die Modellrechnungen den spezifischen Anforderungen entsprechend anzupassen. Dazu ist die leistungsstarke Programmiersprache FISH in 3DEC integriert. Weiterhin liefert das Programm, neben der befehlsgesteuerten, eine graphische Benutzeroberfläche, welche eine interaktive Bearbeitung des Modells und dessen Objekte ermöglicht. Als besonders hilfreich für die Analyse der Simulationsergebnisse erweisen sich Verlaufsdigramme (history plots). [14]

Im Hinblick auf die Standsicherheitssimulationen der Felsformation bei Hřensko ist von den vorprogrammierten Materialverhaltensmodellen sowohl der Gesteinsmatrix als auch den Trennflächen das Mohr-Coulomb-Modell zugewiesen worden. Das Modell kennzeichnet ein

elasto-plastisches Materialverhalten und wird zur Darstellung von Zug- und Scherversagen genutzt. Das elastische Verhalten wird durch die Normal- und Schersteifigkeiten des Materials entsprechend dem Hooke'schen Gesetz beschrieben. Für die plastische Verformung sind drei Grenzparameter entscheidend, dessen Überschreitung zum Materialversagen und damit zum Bruch führen. Diese sind die einaxiale Zugfestigkeit σ_t für das Zugversagen sowie die Kohäsion c und der Reibungswinkel ϕ für das Scherversagen. Weiterhin kann der Dilatanzwinkel ψ festgelegt werden, um die Auflockerung des Materials durch Scherverformung zu definieren. In 3DEC können der Matrix und den Trennflächen unterschiedliche Parameterwerte zugeordnet werden. Die Trennflächen haben im Vergleich zur Matrix höhere Steifigkeiten und weisen damit einen größeren Widerstand gegen elastische Verformung auf. Die Steifigkeiten der Matrix werden entweder durch die elastischen Parameter E-Modul und Poissonzahl oder Schub- und Kompressionsmodul bestimmt. In der vorliegenden Arbeit erfolgt bei der Simulation der verschiedenen Verwitterungsszenarien eine Änderung des plastischen Materialverhaltens von Matrix und/oder Trennflächen durch eine Reduktion von Kohäsion, Reibungswinkel und einaxialer Zugfestigkeit. [14]

Ein typischer Anwendungsbereich des elasto-plastischen Mohr-Coulomb-Modells ist die allgemeine Gesteinsmechanik für Hangstabilitäten. Weiterhin ist es eines der gängigsten 3DEC-Modelle um Diskontinuitäten in der Geologie, wie z. B. Klüfte, zu repräsentieren. Die Zuweisung der Materialverhaltensmodelle und -eigenschaften ist in 3DEC separat für einzelne oder unmittelbar für eine Reihe von Diskontinuitäten möglich. Die Funktion erweist sich für die Simulation bei Hrensko von Vorteil, um die Trennflächen der verstärkten Verwitterung abseits von Szenario 4 inaktiv zu setzen bzw. entsprechend der Matrix zu behandeln. [14]

5.2 Initialmodell (Grundspannungszustand)

Die Initialisierung des Grundspannungszustands erfolgte zunächst hinsichtlich der Materialparameter von Matrix und Trennfläche aus Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 unter Wirkung der Gravitation. Grundlage dafür stellt das aus Rhino nach 3DEC importierte, fertig geschnittene und vernetzte Blockmodell der Abb. 4.9 dar.

Wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert, ist das elasto-plastische Mohr-Coulomb-Modell auf die Sandsteinmatrix sowie die Trennflächen als kennzeichnendes Materialverhaltensmodell angewandt worden. Der Modelltyp der Felsformation ist auch in der Abb. 5.1 veranschaulicht. Die Materialkennwerte wurden der Matrix und den Trennflächen entsprechend zugewiesen. Der Trennflächensatz unterhalb der Felsspitze (vgl. Abb. 4.7) erhielt die Materialkennwerte der Sandsteinmatrix für Kohäsion, Reibungswinkel und einaxiale Zugfestigkeit. Entlang der Aufstandsfläche wurden zusätzliche Trennflächen lediglich im Hinblick auf Szenario 4 gesetzt, sodass separate Blöcke geschnitten und für die Simulation der verstärkten Verwitterung mühelos entfernt werden konnten. Für alle weiteren numerischen Modellrechnungen ist der Trennflächensatz gemäß der Gesteinsmatrix zu behandeln. Weiterhin wurden Anfangs- und Randbedingungen definiert, die ebenfalls in Abb. 5.1 gekennzeichnet sind. Dazu zählt die Einstellung der Bewegungsgeschwindigkeit auf null, sodass bestimmte Bereiche in bestimmte Richtungen fixiert vorliegen. Die Bewegungsgeschwindigkeit kann nur für verformbare Blöcke festgeschrieben werden [14]. Im Modell wurde der Boden in alle Bewegungsrichtungen fixiert. Dadurch sind weder Vertikalverschiebungen entlang der z-Achse noch Horizontalverschiebungen entlang der x-Achse und der y-Achse möglich. In der Abbildung ist der fixierte Modellboden durch die grünen Würfel gekennzeichnet. Am Übergang vom modellierten Felsmassiv zum Gebirgskomplex werden hingegen lediglich Horizontalverschiebungen unterbunden. Dadurch bleiben die Seitenränder des Modells für Vertikalbewegungen frei und werden anhand der Normalen-Richtung der Blockfläche für horizontale Verschiebungen fixiert. Die braunen Würfel in der Abbildung markieren die Bewegungseinschränkung an den Modellseiten. Für das numerische Berechnungsmodell wird die Gravitationskonstante von 9.81 m/s^2 gesetzt. Damit ergibt sich die wirksame Kraft eines Blockkörpers aus dem Produkt von dessen Masse und dem Vektor der Schwerkraft. Der in-situ Spannungszustand des Modells wird durch die Überlagerungsdichte initialisiert, sodass Unregelmäßigkeiten der Topografie im Spannungsbild berücksichtigt werden [14]. Neben der Festlegung der genannten Anfangs- und Randbedingungen sind im Hinblick auf die nachfolgenden numerischen Simulationen mehrere Verlaufsdigramme für definierte Kontrollpunkte erstellt worden. Die Lage der Überwachungspunkte am Felsmassiv wird in Abb. 5.1 anhand der farbigen Pyramiden verdeutlicht. Es sind insgesamt 6 Kontrollpunkte festgelegt worden. Diese liegen in Bereichen, für die eine große Bewegung und damit eine große Gefährdung angenommen wird.

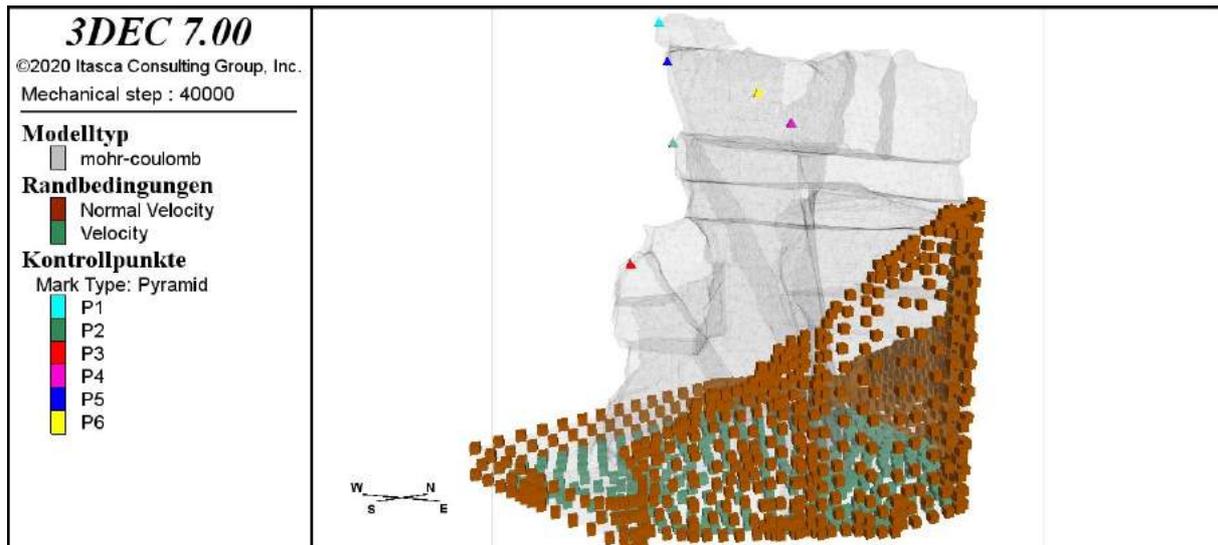


Abb. 5.1: Anfangs- und Randbedingungen des numerischen Modells und Kontrollpunkte

Nach Festlegung der Anfangs- und Randbedingungen wurde der Grundspannungszustand des numerischen Modells durch das Rechnen ins Gleichgewicht initialisiert. Dazu ist die numerische Formulierung für Verformungen unter großer Belastung verwendet worden. Der Gleichgewichtszustand konnte nach rund 80 000 Rechenschritten und einer Rechenzeit von 1 h 15 min erreicht werden. Das Ergebnis der ersten Initialisierung ist in Abb. 5.2 dargestellt. Es handelt sich dabei nicht um das finale Initialmodell, welches als Grundspannungszustand für die Verwitterungssimulationen diente. Der Grund dafür ist später genauer beschrieben.

Die mittlere Zeitschrittlänge (Δt) der Simulation beträgt $\sim 1.2 \cdot 10^{-4}$ s pro Rechenschritt. Somit kann über die Anzahl der Rechenschritte und die Zeitschrittlänge die vergangene Modellzeit abgeschätzt werden. Für das Initialmodell ergibt sich nach 80 000 Schritten eine Modellzeit von 9.6 s. Die Schwankungen der Zeitschrittlänge sind für die Simulationen der vorliegenden Arbeit sehr gering (7. Nachkommastelle), sodass nachfolgend mit $1.2 \cdot 10^{-4}$ s pro Rechenschritt zur Ermittlung der Modellzeit gerechnet wird.

Das Gesamtsystem gilt generell als stabil mit dem Erreichen des Gleichgewichtszustands. Dieser kann über die max. unausgeglichene Kraft im System und über die Verschiebungen der Überwachungspunkte kontrolliert werden. Im Gleichgewichtszustand ist die maximale unausgeglichene Kraft minimal und läuft gegen Null. Dasselbe gilt für die Verschiebungsgeschwindigkeiten, sodass sich die Verschiebungen einem konstanten Wert annähern. Aus den Diagrammen der Abb. 5.2 ist zu erkennen, dass diese Bedingungen nach 80 000 Schritten erfüllt sind. In den Verschiebungsdiagrammen entsprechen die Farben der Linien denen der gesetzten Überwachungspunkte (vgl. Abb. 5.1). Die obere Darstellung der Abb. 5.2 zeigt die Gesamtverschiebungen im Konturbild der SO-Ansicht. Die Verschiebungen fallen gering aus und betreffen überwiegend die obersten Blöcke im vorderen Felsbereich. Aufgrund der exponierten Lage tritt die größte Verschiebung von ca. 6.10 cm an der Felsspitze auf. Im unteren und hinteren Felsbereich sind die Verschiebungen am geringsten.

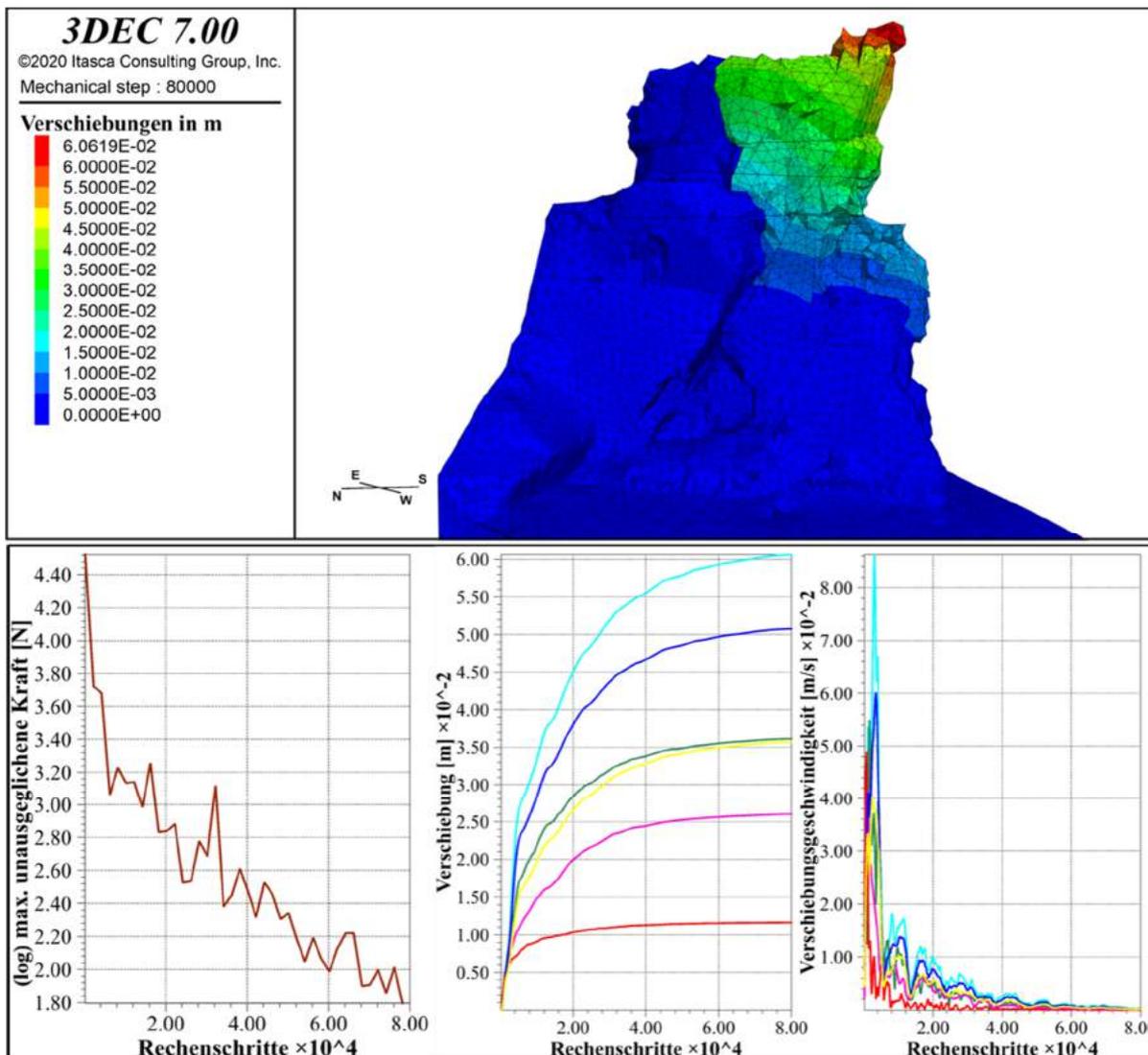


Abb. 5.2: Ergebnis der ersten Initialisierung nach 80 000 Rechenschritten

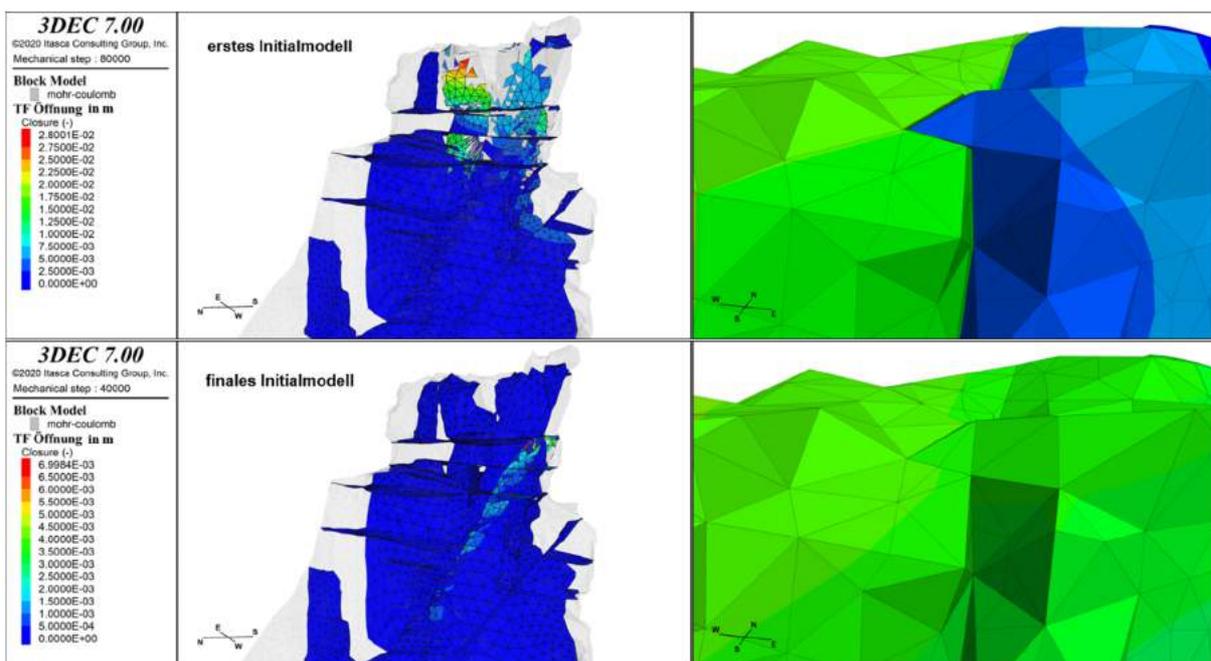


Abb. 5.3: Vergleich der TF-Öffnung vom ersten und finalen Initialmodell

Bei genauerer Betrachtung des Initialmodells fällt auf, dass sich einige Klufflächen bereits um ein paar Zentimeter geöffnet haben. Die obere Darstellung der Abb. 5.3 zeigt, dass für die erste Initialisierung die Kluftöffnungsweite bis zu 2.80 cm beträgt. In einigen Bereichen ist der Kontakt der Gesteinsblöcke untereinander nicht mehr gegeben, was auf der rechten oberen Bildhälfte der Abbildung anhand der Lücke zwischen blauem und grünem Block deutlich wird. Ein Abgleich mit den tatsächlichen Gegebenheiten ausschließlich über die Geländefotos ist eher unpräzise. Bei einer detaillierteren Untersuchung muss die Öffnungsweite der Klüfte im Gelände ermittelt und anschließend im numerischen Berechnungsmodell berücksichtigt werden. Für die nachfolgenden Verwitterungssimulationen sollen intakte Trennflächen als Ausgangssituation angenommen werden. Es ist daher eine Anpassung der Materialparameter aus Kapitel 2.5 notwendig, sodass die Trennflächen überwiegend geschlossen vorliegen. Bei den Matrixparametern handelt es sich um im Labor bestimmte Kennwerte für Sandstein, weshalb diese für eine erneute Initialisierung unverändert bleiben. Allerdings stellen die Trennflächenparameter lediglich Erfahrungswerte dar und müssen für den Erhalt stärkerer Kontakte erhöht werden. Die Trennflächenkennwerte wurden über praktisches Ausprobieren ermittelt. Für das finale Initialmodell erfolgte die Einstellung auf die Kennwerte der Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Neue Kennwerte für geschlossene Trennflächen zur Simulation in 3DEC

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Trennfläche - Sandstein
Kohäsion	c	Pa	8e+04
Reibungswinkel	φ	°	35
einaxiale Zugfestigkeit	σ_t	Pa	4e+04
Dilatanzwinkel	ψ	°	5

Für das finale Initialmodell konnte der Gleichgewichtszustand bereits nach 40 000 Rechenschritten (4.8 s vergangene Modellzeit) und einer Rechenzeit am Computer von 30 Minuten erreicht werden. Die Diagramme der Abb. 5.4 verdeutlichen das Erreichen des Gleichgewichts durch konstante Verschiebungswerte an den Kontrollpunkten sowie dem Abfallen der Verschiebungsgeschwindigkeit und der max. unausgeglichenen Kraft gegen Null. Im Konturbild der Abb. 5.4 sind die Gesamtverschiebungen nach der Initialisierung dargestellt. Die Verschiebungen fallen im Vergleich zum ersten Initialmodell geringer aus und liegen unter einem Zentimeter. Der höchste Wert kann wieder an der Felsspitze, aber auch im vorderen Felsbereich festgestellt werden. Generell sind die Verschiebungen im finalen Initialmodell gleichmäßiger verteilt und nicht wie bei der ersten Initialisierung nur auf den erweiterten Bereich der Felsspitze konzentriert (vgl. Abb. 5.2). Weiterhin wird im Vergleich der Trennflächenöffnung aus Abb. 5.3 deutlich, dass im finalen Initialmodell die Klüfte überwiegend geschlossen und intakt sind. Der größte Öffnungswert beträgt rund 0.70 cm und fällt damit wesentlich geringer aus als nach der ersten Initialisierung mit 2.80 cm.

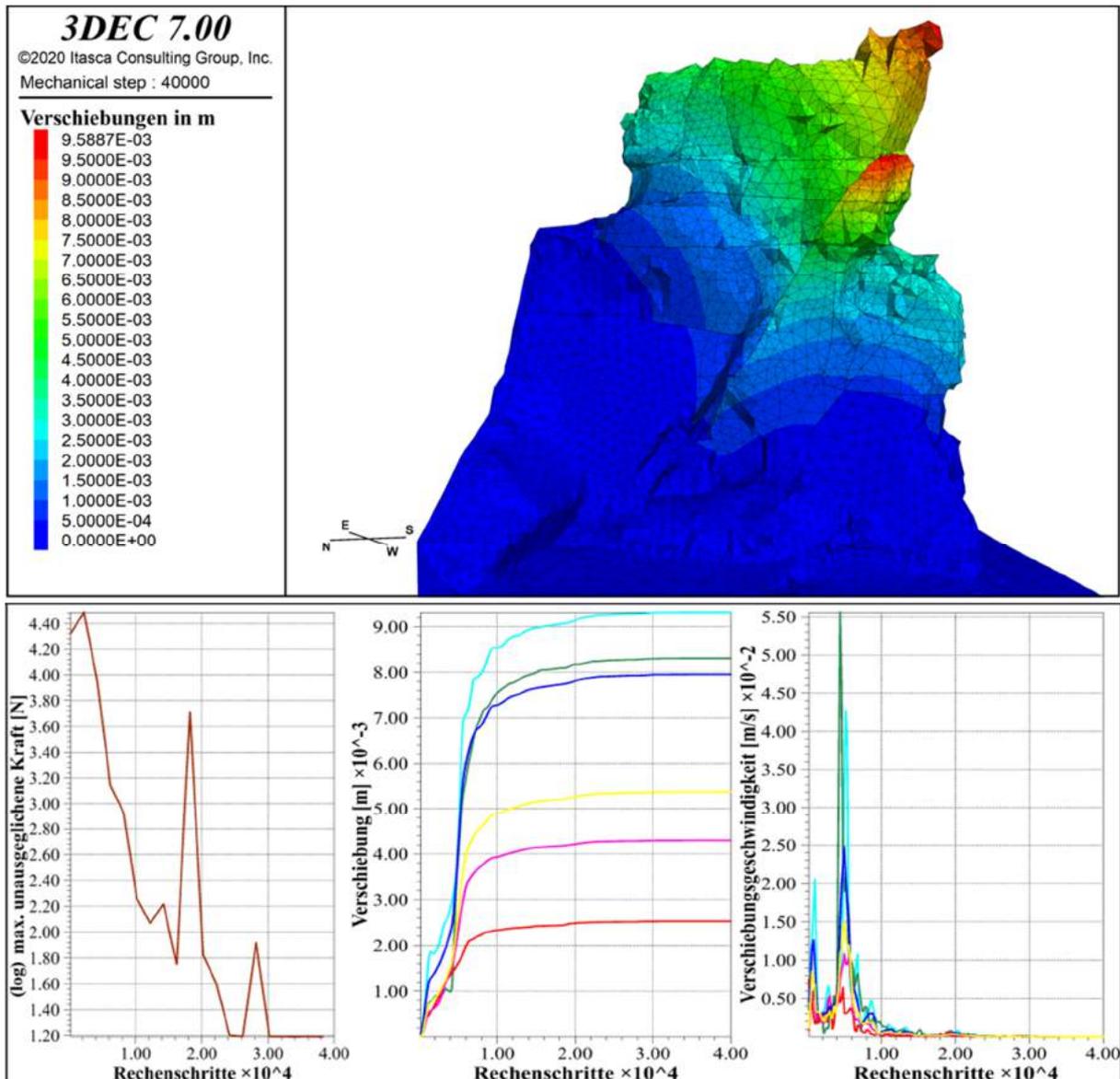


Abb. 5.4: Ergebnis der finalen Initialisierung nach 40 000 Rechenschritten

Nach der finalen Initialisierung des Grundspannungszustandes wurden die Verschiebungen, die Verschiebungsgeschwindigkeiten und die akkumulierte Modellzeit auf null zurückgesetzt. Außerdem sind Blöcke mit einem eher geringem Volumen von 10^{-4} m^3 bis 10^{-2} m^3 identifiziert worden, welche auf das Schneiden der Trennflächen zurückzuführen sind. Zum Vergleich dazu, im Modell beläuft sich das mittlere Blockvolumen auf 9 m^3 und das maximale auf 660 m^3 . Geringe Blockvolumen verursachen Probleme während der numerischen Berechnungen und müssen daher entfernt werden. Das ist z. B. in Rhino durch eine Überarbeitung und Neuvernetzung des geotechnischen 3D-Modells möglich. Die schnellste Variante ist jedoch das Löschen der Miniblöcke in 3DEC. Dadurch bleiben zwar Lücken im Modell zurück, diese sind aufgrund der kleinen Volumina allerdings vertretbar gering. Die erzeugten Hohlräume können zudem so auch in der Natur vorkommen und neben den TF als weitere Inhomogenitäten angesehen werden. Daher sind nach der Initialisierung zwei Blöcke mit geringem Volumen in 3DEC gelöscht worden (vgl. Anhang A Abb. V.1).

5.3 c – φ – σ_t – Reduktion

5.3.1 Matrix und Trennflächen

Zur Bewertung der Standsicherheit der Felsformation wird die c-φ-σ_t-Reduktionsmethode angewandt. Die Methode ermittelt den Standsicherheitsfaktor eines Gebirges durch eine schrittweise Reduktion der Festigkeitsparameter Kohäsion c, Reibungswinkel φ und einaxiale Zugfestigkeit σ_t sowohl von der Gesteinsmatrix als auch den Trennflächen. Es wird bis zum Systemversagen reduziert. Dabei ist der Standsicherheitsfaktor der höchste Faktor, um den die Festigkeitsparameter verringert werden können und das Gesamtsystem trotzdem stabil bleibt. Bei der Überschreitung des Sicherheitsfaktors kommt es zum Felsversagen, sodass das System den Gleichgewichtszustand nicht wieder erreicht. [15]

Die reduzierten Festigkeitsparameter werden für die i-te Stufe des Reduktionsfaktors RF über folgende Formeln berechnet:

$$c_{RF_i} = \frac{c}{RF_i} \quad (1)$$

$$\sigma_{t_{RF_i}} = \frac{\sigma_t}{RF_i} \quad (2)$$

$$\varphi_{RF_i} = \arctan\left(\frac{\tan(\varphi)}{RF_i}\right) \quad (3)$$

Im Verwitterungsszenario 1 erfolgt die Anwendung der c-φ-σ_t-Reduktionsmethode, wobei die Festigkeitsparameter der Sandsteinmatrix sowie die der Trennflächen in gleichem Maße verringert werden. Die numerischen Berechnungen werden für das trockene Gesamtsystem ohne Porenwasserdrücke durchgeführt. Die Ausgangssituation bildet der GSZ der finalen Initialisierung, sodass u. a. die Modellzeit bei null einsetzt (vgl. Kapitel 5.2). Es wurde bei einem Reduktionsfaktor von 1.25 begonnen und anschließend in 0.25er Schritten weiter reduziert. Eine Liste der resultierenden Festigkeitswerte für Sandsteinmatrix und Trennflächen in Abhängigkeit vom Reduktionsfaktor befindet sich im Anhang B Tabelle V.1.

Pro Reduktionsschritt wurden 100 000 Rechenschritte (12 s) veranschlagt, sodass das Gesamtsystem wieder ins Gleichgewicht und damit in den stabilen Zustand zurückkehren kann. Für den Reduktionsfaktor von 2.00 musste die Anzahl auf 160 000 Schritte (19 s) erhöht werden, um den Gleichgewichtszustand zu erreichen. Darüber hinaus führten weitere Reduktionen zu einer anhaltenden Instabilität der Felsformation. Aus diesem Grund wurde lediglich bis zu einem Reduktionsfaktor von 2.50 gerechnet. Die maximale unausgeglichene Kraft während des Reduktionsvorganges von Szenario 1 ist in Abb. 5.5 dargestellt. Abb. 5.6 zeigt die Verschiebungen im Konturbild nach 900 000 Schritten sowie die Verlaufsdiagramme der Überwachungspunkte zur Verschiebung und Verschiebungsgeschwindigkeit.

Die Reduktionsschritte können anhand der Verlaufsdiagramme nachvollzogen werden. Eine Verringerung der Festigkeitsparameter führt zu einem deutlichen Anstieg im Kurvenverlauf. Vom Initialzustand ausgehend erfolgt eine Reduktion bei 40 000 Schritten (RF = 1.25), 140 000 Schritten (RF = 1.50), 240 000 Schritten (RF = 1.75), 340 000 Schritten (RF = 2.00), 500 000 Schritten (RF = 2.25) und 700 000 Schritten (RF = 2.50). Bis einschließlich dem Reduktionsfaktor 2 erreicht das Gesamtsystem pro Verringerung nach 12-19 s vergangene Modellzeit den stabilen Gleichgewichtszustand, wie anhand der minimalen Werte der unausgeglichene Kraft in Abb. 5.5 zu erkennen ist. Dagegen kommt es für die Reduktionsfaktoren 2.25 und 2.50 selbst nach ~ 24 s zu keiner signifikanten Absenkung der unausgeglichene Kraft gegen Null. Der Gradient der Absenkungskurve wird ab RF 1.75 mit jeder weiteren Reduktion stets flacher, sodass das Gleichgewicht erst spät oder gar nicht mehr erreicht wird. Bei RF 2.25 ist nach 200 000 Schritten eine Tendenz zum Abfallen der unausgeglichene Kraft auf minimale Werte zu erkennen. Daher wurde ein weiterer Reduktionsschritt um den Faktor 2.50 durchgeführt. Dessen Verlaufgradient weist im Durchschnitt ein sehr geringes Gefälle auf und lässt keine Absenkung gegen null erkennen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Gesamtsystem dauerhaft instabil bleibt. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Reduktionen durchgeführt, sondern die numerischen Berechnungen an dieser Stelle beendet.

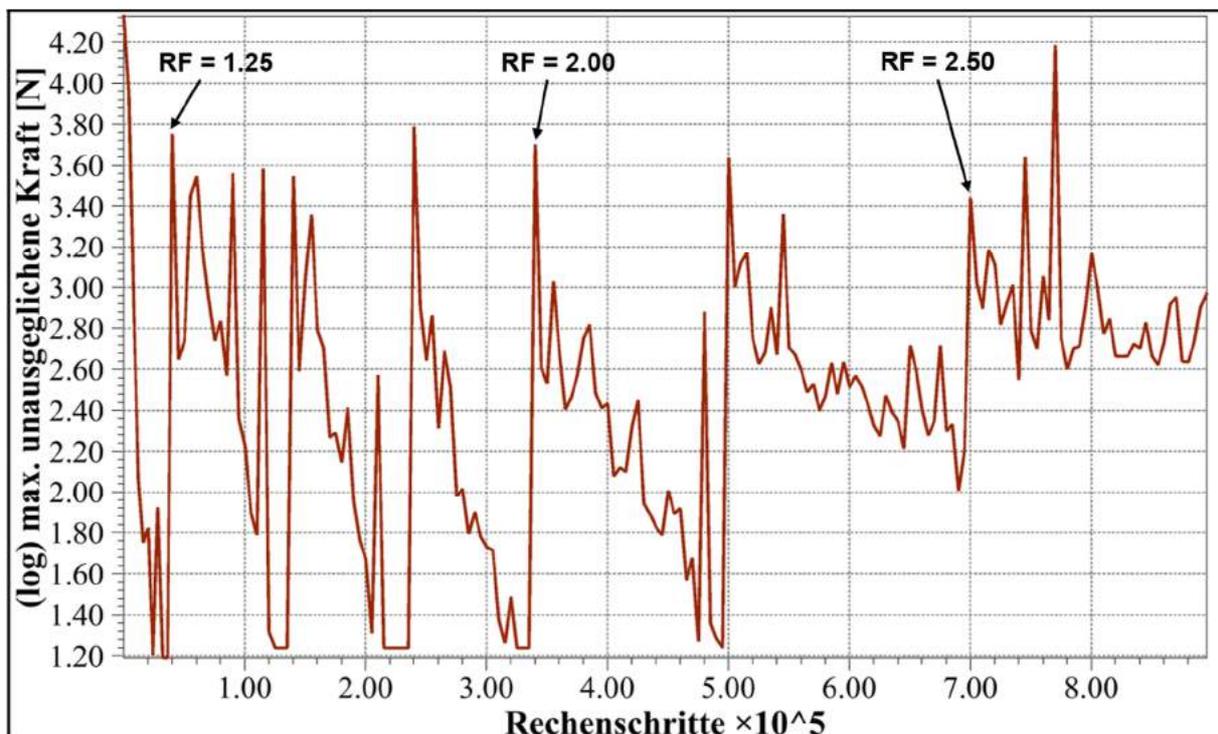


Abb. 5.5: Sz. 1 – max. unausgeglichene Kraft

Aus Abb. 5.6 wird deutlich, dass an den Kontrollpunkten bis 500 000 Schritte (Ende RF = 2.00) die Verschiebungen pro Reduktion eher gering ausfallen und im Verlauf der Rechnung einen konstanten Wert erreichen. Anschließend verlaufen die Kurven in einem anhaltenden erst

5 Numerische Berechnung

flachen (RF = 2.25) und dann steilen (RF = 2.50) Anstieg. Die Verschiebungswerte sind im Vergleich mit den ersten Reduktionsschritten um einiges höher, ebenso wie die Verschiebungsgeschwindigkeiten. Vor allem für die Reduktion um den Faktor 2.50 ist im Kurvenverlauf der Geschwindigkeiten deutlich zu erkennen, dass die Kontrollpunkte über den gesamten Rechenprozess in Bewegung bleiben. Es kommt zu keiner Absenkung der Geschwindigkeit auf null, sodass der stabile Zustand nicht erreicht werden kann. Der höchste Verschiebungswert nach 900 000 Schritten kann dem Konturbild entnommen werden und beträgt rund 0.77 Meter. Das entspricht etwa dem Kontrollpunkt P1 an der Felsspitze. Allgemein überwiegen die Verschiebungen im oberen vorderen Felsbereich, wo im Verlauf der Simulation die Blöcke durch eine Öffnung der Klüfte z. T. vom Felsmassiv abgelöst wurden. Die TF-Öffnung sowie der Verlust einiger Kontaktflächen zwischen den Sandsteinblöcken wird bereits nach 500 000 Schritten in Abb. 5.7 deutlich (vgl. mit GSZ in Abb. 5.3).

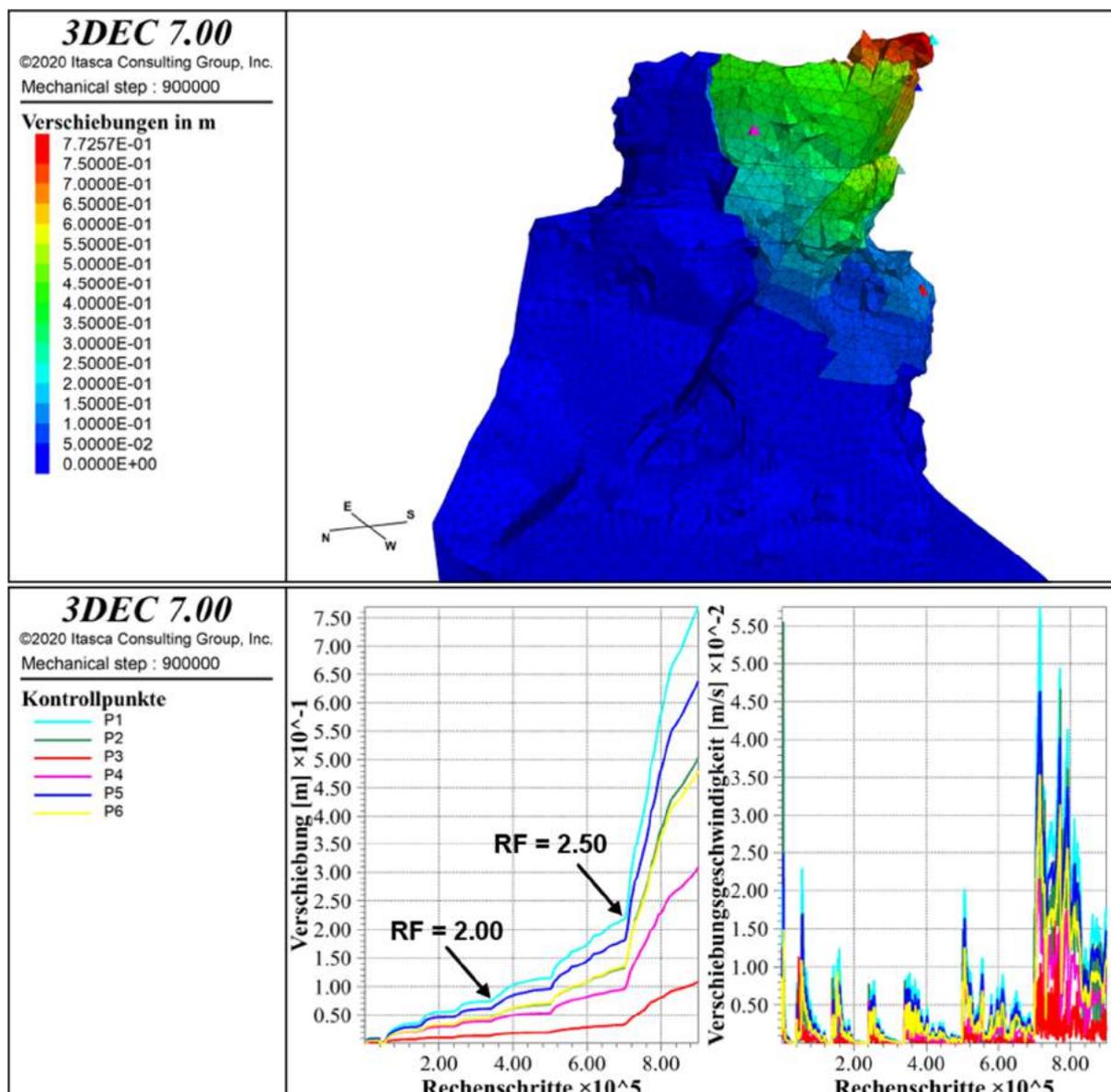


Abb. 5.6: Sz. 1 – Ergebnis der Reduktion bis RF 2.50 nach 900 000 Schritten

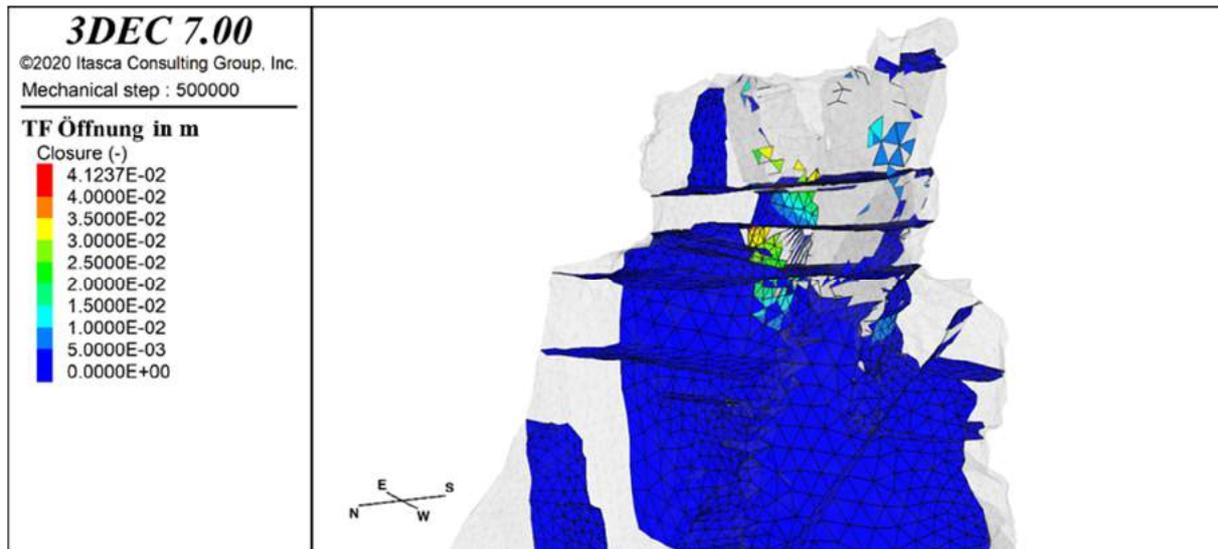


Abb. 5.7: Sz. 1 – TF-Öffnung nach 500 000 Schritten (RF 2)

Die maximale Öffnungsweite der Trennflächen beträgt etwas über 4 cm wie Abb. 5.7 zeigt. Die wirkenden Normal- und Scherkräfte verursachen eine Auflockerung des Materials und eine Verschiebung der Kontakte relativ zueinander. Es kann zu einer Öffnung der Trennflächen kommen, jedoch der Kontakt zwischen den Sandsteinblöcken weiterhin bestehen. Erst bei der Überschreitung der TF-Festigkeit gehen die Kontaktflächen der Blöcke verloren. Wie Abb. 5.7 verdeutlicht, haben sich nach der Reduktion um den Faktor 2 einige Klüfte bereits so weit geöffnet, dass zwischen den Blöcken kein Kontakt mehr besteht und die Trennflächen als Kontaktflächen verloren gegangen sind. Einen Vergleich der Verschiebungskonturen nach der Reduktion um den Faktor 2.00 und 2.50 liefert Abb. 5.8 und stellt das Ausmaß der TF-Öffnung in einigen Bereichen im Modell dar. Nach 500 000 Schritten (RF 2.00) sind mehrere Klüfte bereits leicht um wenige Zentimeter geöffnet. Nach 900 000 Schritten (RF 2.50) ist die Öffnung der Klüfte weiter fortgeschritten und fällt deutlich intensiver aus, sodass sich einige Blöcke im mittleren bis oberen Zentimeterbereich voneinander wegbewegt haben. Eine Auswahl an Konturbildern von verschiedenen Ansichten zu den Verschiebungen > 0.1 m am Ende der Verwitterungssimulation sind im Anhang B angefügt (Abb. V.2, Abb. V.3). Die Richtung und die Geschwindigkeit der Blockbewegung am Ende der Reduktion um den Faktor 2 (~ 56 s) kann der Abb. 5.9 entnommen werden. Je größer der Vektorpfeil, desto höher ist die Blockgeschwindigkeit. Besonders an der Felsspitze ist die Geschwindigkeit der Bewegung am höchsten, was sich auch am Ausmaß der Verschiebung widerspiegelt. Die maximale Verschiebung beträgt ca. 0.12 m nach 56 s vergangene Modellzeit und tritt im Bereich der Felsspitze auf. Die maximale Blockgeschwindigkeit liegt bei etwa 0.8 m/h am Ende des RF 2, wobei die Bewegung weg vom Felsmassiv und gravitativ bedingt nach unten erfolgt. Daraus ist zu vermuten, dass vor allem die Felsspitze von einem möglichen Felssturz betroffen ist. In Abb. 5.7 wird jedoch deutlich, dass ein Versagen hauptsächlich entlang der fast senkrechten Klüfte erfolgt. Die Schichtflächen bleiben intakt, d. h. die horizontalen Kontaktflächen der

Blöcke gehen nicht verloren. Ein Felsversagen ist somit wahrscheinlicher für die erweiterte Felsspitze. Aufgrund des Eigengewichts der Blöcke und der wirkenden Schwerkraft kann es entlang einer senkrechten Klufffläche zu einer Kippbewegung der oberen Felsblöcke im Bereich der Felswand kommen.

Für die Reduktion der Matrix- und Trennflächenfestigkeit wurde der letzte stabile Zustand für den RF 2 erreicht. Dabei ist Versagenszustand bereits stark ausgeprägt. Der maximale Standsicherheitsfaktor der Felsformation in diesem Verwitterungsvorgang liegt bei 2.00.

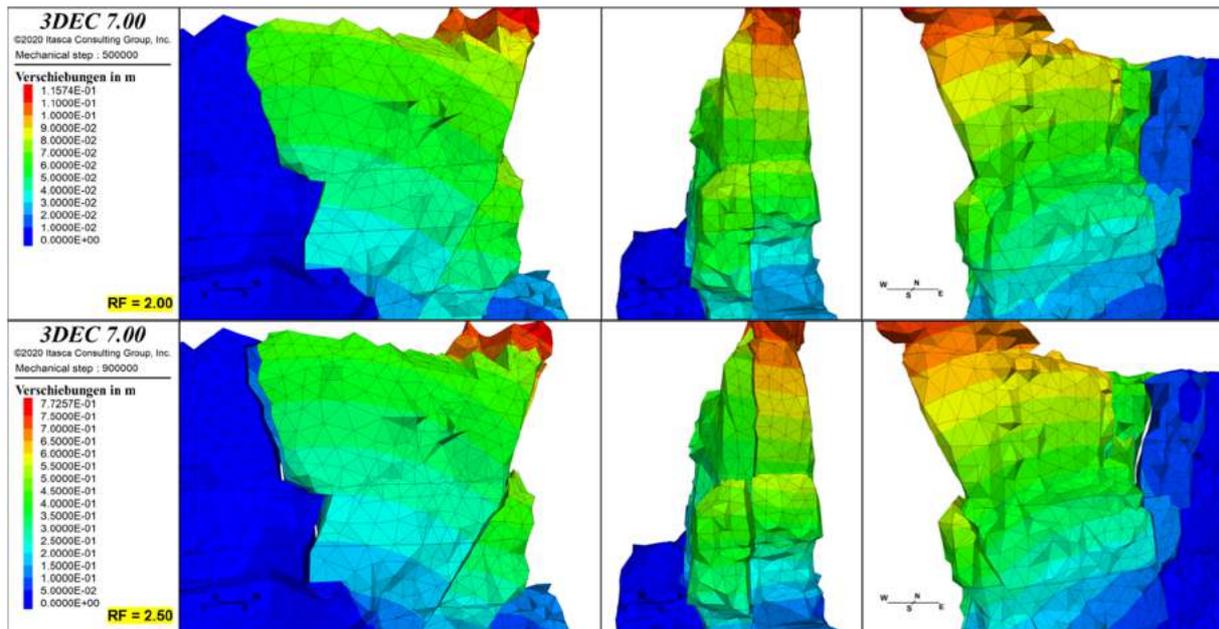


Abb. 5.8: Sz. 1 – Vergleich der TF-Öffnung von RF 2 und RF 2.5

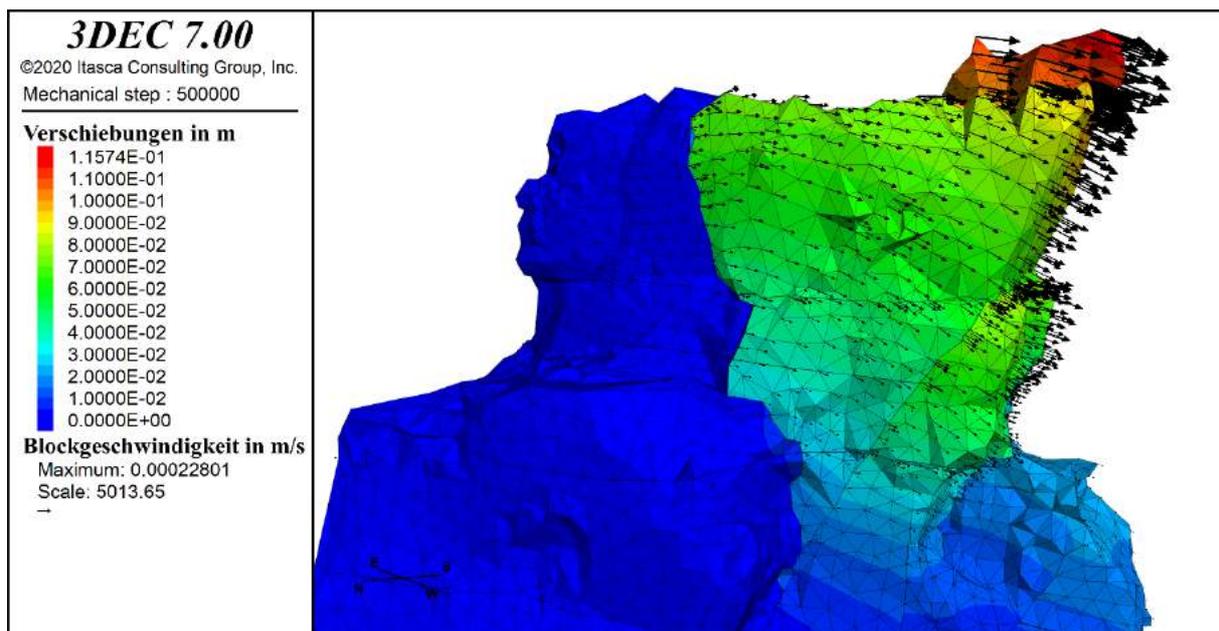


Abb. 5.9: Sz. 1 – Blockbewegung nach 500 000 Schritten (RF 2)

5.3.2 Matrix

Im Verwitterungsszenario 2 wird die c - ϕ - σ_t -Reduktion lediglich auf die Gesteinsmatrix angewandt und wieder für das trockene System ohne Porenwasserdrücke gerechnet. Die Kennwerte der Trennflächen bleiben über den gesamten Simulationsverlauf entsprechend dem Initialmodell (vgl. Tabelle 5.1) unverändert. Der Trennflächensatz der verstärkten Verwitterung ist gemäß der Gesteinsmatrix zu verringern. Die Erläuterung dazu ist in Kapitel 5.2 gegeben. Vom Grundspannungszustand ausgehend wurde die Sandsteinmatrix in 0.25er Schritten und beginnend mit dem Reduktionsfaktor 1.25 allmählich verringert. Die reduzierten Festigkeitswerte der Gesteinsmatrix sind im Anhang B Tabelle V.1 aufgeführt.

Der Verlauf der max. unausgeglichenen Kraft über den gesamten Reduktionsprozess ist in Abb. 5.10 dargestellt. Während der ersten Verringerungen kommt das Gesamtsystem nach kurzer Modellzeit (1.2-3.7 s) wieder in den Gleichgewichtszustand, was anhand der Absenkung der unausgeglichenen Kraft auf minimale Werte gegen null zu erkennen ist. Dazu sind ab dem Reduktionsfaktor 1.25 jeweils 10 000 Schritte, ab RF 2.25 je 20 000 Schritte und ab RF 4.25 je 30 000 Schritte notwendig. Bei der Reduktion um den Faktor 5 erreicht das Gesamtsystem erst nach 7.8 s (60 000 Rechenschritte) den stabilen Zustand. Darüber hinaus bleibt die maximale unausgeglichenen Kraft bei weiteren Reduktionsschritten selbst nach 9.7 s (80 000 Rechenschritte) hoch, sodass keine signifikante Absenkung gegen null erfolgt. Jedoch weist die Verlaufskurve der Reduktion um den Faktor 5.25 einen langsam abfallenden Gradienten auf. Ein Erreichen des Gleichgewichtszustands nach weiteren Sekunden Modellierung ist somit nicht ausgeschlossen. Hingegen verläuft der Kurvengradient der nächstgrößeren Reduktion um den Faktor 5.50 überwiegend flach und durchweg im Bereich hoher Werte der max. unausgeglichenen Kraft. Es kann von einem andauernden instabilen Zustand ausgegangen werden. Aus diesem Grund wurden die numerischen Berechnungen nach insgesamt 550 000 Schritten (62 s) beendet. Die höchste simulierte Verringerungsstufe der Matrixparameter beträgt somit RF = 5.50 bei der Beendigung des Reduktionsvorganges. Für die gesamte Simulation liegt der Rechenaufwand bei weniger als einen halben Tag. Wie bereits erwähnt sind für die anfänglichen Reduktionen der Matrixparameter lediglich eine geringe Anzahl an Rechenschritten notwendig, um erneut den Gleichgewichtszustand zu erreichen. Die jeweilige Reduktion beeinflusst das Gesamtsystem somit nur kurzzeitig und in eher geringem Maße. Bei ausnahmslos jedem Reduktionsschritt wird das Gesamtsystem erst abrupt aus dem stabilen Zustand gebracht, was im Verlaufsdiagramm durch den steilen Anstieg der Kurve deutlich wird. Anschließend zeigt bis einschließlich RF 3.75 der ebenso steil abfallende Gradient der Absenkungskurve, dass eine schnelle Rückkehr des Gesamtsystems ins Gleichgewicht erfolgt. Von RF 4 bis RF 5 ist der Absenkungsgradient immer noch recht steil, jedoch ist die Verlaufskurve nun sichtbar ungleichmäßiger und pendelt sich über kleinere Minima und Maxima auf ein generelles Minimum der unausgeglichenen Kraft ein.

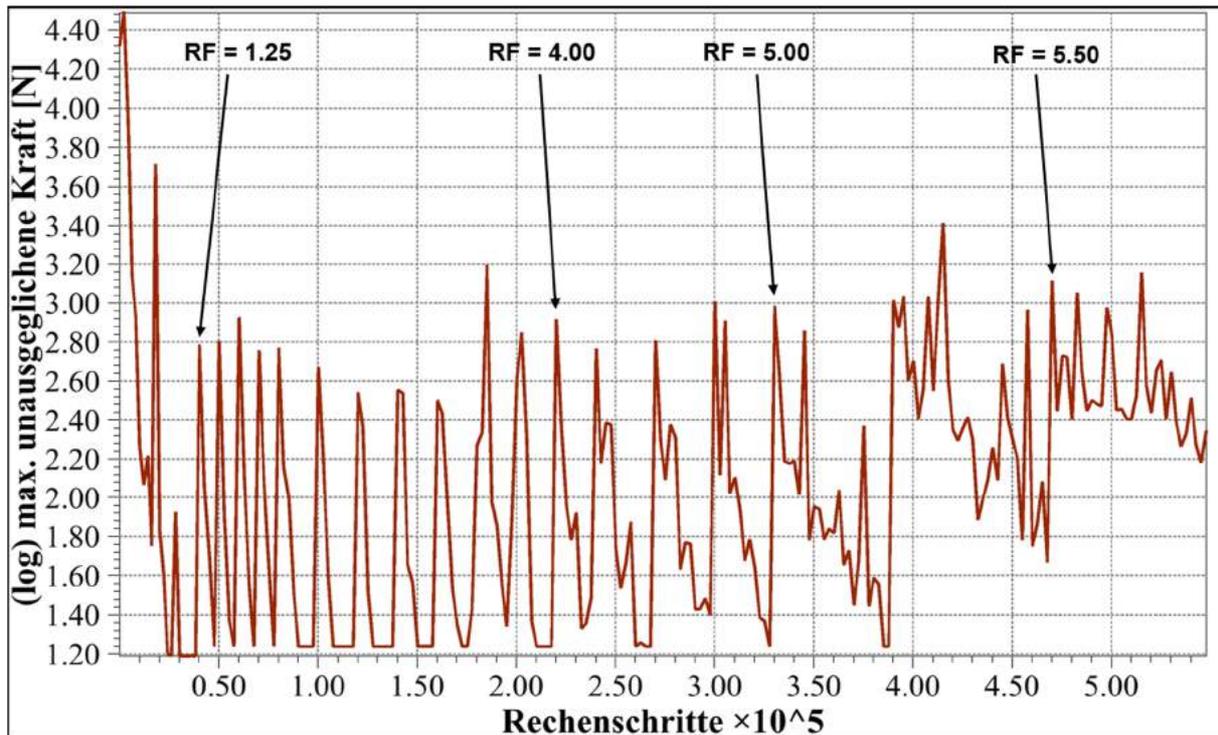


Abb. 5.10: Sz. 2 – max. unausgeglichene Kraft

In Abb. 5.11 sind die Verschiebungen im Konturbild sowie die Verlaufsdiagramme von Verschiebung und Verschiebungsgeschwindigkeit an den Kontrollpunkten am Ende des Reduktionsprozesses nach 550 000 Rechenschritten (RF 5.50) dargestellt. Aus dem Verschiebungsdiagramm wird deutlich, dass je Reduktionsschritt bis einschließlich RF 5 (Start bei 330 000 Schritten) konstante Werte < 4 cm erreicht werden. Bei den letzten beiden Reduktionsfaktoren, RF 5.25 (Start bei 390 000 Schritten) und RF 5.50 (Start bei 470 000 Schritten), verlaufen die Anstiege der Kurven deutlich steiler und überwiegend ohne signifikante Abflachung auf konstante Werte. Vor allem anhand der Kontrollpunkte P1, P2, P5 und P6 ist gut zu erkennen, dass der vordere obere Felsbereich in Bewegung bleibt (vgl. Abb. 5.1). An dieser Stelle sind die Verschiebungswerte nach RF 5.50 im Vergleich zu der vorhergehenden Reduktion um mehr als das doppelte angestiegen. Bei Beendigung des gesamten Simulationsvorgangs beträgt die maximale Verschiebung > 18 cm wie dem Konturbild entnommen werden kann. Die größten Verschiebungswerte treten an der Felsspitze auf. Der untere Felsbereich (vgl. P3) sowie der hintere (vgl. P4) unterliegen hingegen einer geringen Verschiebung < 2 cm nach 62 s vergangener Modellzeit und erreichen im Verlauf jedes Reduktionsschrittes einen konstanten Wert. Dies sowie die anhaltende Bewegung einiger Felsbereiche wird durch den Kurvenverlauf der Verschiebungsgeschwindigkeiten bestätigt. Für die letzten beiden Verringerungsschritte ist, außer für P3 und P4, kein Abfallen der Geschwindigkeiten auf null zu erkennen. Das Gesamtsystem bleibt daher in einem instabilen Zustand. Die Geschwindigkeit an den Kontrollpunkten erreicht bei der Reduktion um den Faktor 5.50 Höchstwerte im Vergleich zu den vorangehenden Reduktionsschritten.

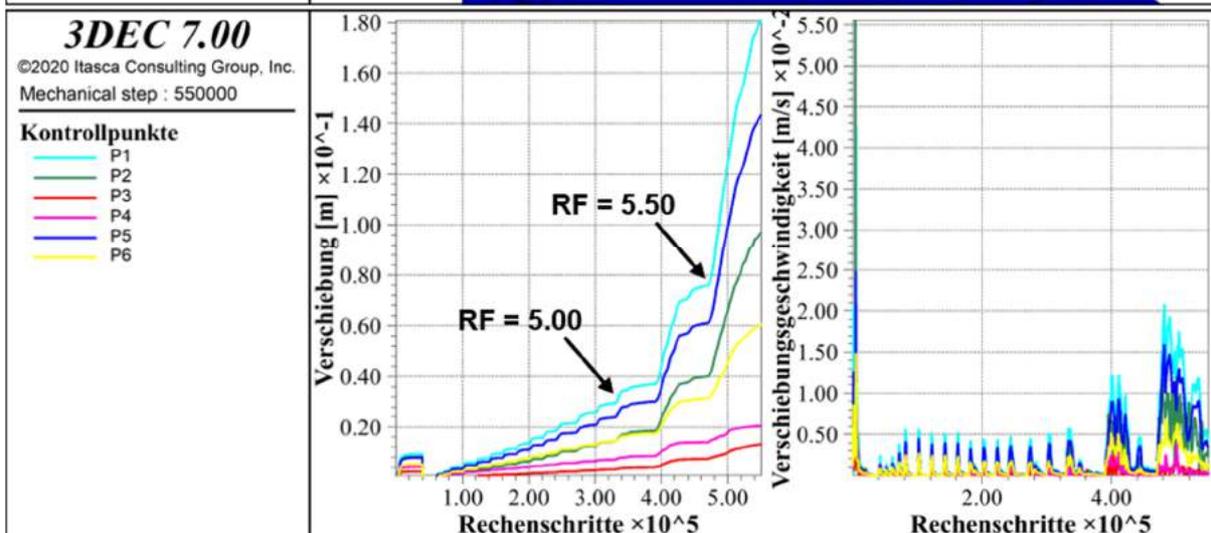
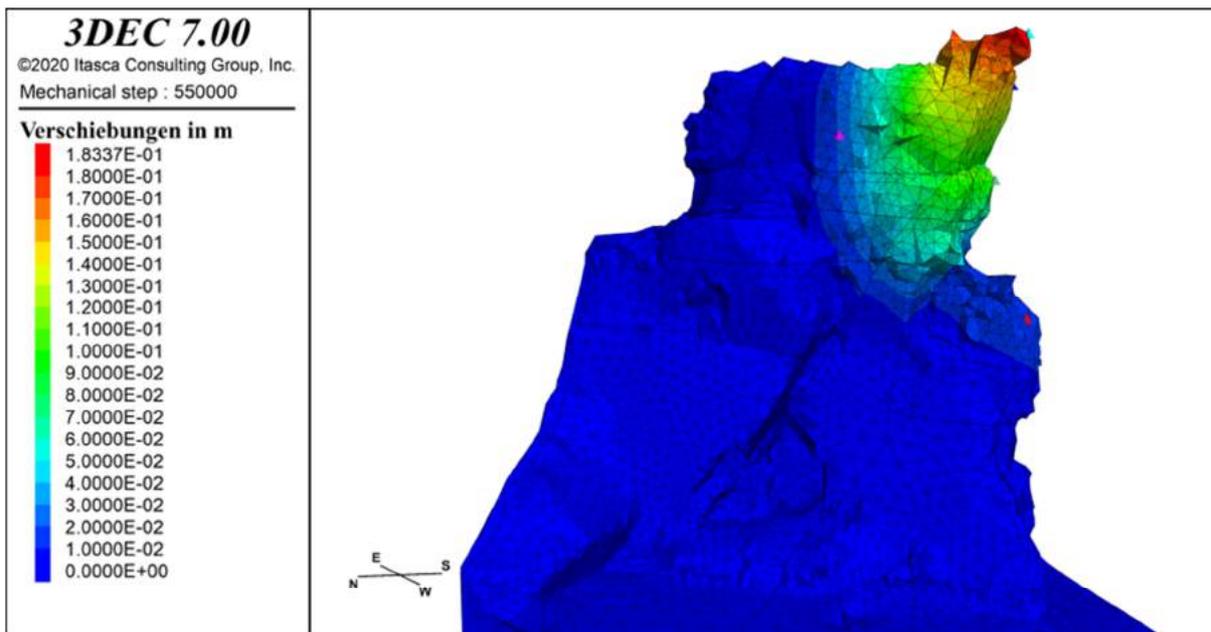


Abb. 5.11: Sz. 2 – Ergebnis der Reduktion bis RF 5.50 nach 550 000 Schritten

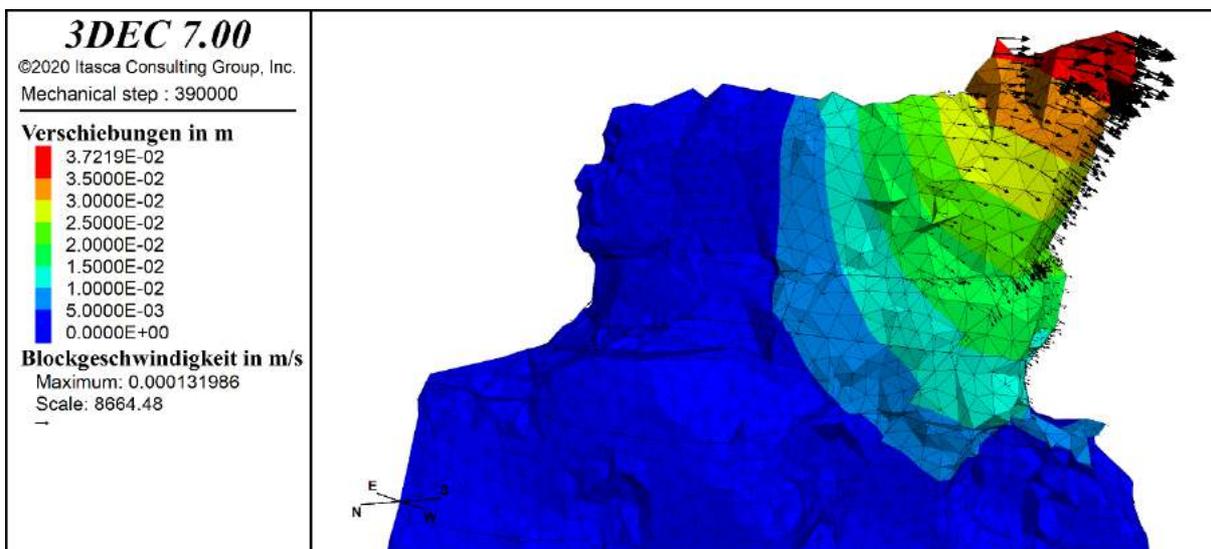


Abb. 5.12: Sz. 2 – Blockbewegung nach 390 000 Schritten (RF 5)

Das Konturbild der Verschiebungen nach 43 s (390 000 Schritte) liefert Abb. 5.12 und verdeutlicht die Bewegungsrichtung sowie Geschwindigkeit der Blöcke durch Vektorpfeile. Am Ende der Reduktion um den Faktor 5 unterliegt besonders die Felsspitze einer Bewegung und weist die größten Bewegungsgeschwindigkeiten auf, erkennbar an der Stärke der Vektorpfeile. Mit rund 4 cm tritt der höchste Verschiebungswert an der Felsspitze (vgl. Kontrollpunkt P1) auf. Die Bewegung erfolgt nach vorn in Richtung Südwesten und gravitativ bedingt nach unten.

Wie Abb. 5.13 zeigt, ist das Ausmaß der Trennflächenöffnung bei einer Reduktion der Matrixparameter sehr gering. Im Verlauf des Simulationszyklus liegt die TF-Öffnung überwiegend bei null oder im unteren mm-Bereich. Somit ist der größte Teil der Trennflächen am Ende der Reduktion um den Faktor 5.50 noch vollständig intakt, sodass die Kontakte zwischen den Blöcken weiterhin bestehen. Die maximale Öffnungsweite der TF beträgt ca. 2.5 cm. Ein paar wenige Klüfte an der westlichen Felswand haben sich so weit geöffnet, dass der Kontakt zwischen den Blöcken verloren gegangen ist. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 5.13 in der NW-Ansicht dargestellt. Aus der Betrachtung der TF-Öffnung kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Ursprung der Blockbewegung nicht in dem Versagen der TF liegt. Vielmehr kommt es aufgrund der plastischen Verformung der Gesteinsmatrix durch die Parameterreduktion zu einer Verschiebung von Felsmaterial.

Angesichts des enormen Anstiegs der Verschiebungen und der fehlenden Rückkehr in den Gleichgewichtszustand bei Verringerung der Matrixfestigkeit um den Faktor 5.25, wird in diesem Verwitterungsvorgang der maximale Standsicherheitsfaktor bei 5.00 erreicht.

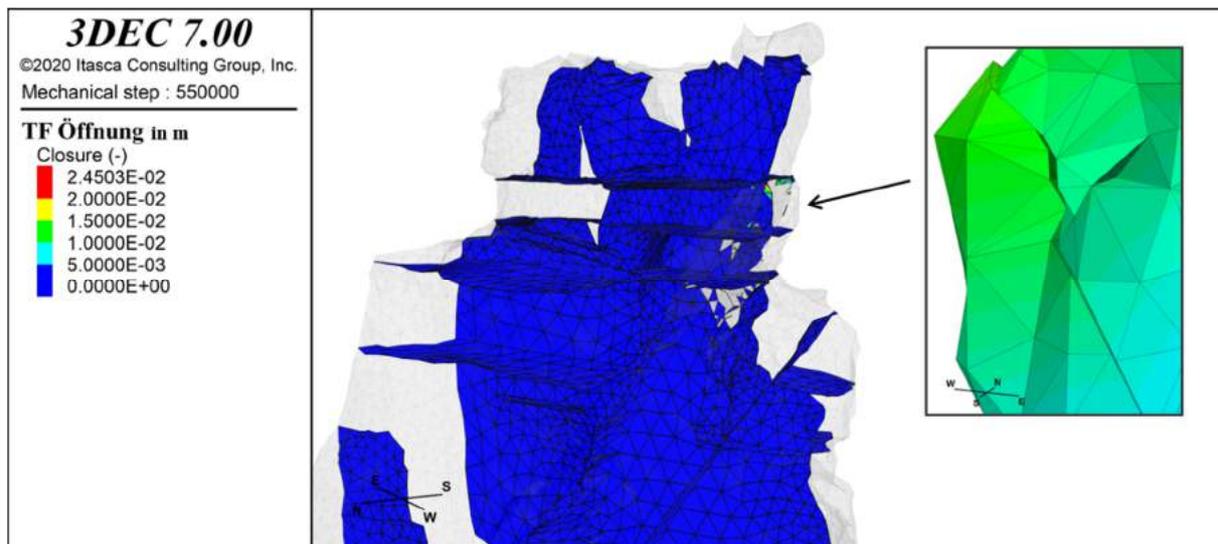


Abb. 5.13: Sz. 2 – TF-Öffnung nach 550 000 Schritten (RF 5.50)

5.3.3 Trennflächen

Das Verwitterungsszenario 3 beinhaltet die c - ϕ - σ_t -Reduktion der Trennflächenparameter für das trockene Gesamtsystem ohne Porenwasserdrücke. Die Materialkennwerte der Sandsteinmatrix, einschließlich dem Trennflächensatz der verstärkten Verwitterung, werden entsprechend dem Grundspannungszustand (vgl. Tabelle 2.1) unverändert beibehalten. Ausgangspunkt für die numerischen Berechnungen ist das finale Initialmodell. Es wurde bei dem Reduktionsfaktor 1.25 begonnen und anschließend in 0.25er Schritten weiter reduziert bis das Gesamtsystem den Gleichgewichtszustand nicht wieder erreicht. Die reduzierten Festigkeitswerte der Trennflächen sind im Anhang B Tabelle V.1 gelistet.

Im Vergleich mit der c - ϕ - σ_t -Reduktion der Gesteinsmatrix aus Kapitel 5.3.2 ist pro Reduktion der TF-Parameter weitaus mehr modellierte Zeit (rund 12-22 s) notwendig, um den stabilen Zustand wieder zu erreichen. Der Rechenaufwand liegt insgesamt bei mehr als einem Tag. Abb. 5.14 zeigt das Verlaufdiagramm der maximal unausgeglichenen Kraft über den gesamten Simulationsprozess von Verwitterungsszenario 3. Ausgehend vom Grundspannungszustand kommt es mit jeder Reduzierung der Festigkeitswerte zu einem abrupten Anstieg im Kurvenverlauf. Anschließend pendelt sich die Kurve über einen unregelmäßigen Verlauf mit einigen kleineren Minima und Maxima wieder auf minimale Werte ein. Dazu wurden für RF 1.25 und RF 1.50 ca. 12 s (100 000 Schritte), für RF 1.75 und RF 2.00 ca. 16 s (130 000 Schritte) und ab RF 2.25 ca. 18 s (150 000 Schritte) gerechnet. Bis einschließlich der Reduktion um den Faktor 3 ist der Gradient der Verlaufskurve überwiegend steil abfallend. Die Absenkung der max. unausgeglichenen Kraft auf minimale Werte lässt auf eine Rückkehr des Gesamtsystems in den Gleichgewichtszustand schließen. Weitere Reduktionen erzielten auch nach 22 s (180 000 Schritte) anhaltend hohe Werte der unausgeglichenen Kraft mit einem deutlich flachen Absenkungsgradienten. Folglich bleibt das Gesamtsystem in einem instabilen Zustand. Der Simulationsvorgang wurde daher am Ende der Reduktion um den Faktor 3.50 nach insgesamt 173 s (1 460 000 Rechenschritte) beendet.

Der im Allgemeinen unruhige Kurvenverlauf der max. unausgeglichenen Kraft während des Reduktionsvorgangs deutet darauf hin, dass einige Veränderungen im Gesamtsystem stattgefunden haben. In Abb. 5.15 sind die Verschiebungen im Konturbild sowie die Verlaufdiagramme von Verschiebung und Verschiebungsgeschwindigkeit an den Überwachungspunkten am Ende des gesamten Simulationsprozesses dargestellt. Aus den Verlaufdiagrammen ist zu erkennen, dass bis zur Reduktion um den Faktor 3 am Ende jedes Rechenvorgangs an den Kontrollpunkten konstante Werte der Verschiebungen und damit Verschiebungsgeschwindigkeiten gegen null vorliegen. Es kann von einem Erreichen des stabilen Zustands ausgegangen werden. Diese Annahme wird bestätigt durch die Absenkung der max. unausgeglichenen Kraft auf minimale Werte (vgl. Abb. 5.14). Bei RF 3.25 und

RF 3.50 ist am Ende des jeweiligen Rechenvorgangs die überwiegende Anzahl der Kontrollpunkte noch immer in Bewegung, sodass kein Gleichgewichtszustand bestehen kann. Die Verschiebungsgeschwindigkeiten liegen über Null und der Kurvenverlauf der Verschiebung ist weiter ansteigend. Einzig für den unteren (vgl. P3) sowie den hinteren Felsbereich (vgl. P4) werden auch am Ende von RF 3.25 konstante Werte der Verschiebung erreicht. Weiterhin weisen diese Bereiche insgesamt die geringsten Verschiebungen auf. Somit unterliegt bei der Reduktion der TF-Parameter besonders der erweiterte Bereich der Felsspitze einer Bewegung, wie anhand der Kontrollpunkte sowie dem Konturbild der Verschiebungen entnommen werden kann. Die maximale Verschiebung nach 1 460 000 Schritten (Ende RF 3.50) beträgt > 0.3 m und tritt an der Felsspitze (vgl. P1) auf.

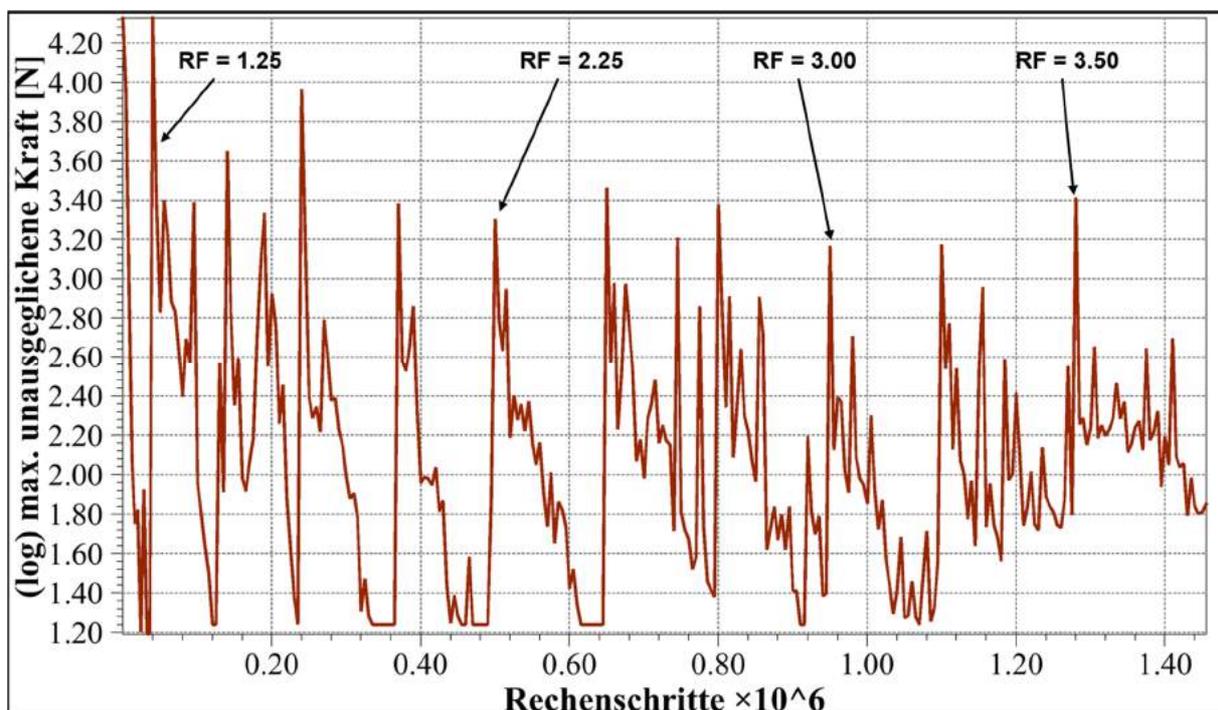


Abb. 5.14: Sz. 3 – max. unausgeglichene Kraft

Generell steht das Ausmaß der Verschiebung in Korrelation mit dem Ausmaß der TF-Öffnung. Bereits am Ende der Reduktion um den Faktor 2 liegen einige Blöcke teilweise vom Felsmassiv gelöst vor, da sich die TF um mehrere Zentimeter geöffnet haben. Die TF-Öffnung nach 56 s (RF 2) und 129 s (RF 3) vergangener Modellzeit ist in Abb. 5.16 dargestellt. Der maximale Öffnungswert ohne den Verlust der Kontaktfläche beträgt > 2.8 cm. Im Bereich zwischen Felsspitze und oberster horizontaler Schichtfläche sind für den überwiegenden Anteil der Klüfte die Kontaktflächen der Blöcke vollständig verloren gegangen. Weitere Bereiche an der vorderen Felswand im Westen sind davon ebenfalls betroffen. Der Verlust der Kontaktflächen betrifft ausschließlich die Klüfte. Die Schichtflächen weisen durchweg keine Öffnungen bzw. lediglich welche im mm-Bereich auf. Einige Kluftöffnungen werden in Abb. 5.17 für den RF 3 in einer detaillierten Ansicht aufgezeigt.

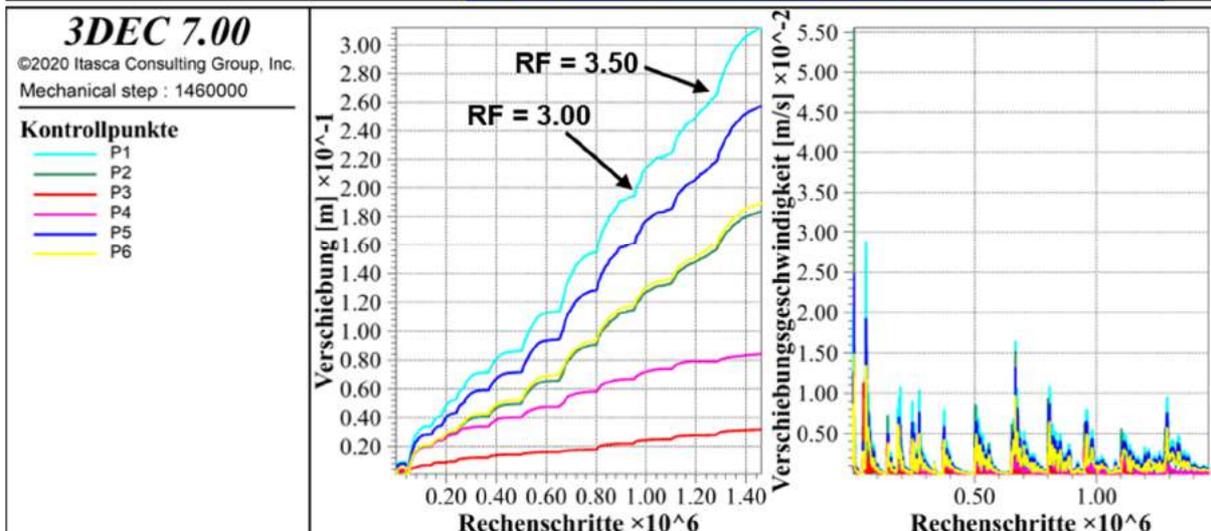
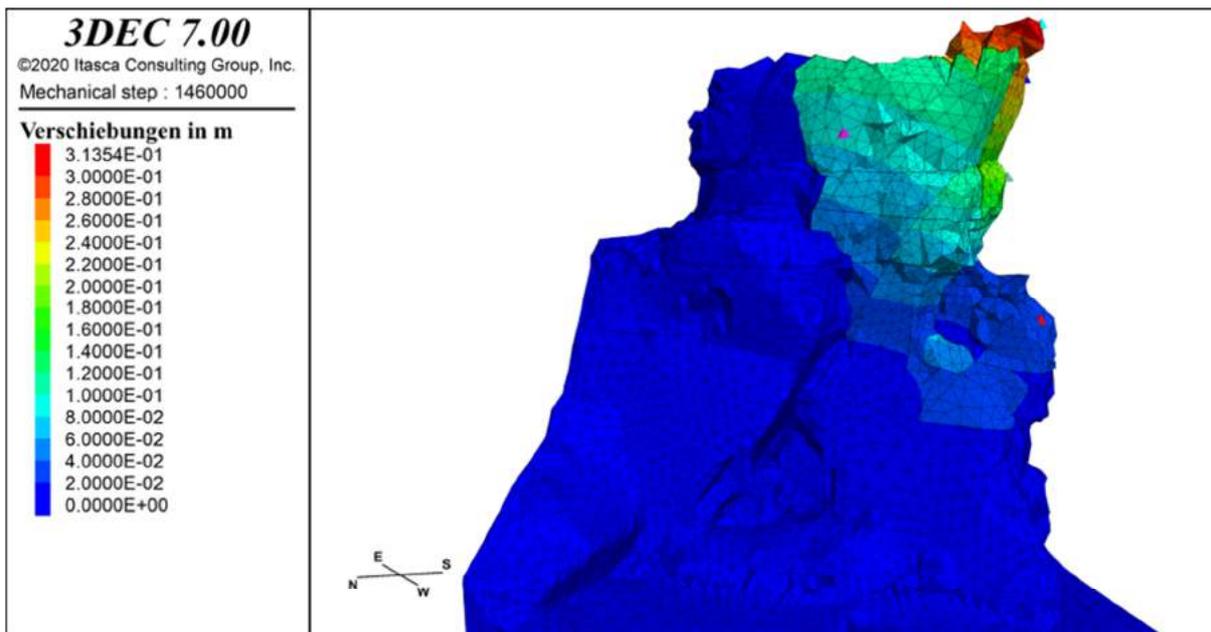


Abb. 5.15: Sz. 3 – Ergebnis der Reduktion bis RF 3.50 nach 1 460 000 Schritten

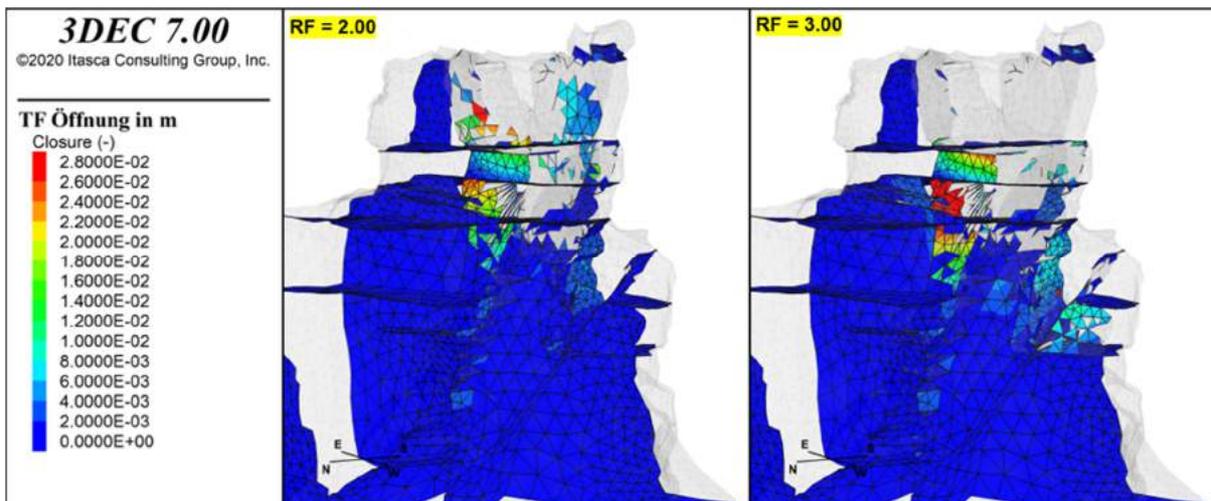


Abb. 5.16: Sz. 3 – TF-Öffnung nach dem RF 2 und dem RF 3

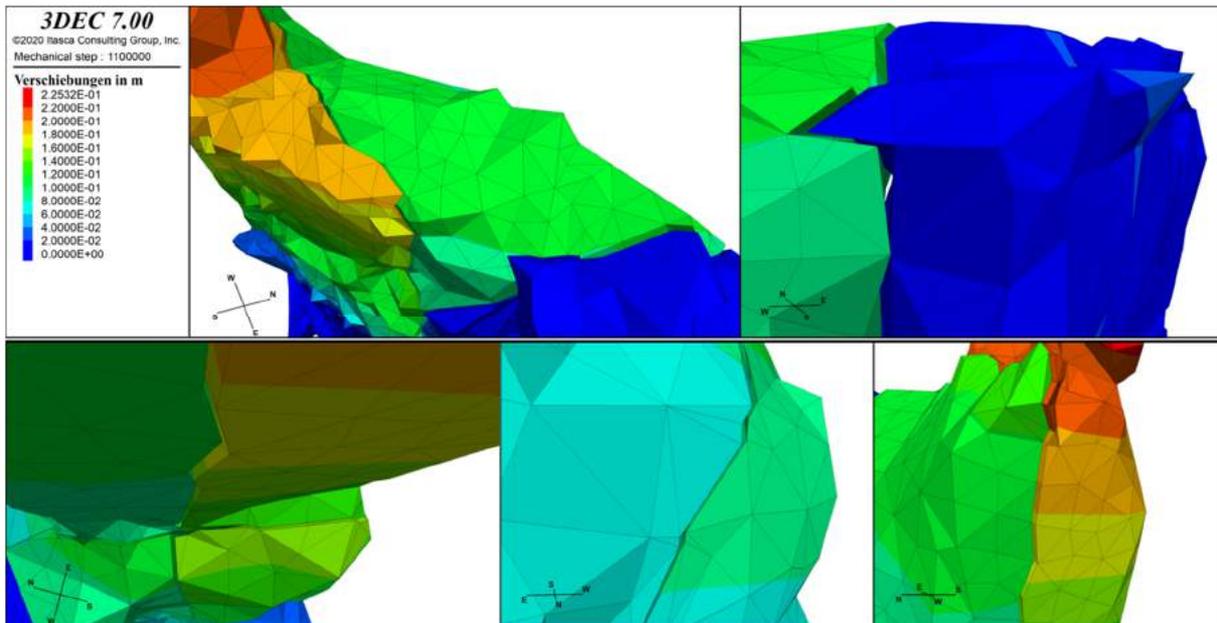


Abb. 5.17: Sz. 3 – TF-Öffnung im Konturbild der Verschiebungen für RF 3

Abb. 5.17 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen geöffneten TF und dem Ausmaß der Verschiebung. Es sind die Bereiche mit den auffälligsten Klüftöffnungen dargestellt, welche sich vor allem im obersten Felsbereich sowie an der westseitigen Felswand befinden (vgl. Abb. 5.16). Mit der Öffnung von Klüften haben sich die Blöcke voneinander entfernt, sodass der Verschiebungswert gestiegen ist. Die Blockbewegung erfolgt weg vom Felsmassiv in Richtung Südwesten und gravitativ bedingt nach unten, wie anhand der Vektorpfeile der Blockgeschwindigkeit aus Abb. 5.18 entnommen werden kann. Weiterhin zeigt die Abbildung, dass am Ende der Reduktion um den Faktor 3 besonders die südseitige vordere Felswand einer Bewegung unterliegt und daher auch die höchsten Blockgeschwindigkeiten sowie die größten Verschiebungswerte von bis zu > 0.2 m an der Felsspitze aufweist.

Da am Ende der Reduktion um den Faktor 3 der letzte stabile Zustand vorliegt, wird für diesen Verwitterungsvorgang ein max. Standsicherheitsfaktor von 3.00 erreicht. Im ungünstigsten Fall liegt der SF bei 2.00, weil an dieser Stelle das Versagen der TF bereits stark ausgeprägt ist.

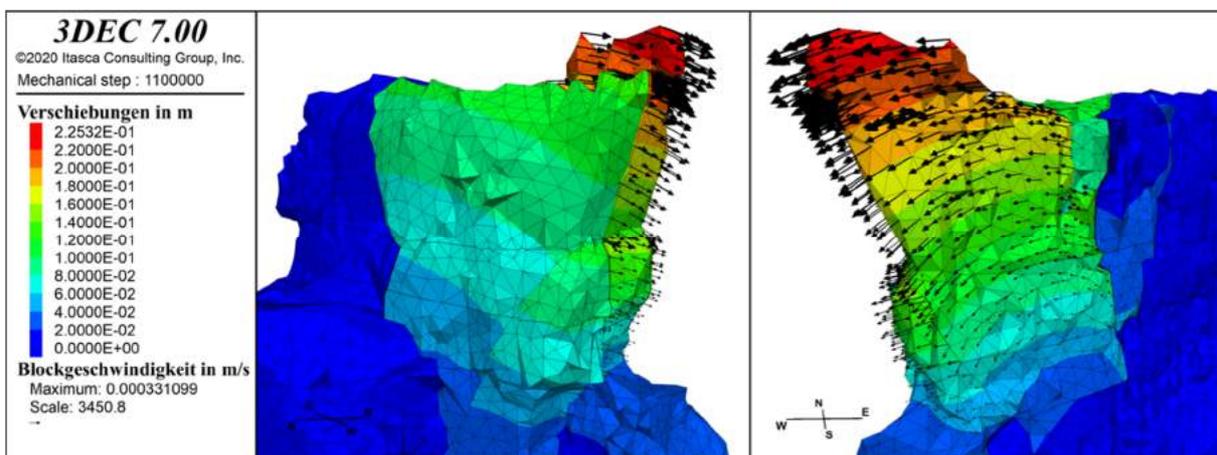


Abb. 5.18: Sz. 3 – Blockbewegung nach 1 100 000 Schritten (RF 3)

5.4 Spezielle Verwitterungsszenarien

5.4.1 Verwitterung unterhalb der Felsspitze sowie ausgewählter TF

Aufgrund der exponierten Lage gilt die Felsspitze als besonders gefährdeter Bereich für einen möglichen Felsabbruch. Dessen Aufstandsfläche ist gering und bereits stark herausgewittert, wie anhand der Geländeaufnahmen zu erkennen ist (vgl. Abb. 4.6). Damit eine intensive Verwitterung unterhalb der Felsspitze simuliert werden kann, wurden bei der Generierung des 3D-Modells zusätzliche Trennflächen festgelegt, welche in Abb. 4.7 dargestellt sind. Dadurch erfolgte die Herausarbeitung von drei kleineren Blöcken mit geringem Blockvolumina von 0.05 m^3 , 0.08 m^3 und 0.14 m^3 . Die Lage der Verwitterungsblöcke sowie deren Größe ist in Abb. 5.19 verdeutlicht.

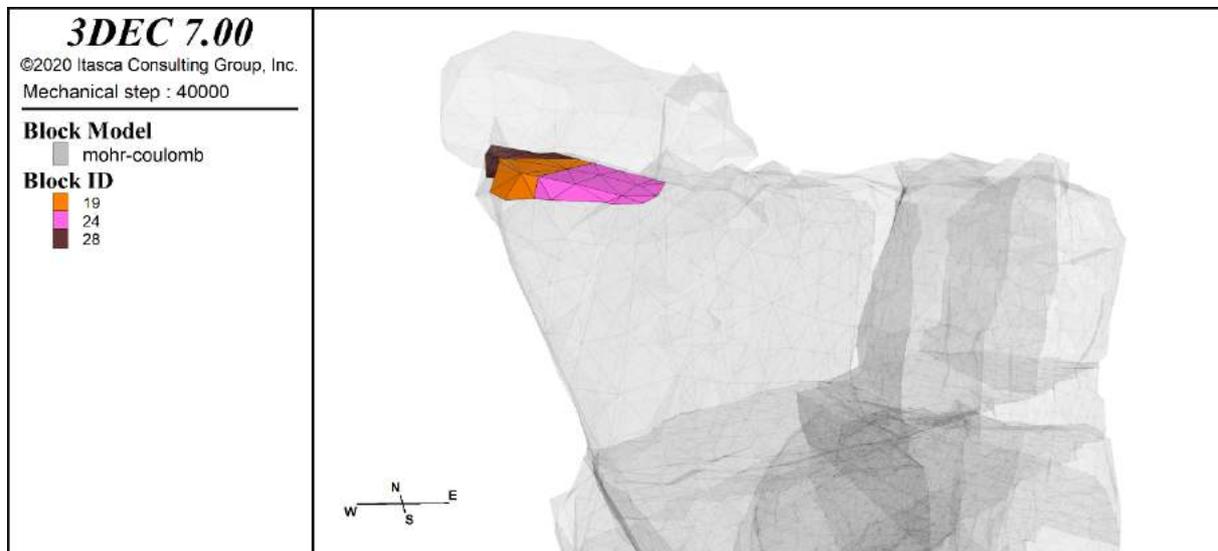


Abb. 5.19: Sz. 4 – Blöcke der verstärkten Verwitterung

Im Verwitterungsszenario 4 wird die c - ϕ - σ_t -Reduktion der Trennflächen ausschließlich innerhalb besonders gefährdeter Felsabschnitte bei zeitgleich verstärkter Verwitterung unterhalb der Felsspitze für das trockene Gesamtsystem ohne Porenwasserdrücke simuliert. Dazu wurden in 3DEC, ausgehend vom finalen Initialmodell, als erstes die drei Verwitterungsblöcke gelöscht, um ein bereits intensives Herauswittern an Felsmaterial unterhalb der Felsspitze zu erhalten. Anschließend wurden die Festigkeitsparameter der Trennflächen für die festgelegten Felsbereiche schrittweise reduziert bis das Gesamtsystem in einen dauerhaft instabilen Zustand gelangt. Für die restlichen TF sowie die Gesteinsmatrix blieben die Festigkeitsparameter entsprechend dem Grundspannungszustand über den gesamten Simulationsprozess unverändert. Die Reduzierung erfolgte beginnend bei RF 1.25 in 0.25er Schritten. Im Anhang B Tabelle V.1 sind die reduzierten Festigkeitswerte aufgeführt. Die reduzierten TF-Abschnitte wurden entsprechend der Felsbereiche ausgewählt, von denen aus eine mögliche Gefährdung durch Abbrüche angenommen wird. Dazu zählen Überhänge,

hervorstehende Felsbereiche und stark geklüftete Bereiche. Die Westseite des Felsen weist solche Risikoabschnitte auf. Die Auswahl der reduzierten TF ist in Abb. 5.20 verdeutlicht. Auffällig ist, dass sich nach der Initialisierung bereits für einige Klüftflächen der westseitigen Felswand ein schwach ausgeprägter Versagenszustand abzeichnet. Dies bekräftigt die Annahme, dass es sich dabei um einen absturzgefährdeten Felsbereich handeln könnte. Der unterste Bereich an der nordseitigen Felswand wurde aufgrund der erheblichen Klüftung und somit wegen dem Vorliegen von mehreren kleinen Blöcken zur Betrachtung hinzugenommen.

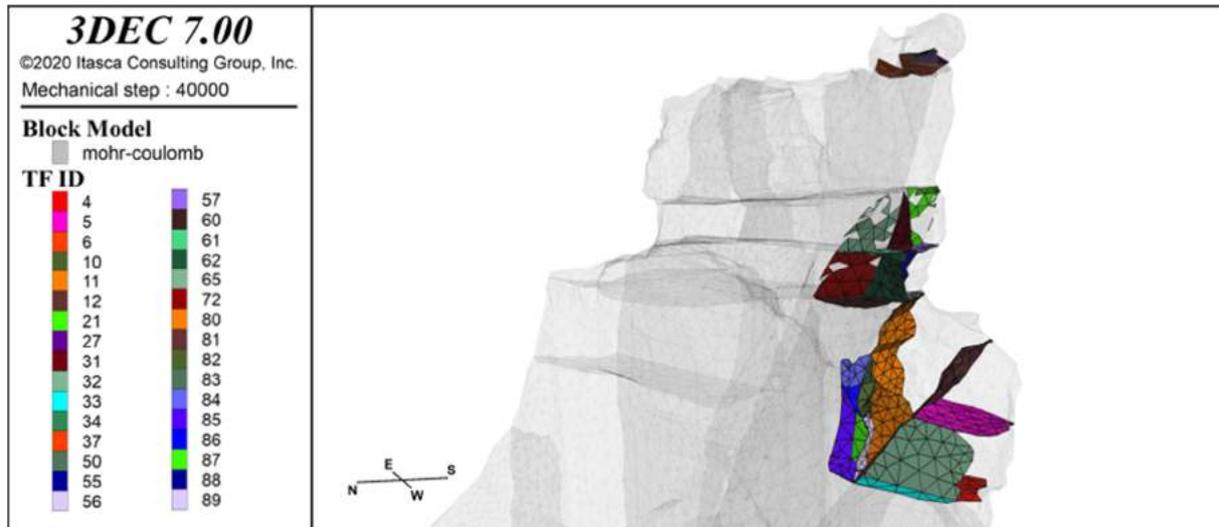


Abb. 5.20: Sz. 4 – reduzierte TF-Abschnitte

Der gesamte Reduktionsprozess ist in Abb. 5.21 als Verlauf der max. unausgeglichene Kraft dargestellt. Abb. 5.22 liefert das Konturbild der Verschiebungen am Ende der Simulation sowie die Verlaufsdiagramme der Verschiebung und Verschiebungsgeschwindigkeit an den Überwachungspunkten (vgl. Abb. 5.1). Die Verlaufskurven von P2 bis P6 sind in Abb. 5.23 genauer abgebildet. In den Diagrammen ist jede Reduktion der Festigkeitsparameter am unmittelbaren Anstieg der Verlaufskurven zu erkennen, wenn das Gesamtsystem aus dem stabilen Zustand gebracht wird. Anschließend erfolgt pro Reduktionsschritt in ~ 5 s (40 000 Schritte) eine Rückkehr ins Gleichgewicht, wie anhand der zügigen Absenkung der unausgeglichene Kraft auf minimale Werte zu erkennen ist. Der Absenkungsgradient verläuft dabei sehr steil. Weiterhin fällt die Verschiebungsgeschwindigkeit an jedem Kontrollpunkt auf Werte gegen null und die Verschiebungen pendeln sich auf ein konstantes Niveau ein, was in den Diagrammen bis 400 000 Schritte (Ende RF 3.25) deutlich und ab RF 3.5 nur angedeutet zu sehen ist. Ab RF 5 wurden insgesamt 7.2 s (60 000 Schritte) gerechnet, um den Gleichgewichtszustand zu erreichen. Eine weitere Reduktion um den Faktor 5.25 versetzt das Gesamtsystem in einen anhaltend instabilen Zustand, sodass die unausgeglichene Kraft auf hohen Werten verbleibt. Die Verschiebungsgeschwindigkeiten liegen weiterhin bei Werten deutlich über Null, d. h. die Verschiebungen dauern an und sind in einigen Bereichen (vgl. P2, P3) enorm gestiegen im Vergleich zu vorangegangenen Reduktionen. Da außerdem der

Absenkungsgradient der unausgeglichene Kraft von RF 5.25 wesentlich flacher verläuft als für vorherige Reduktionen und auf hohen Werten verbleibt, ist eine schnelle Rückkehr in den stabilen Zustand unwahrscheinlich. Aus diesen Gründen wurden die Berechnungen nach insgesamt 760 000 Rechenschritten (91.2 s) mit der Reduktion um den Faktor 5.25 beendet.

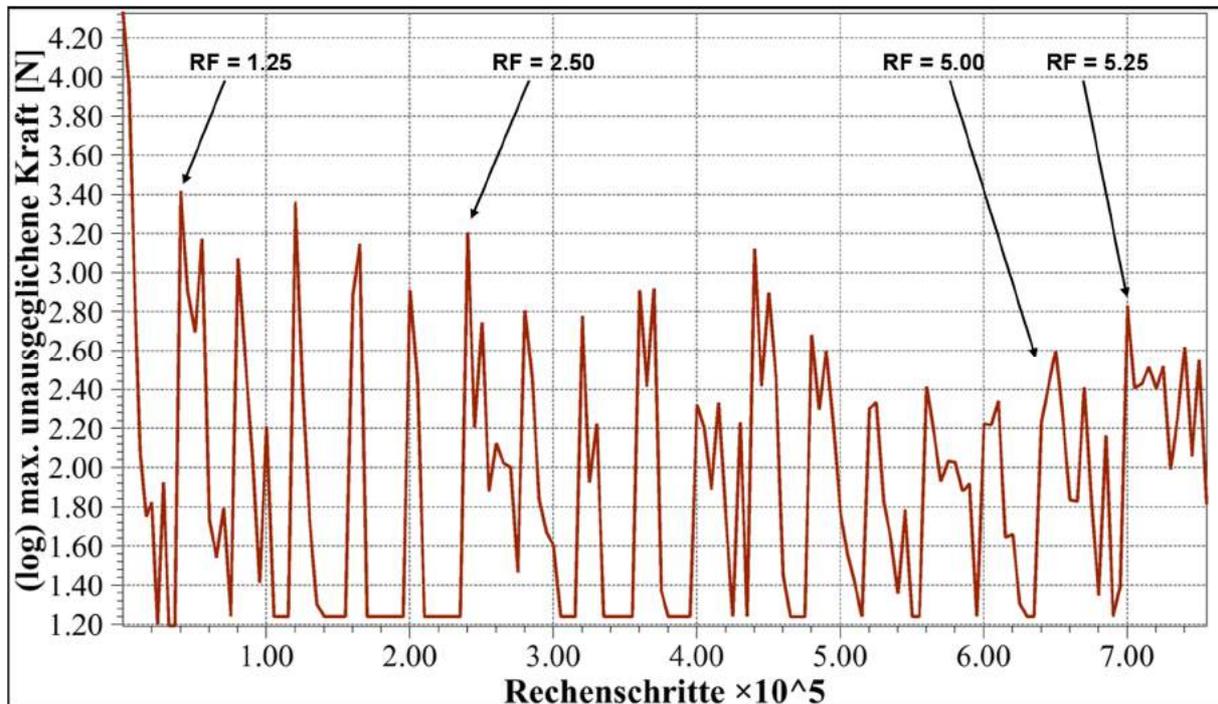


Abb. 5.21: Sz. 4 – max. unausgeglichene Kraft

Sowohl aus dem Konturbild als auch dem Verschiebungsdiagramm der Abb. 5.22 ist zu erkennen, dass am Ende des gesamten Simulationsprozesses der max. Verschiebungswert an der Felsspitze (P1) auftritt und bei rund 38 cm liegt. Die übrigen Kontrollpunkte weisen wesentlich geringere Verschiebungswerte auf (vgl. Abb. 5.23). In den Bereichen mit reduzierten TF liegt die maximale Verschiebung bei P2 mit etwas über 3 cm. Für P3 beträgt die Verschiebung ca. 2.3 cm. Beide Überwachungspunkte sind auf der westseitigen Felswand auszumachen. Hingegen befinden sich die Kontrollpunkte P4, P5 und P6 an Abschnitten nicht reduzierter TF, sodass die Verschiebungen mit < 0.3 cm sehr gering ausfallen.

Aufgrund des Entfernens der Verwitterungsblöcke zur Simulation der verstärkten Verwitterung, kommt es an der Felsspitze zu den größten Verschiebungen. Dabei trägt sowohl die Verringerung der Aufstandsfläche als auch die Reduktion der Trennflächen dazu bei, dass der Block aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Eine Rückkehr in den stabilen Zustand erfolgt anschließend über Ausgleichsbewegungen. In den Verlaufsdigrammen von Abb. 5.22 fällt am Kurvenverlauf von P1 auf, dass neben einigen kleineren Bewegungen zudem mehrere Phasen mit großem Bewegungsausmaß auftreten. Diese äußern sich in erhöhten Verschiebungsgeschwindigkeiten und Verschiebungswerten. Die einzelnen Phasen sowie der Ausgangszustand sind in Abb. 5.24 im Konturbild und den Verlaufsdigrammen verdeutlicht.

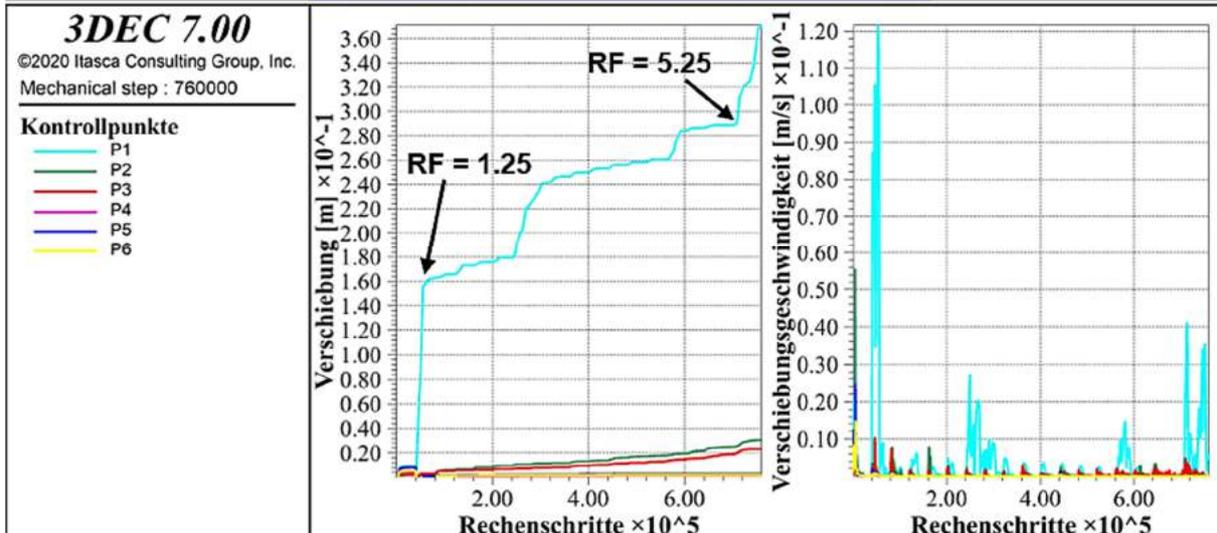
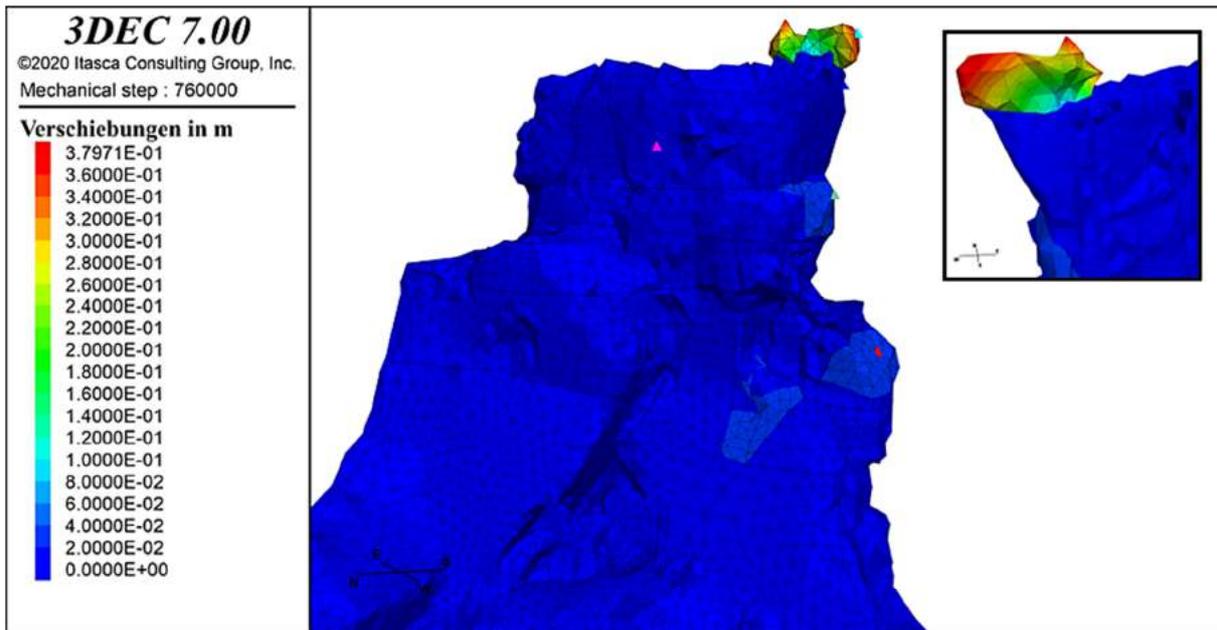


Abb. 5.22: Sz. 4 – Ergebnis der Reduktion bis RF 5.25 nach 760 000 Schritten

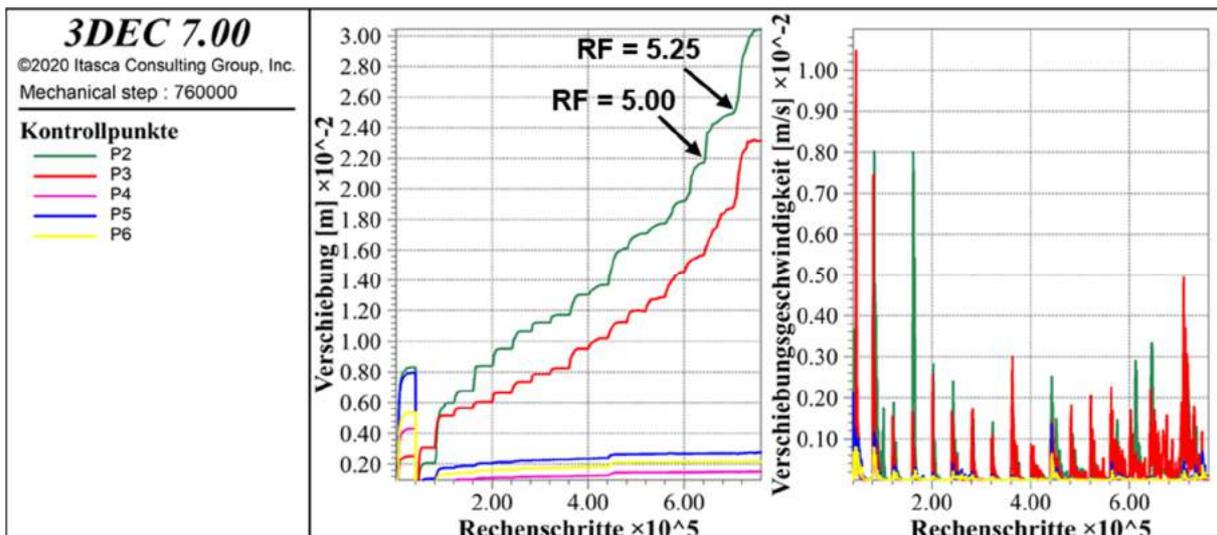


Abb. 5.23: Sz. 4 – Diagramme der Kontrollpunkte P2-P6 nach RF 5.25

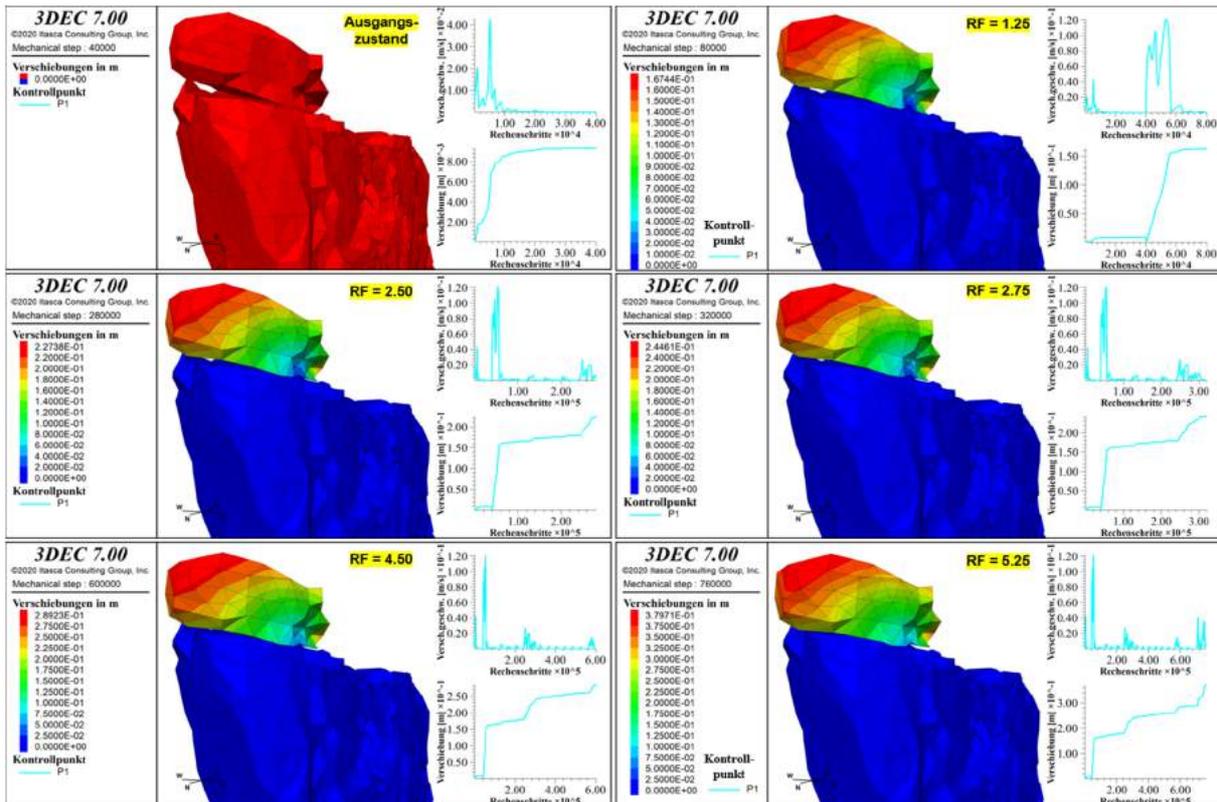


Abb. 5.24: Sz. 4 – Vergleich der Verschiebung in verschiedenen Reduktionsphasen

Ein Vergleich der Konturbilder in Abb. 5.24 zeigt, dass im Verlauf des gesamten Reduktionsprozesses eine phasenweise Setzung der Felsspitze erfolgt. Die Diagramme sollen die einzelnen Phasen veranschaulichen, jedoch ist zur genauen Betrachtung die vergrößerte Ansicht in Abb. 5.22 geeigneter. Im Ausgangszustand hat sich, aufgrund der verstärkten Verwitterungssimulation und dem damit verbundenen Verlust an Felsmaterial unterhalb der Felsspitze, die Aufstandsfläche des Blockes verringert. Dies führt, zusammen mit der Reduktion der Trennflächen, zu einer Änderung der Gleichgewichtssituation. Da ein stabiler Zustand angestrebt wird, kommt es zu Ausgleichsbewegungen bis zum Kräftegleichgewicht. Der Bewegungsprozess kann durch ein Verhaken und Verkeilen des Blockes unterbrochen und damit zeitweise eine stabile Lage erreicht werden. Eine Änderung im Kräftegleichgewicht kann den Bewegungsprozess erneut anstoßen oder zusätzlich verstärken, z. B. durch eine weitere Reduktion der TF oder anderweitige Krafteinwirkung auf den Block, wie etwa einen dagegen prallenden Ast. Daraus ergeben sich die einzelnen Phasen der Bewegung. Die Setzung der Felsspitze erfolgt bei den Reduktionsfaktoren 1.25, 2.5, 2.75, 4.5 und 5.25 mit erhöhter Blockbewegung. Bereits im ersten Reduktionsschritt bewegt sich der Block mit der insgesamt höchsten maximalen Verschiebungsgeschwindigkeit von ca. 0.12 m/s. Ursache dafür ist die Kippbewegung der Spitze ausgelöst durch den Materialverlust der Verwitterung. Dabei wird der insgesamt größte Verschiebungswert innerhalb einer Reduktion von rund 17 cm erreicht. Für die anderen Reduktionen der verstärkten Bewegungsphasen liegen die Verschiebungsgeschwindigkeiten bei < 0.04 m/s und das Plus der max. Verschiebung zur

vorhergehenden Reduktion beträgt 2-9 cm, wobei sich die Felsspitze am Ende von RF 5.25 in einer anhaltenden Bewegung befindet und nahezu vollständig auf dem Felsmassiv aufliegt.

Die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit der Felsspitze am Ende einer Reduktion ist in den Konturbildern der Abb. 5.25 verdeutlicht. Im ersten Reduktionsschritt um den Faktor 1.25 erfolgt eine Kippbewegung des Blockes in Richtung Südosten. Anschließend neigt sich der Block in Richtung WSW, wie v. a. am Ende der Reduktion vom RF 2.5 zu erkennen ist. Die TF-Reduktionen sowie der Verlust der Verwitterungsblöcke verursachen ein Versagen der Trennflächen, welches für die Felsspitze in Abb. 5.26 dargestellt ist. Der Materialverlust durch die verstärkte Verwitterung verringert die Aufstandsfläche des obersten Blockes, wie es im Ausgangszustand sichtbar ist. Während des ersten Reduktionsschrittes werden max. Öffnungsweiten der Trennfläche von ca. 9 cm erreicht. Einige Bereiche der TF zwischen Felsspitze und Felsmassiv weisen ein Versagen mit vollständigem Verlust der Kontaktfläche auf. Am Ende von RF 2.5 nach 33.6 s vergangener Modellzeit (280 000 Schritte) sowie nach Erhöhung auf 39.6 s (330 000 Schritte) liegen nahezu keine intakten Abschnitte der Kontaktfläche vor, sodass von einer vollständigen Abtrennung der Felsspitze ausgegangen werden kann. Der oberste Block liegt somit lose dem Felsmassiv auf, womit das Risikopotenzial eines möglichen Felsabsturzes sehr hoch ist.

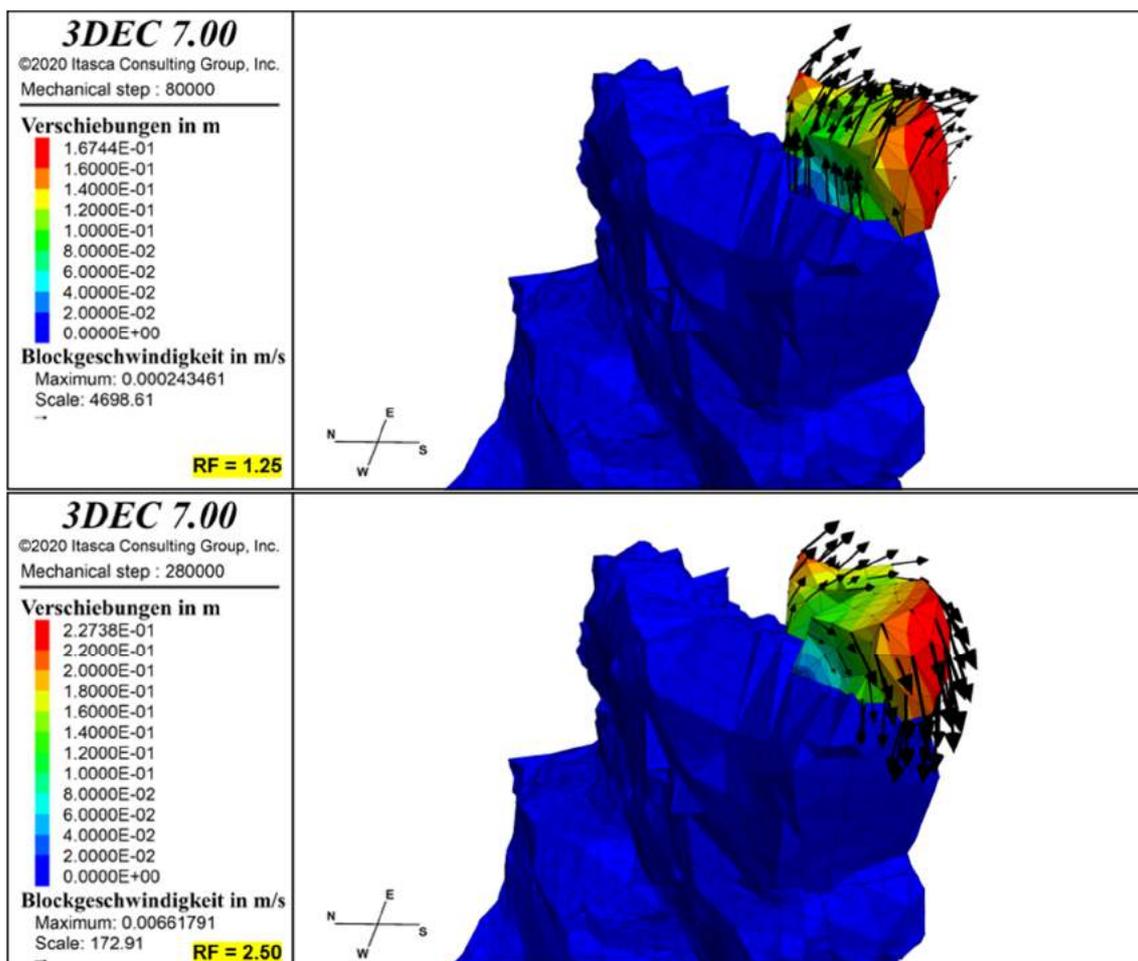


Abb. 5.25: Sz. 4 – Vergleich der Blockbewegung der Felsspitze

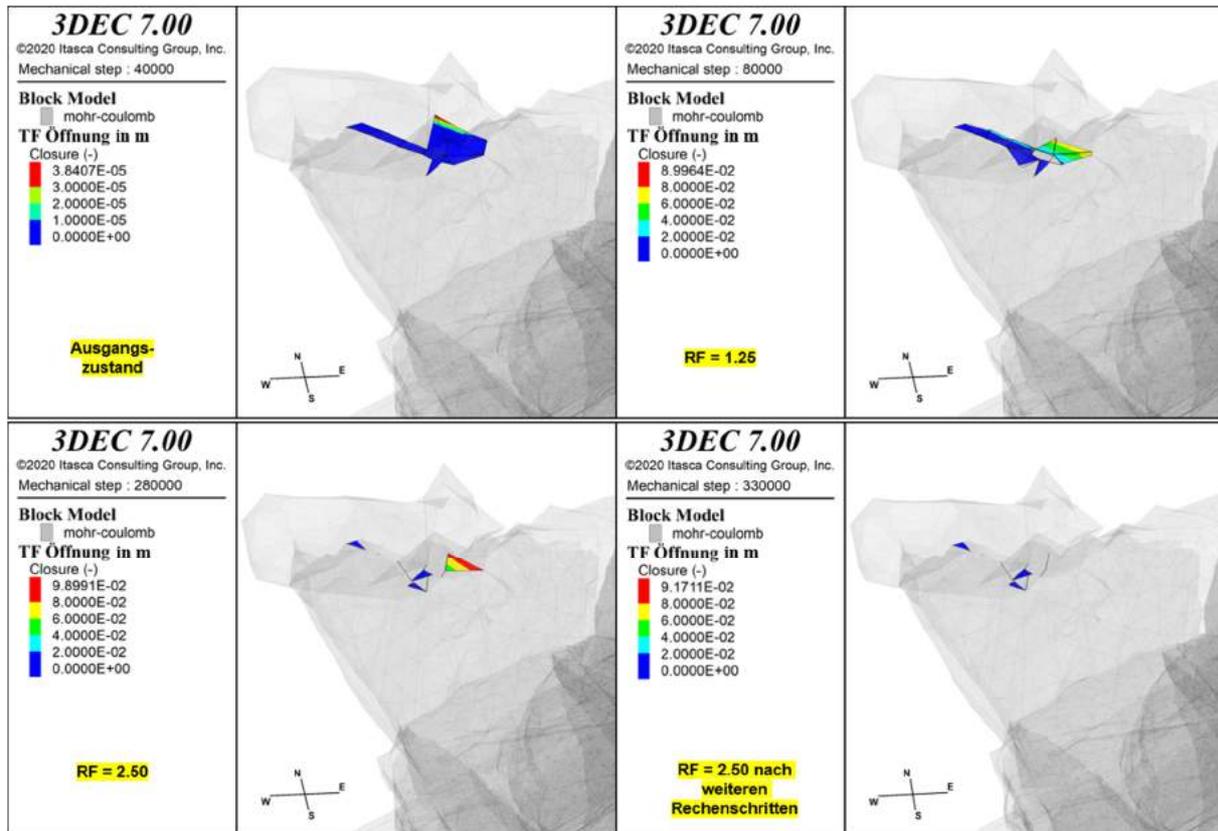


Abb. 5.26: Sz. 4 – Vergleich der TF-Öffnung an der Felspitze

Für die übrigen Felsbereiche ergibt sich ein anderes Versagensbild der Trennflächen. Wie zu erwarten war sind die TF innerhalb der nicht reduzierten Abschnitte bis zum Ende des Simulationsprozesses zum überwiegenden Teil komplett intakt (vgl. Anhang C Abb. V.4). Hingegen weisen die reduzierten Felsbereiche bei fortschreitender Reduktion ein zunehmendes TF-Versagen auf. Abb. 5.27 zeigt einen Vergleich der TF-Öffnungen sowie der Verschiebungen am Ende der drei Reduktionsschritte mit den deutlichsten Veränderungen. Nach der Reduktion um den Faktor 2.5 sind die Kontaktflächen der obersten Klüfte parallel zur westseitigen Felswand komplett verloren gegangen, sodass die Blöcke vom Felsmassiv abgetrennt worden. Jedoch sind die horizontalen Trennflächen noch vollständig intakt, daher liegen die Blöcke nicht völlig vom Felsen gelöst vor. Die oberste Kluft senkrecht zur Westwand ist zwar ebenfalls intakt, hat sich jedoch um wenige Zentimeter geöffnet. Die größten Verschiebungen entlang der westseitigen Felswand betragen etwa 1.2 cm und treten im obersten reduzierten Bereich auf. Am Ende von RF 4 ist das TF-Versagen weiter fortgeschritten. Im oberen Bereich sind alle reduzierten Klüfte parallel zur Westwand überwiegend kaputt. Weiterhin ist der unterste reduzierte Bereich von einem TF-Versagen betroffen und weist max. Verschiebungen bis ca. 1.5 cm auf. Nach RF 5 haben sich im gesamten Reduktionsbereich die meisten Klüfte so weit geöffnet, dass die Kontaktfläche verloren gegangen ist und die Blöcke an einigen Stellen vom Felsmassiv abgetrennt vorliegen. Allerdings fällt auf, dass die horizontalen TF auch am Ende des höchsten Reduktionsschrittes

noch vollkommen intakt sind. Die max. Verschiebung an der westseitigen Felswand beträgt rund 3 cm nach insgesamt 84 s Modellzeit. Die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit der Blöcke am Ende von RF 5 ist in Abb. 5.28 dargestellt. Der obere reduzierte Bereich bewegt sich in SW-Richtung und die Blöcke der unteren Reduktionsabschnitte in Richtung NNW.

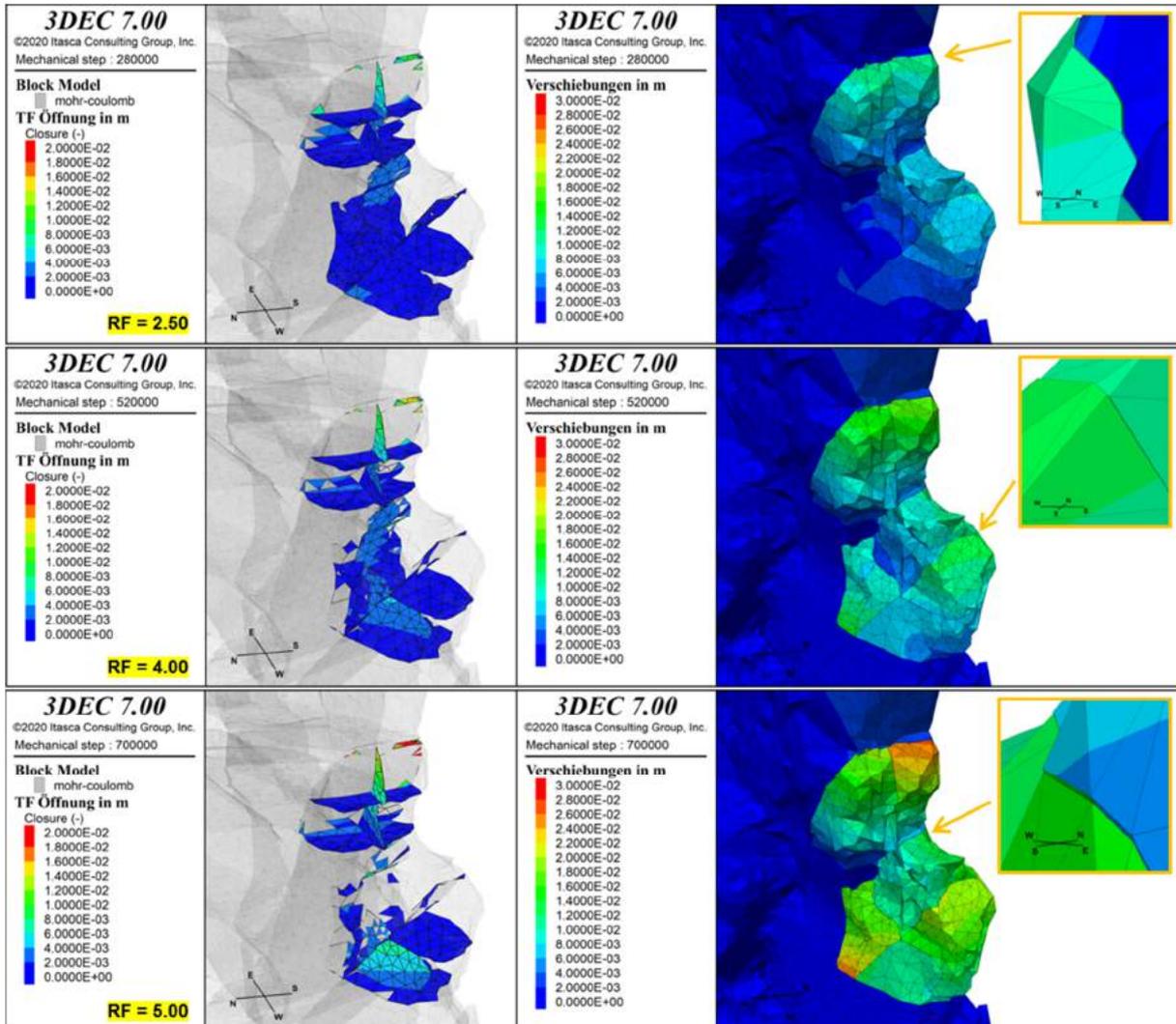


Abb. 5.27: Sz. 4 – Vergleich der TF-Öffnungen & Verschiebungen reduzierter Bereiche

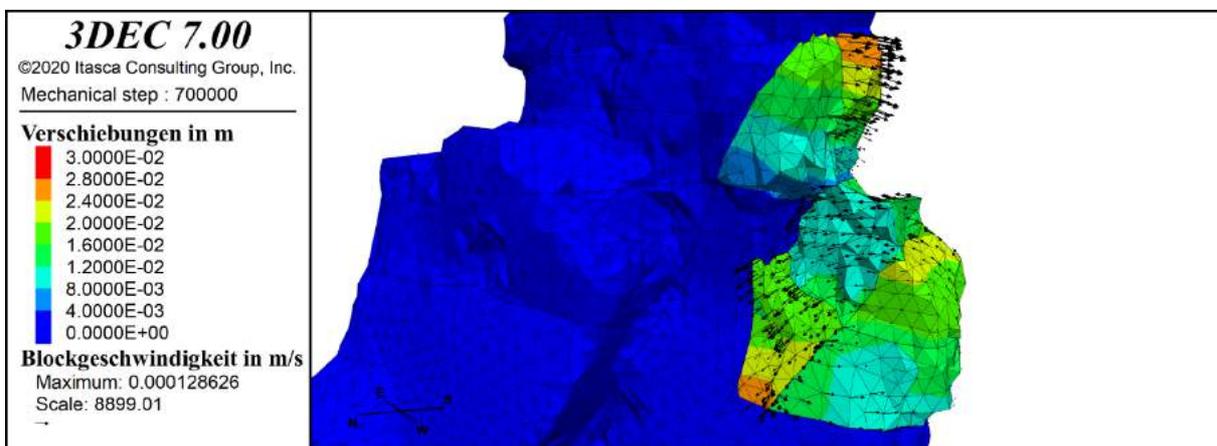


Abb. 5.28: Sz. 4 – Blockbewegung der reduzierten Felsbereiche (RF 5)

Hinsichtlich der Ergebnisse der vorangegangenen Verwitterungsszenarien, insbesondere der TF-Reduktion von Szenario 3 (vgl. TF-Versagen Abb. 5.16), scheint die Auswahl der gefährdeten Felsbereiche nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurde der reduzierte Felsbereiche von Szenario 4 auf den obersten Felsabschnitt ausgedehnt. In Abb. 5.29 ist die erweiterte Auswahl der Trennflächen dargestellt.

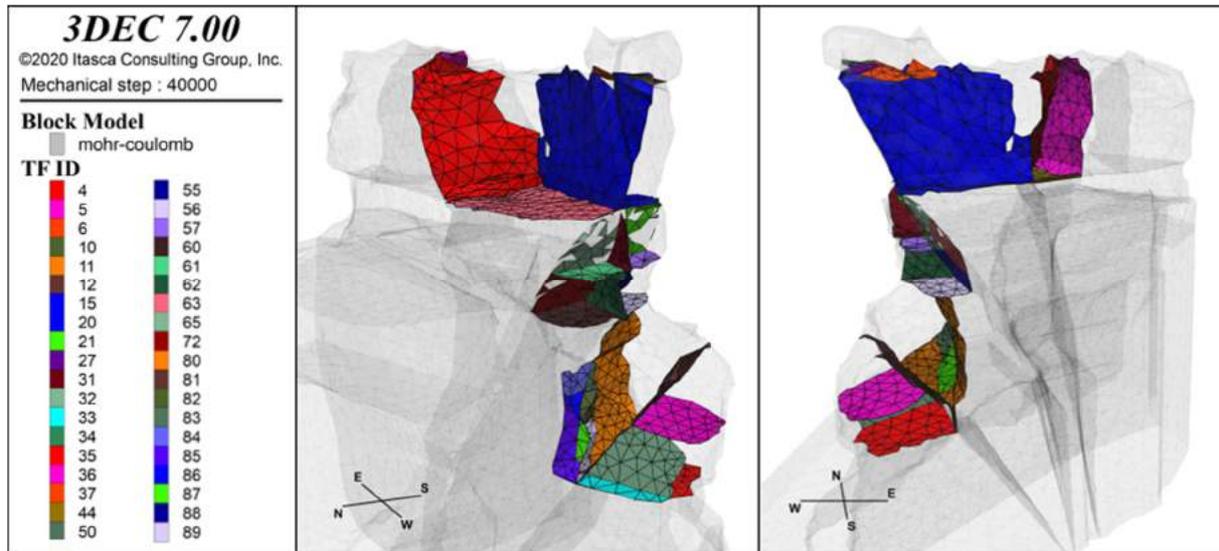


Abb. 5.29: Sz. 4 – erweiterte Auswahl reduzierter TF-Abschnitte

Damit ein Vergleich der zwei Varianten miteinander möglich ist, wurde für die erweiterte TF-Reduktion die gleiche Anzahl an Reduktionsschritten simuliert. Es dauert pro Reduktion im Durchschnitt wesentlich mehr Zeit, um eine Absenkung der max. unausgeglichenen Kraft auf minimale Werte zu erreichen. Das Gesamtsystem ist allgemein instabiler als bei Variante 1. Das Verlaufsdiagramm der unausgeglichenen Kraft sowie das Konturbild und die Diagramme der Verschiebungen am Ende des Simulationsprozesses sind im Anhang C (Abb. V.5, Abb. V.6) zu finden. Aufgrund der zusätzlichen TF-Schwächung innerhalb der oberen Felsbereiche ist das Ausmaß des Versagens an der Felsspitze größer als bei Variante 1, wie aus Abb. 5.30 entnommen werden kann. Die erste Setzungsphase des Blockes bei der Reduktion um den Faktor 1.25 führt zu ähnlichen Verschiebungswerten von max. 17 cm (vgl. Verschiebungsdiagramm P1). Jedoch sind bereits nach dem RF 2 ein Großteil der Kontaktflächen verloren gegangen und die max. Verschiebung beträgt 23 cm. Bei Variante 1 wurde dieser Verschiebungswert erst nach der Reduktion vom RF 2.5 erreicht (vgl. Abb. 5.24). Spätestens am Ende von RF 2.25 ist das TF-Versagen so weit fortgeschritten, dass von einer vollständig vom Felsmassiv abgetrennten Felsspitze ausgegangen werden kann. Der max. Verschiebungswert ist auf ~ 30 cm angestiegen. Der größte Sicherheitsfaktor der Felsspitze ist für den erweiterten Bereich der TF-Reduktion geringer als bei Variante 1. Dasselbe gilt auch für den übrigen Felskomplex. Abb. 5.31 zeigt das Versagensbild der reduzierten TF und die Verschiebungen im Konturbild nach dem RF 2 und RF 2.25. Einige Klüfte des oberen hinteren sowie mittleren Felsabschnitts sind bereits nach der Reduktion um den Faktor 2 nahezu

vollständig geöffnet und die Kontaktflächen zwischen den Blöcken sind verloren gegangen. Nach dem RF 2.25 kommt es zu einem völligen Versagen der obersten reduzierten Klüfte, sodass die Blöcke vertikal vom Felsmassiv abgetrennt vorliegen. Bis zu diesem Reduktionsschritt sind die horizontalen TF, ebenso wie die Klüfte des untersten reduzierten Felsbereichs, überwiegend intakt. Die Auswertung des TF-Versagens der Felsspitze liefert einen max. Standsicherheitsfaktor von 2.50 für Variante 1 und von 2.25 für Variante 2. Der Vergleich beider Varianten zeigt, dass die Betrachtung einzelner Felsabschnitte nicht ausreichend ist, um das Verhalten des gesamten Felsmassivs richtig abschätzen zu können.

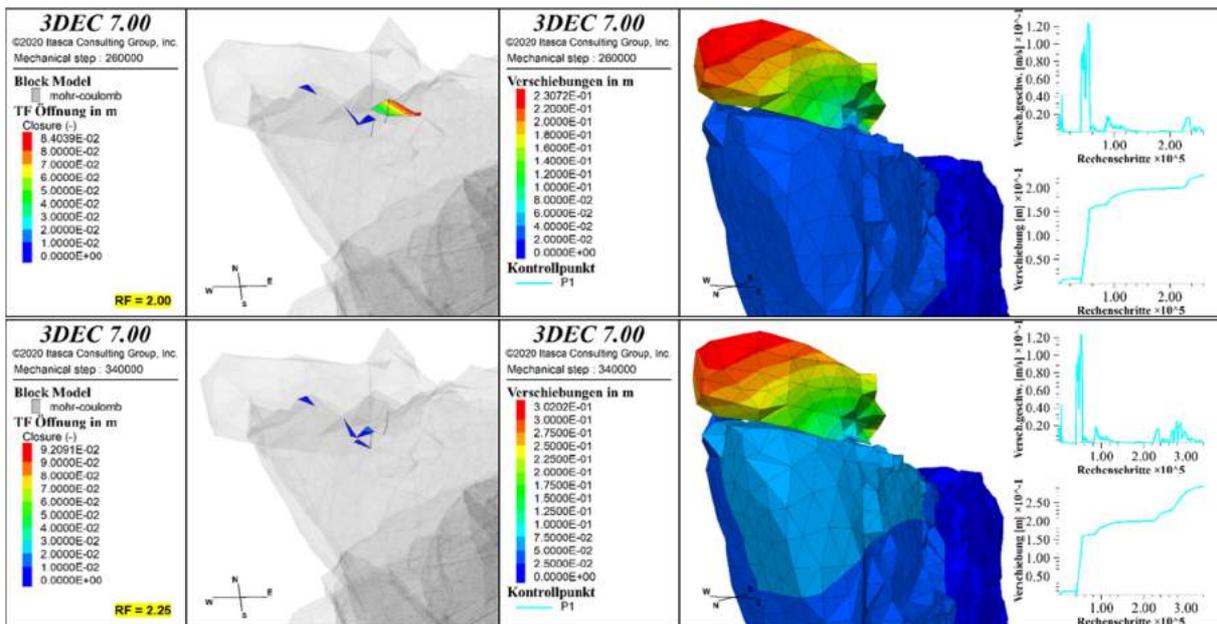


Abb. 5.30: Sz. 4 – TF-Öffnung und Verschiebung an der Felsspitze (Variante 2)

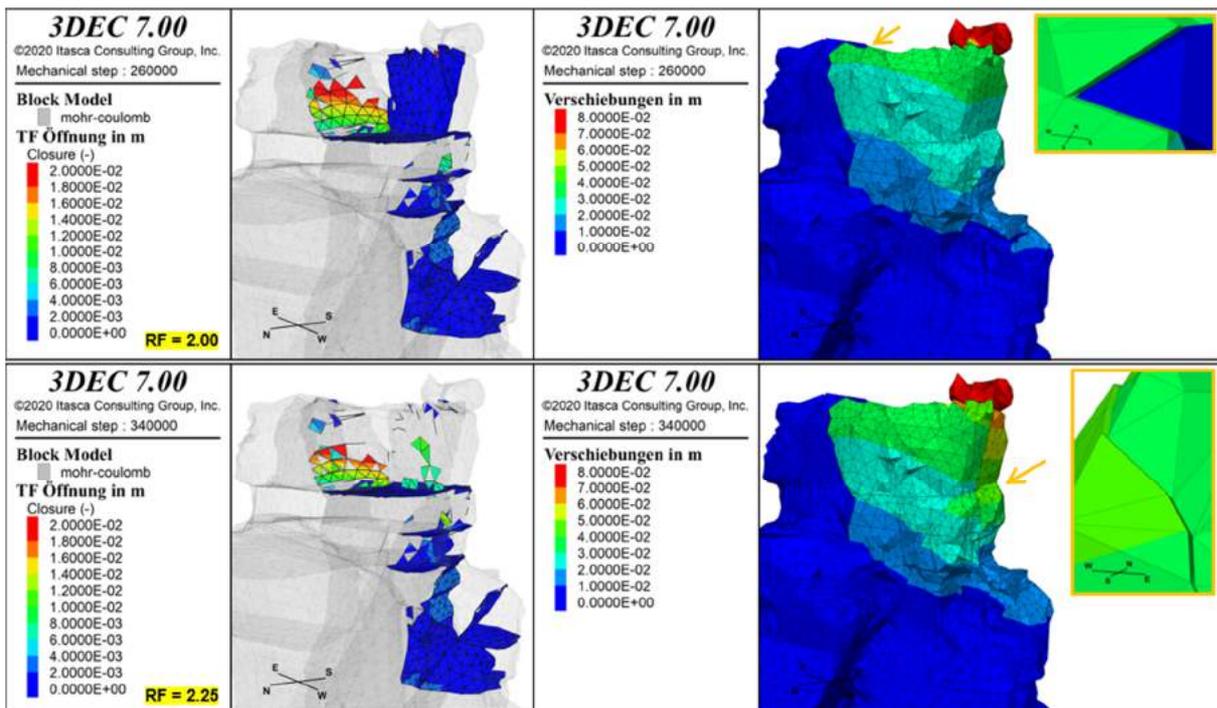


Abb. 5.31: Sz. 4 – TF-Öffnung und Verschiebung reduzierter Bereiche (Variante 2)

5.4.2 Eindringen von Wasser in Klüfte

Im Verwitterungsszenario 5 wird das schrittweise Eindringen von Wasser in Klüfte gefährdeter Felsbereiche simuliert. Die ausgewählten Klüfte entsprechen den reduzierten Bereichen der Variante 2 von Szenario 4 (vgl. Abb. 5.29). Eine potenzielle Wassersättigung der Trennflächen beeinflusst die Stabilität des Felsmassivs. In diesem Zusammenhang greift das Effektivspannungskonzept. Die effektiven Spannungen ergeben sich aus der Differenz der totalen Spannungen und des Porenwasserdruckes. Ein Anstieg des Kluftwassers wirkt somit destabilisierend, indem der Porenwasserdruck zu einer Herabsetzung der Spannungen in den Klüften führt. Je höher der Wassergehalt, desto geringer sind die Festigkeitsparameter. In Tabelle 5.2 sind die veranschlagten Festigkeitsparameter gelistet. Da keine Messdaten zum wirkenden Porenwasserdruck vorlagen, wurden für eine erste Einschätzung sehr geringe Werte für Zugfestigkeit, Kohäsion und Reibungswinkel angenommen. Insgesamt sind 2 Betrachtungsfälle mit je 4 Schritten des Eindringens von Wasser simuliert worden, wobei im letzten Teil alle gefährdeten Klüfte wassergesättigt sind. Abb. 5.32 zeigt die Schritte für beide Fälle anhand der TF-Kohäsion. Im Fall 1 erfasst die Wassersättigung die Klüfte innerhalb von Abschnitten erst in den oberen, dann in den tieferen Gefährdungsbereichen. Im Fall 2 dringt das Wasser von der Felsoberfläche in vier Schritten gleichmäßig in alle gewählten Klüfte ein.

Tabelle 5.2: Festigkeitswerte ausgewählter Klüfte unter Porenwasserdruck

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Trennfläche - Sandstein
Kohäsion	c	Pa	100
Reibungswinkel	φ	°	20
einaxiale Zugfestigkeit	σ_t	Pa	0

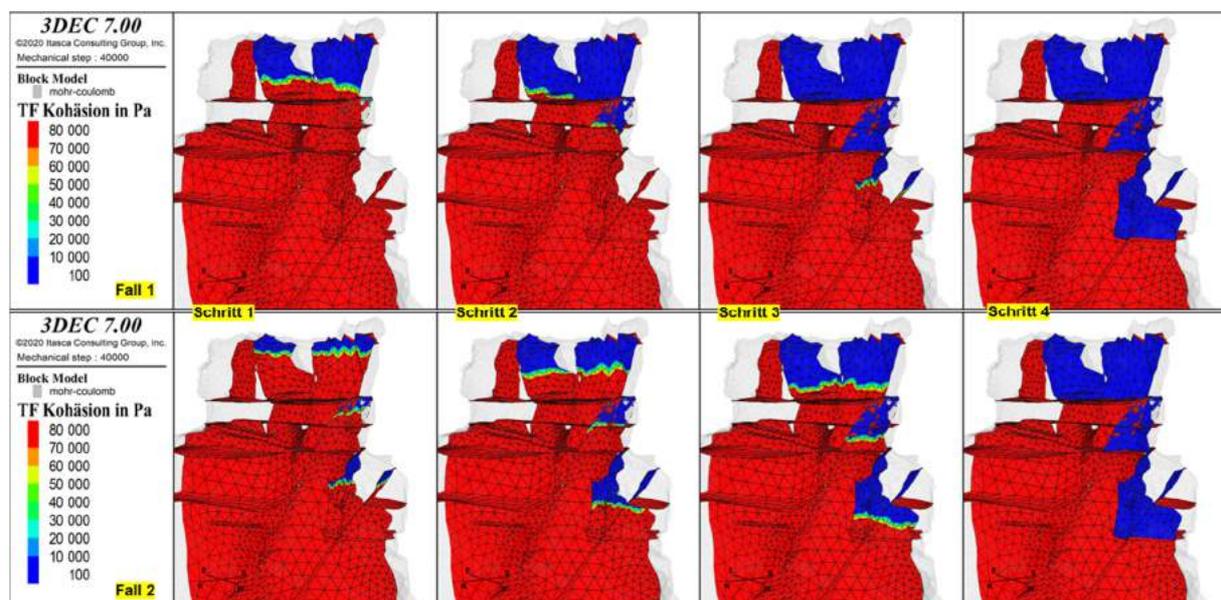


Abb. 5.32: Sz. 5 – Darstellung der Schritte von wassergesättigten Klüften anhand der Kohäsionsreduktion

In beiden Betrachtungsfällen konnte für alle 4 Schritte der Gleichgewichtszustand erreicht werden. Abb. 5.33 zeigt die Verlaufsdiagramme der max. unausgeglichenen Kraft sowie der Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten an den Überwachungspunkten (vgl. Abb. 5.1) für beide Fälle. Die Reduktion der TF-Parameter führt zu Beginn jedes Schrittes zu einem abrupten Anstieg der Verlaufskurven. Es wurden zwischen 4.8 s (40 000 Schritte) und 12 s (100 000 Schritte) Modellzeit simuliert, um eine Absenkung der unausgeglichenen Kraft auf minimale Werte zu erhalten. Dabei verlaufen auch die Verschiebungsgeschwindigkeiten gegen null, sodass die Verschiebungen einen konstanten Wert erreichen. Im Fall 1 ist zu erkennen, dass der 3. Schritt, mit der vollständigen Wassersättigung der Klüfte des oberen und mittleren Gefährdungsbereichs, durch zwei Bewegungsvorgänge gekennzeichnet ist. Die erste starke Bewegung erfolgt zu Beginn (Rechenschritt 140 000) und die zweite nach ~ 3.6 s (Rechenschritt 170 000). Für den zweiten Bewegungsvorgang weisen hauptsächlich die Kontrollpunkte an dem südseitigen Felsblock (P1, P2, P5, P6) eine verstärkte Bewegung auf, sodass an dieser Stelle von dem Versagen der OW-streichenden Kluft im oberen Gefährdungsbereich ausgegangen werden kann. In beiden Betrachtungsfällen treten für jeden Reduktionsschritt die höchsten Verschiebungswerte an der Felsspitze (P1) auf, wie den Diagrammen der Abb. 5.33 sowie den Konturbildern der Abb. 5.34 entnommen werden kann. Im Fall 1 (abschnittsweise Wassersättigung) erfolgt die größte Bewegung im 3. Schritt, v. a. aufgrund des Versagens der OW-streichenden Kluft. Der max. Betrag der Verschiebung liegt dabei über 3.5 cm. Im Fall 2 (gleichmäßiges Eindringen ab GOK) ist die Verschiebung im ersten Schritt mit knapp über 2 cm am größten und weist erst bei kompletter Wassersättigung (Schritt 4) wieder einen starken Anstieg auf. Die größte Verschiebung am Ende des gesamten Simulationsprozesses, mit rund 6.7 cm an der Felsspitze, liefert der Betrachtungsfall 1.

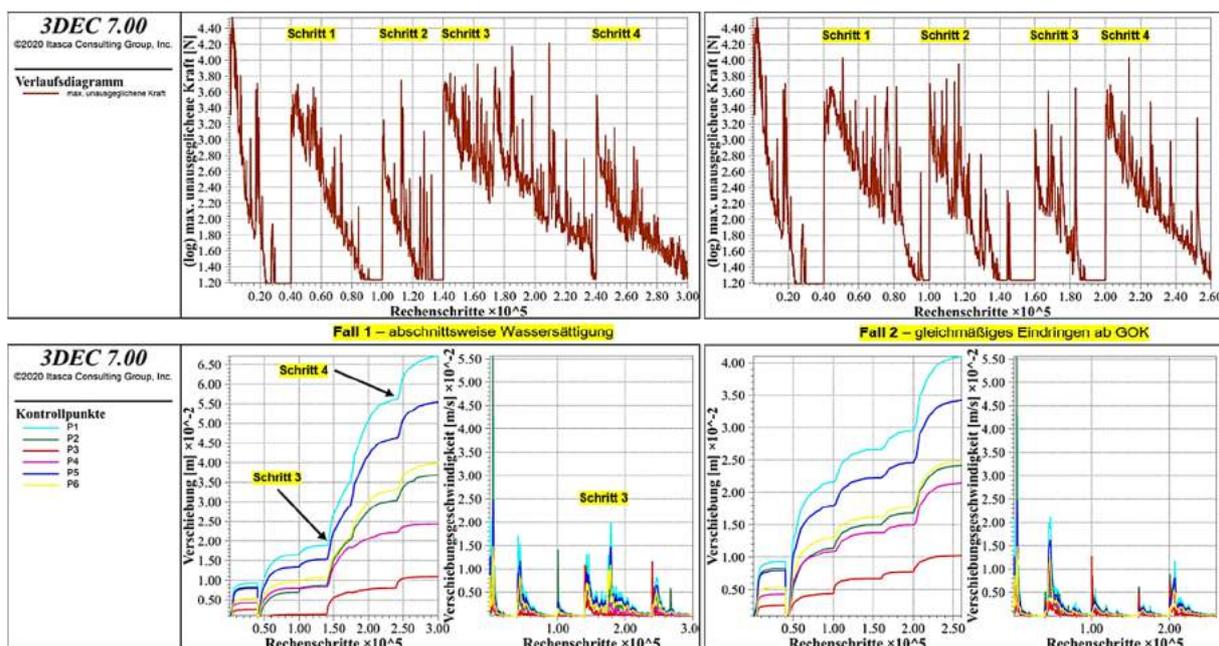


Abb. 5.33: Sz. 5 – Verlaufsdiagramme von Fall 1 und Fall 2

Abb. 5.34 zeigt, dass in beiden Fällen besonders der obere und mittlere gefährdete Bereich von Felsbewegungen betroffen ist. Hingegen weist der unterste reduzierte Teil lediglich Verschiebungen von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern auf (vgl. P3 Abb. 5.33). Im Versagensbild der TF von Abb. 5.35 sind auch nach der Reduktion aller Klüfte (Schritt 4) die TF im untersten gefährdeten Bereich nahezu vollständig intakt. Für die Klüfte des oberen und mittleren Gefährdungsbereichs ergibt sich ein anderes Bild. Die Versagenszustände der TF ähneln sich in beiden Fällen im Schritt 1 und 2, wobei es als erstes zur TF-Öffnung der NS-verlaufenden reduzierten Kluft im oberen Felsbereich kommt. Die TF-Öffnung dieser Kluft erfasst zudem tiefere, nicht reduzierte Bereiche. Darüber hinaus sind einige Kontaktflächen im mittleren Gefährdungsbereich verloren gegangen (vgl. detaillierte Ansicht in Anhang C Abb. V.7). Im Fall 2 (gleichmäßiges Eindringen ab GOK) hält das Versagen im Schritt 3 und 4 für die genannten Klüfte weiter an. Die restlichen TF bleiben intakt. Hingegen sind im Fall 1 (abschnittsweise Wassersättigung), mit der völligen Wassersättigung der oberen und mittleren Gefährdungsbereiche (Schritt 3), alle reduzierten Klüfte des oberen Felsteils von größeren Öffnungsweiten und einem TF-Versagen betroffen. Die Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung am Ende des Simulationsprozesses zeigt Abb. 5.36. Da im Fall 2 die OW-streichende Kluft intakt ist, bewegen sich die Blöcke des oberen Felsbereichs als Ganzes.

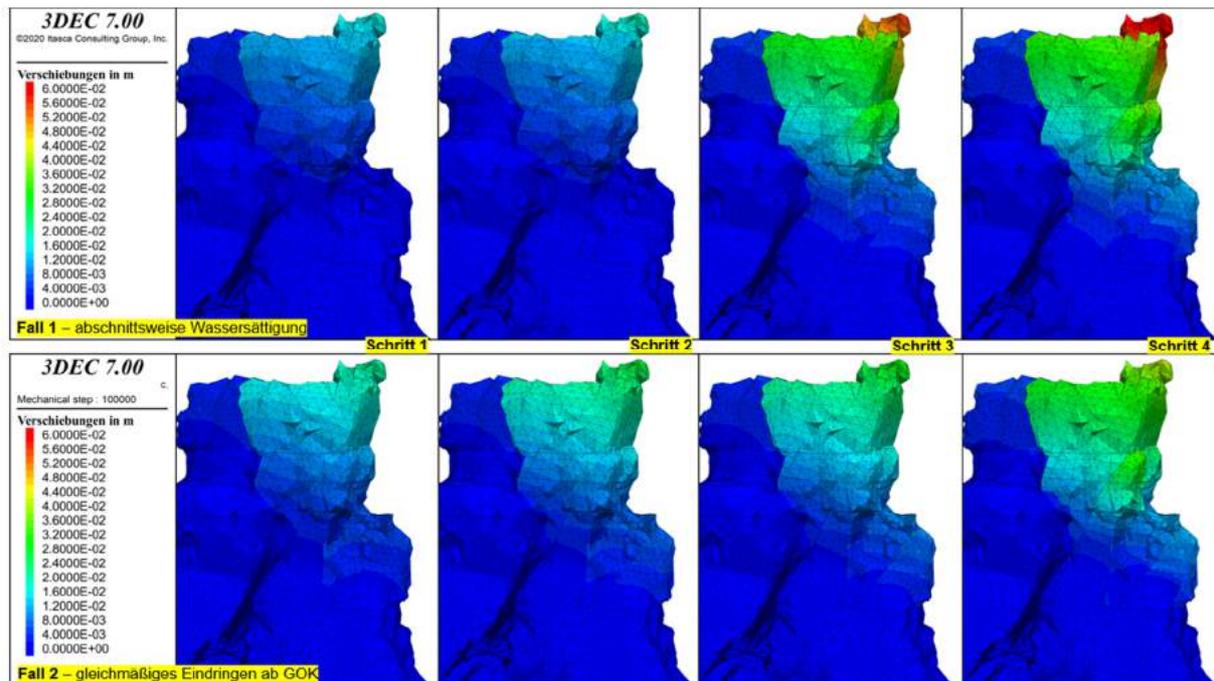


Abb. 5.34: Sz. 5 – Konturbilder der Verschiebungen für Fall 1 und Fall 2

Ein Vergleich der beiden Fälle zeigt: wenn Wasser ungleichmäßig in die Klüfte eindringt und sich in einigen Felsabschnitten staut (Fall 1) ist das Ausmaß des Versagens der Klüfte sowie die Verschiebung größer als bei einem gleichmäßigen Ein- und Vordringen ab der Felsoberfläche (Fall 2). Als Quelle für auftretendes Wasser wird (Stark-) Regen angenommen, welcher gleichmäßig auf die Felsoberfläche trifft. Unter Annahme von homogenen

Bedingungen zur Durchlässigkeit der Klüfte ist ein Eindringen von Wasser wie im Fall 2 am wahrscheinlichsten. Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort können weitere Quellen für größere Wassermengen (z. B. durch Überflutung) ausgeschlossen werden.

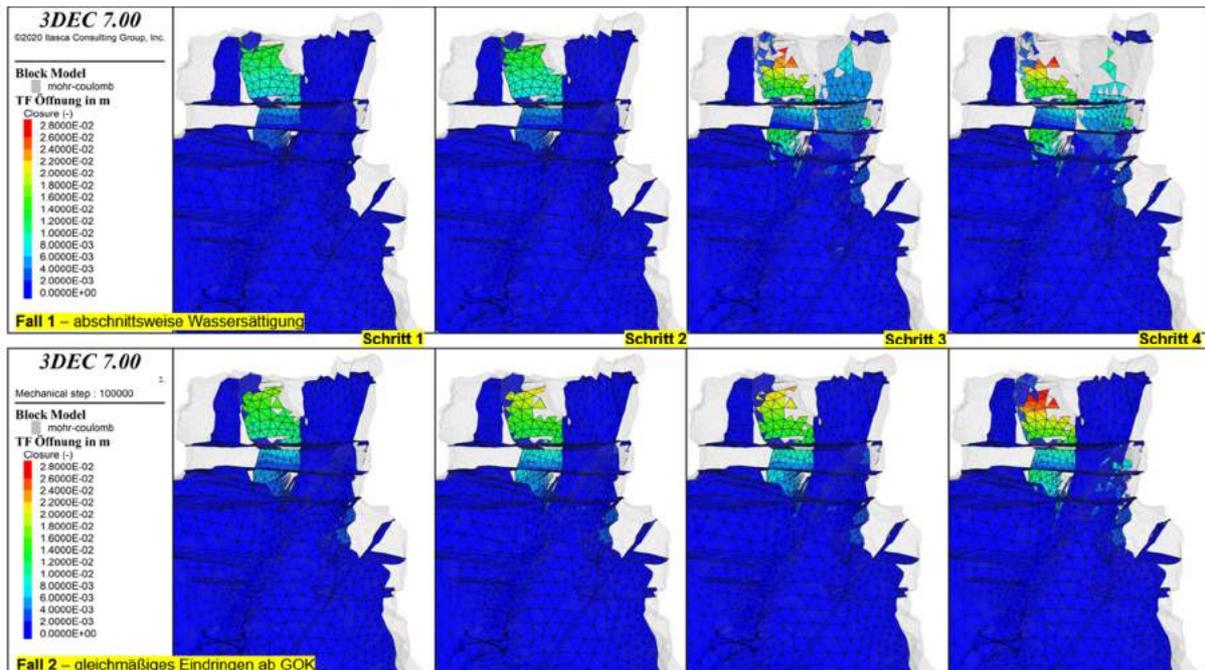


Abb. 5.35: Sz. 5 – TF-Öffnung aller Schritte für Fall 1 und Fall 2

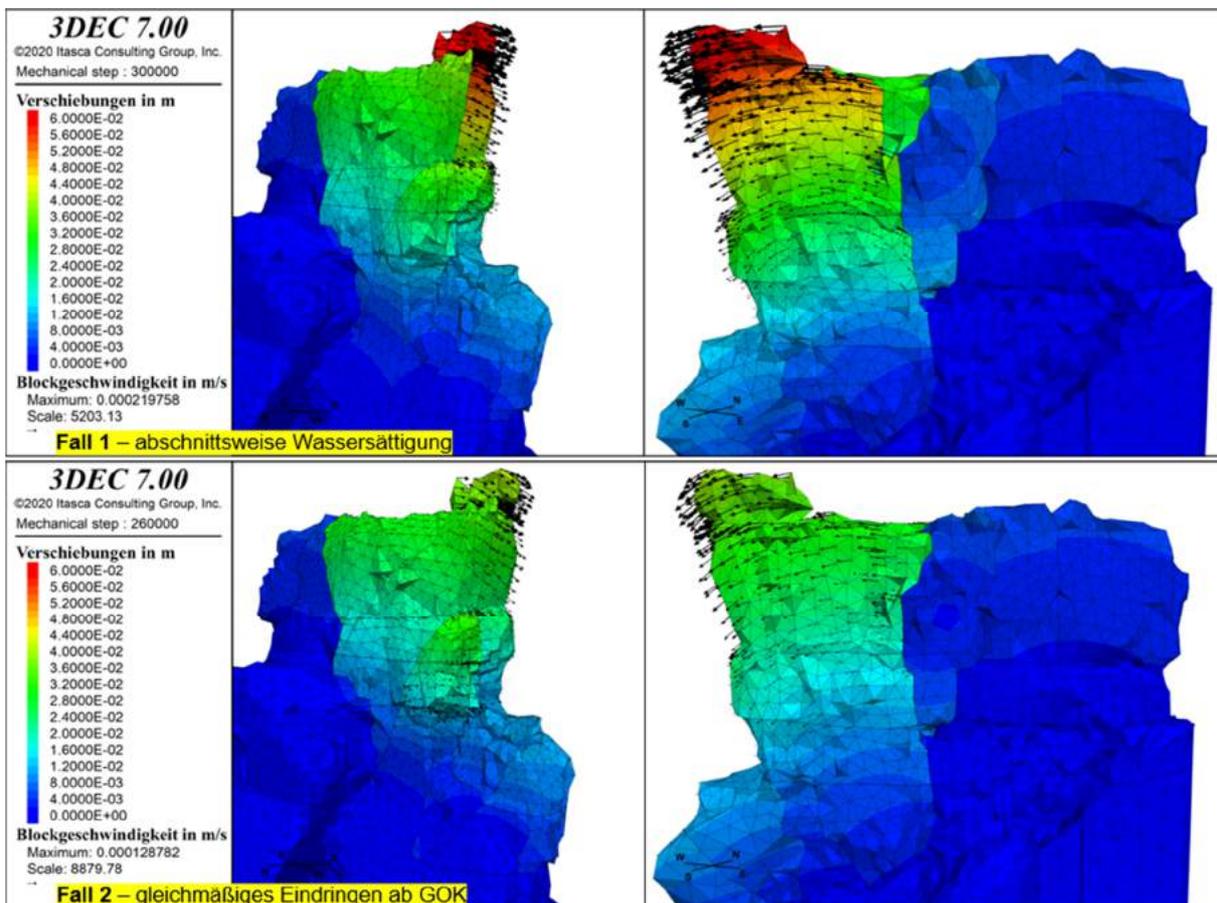


Abb. 5.36: Sz. 5 – Blockbewegung am Ende der Simulation

5.4.3 Frostsprengung

Im Verwitterungsszenario 6 wird das Gefrieren von Wasser in den Klüften gefährdeter Felsbereiche simuliert. Die Kristallisation beginnt bei Temperaturen unter Null Grad Celsius und führt zu einer Volumenvergrößerung des Wassers. Dabei baut sich ein Sprengdruck auf, welcher auf das umliegende Gestein wirkt. Sobald die wirkenden Normalkräfte die Festigkeit der Klüfte übersteigen, kommt es zur Frostsprengung. Die maximale Volumenvergrößerung von Wasser kann bis zu 9 % betragen und wird bei einer Temperatur von -25°C erreicht [16]. Dies verursacht einen Sprengdruck von ca. 235 MPa [16]. Das Ausmaß der Frostverwitterung steht in Abhängigkeit zu der Wassersättigung, sodass eine Sprengwirkung erst bei nahezu wassergesättigten Porenräumen eintritt [17]. Temperaturen von $< 0^{\circ}\text{C}$ werden in den Gesteinsbereichen nahe der Felsoberfläche schneller erreicht als im tiefer liegenden Gestein. Bis in welche Tiefen eine Sprengwirkung vordringen kann ist abhängig vom Tiefgang und der Dauer des Frostes. Laut FRAEDRICH [16] liegt die übliche Eindringtiefe von Frost bei bis zu 2 m. Dieses Maß entspricht sowohl der höchsten als auch der breitesten Stelle der Felsspitze. Damit kann die Spitze des Felsen vollständig von Frost durchdrungen sein und eine Gefährdung darstellen. Im Verwitterungsszenario 6 wird hinsichtlich der Fakten zum Wirkungsbereich eine vollständige Wassersättigung der Klüfte angenommen und das Gefrieren von Kluftwasser ausgehend von der Gesteinsoberfläche bis zu der üblichen max. Eindringtiefe simuliert. Somit erfolgt die Simulation der Frostverwitterung innerhalb der gefährdeten Felsbereiche entsprechend der ersten zwei Schritte aus dem Betrachtungsfall 2 (gleichmäßiges Eindringen ab GOK) von Verwitterungsszenario 5 (vgl. Abb. 5.32). Die Frostsprengung wirkt im Modell wie ein Flüssigkeitsdruck auf die Kontaktflächen der Blöcke und wird daher als Porendruck in den Klüften angebracht. In Abb. 5.37 sind die Frosttiefen anhand des wirkenden Porendruckes dargestellt. Es wurden pro Tiefenbereich separate Rechnungen mit unterschiedlichen Druckwerten durchgeführt, bis ein auffallendes TF-Versagen eingetreten ist. Die simulierten Porendrücke liegen zwischen 1 kPa und 100 kPa.

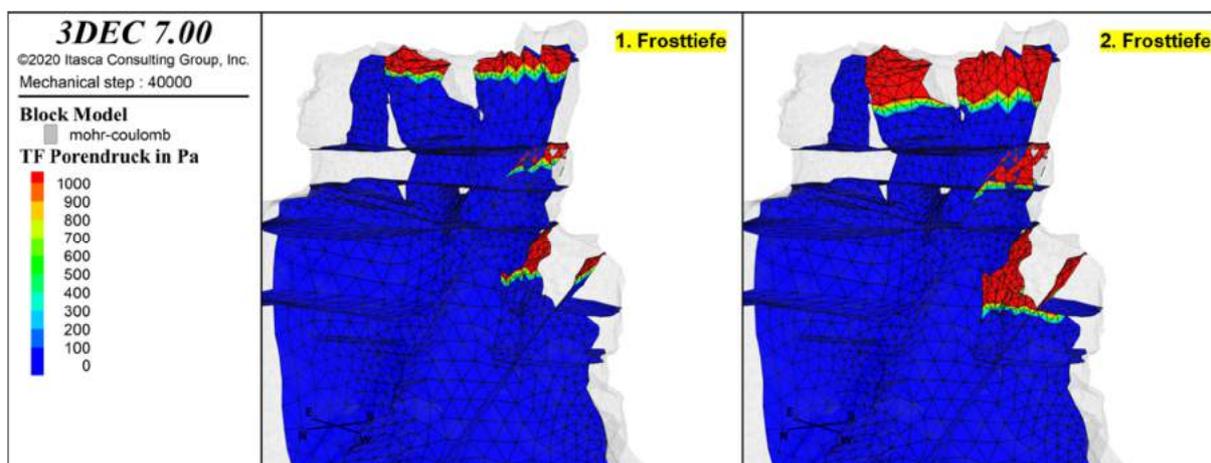


Abb. 5.37: Sz. 6 – Darstellung der Frosttiefen anhand der Porendruckverteilung

Bis zu einem wirkenden Porendruck von 10 kPa erreicht das Gesamtsystem nach kurzer Zeit (1.2 s pro Frosttiefe) den stabilen Zustand. Die Trennflächen bleiben größtenteils vollständig intakt. Einzig im mittleren Gefährdungsbereich kam es zu einem Versagen der Klufflächen. Der Versagenszustand für das Gefrieren von Wasser bis in tiefere Felsbereiche ist stärker ausgeprägt als bei dem geringen Eindringen des Frostes. Die Verschiebungen fallen mit Werten im unteren mm-Bereich eher gering aus. Für die Simulation der 2. Frosttiefe bei einem Sprengdruck von 10 kPa ist der Versagenszustand der Kluft im mittleren Gefährdungsbereich weit fortgeschritten und führt zu kleineren Ablösungen. Die max. Verschiebung der Blöcke an der Westwand beträgt knapp 1 cm. Die horizontalen TF sind intakt, weshalb die Blöcke nicht komplett vom Felsmassiv abgetrennt vorliegen. Abb. 5.38 zeigt den Zustand der Trennflächen in den Gefährdungsbereichen sowie das Konturbild der Verschiebungen.

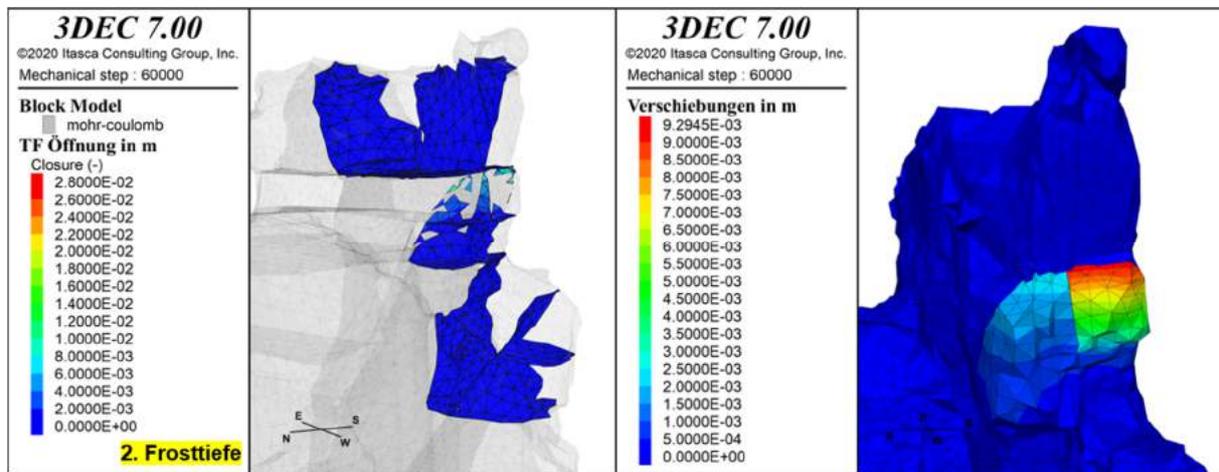


Abb. 5.38: Sz. 6 – Versagenszustand bei 10 kPa Frostsprengdruck

Bei einem Frostsprengdruck von 50 kPa innerhalb der Klüfte kommt es für beide Frosttiefen zu großräumigen Ablösungen vom Felsmassiv. Es wurden 7.2 s (1. Frosttiefe) bzw. 9.6 s (2. Frosttiefe) gerechnet, um minimale Werte der unausgeglichenen Kraft zu erreichen. Die Tendenz des Gesamtsystems zu einer Rückkehr in den stabilen Zustand ist damit gegeben. Allerdings ist das Versagen der Klüfte innerhalb der frostverwitterten Bereiche groß. Der Versagenszustand am Ende des Simulationsprozesses ist für beide Frosttiefen in den Gefährdungsbereichen in Abb. 5.39 dargestellt. Ein Frostsprengdruck von 50 kPa verursacht in den Klüften ein nahezu vollständiges Versagen. Insbesondere dann, wenn das Kluftwasser bis in große Tiefen gefriert. Dadurch kommt es zu einem Verlust der Kontaktflächen zwischen den einzelnen Blöcken und zu großen Bewegungen. Das Konturbild der Verschiebungen ist in verschiedenen Ansichten für beide Frosttiefen in Abb. 5.40 dargestellt. Bei einer geringen Frosttiefe sind die Verschiebungen im oberen und mittleren Gefährdungsbereich am höchsten. Der größte Verschiebungswert von rund 15 cm wird an der Felsspitze erreicht. Allgemein weist der erweiterte Bereich der Felsspitze auf der Südseite die größte Bewegung auf. Im unteren Gefährdungsbereich ist das TF-Versagen gering, sodass die Verschiebungen < 1 cm sind. Bei

einem tieferen Gefrieren von Kluftwasser ist der Versagenszustand der Klüfte weiter fortgeschritten. Hinsichtlich der oberen Gefährdungsbereiche kommt es, wie bei geringen Frosttiefen, auf der Südseite zu den größten Bewegungen mit dem höchsten Verschiebungswert von ca. 25 cm an der Felsspitze. Im unteren Gefährdungsbereich ist der Versagenszustand der TF ebenfalls stärker ausgeprägt. Einige Klüfte weisen eine Öffnung im unteren cm-Bereich auf, z. T. sind die Kontaktflächen auch verloren gegangen. Die tief reichende Frostsprengung führt bei einem Sprengdruck von 50 kPa zu einer kleinräumigen Ablösung auf der Nordseite im unteren Gefährdungsbereich. Die max. Verschiebung der Ablösung beträgt ca. 73 cm nach 14.4 s (120 000 Rechenschritte). Für das gesamte Felsmassiv bleiben die horizontalen Trennflächen intakt, ebenso der Großteil der nicht frostverwitterten Kluftabschnitte, wie es zu erwarten war (vgl. Anhang C Abb. V.8). Bei einer Steigerung des Frostsprengdruckes auf 100 kPa ergibt sich ein ähnlicher Versagenszustand. Jedoch fällt das Ausmaß der Ablösungen mit Verschiebungswerten im Meterbereich deutlich größer aus, sodass die Simulationen bereits nach 2.4 s Modellzeit (20 000 Schritte) beendet wurden.

Schlussendlich ist anzumerken, dass die Machbarkeit von Simulationen zur Frostverwitterung nachgewiesen werden konnte. Inwiefern die Annahmen für die numerische Berechnung mit den natürlichen Gegebenheiten übereinstimmen, ist jedoch sehr unsicher. Die vorgenommenen Vereinfachungen sind zu groß, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Zum Beispiel wird ein homogen wirkender Frostdruck simuliert, was in der Natur allerdings unwahrscheinlich ist. So können etwa vereinzelt auftretende Hohlräume bei Wassersättigung stellenweise einen höheren Frostdruck auf das umliegende Gestein ausüben als das gefrorene Porenwasser. Grund dafür ist die größere Eismasse. Weiterhin beeinflussen Kluftverfüllungen, wie etwa mit verwittertem Material oder Pflanzenteilen, die Verteilung von Wasser und damit den Aufbau von Frostdrücken. In der Simulation müsste daher faktisch ein heterogener Frostdruck angebracht werden. Die tatsächliche Verteilung von Frostdrücken im Gelände zu bestimmen ist schwierig, auch wegen den sich ständig ändernden Bedingungen. Aus den genannten Gründen ist ein Abgleich des ermittelten maximalen Frostdruckes mit den Literaturwerten, z. B. zur Einordnung in einen Temperaturbereich, wenig aussagekräftig. Es ergeben sich viel kleinere Drücke sowohl für die numerische Berechnung als auch in der Realität. Die durchgeführten Simulationen liefern einen maximalen Frostsprengdruck von 50 kPa, für den es v. a. bei einer großen Frosttiefe zu einem ausgeprägten Versagenszustand und zu kleineren Ablösungen kommt. Jedoch sollte die numerische Berechnung zur Frostsprengung vorrangig als eine erste Einschätzung zur Machbarkeit und zur Umsetzung des Verwitterungsvorgangs in einem geotechnischen Modell angesehen werden.

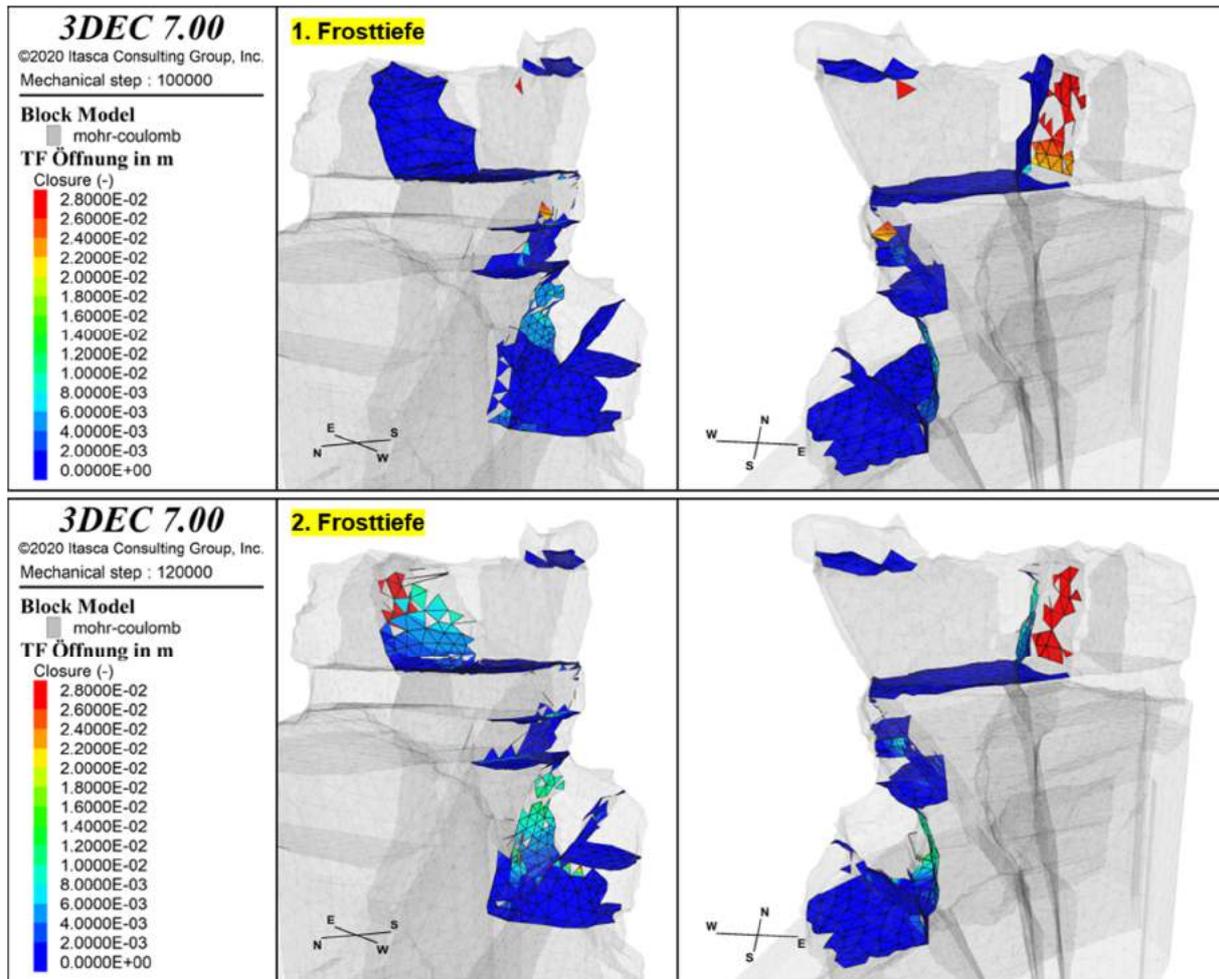


Abb. 5.39: Sz. 6 – TF-Öffnung bei 50 kPa Frostsprenndruck

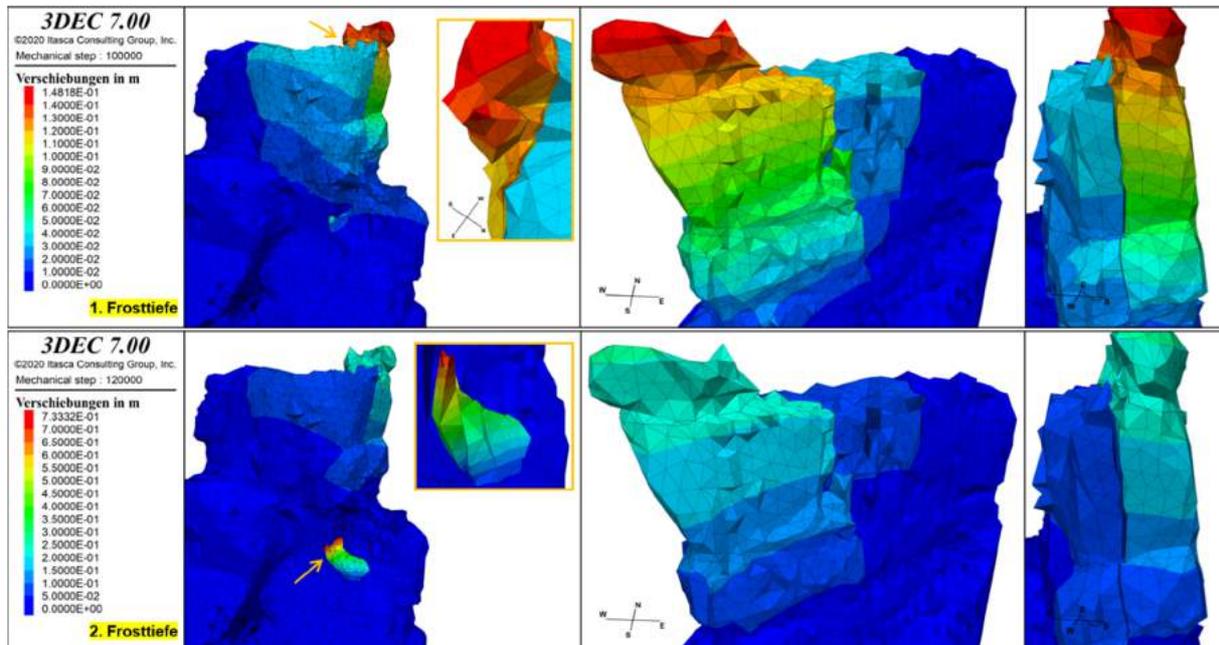


Abb. 5.40: Sz. 6 – Konturbild der Verschiebungen bei 50 kPa Frostsprenndruck

6 Abgeleitete Ergebnisse und Interpretation

Aus den Ergebnissen der c - φ - σ_T -Reduktion von Verwitterungsszenario 1 bis 4 kann der maximale Sicherheitsfaktor abgeleitet werden. Dieser entspricht dem höchsten Faktor um den reduziert werden konnte, ohne dass das Versagen das Gesamtsystem in einen andauernden instabilen Zustand versetzt. Neben dem maximalen SF, d.h. der höchsten Reduktion, die im günstigsten Fall möglich ist, wird der SF für den ungünstigsten Fall benannt. Dabei entspricht der SF im ungünstigsten Fall dem Reduktionsfaktor, ab dem erstmals ein ausgeprägter Versagenszustand vorliegt und damit ein Felsversagen wahrscheinlich ist. Dieser erste SF steht in der Regel unmittelbar vor dem max. SF. In Tabelle 6.1 sind die Sicherheitsfaktoren der Reduktionssimulationen mit den entsprechenden max. Verschiebungswerten gelistet. Die max. Verschiebungswerte sind an der Felsspitze (vgl. Kontrollpunkt P1) gemessen worden.

Tabelle 6.1: Ermittelte Sicherheitsfaktoren und max. Verschiebung der Szenarien 1 bis 4

Szenario	ungünstigster Fall		günstigster Fall	
	SF	max. Versch. [cm]	SF _{max}	max. Versch. [cm]
1	1.75	8	2.00	12
2	4.75	3	5.00	3.7
3	2.00	8.6	3.00	22.5
4 – Variante 1	2.25	18.3	2.50	22.7
4 – Variante 2	2.00	23.1	2.25	30.2

Den höchsten Sicherheitsfaktor liefert die reine Matrixreduktion von Szenario 2. Bei einer unveränderten TF-Festigkeit kann die Festigkeit der Gesteinsmatrix um das 5-fache reduziert werden, bevor es zu einem Versagen des Gesamtsystems kommt. Der Versagenszustand der TF bleibt gering, wie Abb. 5.13 zeigt, und es treten keine Brüche innerhalb der Sandsteinblöcke auf. Die Verschiebungen sind somit auf die plastische Verformung der Gesteinsmatrix zurückzuführen. Verglichen mit den anderen Szenarien fallen die Verschiebungen der Matrixreduktion mit Werten im unteren cm-Bereich am geringsten aus. Die Simulationen zeigen, dass die Diskontinuitäten die größte Schwachstelle im Gebirgskomplex darstellen. Eine Verwitterung der Trennflächen und die damit verbundene Verringerung der TF-Festigkeit, wie in Szenario 3, hat einen wesentlich geringeren Sicherheitsfaktor zur Folge als die Matrixreduktion. Bereits die Reduzierung der TF-Parameter um die Hälfte führt zu einem erheblichen Versagenszustand der TF (vgl. Abb. 5.16) und zu mehr als den doppelten Verschiebungswerten wie für die maximale Matrixreduktion, sodass im ungünstigsten Fall mit einem Versagen des Gesamtsystems zu rechnen ist. Für den günstigsten Fall tritt das Felsversagen erst bei einem maximalen Sicherheitsfaktor von 3 auf. Der Versagenszustand der TF ist nur gering weiter fortgeschritten, aufgrund der geöffneten Klüfte hat sich die maximale Verschiebung allerdings fast verdreifacht (vgl. Tabelle 6.1). Für

das Ausmaß des Felsversagens und den maximalen Sicherheitsfaktor ist weiterhin entscheidend, welche Felsbereiche einer Verwitterung unterliegen. Die Simulation der verstärkten Verwitterung unterhalb der Felsspitze (Szenario 4) führt zu den insgesamt höchsten Verschiebungswerten. Ursache dafür ist der Materialverlust und die dadurch herbeigeführte Setzung der Felsspitze. Der maximale Sicherheitsfaktor orientiert sich an dem TF-Versagen der Felsspitze (vgl. Abb. 5.26, Abb. 5.30) und ist, ebenso wie die Größe der Verschiebung, abhängig vom Umfang bzw. der Lage der reduzierten TF-Abschnitte. Ein Vergleich von Variante 1 und 2 zeigt, dass der SF geringer ist, je mehr Felsbereiche einer Verwitterung unterliegen. Es ergibt sich im Szenario 4 ein max. Sicherheitsfaktor von 2.50 für Variante 1 mit einer max. Verschiebung von 22.7 cm. Für Variante 2 liegt der max. SF bei 2.25 und die max. Verschiebung bei 30.2 cm. Die Betrachtung einzelner Gefährdungsbereiche ist somit nicht immer ausreichend, um das gesamte Ausmaß des Felsversagens abschätzen zu können. Von den einzelnen Verwitterungsszenarien weist die zeitgleiche Reduktion der Matrix und der Trennflächen den geringsten Sicherheitsfaktor auf. Die Verringerung der Festigkeitsparameter um die Hälfte führt zu einem ausgeprägten Versagenszustand (vgl. Abb. 5.7) und zu einer maximalen Verschiebung von 12 cm, sodass im Szenario 1 der max. SF bei 2.00 liegt. Während es für Böschungen und Hohlräume Normen mit zulässigen Standsicherheitsfaktoren gibt, erweist sich an dieser Stelle eine Beurteilung der ermittelten Sicherheitsfaktoren sowie Verschiebungen als schwierig, da keine Vorgaben für natürliche Felsformationen bestehen.

Das Verwitterungsszenario 5 zeigt, dass ein Eindringen von Wasser in Klüfte und die damit einhergehende Herabsetzung der TF-Festigkeit zum Versagen dieser führen kann, wodurch Verschiebungen im Bereich von einigen Zentimetern wahrscheinlich sind. Besonders bei vollständiger Wassersättigung ist der Versagenszustand am größten (vgl. Abb. 5.35 Schritt 4). Dabei ist das Ausmaß des Versagens abhängig von der Art des Eindringens von Wasser. Ein gleichmäßiges Vordringen in tiefere Bereiche, wie im Fall 2, führt zu einem schwachen Versagenszustand mit geringen Kluft-Öffnungen und wenig Verlust von Kontaktflächen. Die größten Bewegungen erfolgen an der Felsspitze und im mittleren Gefährdungsbereich. Hingegen kann eine ungleichmäßige Verteilung mit angestautem Wasser in einigen Kluft-Abschnitten zu einem ausgeprägten Versagenszustand führen. Im Fall 1 ist davon der oberste Felsbereich betroffen, weshalb es zu einem Verlust der Kontaktflächen kommt. Die Bewegung der Felsspitze und des erweiterten Felsabschnittes der Spitze auf der Südseite fällt stärker aus als im Fall 2. In der Annahme, dass das Wasser in Folge eines Niederschlagsereignisses anfällt und homogene Kluft-Bedingungen vorliegen, ist das gleichmäßige Eindringen wie im Fall 2 am plausibelsten. Trotz alledem verursacht der Porenwasserdruck in beiden Fällen die ersten Schäden im mittleren Gefährdungsbereich durch ein vollständiges Versagen der Klüfte (vgl. Abb. 5.35 Schritt 1). Es kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Bereich das

höchste Risikopotential für einen Felssturz nach einem Starkregenereignis liegt. Auch für die Frostsprengung aus dem Verwitterungsszenario 6 ist der Versagenszustand der Klüfte im mittleren Gefährdungsbereich stark ausgeprägt (vgl. Abb. 5.38). Daher kommt es in diesem Felsabschnitt bei einem moderaten Sprengdruck von 10 kPa und einem Gefrieren von Wasser bis in große Tiefen zu kleineren Ablösungen. Ein höherer Sprengdruck von 50 kPa verursacht in allen Felsbereichen mit Frostverwitterung Kluftöffnungen und Kluftversagen (vgl. Abb. 5.39). Bei einer Frosttiefe von 2 m kommt es zu einer Ablösung im stark geklüfteten Felsabschnitt des unteren Gefährdungsbereichs. Die Verschiebung des Blockes beträgt > 70 cm, weshalb dieser als vom Felsmassiv gelöst angesehen wird. Allgemein sind die Bewegungen an der Felsspitze am größten, v. a. bei tiefreichendem Frost. Die wirkenden Sprengdrücke können aufgrund von vereinfachten Annahmen, z. B. homogene Eigenschaften der Klüfte, nicht eindeutig einem bestimmten Temperaturbereich zugeordnet werden. Außerdem zeigen verschiedene Untersuchungen, dass der Aufbau von Eisdrücken im geklüfteten Gestein u. a. von der Dauer des Frostes sowie der Anzahl der Frost-Tau-Zyklen abhängig ist [18]. Dennoch kann das Verwitterungsszenario 6 als Bestätigung der Machbarkeit von numerischen Simulationen zur Frostverwitterung dienen. Zudem lässt sich aus den Simulationen der Frostsprengung ein Risikobereich für mögliches Felsversagen ableiten.

Für alle 6 Verwitterungsszenarien gilt bis zum maximalen Sicherheitsfaktor bzw. zur maximalen Eindringtiefe von Wasser und Frost, dass ein Versagen lediglich lokal auftritt. Im Vergleich der einzelnen Simulationsergebnisse miteinander lässt sich ein eindeutiger Risikobereich erkennen, in welchem für jedes Verwitterungsszenario die größten Verschiebungswerte auftreten. Es handelt sich dabei um den oberen, vorderen Felsabschnitt. Dieser wird in der Horizontalen von der zur Felswand nächsten NS-streichenden Kluft begrenzt und reicht in der Vertikalen bis zur unteren Schichtfläche des mittleren Gefährdungsbereiches. Innerhalb dieses Felsabschnittes sind die nachfolgend genannten Bereiche von den größten Verschiebungen betroffen:

- die Felsspitze
- der obere südseitige Felsblock
- der leichte Überhang auf mittlerer Höhe der Felswand im Westen

Bei allen Szenarien tritt die größte Verschiebung, abgesehen von den vollständig vom Felsmassiv gelösten Blöcken (vgl. Abb. 5.39), stets an der Felsspitze auf. Insbesondere die verstärkte Verwitterung unterhalb der Felsspitze von Szenario 4 führt zu einer maximalen Verschiebung von ca. 30 cm aufgrund der Setzung. Es folgt die Frostverwitterung im Szenario 6 mit einer max. Verschiebung von bis zu 25 cm und die reine TF-Reduktion im Szenario 3 mit ca. 22.5 cm. Das TF-Versagen erfolgt vorrangig innerhalb der Klüfte. Die horizontalen TF bleiben intakt. Ablösungen vom Felsmassiv betreffen v. a. den Überhang im mittleren Gefährdungsbereich und aufgrund des Versagens der OW-streichenden Kluft, den

oberen Felsblock auf der Südseite. Im unteren, stark geklüfteten Felsabschnitt kommt es bei der Frostverwitterung im Szenario 6 mit einem Gefrieren von Wasser bis in 2 m Tiefe zu kleineren Ablösungen. Ebenso wie im Szenario 4 bei hohen Reduktionsfaktoren (vgl. Abb. 5.27), welche jedoch bereits den maximalen Sicherheitsfaktor der Felsspitze übersteigen. Darüber hinaus ist der Versagenszustand der Trennflächen im unteren Gefährdungsbereich eher gering.

Für alle Verwitterungsszenarien erfolgt die Blockbewegung hauptsächlich in Richtung SW. In einzelnen Fällen ist ein Absturz der Blöcke nach SO (vgl. Abb. 5.25) sowie nach NNW (vgl. Abb. 5.28, Abb. 5.40) möglich. Abseits der Felsformation verläuft die Geländeoberfläche als Hang mit einer Neigung nach WSW. Da die Bundesstraße I-62 westlich an der Felsformation vorbei geht, besteht ein Risiko durch abstürzende Felsblöcke. Zudem können, aufgrund der Hangneigung des Geländes, abstürzende Felsmassen auf die Straße rollen. Es ergibt sich ein hohes Gefährdungspotenzial für die Infrastruktur sowie für die menschliche Gesundheit.

Die durchgeführten Simulationen dienen als erste Orientierung zur Identifikation von Risikobereichen sowie der maximalen Standsicherheit der Felsformation. Jedoch können weitere lokale Ablösungen und kleinere Felsstürze nicht ausgeschlossen werden, da aufgrund der manuellen Einarbeitung eine Vollständigkeit des Trennflächensystems im numerischen 3D-Modell nicht gegeben ist. Es wurden überwiegend die Haupttrennflächen sowie kleinräumige Klüfte innerhalb der Gefährdungsbereich berücksichtigt. Im Hinblick auf die Vereinfachung des Modells und die Verringerung des numerischen Rechenaufwands wurde auf eine Vollständigkeit der TF außerhalb der vermuteten Gefährdungsbereiche verzichtet.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des grenzübergreifenden Projekts „Georisks“ wurden in Deutschland und der Tschechischen Republik verschiedene Gegenden des Elbsandsteingebirges untersucht, die eine potenzielle Gefährdung durch Massenbewegungen aufweisen. Die Notwendigkeit der Untersuchungen in der Sächsisch-Böhmischen Schweiz ergibt sich aus der Häufung auftretender Massenbewegungen, wie z. B. Felsstürze, Steinschläge und Gerölllawinen, bei gleichzeitig steigender Beliebtheit als touristisches Ausflugsziel. Das bizarre Landschaftsbild mit seinen markanten Felsformationen entwickelte sich über Jahrmillionen durch auch heute noch andauernde Verwitterungs- und Erosionsprozesse. Grundlage dafür bilden die überwiegend sandigen Ablagerungen des Kreidemeeres aus der Oberkreide vor 100.5 Millionen Jahren. Darüber hinaus führten nachfolgend verschiedene tektonische Prozesse zu einer orthogonalen Klüftung des Sandsteins. Die hauptsächlich vertikalen Klüfte sowie horizontale Schichtflächen stellen natürliche Gangbarkeiten für Verwitterungsprozesse dar, weshalb im Elbsandsteingebirge sogenannte Quadersandsteine charakteristisch sind. Ein Untersuchungsgebiet des „Georisks“-Projektes, in dem die Quadersandsteine auftreten, ist die Felsformation wenige Meter nördlich der Ortschaft Hřensko in der Böhmischen Schweiz. Neben morphologischen Auffälligkeiten, wie steile Felswände und Überhänge, ist die Lage der Felsformation direkt an der Hauptverkehrsstraße I-62 Anlass für numerische Untersuchungen zur Standsicherheit. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die geotechnische 3D-Modellierung des Felsens mit Hilfe des Programmes Rhinoceros 3D und dem Griddle Plug-in von Itasca. Dabei wurden Geometriedaten aus dem Laserscan der Geländeoberfläche zu einem Netzmodell aufbereitet und anschließend das Trennflächensystem manuell eingefügt, sodass ein numerisches Blockmodell zur weiteren Nutzung für Simulationen im Itasca-Programm 3DEC erstellt werden konnte. Die Geometriedaten wurden von dem tschechischen Kooperationspartner zur Verfügung gestellt. Da keine eigenen Messdaten der gesteinsphysikalischen Kennwerte von Sandstein und Trennflächen der Formation bei Hřensko vorlagen, aber eine Ähnlichkeit zu den Quarzsandsteinen des „Großen Wehlturm“ besteht, orientiert sich die Zuordnung der Festigkeitsparameter an den Laborergebnissen von KONIETZKY ET AL. [11]. Jedoch ist die Festigkeit der Trennflächen bei der Initialisierung des Grundspannungszustands auf die untersuchte Felsformation angepasst worden. Im Anschluss an die Initialisierung wurden 6 verschiedene Verwitterungsszenarien durchgeführt. Für die Szenarien 1 bis 4 kam die $c-\varphi-\sigma_t$ -Reduktionsmethode zur Anwendung, bei der die Festigkeitsparameter Kohäsion, Reibungswinkel und einaxiale Zugfestigkeit schrittweise verringert werden, bis ein Systemversagen eintritt. Über das Herantasten an den Grenzzustand durch die Festigkeitsreduktion lassen sich Versagenszustände sowie lokale und globale Verschiebungen ermitteln. Daraus kann der maximale Standsicherheitsfaktor der

Felsformation abgeleitet werden. Es wurden sowohl Szenarien simuliert, in denen ausschließlich eine Reduzierung der Matrix- oder der Trennflächenfestigkeit erfolgte, als auch beides gleichzeitig. Weiterhin konnte, durch die Herausarbeitung von kleineren Verwitterungsblöcken bei der Generierung des geotechnischen 3D-Modells in Rhino, ein Materialverlust unterhalb der Felsspitze mit anschließender TF-Reduktion innerhalb von Gefährdungsbereichen simuliert werden. Die ermittelten Standsicherheitsfaktoren der einzelnen Szenarien liegen zwischen SF 2 und SF 5. Ablösungen von Felsmassen treten lokal auf, dabei kann globales Versagen ausgeschlossen werden. Den größten Sicherheitsfaktor von SF 5 liefert die reine Matrixreduktion (Szenario 2). Bei diesem Verwitterungsvorgang fallen die Verschiebungen am geringsten aus. Für die Verwitterung des Trennflächensystems konnte ein maximaler Sicherheitsfaktor von 3 ermittelt werden, wobei der Versagenszustand bereits nach der Verringerung der TF-Festigkeit um die Hälfte stark ausgeprägt ist. Somit liegt im ungünstigsten Fall der SF bei 2 (Szenario 3). Die Simulation der verstärkten Verwitterung (Szenario 4) liefert insgesamt die größten Verschiebungswerte. Aufgrund des Materialverlustes treten diese an der Felsspitze auf. Der max. Sicherheitsfaktor liegt bei SF 2.25 bzw. SF 2.5 und ändert sich damit minimal in Abhängigkeit vom Umfang bzw. der Lage der reduzierten TF-Bereiche. Je mehr Trennflächen v. a. nahe der Standfläche der Felsspitze verwittern, desto geringer ist die Standsicherheit. Der geringste maximale Standsicherheitsfaktor von SF 2 ergibt sich aus der zeitgleichen Reduktion der Matrix- und Trennflächenfestigkeit (Szenario 1). Abgesehen von der verstärkten Verwitterung ist die max. Verschiebung an der Felsspitze, bei der Reduktion um den Faktor 2, für diese Simulation am größten. Die Standsicherheit der Felsformation ist hauptsächlich von der Verwitterung des Trennflächensystems abhängig und wird im geringen Maß von der Verwitterung der Sandsteinmatrix beeinflusst. Neben den c - ϕ - σ_t -Reduktionen sind weiterhin numerische Berechnungen zur verringerten Kluffestigkeit durch eindringendes Wasser und zur Frostverwitterung in den Klüften festgelegter Gefährdungsbereiche durchgeführt worden. Daraus konnte ein ausgeprägtes Versagen der Klüfte bei vollständiger Wassersättigung, z. B. nach einem Starkregenereignis, ermittelt werden. Bei der Frostverwitterung konnte vorrangig die Machbarkeit der Simulation bestätigt werden. Aus den Ergebnissen der einzelnen Simulationen wird das Risikopotenzial der Felsformation bei Hřensko hinsichtlich eines möglichen Felsversagens abgeschätzt. Es zeigt sich, dass die Bereiche der Felsspitze und des leichten Überhangs auf der Westseite der Felsformation die größte Gefährdung aufweisen. Für jedes Verwitterungsszenario treten an dieser Stelle die höchsten Verschiebungen und ein ausgeprägter Versagenszustand auf. Darüber hinaus kann es bei der Frostverwitterung zu kleineren Ablösungen im unteren, stark geklüfteten Felsbereich im Norden kommen. Das Versagen ist innerhalb des Kluftsystems besonders hoch. Die horizontalen Schichtflächen bleiben für gewöhnlich intakt, ebenso wie die Gesteinsmatrix. Bei

der reinen Matrixreduktion ist das gesamte Trennflächensystem intakt, sodass auftretende Verschiebungen auf die plastische Verformung der Gesteinsmatrix zurückzuführen sind. Aufgrund des orthogonalen Kluftsystems und des Versagens der Klüfte durch die Reduktion kommt es zur Ablösung von kleineren und größeren Sandsteinblöcken. Die Bewegung der Blöcke erfolgt überwiegend in Richtung SW. Durch die Hangneigung der Geländeoberfläche in dieselbe Richtung ist ein Herabrollen der Gesteinsblöcke sehr wahrscheinlich. Damit gefährden herabstürzende und herabrollende Felsmassen die Hauptverkehrsstraße I-62, die unmittelbar westlich der Felsformation verläuft. Schlussendlich konnte mit Hilfe der numerischen Simulationen nachgewiesen werden, dass verschiedene Verwitterungsvorgänge die Standsicherheit der Felsformation bei Hřensko unterschiedlich stark beeinflussen. Einen erheblichen Einfluss auf die Standsicherheit zeigt das Trennflächensystem. Insbesondere die Verwitterung der Kluftflächen, z. B. durch Wasser oder Frost, kann zu kleinräumigen Ablösungen von Felsblöcken führen. Die Wirkung einer verringerten Matrixfestigkeit ist eher gering und führt zwar zu plastischen Verformungen, jedoch können Ablösungen praktisch ausgeschlossen werden. Eine gleichzeitige Verwitterung von Sandstein und Trennflächen zeigt den größten Einfluss auf die Standsicherheit und liefert den geringsten Sicherheitsfaktor. Durch den Materialverlust unterhalb der Felsspitze aufgrund von intensiver Verwitterung ist mit einer raschen Ablösung des Felsblockes bei verringerter TF-Festigkeit zu rechnen. Dabei ist entscheidend, welche Felsabschnitte einer Verwitterung der Trennflächen unterliegen. In Anbetracht an das manuelle Einfügen der Trennflächen in das geotechnische 3D-Modell anhand von Geländefotos und der Oberflächengeometrie, kann davon ausgegangen werden, dass das Trennflächensystem nicht vollständig ist. Eine Aufnahme der Trennflächen im Gelände ist zur Vervollständigung des Modells zu empfehlen. Weiterhin sind bei der Generierung des 3D-Modells diverse Glättungsvorgänge zur Erzeugung eines hochwertigen Netzes notwendig. Dabei wird die Oberflächenstruktur ausgebessert und es kann zu einem Verlust natürlicher Verwitterungseinschnitte kommen, wie z. B. unterhalb der Felsspitze. Die gesteinsphysikalischen Kennwerte von Matrix und Trennflächen sind angelehnt an eine ähnliche Felsformation im Elbsandsteingebirge. Für die Bestimmung der spezifischen Bedingungen bei Hřensko sind diverse Labor- und Geländeversuche notwendig. Somit stellt das erarbeitete Modell lediglich eine Annäherung an die natürlichen Gegebenheiten dar. Die numerischen Simulationen ermöglichen eine erste Einschätzung des Gefährdungspotenzials der Felsformation hinsichtlich verschiedener Verwitterungsvorgänge. Aus den Ergebnissen können Empfehlungen zur Überwachung und Sicherung bestimmter Felsbereiche abgeleitet werden. Unabhängig vom Verwitterungsszenario sind Kluftversagen und Felsablösungen besonders an der Felsspitze und auf der Westseite der Felsformation wahrscheinlich. Daher sollte in diesen Felsabschnitten eine genaue Überwachung erfolgen und weitere Untersuchungen zu möglichen Sicherungsmaßnahmen durchgeführt werden.

IV Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] JÄGER, M. (19.02.2021): *Schwerer Felssturz im Elbsandsteingebirge*. *Sächsische Zeitung Pirna*. (sächsische.de DDV Mediengruppe). Abgerufen am 05.03.2021 von <https://www.saechsische.de/sachsen/saechsische-schweiz/felssturz-im-elbsandsteingebirge-bad-schandau-felsgruppe-bergsteiger-5382996-plus.html>.
- [2] WICHERT, J. (2021): *Georisks. Grenzüberschreitendes Experten- und Frühwarnsystem für Georisiken im Elbsandsteingebirge*. (TU Bergakademie Freiberg – Institut für Geotechnik). Abgerufen am 24.02.2021 von <http://elbe-labe-georisiko.eu/de/>.
- [3] PÄLCHEN, W. & WALTER, H. (2011): *Geologie von Sachsen I. Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte*. (2. korrigierte Auflage). Stuttgart: Schweizerbart Verlag.
- [4] CZECH GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (25.02.2021): *On-line Maps*. Prag. Abgerufen am 07.03.2021 von <http://www.geology.cz/extranet-eng/maps/online>.
- [5] RAST, H. (1959): *Geologischer Führer durch das Elbsandsteingebirge*. (1. Auflage). Freiberg: Verlag Bergakademie Hauptabteilung Fernstudium.
- [6] ČESKÝ GEOLOGICKÝ ÚSTAV (Hrsg.) (2000): *České Švýcarsko. Böhmisches Schweiz*. Reihe: Geology of national parks in the Czech Republic. Prag: Český Geologický Ústav.
- [7] PRINZ, H. & STRAUß, R. (2006): *Abriss der Ingenieurgeologie*. (4. Auflage). München, Heidelberg: Elsevier Spektrum Akademischer Verlag.
- [8] DOMMASCHK, P. (2021): *Massenbewegungen. Ereigniskataster*. In: Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.): *Geologie. Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*. Abgerufen am 06.03.2021 von <https://www.geologie.sachsen.de/massenbewegungen-27229.html>.
- [9] JOHNSEN, G. (1973): *Blockrutschungen und Felsstürze im Sandstein der Sächsischen Schweiz. Exkursion A*. In: Klengel, K. J. (Hrsg.): *Massenbewegungen an Böschungen (Rutschungen und Felsstürze): Kurzreferate und Exkursionsführer*. (S. 38-53). Berlin.
- [10] GLINIORZ, H. (2003): *Felsstürze*. In: Eissner, I. (Hrsg.): *Gipfelbuch*. Dresden. Abgerufen am 24.02.2021 von <http://www.1999er.gipfelbuch.de/felsstuerze.htm>.
- [11] KONIETZKY, H.; HERBST, M.; MARTIENßEN, T. & GÖTZE, J.-U. (2009): *Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben: Entwicklung geotechnischer Methoden und eines geomechanischen Modells zur Beurteilung der Standsicherheiten von Kreidesandsteinen bei fortschreitender Verwitterung zur Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit*. TU Bergakademie Freiberg (unveröffentlicht).

- [12] MCNEEL EUROPE (Hrsg.) (2021): *Rhinoceros. design, model, present, analyze, realize...* (Robert McNeel & Associates). Abgerufen am 03.03.2021 von <https://www.rhino3d.com/>.
- [13] ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (Hrsg.) (2021): *Griddle Version 2.0. Advanced Meshing Tools for Numerical Modeling*. Abgerufen am 03.03.2021 von <https://www.itascainternational.com/software/griddle>.
- [14] ITASCA CONSULTING GROUP, INC. (Hrsg.) (2019): *3DEC 7.0 documentation. Distinct-Element Modeling of Jointed and Blocky Material in 3D*. Abgerufen am 09.03.2021 von <http://docs.itascacg.com/3dec700/3dec/docproject/source/3dechome.html>.
- [15] WALTER, K. & KONIETZKY, H. (2008): *Room and pillar dimensioning for gypsum and anhydrite mines in Germany*. In: Publishing House for Science and Technology (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Advances in Mining and Tunneling 20-21 August 2008*. (S. 349-362). Hanoi, Vietnam.
- [16] FRAEDRICH, W. (2016): *Spuren der Eiszeit. Landschaftsformen in Mitteleuropa*. (2. Auflage). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- [17] KOTAN, E. (2011): *Ein Prognosemodell für die Verwitterung von Sandstein*. In: Müller, H. S. & Stempniewski, L. (Hrsg.): *Karlsruher Reihe. Massivbau, Baustofftechnologie, Materialprüfung*. (2017). Heft 79. Karlsruhe.
- [18] WANG, P. & ZHOU, G. (2018): *Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process*. In: China University of Mining and Technology (Hrsg.): *International Journal of Mining Science and Technology*. (März 2018). Volume 28, Issue 2. (S. 287-296). China.

V Anhang

A Initialmodell

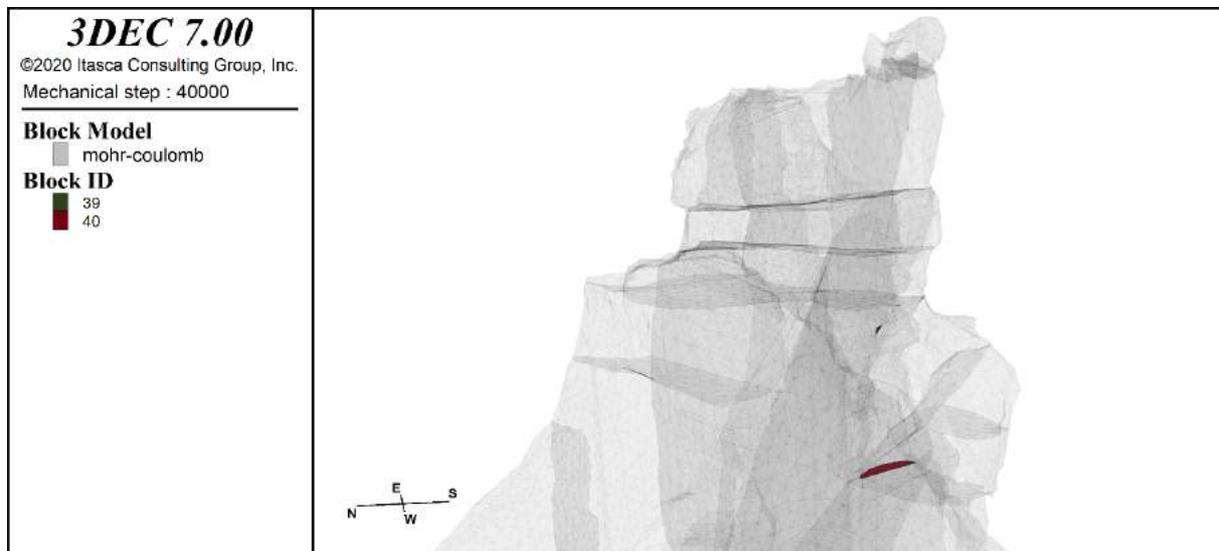


Abb. V.1: Blöcke mit geringem Blockvolumen im Grundspannungszustand

B c – φ – σ_t – Reduktion

Tabelle V.1: Reduzierte Festigkeitskennwerte entsprechend dem Reduktionsfaktor

Material Reduktionsfaktor RF	Sandsteinmatrix			Trennflächen		
	c [Pa]	φ [°]	σ _t [Pa]	c [Pa]	φ [°]	σ _t [Pa]
1.00	7.30E+05	40.0	4.20E+04	8.00E+04	35.0	4.00E+04
1.25	5.84E+05	33.9	3.36E+04	6.40E+04	29.3	3.20E+04
1.50	4.87E+05	29.2	2.80E+04	5.33E+04	25.0	2.67E+04
1.75	4.17E+05	25.6	2.40E+04	4.57E+04	21.8	2.29E+04
2.00	3.65E+05	22.8	2.10E+04	4.00E+04	19.3	2.00E+04
2.25	3.24E+05	20.5	1.87E+04	3.56E+04	17.3	1.78E+04
2.50	2.92E+05	18.6	1.68E+04	3.20E+04	15.6	1.60E+04
2.75	2.65E+05	17.0	1.53E+04	2.91E+04	14.3	1.45E+04
3.00	2.43E+05	15.6	1.40E+04	2.67E+04	13.1	1.33E+04
3.25	2.25E+05	14.5	1.29E+04	2.46E+04	12.2	1.23E+04
3.50	2.09E+05	13.5	1.20E+04	2.29E+04	11.3	1.14E+04
3.75	1.95E+05	12.6	1.12E+04	2.13E+04	10.6	1.07E+04
4.00	1.83E+05	11.8	1.05E+04	2.00E+04	9.9	1.00E+04
4.25	1.72E+05	11.2	9.88E+03	1.88E+04	9.4	9.41E+03
4.50	1.62E+05	10.6	9.33E+03	1.78E+04	8.8	8.89E+03
4.75	1.54E+05	10.0	8.84E+03	1.68E+04	8.4	8.42E+03
5.00	1.46E+05	9.5	8.40E+03	1.60E+04	8.0	8.00E+03
5.25	1.39E+05	9.1	8.00E+03	1.52E+04	7.6	7.62E+03
5.50	1.33E+05	8.7	7.64E+03	1.45E+04	7.3	7.27E+03

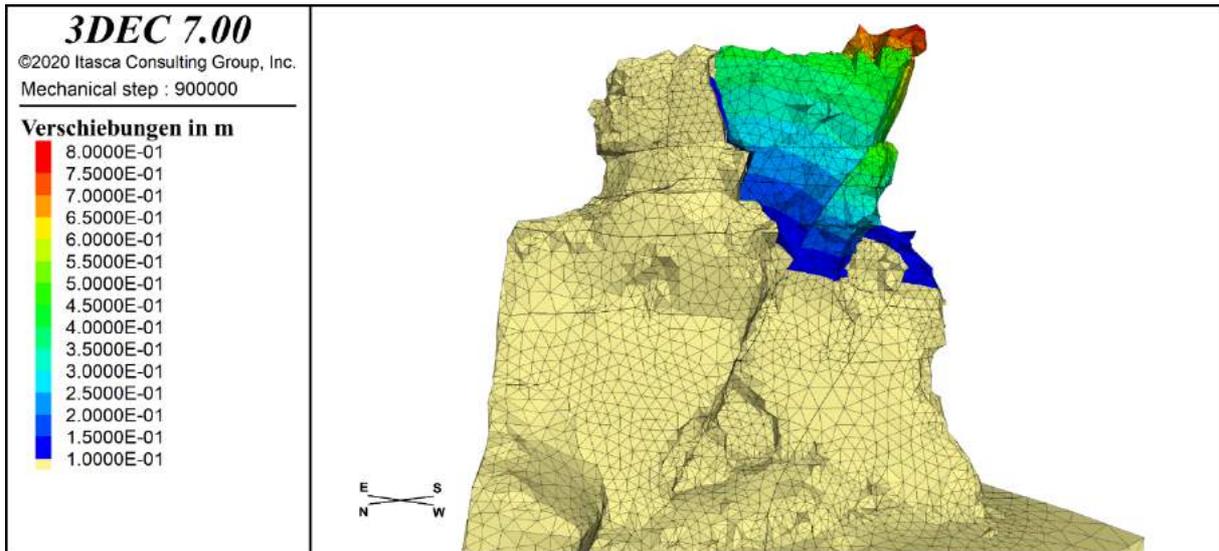


Abb. V.2: Sz. 1 – SE-Ansicht der Verschiebungen > 0.1 m (RF 2.5)

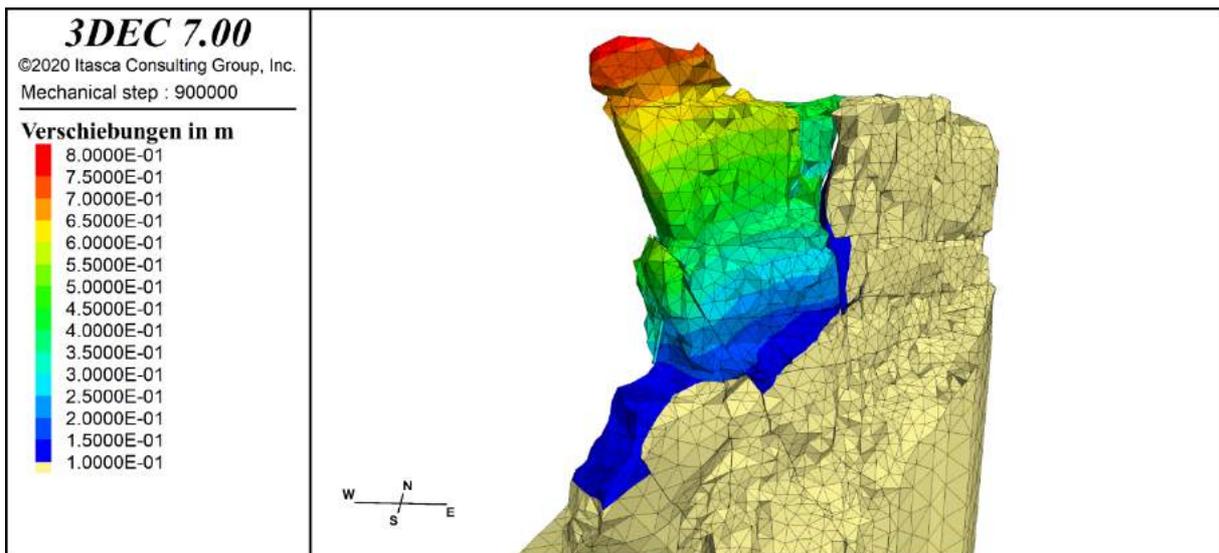


Abb. V.3: Sz. 1 – N-Ansicht der Verschiebungen > 0.1 m (RF 2.5)

C Spezielle Verwitterungsszenarien

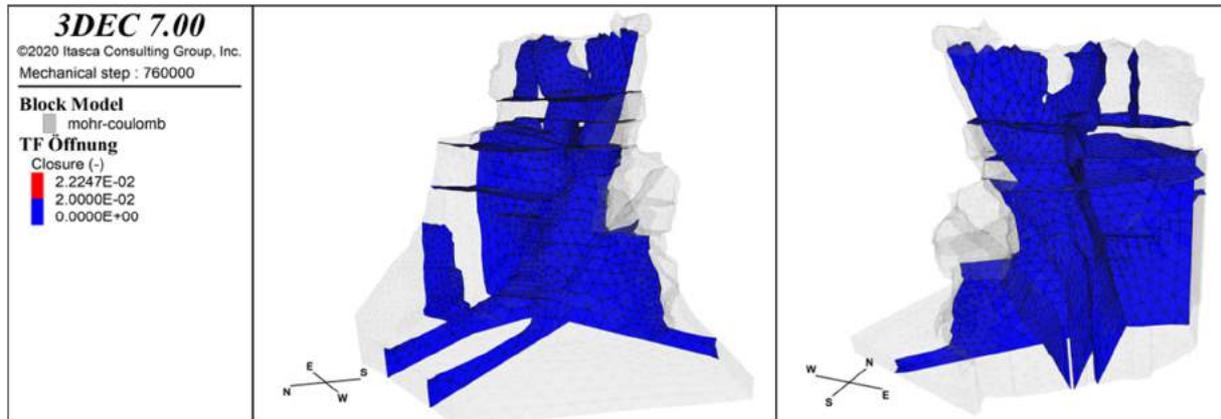


Abb. V.4: Sz. 4 – TF-Öffnung nicht reduzierter Bereiche (RF 5.25)

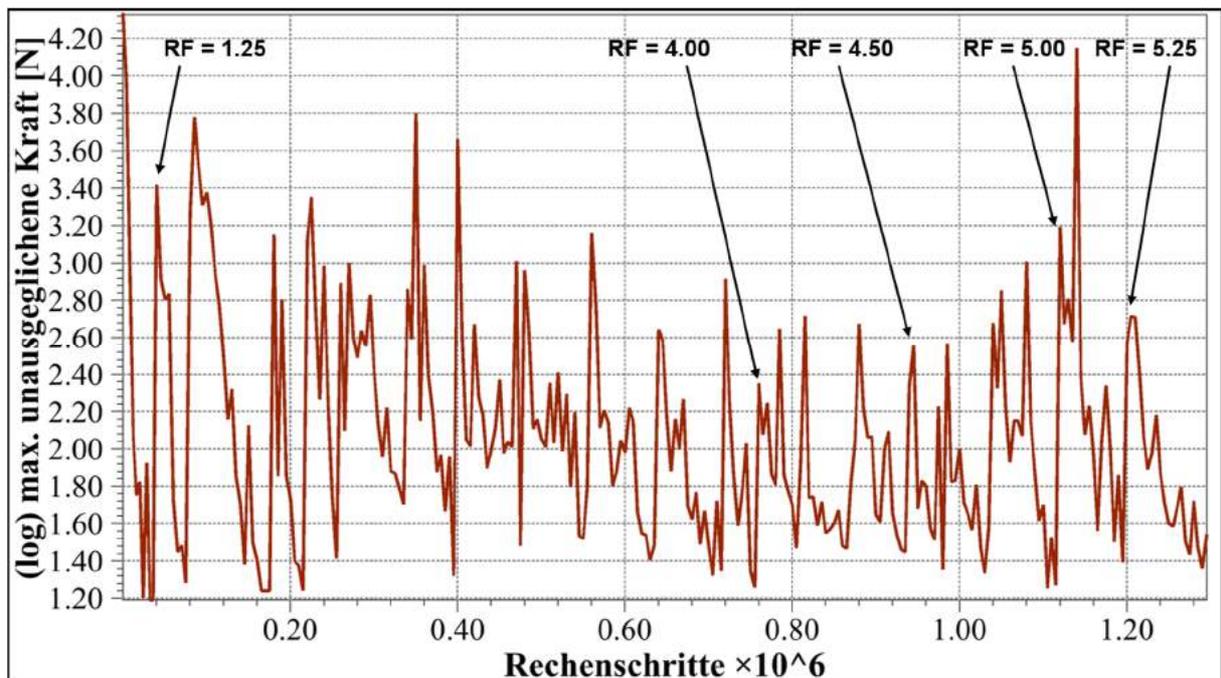


Abb. V.5: Sz. 4 – max. unausgeglichene Kraft für Variante 2

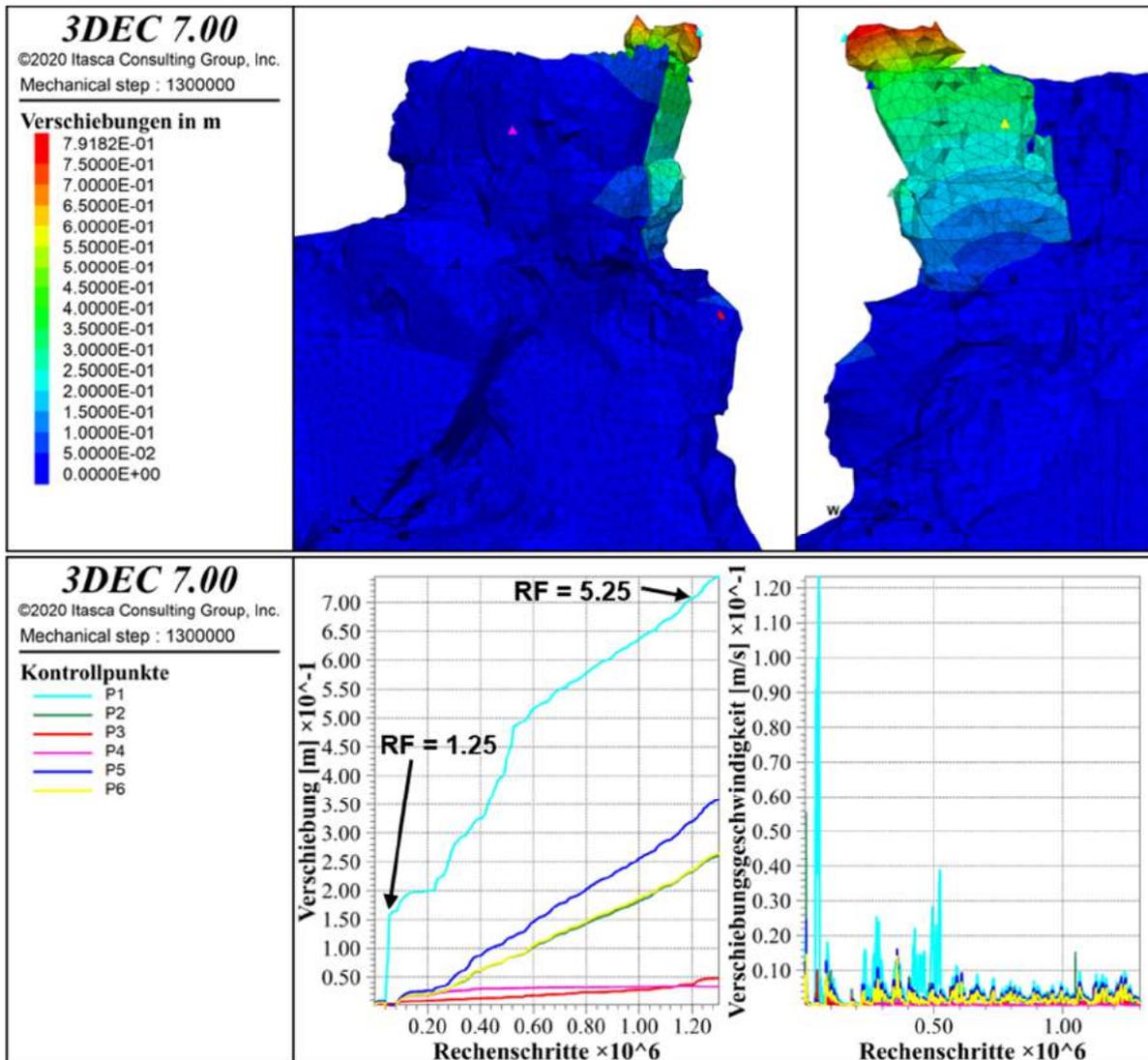


Abb. V.6: Sz. 4 – Ergebnis der Reduktion (RF 5.25) Variante 2

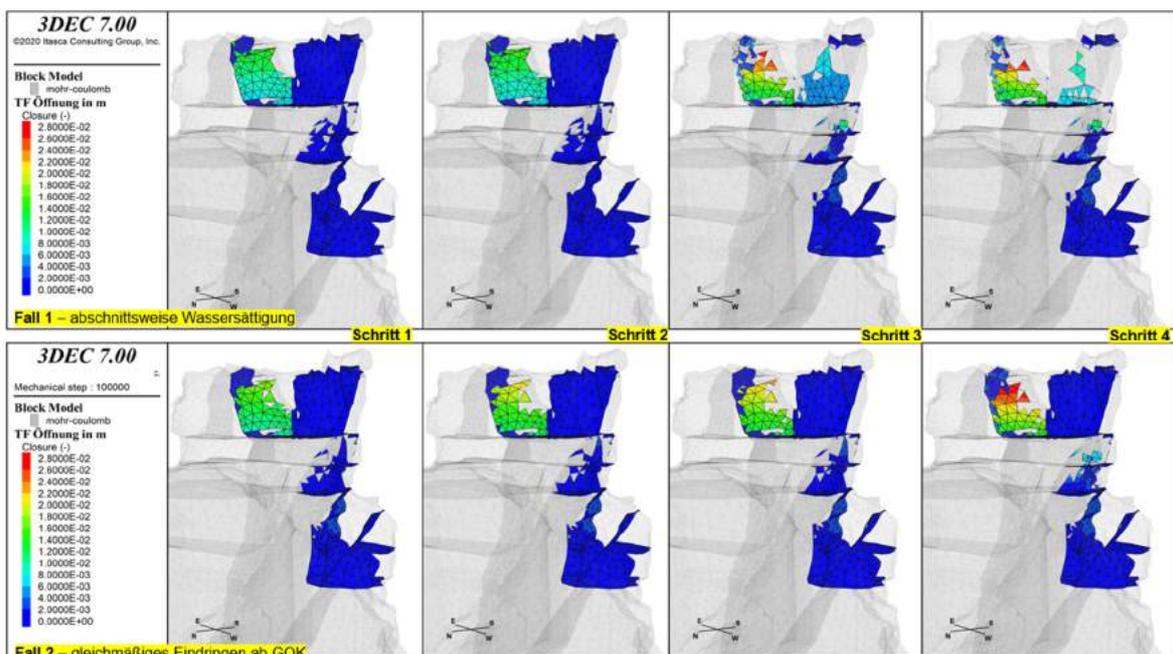


Abb. V.7: Sz. 5 – TF-Öffnung reduzierter Bereiche aller Schritte für Fall 1 und 2

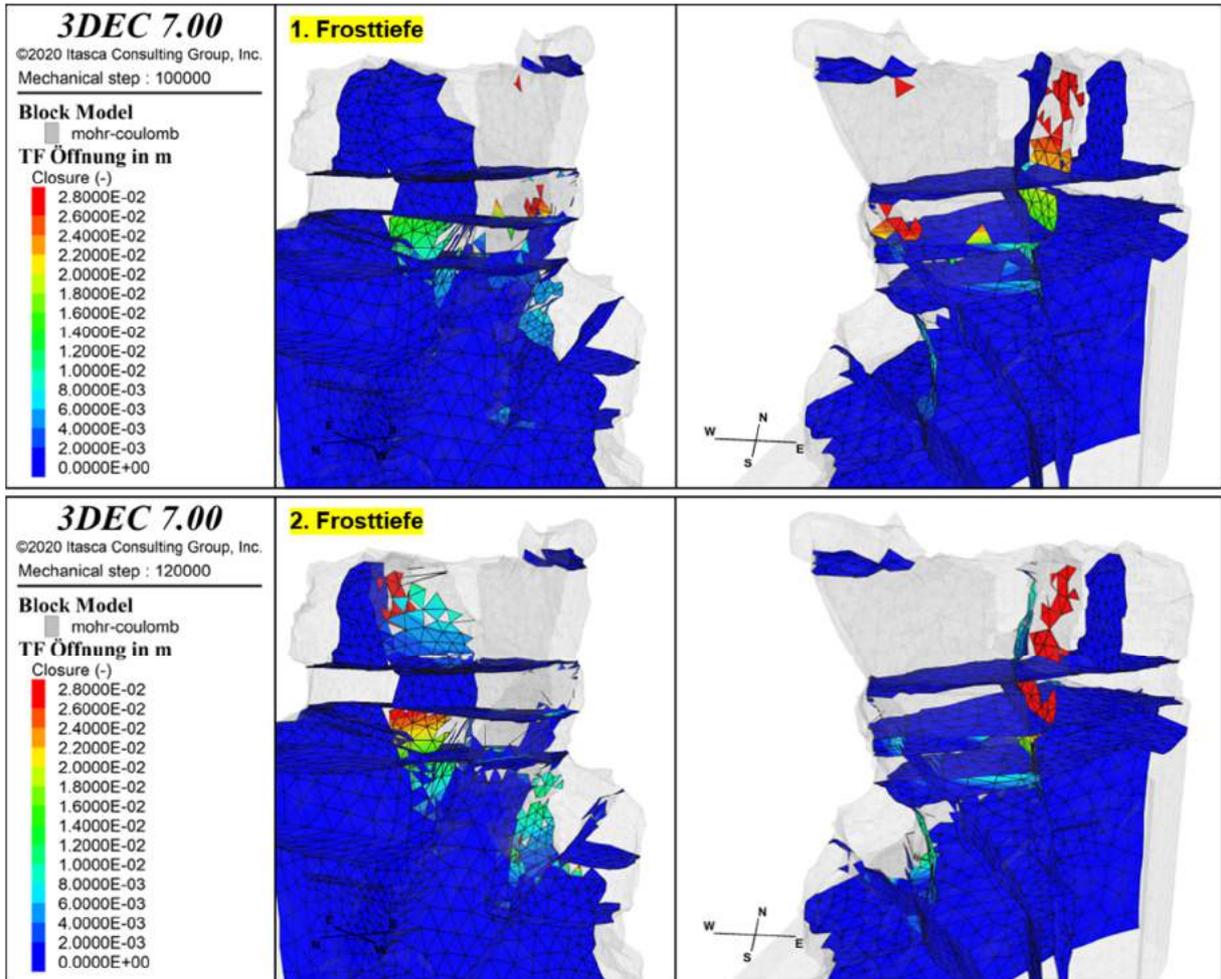


Abb. V.8: Sz. 6 – Versagenszustand aller TF bei 50 kPa Frostsprengdruck