



Fakultät: Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Studiengang: Bachelor Geologie/Mineralogie (BGM)

THEMA DER BACHELORARBEIT:

Untersuchungen mit PFC2D zu möglichem Felsversagen aufgrund von Wurzeldruck und Windbelastung auf Bäume am Beispiel der Postelwitzer Wände

TITLE OF THE BACHELOR THESIS:

Analysis of the potential rock failure due to root pressure and wind pressure on trees by means of PFC2D at the Postelwitzer Wände

bearbeitet von: Lena-Sophie Franz

zur Erlangung des akademischen Grades: Bachelor of Science

1. Prüfer / Gutachter: Dr. rer. nat. Martin Herbst

2. Prüfer / Gutachter: Dr.-Ing. Jörn Wichert

Übergabetermin des Bachelorarbeitsthemas: 14.02.2019

Abgabetermin der Bachelorarbeit: 30.05.2019

Prof. Dr. O. Elicki
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Dr. rer. nat. M. Herbst
Prüfer/Gutachter

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit 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.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Zusammenhang eines Sturmereignisses und einem resultierenden, möglichen Felsversagen. Dabei wird der Einfluss von erhöhten Wurzeldruck im Gestein auf die Felsstabilität untersucht. Der erhöhte Wurzeldruck ergibt sich aus der Windbelastung eines Baumes, welcher in den Trennflächen im Fels verwurzelt ist. Die Untersuchung der Thematik erfolgt am Beispiel des ehemaligen Steinbruchgebietes der Postelwitzer Wände im Elbsandsteingebirge. Die Geologie und Geometrie des Projektgebietes werden in der Arbeit vorgestellt und liefern die Kennwerte für numerische Simulationen.

Mit Hilfe des Itasca Programms PFC sind 2D-Modelle erstellt und numerische Berechnungen zur Windbelastung durchgeführt worden. Es konnte im Windversuch nachgewiesen werden, dass der Fels selbst intakt bleibt und ein Versagen entlang der Trennflächen durch Lockerungen um die Wurzel und Bruchbildung innerhalb der Schichtflächen auftritt. In Abhängigkeit der Lage der Bäume und der Schichtflächenneigung finden Verschiebungen von Gesteinsblöcken unterschiedlicher Größe, sowie Fragmentbildung entlang der Felskante statt. Aufgrund der 2D-Darstellung einer 3D-Wirklichkeit sind die numerischen Berechnungen ausschließlich als eine erste Annäherung an die natürlichen Gegebenheiten anzusehen. Dennoch konnte bestätigt werden, dass erhöhter Wurzeldruck durch Windbelastung auf Bäume einen Einfluss auf mögliches Felsversagen nimmt.

Abstract

This study deals with the connection of storm events and resulting, possible rock failure. Therefore, the increased root pressure on the surrounding rock effecting the rock stability is investigated. The rising root pressure results from the trees wind load. The tree itself is enrooted in the discontinuities located in the rock mass.

The investigation of the topic is based on the example of the former quarry area of the Postelwitzer Wände in the Elbsandsteingebirge. The geology and geometry of the project area are presented in the study and provide parameters required for numerical simulations.

With the use of the Itasca program PFC, 2D models have been created and numerical calculations of wind load have been performed. In the wind test it could be proven, that the rock itself remains intact and failure occurs along the discontinuities due to loosening around the root and fracturing within the bedding planes. According to the trees position and the inclination of the bedding planes, displacements of different sized boulders occurs as well as fragment formation along the edge of the rock.

Based on a 2D illustration for a 3D reality, the numerical calculations should be considered as a first approach to the natural conditions. Nevertheless, it could be confirmed that increased root pressure according to wind load on trees causes possible rock failure.

I. Inhaltsverzeichnis

II. Abbildungsverzeichnis.....	3
III. Tabellen- und Formelverzeichnis	5
1. Einleitung und Motivation.....	6
2. Kenntnisstand und angewandte Methodik.....	8
3. Geologie	9
3.1 Regionalgeologischer Überblick Elbsandsteingebirge	9
3.2 Geologie der Postelwitzer Wände	11
3.3 Bergmännische Gewinnung des Werksteins an den Postelwitzer Wänden	13
3.4 Einfluss von Pflanzenwurzeln auf Felsstabilität.....	15
4. Gesteinstechnische Kennwerte Elbsandstein, Trennflächen- und Holzparameter....	16
5. Numerische Berechnung	18
5.1 Grundlagen zum Programm PFC.....	18
5.2 Modellierung und Arbeitsschritte.....	20
5.2.1 Einheiten	20
5.2.2 Kalibrierung Materialverhalten.....	21
5.2.3 Profil-Geometrien	23
5.2.4 Initialmodell.....	26
5.2.5 Windversuche	27
6. Ergebnisse und Interpretation.....	29
7. Zusammenfassung und Ausblick	44
IV. Literatur- und Quellenverzeichnis.....	46
V. Anhang	48
A Darstellungen der Kalibrierung	48
B Abbildungen der Verschiebung.....	49
C Diagramm der Porosität.....	52
D Abbildungen der Kontaktbindung und Bruchbildung	53

II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Lage des Projektgebietes mit offizieller Einteilung der Felsmassive im NW der Postelwitzer Wände nach KLENGEL & RICHTER (1987)	7
Abb. 3-1:	Schichtenfolge und morphologisches Profil in den Schrammsteinen nach Friedrich Lamprecht (2 1/2 fach überhöht) (RAST 1959)	11
Abb. 3-2:	Schematische Darstellung einer Wandfällung im Querschnitt (KUTSCHKE 2000)	14
Abb. 4-1:	Wachstum einer Birke an der senkrechten Felswand mit Verwurzelung in einer verwitterten Schichtfläche	17
Abb. 5-1:	Probenkörper zum Material „Postaer Sandstein“ nach dem Druckversuch; maximale Druckfestigkeit von 40 MPa	22
Abb. 5-2:	Darstellung der Geometrien von Modell 1 (Profil 1)	25
Abb. 5-3:	Darstellung der Geometrien von Modell 3 (Profil 2)	25
Abb. 5-4:	Erstelltes Windprofil in Anlehnung an Orkan „Friederike“	28
Abb. 6-1:	Diagramm der Spannungsänderung in x- und y-Richtung im Modell 2 während Windbelastung	29
Abb. 6-2:	Darstellung der Verschiebungen im Modell 2 nach 25 s Windlast und Diagramme der x- bzw. y-Verschiebung von drei ausgewählten Punkten im System	30
Abb. 6-3:	Vergleichsbild der Verschiebungen im Modell 1 nach 3 s und nach 8 s Windlast	31
Abb. 6-4:	Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 25 s Windlast im Modell 2	31
Abb. 6-5:	Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 25 s Windlast im Modell 6	32
Abb. 6-6:	Vektordarstellung der Verschiebungen im Modell 2 nach 25 s Windlast	33
Abb. 6-7:	Verschiebungsdiagramme in x- und y-Richtung von ausgewählten Beobachtungspunkten im Modell 2	34
Abb. 6-8:	Änderungen der Porosität von Fels und Baum im Modell 2 während des Windversuchs	35
Abb. 6-9:	Zustand der Kontaktbindungen im Modell 2 nach 25 s Windlast	36
Abb. 6-10:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 25 s Windlast im Modell 2	37

Abb. 6-11:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 20 s Windlast im Modell 4	38
Abb. 6-12:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 22 s Windlast im Modell 5	38
Abb. 6-13:	Anzahl der Brüche im Modell 2 und Modell 5 während des Windversuchs	39
Abb. 6-14:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 8 s Windlast im Modell 1	40
Abb. 6-15:	Darstellung der Kontaktbindungen vor und nach 8 s Windlast im Modell 1	41
Abb. 6-16:	Fragmente im Modell 1 nach 3 s Windlast	41
Abb. 6-17:	Fragmente im Modell 1 nach 8 s Windlast	41
Abb. 6-18:	Anzahl der Brüche im Windprofil bis zu einer Belastungszeit von 31 s	43
Abb. 6-19:	Darstellung der Brüche im Windprofil nach 31 s Belastung	43
Abb. A-1:	Probenkörper zum Material „Kiefer“ nach dem Druckversuch; maximale Druckfestigkeit: 7,7 MPa	48
Abb. A-2:	Probenkörper zum Material „Postaer Sandstein mit Trennfläche“ nach dem Zugversuch; maximale Zugfestigkeit: 2 kPa	48
Abb. B-1:	Verschiebungen im Modell 3 nach 20 s Windlast	49
Abb. B-2:	Verschiebungen im Modell 4 nach 20 s Windlast	49
Abb. B-3:	Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 22 s Windlast im Modell 5	50
Abb. B-4:	Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 25 s Windlast im Modell 7	50
Abb. B-5:	Verschiebungen in x-Richtung im Modell 2 nach 25 s Windlast	51
Abb. B-6:	Verschiebungen in y-Richtung im Modell 2 nach 25 s Windlast	51
Abb. C-1:	Änderungen der Porosität von Fels und Baum im Modell 7 während des Windversuchs	52
Abb. D-1:	Zustand der Kontaktbindungen im Modell 6 nach 25 s Windlast	53
Abb. D-2:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 25 s Windlast im Modell 6	53
Abb. D-3:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 25 s Windlast im Modell 7	54
Abb. D-4:	Darstellung der Brüche im Gebirge nach 20 s Windlast im Modell 3	54

III. Tabellen- und Formelverzeichnis

Tab. 4-1:	Parametereigenschaften für die Simulation in PFC ^{2D}	17
Tab. 5-1:	Verwendete Einheiten in PFC ^{2D}	20
Tab. 5-2:	Modellübersicht mit entsprechenden Merkmalen	24
Formel (1):	Formel zur Berechnung der Windkraft F_w	27
Formel (2):	Formel zur Berechnung des Staudrucks q	27

1. Einleitung und Motivation

In den letzten Jahrzehnten ist in der Gesellschaft der Eindruck entstanden, dass die Anzahl der Extremwetterereignisse ansteigt. Dazu zählen etwa starke Stürme, wie das Orkantief Friederike vom Januar 2018. Die hohen Windgeschwindigkeiten können dabei zu großen wirtschaftlichen Schäden an Schutzgütern und Infrastruktur führen.

Besonders im Zusammenhang mit Bäumen stellen Stürme große Gefahren dar. Die enorme Windkraft auf einen Baum wirkt, über die Wurzel, weiter unter der Geländeoberkante.

Aus diesem Grund wirft sich die Frage auf, inwiefern erhöhter Wurzeldruck bei Windbelastung einen Einfluss auf mögliches Felsversagen nimmt, wenn Bäume in Trennflächen auf Felsen verwurzelt sind. Die vorliegende Arbeit setzt sich mit dieser Thematik auseinander.

Als Wurzeldruck ist dabei die Kraft definiert, die der Baum auf das umgebende Gestein ausübt. Das Ziel der Arbeit besteht darin, die ablaufenden Prozesse im Gebirge während der Windbelastung auf einen Baum darzustellen und zu erfassen.

Zur Anwendung kommen dazu numerische Simulationen im ITASCA-Programm PFC.

Mit Hilfe einiger 2D-Modelle sollen unterschiedliche Szenarien in Bezug auf die Felskanten- und Trennflächengeometrie sowie die Lage der Bäume erstellt werden. Anschließend folgen numerische Berechnungen zur Windbelastung auf Bäume. Die Geometrien der Modelle orientieren sich dabei an zwei Profilen der Postelwitzer Wände.

Die Postelwitzer Wände zählen zu dem ehemaligen Steinbruchgebiet bei Postelwitz im Elbsandsteingebirge. Das auch als Sächsische Schweiz bezeichnete Gebirge liegt im Südosten von Sachsen und folgt weitestgehend dem Verlauf der Elbe.

Die Postelwitzer Steinbrüche liegen rechtseibisch auf einer Strecke von etwa 2,5 km entlang der Elbe zwischen Bad Schandau im Nordwesten und Schmilka im Südosten. Exakte Begrenzungspunkte sind dabei im NW der Zahnsgrund bei Postelwitz (vgl. Abbildung 1-1) und im SO die „Kleine Bastei“ bei Schmilka.

Aus der Abbildung 1-1 wird die offizielle Einteilung der Felsmassive der Postelwitzer Wände ersichtlich. Durch die blauen Kästchen sind verschiedenen Abschnitte dargestellt.

Im ersten Teil der Arbeit geht aus den geologischen und bergbaulichen Grundlagen die Eignung der Postelwitzer Wände als Untersuchungsgebiet hervor. Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen Pflanzen und Festgestein dargelegt. Für die numerische Simulation wichtige Kennwerte und Parameter werden im darauffolgenden Kapitel zusammengetragen.

Neben einer kurzen Einführung in das Programm PFC folgt im zweiten Teil der Arbeit die Beschreibung der Simulationsmethodik. Anschließend werden die erzielten Ergebnisse der numerischen Berechnungen präsentiert und ausgewertet.

Am Ende der Arbeit findet eine Zusammenfassung der Resultate statt. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf weitere Untersuchungsmöglichkeiten gegeben.



Abb. 1-1: Lage des Projektgebietes mit offizieller Einteilung der Felsmassive im NW der Postelwitzer Wände nach KLENGEL & RICHTER (1987) (Karte: QUANTUM GIS)

2. Kenntnisstand und angewandte Methodik

Recherchen während der Arbeit ergaben, dass zu der Fragestellung, inwiefern sich steigender Wurzeldruck auf die Felsstabilität auswirkt, wenn Wind als externer Faktor an den Baum angreift, bislang keine ausreichenden Untersuchungen oder Simulationen vorliegen.

Allgemein bekannt ist jedoch eine physikalische Verwitterung von Boden und Fels durch Pflanzen. Somit kann z.B. Wurzelwachstum von Bäumen im Festgestein verantwortlich für Sprengung und Abtrennung von Blöcken aus dem Gesteinsverband sein. Die Ursache dafür liegt in dem Wurzeldruck, den der Baum auf das umliegende Gestein ausübt.

Weiterhin haben Wetterereignisse der letzten Jahre, wie der Orkan „Kyrill“ 2007 oder „Friederike“ 2018 gezeigt, dass starke Stürme Windwurf verursachen können. Dabei kommt es, aufgrund eines hohen Belastungsdruckes, zur Entwurzelung von Bäumen. Die resultierende Hebelwirkung führt zur Herauslösung einzelner Steine und Blöcke.

Der Prozess, der während eines Sturmereignisses im Fels rund um die Wurzeln eines Baumes stattfindet, soll in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht werden.

Zur Anwendung kommt dabei eine numerische Simulation mit Hilfe des Programmes PFC, welches allgemein als zweidimensionale und dreidimensionale Ausführung vorliegt. Aufgrund der einfacheren und schnelleren Handhabung wird in der Arbeit das 2D-Modell bevorzugt.

Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass ein 3D-Modell die Gegebenheiten in der Natur genauer erfassen könnte, wie z.B. die Tiefenwirkung der Wurzel in der horizontalen Ebene. Zudem erfolgt im 2D-Modell keine Betrachtung der Trennflächen parallel zur Profilinie, welche allerdings zu einer erweiterten natürlichen Unterteilung des Gebirges führen und somit für das Lösen von Blöcken eine wesentliche Rolle spielen.

Zur Gewinnung erster Erkenntnisse und Aussagen zur Fragenstellung ist vorerst eine Vereinfachung der natürlichen Gegebenheiten durch ein 2D-Modell vollkommen ausreichend.

3. Geologie

3.1 Regionalgeologischer Überblick Elbsandsteingebirge

Das Elbsandsteingebirge entwickelte sich zu Beginn der Oberkreide im Mesozoikum mit dem Vorstoß des Kreidemeeres in die heutige obere Elbtalzone. Dabei wurde eine schmale Verbindung zwischen den Meeren Boreal im Norden und Tethys im Süden 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 beschrieben, welche sich von NW im Gebiet um Meißen bis ins Elbsandsteingebirge im SO erstreckt. Im Süden erfolgt ein direkter Übergang der sächsischen Kreide in die Nordböhmische Kreide (PÄLCHEN & WALTER 2011).

Die Störungslinie der Lausitzer Überschiebung trennt die Elbtalkreide im NO vom Granit des Lausitzer Blocks. Im SW erfolgt ein Übergang zu metamorphen Gesteinen des Osterzgebirges und des Elbtalschiefergebirges (RAST 1959). Die kretazischen Sedimente der Elbtalkreide sind Ablagerungen aus dem Unter-Cenomanium bis Mittel-Coniacium und liegen diskordant präkambrischen und paläozoischen Einheiten auf. Die Oberkreide in Sachsen kann Mächtigkeiten von 550 m bis 650 m erreichen (PÄLCHEN & WALTER 2011).

Innerhalb der Elbtalkreide werden drei Fazies unterschieden. Dazu zählt eine schluffig-kalkige Fazies, eine Übergangsfazies und eine rein sandige Fazies (PÄLCHEN & WALTER 2011). Ablagerungen der schluffig-kalkigen Fazies stehen hauptsächlich im Dresdner Elbtalkessel an. Die Mergel und Schluffsteine sind fossilreich. Ablagerungen der sandigen Fazies kommen im Hauptgebiet des Elbsandsteingebirges vor und sind eher fossilarm (RAST 1959). Während die schluffig-kalkigen Sedimente in tieferen Meeresbereichen fern dem Ufer abgelagert wurden, zeigen die sandigen Sedimente den ufernahen Flachwasserbereich an (KUTSCHKE 2000).

Das Elbsandsteingebirge entspricht v.a. der sandigen Fazies der Elbtalkreide und wird vom Cenomanium bis Coniacium von fünf Formationen aufgebaut (PÄLCHEN & WALTER 2011). Erste Ablagerungen der sächsischen Kreide erfolgten vor 100,5 Ma. Im Elbsandsteingebirge beginnt die Abfolge mit fluviatilen Sandstein-Tonstein-Wechselagerungen des Unter- und Mittel-Cenomaniums. Die Transgression aus SE erreicht im tieferen Ober-Cenomanium das Elbsandsteingebirge, wodurch es zu Ablagerung von ersten marinen Sandsteinen kommt. Die fluviatilen und marinen Einheiten werden zur Niederschöna-Formation zusammengefasst. Im Ober-Cenomanium dauert die Transgression weiter an und schafft eine Verbindung von Boreal im Norden und Tethys im Süden. Es kommt zur Ablagerung von Transgressionskonglomeraten und marinen Sandsteinen. Die Gesteine enthalten Fossile der flachmarinen Fauna beider Meere. Die Ablagerungen des mittleren und höheren Ober-Cenomaniums im Elbsandsteingebirge werden als Oberhäslich-Formation bezeichnet. Ab dem Turonium ist das Elbsandsteingebirge von verschiedenen Transgressions- und Regressionsphasen geprägt. Die Einheiten sind bis in das Coniacium marin und werden

aufgrund unterschiedlicher Charakteristika in drei unterschiedliche Formationen unterteilt. Die Schmilka-Formation enthält Ablagerungen vom Unter- bis tieferen Mittel-Turonium, gekennzeichnet durch marine Quarzsandsteine mit Schrägschichtungen. Die Strukturen im Gestein weisen auf eine strömungsgeprägte Sedimentation mit Strömung aus SO hin. Im Unter-Turonium erfolgte die maximale Überflutung der Elbtalzone. Die Postelwitz-Formation umfasst das Mittel-Turonium. Es treten gebankte, überwiegend fein- bis mittelkörnige Quarzsandsteine mit unterschiedlicher Mächtigkeit auf. Kleinbankige Einheiten kommen als Hangverflachungen vor, großbankige sind wandbildend. Das Bindemittel der Gesteine ist schluffig-tonig oder kieselig. Die jüngsten Ablagerungen der Oberkreide im Elbsandsteingebirge sind aus dem höheren Mittel-Turonium bis Mittel-Coniacium und werden als Schrammstein-Formation bezeichnet. Die marinen Quarzsandsteine sind massiv und fossilarm, sowie überwiegend großbankig und wandbildend, weshalb die Bezeichnung als Quadersandsteine gängig ist (PÄLCHEN & WALTER 2011).

3.2 Geologie der Postelwitzer Wände

Die geologischen Einheiten der Postelwitzer Steinbrüche können aus der Abbildung 3-1 entnommen werden und umfassen die Sandsteinstufen a und b, sowie die Schichtfuge $\alpha 3$. Zugeordnet werden die Ablagerungen der Postelwitz-Formation dem Mittel-Turonium. Die Sandsteine bilden Bänke unterschiedlicher Mächtigkeit aus. Ursache dafür sind wasserstauende Zwischenlagen von tonigem Material im Sandstein, wodurch eine besonders starke Auswitterung und damit verbunden eine Bankung begünstigt wird. Kleinbankige Bereiche weisen eine hohe und großbankige eine geringe Dichte an Tonlagen auf. Die Mächtigkeit der Zwischenlagen reicht von wenigen Millimetern bis mehrere Dezimeter. Der Unterschied von tonreicher Zwischenlage und definierter Schichtfuge (u.a. $\alpha 3$) der Formation besteht darin, dass die Leithorizonte im ganzen Profil aushaltend sind (RAST 1959).

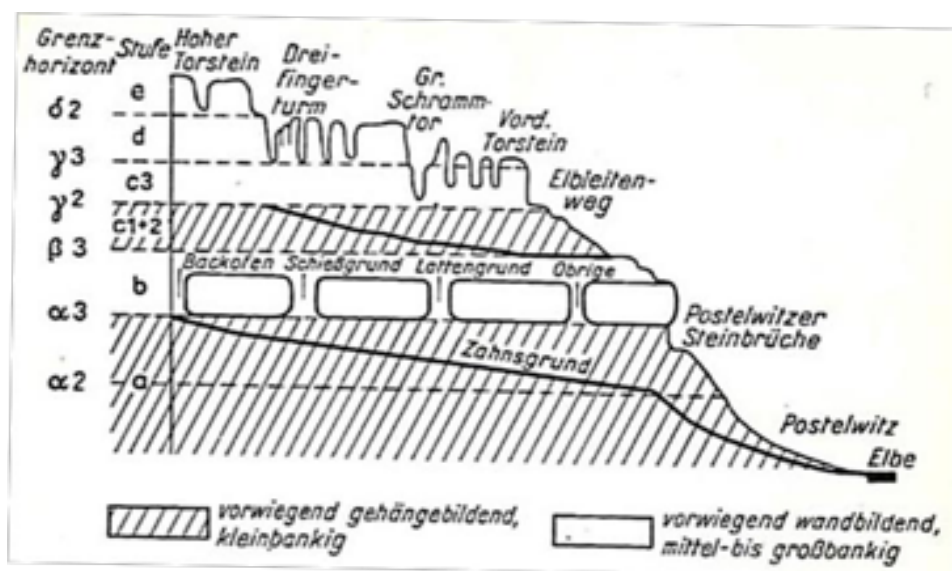


Abb. 3-1: Schichtenfolge und morphologisches Profil in den Schrammsteinen nach Friedrich Lamprecht (2 1/2 fach überhöht) (RAST 1959)

Im Liegenden der Postelwitzer Wände befindet sich die Sandsteinstufe a, welche überwiegend klein- bis mittelbankig ausgebildet ist und im Steinbruchbetrieb als untere Werkbank bezeichnet wurde (LEMME & ENGELMANN 1959). Innerhalb der Stufe a variieren die Quarzsandsteine farblich, sowie in der Art des Bindemittels und der Körnung (RAST 1959), weshalb eine weitere Unterteilung in a1, a2 und a3 erfolgt. In den Postelwitzer Steinbrüchen aufgeschlossen sind die oberen Bereiche der Sandsteinstufe a. In der morphologischen Ausbildung sind, aufgrund der geringmächtigen Bankung, Hangverflachungen mit Überrollungen typisch (PÄLCHEN & WALTER 2011).

Zwischen den Stufen a und b befindet sich die dünnplattige, tonreiche Schichtfuge $\alpha 3$. Der Leithorizont ist von grauer Farbe, kann aber auch grünlich oder rötlich gefärbt vorkommen und stellt eine wasserundurchlässige Schicht dar (LEMME & ENGELMANN 1959). Die Schichtfuge kann Mächtigkeiten von bis zu 2 m erreichen und ist tief ausgewittert (PÄLCHEN & WALTER

2011). Charakteristisch ist die Bildung von Überhängen. Entlang der Postelwitzer Wände verläuft α_3 nicht horizontal, sondern steigt von NW nach SO um rund 30 m an (RAST 1959). Die Sandsteinstufe b, im Topbereich der Postelwitzer Steinbrüche, ist mittel- bis großbankig und wird, in Bezug auf die grobe Bankung, auch als Quadersandstein bezeichnet. Im Unterschied zu der Sandsteinstufe a ist die Stufe b wandbildend. Entlang der Wände kann Wabenverwitterung im Quadersandstein auftreten (PÄLCHEN & WALTER 2011). LEMME & ENGELMANN (1959) führen auf, dass die Stufe b von den Steinbrechern als obere Werkbank angesprochen worden ist.

Allgemein sind die Sandsteine der Postelwitzer Wände von weiß-gelblicher oder gräulicher Farbe. Rotfärbungen deuten auf einen Eisengehalt hin. Lieferant für Eisen ist das im Gestein enthaltene Mineral Pyrit. Eisenhaltige Lagen können dem Sandstein eine gebänderte oder geflammte Erscheinung geben (RAST 1959). Dominiert werden die Postelwitzer Wände von fein- bis mittelförnigem Quarzsandstein mit schluffig-tonigen oder kieseligen Bindemittel. Fossile sind im Gestein vorhanden, treten jedoch weniger häufig auf. Von Bedeutung ist das Vorkommen von Inoceramen, wodurch die Gesteine eindeutig dem Mittel-Turonium zugeordnet werden können (PÄLCHEN & WALTER 2011). Die Schichtflächen des Sandsteins zeigen strömungsbedingte Strukturen wie Groß- und Kleinrippel, sowie fossile Grabgänge und sprechen damit für flachmarine Verhältnisse während der Ablagerung (RAST 1959).

Im Elbsandsteingebirge verursachen Trennflächen im Gestein eine in etwa horizontale Gliederung durch Schichtflächen und eine vertikale Gliederung durch Klüfte.

Allgemein handelt es sich bei Trennflächen um Diskontinuitäten, entlang denen sich die mechanischen Eigenschaften im Gestein verändern. Aus dem Zusammenspiel der Eigenschaften von Gestein und Trennflächen ergeben sich die Gebirgseigenschaften.

Die Kluffflächen der Postelwitzer Wände entsprechen dem orthogonalen Kluffflächensystem des Elbsandsteingebirges. Tektonische Prozesse verursachten durch Druck- und Zugspannungen eine Klüftung des Sandsteins während der Lausitzer Überschiebung in der höheren Oberkreide und der Heraushebung des Erzgebirges im Tertiär (PÄLCHEN & WALTER 2011).

Für das Gebirge werden 2 Hauptkluftsysteme unterschieden, welche in etwa senkrecht zueinander orientiert sind. Das Lausitzer Hauptkluftsystem verläuft parallel zur NW-SO streichenden Lausitzer Störung. Weiterhin treten abgelenkte Richtungen auf wie beispielsweise NNW streichende Klüfte. Das erzgebirgische Hauptkluftsystem verläuft parallel zur Störungslinie des Erzgebirgsabbruchs mit einem Streichen von NO-SW. Abgelenkte Richtungen kommen auch im erzgebirgischen Kluftsystem vor (RAST 1959).

Klüfte stellen Gangbarkeiten für Niederschlagswässer im Gestein dar, wodurch Verwitterungs- und Erosionsprozesse begünstigt werden. Die relativ hohe Dichte der Zerklüftung und Schichtflächen im Elbsandsteingebirge ist Ursache für die Herausbildung der typischen Landschaftsformen wie Ebenheiten, Wände und Schluchten (RAST 1959).

3.3 Bergmännische Gewinnung des Werksteins an den Postelwitzer

Wänden

Zahlreiche bereits aufgegebene Sandsteinbrüche, wie etwa die Postelwitzer Steinbrüche, sind in der Sächsischen Schweiz anzutreffen. Während erste Brucharbeiten vermutlich schon im 11. Jh. begannen, entwickelte sich der Betrieb bei Postelwitz erst Ende des 16. Jh. und umfasst etwa 35 Brüche (KUTSCHKE 2000). Eine hohe Nachfrage an Sandstein durch den Auf- und Ausbau der Residenzstadt Dresden begünstigte die Anlage eines Steinbruchbetriebes in Postelwitz. Auch über die Stadtgrenzen hinaus wurde das Baumaterial verkauft. Verwendung fand der Elbsandstein unter anderem bei der Errichtung der Kreuzkirche in Dresden, des Reichsgerichtes in Leipzig und des Brandenburger Tors in Berlin (RAST 1959). Laut LEMME & ENGELMANN (1959) war der gleichkörnige Sandstein aus den Postelwitzer Brüchen, aufgrund seiner hohen Festigkeit und Verwitterungsresistenz, als Baumaterial besonders gefragt.

Im 19. Jh. galten die Postelwitzer Steinbrüche noch als das größte zusammenhängende Steinbruchgebiet im Elbsandsteingebirge, jedoch wurde der Betrieb bereits 1907 eingestellt. Dafür ausschlaggebend war der Bau der Talstraße entlang der Elbe, welcher ein Verbot der gängigen Abbaumethode aus Sicherheitsgründen mit sich zog. Abbaumethode im Postelwitzer Steinbruchgebiet war ausschließlich das Wandfällern (KUTSCHKE 2000).

Das Fällern von Wänden galt als gängige Gewinnungsmethode in der Sächsischen Schweiz. Man nutzte das nahezu orthogonale Kluftsystem und trennte Sandsteinquader mehrerer Meter Höhe entlang der Klüfte, unter Steinbrechern als Loose bezeichnet, ab (KUTSCHKE 2000).

Die Abbildung 3-2 verdeutlicht die einzelnen Stadien (Bild A-C) der Wandfällung. Bild A zeigt die Situation vor dem Beginn der Fällungsarbeiten. Generell können die Steinbrüche grob in drei Abschnitte unterteilt werden. Die zu fällende Sandsteinwand erreicht Höhen von bis zu 70 m. An dessen Basis liegt die horizontale, einige Meter breite Bruchsohle. An die Bruchsohle wiederum schließt sich die zur Elbe hin geneigte Husche an (KUTSCHKE 2000).

Im Bild B dargestellt sind die Vorarbeiten zur Wandfällung. Beim Wandfällern wird die zu fällende Steinwand an der Bruchsohle horizontal bis zur nächsten senkrechten Loose unterhöhlt und somit das eigenständige Abtrennen vom Massiv, aufgrund des Eigengewichtes des Quaders, eingeleitet. Der zwischen Bruchsohle und Stein entstandene Raum wird als Hohle bezeichnet und kann bis zu 2 m hoch sein. Die Unterhöhung der Wand war mit einem Arbeitsaufwand von mehreren Wochen bis Jahre verbunden. Das Hohlmachen fand bevorzugt an tonigen, leicht zu bearbeitenden Zwischenlagen im Sandstein statt. Diese werden als Faulböden bezeichnet. Das Einbauen von Holz- oder Steinstützen, sogenannten Steifen, in die Hohle, wie in Bild B verdeutlicht, verhindert den vorzeitigen Abbruch des Steinquaders und ermöglicht, nach Erreichen der Loose, das gezielte Fällern der Wand (vgl. Bild C). Dazu werden die haltenden Holzsteifen weggebrannt oder weggeschlagen, die Steinsteifen weggesprengt.

Um den Aufschlag beim Fallen zu dämpfen und einem Zerschneiden in kleinste Bruchstücke entgegen zu wirken, wird vor der Wand auf der Bruchsohle ein Horzelbett angelegt (vgl. Bild B und C). Dieses ist eine ca. 1 m starke Aufhäufung von Steinschutt. Es folgt die Aufarbeitung der gefällten Wand und der Transport der zerkleinerten Blöcke über die Husche von der Bruchsohle zum Elbtal (KUTSCHKE 2000).

Mit dieser Abbaumethode wurden in den Postelwitzer Steinbrüchen große Wände von über 60 m Höhe und bis zu 60 m Länge gefällt. Die Hohle reichte 10-20 m, selten 30 m tief in das Massiv. Das Volumen eines gefällten Sandsteinquaders lag in der Regel bei 1 000 - 5 000 m³, konnte jedoch auch bis zu 30 000 m³ betragen. Im Jahre 1823 belief sich die Zahl der Steinbrecher auf 107 in insgesamt 15 Brüchen des Postelwitzer Gebietes. Vorzeitig gefallene Wände konnten zur Verschüttung oder Tötung von Steinbrechern führen. Das bekannteste Beispiel eines Postelwitzer Wandsturzes ereignete sich am 25. Januar 1862 bei dem 24 Steinbrecher verschüttet und von rund 200 Helfern nach 52 Stunden lebend geborgen wurden. Mitte des 20. Jahrhunderts trat ein generelles Verbot des Wandfällens aus Sicherheitsgründen in Kraft (KUTSCHKE 2000).

Die Abbaumethode des Wandfällens führte zur Herausbildung von künstlich geschaffenen Überhängen. In auflässigen Steinbrüchen wie den Postelwitzer Steinbrüchen stellen die Überhänge ein hohes Risiko für Massenbewegungen wie Felsstürze dar (PÄLCHEN 2009).



Abb. 3-2: Schematische Darstellung einer Wandfällung im Querschnitt (KUTSCHKE 2000)

3.4 Einfluss von Pflanzenwurzeln auf Felsstabilität

Der Einfluss von Pflanzenwurzeln auf die Felsstabilität wird, anhand der resultierenden Wirkung, in einen positiven und einen negativen Einfluss unterschieden.

Besonders Pflanzen mit einem geringen Anspruch an die Standortbedingungen können sich auf Felsen ansiedeln. Eine wichtige Voraussetzung für Bäume ist dabei ein ausgeprägtes Wurzelsystem. Die Wurzeln bedecken den Fels oft weitreichend an der Oberfläche und nutzen Wegsamkeiten wie Schichtflächen und Klüfte im Gestein für das Wurzelwachstum. Folglich ergibt sich der positive Einfluss auf die Felsstabilität dadurch, dass mehrere Wurzeln gelockertes Gestein umschließen und beisammenhalten (JAHN 1988). Erosion wird dadurch vermindert und die Stabilität des Felses steigt (REUTER et al. 1992).

Der negative Einfluss des Wurzelwachstums im Felsen ist die Gesteinslockerung selbst, welche sowohl chemisch als auch physikalisch erfolgen kann. Chemische Zersetzung des Gesteins findet z.B. durch die Abgabe von Kohlensäure aus der Wurzel statt (JAHN 1988). Die Stabilität wird verringert und die Morphologie des Felses verändert (REUTER et al. 1992).

Für die vorliegende Arbeit von Bedeutung ist die mechanische Gesteinslockerung und Gesteinssprengung bedingt durch Baumwurzeln und Wind. Erste vegetationsbedingte Mikrorisse im Fels entstehen durch das Wachstum der Wurzeln in den Trennflächen. Das anhaltende Dickenwachstum führt zu einem steigenden Wurzeldruck und einer Verbreiterung der Rissöffnung (GRUNER & BRÖNNIMANN 2016). Es bilden sich Spalten im Gestein aus, welche durch das Wurzelwachstum kontinuierlich auseinander gepresst werden (JAHN 1988). Die Risse im Gestein setzen zwar die Felsstabilität herab (GRUNER & BRÖNNIMANN 2016), sind jedoch ohne weitere einwirkende Faktoren wie Wasser und Wind weniger ausschlaggebend für Felsversagen, wie z.B. einen Steinschlag.

Mit dem Wurzelwachstum in Spalten erhöhen sich die inneren Druckkräfte im umliegenden Gesteinsverband. Zusätzlich auf die Pflanze einwirkende Kräfte, wie durch angreifenden Wind hervorgerufen, werden über die Wurzeln in den Felsen weitergeleitet. Die Baumbewegung im Wind verursacht eine Hebelwirkung im Wurzelbereich und eine Zunahme des Druckes in den Trennflächen (HERBST et al. 2014). Dabei werden einzelne Fragmente aus dem Gesteinsverband abgesprengt und der Fels aufgelockert. Es kommt zu einem Felsversagen, wenn die Fragmente durch einen Initialanstoß in Bewegung geraten. Entlang von steilen Felshängen kann sich somit ein Steinschlag entwickeln. Bei der Entwurzelung von Bäumen, sogenannten Windwürfen, als Folge von Sturmereignissen ist der Wind- und Wurzeldruck so hoch, dass große Gesteinsblöcke aus dem Fels herausgehoben werden können (JAHN 1988). Die Hauptrolle im Elbsandsteingebirge spielt laut RAST (1959) die chemische Verwitterung. Im Zusammenhang mit der Vegetation tritt physikalische Verwitterung, z.B. durch Wurzelsprengung, eher zweitrangig und hauptsächlich unterstützend auf.

4. Gesteinstechnische Kennwerte Elbsandstein, Trennflächen- und Holzparameter

Die gesteinstechnischen Kennwerte des Elbsandsteins sind angelehnt an die Untersuchungen von GRUNERT (2007). Aufgrund unterschiedlicher Merkmale und Eigenschaften wird der Elbsandstein in zwei Typen unterteilt. Den Postaer Sandstein und den Cottaer Sandstein.

Bei beiden Typen handelt es sich um Quarzsandsteine mit einem Quarzanteil von >90%. Daher liegen die Unterschiede der zwei Sandsteintypen vor allem im Feinkornanteil begründet. Der Cottaer Sandstein zeigt einen hohen Feinkornanteil, welcher den Porenraum füllt. Hingegen ist der Feinkornanteil im Postaer Sandstein geringer und der Porenraum offen. Folglich ist die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins besser als die des Cottaer Typs. Beide Sandsteintypen weisen eine hohe Frostbeständigkeit auf, unterscheiden sich jedoch in ihren Festigkeiten. Der Cottaer Typ besitzt eine geringe Gesteinsfestigkeit und wird als weicher Sandstein angesprochen. Die Festigkeit des Postaer Sandsteins ist höher und führt zur Bezeichnung als harten Elbsandstein (KUTSCHKE 2000).

Die Quarzsandsteine der Postelwitzer Wände zählen zum Postaer Sandsteintyp. In Abhängigkeit der Ergebnisse von GRUNERT (2007) für den Postaer Sandstein erfolgte, für die Modellrechnungen, eine Kalibrierung des Gesteins auf eine Druckfestigkeit von 40 MPa bei einem Lasteintrag senkrecht zur Schichtung während lufttrockener Verhältnisse.

Die Postelwitzer Wände werden horizontal durch Schichtflächen und vertikal durch Klüfte gegliedert. Zur Vereinfachung der Modellrechnungen wurden Schichtflächen und Klüfte zusammengefasst und erhielten dieselben Trennflächenparameter. Nach KONIETZKY et al. (2009) wurde die Kalibrierung der Trennfläche auf eine einaxiale Zugfestigkeit von 2 kPa, bei einer Kohäsion von ebenfalls 2 kPa, durchgeführt.

Laut KUTSCHKE (2000) sind nach dem Ende der Steinbrucharbeiten entlang der Postelwitzer Wände Anpflanzungen von Kiefer und Fichte durchgeführt worden. Auf dem Plateau im Top der Sandsteinstufe b sind gegenwärtig, neben verschiedenen Sträuchern, an Baumarten besonders Birke und Kiefer anzutreffen.

Aus der Abbildung 4-1 wird ersichtlich, dass Bäume mit einem dünnen Stamm, wie etwa die Birke, an den senkrechten Felswänden der Postelwitzer Steinbrüche wachsen können. Die Verwurzelung liegt dabei in den herausgewitterten Schichtfugen.



Abb. 4-1: Wachstum einer Birke an der senkrechten Felswand mit Verwurzelung in einer verwitterten Schichtfläche, NW-Gebiet der Postelwitzer Steinbrüche (Foto: L. Franz, 17.11.2018)

In Anbetracht der Baumvorkommen in den Postelwitzer Steinbrüchen orientieren sich die Holzparameter, wie Stammmächtigkeit, Wurzeltiefe und Druckfestigkeit, für die Simulation mit PFC-2D an der Baumart Kiefer.

Die Holzfestigkeit ist abhängig von der Faserrichtung. Generell wachsen die Fasern längs zur Stammachse. Für die Kiefer beträgt die Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung 47 N/mm^2 und quer zur Faserrichtung $7,7 \text{ N/mm}^2$ (LIPSMEIER 1994). Im PFC-Modell vorgesehen ist ein angreifender Wind senkrecht zur Stammwuchsrichtung, sodass die Kalibrierung des Baumes auf eine Druckfestigkeit von $7,7 \text{ MPa}$ ($1 \text{ N/mm}^2 = 10^6 \text{ Pa}$) erfolgte.

Die in der Arbeit verwendeten Festigkeitswerte sind, für das entsprechende Material, in der Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tab. 4-1: Parametereigenschaften für die Simulation in PFD^{2D}

Material	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit
Postaer Sandstein	40 MPa	-
Kiefer	7,7 MPa	-
Trennfläche	-	2 kPa

5. Numerische Berechnung

Mit Hilfe einer numerischen Berechnung wird in der vorliegenden Arbeit der Zusammenhang zwischen Felsstabilität und dem Wurzeldruck eines Baumes bei angreifendem Wind simuliert. Dazu erfolgt die Anwendung der diskontinuierlichen Berechnungsmethode, auch Distinct-Element Method (DEM) genannt.

Eingeführt wurde die DEM 1971 von CUNDALL (zitiert nach ITASCA 2015) zur Auswertung gesteinsmechanischer Probleme. Acht Jahre später fand eine Erweiterung auf bodenmechanische Anwendungen statt (CUNDALL & STRACK 1979, zitiert nach ITASCA 2015). Kennzeichnend für die DEM ist, dass sowohl finite Translations- als auch Rotationsbewegung und eine vollständige Abtrennung diskreter Elemente zugelassen wird. Gleichzeitig werden neue Kontakte während des Rechnungsprozesses automatisch erkannt. Die Definition der DEM ergibt sich aus den genannten Merkmalen und ist 1992 von CUNDALL und HART verfasst worden (zitiert nach ITASCA 2015).

5.1 Grundlagen zum Programm PFC

Das Programm „Particle Flow Code“ gibt es als zweidimensionale (PFC^{2D}) und als dreidimensionale (PFC^{3D}) Anwendung seit 1994. Neben der Rechenmaschine selbst beinhaltet PFC weiterhin eine graphische Benutzeroberfläche, über welche der Anwender mit dem Programm arbeitet. Die Befehlseingabe erfolgt dabei direkt über programmspezifische Kommandos oder mit Hilfe der internen Programmiersprache FISH (ITASCA 2015).

Ein PFC Modell ist eine spezielle, vereinfachte Ausführung der DEM und beschränkt auf starre Partikel. Das Partikel wird als „Ball“ bezeichnet. Dessen grundlegende Form entspricht einer Scheibe in 2D und einer Kugel in 3D. Simuliert werden Bewegung und Interaktion von Partikeln mit definierter Masse, Form und Größe. Die Bewegung der starren Körper erfolgt prinzipiell unabhängig voneinander, jedoch ist eine Interaktion über Kontakte möglich. Innere Kräfte und Momente führen zur Interaktion der Partikel, welche paarweise an den Kontakten auftritt (ITASCA 2015).

Den Zusammenhang von Partikelbewegung und verursachender Kraft liefern die Newton'schen Bewegungsgesetze. Im statischen Gleichgewicht befindet sich das Kräftesystem, wenn keine Bewegung der Partikel erfolgt, d.h. die Summe der inneren und äußeren Kräfte im System gleich Null ist. Herrscht ein Ungleichgewicht im Kräftesystem versuchen die Partikel über Ausgleichsbewegungen dieses aufzuheben (ITASCA 2015).

Der physikalische Kontakt (mechanical contact) von Partikeln wird durch eine verschwindend kleine Fläche beschrieben, sodass allgemein von einem Kontaktpunkt ausgegangen wird. Die Teilchenwechselwirkungsgesetze bestimmen das mechanische Verhalten an den Kontakten und führen zur Aktualisierung der inneren Kräfte und Momente. In Abhängigkeit der Stärke der

Kontaktkräfte kann an den Kontaktpunkten eine gegenseitige Überlappung der starren Partikel auftreten, die den herrschenden inneren Abstoßungskräften zwischen den überlappenden Partikeln entspricht (ITASCA 2015).

Vereinfacht wird das Verhalten an den Kontakten durch eine finite Steifigkeit charakterisiert. Komplexeres Verhalten kann modelliert werden, indem die Partikel an den Kontaktpunkten miteinander verbunden werden. Eine Kontaktfestigkeit zwischen zwei Partikeln wird als „Bond“ bezeichnet. Die Bondfestigkeit liefert die maximale Kraftkomponente bis zu welcher die Bindung stabil ist. Dabei werden Kohäsions-, Zugfestigkeits- und Reibungseinflüsse berücksichtigt. Das bedeutet, dass Bonds brechen können, wenn eine Komponente der Bindungsfestigkeit überstiegen wird. Dadurch kommt es zur Ausbildung von Rissen und Unterteilung des Materials in Fragmente (ITASCA 2015).

Bei der Modellierung von Feststoffen, wie z.B. Gesteinen, wird allgemein zwischen zwei Bindungsverhalten, den „Contact-bond“ und „Parallel-bond“, unterschieden. Für beide dient eine Art simulierter Klebstoff als Bindung zwischen den Partikeln. Der Klebstoff bei den Contact-bonds wirkt auf einen sehr kleinen Kontaktpunkt. Hierbei ist ausschließlich Kraftübertragung möglich. Bei Parallel-bonds wird zwischen den Partikeln weiteres Material simuliert, sodass der Klebstoff über eine Kontaktfläche wirkt. Neben der Kraftübertragung ist hier auch eine Momentübertragung möglich (ITASCA 2015).

Weitere für PFC wichtige Elemente sind sogenannte „Walls“. Ein Wall ist eine starre Oberfläche, bestehend aus einer oder mehreren „Facets“. In 2D wird ein Facet durch eine Linie, in 3D durch eine dreieckige Seite beschrieben. Facets beeinflussen sich nicht gegenseitig und können unabhängig voneinander unterschiedliche Eigenschaften zugeordnet bekommen. Ebenfalls möglich ist eine Überlappung der einzelnen Wandelemente (facets). Eine der Funktionen von Walls ist die Begrenzung des numerischen Modells, was z.B. Anwendung bei dem Generieren von Balls findet. Zusätzlich kann der Einsatz als bewegliche Randbedingungen erfolgen. Walls können Translations- und Rotationsbewegungen ausführen bei entsprechender Zuweisung von Translations- bzw. Winkelgeschwindigkeit (ITASCA 2015). Während der Simulation mit PFC wird ein Zeitschritt bestimmt, der vom Systemzustand abhängig ist. Die DEM liefert eine dynamische Lösung der Newton'schen Bewegungsgesetze, welche zur Berechnung der zeitlichen Entwicklung des Systems in PFC genutzt wird. Über die Bewegungsgesetze werden während des Rechenvorgangs neue Positionen jedes Partikels und daraus die neu wirkenden Kräfte bestimmt (ITASCA 2015).

Schlussendlich dient das PFC Modell v.a. zur Simulation des mechanischen Verhaltens eines Gesamtsystems unter Stress, welches beschrieben wird durch die Bewegung der einzelnen Partikel, sowie die an den Kontaktpunkten der Partikel wirkenden Kräfte. Das Gesamtsystem setzt sich aus einer Ansammlung von starren Partikeln zusammen, welche an Kontaktpunkten miteinander in Wechselwirkung stehen. Die Ansammlungen können unterschiedliche Formen

aufweisen. Unter Anwendung der DEM kann in einem PFC Modell somit ein ungebundenes (lockeres) oder gebundenes (festes) Material künstlich geschaffen werden (ITASCA 2015). Ein PFC-Modell stellt lediglich eine starke Abstraktion der Realität dar. Weiterhin haben die Kontakte grundsätzlich keinen oder nur sehr geringen Bezug zum Modellierungsgegenstand. Daher müssen die Kontaktparameter generell in einem ersten Schritt kalibriert werden, bevor die eigentliche Modellierungsarbeit des Gesamtsystems beginnen kann (vgl. Kapitel 5.2.2).

5.2 Modellierung und Arbeitsschritte

Die Modelle und Simulationen der vorliegenden Arbeit sind ausschließlich mit PFC^{2D} bearbeitet worden. Die 2D-Ausführung wurde aufgrund der leichteren Handhabung als erste Annäherung an die Lösung der Fragestellung, inwiefern die Felsstabilität durch Wurzeldruck bei angreifendem Wind beeinflusst wird, der 3D-Ausführung bevorzugt.

5.2.1 Einheiten

Das Programm PFC gibt keine Einheiten vor, sodass diese vom Bearbeiter festzulegen sind. Dabei muss beachtet werden, dass die Einheiten untereinander in festem Zusammenhang stehen.

Die Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die wichtigsten physikalischen Größen sowie das entsprechende Formelzeichen und die verwendete Einheit.

Tab. 5-1: Verwendete Einheiten in PFC^{2D}

physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit
Länge	l	[m]
Dichte	ρ	[kg/m ³]
Geschwindigkeit	v	[m/s]
Beschleunigung (Gravitation)	a (g)	[m/s ²]
Kraft	F	[N]=[kg*m/s ²]
Spannung Normalspannung Scherspannung	σ τ	[Pa]=[N/m ²]

5.2.2 Kalibrierung Materialverhalten

Vor der Zusammenstellung des Gesamtsystems und dem Beginn der Berechnungen sind im ersten Arbeitsschritt die im Modell vorkommenden Materialien (Fels, Trennfläche und Baum) auf entsprechende Parameter eingestellt worden.

Die Kalibrierung eines bestimmten Materialverhaltens in PFC wird als „inverse modeling“ bezeichnet. Dabei wird, an einem Probenkörper, ein Test so lange mit veränderlichen Eingabeparametern wiederholt, bis das gewünschte Endergebnis erzielt werden konnte. Das Endergebnis spiegelt das Materialverhalten wider. Anschließend werden die ermittelten mikromechanischen Parameter des jeweiligen Materials auf das Gesamtsystem übertragen und für die Simulation verwendet (ITASCA 2015).

In Abhängigkeit der Materialart wurden unterschiedliche Vorversuche durchgeführt. Das zu erzielende Materialverhalten von Fels, Trennfläche und Baum ist beschrieben in Kapitel 4.

Die Kalibrierung des Felses auf die gesteinstechnischen Kennwerte des Postaer Sandsteins erfolgte mit Hilfe eines einaxialen Druckversuchs. Dazu wurde ein Probenkörper der Abmessung 4 m Breite mal 8 m Höhe modelliert. Die generierten Bälle sind an den Kontakten über Linear Parallel Bonds fest miteinander verbunden worden. Der Probenkörper umfasst keine Trennflächen und stellt ausschließlich das Material „Elbsandstein“ dar. Jeweils an der Basis und im Topbereich der Probe wurde ein horizontaler Wall erzeugt um eine Begrenzung vorzugeben. Anschließend bekamen beide Wände eine Geschwindigkeit und eine Bewegungsrichtung zugewiesen. Die Bewegung erfolgte aufeinander zu, sodass der Probenkörper zusammengedrückt wurde. Mehrere Belastungsversuche mit unterschiedlichen Eingabeparametern des mikromechanischen Verhaltens sind bis zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit von 40 MPa durchgeführt worden.

In der Abbildung 5-1 dargestellt ist das Endergebnis des Druckversuchs zum Material Fels. Zu erkennen sind die Risse (cracks) in der Probe, welche in der Abbildung als schwarze Linien gezeigt werden. In diesen Bereichen sind die Bälle nicht mehr miteinander in Verbindung. Die Risse verdeutlichen das Materialversagen, hervorgerufen durch ein Übersteigen der Bindungsfestigkeit. Lineare Bindungen (rote Linien) im Probenkörper zeigen die Stellen, an denen die Bälle miteinander in Kontakt stehen. Jedoch wurde die durch den Klebstoff simulierte, feste Bindung gelöst. Das in der Abbildung enthaltene Diagramm zeigt das Erreichen der maximalen Druckfestigkeit von 40 MPa an.

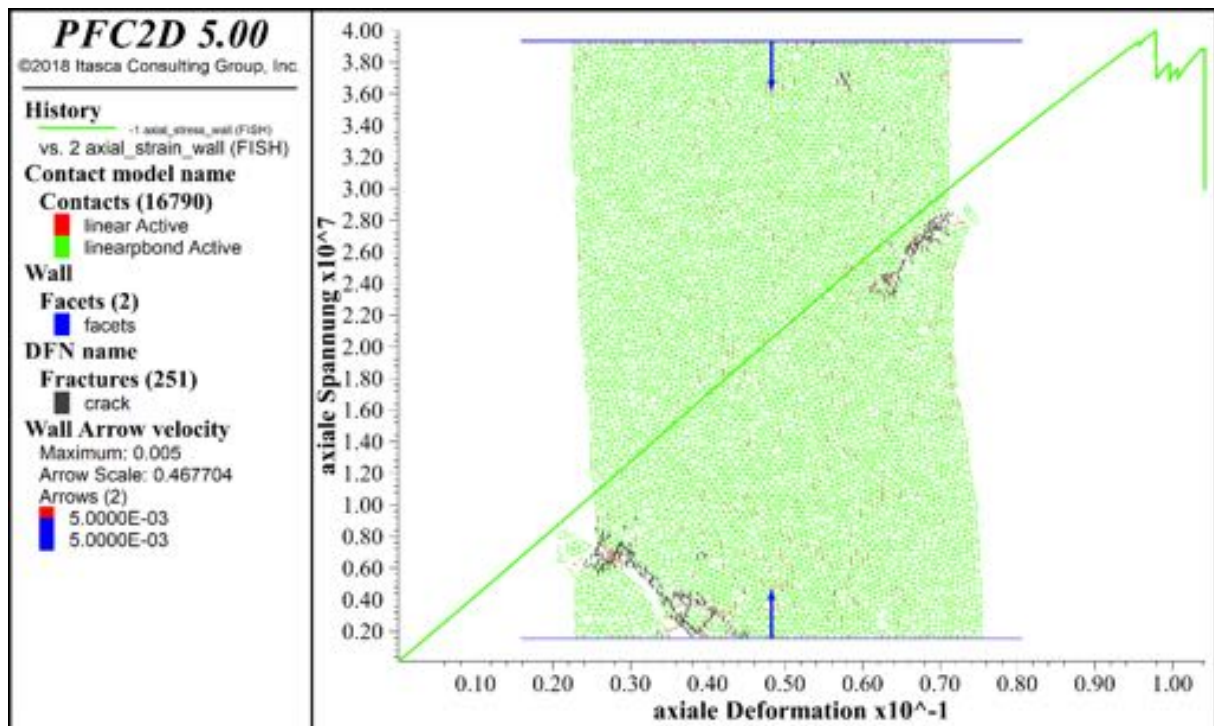


Abb. 5-1: Probenkörper zum Material „Postaer Sandstein“ nach dem Druckversuch; maximale Druckfestigkeit von 40 MPa

Die mikromechanischen Parameter des Baumes sind ebenfalls über einen Druckversuch zugewiesen worden. Der Ablauf erfolgte analog dem oben beschriebenen Druckversuch vom Material Fels. In Anlehnung an eine Stammdicke der Kiefer von 60 cm ist der Probenkörper mit den Maßen 0,6 m x 1,2 m kleiner als der Fels-Probenkörper. Die Materialparameter wurden auf eine maximale Druckfestigkeit von 7,7 MPa eingestellt (vgl. Anhang, Abbildung A-1). Für die Trennflächenkalibrierung erhielt der Probenkörper des Felses auf halber Höhe (4 m) eine durchgehende, horizontal gelegene Trennfläche von 10 cm Mächtigkeit. Die Bälle der Trennfläche wurden mit dem Smooth-Joint Kontaktmodell gebunden. Das Kontaktmodell simuliert eine ausgedehnte Grenzfläche zwischen den Partikeln, an der eine feste Bindung oder Reibung möglich und das Verhalten im Makroskopischen linear elastisch ist (ITASCA 2015). Kalibriert wurde mit Hilfe eines einaxialen Zugversuchs, bei dem die mikromechanischen Parameter der Trennfläche auf eine maximale Zugfestigkeit von 2 kPa eingestellt worden. Die Umsetzung des gleichmäßigen Ziehens an dem Probenkörper ist nicht durch Wände möglich. Deshalb wurden jeweils die Bälle der obersten Reihe im Topbereich und die der untersten Reihe an der Basis zu einer Gruppe zusammengefügt, um eine Art Griff für die angreifende Zugkraft zu schaffen. Anschließend bekamen beide Gruppen eine Bewegungsrichtung und eine Geschwindigkeit zugewiesen, sodass die Bewegung voneinander weg erfolgte. Der Probenkörper wurde dadurch auseinandergezogen. Ein Versagen fand lediglich innerhalb der Trennfläche statt, wo es zur Ausbildung von Rissen kam (vgl. Anhang, Abbildung A-2).

5.2.3 Profil-Geometrien

Um Simulationen mit PFC^{2D} zur Felsstabilität bei Wurzeldruck und angreifendem Wind durchführen zu können, erfolgt als nächster Arbeitsschritt die Modellierung des Gesamtsystems. Das Gesamtsystem besteht aus dem Felsen mit horizontal und vertikal orientierten Trennflächen und dem Baum, welcher in den Trennflächen verwurzelt ist.

Insgesamt wurden zwei Profile bearbeitet. Die Geometrie der Felskanten ist von KLENGEL und RICHTER (1987) erfasst und auf die vorliegende Arbeit angewandt worden.

Die verschiedenen Steinbruchabschnitte der Postelwitzer Wände sind in der Abbildung 1-1 (unter Kapitel 1) dargestellt. In der vorliegenden Arbeit wurde für das Profil 1 die Felskantengeometrie des Abschnittes Nr. 7 und für Profil 2 die des Abschnittes Nr. 9a genutzt. Beide Profile liegen im NW-Gebiet der Postelwitzer Wände nahe dem Beginn bzw. Ende der Steinbrüche. Die Felswände sind nach SW orientiert, d.h. die Profillinie mit Abbildung der Felskante verläuft von NO nach SW. Im PFC-Modell wird die Profillinie auf der x-Achse und die Höhe des Profils auf der y-Achse abgebildet.

Die vertikalen Trennflächen beschreiben das Kluftsystem im Elbsandsteingebirge. Aufgrund der 2D-Darstellung in PFC werden die NO-SW-streichenden Klüfte im Modell nicht erfasst, da diese parallel zur Profillinie verlaufen. Hingegen sind die NW-SO-streichenden Kluftflächen von Bedeutung und erscheinen im Modell. Die Neigung der Klüfte beträgt genau 90° zur Geländeoberkante. Beide Profile zeigen eine hangparallele Klüftung. Der Kluftabstand von Profil 1 liegt zwischen 16-22 m und von Profil 2 zwischen 8-9 m (KLENGEL & RICHTER 1987). Die horizontalen Trennflächen umfassen die Schichtfugen im Sandstein und sind in den Profilen von KLENGEL und RICHTER (1987) nicht dokumentiert worden. In Anlehnung an die Felskantengeometrie und der generell stärkeren Herauswitterung entlang der Schichtfugen (vgl. Kap. 3.2) erfolgte eine abgeschätzte Zuordnung der Lage der horizontalen Trennflächen. Neben Modellen mit horizontalen Trennflächen wurden, bei gleichbleibender Austrittsstelle an der Felswand, weitere mit einer Neigung der Schichtfugen um 5°, 10° bzw. 15° erstellt.

In Abhängigkeit der Trennflächengeometrie wurden insbesondere die in Schichtfugen reichenden Wurzeln des Baumes an das jeweilige Modell angepasst. Für alle Modelle gleich ist die Stammhöhe von 5 m und die Wurzeltiefe von 10 m unter der Geländeoberkante.

In der Tabelle 5-2 sind die wichtigsten Merkmale zu den Geometrien der einzelnen Modelle gelistet. Insgesamt sind 7 Modelle erstellt worden.

Tab. 5-2: Modellübersicht mit entsprechenden Merkmalen

Modellname	Merkmale
Modell 1	- Felskanten geometrie von Profil 1 - Profilhöhe: 17,05 m - Profillänge: 15,50 m - horizontale Schichtflächen - eine vertikale Trennfläche mit Baum TF: 1,00 m Abstand zur oberen Felskante
Modell 2	- Felskanten geometrie von Profil 2 - Profilhöhe: 17,55 m - Profillänge: 13,70 m - horizontale Schichtflächen - 2 vertikale Trennflächen, Baum in 1. TF 1. TF: 2,05 m Abstand zur oberen Felskante 2. TF: 10,05 m Abstand zur oberen Felskante
Modell 3	- Felskanten geometrie von Profil 2 - Profilhöhe: 17,55 m - Profillänge: 23,70 m - horizontale Schichtflächen - 3 vertikale Trennflächen, Baum in 2. TF 1. TF: 2,05 m Abstand zur oberen Felskante 2. TF: 9,05 m Abstand zur oberen Felskante 3. TF: 17,05 m Abstand zur oberen Felskante
Modell 4	- Felskanten geometrie von Profil 2 - Profilhöhe: 17,55 m - Profillänge: 23,70 m - horizontale Schichtflächen - 3 vertikale Trennflächen, 2 Bäume jeweils in 1. TF und 2. TF 1. TF: 2,05 m Abstand zur oberen Felskante 2. TF: 10,05 m Abstand zur oberen Felskante 3. TF: 17,05 m Abstand zur oberen Felskante
Modell 5	- Felskanten geometrie von Profil 2 - Profilhöhe: 17,55 m - Profillänge: 13,70 m - Schichtflächen um 5° in Richtung Felskante geneigt - 2 vertikale Trennflächen, Baum in 1. TF 1. TF: 2,05 m Abstand zur oberen Felskante 2. TF: 10,05 m Abstand zur oberen Felskante
Modell 6	- Felskanten geometrie von Profil 2 - Profilhöhe: 17,55 m - Profillänge: 13,70 m - Schichtfläche um 10° in Richtung Felskante geneigt - 2 vertikale Trennflächen, Baum in 1. TF 1. TF: 2,05 m Abstand zur oberen Felskante 2. TF: 10,05 m Abstand zur oberen Felskante
Modell 7	- Felskanten geometrie von Profil 2 - Profilhöhe: 17,55 m - Profillänge: 13,70 m - Schichtfläche um 15° in Richtung Felskante geneigt - 2 vertikale Trennflächen, Baum in 1. TF 1. TF: 2,05 m Abstand zur oberen Felskante 2. TF: 10,05 m Abstand zur oberen Felskante

5. Numerische Berechnung

Die Felskantenengeometrie von Profil 1 wird nachfolgend in Abb. 5-2 (Darstellung 1. Modell) und die von Profil 2 in Abb. 5-3 (Darstellung 3. Modell) verdeutlicht.

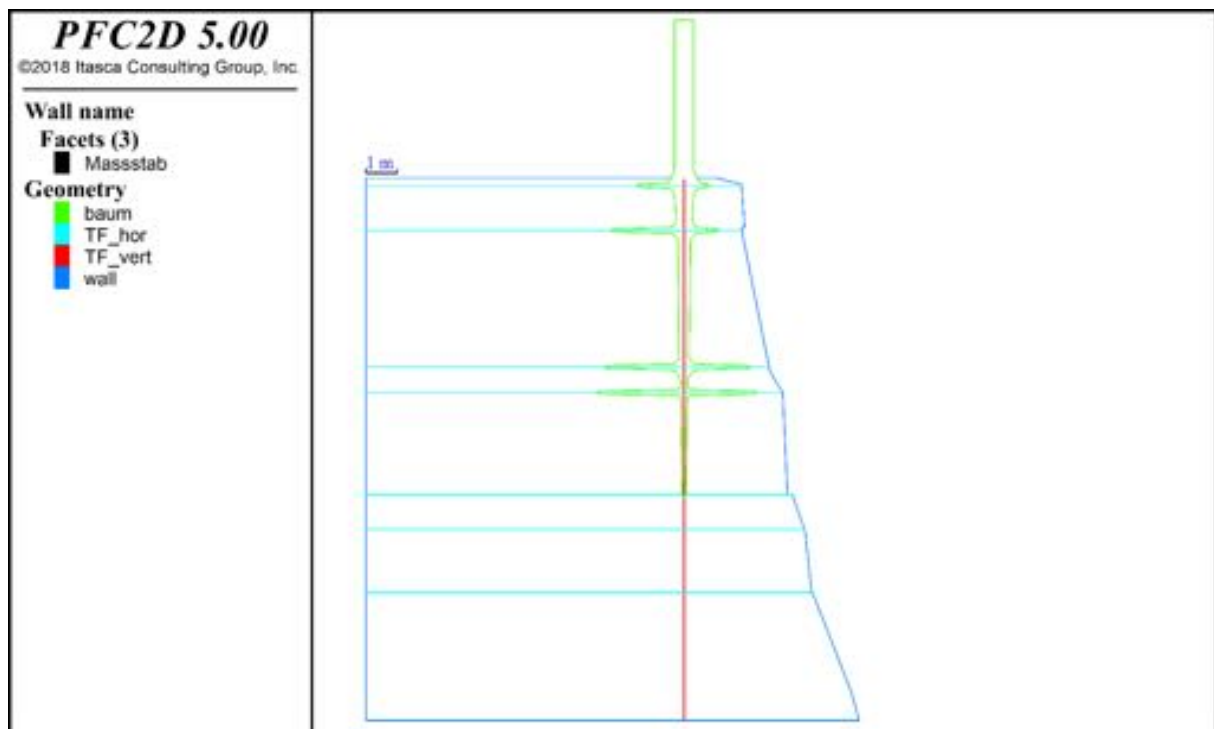


Abb. 5-2: Darstellung der Geometrien von Modell 1 (Profil 1)

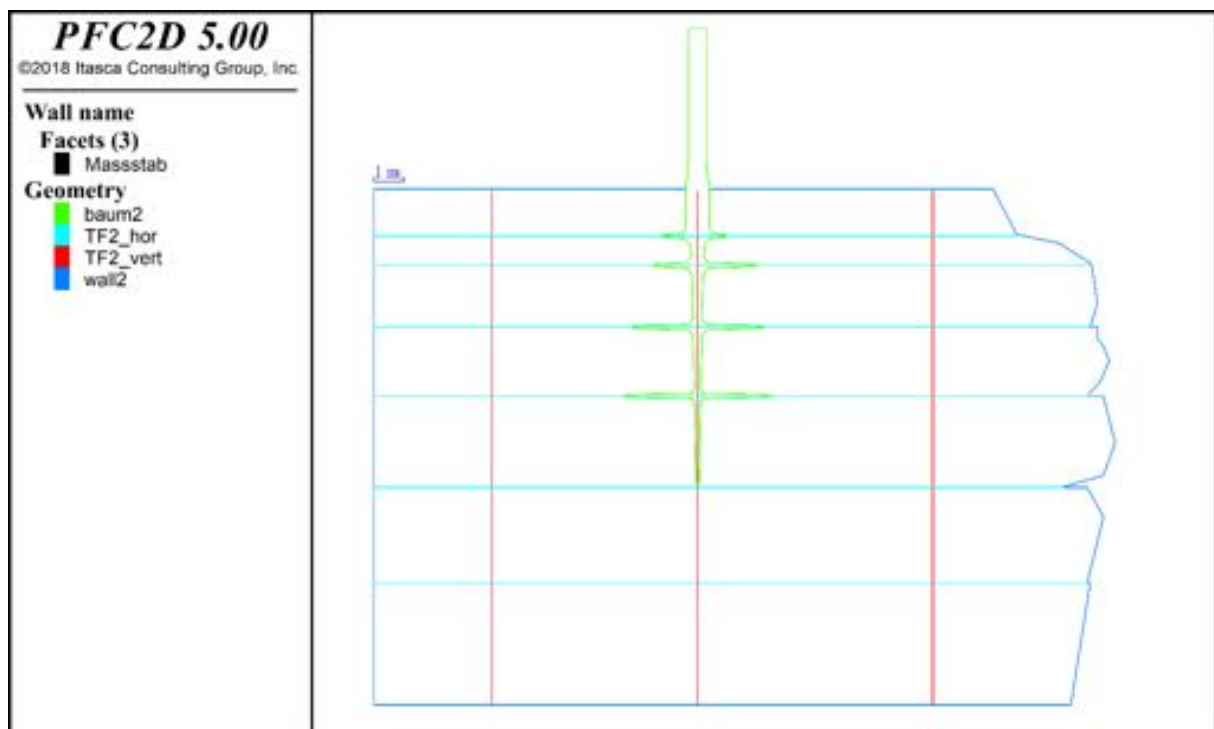


Abb. 5-3: Darstellung der Geometrien von Modell 3 (Profil 2)

5.2.4 Initialmodell

Nachdem die Materialien in den Vorversuchen kalibriert und die Profil-Geometrien erstellt worden sind, umfasst der dritte Arbeitsschritt die Modellierung des Initialzustands.

Um eine Begrenzung des Modells zu schaffen, wurden die Geometrien von Fels und Baum auf Wände übertragen. Anschließend erfolgte die Befüllung des Raumes innerhalb der Wände mit Partikeln. Dazu wurden für den Fels Bälle der Größe 3-4 cm und für den Baum Bälle der Größe 0,75-2 cm generiert. Die Partikelgröße wurde entsprechend klein gewählt, um eine Annäherung an den Ist-Zustand zu erhalten. Jedoch noch so groß, dass der zeitliche Rechenaufwand möglichst geringgehalten werden konnte.

Auf das Generieren der Bälle folgte die Setzung der Gravitation auf $9,81 \text{ m/s}^2$ und die Rechnung des Systems ins Gleichgewicht. Kontakte zwischen den Bällen wurden dabei zunächst nach dem linearen Modell gesetzt. Im Anschluss erhielten die Materialien Fels und Baum die in den Vorversuchen ermittelten mikromechanischen Parameter und wurden nach dem Linear Parallel Bond Modell gebunden. Erneut fand die Rechnung ins Gleichgewicht statt. Um in dem nachfolgenden Windversuch eine freie Bewegung des Modells zu ermöglichen, wurde die Begrenzung von Baum und Fels nach dem Binden wieder aufgehoben. Wände bestehen lediglich am unteren und linken (NO-Ende) Abschluss des Modells, um Partikelverschiebungen in diesen Bereichen zu verhindern.

Im nächsten Teilschritt zur Erstellung des Initialmodells wurden die Trennflächen-Geometrien eingefügt und die Bälle des Felses innerhalb eines Abstands von 5 cm um die Trennflächen nach dem Smooth-Joint Contact Modell gebunden. Zugewiesen wurden dabei die im Zugversuch ermittelten mikromechanischen Parameter der Trennflächen. Am Ende einer weiteren Rechnung des Systems ins Gleichgewicht stand das Initialmodell als Ausgangspunkt für die Windversuche.

5.2.5 Windversuche

Ausgehend vom Gleichgewichtszustand des Initialmodells erfolgte die Belastung des Systems durch eine horizontal auf den Stamm des Baumes wirkende Windkraft.

Simuliert wurde dabei angreifender Wind während eines Sturmereignisses, bei welchem sich Phasen der Belastung (Beginn Böe) und Entlastung (Ende Böe) des Baumes abwechseln. Die Windkraft wurde im Modell mit Hilfe einer Wand realisiert, um eine gleichmäßige Verteilung der Windlast auf einer bestimmten Fläche zu gewährleisten. Da das Material in PFC das Biegeverhalten des Baumes nicht automatisch berücksichtigt, war es notwendig, während der Entlastungsphasen eine Gegenkraft (Gegenwind) wirken zu lassen. Dadurch konnte der Baum im Modell in Richtung Ausgangsstellung zurückgedrückt und an das Biegeverhalten in der Natur angenähert werden. Der Gegenwind wurde ebenfalls über eine Wand in das System eingebracht. Um das Arbeiten mit der Windlast zu erleichtern, wurde ab der Höhe der Stammmitte nach oben, auf beiden Seiten, je eine fast senkrechte Facet erstellt. Beide Facets sind am oberen Ende über eine waagerechte Facet miteinander verbunden worden, sodass letztendlich eine Wand den angreifenden Wind und Gegenwind simuliert.

Für den Windversuch bekam die modellierte Wand eine Kraft zugewiesen, welche bei der Translationsbewegung wirkte. Um die gewünschte Kraft aufzubringen und während des Rechenvorgangs aufrechtzuerhalten, wird in PFC über ein Kommando (wall servo) die Translationsgeschwindigkeit der Wand kontrolliert (ITASCA 2015). Über die Vorzeichen der Kraftkomponente in x- bzw. y-Richtung ergibt sich die Bewegungsrichtung der Wand. Simuliert wurde ein angreifender Wind aus SW und dementsprechend ein Gegenwind aus NO.

Der Windversuch wurde mit einer Windkraft von 55 kN durchgeführt. Dieser Wert soll in etwa die Last widerspiegeln, welche bei einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s auf eine Kiefer wirkt. Die angenommene Windgeschwindigkeit ergibt sich aus der DIN 1055-4.

Die Bundesrepublik Deutschland wird nach der DIN 1055-4 in vier Windlastzonen unterteilt. Jeder Windlastzone wird, in Abhängigkeit der topographischen Bedingungen, eine gemittelte Windgeschwindigkeit v_{ref} zugeordnet. Das Bundesland Sachsen zählt in die Windzone 2 und erhält eine mittlere Windgeschwindigkeit von 25 m/s (THORN & SCHOPBACH 2007).

Unter Annahme von $v = 25$ m/s kann die Windkraft auf den Baum mit Hilfe nachfolgender Formeln berechnet werden (THORN & SCHOPBACH 2007):

Windkraft (F_W)	$F_W = A * q * c_w$	(1)	A ... Windangriffsfläche c_w ... Luftwiderstandsbeiwert
Staudruck (q)	$q = \frac{\rho_{Luft} * v^2}{2}$	(2)	ρ_{Luft} ... Luftdichte v ... Windgeschwindigkeit

Dabei beträgt die Windangriffsfläche der Kiefer $A = 162 \text{ m}^2$ (AFB 2002). Der Luftwiderstandsbeiwert kann, je nach der äußeren Erscheinung des Baumes, unterschiedlich ausfallen. Für die durchzuführende Berechnung wurde der Wert auf $c_w = 0,9$ festgelegt. Für die Dichte von Luft wurde $\rho_{\text{Luft}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (bei 20°C auf Meeresspiegelhöhe) angenommen. Das Einsetzen der Werte in die obenstehenden Formeln ergibt eine Windlast von $F_w = 55 \text{ kN}$. Eine Windböe ist definiert als ein unvermittelter, starker Windstoß von kurzer Dauer. Die Dauer des Windstoßes beträgt min. 3 und max. 20 Sekunden (WETTERDIENST.DE 2019).

Der Rechenaufwand für die Simulation des Windversuches ist recht hoch und wird, durch eine Vergrößerung des simulierten Zeitraums, immer länger. Es wurde, vor allem aus zeitlichen Gründen, eine abwechselnde Belastung und Entlastung des Baumes für einen Zeitraum von bis zu 25 Sekunden simuliert. Unter Beachtung der Definition von Windböen wurden die jeweiligen Phasen der Windlastrichtung erstellt. Die gesamte Simulation eines Modells dauerte für diesen Zeitraum von 25 Sekunden meist bis zu drei Tage.

In Anlehnung an das Orkantief „Friederike“ ist ein Windprofil (Abb. 5-4) erstellt worden, welches sich an die gemessenen Windgeschwindigkeiten des Ereignisses vom 18.01.2018 orientiert. Aufgrund der langen Rechendauer der Simulation wurde das Profil für einen Zeitraum von einer Minute modelliert. Die Phasen der Entlastung des Baumes entfallen, da eine durchgängige mittlere Windgeschwindigkeit von $14,2 \text{ m/s}$ angesetzt wurde. Dieser Wert entspricht dem Tages-Stundenmittelwert von 16 Uhr für die Station Nossen in Sachsen (SACHSEN.DE 2019). Als maximale Windgeschwindigkeit einer Böe wurde im Profil der für Deutschland gemessene Höchstwert von 56 m/s (204 km/h auf dem Brocken, Sachsen-Anhalt) angesetzt (HINTEREGGER 2018). Die Rechnung des Windprofils erfolgt am Modell 2.

Aus den Windversuchen der einzelnen Modelle und dem Windprofil ergibt sich insgesamt eine Anzahl von 8 gerechneten Simulationen.

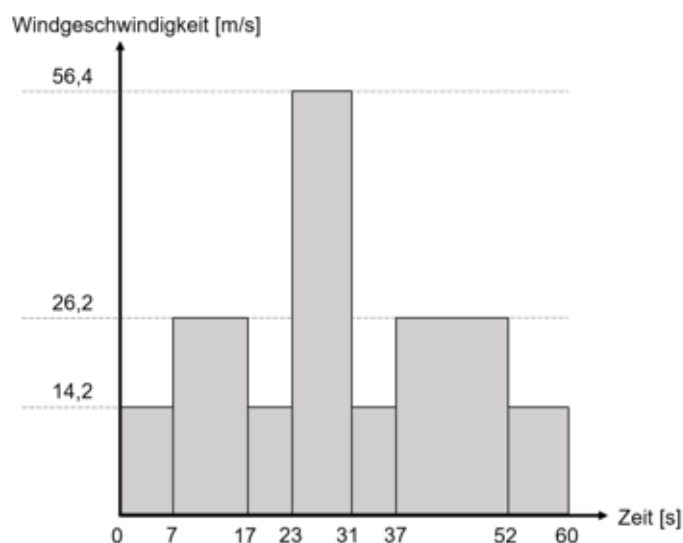


Abb. 5-4: Erstelltes Windprofil in Anlehnung an Orkan „Friederike“

6. Ergebnisse und Interpretation

Im Vergleich der einzelnen Modelle miteinander sind unter den Ergebnissen der Berechnung zum Windversuch sowohl einige Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede erfasst worden.

Eine Gemeinsamkeit ist das Auftreten von Spannungsänderungen im Baum und im Gebirge bei wirkender Windlast und wirkendem Gegenwind bzw. Rückschwingung des Baumes.

Dazu sind Messungen im Stamm, in der Wurzel und im Fels durchgeführt worden. Die Messungen im Fels erfolgten in vier Bereichen (measurement objects), jeweils auf beiden Seiten der Wurzel zwischen Geländeoberkante und oberster Schichtfläche, sowie oberster und darunter liegender Schichtfläche.

Für den Fels sind die Änderungen der x- und y-Komponente der Spannungen innerhalb der einzelnen Bereiche exemplarisch für das Modell 2 in der Abbildung 6-1 dargestellt.

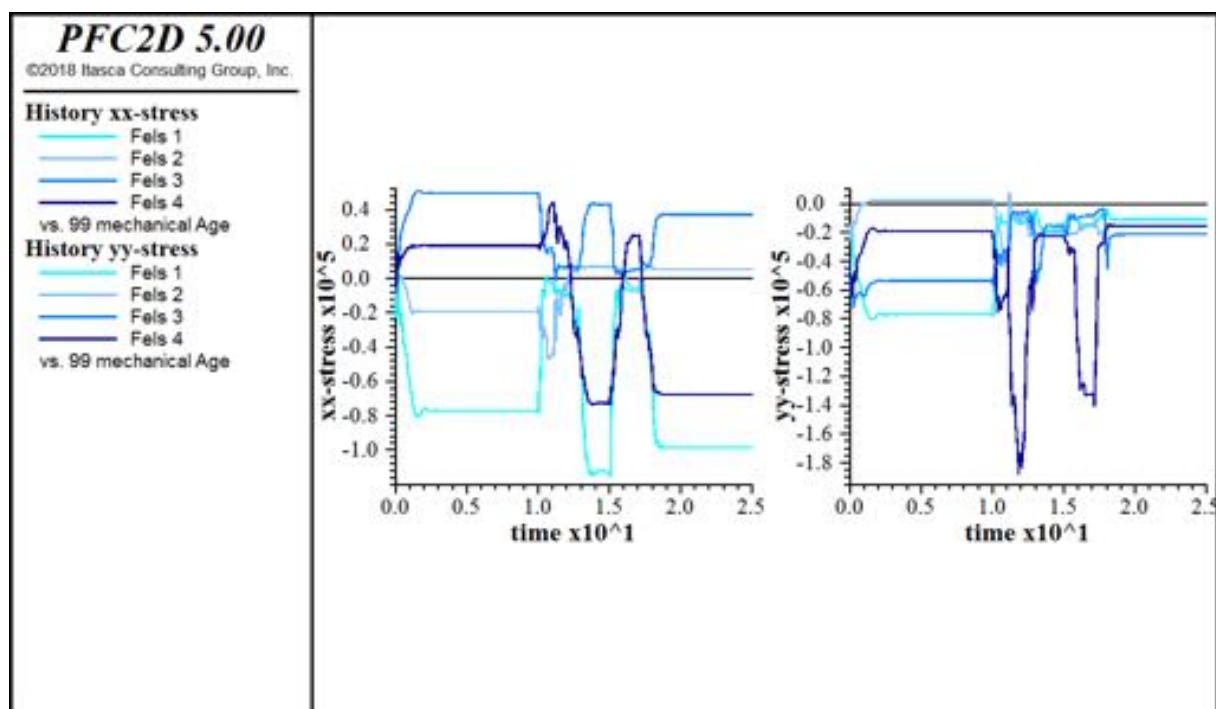


Abb. 6-1: Diagramm der Spannungsänderung in x- und y-Richtung im Modell 2 während Windbelastung

Aus der Abbildung lässt sich erkennen, dass mit der Lasteinwirkung die Spannungen im Gestein innerhalb weniger Sekunden eine Veränderung erfahren. Anschließend bleiben die Spannungen bei anhaltender, gleicher Belastung in etwa konstant bis es zu einer Änderung der Richtung oder Stärke der Lasteinwirkung kommt. Im Modell 2 geschieht dies nach 10, 12, 15 und 17 Sekunden Windlast (vgl. Abbildung 6-1).

Damit bestätigt sich die Annahme, dass die Windkraft auf den Baum über die Wurzeln weiter unter der Geländeoberkante wirkt und wie in diesem Fall, zu Spannungsänderungen im Festgestein führt.

Weiterhin fanden in allen Modellen Verschiebungen bereits nach wenigen Sekunden angreifenden Windes statt. Der Baumstamm zeigt dabei, aufgrund der direkt wirkenden Windlast, die größten Verschiebungsbeträge, welche im oberen Zentimeter-Bereich liegen. Verdeutlicht wird dies in den Diagrammen der Abbildung 6-2. Aufgetragen sind die Verschiebungen zweier Punkte des Stammes, sowie die eines Punktes der oberen Felskante.

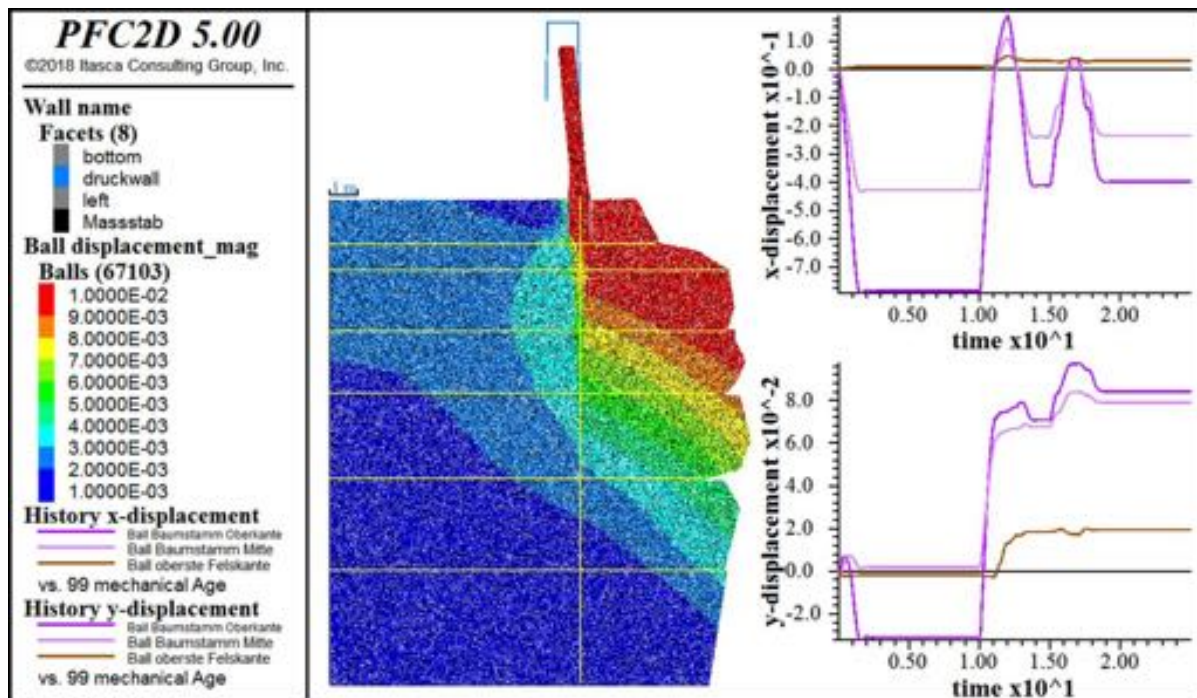


Abb. 6-2: Darstellung der Verschiebungen im Modell 2 nach 25 s Windlast und Diagramme der x- bzw. y-Verschiebung von drei ausgewählten Punkten im System

Um jedoch die Frage nach der Felsstabilität zu klären, wird nachfolgend ausschließlich auf die Verschiebungen im Gebirge eingegangen.

Die Werte der Verschiebungen im Fels sind nach den ersten Sekunden der Windsimulation gering und liegen größtenteils im Millimeter-Bereich. Als erstes von Verschiebungen erfasst wird das Gebiet um die Baumwurzel, vorwiegend im Bereich zwischen Baum und Felskante. Bei anhaltender Windbelastung findet eine Ausdehnung des Gebietes statt, sodass beispielsweise entlang der Felskante die Verschiebung in einigen Modellen bis auf die Höhe der Wurzelspitze in 10 m Tiefe reicht. Zusätzlich erhöhen sich die Verschiebungsbeträge aller Punkte im Fels über die Dauer der Belastung. Die nachfolgende Abbildung 6-3 verdeutlicht die Entwicklung der Verschiebungen am Beispiel von Modell 1. Dargestellt ist der Zustand nach 3 Sekunden (linke Bildhälfte) und nach 8 Sekunden (rechte Bildhälfte) Lasteinwirkung.

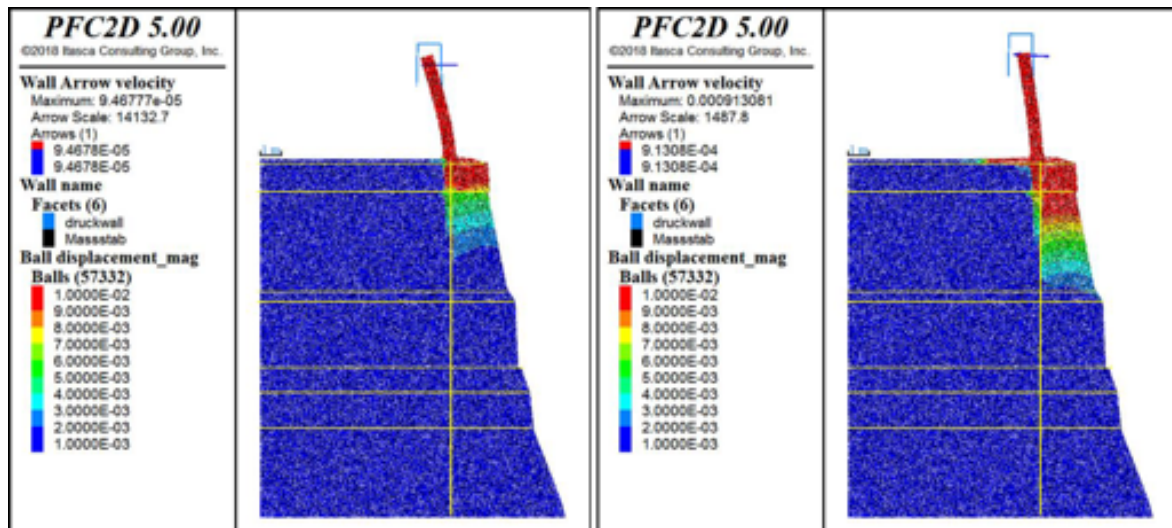


Abb. 6-3: Vergleichsbild der Verschiebungen im Modell 1; links: nach 3 s Windlast; rechts: nach 8 s Windlast

Die Modelle mit einem Baum in der Kluft am nächsten zur Felskante (1-2 m Entfernung) weisen die größten Verschiebungsbeträge auf, welche im Bereich von einigen Zentimetern liegen. Erkennen lässt sich dies anhand der zwei oberen Abbildungen, sowie der Abbildung 6-4. Weiterhin sind im Anhang (Abbildung B-1, Abbildung B-2) Darstellungen der Verschiebung in den Modellen 3 und 4 als Vergleichsbilder hinterlegt.

Im Modell 2 treten nach 25 Sekunden Windlast Verschiebungen von mehr als 1 cm zwischen Wurzel und Felskante auf (vgl. Abbildung 6-4). Von diesem Wert erfasst wird direkt an der Wurzel eine Tiefe von bis zu 2 m und an der Felskante eine Tiefe von ca. 5 m. Bis in 10 m Tiefe beträgt die Verschiebung entlang der Felskante immerhin noch 0,5 cm. Auffällig ist, dass die größten Verschiebungsbeträge das Gestein über der obersten Schichtfläche erfassen. Tendenziell gilt für alle Modelle, dass die Verschiebung in den am weitesten vom Baum entfernten Bereichen am geringsten ist und Werte unterhalb von 1 mm annimmt.

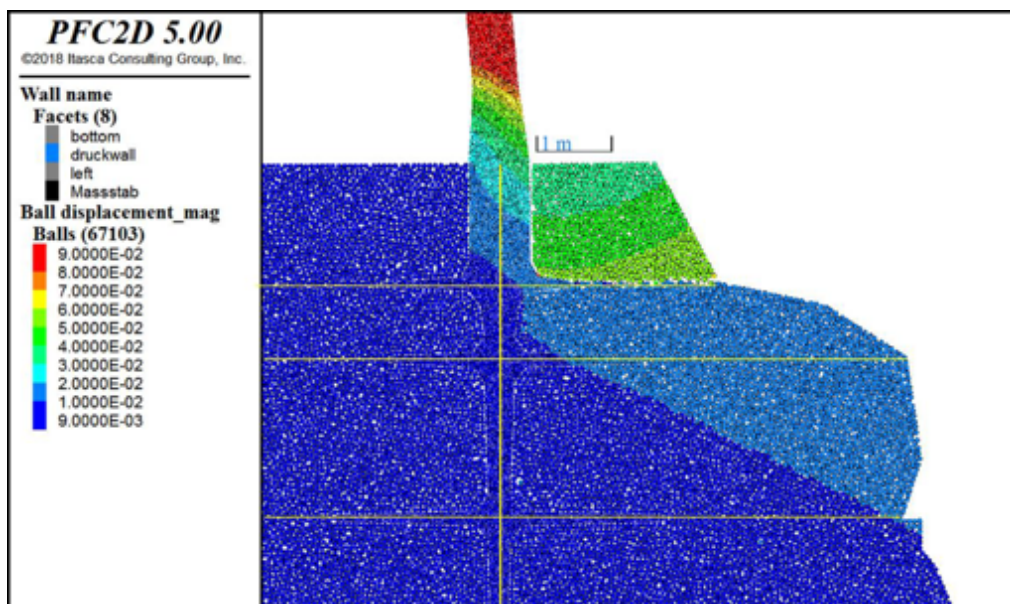


Abb. 6-4: Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 25 s Windlast im Modell 2

Neben der Lage der Bäume hat auch die Neigung der Schichtfläche einen Einfluss auf die Verschiebungen im Gebirge.

Im Modell 5 bei 5°- und im Modell 7 bei 15°- Schichtflächenneigung ist die Verschiebung um 2-3 cm geringer als bei den horizontalen Schichtflächen im Modell 2 (siehe Anhang, Abbildung B-3, Abbildung B-4). Im Gegensatz dazu ist die Verschiebung im Modell 6, bei einer Schichtflächenneigung von 10°, um etwa 5 cm größer als im Modell 2.

Die Abbildung 6-5 verdeutlicht die Verschiebung des obersten Gesteinsblockes zwischen Wurzel und Felskante um mehr als 9 cm im Modell 6 bei einer Schichtflächenneigung von 10°. Zusätzlich lässt sich nahe der Geländeoberkante eine starke Auflockerung um die Wurzel, sowie in der obersten Schichtfläche, besonders zwischen Wurzel und Felskante, erkennen. Anders als im Modell 2 treten links der Wurzel zwischen Geländeoberkante und oberster Schichtfläche ebenfalls Verschiebungen mehrerer Zentimeter auf. Dies trifft weiterhin auf das Modell 7 mit einer Neigung von 15° zu (vgl. Anhang, Abbildung B-4).

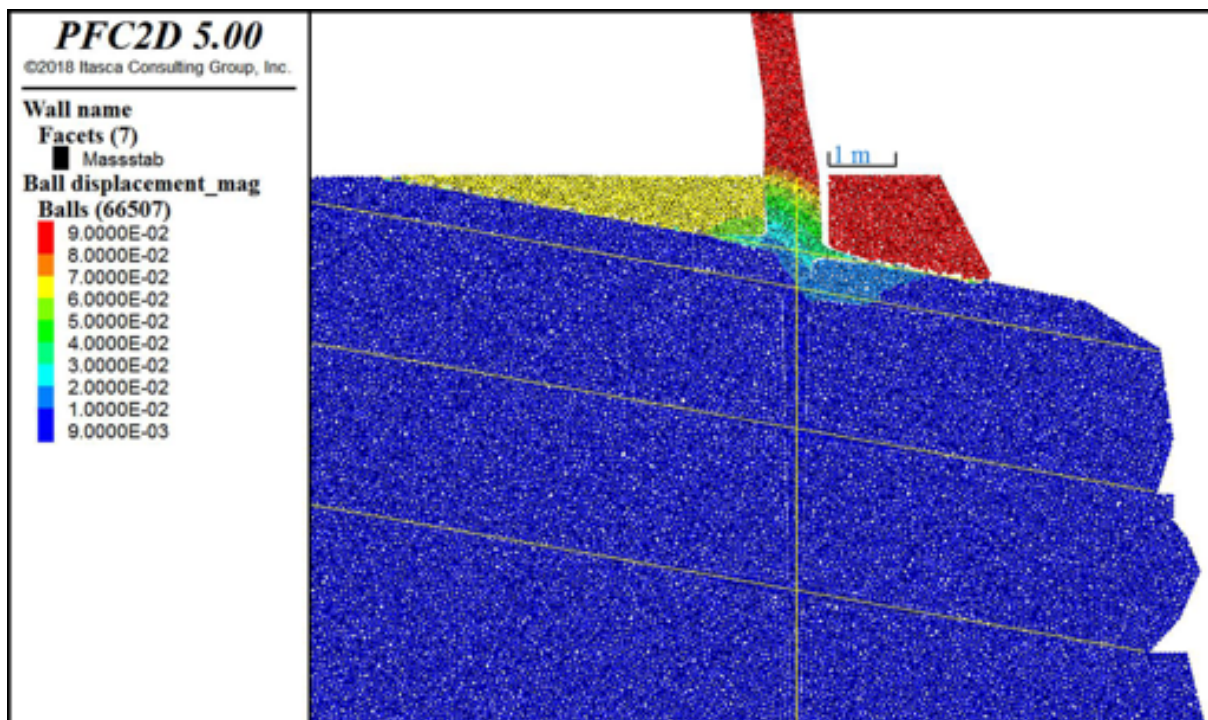


Abb. 6-5: Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 25 s Windlast im Modell 6

Die Bewegungsrichtung der verschobenen Punkte wird mit Hilfe des Verschiebungsvektors durch Pfeile sichtbar gemacht. Abbildung 6-6 zeigt einen Ausschnitt der Verschiebung im Modell 2 als Vektordarstellung. Unterteilt wird der Vektor in eine x- und eine y-Komponente.

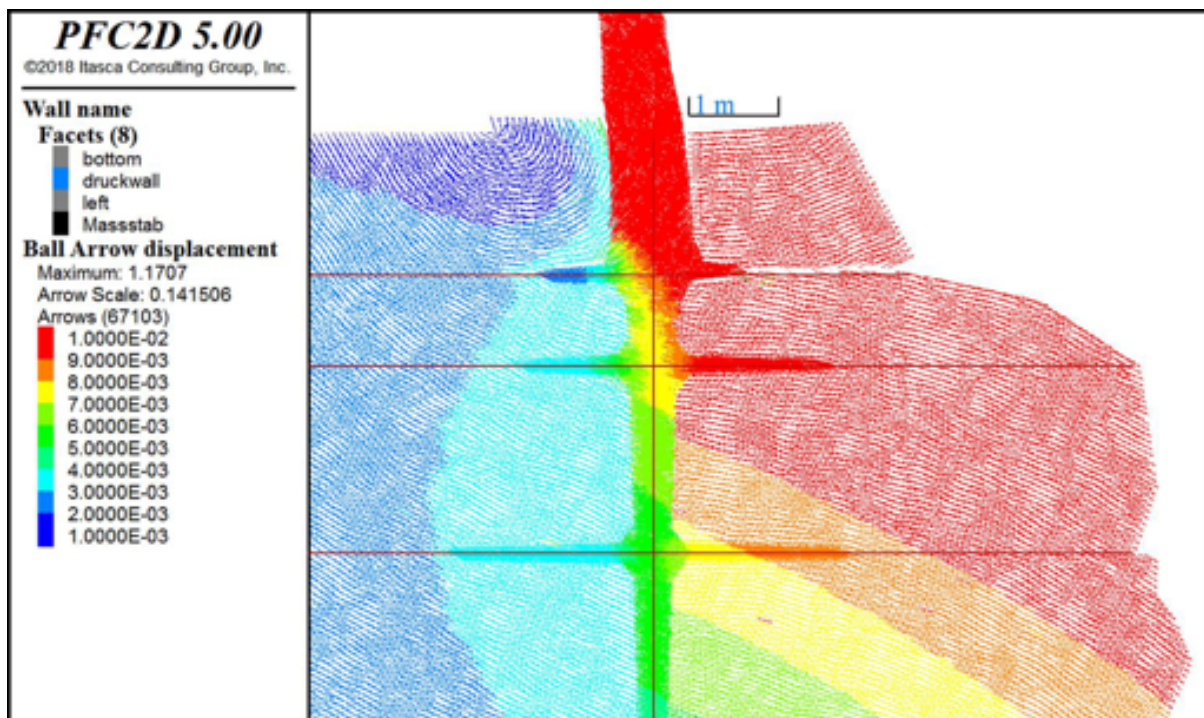


Abb. 6-6: Vektordarstellung der Verschiebungen im Modell 2 nach 25 s Windlast

Allgemein gilt für alle Modelle, dass die Betrachtung der Verschiebung entlang der x- bzw. y-Achse unterschiedliche Bewegungsrichtungen und -beträge in Abhängigkeit der Lage der Betrachtungspunkte zeigt. Grundsätzlich erfolgt die größte x-Verschiebung zwischen Wurzel und Felskante (vgl. Anhang, Abbildung B-5), wobei die Bewegung in die positive x-Richtung stattfindet. Das bedeutet, das Gestein wird in diesem Bereich aus dem Felsmassiv heraus bewegt. Erkennen lässt sich dies anhand der Pfeilrichtung der Vektoren in der Abbildung 6-6. Ebenfalls in der Abbildung verdeutlicht ist die y-Verschiebung einiger Bereiche in positive und anderer in negative Richtung. Dabei erfolgen Bewegungen bedeutender Größe (mm bis cm) hauptsächlich lokal um die Wurzel nahe der Geländeoberkante (vgl. Anhang, Abbildung B-6). Verschiebungen in positive y-Richtung bedeuten ein Herausheben des Gesteins. Dies findet im Fels besonders am Übergangsbereich von Baumstamm und -wurzel statt. Im Modell 2 unter Abbildung 6-6 lässt sich erkennen, dass weiterhin die Felskante zwischen oberster Schichtfläche und Geländeoberkante herausgehoben wird.

Im Vergleich der Verschiebungskomponenten (s. Anhang, Abbildung B-5 und Abbildung B-6) miteinander zeigt sich, dass die Verschiebungen in x-Richtung generell weitreichender sind und höhere Verschiebungsbeträge liefern als die in y-Richtung.

In den zwei Diagrammen der Abbildung 6-7 dargestellt ist die x- bzw. y-Verschiebung ausgewählter Beobachtungspunkte entlang der oberen Felskante im Modell 2. Mit steigender Nummerierung nimmt die Entfernung der Punkte zur Geländeoberkante hin zu.

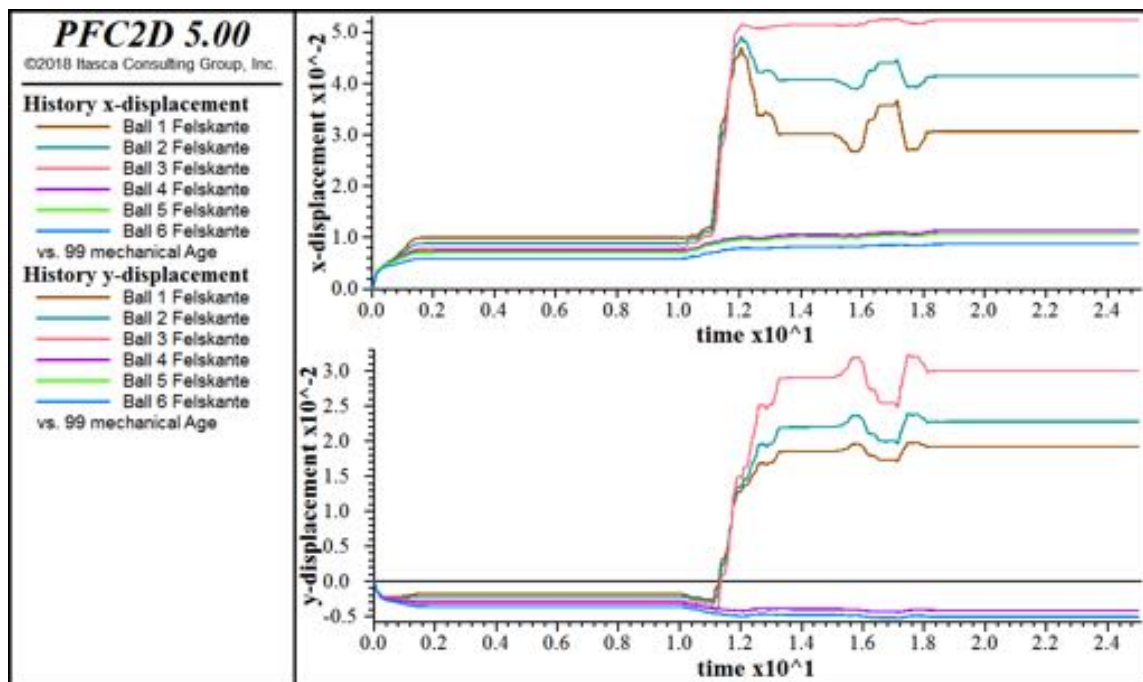


Abb. 6-7: Verschiebungsdiagramme in x- und y-Richtung von ausgewählten Beobachtungspunkten im Modell 2

Es bestätigt sich die Aussage einer generellen Bewegung in positive x-Richtung entlang der Felskante, sowie einer Bewegung in positive und negative y-Richtung.

Weiterhin lässt sich der Einfluss der zwei Belastungsphasen (Wind und Rückbiegen bzw. Gegenwind) erkennen. In den ersten 10 Sekunden bewirkt die Windlast eine Verschiebung der Felskante in x-Richtung von bis zu einem Zentimeter. Die y-Verschiebung ist gering und erfolgt in negative Richtung. Anschließend sind die Beobachtungspunkte der unteren Felskante nur noch wenig von Verschiebungen betroffen, wohingegen die Veränderungen der oberen Felskante (über der obersten Schichtfläche) deutlich hervortreten.

Aufgrund der Rückschwingung des Baumes mit dem Ende der Windböe bzw. bei angreifendem Gegenwind wird die Verschiebung im Modell 2 weit mehr als verdoppelt, wobei die Felskante tendenziell vom Felsmassiv wegbewegt und angehoben wird. Eine leichte Rückbewegung der Beobachtungspunkte findet in der zweiten Phase der Windbelastung statt. Nachfolgend wiederholen sich die Vorgänge, sodass besonders die Rückschwingung des Baumes bzw. der Gegenwind einen Einfluss auf die Verschiebungen im Gebirge aufweist.

Analog zum Modell 2 lassen sich die Verschiebungen entlang der Felskante jedes anderen Modells mit ähnlichen Ergebnissen auswerten. Grundsätzlich unterscheiden sich die Modelle dabei nur in der Größe der Verschiebungsbeträge.

Des Weiteren stimmen die einzelnen Modelle in der Entwicklung der Porosität im Gebirge und im Baum über den Verlauf des Windversuchs überein.

Für alle Modelle gilt, die Porosität im Fels erfährt während des Windversuches kaum eine Veränderung. Messungen im Gestein wurden jeweils nahe der Geländeoberkante auf beiden Seiten der Wurzel zwischen den Schichtflächen genommen und sind beispielhaft für Modell 2 im Diagramm der Abbildung 6-8 in Blautönen dargestellt.

Die Linie „Fels 2“ zeigt zwar eine Erhöhung der Porosität im Gesteinsblock der oberen Felskante, allerdings liegt die Änderung im Bereich von 10^{-3} und ist damit vernachlässigbar gering. Aufgrund der Nähe des Messpunktes zur Wurzel-Fels-Grenze ist die leichte Erhöhung der Porosität in diesem Bereich wahrscheinlich auf weitreichende Lockerungen innerhalb der Kluft zurückzuführen. Zur Bestätigung diese Annahme werden separate Porositätsmessungen innerhalb der Trennflächen (insbesondere der Klüfte) empfohlen, welche in der vorliegenden Arbeit, aufgrund des zeitlichen Rahmens, nicht umgesetzt werden konnten. Die grundsätzlich etwa gleichbleibende Porosität spricht für einen intakten Fels während des Windversuchs.

Die Modelle mit geneigten Schichtflächen unterscheiden sich geringfügig in zwei Messpunkten der Porosität von den restlichen Modellen. Im Fels zwischen Geländeoberkante und oberster Schichtfläche findet zu Beginn der Windlast eine Verdichtung im Bereich von 10^{-2} statt und verändert sich anschließend bis zum Ende des Versuchs kaum (vgl. Anhang, Abbildung C-1). Im Diagramm der Abbildung 6-8 in Brauntönen dargestellt ist die Porosität des Baumes. Anders als im Fels steigt die Porosität im Baum merklich um Werte von 10^{-1} an. Dies bedeutet eine Auflockerung des Materials. Bei andauernder Windbelastung könnte das Holz somit brüchig werden und der Baumstamm abbrechen. Ein Abbrechen des Baumes würde zum Ende der Windbelastung sowie der numerischen Berechnung des Windversuchs führen.

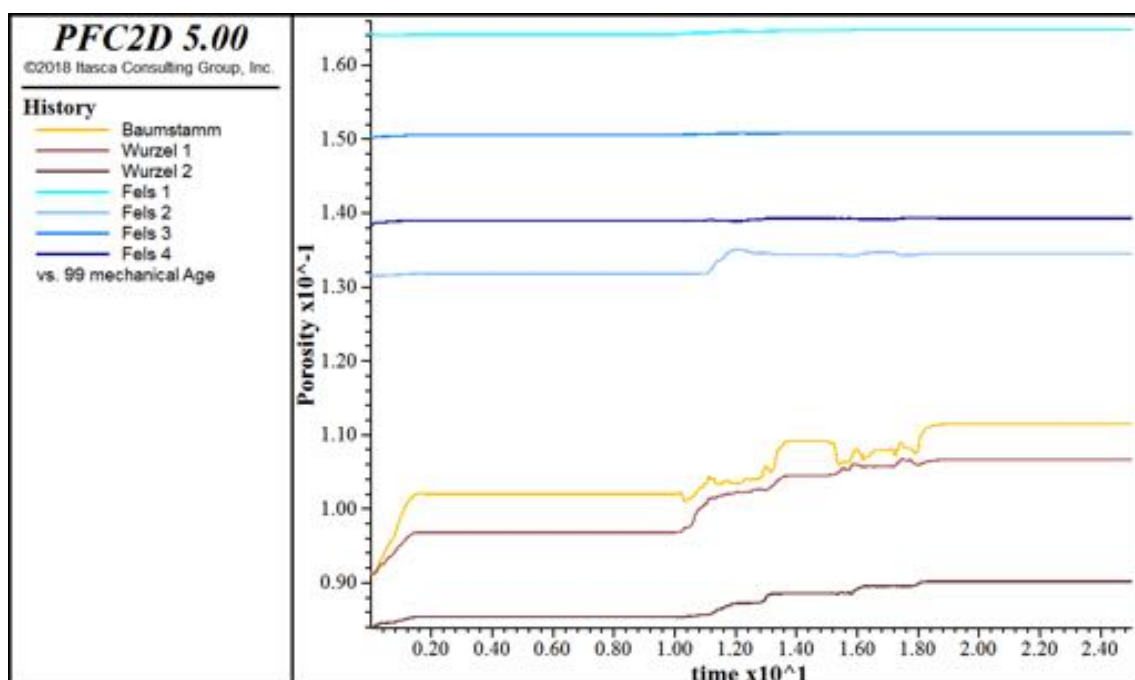


Abb. 6-8: Änderungen der Porosität von Fels und Baum im Modell 2 während des Windversuchs

Eine weitere Gemeinsamkeit der einzelnen Modelle ist der Zustand der Kontaktbindungen im Gebirge nach dem Windversuch. Stellvertretend für alle Modelle soll Abbildung 6-9 zur Auswertung herangezogen werden.

Demnach sind alle Kontaktbindungen des Felses (Contact pb_state) stabil und zeigen keine gebrochenen Kontakte. Der Fels bleibt vollständig intakt. Dies deckt sich auch mit der über die Porosität getroffenen Aussage eines intakten Gesteins.

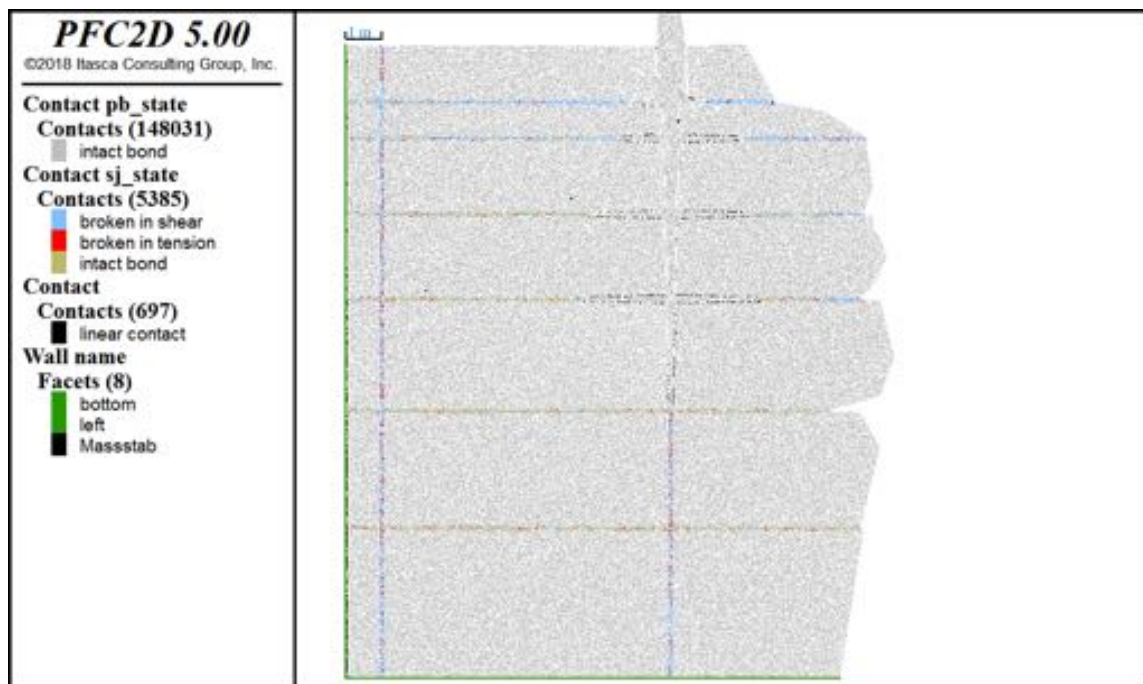


Abb. 6-9: Zustand der Kontaktbindungen im Modell 2 nach 25 s Windlast

Hingegen sind die Kontaktbindungen der Trennflächen (Contact sj_state) überwiegend gebrochen. Die wenigen intakten Bindungen lassen sich nicht speziell einer Trennfläche zuordnen, sondern sind etwa im gleichen Maß über die mittleren und unteren Schichtflächen verteilt. Es kann keine vollständig intakte Trennfläche ausgemacht werden. Der überwiegende Anteil der Kontaktbindungen ist aufgrund von Scherbewegung gebrochen (broken in shear). Dies betrifft alle Trennflächen, insbesondere die Klüfte und oberen Schichtflächen. Weitaus geringer ist der Anteil an gebrochenen Bindungen durch Zugbeanspruchung (broken in tension), welche entlang aller Trennflächen etwa gleichmäßig verteilt auftreten. Dies trifft ebenso auf die Modelle mit geneigter Schichtfläche zu, wohingegen der Anteil im Vergleich mit den Modellen horizontaler Schichtflächen jedoch größer ist (vgl. Anhang, Abbildung D-1).

Unter der Berücksichtigung von intakten Kontaktbindungen im Fels und gebrochenen innerhalb der Trennflächen lässt sich daraus schließen, dass ein Versagen vorwiegend entlang der Trennflächen wahrscheinlich ist. Da die obersten Schichtflächen fast vollständig gebrochene Kontaktbindungen aufweisen, liegen dort die größten Gefahren für Bruchbildung und Felsversagen.

In PFC ergeben sich Bruchflächen im Gestein, aus dem Zusammenschluss von gebrochenen Bonds, welche in dem sogenannten Discrete Fracture Network (DFN) beschrieben werden. Die einzelnen Modelle unterscheiden sich zwar in dem exakten Erscheinungsbild der auftretenden Brüche, jedoch sind die grundlegenden Charakteristiken für alle gleich.

Generell treten Brüche in allen Modellen ausschließlich innerhalb der Trennflächen auf und konzentrieren sich in bestimmten Bereichen. Klüfte weisen allgemein sehr wenige Brüche auf. Ebenso wie die unteren Schichtflächen. Hingegen ist in den zwei obersten Schichtflächen das Vorkommen von Brüchen sehr hoch. Wie weit die Bruchbildung innerhalb der Schichtflächen reicht, ist vom jeweiligen Modell abhängig, beträgt generell jedoch mehrere Meter.

Die Abbildung 6-10 verdeutlicht die Lage und Häufigkeit von Brüchen (fractures) im Modell 2 nach 25 s Windlast und spiegelt die oben beschriebenen, grundlegenden Merkmale wider.

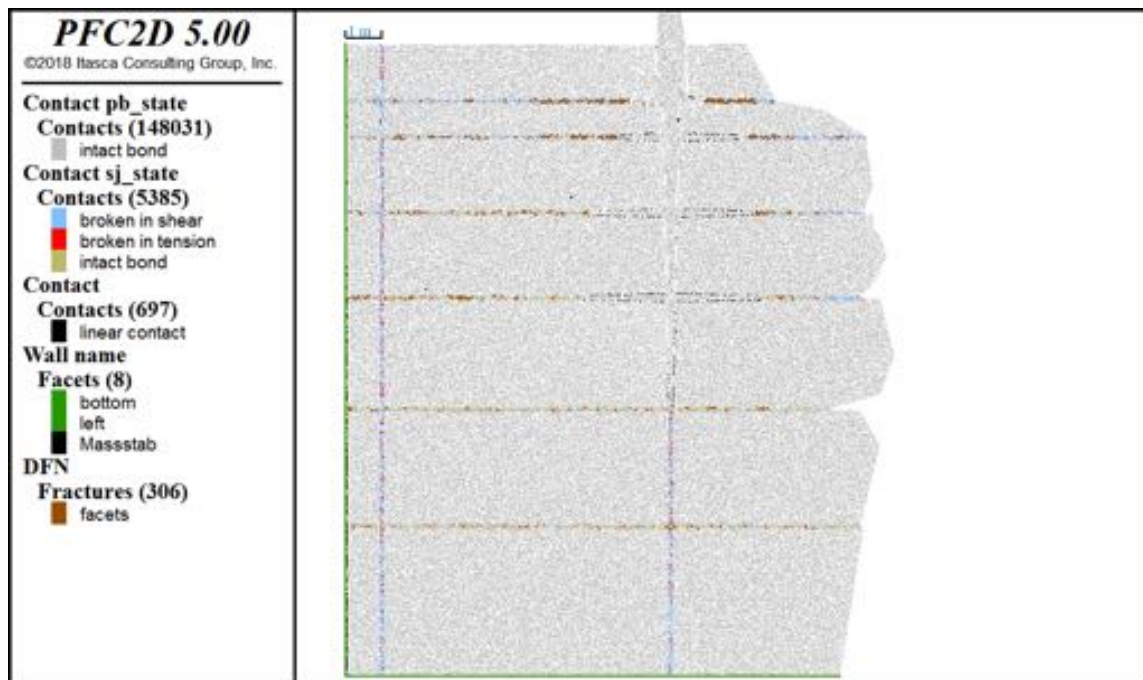


Abb. 6-10: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 25 s Windlast im Modell 2

Im Modell 2 durchziehen Brüche nach 25 s Windlast fast vollständig die obere Schichtfläche von der Wurzel bis zur Felskante. Bei einer anhaltenden oder erhöhten Belastung könnten sich die Brüche weiterentwickeln, sodass der Block komplett gelöst vorliegen würde.

Im Modell 1 sind die zwei obersten Schichtflächen bereits nach 8 s Windlast zwischen Wurzel und Felskante komplett von Brüchen durchzogen (vgl. Abbildung 6-14). Im Vergleich von Modell 1 und 2 lässt sich daraus schließen, dass die Felskante von Profil 1 stärker durch Gesteinsabbruch betroffen ist als Profil 2. Aufgrund der geringeren Bruchbildung sind die untersten Bereiche der Felskante bei beiden Profilen weniger durch ein Herauslösen von Gesteinsblöcken gefährdet.

Eine ähnliche Situation wie im Modell 2 liegt im Modell 4 vor. Jedoch führt die doppelte Belastung des Gebirges durch zwei im Wind bewegte Bäume zu einer ausgeprägteren Bruchbildung. Die Abbildung 6-11 zeigt, dass bereits nach 20 s Windlast auf beide Bäume sowohl die oberste als auch die direkt darunter liegende Schichtfläche zwischen der Wurzel und der Felskante vollständig von Brüchen durchzogen und damit von dem festen Gesteinsverband abgetrennt ist. Das heißt, die Gefahr von Felsstürzen durch Sturmereignisse erhöht sich mit der Anzahl der in den Trennflächen befindlichen, bewegten Bäume.

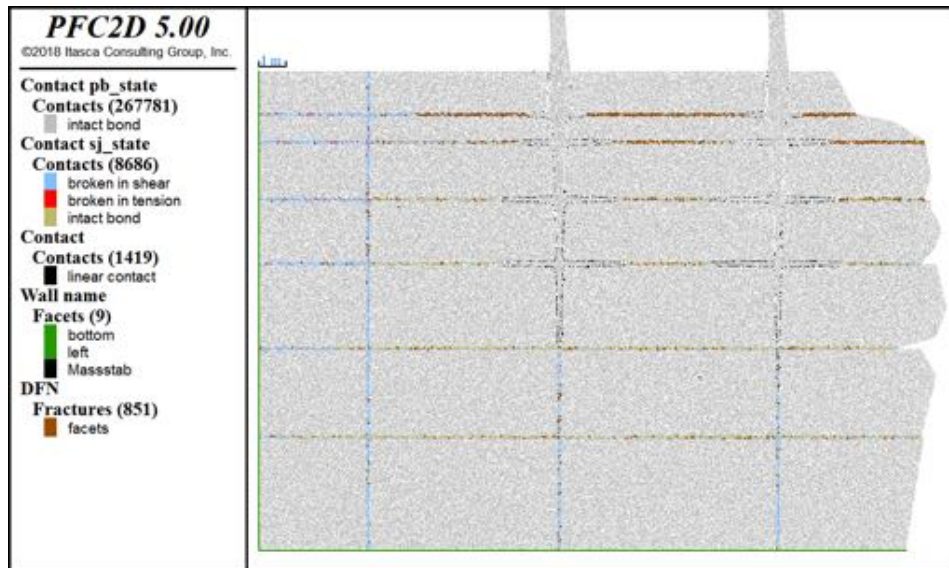


Abb. 6-11: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 20 s Windlast im Modell 4

Weiterhin hat die Neigung der Schichtflächen einen Einfluss auf die Ausbildung von Brüchen im Gebirge bei Belastung. Der Vergleich von Abb. 6-10 und Abb. 6-12 zeigt, dass eine Neigung um 5° in Richtung Felskante zu erhöhter Bruchbildung innerhalb der Trennflächen führt.



Abb. 6-12: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 22 s Windlast im Modell 5

Während im Modell 2 mit horizontalen Schichtflächen nach 25 s Windlast etwa 300 Brüche auftreten, führt im Modell 5 die Neigung der Schichtung um 5° zur Ausbildung von fast 900 Brüchen nach bereits 22 s bei gleicher Windbelastung. Die Anzahl der Brüche über die Zeit des Windversuchs ist, für Modell 2 und 5, in den Diagrammen der Abbildung 6-13 dargestellt. Ebenfalls für alle weiteren Modelle in etwa gleich ist dabei der Kurvenverlauf der erfassten Brüche innerhalb der Trennflächen (crack_num_sj).

Brüche von linearparallel gebundenen Kontakten (Baum und Fels, crack_num_pb) treten in den Modellen 1 bis 4 nicht und in den Modellen mit geneigter Schichtfläche nur selten auf (max. 3 cracks, Modell 7). Für das Modell 5 lässt sich in der Vergrößerung der Abbildung 6-12 (rotes Kästchen) erkennen, dass die Brüche der linearparallel gebundenen Kontakte innerhalb der Wurzel liegen (s. auch Anhang, Abbildung D-2, Abbildung D-3). Damit kann der Fels weiterhin, auch bei Schichtflächenneigung, als vollkommen intakt angesehen werden.

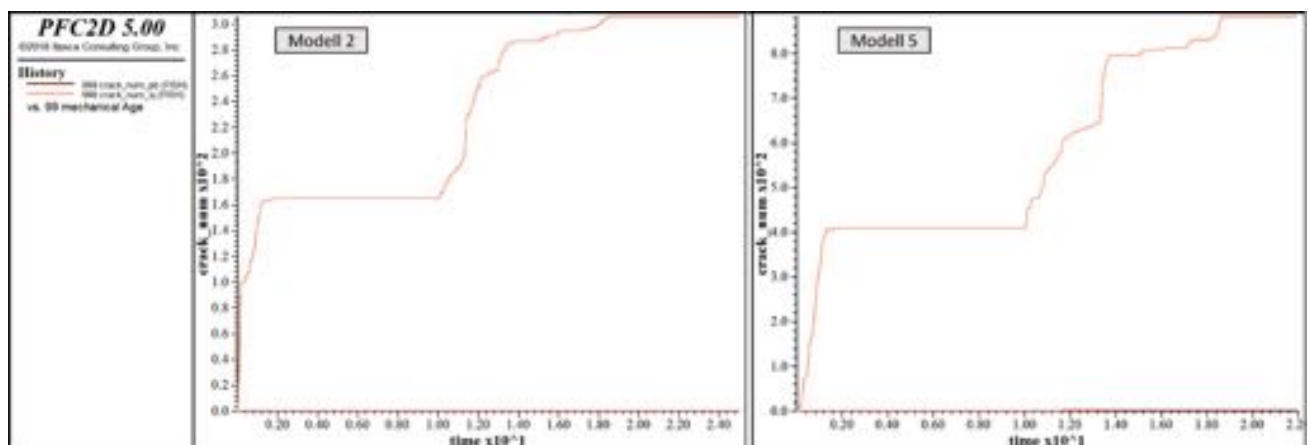


Abb. 6-13: Anzahl der Brüche im Modell 2 (links) bzw. Modell 5 (rechts) während des Windversuchs

Anders als im Modell 2 sind die zwei obersten Schichtflächen im Modell 5 zwischen Felskante und Wurzel vollständig (oberste) bzw. fast vollständig von Brüchen gekennzeichnet. Dieselbe Situation liegt bei einer Neigung der Schichtflächen um 10° und 15° vor. Während bei einer 15° Neigung ebenfalls weit mehr Brüche auftreten als bei horizontalen Schichtflächen ist die Bruchbildung bei 10° Neigung geringer und konzentriert sich überwiegend in den oberen Schichtflächen zwischen Wurzel und Felskante (siehe Anhang, Abb. D-2, Abb. D-3).

Auffällig im Modell 5 sowie im Modell 3 (siehe Anhang, Abbildung D-4) ist, dass die Brüche der Schichtflächen nur bis an die nächste freistehende Kluft und nicht darüber hinaus reichen. Eine mögliche Begründung liegt in der Belastungszeit, sodass sich Brüche, bei anhaltender Windlast, über die Klüfte hinaus weiterentwickeln könnten. Eine andere Möglichkeit bedeutet eine natürliche Barrierefunktion der Kluft ohne Baum, über die hinaus keine weitere Bruchbildung möglich ist. Für Modell 3 mit dem Baum in einer hinteren Trennfläche hieße dies, dass die Felskante bei Windbelastung nicht durch ein Abbrechen gefährdet ist.

Ein Zusammenhang von Brüchen und Fragment-Bildung im Gebirge lässt sich anhand des Modells 1 durch den Vergleich der Abbildung 6-14 und Abbildung 6-17 erkennen. Bei Fragmenten handelt es sich um einzelne Steine oder Blöcke, welche vollständig vom Gebirge abgetrennt vorliegen. Die Bildung von Fragmenten erfolgt in den Bereichen, in denen das Gestein komplett von Brüchen umgeben ist bzw. keine Bindung zum umliegenden Gestein mehr aufweist (vgl. z.B. Abbildung 6-17 Fragment Nr. 3 und Nr. 6). Durchziehen Brüche die gesamte Schichtfläche, wie in der Abbildung 6-14 die oberste Schichtfläche und lösen damit die Verbindung von Gestein und Felsmassiv, dann können Blöcke in diesen Bereichen herausgelöst werden. Somit liefert die Betrachtung der Bruchentwicklung im Gebirge Aussagen darüber, wo die Stabilität des Felses nachlässt und eine Gefährdung durch das Herauslösen von Gesteinen besteht.

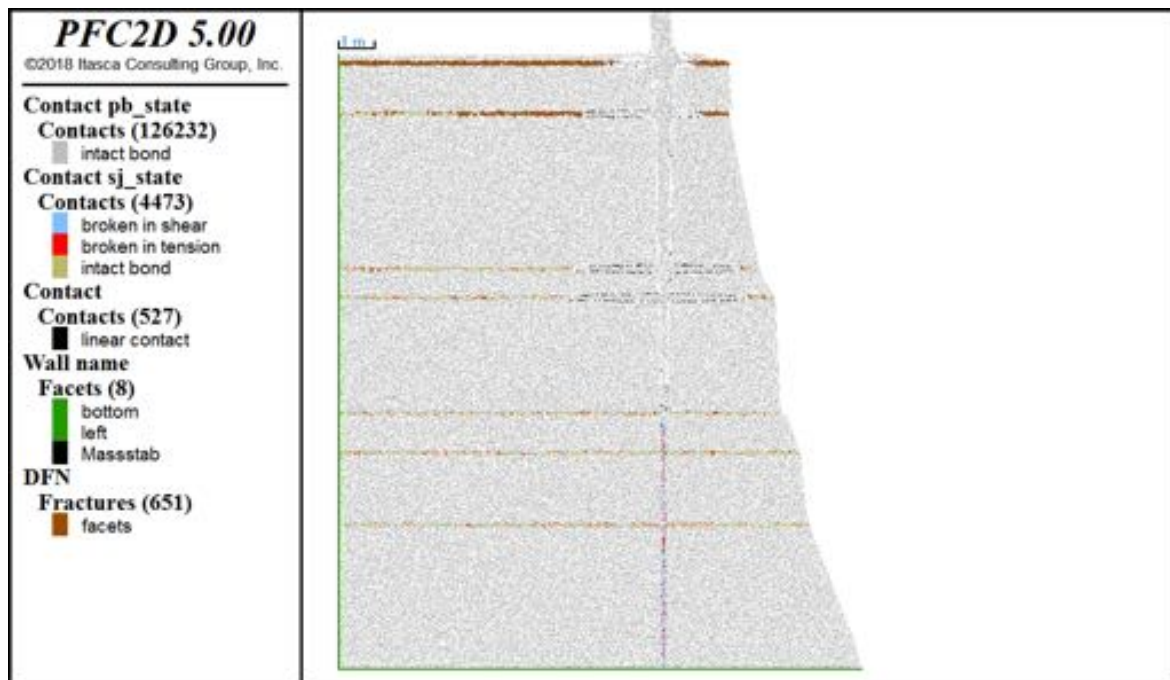


Abb. 6-14: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 8 s Windlast im Modell 1

Zusätzlich haben Lockerungen in den Trennflächen zwischen Baumwurzel und Fels einen Einfluss auf die Bildung von Fragmenten. Die Abbildung 6-15 liefert einen Vergleich der Kontaktbindungen von Wurzel und Fels vor und nach dem Windversuch.

Bevor es zu der Belastung durch angreifenden Wind kommt (Abb. 6-15, linke Bildhälfte), ist die Wurzel mit dem umliegenden Gestein über lineare Kontakte gebunden. Nach 8 s Windlast (Abb. 6-15, rechte Bildhälfte) sind weniger lineare Bindungen, besonders entlang der vertikalen Pfahlwurzel und der horizontalen Wurzel nahe der Geländeoberkante, vorhanden. Es lässt sich daraus ableiten, dass während der Windlast Lockerungen um die Wurzel innerhalb der Kluft stattgefunden haben.

6. Ergebnisse und Interpretation

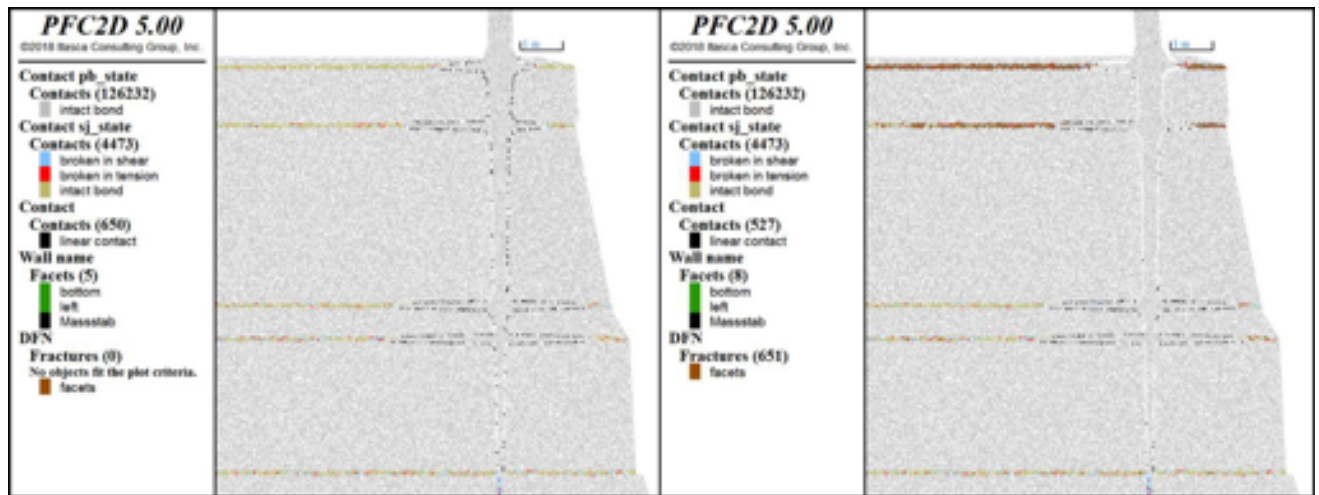


Abb. 6-15: Darstellung der Kontaktbindungen vor (links) und nach (rechts) 8 s Windlast im Modell 1

Die unteren Abbildungen verdeutlichen die Anzahl und Lage von Gesteinsfragmenten nach 3 s (Abbildung 6-16) und nach 8 s (Abbildung 6-17) Windbelastung im Modell 1.

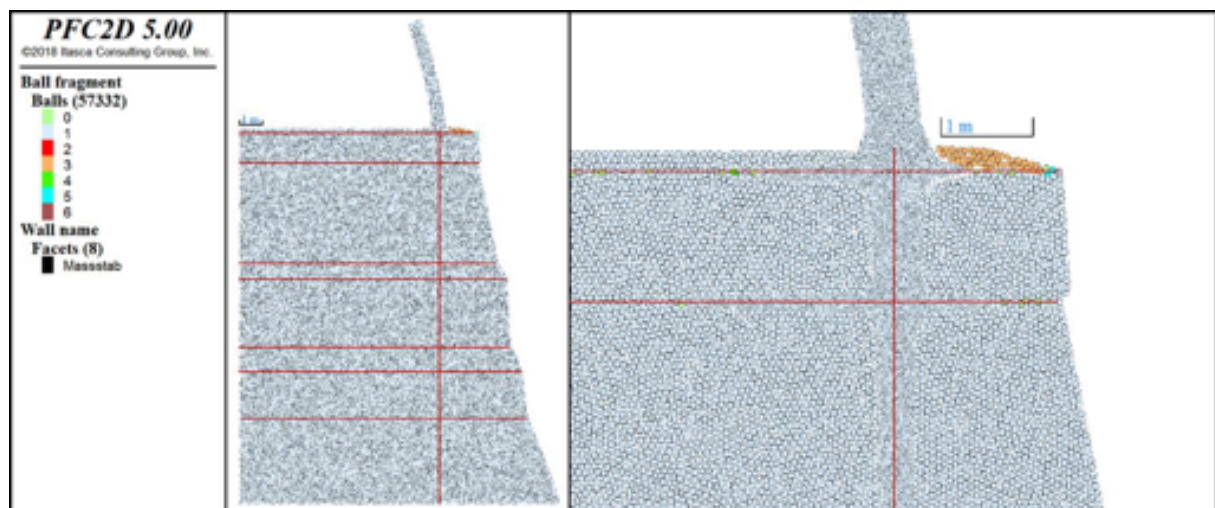


Abb. 6-16: Fragmente im Modell 1 nach 3 s Windlast

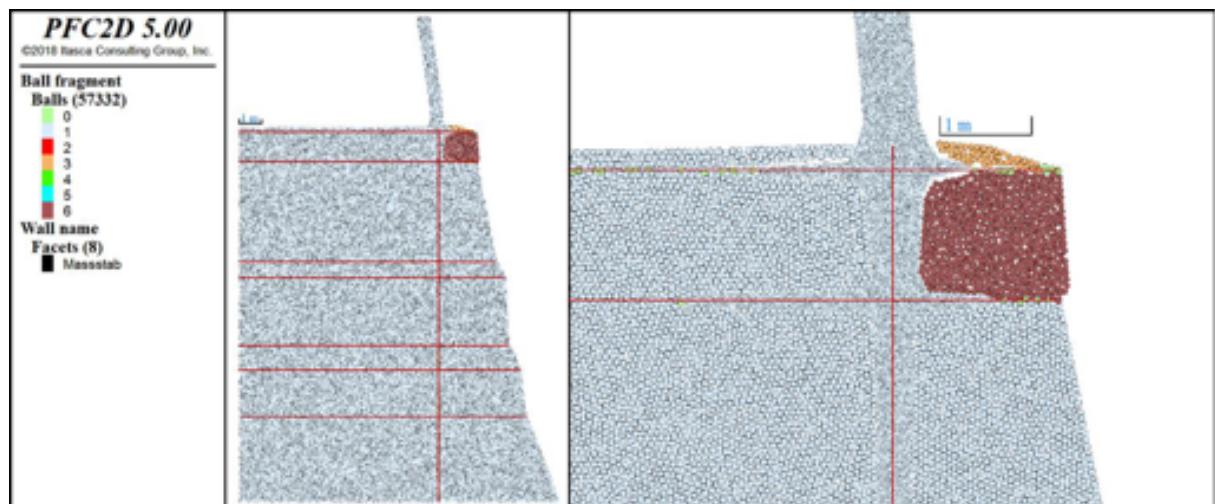


Abb. 6-17: Fragmente im Modell 1 nach 8 s Windlast

Im Modell 1 sind nach schon 3 Sekunden Windlast mehrere Fragmente registriert worden (vgl. unterschiedlich gefärbte Bereiche in Abbildung 6-16). Im Bereich der oberen Felskante befindet sich, mit den Abmessungen von ca. $0,25 \times 0,75 \text{ m}^2$ Fläche, das größte Fragment (Nummer 3) nach 3 Sekunden Lasteinwirkung. Unter der Annahme einer 3D-Tiefe von 1 m ergibt sich, aus dem Volumen und einer Dichte von 2650 kg/m^3 , eine Masse des gelösten Gesteinsblockes von ca. 500 kg. Abbildung 6-17 zeigt, dass nach 8 s angreifenden Wind weitere Fragmente registriert worden sind. Das größte Fragment (Nummer 6) umfasst eine Fläche von ca. $1,4 \times 1,6 \text{ m}^2$. Bei einer Tiefe in 3D von 1 m ergibt sich eine Masse des gelösten Gesteinsblockes von ca. 6 Tonnen. Dies bedeutet, dass der Baum bei angreifendem Wind in der Lage ist, auch Gesteinsblöcke von mehreren Tonnen Gewicht zu bewegen. Eine besondere Gefahr für Felsabgänge stellen Fragmente an der Felskante dar. Erfolgt ein Initialanschub, so kann vollständig aus dem Festverband gelöstes Material in Bewegung versetzt und aus der Ruhelage gebracht werden.

Jedoch bedeutet das Vorhandensein von Brüchen oder Fragmenten im Gebirge nicht automatisch, dass Gesteine oder Blöcke aus dem festen Gesteinsverband herausgelöst werden. Angehobene, aber nicht vollständig gelöste Blöcke können sich nach dem Ende der Belastungsphase wieder setzen und Risse über einen längeren Zeitraum z.B. mit Erdreich aufgefüllt und verfestigt werden. Ebenso können Fragmente bei fehlendem Initialanstoß in der Ruhelage verharren und wieder verfestigt werden. Die Felsstabilität würde sich durch die Verfestigung von Material in den Rissen erhöhen.

Mit den Ergebnissen der numerischen Berechnung zum Windprofil können vergleichbare Aussagen wie zum Modell 2 getroffen werden.

Die Windbelastung von einer Minute konnte nicht durchgeführt werden. Der Versuch musste nach 40 s Windlast beendet werden, weil der Baumstamm bereits nach 23 s abgebrochen ist. Das Diagramm der Abb. 6-18 verdeutlicht, durch den steilen Anstieg der Brüche von linear parallel gebundenen Kontakten, das Versagen des Baumes nach ca. 23 s Belastung. Dass es sich um gebrochene Kontakte des Baumes handelt, wird aus der Abb. 6-19 ersichtlich.

Das Versagen des Baumes im Windprofil erfolgte am Übergang einer Belastungserhöhung von 19,6 kN (14,2 m/s) auf 309,2 kN (56,4 m/s).

Gerechnet wurde mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $v_{\max}=1,0 \text{ m/s}$. Wahrscheinlich ist eine zu schnelle Erhöhung der Windlast in der Simulation Ursache für das Abbrechen. Daher sollte die Belastungsgeschwindigkeit in künftigen numerischen Berechnungen herabgesetzt bzw. dementsprechend angepasst werden.

Eine weitere mögliche Ursache liegt in der unzureichenden Kalibrierung der Bauparameter, wie z.B. auf die Biegefestigkeit und das Rückschwingungsverhalten. Um erste Ergebnisse zur Fragestellung zu erhalten, wurde die numerische Simulation in Hinsicht auf das Material Holz

eher einfach gehalten. Für weitere Untersuchungen ergibt sich, aufgrund der gescheiterten Berechnung zum Windprofil, die Notwendigkeit einer genaueren Kalibrierung des Baumes. Das Windprofil lässt sich bis zum Bruch des Baumstammes auf dieselbe Weise wie die Windversuche der Modelle 1 bis 7 auswerten und liefert dabei ähnliche Ergebnisse wie das Modell 2. Nach dem Abbrechen des Baumes fanden, aufgrund der fehlenden Belastung, keine markanten Änderungen im Gebirge statt.

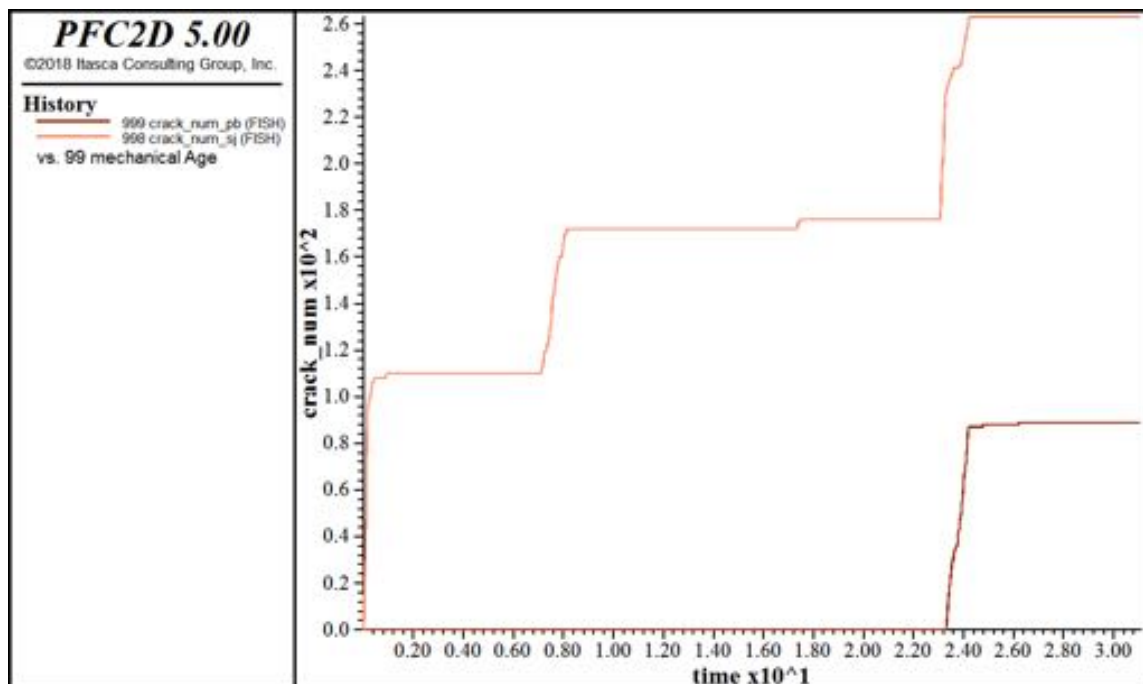


Abb. 6-18: Anzahl der Brüche im Windprofil bis zu einer Belastungszeit von 31 s

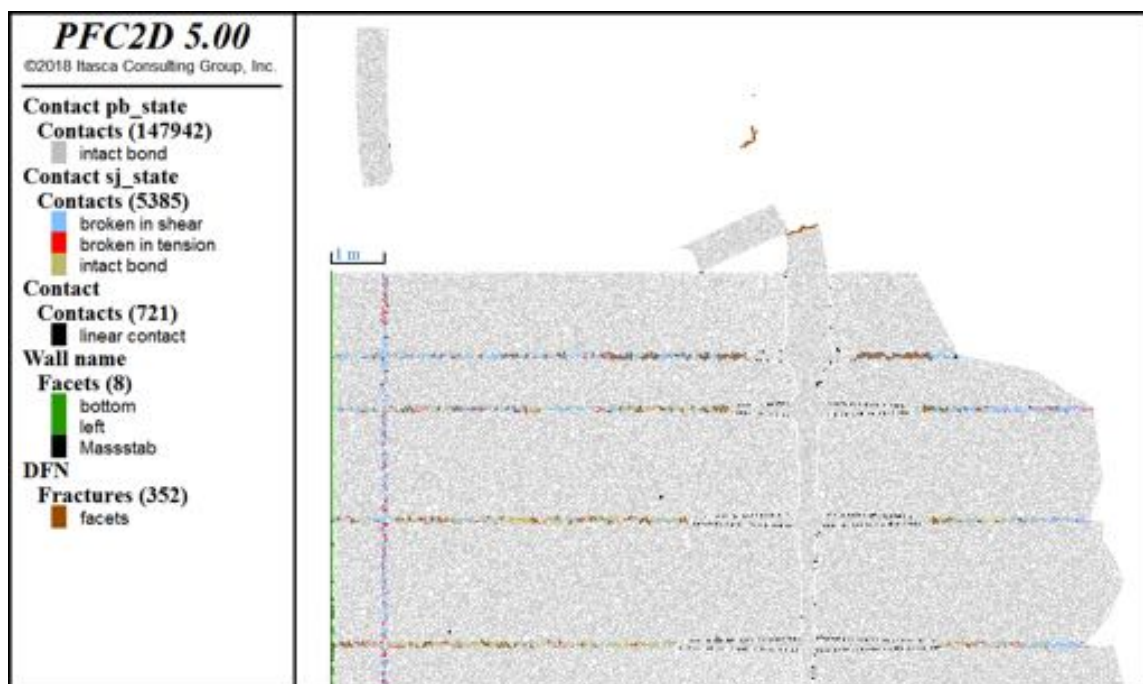


Abb. 6-19: Darstellung der Brüche im Windprofil nach 31 s Belastung

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Geologie des Elbsandsteingebirges liefert natürliche Unstetigkeitsflächen, entlang denen die Gebirgsfestigkeit herabgesetzt wird. Genutzt wurden diese Schwachstellen im Gestein bereits seit Jahrhunderten für den Abbau von Elbsandstein mittels Wandfällen. Im Untersuchungsgebiet der Postelwitzer Wände ergeben sich durch die Steinbrucharbeiten künstlich geschaffenen Überhänge, welche ein hohes Risiko für Felsabgänge darstellen.

Die Klüfte und teilweise stark herausgewitterte Schichtflächen bieten Bäumen gute Bedingungen, um im Festgestein zu wurzeln. Das Wurzelwachstum führt, aufgrund von Wurzeldruck, zur Ausbildung erster Mikrorisse und zu Auflockerungen im Gestein. Der im Gebirge wirkende Wurzeldruck erhöht sich zusätzlich bei Lasteinwirkung auf den Baum, wie in der vorliegenden Arbeit z.B. durch Windbelastung. Die Kraft wird dabei über den Stamm und die Wurzel in den Untergrund geleitet und führt zu Spannungsänderungen im Gebirge.

Mit Hilfe von numerischen Simulationen in PFC^{2D} konnten die Vorgänge im Gebirge bei Windlast auf einen Baum während eines Sturmereignisses, am Beispiel zweier Profile der Postelwitzer Wände, nachvollzogen werden. Weiterhin wurde der Einfluss der Schichtflächenneigung und der Lage des Baumes im Bezug zur Felskante untersucht.

Aufgrund der wirkenden Windlast, sowie der Rückschwingung des Baumes traten nach wenigen Sekunden Belastung Verschiebungen im Gebirge auf, welche besonders entlang der oberen Felskante Werte von bis zu einigen Zentimetern liefern. Innerhalb der Trennflächen zwischen Baumwurzel und Fels fanden Lockerungen statt. Die Betrachtung der Porosität und Kontaktbindungen während des Versuchs lieferte das Ergebnis eines stetig intakten Felses. Hingegen sind die Trennflächen Ursache für mögliches Felsversagen. Brüche bildeten sich überwiegend in den obersten Schichtflächen im Bereich der Wurzel aus und reichen teilweise bis an die Felskante heran.

Der Umstand eines intakten Felses, aber gelockerten Klüften und bis zur Felskante durchgebrochenen Schichtflächen spricht für ein Herauslösen von größeren Blöcken aus dem festen Gebirgsverband. In der Simulation konnte dies anhand des Felsmassives Nr. 7 (Profil 1) nachvollzogen werden. Im Profil 1 liegen nach 8 s Windlast Gesteinsblöcke von bis zu mehreren Tonnen Masse, bei einer abgeschätzten 3D-Tiefe, als Fragmente vor.

Die Stabilität der Felskante ist insbesondere von der Lage des Baumes abhängig. Je näher der Baum an der Felskante, desto größer die Gefährdung von Felsabgängen. Ebenso darf der Einfluss der Schichtflächenneigung nicht vernachlässigt werden. Die mit Abstand größte Lockerung um einen Gesteinsblock fand an der obersten Felskante bei einer Neigung der Schichtfläche um 10° zur Geländeoberkante statt. Zudem liefert die Verschiebung dieses Blockes von >9 cm nach 25 s Belastung den, im Vergleich mit den anderen Windversuchen, höchsten Wert. Grundsätzlich weisen die Trennflächen zwischen Wurzel und oberer Felskante

bei Schichtflächenneigung eine größere Bruchbildung auf als bei horizontaler Lage. Somit trägt eine Neigung der Schichtfläche im Windversuch zur Instabilität der Felskante bei.

Schlussendlich lässt sich sagen, dass ein Zusammenhang zwischen Felsinstabilität und erhöhtem Wurzeldruck bei Windbelastung auf Bäume nachgewiesen werden konnte.

Das Untersuchungsgebiet der Postelwitzer Wände zeigt eine Gefährdung durch Felsversagen vorwiegend entlang der Felskante, insbesondere bei geneigten Schichtflächen und Bäumen mit wenigen Metern Entfernung zur Felskante. Dabei findet ein mögliches Versagen ausschließlich innerhalb der Trennflächen statt. Das Gestein selbst bleibt intakt.

Da die Lage und Anzahl der Schichtflächen in beiden Profilen, sowie das Vorhandensein von Bäumen in den Klüften, keine tatsächliche Gegebenheit der Postelwitzer Wände widerspiegelt, sind die Ergebnisse als allgemeine Aussagen zu Felsversagen bei Windbelastung anzusehen und lassen keine konkreten Anwendungsmaßnahmen, z.B. für Sicherungsarbeiten zu.

Die numerischen Simulationen der vorliegenden Arbeit liefern lediglich erste Aussagen zur Fragestellung. Aufgrund der Dreidimensionalität von Baum und Gebirge sind die erstellten 2D-Modelle eine unzureichende Darstellung der Natur. Die Ergebnisse sollten daher kritisch betrachtet und als erste Annäherung an das tatsächliche Verhalten angesehen werden.

Um die Gegebenheiten und Abläufe in der Natur während eines Sturmereignisses genauer darzustellen, ist die Entwicklung eines 3D-Modells, beispielsweise mit PFC^{3D}, empfehlenswert. Angewandt auf konkrete Untersuchungsgebiete könnten, mit Hilfe der erhaltenen Ergebnisse, anschließend Vorschläge zu notwendigen Sicherungsmaßnahmen ausgearbeitet werden.

IV. Literatur- und Quellenverzeichnis

Literatur:

- AFB (ARBEITSSTELLE FÜR BAUMSTATIK) (2002): *Baumstatik. Was ist Baumstatik?*. Online im Internet unter http://www.baumstatik.de/pages/frames/frame_baumstatik.html (26.05.2019)
- GRUNER U. & BRÖNNIMANN C. (2016): *Felsstürze und Klimawandel – Auswertung historischer Daten aus dem Kanton Bern*. In: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern 2016, 135-149
- GRUNERT S. (2007): *Der Elbsandstein: Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften*. In: GEOLOGICA SAXONICA. Journal of Central European Geology 2007, 52/53, 3-22
- HERBST B., SCHILLINGER C. & FICKERT T. (2014): *Gefährliche Felsböschungen im Nördlichen Frankenjura. Geologischer Rahmen, Gefährdungspotenzial und mögliche Sicherungsmaßnahmen*. In: Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft 2014, Band 59, 59–74
- HINTEREGGER P. (2018): *Nachbetrachtung Windböen von Sturm/Orkan Friederike*. In: k.Wetterkanal, 2019. Online im Internet unter <https://wetterkanal.kachelmannwetter.com/nachbetrachtung-windboeen-von-sturmorkan-friederike/> (26.05.2019)
- ITASCA (2015): *Itasca. PFC 5.0 Manual.Ink [Software]*. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, 55401 USA
- JAHN J. (1988): *Entwaldung und Steinschlag*. In: Internationales Symposion INTERPRAEVENT (Hg.): Tagungspublikation, Band 1, Graz: o.A., 185-198
- KONIETZKY H., HERBST M., MARTIENßEN T. & GÖTZE J.-U. (2009): *Entwicklung geotechnischer Methoden und eines geomechanischen Modells zur Beurteilung der Standsicherheiten von Kreidesandsteinen bei fortschreitender Verwitterung zur Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit*. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben gefördert vom Sächs. Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, vertreten durch das Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 104 S.
- KUTSCHKE D. (2000): *Steinbrüche und Steinbrecher in der Sächsischen Schweiz*. Pirna: Stadtmuseum (Geschichtliche und heimatkundliche Beiträge aus Pirna und Umgebung, 11), 200 S.
- LEMME H. & ENGELMANN G. (1959): *Zwischen Sebnitz, Hinterhermsdorf und den Zschirnsteinen. Ergebnisse der heimatkundlichen Bestandsaufnahme im Gebiet von Sebnitz Hinterhermsdorf Schöna und Am Raumberg*. Berlin: Akademie-Verl. (Werte der deutschen Heimat, 2), 234 S.
- LIPSMEIER A. (Hg.) (1994): *FRIEDRICH. Tabellenbuch Holztechnik*. 10.Aufl., Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag, 416 S.
- PÄLCHEN W. (2009): *Georessourcen, Geopotenziale, Georisiken*. Mit 55 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart (Geologie von Sachsen, 2), 307 S.
- PÄLCHEN W. & WALTER H. (2011): *Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte*. Mit 16 Tabellen. 2.Aufl., Stuttgart: Schweizerbart (Geologie von Sachsen, 1), 537 S.
- RAST H. (1959): *Geologischer Führer durch das Elbsandsteingebirge*. Freiberg: Bergakademie Hauptabt. Fernstudium, 224 S.
- REUTER F., KLENGEL K. J. & PAŠEK J. (1992): *Ingenieurgeologie. Mit 181 Tabellen*. 3.Aufl., Leipzig/Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 603 S.

THORN P. & SCHOPBACH H. (2007): *Vom Winde verweht – Ermittlung von Windlasten nach der neuen DIN 1055-4*. In: Holzbau - die neue quadriga 2007, 05/2007, 44-48

WETTERDIENST.DE (2019): *Lexikon. Böe*. Online im Internet unter <https://www.wetterdienst.de/Service/Lexikon/Boee> (26.05.2019)

Quellen:

KLENGEL K.J. & RICHTER H.C. (1987): *Geotechnisches Gutachten zur Standsicherheit der Restlochböschungen „Postelwitzer Wände“*. Unveröffentlichtes Gutachten, Bergsicherung Dresden

QUANTUM GIS (2002): *Quantum-Geoinformationssystem [Software]*. QGIS Development Team, o.O.

SACHSEN.DE (2019): *Landwirtschaft. Agrarmeteorologisches Messnetz Sachsen – Wetterdaten*. Online im Internet unter <https://www.landwirtschaft.sachsen.de/Wetter09/asp/inhalt.asp?seite=twerte> (26.05.2019)

V. Anhang

A Darstellungen der Kalibrierung

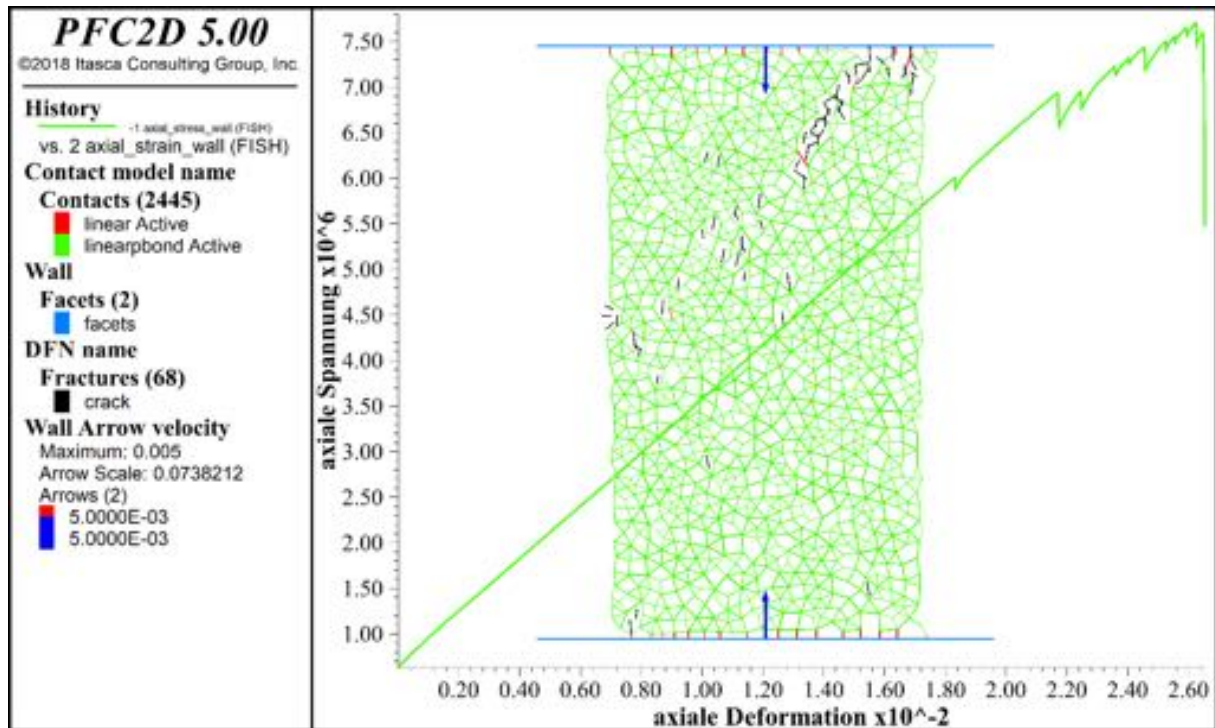


Abb. A-1: Probenkörper zum Material „Kiefer“ nach dem Druckversuch; maximale Druckfestigkeit: 7,7 MPa

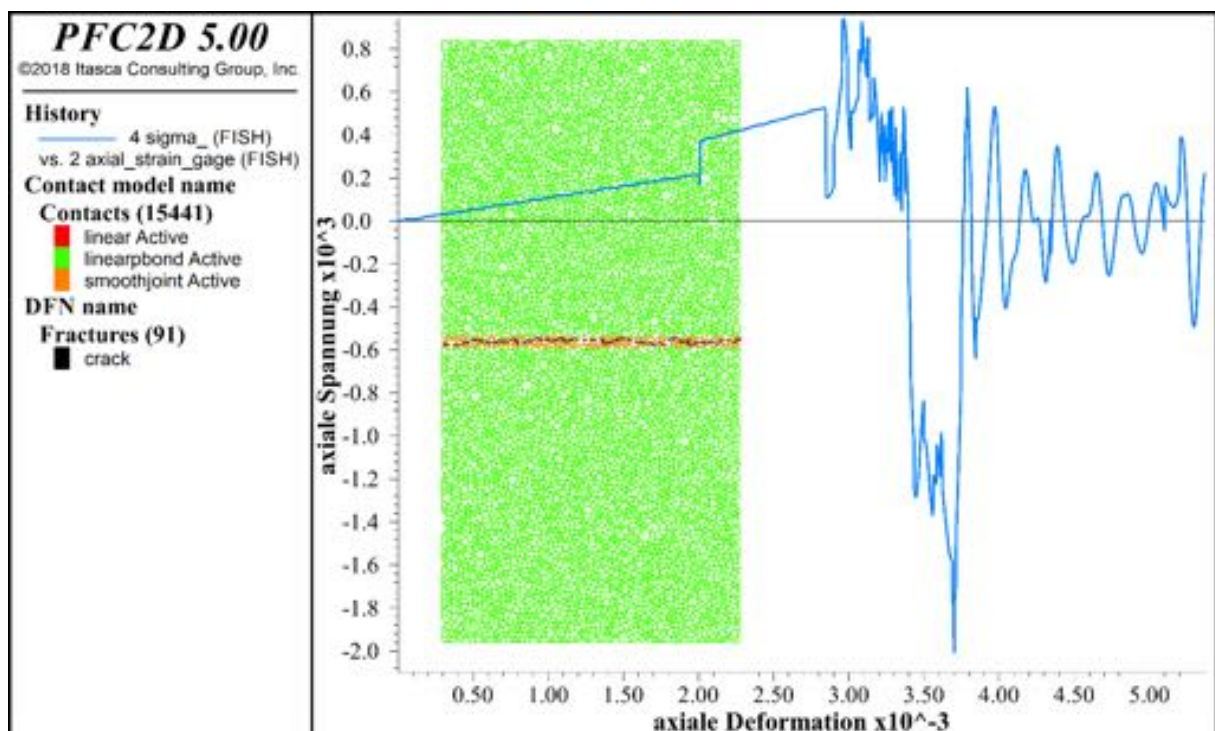


Abb. A-2: Probenkörper zum Material „Postea Sandstein mit Trennfläche“ nach dem Zugversuch; maximale Zugfestigkeit: 2 kPa

B Abbildungen der Verschiebung

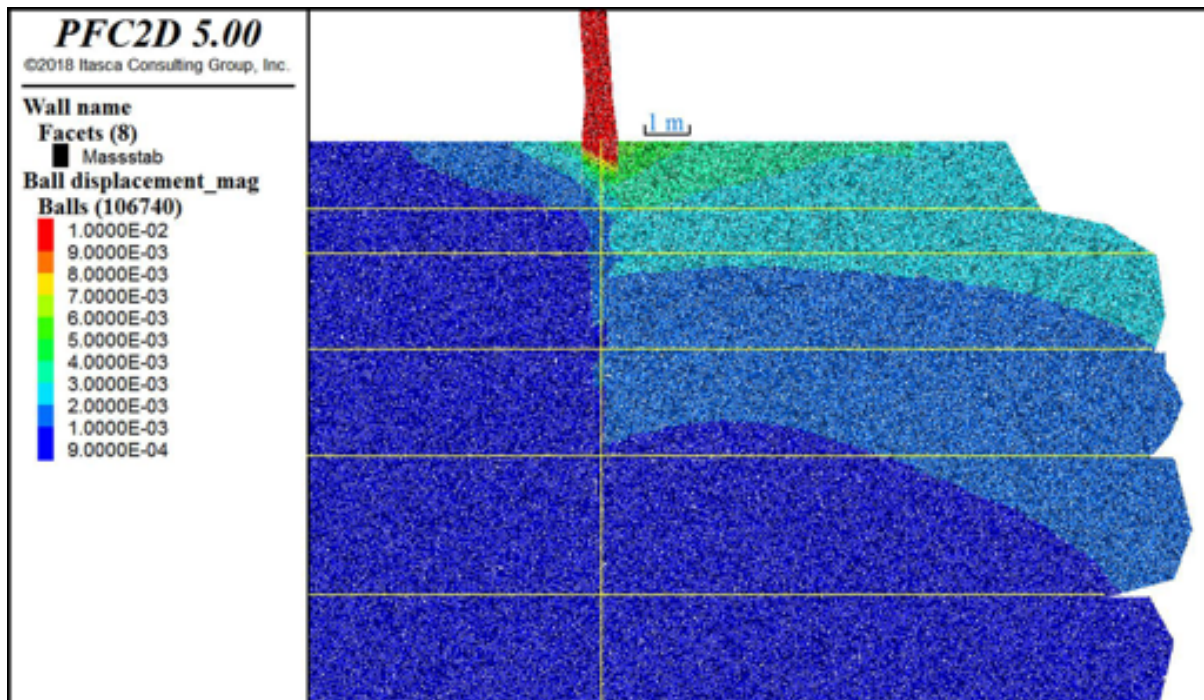


Abb. B-1: Verschiebungen im Modell 3 nach 20 s Windlast

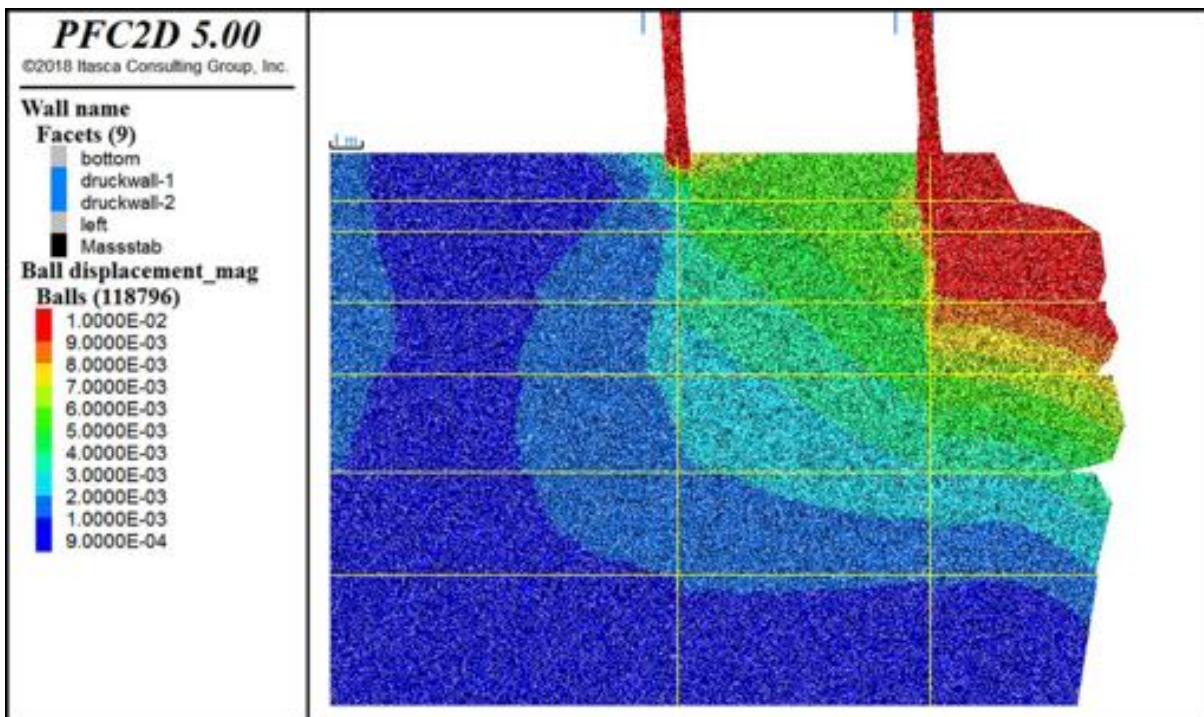


Abb. B-2: Verschiebungen im Modell 4 nach 20 s Windlast

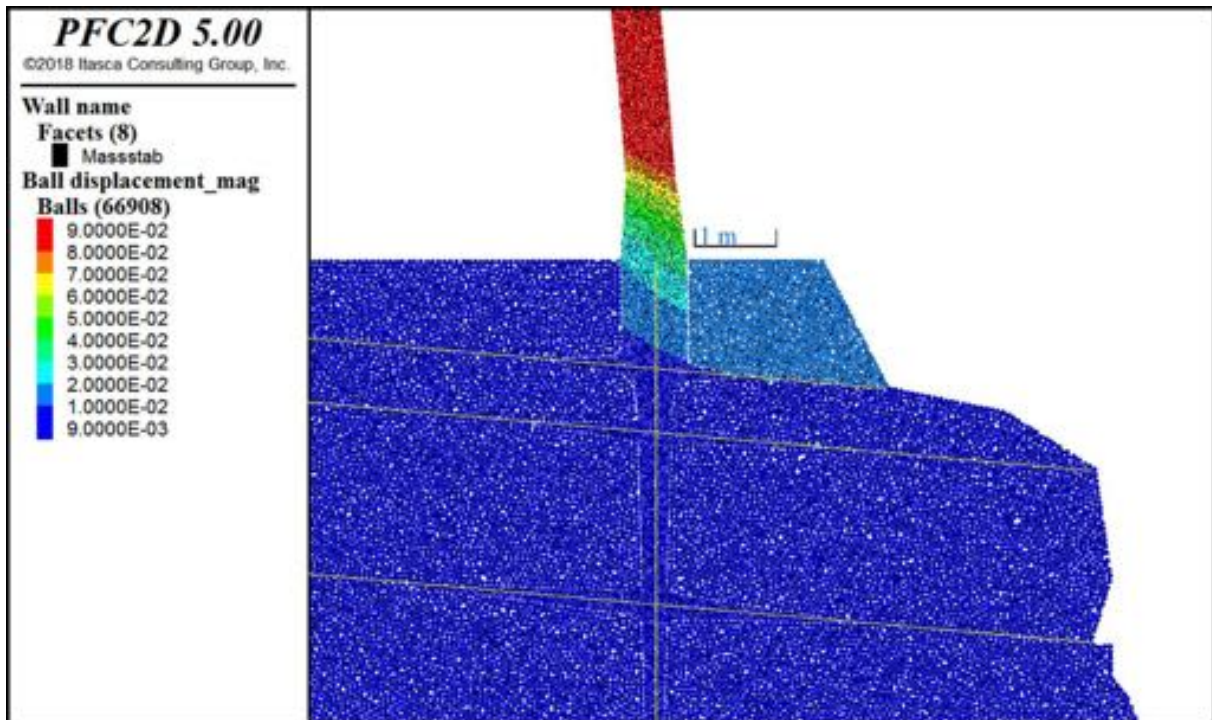


Abb. B-3: Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 22 s Windlast im Modell 5

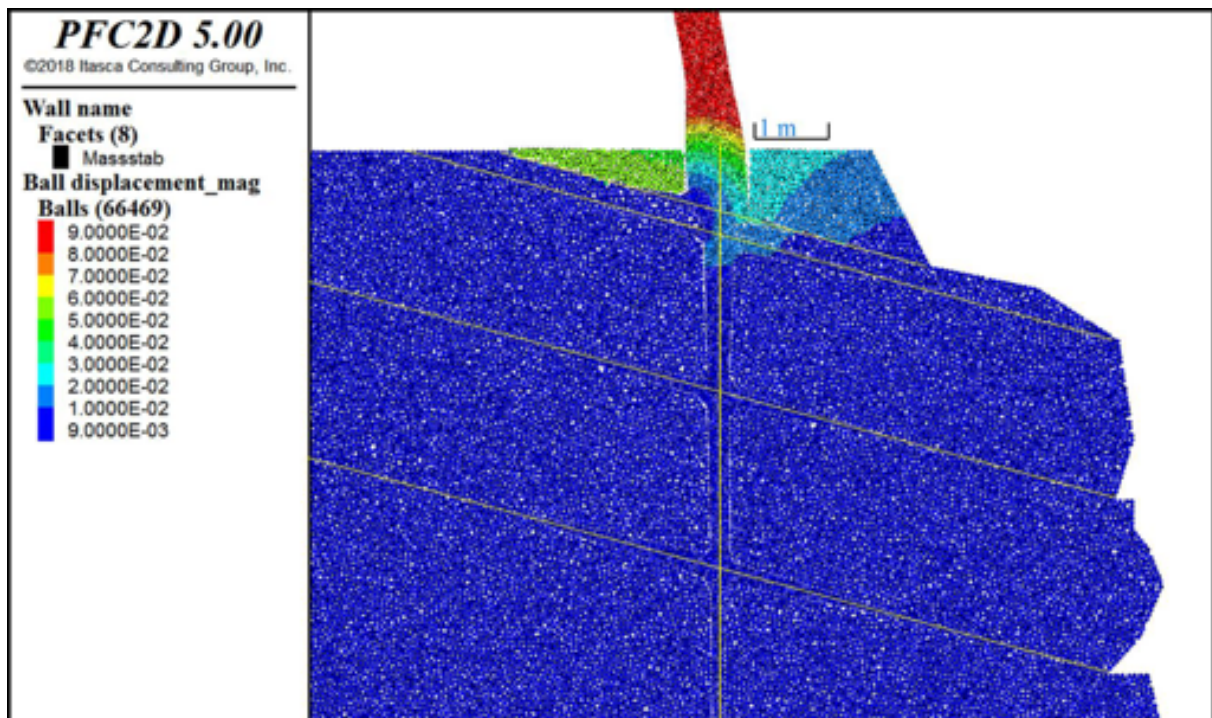


Abb. B-4: Darstellung der Verschiebungen im cm-Bereich nach 25 s Windlast im Modell 7

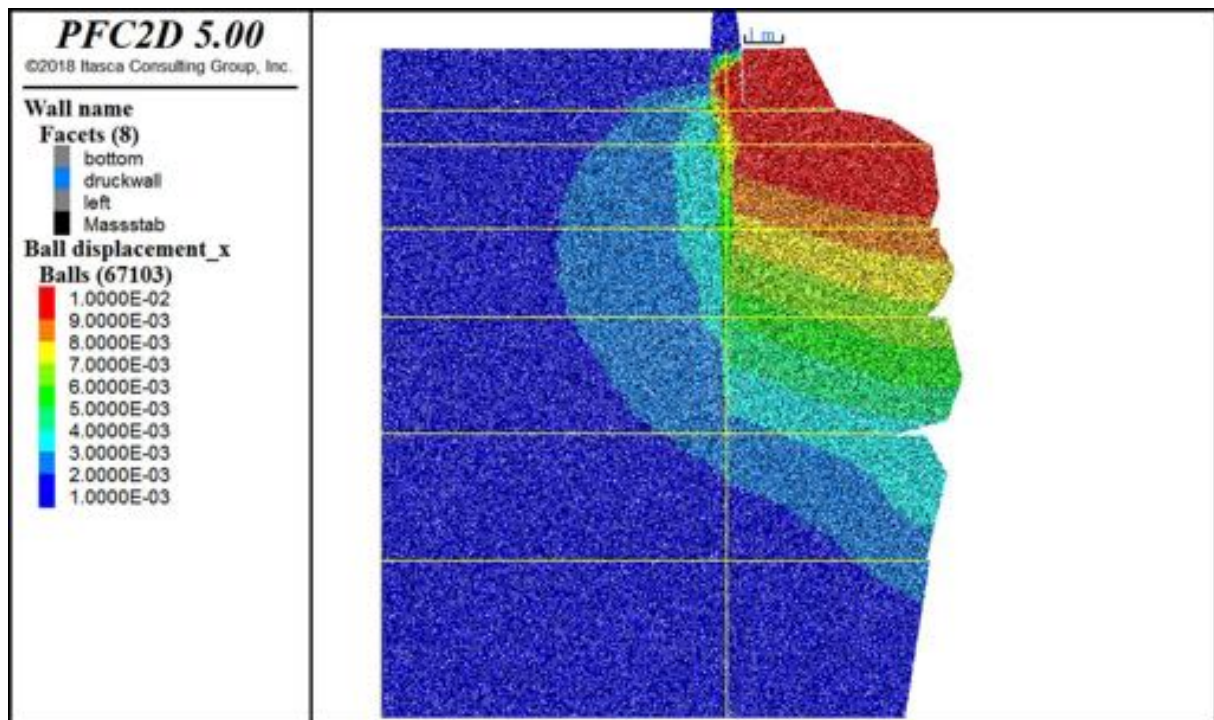


Abb. B-5: Verschiebungen in x-Richtung im Modell 2 nach 25 s Windlast

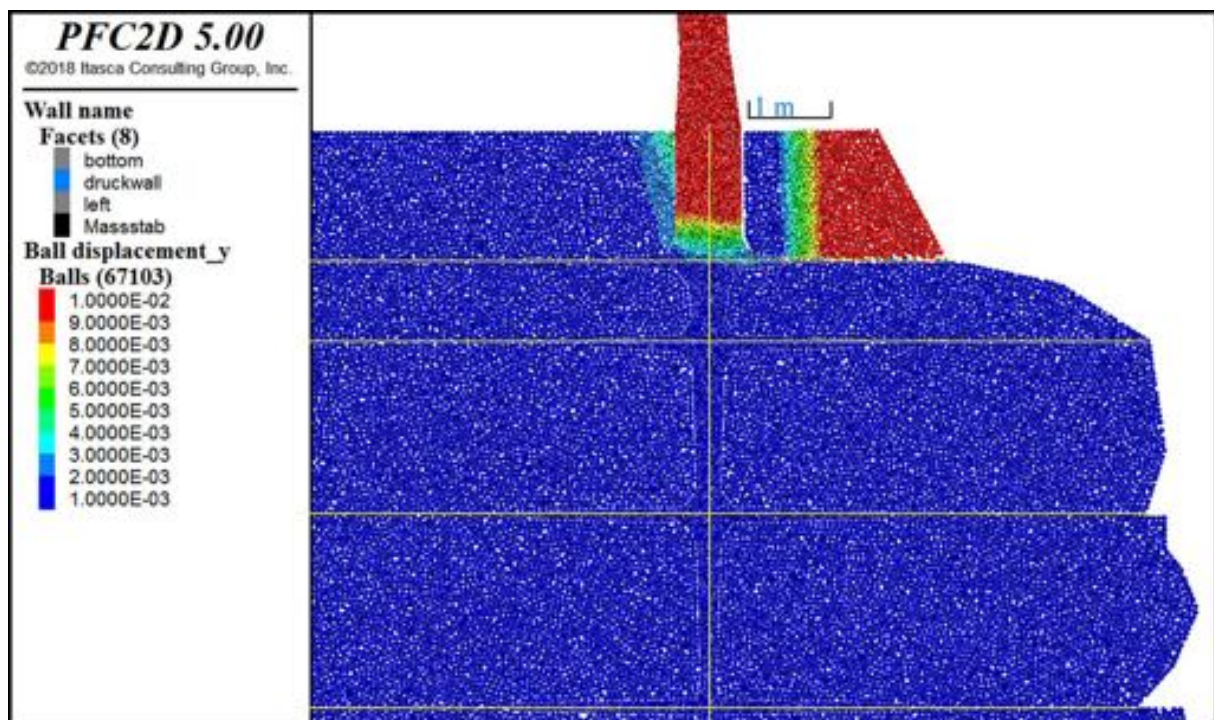


Abb. B-6: Verschiebungen in y-Richtung im Modell 2 nach 25 s Windlast

C Diagramm der Porosität

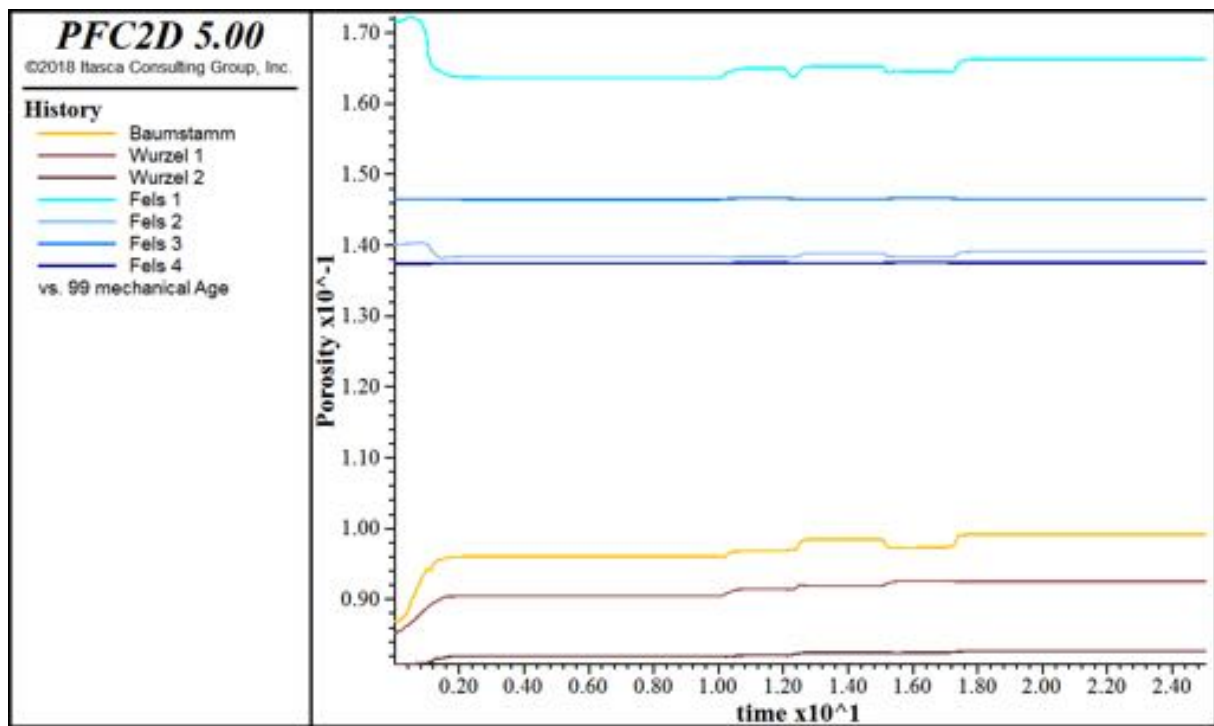


Abb. C-1: Änderungen der Porosität von Fels und Baum im Modell 7 während des Windversuchs

D Abbildungen der Kontaktbindung und Bruchbildung

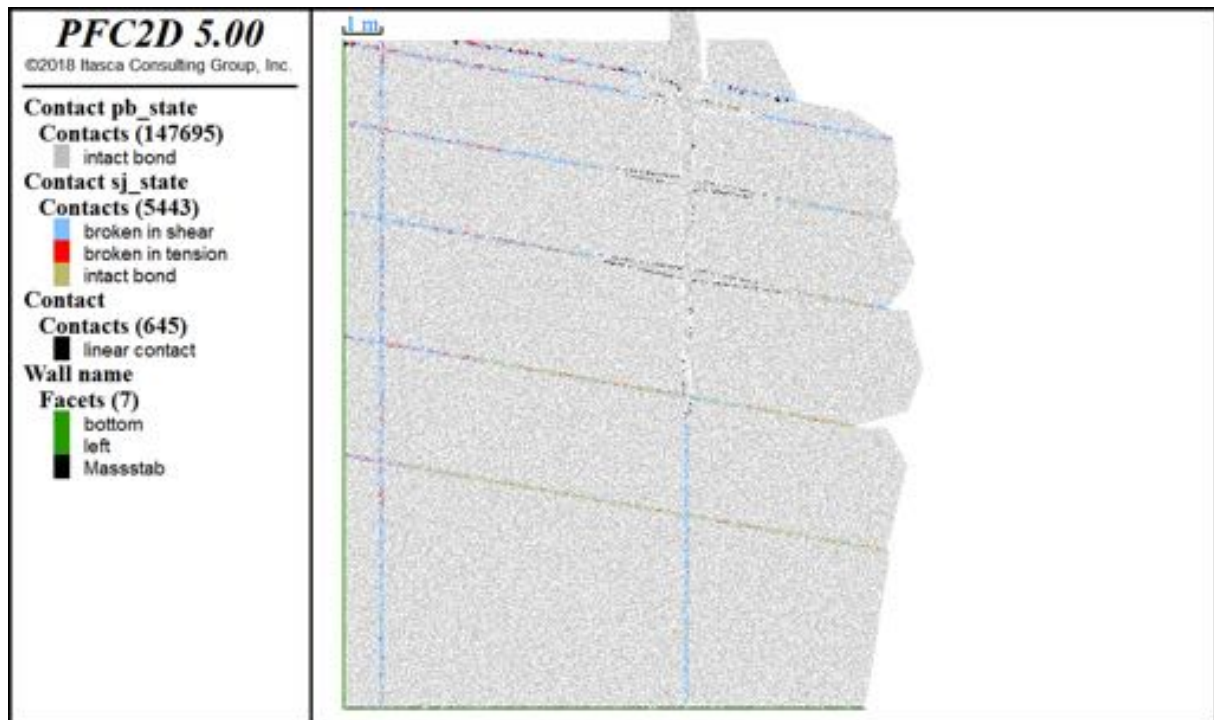


Abb. D-1: Zustand der Kontaktbindungen im Modell 6 nach 25 s Windlast

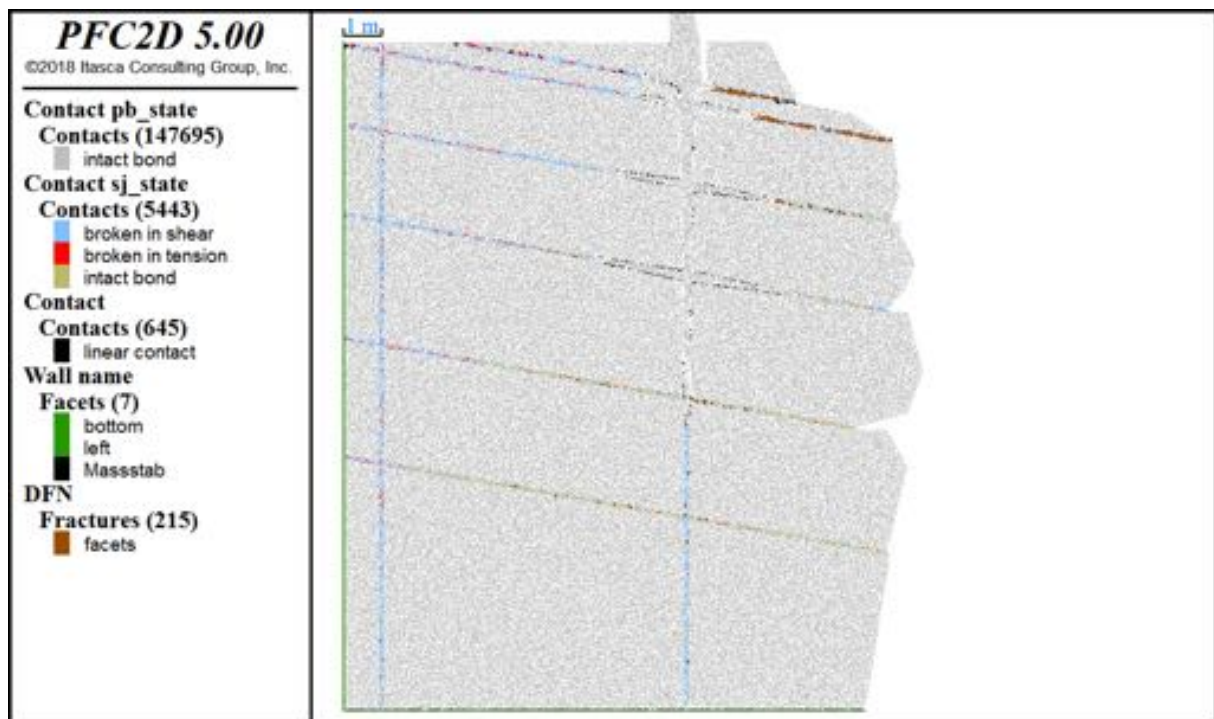


Abb. D-2: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 25 s Windlast im Modell 6

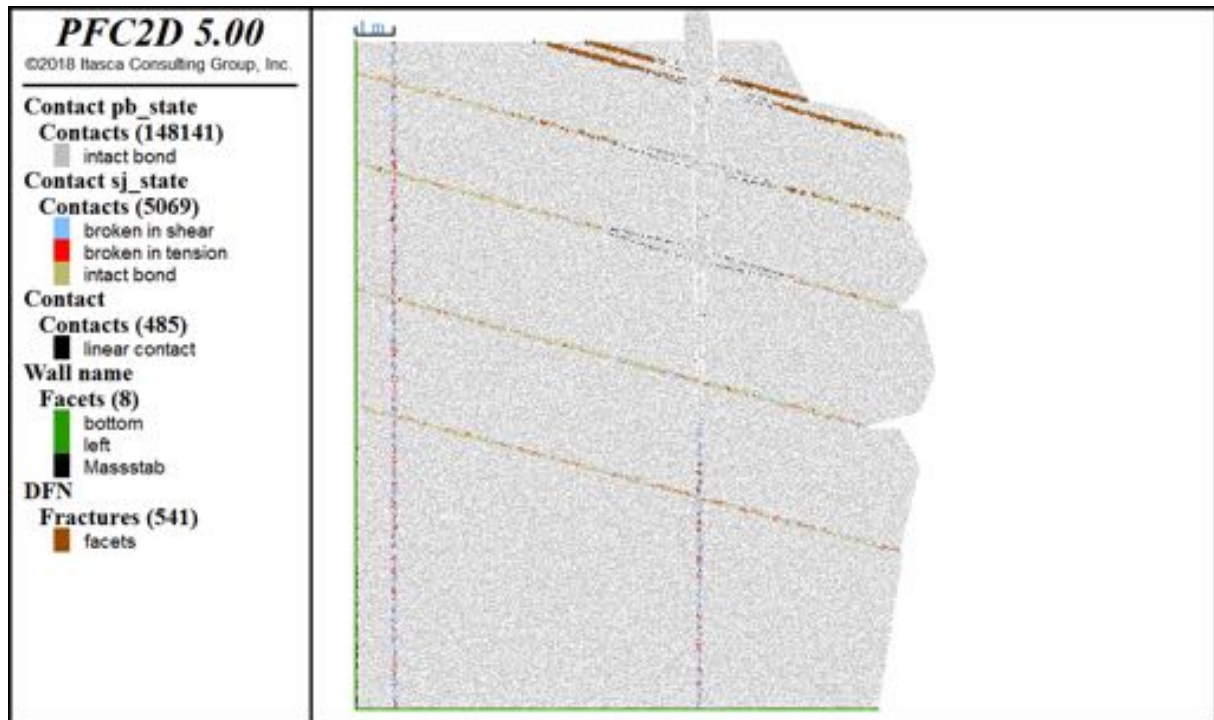


Abb. D-3: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 25 s Windlast im Modell 7

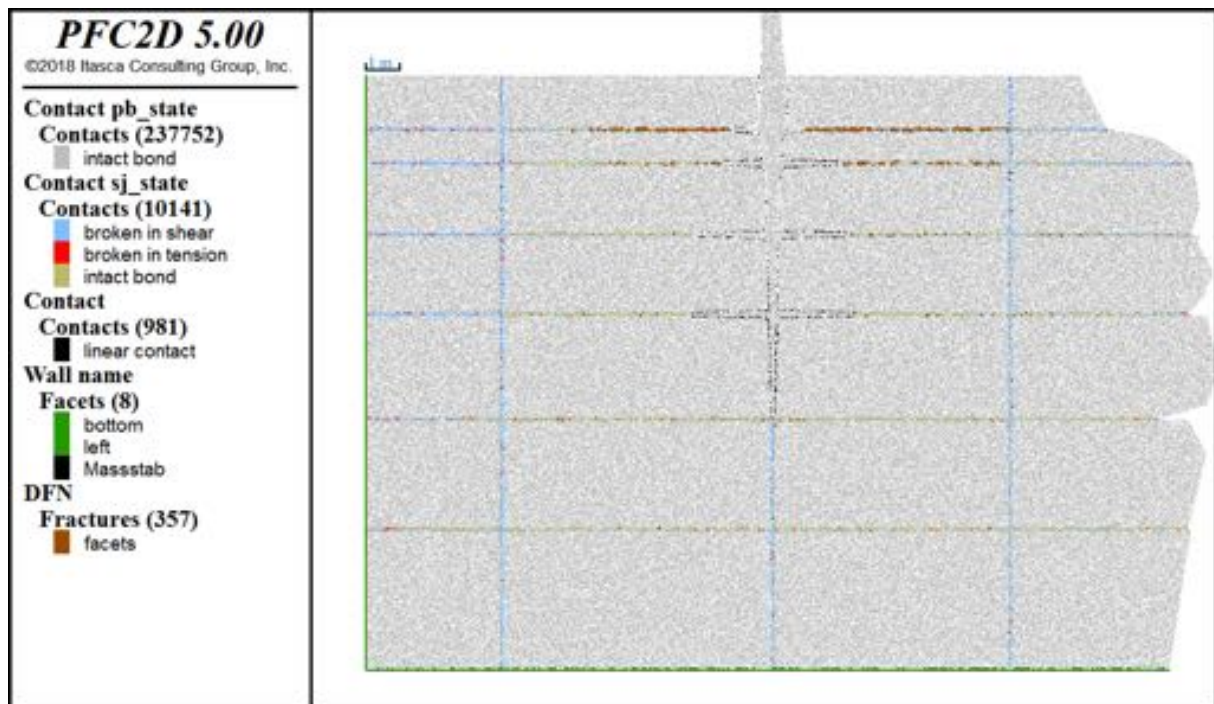


Abb. D-4: Darstellung der Brüche im Gebirge nach 20 s Windlast im Modell 3