

Masterarbeit

Untersuchungen zur Frage der Gesamtstabilität der geplanten untertägigen Abbaue im Tagebau Gummern

Tobias Ladinig

Datum(28/10/2016)



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Department Mineral Resources Engineering
MontanuniversitätLeoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18
Tel.Nr.: +43 3842-402-2001
Fax: +43 3842-402-2002
bergbau@unileoben.ac.at

Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Datum

Tobias Ladinig

Vorwort, Widmung, Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich gerne bei Herrn Prof. Wagner für seine ausgezeichnete Betreuung meiner Diplomarbeit und die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren bedanken. Während dieser Zeit hat er mein Interesse an der Gebirgsmechanik und Bergbauplanung vertieft sowie in Vorlesungen und zahlreichen Diskussionen mein Wissen erweitert.

Mein weiterer Dank gebührt meiner Familie, Freunden, Arbeitskollegen und allen weiteren Personen, die mich während meines Studiums unterstützt und mir eine lustige, lehrreiche und spannende Zeit gegeben haben. Abschließend möchte ich nochmals meine Familie erwähnen, die mir in guten sowie weniger guten Zeiten immer mit Rat und Tat zur Seite steht und mich bei der Erfüllung meiner Ziele vollends unterstützt.

Zusammenfassung

Im Bergbau Gummern ist geplant, aus dem Tagebau unzugängliche Teile der Lagerstätte mit dem Raise-mining Abbaufahren zu gewinnen. Im Zuge dieser Arbeit werden daher die gebirgsmechanischen Aspekte des Raise-mining und die Standfestigkeit der geplanten Abbaue in Gummern untersucht. Das Raise-mining ist eine Variante des herkömmlichen Kammerbaus, unterscheidet sich allerdings von diesem durch die zylindrische Kammergeometrie. Obwohl das Raise-mining Abbaufahren durch diese besondere Form der Kammern und des allseitig eingespannten Festensystems aus gebirgsmechanischer Sicht Vorteile gegenüber einem herkömmlichen Kammerbau aufweist, wird es zurzeit dennoch nicht angewandt. Aus diesem Umstand resultiert in weiterer Folge ein unzureichender Erfahrungsstand betreffend des Zuschnitts eines Raise-mining Abbaus. Daher werden zunächst die grundlegenden gebirgsmechanischen Aspekte des Raise-mining Abbaufahrens untersucht, um allgemeine Aussagen über Zuschnittsparameter eines Raise-mining Abbaus zu tätigen. Diese Parameter sind im Speziellen die Kammergeometrie, der Zentralabstand der Kammern, die Abbaufeldgröße, die Abbaurichtung innerhalb eines Abbaufeldes und die Barrierefestenbreite zwischen Abbaufeldern. In weiterer Folge werden zudem die Erkenntnisse dieser Untersuchungen auf den Bergbau Gummern übertragen und die Standfestigkeit der geplanten Raise-mining Kammern untersucht. Aufgrund der Nähe des untertägigen Abbaus zur Tagebauendböschung werden zusätzlich die Auswirkungen auf deren Standfestigkeit analysiert. Die dazu durchgeführten Studien erfolgen in erster Linie an Hand von numerischen Simulationen, weil derzeit Raise-mining nicht angewandt wird.

Abstract

In the Gummern quarry it is planned to use the raise-mining system for mining parts of the deposit, which cannot be recovered by the current open-pit mining activities. Therefore general rock mechanical aspects of raise-mining and the stability of the planned underground mining activities are investigated. Raise-mining is in general a variation of stoping systems based on pillars. However, in contrast to these systems stopes of cylindrical shape are mined. Although this special stope geometry and the all side confined pillar system offer from a rock mechanical point of view in comparison to other stoping systems considerable advantages, raise-mining has not been applied so far. As a result there is a lack of experience regarding the design of such a raise-mining system. For this reason important parameters for the design of a raise-mining system are first of all investigated. Basically these parameters are the geometry of the stopes, the central distance between neighbouring stopes, the dimensions of a mining panel, the mining direction inside a mining panel and the width of barrier pillars between mining panels. In a next step the results of these basic investigations are used for determining the stability of the planned raise-mining stopes in the Gummern quarry. Moreover the impact of underground mining on the stability of the nearby pit slope is evaluated. Due to the fact that raise-mining is not applied nowadays, there are any underground mines for in-situ analyses available. For this reason the investigations are mainly based on numerical simulations.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Ehrenwörtliche Erklärung | II |
| Vorwort, Widmung, Danksagung..... | III |
| Zusammenfassung..... | IV |
| Abstract..... | V |
| Inhaltsverzeichnis..... | VI |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Raise-mining Abbauverfahren..... | 2 |
| 3 Raise-mining im Bergbau Gummern | 10 |
| 3.1 Bergwerkszuschnitt | 10 |
| 3.1.1 Lagerstätte | 11 |
| 3.1.2 Tagebau..... | 12 |
| 3.1.3 Untertagebau | 13 |
| 3.2 Gebirgsverhältnisse..... | 16 |
| 3.2.1 Homogenbereiche..... | 17 |
| 3.2.2 Gesteinsparameter..... | 20 |
| 3.2.3 Gebirgsklassifikation | 22 |
| 3.2.4 Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit..... | 26 |
| 4 Literaturrecherche | 30 |
| 5 Standfestigkeitsuntersuchungen | 31 |
| 5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen | 32 |
| 5.1.1 FLAC 3D | 32 |
| 5.1.2 Simulationsnetze..... | 33 |
| 5.1.3 Simulationsparameter | 37 |
| 5.1.4 Simulationsablauf..... | 40 |
| 5.1.5 Auswertung der Ergebnisse | 42 |
| 5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen | 44 |
| 5.1.7 Anmerkungen zu den Materialgesetzen | 50 |
| 5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer..... | 53 |
| 5.2.2 Primäre Spannungszustand..... | 73 |
| 5.2.3 Gebirgsstruktur..... | 80 |
| 5.2.4 Überlegungen zu einer möglichen Anpassung der empirischen Designkriterien nach Laubscher und Matthews an die zylindrische | |

| | |
|---|-----|
| Kammerform | 89 |
| 5.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 92 |
| 5.2.6 Fallbeispiel: Einzelne Kammer in Gummern | 95 |
| 5.3 Standsicherheit des gesamten Abbaubereichs | 99 |
| 5.3.1 Zentralabstand | 99 |
| 5.3.2 Abbaufeldbreite | 113 |
| 5.3.3 Versagen von Festen | 121 |
| 5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 129 |
| 5.3.5 Fallbeispiel: Erweiterung eines Abbaufelds in Gummern | 132 |
| 5.4 Geometrie des Abbausystems | 132 |
| 5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld | 132 |
| 5.4.2 Versagen einer Feste in einem Abbaufeld | 148 |
| 5.4.3 Lage/Größe/Form der Abbaufelder | 155 |
| 5.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 178 |
| 5.4.5 Fallbeispiel: Abbaufeld in Gummern | 181 |
| 5.5 Abbausequenz | 181 |
| 5.5.1 Abbausequenz 1: Abbau entwickelt sich in eine Richtung | 182 |
| 5.5.2 Abbausequenz 2: Abbau von voneinander entfernten Kammern | 187 |
| 5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 191 |
| 5.5.4 Fallbeispiel: Abbaufeld inklusive Abbausequenz in Gummern | 192 |
| 5.6 Interaktion zwischen Tagebauböschung und Kammern..... | 199 |
| 5.6.1 Simulationsverlauf..... | 200 |
| 5.6.2 Auswertung der Ergebnisse | 202 |
| 5.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 209 |
| 6 Schlussfolgerungen..... | 211 |
| 7 Literaturverzeichnis | 215 |
| 8 Abbildungsverzeichnis..... | 217 |
| 9 Tabellenverzeichnis..... | 230 |
| 10 Abkürzungsverzeichnis..... | 231 |

1 Einleitung

Die Firma Omya plant im Bergbau Gummern, jene Teile der Lagerstätte, die sich hinter der ostseitigen Tagebauendböschung befinden, untertägig mit dem Raise-mining Abbauverfahren zu gewinnen. Das Raise-mining ist eine Variante des herkömmlichen Kammerbaus, wobei der wesentliche Unterschied in der Geometrie der Kammern und Bergfesten sowie in der Art der Aus- und Vorrichtung der Kammern besteht. Der Abbau der Kammern erfolgt durch zylindrisches Aufweiten eines Schachts, dem so genannten Raise, woraus eine zylindrische Kammer- und Festengeometrie resultiert. Diese geschwungene Form der Festen und Kammern ist aus gebirgsmechanischer Sicht im Allgemeinen als günstiger als die quaderförmige eines herkömmlichen Kammerbaus einzustufen. Des Weiteren bilden die Festen beim Raise-mining Abbauverfahren ein Festensystem, das allseitig horizontal eingespannt ist. Obwohl das Raise-mining aufgrund dieser Umstände betreffend Gebirgsmechanik Vorteile gegenüber einem herkömmlichen Kammerbau aufweist, wird es derzeit nicht angewandt. Daraus resultiert ein unzureichender Erfahrungsstand für die gebirgsmechanische Auslegung eines Raise-mining Abbaus. Aus diesem Grund werden zunächst Untersuchungen betreffend die grundlegenden gebirgsmechanischen Aspekte durchgeführt. Diese umfassen im Wesentlichen Analysen bezüglich des Einflusses von wichtigen Zuschnittsparametern auf die Standfestigkeit des Abbaus. Im Speziellen sind dafür die Kammergeometrie, der Zentralabstand der Kammern, die Abbaufeldgröße, die Abbaurichtung innerhalb eines Abbaufelds und die Barrierefestenbreite zwischen Abbaufeldern betrachtet worden. Die Ergebnisse dieser generellen Studien werden anschließend genutzt, um die Stabilität der geplanten untertägigen Abbaue im Bergbau Gummern zu beurteilen. Abschließend werden zudem die Auswirkungen des untertägigen Abbaus auf die nahegelegene Tagebauendböschung und deren Standfestigkeit analysiert. Da Raise-mining derzeit nicht angewandt wird, stehen keine Bergwerke für in-situ Untersuchungen zur Verfügung. Aus diesem Grund werden die nachfolgenden Studien in erster Linie mit Hilfe von numerischen Simulationen durchgeführt.

2 Raise-mining Abbauverfahren

Das Raise-mining Abbauverfahren ist eine Variante des Kammerbaus. Die Unterschiede zum klassischen Kammerbau liegen dabei vor allem in der Art der Vorrichtung der Kammern sowie der Geometrie der Kammern und jener der Bergfesten zwischen den Kammern. Die Vorrichtung einer Kammer besteht aus einer Kopf- und einer Fußstrecke und einem Schacht, dem so genannten Raise, der die beiden Strecken miteinander verbindet; vergleiche Abbildung 1. Der Raise ist ein Schacht mit einem Durchmesser von 3 bis 4m und wird üblicherweise durch das Raise-Bohrverfahren aufgeföhren. In diesem Raise wird eine verfahrbare Plattform installiert, die für die weiteren Arbeiten im Raise genutzt wird. Dafür ist es notwendig, oberhalb des Raise eine kleine Kaverne auszubrechen, die die dafür notwendigen Installationen für die Schachtbefahrung aufnimmt.

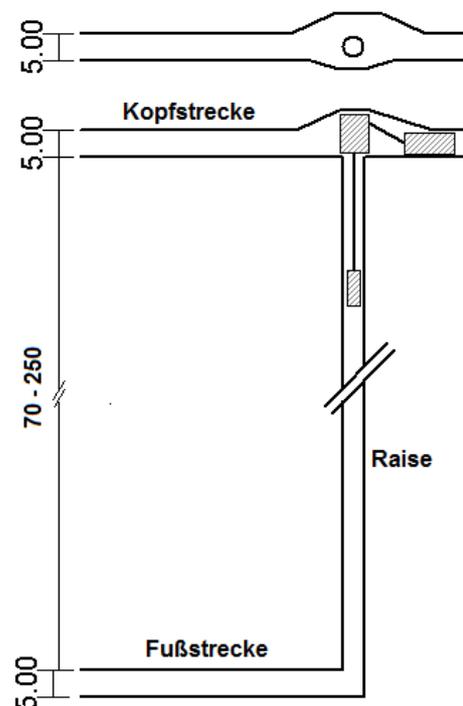


Abbildung 1: Schematische Darstellung (Grundriss – oben, Aufriss – unten) der Vorrichtung einer Raise-mining Kammer; Im Aufriss sind zudem die Installationen im Raise gezeigt. Der Streckenquerschnitt beträgt 5 x 5m; die Höhe der Kammer kann bis zu mehrere Hundertmeter betragen. Die Geometrie der Kaverne in der Kopfstrecke hängt von den verwendeten Geräten und Installationen ab; alle Größenangaben in Meter.

Der Abbau der zylindrischen Kammer erfolgt anschließend schwebend und scheibenweise; vergleiche Abbildung 2. Dafür werden im Raise von der installierten Plattform aus zylindrische Bohrfächer abgebohrt und anschließend gesprengt. Die Bohrlöcher werden üblicherweise mit 20 bis 40° nach unten hin geneigt, weil dadurch das Sprengergebnis sowie die Stabilität der Kammerfirste und der Festen zwischen den Raise-Abbaueen positiv beeinflusst werden. Nach dem Sprengen wird das Gestein in der Fußstrecke aus der Kammer gefördert. Um einen leichteren Materialfluss im Bereich der Fußstrecke zu ermöglichen, wird die Kammersohle üblicherweise trichterförmig ausgeführt. Nach dem vollständigen Abbau einer Kammer wird diese versetzt, um die Festigkeit der Abbaufesten zu erhöhen. Dadurch wird in weiterer Folge die Stabilität des gesamten Grubengebäudes positiv beeinflusst. Des Weiteren ist es durch das Einbringen von Versatz einerseits möglich, das Ausbringen zu erhöhen und somit die Reserven zu schonen, und andererseits können Taubgestein beziehungsweise Aufbereitungsabgänge als Versatz verwendet werden, wodurch die Halden verkleinert werden. Aufgrund der oben angeführten Vorteile des Versetzens ist es nicht empfehlenswert, Raise-mining ohne Versatz durchzuführen.

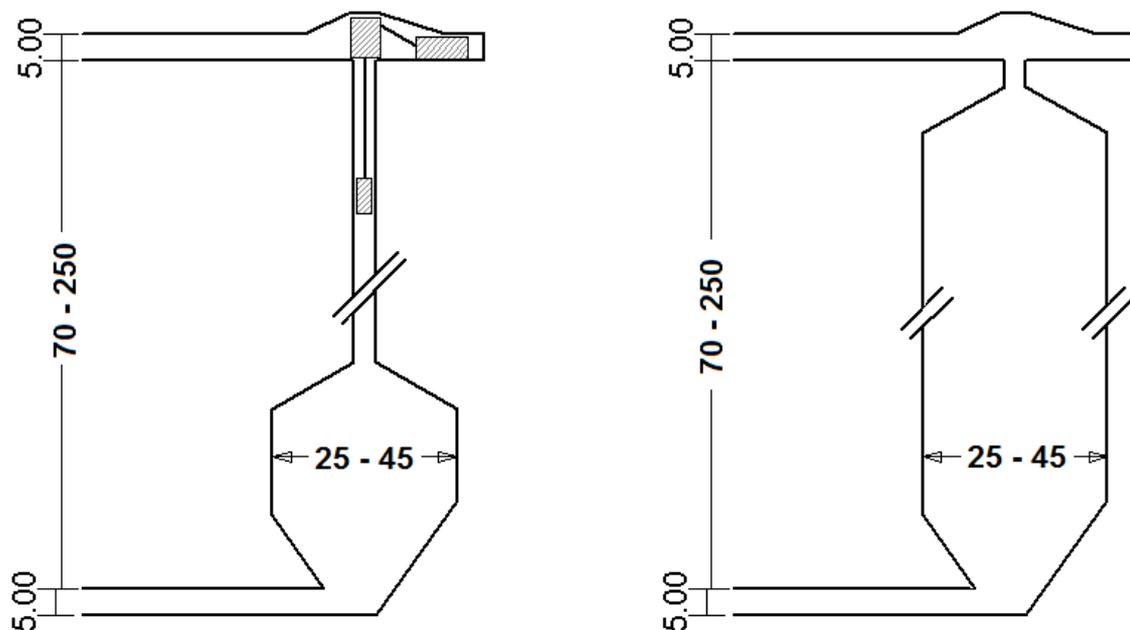


Abbildung 2: linke Seite → Im Abbau befindliche Raise-mining Kammern; rechte Seite → vollständig abgebaute Kammer, die Installationen zur Befahrung des ehemaligen Raise sind bereits entfernt worden; alle Größenangaben in Meter.

Ähnlich dem Kammerbau wird der Abbau in Abbaufelder unterteilt. Die Abbaufelder werden durch Barrierefesten getrennt und bestehen jeweils aus mehreren, nebeneinander angeordneten Kammern. Im Gegensatz zum Kammerbau ist der Querschnitt der Festen innerhalb eines Abbaufelds jedoch nicht rechteckförmig sondern gekrümmt. Der geschwungene Festenquerschnitt in Kombination mit der zylindrischen Kammergeometrie sowie der Anordnung der Kammern ist aus gebirgsmechanischer Sicht als stabiler als die im Kammerbau üblichen rechteckförmigen Kammern und Festen einzustufen. Aus diesem Grund kann mit dem Raise-mining Abbaufeldern meist ein höheres Ausbringen als mit einem klassischen Kammerbau erzielt werden.

Der geometrische Zuschnitt eines Raise-mining Abbaus wird im Wesentlichen durch folgende Parameter bestimmt: Kammerhöhe, Kammerdurchmesser, Zentralabstand der Kammern sowie Anordnung der Kammern zueinander. Des Weiteren sind auch die Abbaufeldgröße sowie dessen Geometrie und die Breite und Form der Barrierefesten zu beachten. Die oben angeführten Parameter werden vor allem nach der Größe und Form der Lagerstätte sowie der vorherrschenden gebirgsmechanischen Situation ausgewählt. Zudem sind auch die Qualitätssteuerung, weitere bergtechnische Parameter, als Beispiel seien Wetterführung beziehungsweise Wasserhaltung genannt, etwaige Abbaugrenzen, behördliche Auflagen sowie andere Randbedingungen zu berücksichtigen. Prinzipiell soll die Kammer so groß als möglich sein. Das heißt, dass die Höhe und der Durchmesser maximiert werden sollen. Dadurch sinkt der Aufwand für die Vorrichtung, (Kopf- und Fußstrecke; Raise sowie Ausbau und Installationen im Raise) bezogen auf das Volumen einer Kammer, wodurch in weiterer Folge die Gestehungskosten verringert werden können. Die Höhe und der Durchmesser der Kammern werden jedoch durch die Geometrie der Lagerstätte und die gebirgsmechanischen Rahmenbedingungen begrenzt. Dabei kann die Höhe durchaus bis zu mehrere Hundertmeter und der Durchmesser bis zu mehrere Zehnmeter erreichen. Des Weiteren sei erwähnt, dass aus Gründen der Qualitätssteuerung mehrere kleinere Kammern einer großen Kammer vorzuziehen sind, weil dadurch mehrere Abbaupunkte zur Verfügung stehen. Die dritte Zuschnittsgröße innerhalb eines Abbaufelds ist der Zentralabstand der Kammern.

Dies ist der Abstand zweier Kammermittelpunkte (Abbildung 3). Er sollte zur Maximierung des Ausbringens so klein als gebirgsmechanisch möglich gewählt werden. Gemeinsam mit der Anordnung der Kammern untereinander beschreibt er den Querschnitt der Festen.

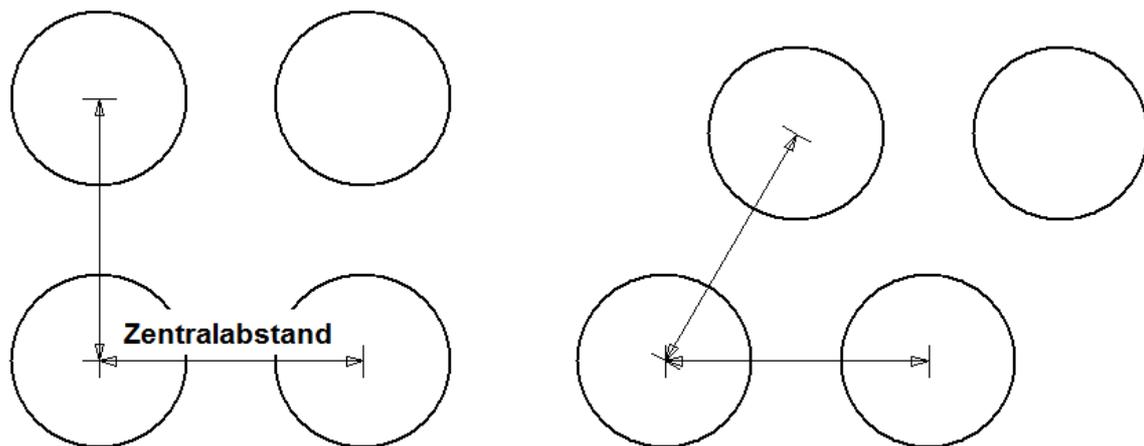


Abbildung 3: Darstellung des Begriffs Zentralabstand der Kammern. Zudem sind zwei Möglichkeiten der Kammeranordnung ausgewiesen: links → quadratische Anordnung; rechts → dreiecksförmige Anordnung

Das Festensystem eines Raise-mining Abbaus ist aus gebirgsmechanischer Sicht der größte Unterschied zum Festensystem eines klassischen Kammerbaus. Im herkömmlichen Kammerbau werden üblicherweise langgestreckte Kammern verwendet, wodurch die Kammern durch langgestreckte Festen mit konstanter Breite voneinander getrennt werden. Diese Festen besitzen nur eine geringe horizontale Einspannung auf ihrer kurzen Seite, denn die lange Seite der Festen ist durch die Kammern vom Gebirgsverbund getrennt. Im Gegensatz dazu sind die Festen eines Raise-mining Abbaus allseitig horizontal eingespannt. Dies wird in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Aufgrund dieses Umstands und der geschwungenen Form der Festen, die aus gebirgsmechanischer Sicht im Allgemeinen als günstiger als die rechteckförmige Form einzustufen ist, weist das Festensystem des Raise-mining Abbaus aus gebirgsmechanischer Sicht Vorteile gegenüber jenem eines klassischen Kammerbaus auf.

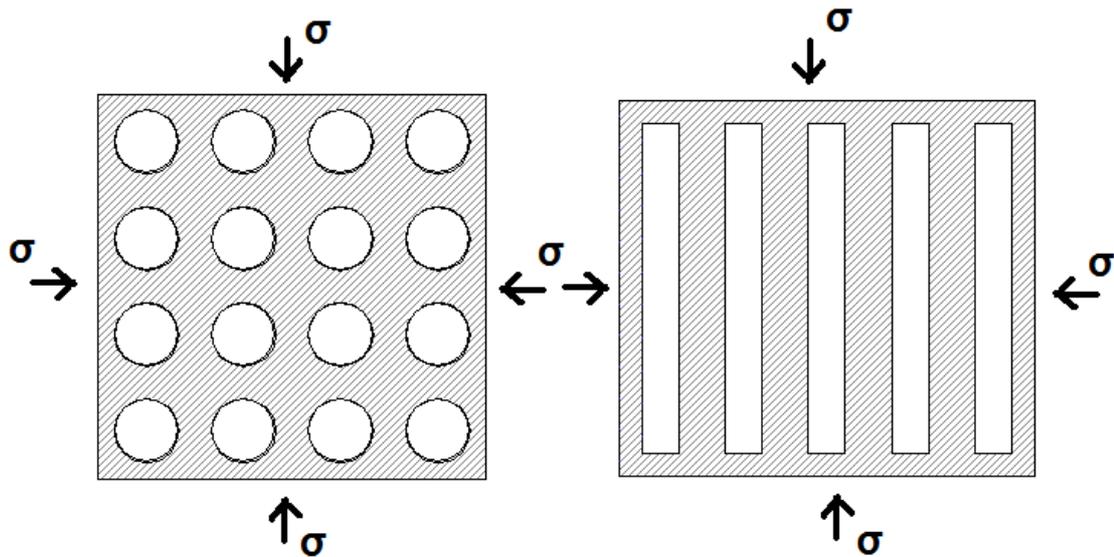


Abbildung 4: Gegenüberstellung der Festensysteme im Grundriss eines Raise-mining Abbaus (links) und eines herkömmlichen Kammerbaus (rechts)

Aufgrund der eben erläuterten Tatsache, dass die Gesteinskosten bei steigender Kammerhöhe und Kammerdurchmesser abnehmen, ist das Raise-mining Abbaufahren für Lagerstätten geeignet, die vor allem eine große Kammerhöhe ermöglichen. Dabei handelt es sich überwiegend um massige beziehungsweise linsenförmige Lagerstätten mit einer großen vertikalen Erstreckung. Ein weiterer Lagerstättentyp sind steilstehende Lagerstätten mit ausreichender Mächtigkeit, damit wirtschaftliche Kammerdurchmesser erreicht werden können. Als Variante bei solchen steilstehenden Lagerstätten besteht auch die Möglichkeit, dass die Raise nicht vertikal sondern geneigt ausgeführt werden und dass der Kammerquerschnitt an die Form der Lagerstätte angepasst wird. Weniger geeignete Lagerstättentypen sind gangförmige Lagerstätten und Lagerstätten, bei denen die Qualitätssteuerung komplex ist. Für beide Fälle besitzt das Raise-mining Abbaufahren während des Abbaus zu wenig Flexibilität, um an die lokal vorherrschenden Bedürfnisse angepasst werden zu können. Die Flexibilität könnte nur durch kleinere Kammerhöhen und Kammerdurchmesser gesteigert werden, wodurch aber die Gesteinskosten signifikant ansteigen. Ungeeignete Lagerstättengeometrien sind flacheinfallende plattenförmige Lagerstätten, weil in diesen normalerweise keine wirtschaftliche Kammerhöhe erreicht werden kann.

In der Literatur sind zurzeit keine Bergwerke angeführt, die das oben beschriebene Raise-mining Abbauverfahren anwenden. Allerdings wird im Bergbau Lenhardt-Petrasch der Firma Omya eine Variante des Raise-mining Abbauverfahrens angewandt. Die steilstehende Lagerstätte wird wie beim Raise-mining vorgerichtet, der Kammerquerschnitt ist jedoch rechteckförmig und nicht kreisförmig. Eine andere ähnliche Abbaumethode ist das so genannte Alimak-mining; vergleiche Abbildung 5 (Pakalnis und Hughes 2011). Die Vorrichtung besteht ebenfalls aus einer Kopf- und Fußstrecke und der Raise wird mit dem Alimak-System aufgefahren. Anschließend wird der Raise wie beim Raise-mining schwebend aufgeweitet. Im Gegensatz zum Raise-mining wird das Alimak-mining jedoch in gangförmigen Lagerstätten angewandt, wobei versucht wird, den Gängen schon während des Auffahrens des Raise zu folgen und die Kammern an die Gänge anzupassen. Da die einzelnen Gänge einer solchen Ganglagerstätte im Allgemeinen eher geringmächtig sind, sind die Kammerquerschnitte beim Alimak-mining deutlich kleiner als beim Raise-mining. Daraus resultiert ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Abbaumethoden. Bergwerke, in denen das Alimak-mining Abbauverfahren angewandt wird beziehungsweise angewandt worden ist, sind zum Beispiel: Namew Lake mine (Pakalnis und Hughes 2011), Hemlo mines (Noble 2012), Seabee mine (Moore 2014) oder Bulyanhulu mine (Ran und Mfula 2012)

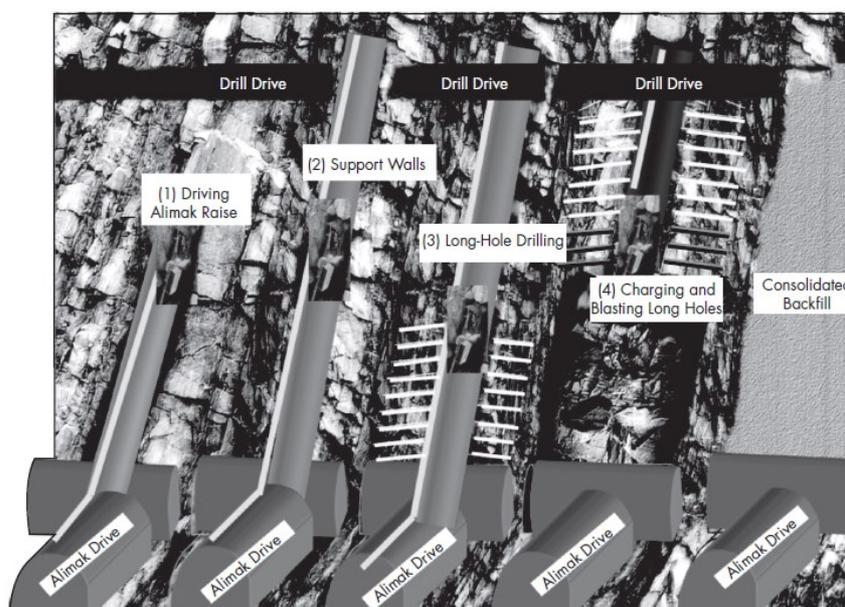


Abbildung 5: Abbau einer Kammer mit Alimak-mining (Pakalnis and Hughes 2011)

Abschließend werden die Vor- und Nachteile des Raise-mining Abbauverfahrens kurz zusammengefasst. Da es sich beim Raise-mining um einen kammerartigen Abbau handelt, werden die Vor- und Nachteile auf einen klassischen Kammerbau bezogen.

Vorteile des Raise-mining Abbauverfahrens:

- Im Gegensatz zum klassischen Kammerbau und zu den meisten anderen untertägigen Abbauverfahren ist der Aufwand für die Aus- und Vorrichtung aufgrund der großen Kammerhöhen deutlich geringer. Im Falle eines klassischen Kammerbaus werden ab Kammerhöhen von 30m zumeist Teilsohlen verwendet; diese müssen entsprechend aus- und vorgerichtet werden. Im Gegensatz dazu können beim Raise-mining Abbauverfahren jegliche Kammerhöhen mit zwei Sohlen, der Kopf- und Fußstreckensole, abgebaut werden.
- Aus dem geringeren Aufwand für die Aus- und Vorrichtung resultiert dementsprechend ein geringerer Aufwand für die Sicherung der Grubenbaue.
- Da die Arbeitsumgebung in den einzelnen Raise in Bezug auf Größe und Ausbau des Raise sehr ähnlich ist, ist es möglich, das Bohren und Beladen der Sprengbohrlöcher im Raise zu automatisieren. Dadurch erhöht sich einerseits die Sicherheit und andererseits können in Hochlohnländern die Kosten gesenkt werden. Des Weiteren können auch das Laden und Fördern sowie das Versetzen der Kammer, zumindest teilweise, automatisiert werden.
- Während des Abbaus einer Kammer kann eine sehr hohe Produktivität erreicht werden. Allerdings muss vor allem bei der Abbauplanung berücksichtigt werden, dass Raise-mining ein zyklisches Abbauverfahren ist und die Produktivität während der Vorrichtung einer Kammer äußerst gering ist.
- Durch die zylindrische Kammergeometrie und die besondere Form der Bergfesten kann mit großer Wahrscheinlichkeit ein höheres Ausbringen als

in vergleichbaren kammerartigen Abbauverfahren erreicht werden.

- Die Kammern müssen während und nach dem Abbau nicht betreten werden, woraus eine höhere Sicherheit resultiert.
- Aufgrund der oben angeführten Punkte kann zusammenfassend festgehalten werden, dass im Raise-mining Abbauverfahren signifikant niedrigere Gesteungskosten als im herkömmlichen Kammerbau erreicht werden können. Voraussetzung dafür ist, dass die betrachtete Lagerstätte für die Anwendung von Raise-mining geeignet ist.

Nachteile des Raise-mining Abbauverfahrens:

- Da das Raise-mining Abbauverfahren zurzeit nicht angewandt wird, sind die Erfahrungen mit diesem Abbausystem gering. Dies betrifft in besonderer Hinsicht die gebirgsmechanischen Aspekte, weil sich das Raise-mining in Bezug auf Kammer- und Festengeometrie deutlich von den zurzeit in Verwendung befindlichen Abbauverfahren unterscheidet.
- Da die Kammern im Raise-mining üblicherweise so groß als möglich dimensioniert werden und die Vorrichtung einer Kammer mit hohen Investitionskosten verbunden ist, steht zumeist nur eine geringe Anzahl von Kammern in Verhieb. Aus diesem Grund ist eine komplexe Qualitätssteuerung üblicherweise nicht möglich oder mit entsprechend höheren Kosten verbunden.
- Eine flexible Anpassung des Zuschnitts an die Lagerstättengeometrie ist, vor allem während des Abbaus einer Kammer, nur begrenzt möglich. Aus diesem Grund ist Raise-mining für komplexe Lagerstättengeometrien, beispielsweise Ganglagerstätten, nur bedingt geeignet.
- Aufgrund der großen Kammerhöhen stehen diese in vielen Fällen über längere Zeiträume offen, bevor sie versetzt werden können. Dieser Umstand muss bei der gebirgsmechanischen Planung berücksichtigt werden.

3 Raise-mining im Bergbau Gummern

Die Firma Omya plant im Bergbau Gummern einen Raise-mining Abbau. Aus diesem Grund werden die Untersuchungen zu den gebirgsmechanischen Aspekten an den Bergbau Gummern angelehnt. Dabei werden vor allem die Gebirgseigenschaften für die Simulationen übernommen und für ausgewählte Abbausituationen wird der geplante Zuschnitt des Bergbaus Gummern als Beispiel herangezogen. In weiterer Folge sollen in Zukunft die Ergebnisse der numerischen Simulationen mit Messungen in Gummern, die im Rahmen des Abbaus durchgeführt werden, verglichen und die numerischen Simulationen adaptiert werden. Dadurch erhöht sich einerseits die Kenntnis der gebirgsmechanischen Aspekte des Raise-mining Abbaufahrens und andererseits ist es möglich, bessere Vorhersagen für die zukünftige Entwicklung der gebirgsmechanischen Situation im Bergbau Gummern zu machen. Aufgrund der oben angeführten Umstände wird dieses Kapitel zur Beschreibung des Bergbaus Gummern herangezogen. Dabei werden zunächst der geplante Zuschnitt erläutert und anschließend die Gebirgseigenschaften diskutiert.

3.1 Bergwerkszuschnitt

Der Bergbau Gummern der Firma Omya liegt in Österreich im Bundesland Kärnten etwa 5km nordwestlich der Stadt Villach. Die Gewinnung des Marmors erfolgt zurzeit ausschließlich obertägig, wobei der jährliche Verhieb in etwa 3 Mio t (Wert- und Taubgestein) beträgt. In naher Zukunft ist geplant, in etwa 0,5 Mio t untertägig mit dem Raise-mining Abbaufahren zu gewinnen. Abbildung 6 zeigt eine Luftbildaufnahme des Tagebaus in Gummern und weist zusätzlich den Bereich des geplanten untertägigen Abbaus aus.

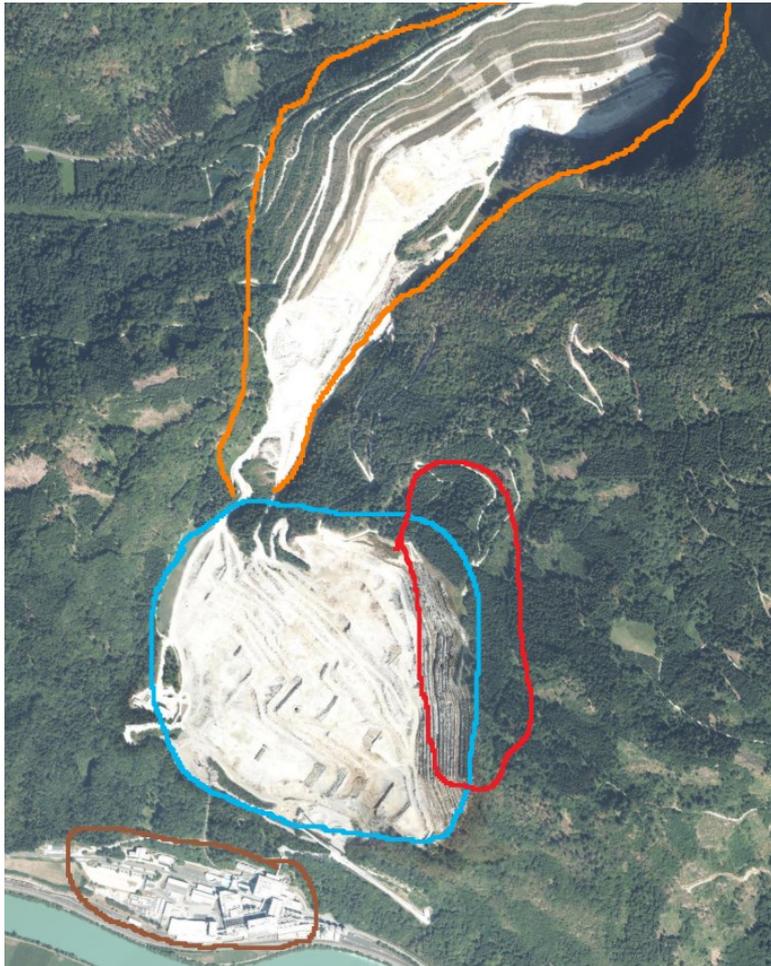


Abbildung 6: Luftbildaufnahme des Bergbaus Gummern; blau = Tagebau; rot= geplanter untertägiger Abbau; orange = Halde; braun = Werk (KAGIS 25.10.2016)

3.1.1 Lagerstätte

Die Lagerstätte in Gummern ist massig und fällt mit einer Neigung von ca. 30 bis 60° Richtung Nordosten ein. Der Marmor weist unterschiedliche Qualitäten bezüglich Reinheit und Weißheitsgrad auf. Diese qualitativen Unterschiede werden beim Abbau berücksichtigt.

3.1.2 Tagebau



Abbildung 7: Luftbildaufnahme des Tagebaus Gummern (KAGIS 25.10.2016)

Im Tagebau wird Marmor in einem flächenartigen Abbau gewonnen, wobei aus Qualitätssteuerungsgründen mehrere Scheiben in Verhieb sind. Die Höhe einer Scheibe beträgt 10m bei einer Bruchwandneigung von 80° . Das Lösen des Gesteins erfolgt mittels Bohren und Sprengen. Anschließend wird das Gestein selektiv geladen: Das Taubmaterial wird nördlich des Tagebaus verhaldet und das Wertgestein wird in den Sturzschaft gestürzt. Am Fuße des Sturzschafts befindet sich die erste Brechstufe (Seehöhe über Adria 490m). Nach dieser erfolgt der Transport ins Werk über einen Stollen mit Förderbändern. Bei Erreichen der Endböschung werden zwei Scheiben zu einer vereint. Daraus resultiert eine Etagenhöhe der Endböschung von 20m. Die Generalneigung beträgt zurzeit 52° ; eine Erhöhung der Generalneigung ist nach den Untersuchungen von Wagner et al. (2010) nicht zu empfehlen. Des Weiteren sind in der Endböschung Sicherheitsbermen zur Reduktion des Steinfallrisikos vorgesehen. Zurzeit befindet sich die tiefste Scheibe im Tagebau in etwa auf einer Seehöhe von 635m über Adria und die Höhe der Endböschung im östlichen Tagebaubereich beträgt in etwa

180m. Es ist geplant, den Tagebau zumindest auf eine Seehöhe von 505m über Adria fortzuführen. Dies wird bei dem derzeitigen Verhieb und dem zusätzlichen untertägigen Abbau in etwa 30 bis 40 Jahre in Anspruch nehmen. Ein weiterer Abbau in die Teufe ist zurzeit nicht geplant, weil der Grundwasserspiegel auf dem Niveau der Drau (ca. 490m Seehöhe) erwartet wird und ein Abpumpen der Grundwässer aus dem Tagebau vermieden werden möchte. Die ostseitige Endböschung wird demnach in etwa eine Höhe von 350m erreichen. Die Stabilität dieser Endböschung sowie Maßnahmen zur Reduktion des Steinfalfrisikos sind bereits von Wagner et al. (2010) und Nußbacher (2009) untersucht worden. In dieser Arbeit wird zudem der Einfluss des untertägigen Abbaus auf die Stabilität der ostseitigen Endböschung nochmals diskutiert. Da die Höhe der übrigen Endböschungen deutlich geringer sein wird, sich hinter diesen keine Abbaue befinden werden und sie dieselbe Generalneigung wie die östliche Böschung aufweisen werden, wird deren Standfestigkeit in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

3.1.3 Untertagebau

Die nach Nordosten einfallende Lagerstätte soll hinter der östlichen Tagebauendböschung untertägig gewonnen werden; vergleiche Abbildung 8. Dazu wird das Raise-mining Abbauverfahren angewandt: Die Kammerhöhe beträgt 160m, der Kammerdurchmesser 35m, der Zentralabstand der Kammern 50m und der Durchmesser des Raise 4m. Die Neigung der Firste soll 15 – 40° betragen und jene der Sohle 55°. Insgesamt ist geplant, 50 Kammern in drei Abbaufeldern zu gewinnen. Diese Abbaufelder bestehen aus 12 (Abbaufeld 1) beziehungsweise 19 (Abbaufeld 2 und 3) Kammern und sind durch in etwa 40m breite Barrierefesten voneinander getrennt. Die Kopf- und Fußstrecken befinden sich auf zwei Sohlen; wobei die Kopfstreckensole auf einer Seehöhe von 672m über Adria liegt und die Fußstreckensole auf 507m. Der Aufschluss der Kopfstreckensole erfolgt über einen eigenen Stollen, dessen Mundloch nördlich des Tagebaus liegt. Jener der Fußstreckensole erfolgt über eine Strecke, die bei der bestehenden Brecherkaverne abzweigt. Der Querschnitt der Kopf- und

Fußstrecken beträgt 5,5 x 5,5m (Breite x Höhe). In der Kopfstreckensohle wird dieser oberhalb des Raise einer Kammer auf ca. 13 x 9m aufgeweitet, um einerseits die Einrichtungen für die Befahrung des Raise aufnehmen zu können, und andererseits eine Umfahrungsmöglichkeit des Raise besteht; vergleiche Abbildung 10. In der Fußstreckensohle werden jene Bereiche aufgeweitet, in denen die Beladung der SLKW erfolgt. Der Querschnitt beträgt in diesen Bereichen in etwa 13 x 9m. Des Weiteren wird die Streckenbreite in den Abzugsbereichen der Kammer auf ca. 9m aufgeweitet, um die Ladetätigkeiten zu erleichtern; vergleiche Abbildung 10.

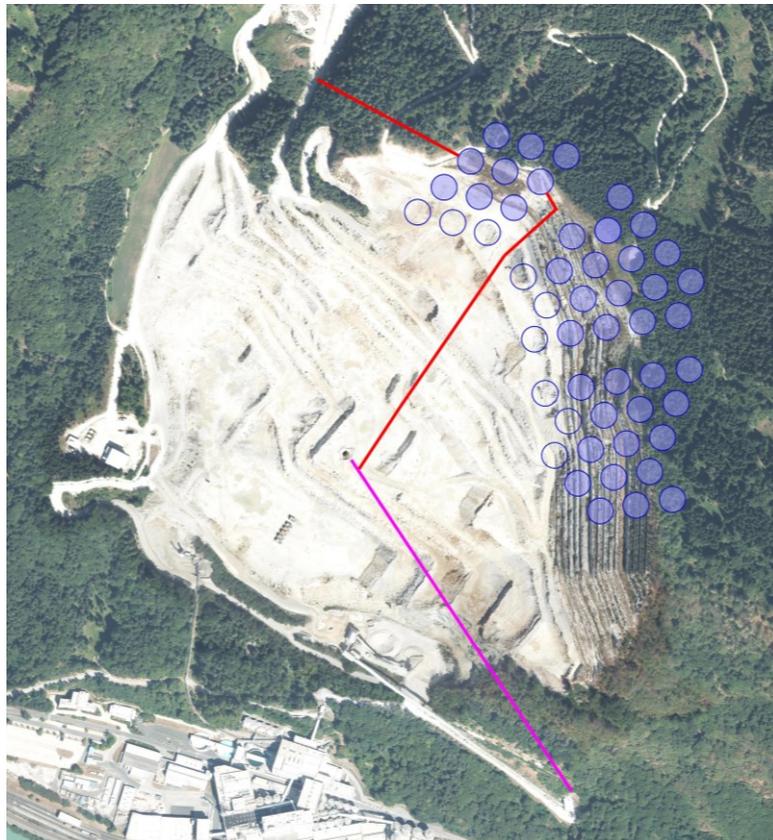


Abbildung 8: Luftbild des Tagebaus mit den geplanten Abbaukammern (blau), dem Aufschluss (rot) und dem bestehenden Förderstollen (violett). (KAGIS 25.10.2016)

In der ersten Abbauphase werden 2 Kammern des Abbaufelds 1 abgebaut. Des Weiteren wird der Raise einer dritten Kammer vorgerichtet, um beim Abbau der ersten beiden Kammern als Wetter- und Fluchtweg für die Kopf- beziehungsweise Fußstreckensohle zu dienen; vergleiche Abbildung 9.

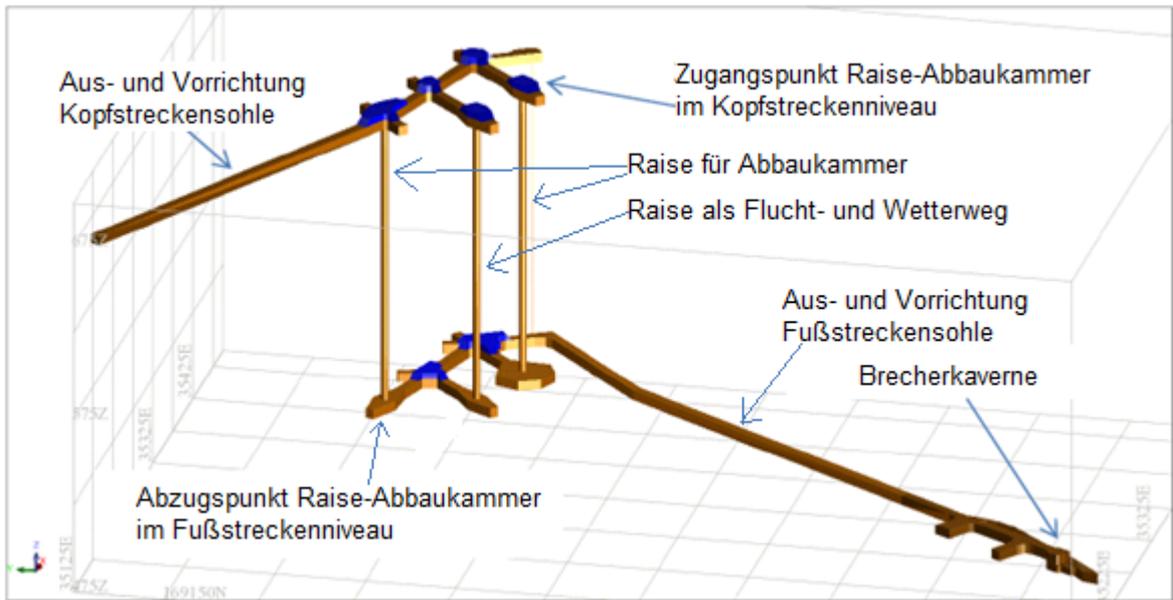


Abbildung 9: Zuschnitt der ersten Abbauphase im Bergbau Gummer (vgl. Wagner und Blaha 2015)

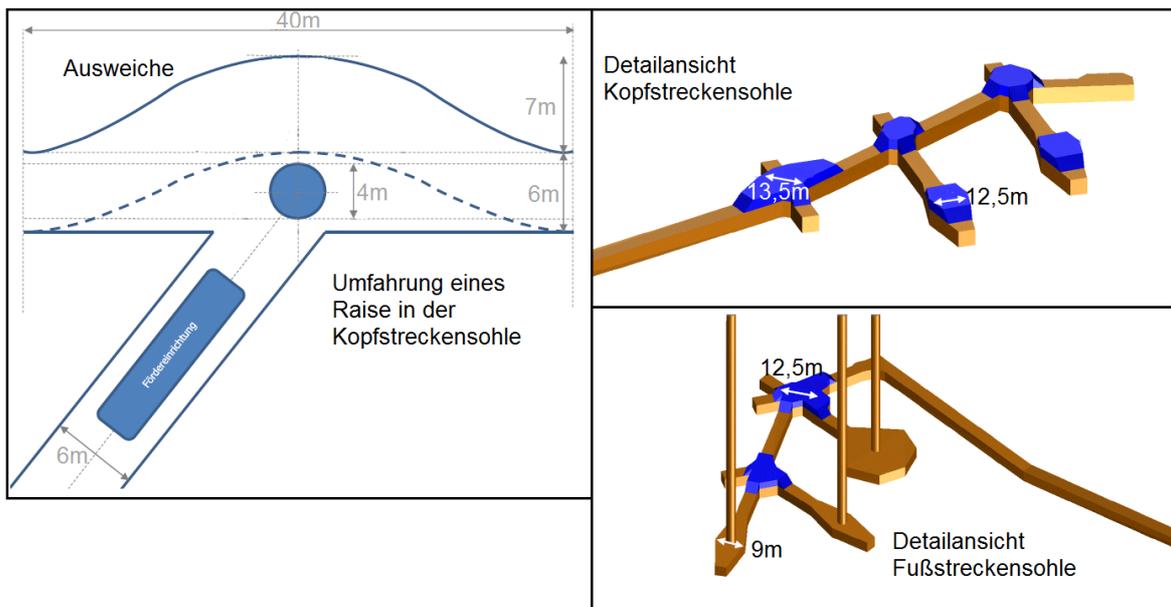


Abbildung 10: Detailansichten zum Zuschnitt in der ersten Abbauphase (vgl. Wagner und Blaha 2015)

Der Abbau der ersten beiden Kammern wird durch ein umfassendes gebirgsmechanisches Monitoringprogramm begleitet. Dabei wird neben dem Verhalten des Gebirges im Einflussbereich der Kammern auch die Interaktion des untertägigen Abbaus mit der Tagebauendböschung untersucht. Die damit gewonnenen Erkenntnisse und die Ergebnisse, der in dieser Arbeit durchgeführten

numerischen Simulationen, werden anschließend genutzt, um den weiteren untertägigen Abbau zu optimieren. Aus heutiger Sicht ist geplant, zunächst jene Kammern abzubauen, die am weitesten von der Endböschung entfernt sind. Die Kammern, die sich unmittelbar hinter der Endböschung befinden, werden zuletzt angegriffen; vergleiche Abbildung 8. Der Abbau der 50 Kammern soll zur gleichen Zeit beendet sein, wie der Abbau des Tagebaus bis zur Seehöhe von 505m über Adria. Das heißt, dass jährlich 1-2 Kammern abgebaut werden. Dabei erfolgt das Bohren der Sprengfächer automatisiert. Das Beladen der Bohrlöcher wird zunächst manuell durchgeführt, soll in Zukunft aber auch automatisiert werden. Im Anschluss an das Sprengen erfolgen das Laden aus der Kammer mit ferngesteuerten LHDs und die Förderung zum Brecher mit SLKWs. Nach dem vollständigen Abbau einer Kammer wird diese mit Taubmaterial aus dem Tagebau von der Kopfstreckensole aus versetzt. Das Taubmaterial hat die Wirkung eines herkömmlichen Sturzversatzes.

3.2 Gebirgsverhältnisse

Die Gebirgsparameter für die numerischen Berechnungen sind weitestgehend aus den bisherigen Untersuchungen (Diplomarbeit Nußbacher (2009), Bericht zur Tagebauendböschung (Wagner et al. 2010), Teilbericht 1 (Wagner und Blaha 2015)) übernommen worden. Allerdings hat die Befahrung vom 11.04.2016 gezeigt, dass eine Anpassung, die in erster Linie die Gebirgsklassifikation betrifft, an die untertägig vorgefundenen Gebirgsverhältnisse notwendig ist. Bisher konnten Gebirgsklassifikationen ausschließlich obertage durchgeführt werden, weil untertage keine ausreichende Möglichkeit für die Durchführung von solchen gegeben war. Da das Gebirge im Tagebau grundsätzlich den Witterungseinflüssen sowie dem langfristigen Abbau ausgesetzt ist, hat sich die Gebirgsqualität untertage erwartungsgemäß signifikant verbessert.

3.2.1 Homogenbereiche

Nußbacher (2009) hat das Gebirge im Bergbau Gummern auf Basis seiner Gebirgsklassifikation in 4 geotechnische Homogenbereiche eingeteilt. Die Erstreckung der einzelnen Homogenbereiche ist in Abbildung 11 und Abbildung 12 zu erkennen. Dabei stellt Abbildung 11 den Tagebauzustand im Jahre 2009 dar und Abbildung 12 den geplanten Tagebauendstand. Die Erstreckung der Homogenbereiche im geplanten Tagebauendstand ist mittels Extrapolation der bekannten Daten unter Berücksichtigung des geologischen Modells ermittelt worden.

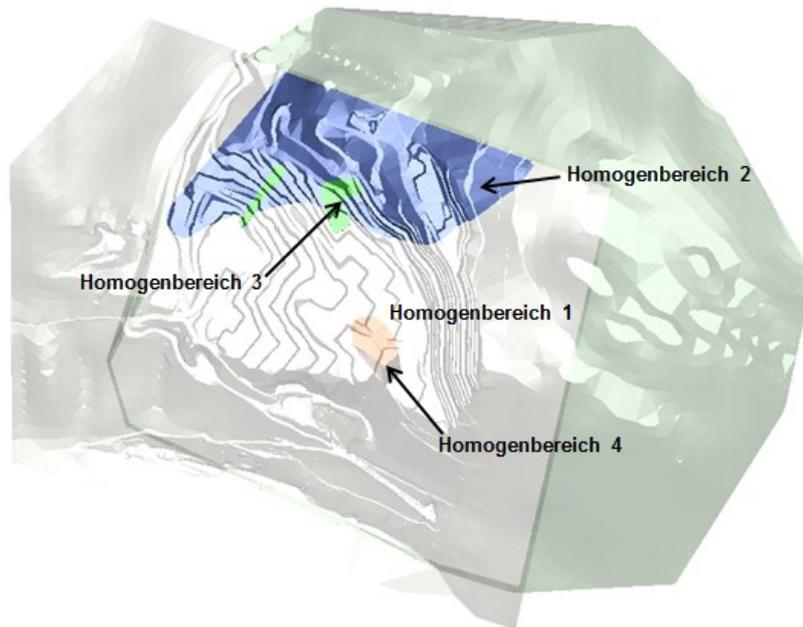


Abbildung 11: Erstreckung der einzelnen Homogenbereiche; Tagebaustand 2009 (vgl. Nußbacher 2009)

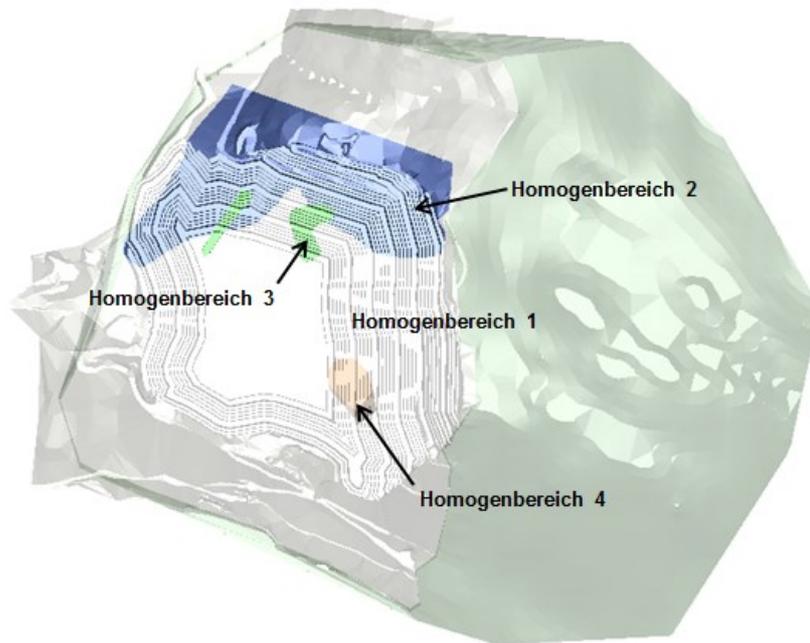


Abbildung 12: Erstreckung der einzelnen Homogenbereiche; geplanter Tagebauendstand (vgl. Nußbacher 2009)

Sowohl Nußbacher (2009) als auch Wagner et. al. (2010) haben für deren Untersuchungen zur Standfestigkeit der Tagebauböschung die beschriebene Einteilung des Gebirges in 4 geotechnische Homogenbereiche herangezogen. Dennoch ist für die Untersuchungen des geplanten untertägigen Abbaus eine etwas abgeänderte Einteilung besser geeignet: Die Homogenbereiche 1 und 2 werden ohne Veränderung übernommen und die Homogenbereiche 3 und 4 werden zu einem sogenannten Karstbereich zusammengefasst; vergleiche Abbildung 13. Im Folgenden ist eine kurze Beschreibung der wesentlichen Aspekte der einzelnen Bereiche gegeben.

Homogenbereich 1: Der Homogenbereich 1 stellt die besten Gebirgseigenschaften im Bergbau Gummern dar und wird aus massivem Marmor beziehungsweise massivem Amphibolit (Nebengestein) gebildet. Er weist ein geregeltes Trennflächengefüge auf, wobei der Kluftabstand weitestgehend größer als 0,2m ist. Die Verwitterung und der Wasserzutritt können als unbedeutend eingestuft werden.

Homogenbereich 2: Der Homogenbereich 2 wird auch aus Marmor und dessen Nebengesteinen gebildet. Verwitterung und Wasserzutritt sind wiederum unbedeutend. Allerdings ist er im Gegensatz zum Homogenbereich 1 deutlich feinklüftiger (Kluftabstand im Zentimeter- bis niedrigen Dezimeterbereich); dies ist auf eine mylonitische Störzone in der Umgebung zurückzuführen. Aus diesem Grund weist er etwas schlechtere Gebirgseigenschaften als der Homogenbereich 1 auf.

Karstbereich: Bei den Karstbereichen handelt es sich um lokal auftretende Verkarstungen, in denen toniges bis feinkörniges Material sowie Gesteinsblöcke eingelagert sind. Des Weiteren kann in diesen Bereichen eine stärkere Verwitterung des Gesteins begleitet von einer Durchsetzung mit Toneinlagerungen auftreten. Aufgrund dieser Eigenschaften sind diese Karstbereiche aus gebirgsmechanischer Sicht als ungünstig bis sehr ungünstig einzustufen.

Die Einteilung in 2 Homogenbereiche und einen Karstbereich ist zweckmäßig, weil ausschließlich die Homogenbereiche 1 und 2 eine großräumige Erstreckung haben und daher für die regionale Standfestigkeit der untertägigen Grubenbaue entscheidend und dementsprechend für Untersuchungen betreffend dieser heranzuziehen sind. Demgegenüber ist das vereinzelte Auftreten von Karstbereichen lokal beschränkt, woraus lediglich eine Auswirkung auf die lokale Stabilität resultiert. Werden jedoch solche Karstbereiche angefahren und ist aus diesem Grund ein Auftreten von lokalen Stabilitätsproblemen zu erwarten, muss mit entsprechenden Maßnahmen auf die schlechteren Gebirgseigenschaften reagiert werden. Dies wären zum Beispiel eine Verstärkung des Ausbaus in den Strecken oder eine Verringerung des Kammerdurchmessers in den Karstbereichen. Des Weiteren ist eine geologische Vorauserkundung zu empfehlen, damit eventuell auftretende Karstbereiche frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen getroffen werden können.

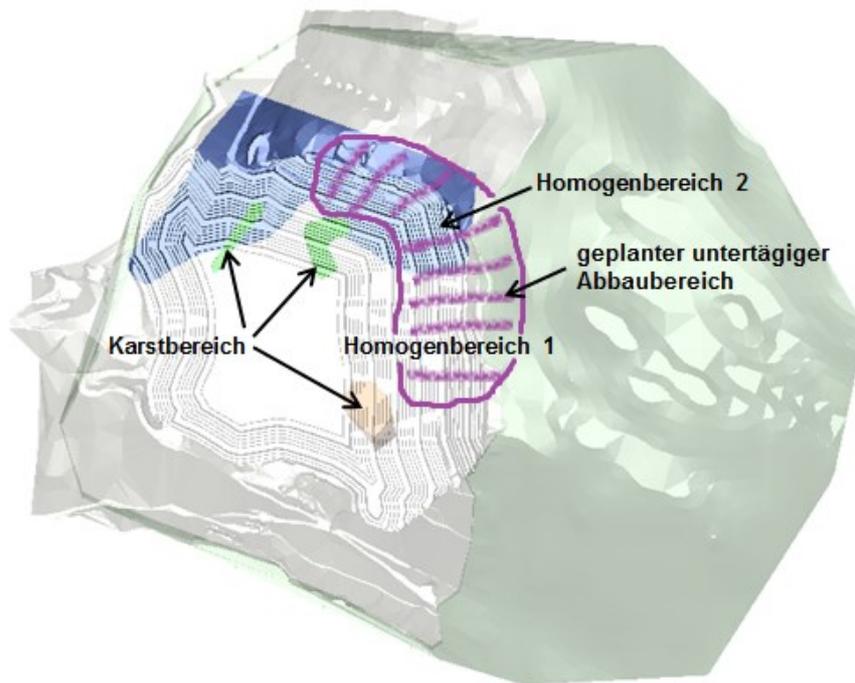


Abbildung 13: Lage der geplanten untertägigen Abbaue (lila) und Erstreckung der Homogenbereiche sowie Lage der lokalen Karstbereiche im geplanten Tagebauendstand (vgl. Nußbacher 2009)

Abbildung 13 stellt neben der Erstreckung der Homogenbereiche auch die Lage der geplanten untertägigen Abbaue dar. Es ist zu erkennen, dass die Kammern sowohl im Homogenbereich 1 als auch im Homogenbereich 2 liegen. Da der Homogenbereich 2 aus gebirgsmechanischer Sicht die ungünstigeren Verhältnisse aufweist, werden die Standfestigkeitsberechnungen für den Bergbau Gummern mit den Gebirgseigenschaften des Homogenbereichs 2 durchgeführt. Dadurch soll eine Überschätzung der Gebirgsfestigkeit vermieden werden, die wiederum in einer Überschätzung der Standfestigkeit resultieren würde.

3.2.2 Gesteinsparameter

Die Bestimmung der Materialkennwerte des ungestörten Gesteins ist für die Durchführung der numerischen Simulationen notwendig. Diese haben neben einem Einfluss auf die Spannungssituation sowie auf die Spannungsumlagerungen im Gebirge auch einen Einfluss auf die Gebirgsfestigkeit. Zur Gebirgsfestigkeit ist allerdings anzumerken, dass diese

stark von der Gefügesituation des Gebirges beeinflusst wird. Nähere Information dazu befindet sich im Abschnitt „3.2.4 Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit“.

Für die Durchführung der vorgenommenen numerischen Simulationen werden folgende Gesteinsparameter benötigt:

- Einaxiale Druckfestigkeit
- E-Modul
- Poisson-Zahl

Diese Materialkennwerte sind bereits durch Druckversuche bestimmt worden; vergleiche Bericht zur Tagebauendböschung (Wagner et al. 2010). Da die durch diese Druckversuche ermittelten Gesteinsparameter im Bereich der zu erwartenden Werte für Marmor liegen, sind keine weiteren Untersuchungen bezüglich der Gesteinsparameter durchgeführt worden. Die Ergebnisse der bisherigen Druckversuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. In den Berechnungen fließen die einaxiale Druckfestigkeit, der E-Modul und die Poisson-Zahl jeweils als Durchschnittswerte ein. Der Mittelwert der einaxialen Druckfestigkeit beträgt 83,5MPa, jener des E-Moduls 56,0GPa und jener der Poisson-Zahl 0,26. Wie bereits im Bericht zur Tagebauendböschung (Wagner et al. 2010) wird für die einaxiale Druckfestigkeit ein durchschnittlicher Wert von 80MPa angenommen und bei der Berechnung des E-Moduls die Ergebnisse von Gehring nicht berücksichtigt. Bei der Ermittlung der Poisson-Zahl wird das Ergebnis von Probe BBK 34-2 nicht berücksichtigt, weil aus unbekanntem Gründen kein Wert ausgewiesen worden ist. Tabelle 2 fasst nochmals die Werte für die Simulationen zusammen.

| Versnr. | Quelle | Material | Einaxiale Druckfestigkeit (MPa) | Verformungs-Modul (MPa) | Elastizitäts-Modul (MPa) | Poisson Zahl |
|-----------|---------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|
| Versuch 1 | Gehring | kristalliner Kalk | 81,6 | 27.070 | 18.344 | |
| Versuch 2 | Gehring | kristalliner Kalk | 53,5 | 9.895 | 11.959 | |
| Versuch 3 | Gehring | grobkristalliner Kalk | 108,9 | 27.645 | 28.956 | |
| BBK 34-1 | Hohl | Marmor | 69 | 56.954 | 64.468 | 0,31 |
| BBK 34-2 | Hohl | Marmor | 69 | 25.402 | 27.357 | 0,00 |
| BBK 35-1 | Hohl | Marmor mit Graphit | 109 | 54.212 | 59.149 | 0,22 |
| BBK 35-2 | Hohl | Silikat-Marmor | 85 | 60.749 | 65.694 | 0,26 |
| BBK 36-1 | Hohl | Marmor mit Graphit | 92 | 59.218 | 63.407 | 0,26 |

Dr. Gehring - VA-Bergtechnik (25.07.1990) . Druckversuche an Proben mit L/D*~1

W. Hohl - Lehrstuhl für Bergbaukunde. (07.2009) Druckversuche an 50 mm Durchmesser Proben mit L/D ~2

Tabelle 1: Gesteinsparameter von Proben aus dem Tagebau Gummern (Wagner et al. 2010)

| | |
|---------------------------|-------|
| einaxiale Druckfestigkeit | 80MPa |
| E-Modul | 56GPa |
| Poisson-Zahl | 0,26 |

Tabelle 2: Gesteinsparameter für die numerischen Simulationen

3.2.3 Gebirgsklassifikation

Um Aussagen über die Standfestigkeit der Abbaukammern sowie über die Interaktionen zwischen den Abbauen und der Tagebauendböschung tätigen zu können, müssen die Festigkeits- und Verformungskennwerte des Gebirges bestimmt werden. Da eine experimentelle Bestimmung von diesen Materialkennwerten nicht möglich ist, greift man auf Gebirgsklassifikationssysteme zurück. Diese beschreiben das Gebirge qualitativ und ermöglichen dadurch eine

indirekte Bestimmung der Gebirgsparameter. Im Wesentlichen fließen in die verschiedenen gängigen Gebirgsklassifikationssysteme die Gesteinsfestigkeit, das Trennflächengefüge (Anzahl der Trennflächensysteme, Abstände der Trennflächen, Oberflächenbeschaffenheit der Trennflächen, Füllungen zwischen Trennflächen), der Verwitterungsgrad und die Bergwassersituation ein. Des Weiteren können auch die erwartete Spannungssituation sowie die Orientierung der Grubenbaue in Bezug auf die Orientierung der Trennflächen berücksichtigt werden. Im Falle des Bergbaus Gummern sind die Gebirgsklassifikationssysteme nach Bieniawski in der Version von 1989 (Bieniawski 1989), Barton in der Version von 2002 (Barton 2002) und Marinos und Hoek in der Version von 2000 (Marinos und Hoek 2000) angewandt worden. Nußbacher (2009) hat zunächst die dazugehörigen RMR-, Q- und GSI-Werte bestimmt und Wagner et al. (2010) haben diese aufgrund weiterer Untersuchungen modifiziert. Eine Beschreibung der einzelnen Gebirgsklassifikationssysteme kann in den entsprechenden ausgewiesenen Quellen vorgefunden werden. Die Vorgehensweise zur Berechnung der einzelnen Klassifikationswerte sowie der Durchführung der Klassifikationen im Feld im Bergbau Gummern wird in den entsprechenden Berichten (Diplomarbeit Nußbacher (2009) und Bericht zur Tagebauendböschung (Wagner et al. 2010)) beschrieben. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse nach Wagner et al. (2010). Des Weiteren ist zu den Gebirgsklassifikationssystemen anzumerken, dass manche Eingangparameter, wie zum Beispiel der Verwitterungsgrad oder die Trennflächenbeschaffenheit, geschätzt werden müssen. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Gebirgsklassifikationen mit einer gewissen Unsicherheit versehen. In weiterer Folge fließt diese Unsicherheit auch in die aus der Gebirgsklassifikation abgeleitete Gebirgsfestigkeit ein. Dieser Umstand muss bei der Beurteilung der Ergebnisse der Stabilitätsberechnungen berücksichtigt werden.

| | Homogenbereich 1 | Homogenbereich 2 | Karstbereich |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| basis RMR | 58 | 52 | 28 |
| Q' | 5,0 | 2,5 | 0,01 |
| GSI | 60 | 50 | 25 |

Tabelle 3: Ergebnisse der Gebirgsklassifikation nach Wagner et al. (2010)

Die Befahrung der Ausrichtungsstrecken am 11.04.2016 hat gezeigt, dass die Gebirgsverhältnisse untertage als wesentlich besser einzustufen sind als jene im Tagebau; vergleiche Abbildung 14 bis Abbildung 16. Die Ursache dafür dürfte sein, dass das Gebirge im Tagebau einerseits ständig den Witterungseinflüssen ausgesetzt ist und dass andererseits die Gebirgseigenschaften durch die großflächigen Sprengungen im Tagebau negativ beeinflusst werden. Da ein Auftreten dieser Umstände im zukünftigen untertägigen Abbau nicht zu erwarten ist und da bei der Befahrung eine bessere Gebirgsqualität festgestellt werden konnte, ist eine neuerliche Gebirgsklassifikation für die Untersuchungen bezüglich des geplanten untertägigen Abbaus erforderlich. Im Gegensatz zu den Gebirgsklassifikationen im Tagebau wird bei dieser jedoch nur der GSI-Wert nach Marinos und Hoek (2000) bestimmt. Der Grund dafür liegt im Umstand, dass für die Ermittlung der Gebirgsfestigkeit das Verfahren nach Hoek und Brown in der Version von 2002 (Hoek, Carranza-Torres und Corkum 2002), das auf dem GSI-Wert aufbaut, angewandt wird. Des Weiteren ist ausschließlich der Homogenbereich 2 klassifiziert worden, weil zurzeit der Homogenbereich 1 untertägig nicht aufgeschlossen ist. Auf eine Klassifikation der Karstbereiche wird verzichtet, weil diese lediglich lokal auftreten und daher bei der Beurteilung der regionalen Standfestigkeit nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der neuerlichen Klassifikation sind in Tabelle 4 dargestellt. Information zur Vorgehensweise bei der Ermittlung der GSI-Werte kann in der Diplomarbeit Nußbacher (2009) sowie im Bericht zur Tagebauendböschung (Wagner et al. 2010) gefunden werden.

| | Homogenbereich 1 | Homogenbereich 2 |
|------------|-------------------------|-------------------------|
| GSI | nicht aufgeschlossen | 65 |

Tabelle 4: Ergebnis der untertägigen Gebirgsklassifikation vom 11.04.2016



Abbildung 14: Gebirge im Tagebau Gummern



Abbildung 15: Gebirge in einer Ausrichtungsstrecke



Abbildung 16: Gebirge in einer Ausrichtungsstrecke

3.2.4 Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit

Die Ermittlung der Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit für die beiden Homogenbereiche erfolgt mit Hilfe der Software RocData Version 5.002 der Firma Rocscience. Das zugrunde liegende Berechnungsverfahren ist jenes nach Hoek und Brown in der Version 2002 (Hoek, Carranza-Torres und Corkum 2002). Eine Beschreibung zum Berechnungsverfahren sowie zur Software RocData befindet sich in der Diplomarbeit Nußbacher (2009). Aus diesem Grund wird auf eine neuerliche Beschreibung verzichtet. Tabelle 5 zeigt sowohl die Eingangsparameter als auch die Ergebnisse der Berechnung der Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit.

Zu den Eingangsparametern ist Folgendes anzumerken:

- Die einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (σ_{ci}), der E-Modul des Gesteins (E_i) und der GSI-Wert werden aus den vorhergehenden Abschnitten entnommen.

- Die Materialkonstante des intakten Gesteins (m_i) wird nach den Empfehlungen von Hoek und Brown mit 9 angenommen.
- Der Zerrüttungsfaktor (D) wird mit 0 angenommen, weil die regionale Standfestigkeit betrachtet wird und die Sprengarbeit, die für den Zerrüttungsfaktor maßgeblich ist, lediglich einen Einfluss auf das Gebirge in unmittelbarer Umgebung des Hohlraums hat.
- Die Abbautiefe wird mit 400m angenommen. Dies entspricht in etwa der größten zu erwartenden Überlagerung.
- Die Gebirgsdichte wird mit 2700kg/m^3 angenommen.

Zu den Ergebnissen ist Folgendes anzumerken:

- Die Zugfestigkeit berechnet nach Hoek und Brown beträgt für den Homogenbereich 2 $0,6\text{MPa}$. Um die Zugfestigkeit des Gebirges nicht zu überschätzen, wird diese auf $0,5\text{MPa}$ abgemindert. Demnach beträgt die Zugfestigkeit in der numerischen Simulation $0,5\text{MPa}$.
- Der Homogenbereich 1 ist derzeit untertägig nicht aufgeschlossen. Aus diesem Grund ist die Berechnung der Gebirgsfestigkeit nicht möglich, weil keine untertägige Klassifikation durchgeführt werden kann und die bestehenden Gebirgsklassifikationen aus dem Tagebau nicht herangezogen werden können; vergleiche Abschnitt „3.2.3 Gebirgsklassifikation“.

| Bestimmung der Gebirgsfestigkeiten nach Hoek&Brown | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Eingangsparameter | <i>Homogenbereich 1</i> | <i>Homogenbereich 2</i> |
| einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit; σ_{ci} [MPa] | 80 | 80 |
| GSI – Wert [1] | nicht aufgeschlossen | 65 |
| Materialkonstante des Gesteins; m_i [1] | 9 | 9 |
| E-Modul des Gesteins; E_i [GPa] | 56 | 56 |
| Abbautiefe; T [m] | 400 | 400 |
| Dichte; ρ [kg/m ³] | 2700 | 2700 |
| Zerrüttungsfaktor; D [1] | 0 | 0 |
| Ergebnisse | | |
| <i>Mohr-Coulomb – Materialgesetz</i> | | |
| Kohäsion; c [MPa] | --- | 2,55 |
| Reibungswinkel; ϕ [°] | --- | 44,65 |
| <i>Hoek-Brown – Materialgesetz</i> | | |
| Zugfestigkeit des Gebirges; σ_t [MPa] | --- | 0,5 (0,6) |
| einaxiale Gebirgsdruckfestigkeit; σ_c [MPa] | --- | 11,4 |
| globale Gebirgsdruckfestigkeit; σ_{cm} [MPa] | --- | 18,9 |
| E-Modul des Gebirges; E_m [GPa] | --- | 35,4 |

Tabelle 5: Gebirgsfestigkeiten der beiden Homogenbereiche

Die Mohr-Coulomb'schen Festigkeitsparameter (Kohäsion, Reibungswinkel und Zugfestigkeit) in der numerischen Simulation werden durch eine Interpolation des Mohr-Coulomb'schen Materialgesetzes an das Materialgesetz von Hoek und Brown im erwarteten Spannungsbereich abgeleitet; vergleiche Abbildung 17. Aus dieser Abbildung ist auch ersichtlich, dass beim Mohr-Coulomb'schen Materialgesetz die Gebirgsfestigkeit im Bereich niedriger Umschlingungsdrücke überschätzt wird. Die Interpolation ist mit der Software RocData durchgeführt worden.

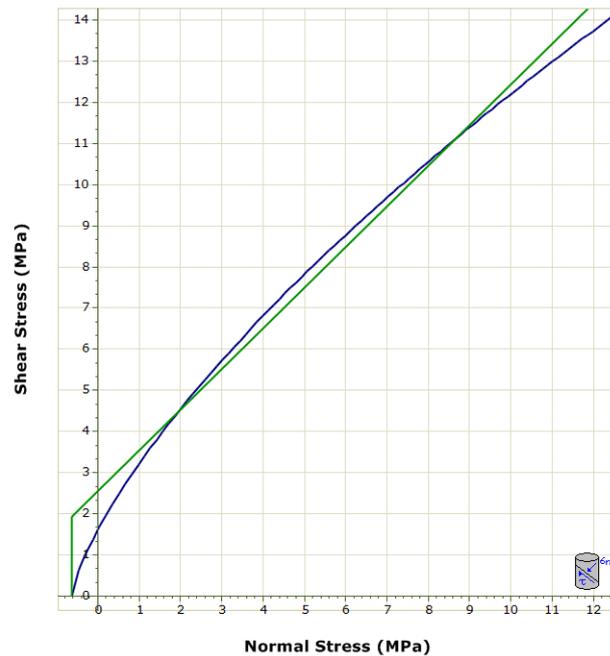


Abbildung 17: Gebirgsfestigkeit nach Hoek und Brown (blau) und interpolierte Gebirgsfestigkeit nach Mohr-Coulomb (grün)

Hoek (2004) hat die bis dahin bekannten Methoden, welchen ein Gebirgsklassifikationssystem zur Ermittlung der Gebirgsfestigkeit zugrunde liegt, zusammengefasst; vergleiche Abbildung 18. Das Ergebnis dieser Studie kann herangezogen werden, um die zu erwartende Gebirgsfestigkeit abzuschätzen, und wird im Falle des Bergbaus Gummern ergänzend zu der bisherigen Gebirgsfestigkeitsberechnung verwendet. Die Auswertung für den Homogenbereich 2 ist in Abbildung 18 ersichtlich und Tabelle 6 fasst die Werte für die Homogenbereiche 1 und 2 zusammen. Dabei ist anzumerken, dass der Homogenbereich 1 derzeit untertägig nicht aufgeschlossen ist und daher kein Vergleich möglich ist. Vergleicht man die berechnete globale Gebirgsfestigkeit des Homogenbereichs 2 (18,9MPa) mit dem Streubereich der globalen Gebirgsfestigkeiten aus der Zusammenfassung nach Hoek (9,6 bis 20,8MPa), kann der Schluss gezogen werden, dass die Berechnung der Gebirgsfestigkeit angemessene aber nicht konservative Werte für die Gebirgsfestigkeit ergibt.

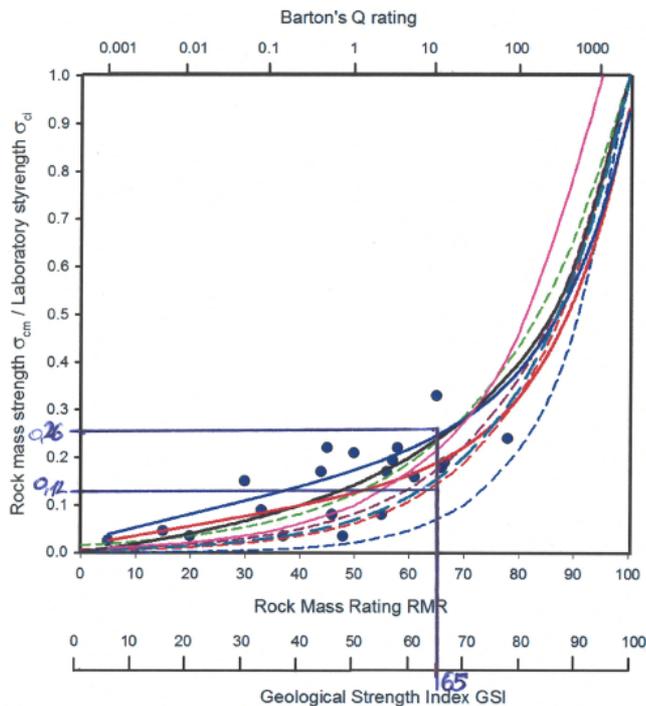


Abbildung 18: Zusammenhänge zwischen Gebirgsfestigkeit, Gesteinsdruckfestigkeit und Gebirgsklassifikationssysteme (Hoek 2004); ersichtlich ist auch der Streubereich für den Homogenbereich 2; zur dessen Ermittlung ist jedoch die Gebirgsfestigkeit nach der blau strichlierten Linie nicht berücksichtigt worden, weil diese stark von den übrigen Festigkeiten abweicht.

| | Homogenbereich 1 | | Homogenbereich 2 | |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|
| | σ_{cm}/σ_{ci} [1] | σ_{cm} [MPa] | σ_{cm}/σ_{ci} [1] | σ_{cm} [MPa] |
| Minimum | --- | --- | 0,12 | 9,6 |
| Maximum | --- | --- | 0,26 | 20,8 |
| Durchschnitt | --- | --- | 0,19 | 15,2 |

Tabelle 6: Streubreite der Gebirgsfestigkeiten nach den Untersuchungen von Hoek (2004)

4 Literaturrecherche

Im Zuge dieser Arbeit ist nach Literatur gesucht worden, die gebirgsmechanische Aspekte des Raise-mining Abbaufahrens betrachtet. Bereits im Kapitel „2 Raise-mining Abbaufahren“ wird erwähnt, dass in der Literatur keine Information zu einem Raise-mining Abbau mit zylindrischen Kammern in größeren Abbaufeldern vorhanden ist. Aus diesem Grund ist auch keine Literatur zur

Gebirgsmechanik des Raise-mining gefunden worden. In diesem Kapitel ist zudem erwähnt worden, dass das Alimak-mining Abbaufahren ähnlich dem Raise-mining ist. Da es aber bevorzugt zum Abbau von geringmächtigen Ganglagerstätten angewandt wird und sich in weiterer Folge die Geometrien der Kammern und Abbaufelder deutlich von jenen des Raise-mining Abbaus unterscheiden, sind die gebirgsmechanischen Aspekte nur bedingt vergleichbar und werden daher nicht für die weiteren Untersuchungen herangezogen. Ähnliche Hohlraumgeometrien und –größen wie beim Raise-mining werden im Lösungsbergbau mit Bohrlochsonden bei massigen Salzlagerstätten erreicht. Dabei wird das Salz aus dem Gebirge gelöst, wobei zylindrische Kavernen mit vergleichbaren Geometrien zurückbleiben. Allerdings ist festzuhalten, dass sich die gebirgsmechanischen Eigenschaften von Salz und jene des umliegenden Gebirges von Salzlagerstätten aufgrund des duktilen Verhaltens von Salz deutlich von jenen des Festgesteins unterscheiden. Aus diesem Grund sind die gebirgsmechanischen Aspekte des Bohrlochsondenbergbaus im Salz nicht mit jenen des Raise-mining im Festgestein vergleichbar. Daher wird die Gebirgsmechanik des Bohrlochsondenbergbaus für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit nicht herangezogen.

5 Standfestigkeitsuntersuchungen

Dieses Kapitel beschreibt die Untersuchungen betreffend ausgewählter gebirgsmechanischer Aspekte des Raise-mining Abbaufahrens. Dabei beziehen sich diese Untersuchungen allerdings nicht ausschließlich auf den Bergbau Gummern, sondern es wird auch das Raise-mining Abbaufahren im Allgemeinen betrachtet. Der Grund dafür ist, dass das Raise-mining Verfahren eine in Betracht zu ziehende Alternative gegenüber Variationen des herkömmlichen Kammerbaus für den Abbau massiger Lagerstätten ist, es aber nur unzureichende Studien zu den grundlegenden, gebirgsmechanischen Aspekten gibt (vergleiche Kapitel „2 Raise-mining Abbaufahren“). Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen und Analysen ist es, die wesentlichen gebirgsmechanischen Aspekte des Raise-minings zu erläutern. Diese werden

einerseits genutzt, um Richtlinien für eine erste, grobe Auslegung eines Raise-mining Abbaus ableiten zu können und andererseits um die Standfestigkeit der geplanten Kammern im Bergbau Gummern zu beurteilen. Dafür werden in den nächsten Kapiteln folgende Punkte analysiert:

- Standfestigkeit einer isolierten Abbaukammer
- Wechselwirkungen zwischen benachbarten Abbaukammern sowie deren Einfluss auf die Standfestigkeit der Kammern
- Einfluss der Anordnung der Kammern innerhalb eines Baufelds auf die Standfestigkeit sowie Einfluss der Baufeldgröße und Baufeldanordnung auf die regionale Stabilität.
- Einfluss der Abbausequenz auf die Standfestigkeit
- Wechselwirkungen zwischen einem Raise-mining Abbau und einer nahen Tagebauendböschung und deren Einfluss auf die Standfestigkeit der Kammern sowie der Böschung.

In den einzelnen Kapiteln werden zunächst jeweils generelle Untersuchungen durchgeführt. Zum Abschluss werden die jeweiligen Aspekte des Raise-minings des Bergbaus Gummern betrachtet. Da keine Bergwerke, in denen das Raise-mining Abbaufahren derzeit angewandt wird, für Untersuchungen zur Verfügung stehen, erfolgen diese in erster Linie an Hand von numerischen Simulationen. Diese werden zudem durch die Anwendung von und Vergleich mit analytischen sowie numerischen Studien aus der Literatur ergänzt.

5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen

5.1.1 FLAC 3D

Die numerischen Simulationen werden mit der Software FLAC 3D Version 4.00.89 der Firma Itasca, die eine Berechnung von dreidimensionalen Modellen ermöglicht, durchgeführt. Eine zweidimensionale Simulation ist aufgrund der

zylindrischen Kammergeometrie und der Simulation der Interaktion des ober- und untertägigen Abbaus im Bergbau Gummern nicht möglich. Der zugrunde liegende Lösungsalgorithmus beruht auf der finiten Differenzenmethode (Itasca 2009). Für die Simulation wird zunächst ein Simulationsmodell in Form eines Netzes erstellt, das aus einzelnen Zonen in Form von Polyedern besteht. Diesen Zonen wird ein Materialgesetz mit entsprechenden Materialparametern zugeordnet und sie interagieren untereinander über ihre Eckpunkte. Dabei können unterschiedliche Zonen unterschiedliche Materialgesetze und Materialparameter erhalten. Des Weiteren werden Rand- und Anfangsbedingungen vorgegeben. Eine Randbedingung ist beispielsweise die Lagerung des Netzes, eine Anfangsbedingung beispielsweise der Abbau einer Kammer oder die Aufbringung der Gewichtskraft beziehungsweise eines anderen Spannungszustands. Zu Beginn einer Simulation befindet sich das Modell aufgrund der Anfangs- und Randbedingungen normalerweise nicht im statischen Gleichgewicht. Dieses wird anschließend im Zuge der Simulation näherungsweise numerisch ermittelt. Nach dem Erreichen des Gleichgewichts ist es möglich, die Rand- und Anfangsbedingungen beziehungsweise das Materialgesetz in allen beziehungsweise ausgewählten Zonen zu ändern und einen neuen Simulationsschritt zu starten. Dadurch ist es beispielsweise möglich, im ersten Schritt den primären Spannungszustand im Modell durch Aufbringen der Gewichtskraft zu initialisieren. Im zweiten Schritt erfolgt der Abbau der ersten Kammer, im dritten der Abbau der zweiten Kammer und im vierten werden beide Kammern versetzt. In dieser Arbeit werden die gesamten Simulationen nach diesem Prinzip durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise von FLAC 3D und dem Lösungsalgorithmus befindet sich in Itasca 2009.

5.1.2 Simulationsnetze

Da für die Simulationen im Allgemeinen lediglich einfache Geometrien benötigt werden, können die dazugehörigen Netze mit FLAC 3D generiert werden. Dabei wird insbesondere darauf geachtet, dass der Abstand der Kammern zum Rand des Netzes groß genug ist, damit mögliche Randeffekte keinen Einfluss auf das

Ergebnis haben, und dass in der Nähe der Kammern das Netz feiner ist, um die in diesen Bereichen erwarteten hohen Spannungsgradienten besser darstellen zu können. Das Simulationsmodell, das für die Beurteilung der Interaktion der Tagebauendböschung und den untertägigen Abbauen herangezogen wird, kann aufgrund seiner Komplexität jedoch nicht mit FLAC 3D erstellt werden. In diesem Fall wird die Geometrie des Bergbaus Gummern ins Modell übertragen. Dazu werden folgenden Daten verwendet:

- Tagebau-Istzustand und Topografie des umliegenden Geländes
- geplanter Tagebau-Endzustand
- Zuschnitt des untertägigen Abbaus
 - Geometrie der Kammern
 - Höhe 160m
 - Durchmesser 35m
 - Lage der Kammern
 - 50 Kammern
 - Seehöhenerstreckung über Adria 512m bis 672m
 - Zentralabstand zwischen Kammern 50m

Ausgehend von diesen Daten ist zunächst ein dreidimensionales Modell des Bergbaus mit der Software Surpac Version 6.3 der Firma Gemcom erstellt worden; vergleiche Abbildung 20. Dieses wird anschließend mit der Software Kubrix der Firma Itasca in ein Berechnungsnetz für FLAC 3D umgewandelt. Die Grenzen des Modells sind dabei so gewählt worden, dass der Abstand zu den Kammern so groß ist, dass die Berechnungsergebnisse in der Umgebung der Kammern nicht durch mögliche Randeffekte verfälscht werden. Abbildung 21 zeigt das Modell. Seine Grenzen verlaufen in Nord-Süd Richtung und Ost-West Richtung und sind jeweils 900m lang; vergleiche Abbildung 19. Die ebenen Koordinaten der Eckpunkte sind in Tabelle 7 ersichtlich. Sie werden im System der österreichischen Landesvermessung mit dem Bezugsmeridian M31 angegeben. Die Höhe des Modells erstreckt sich von 250m Seehöhe über Adria bis auf 1000m Seehöhe über Adria beziehungsweise bis zur Geländeoberfläche, sollte diese unter 1000m Seehöhe über Adria liegen.

| Eckpunkt | Rechtswert [m] | Hochwert [m] |
|----------|----------------|--------------|
| 1 | 35980,00 | 169262,00 |
| 2 | 35980,00 | 168362,00 |
| 3 | 35080,00 | 168362,00 |
| 4 | 35080,00 | 169262,00 |

Tabelle 7: Ebene Koordinaten der Eckpunkte des Simulationsmodells; Koordinaten im System der österreichischen Landesvermessung Bezugsmeridian M31

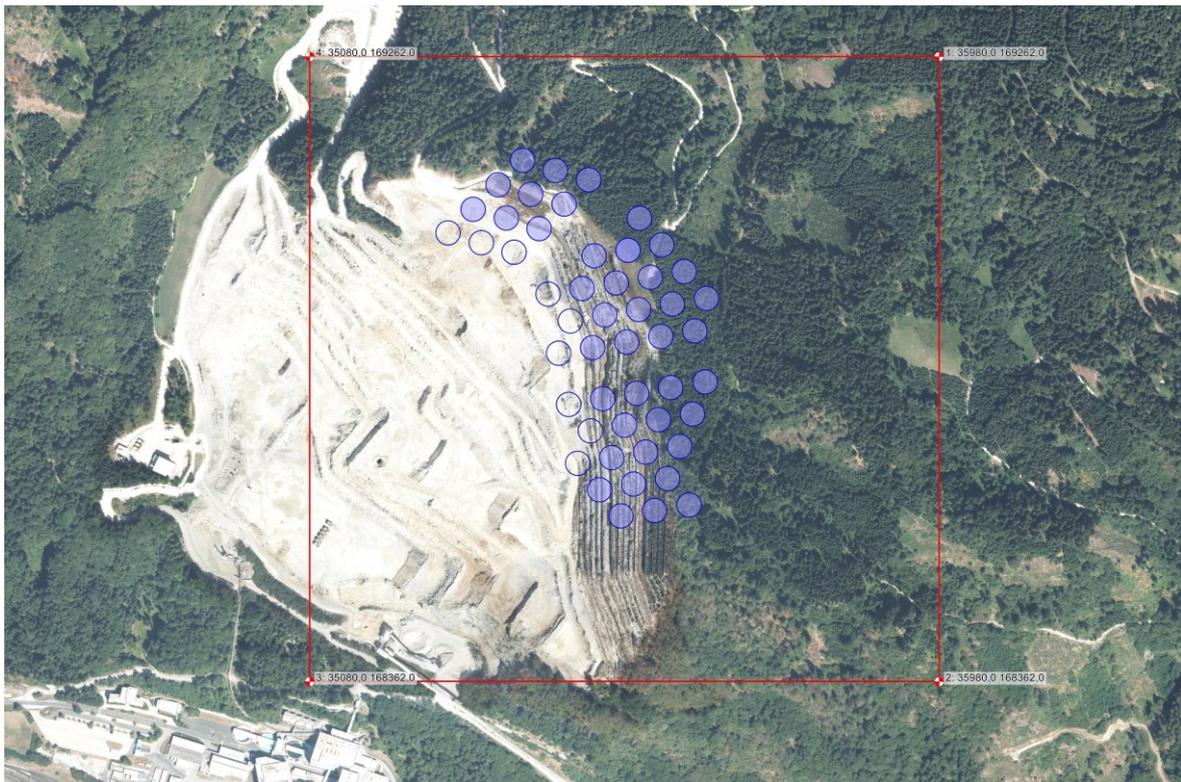


Abbildung 19: Luftbildaufnahme des Tagebaus Gummern; Eingezeichnet sind die Grenzen des Simulationsmodells (rot) und die geplanten Abbaukammern (blau) (KAGIS 25.10.2016)

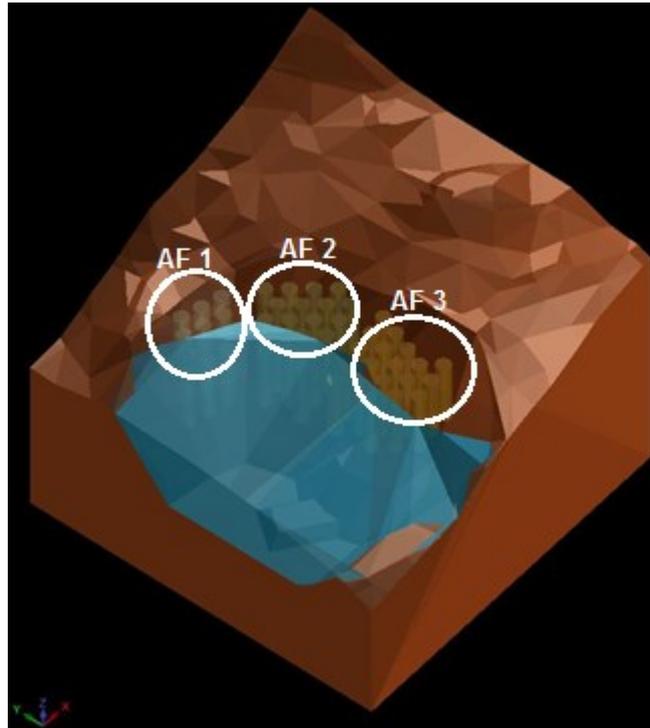


Abbildung 20: Simulationsmodell in der Software Surpac. braun=Tagebau-Endzustand und restliche Topografie; blau=Vorräte im Tagebau; weiß markiert = Abbaufelder 1 bis 3

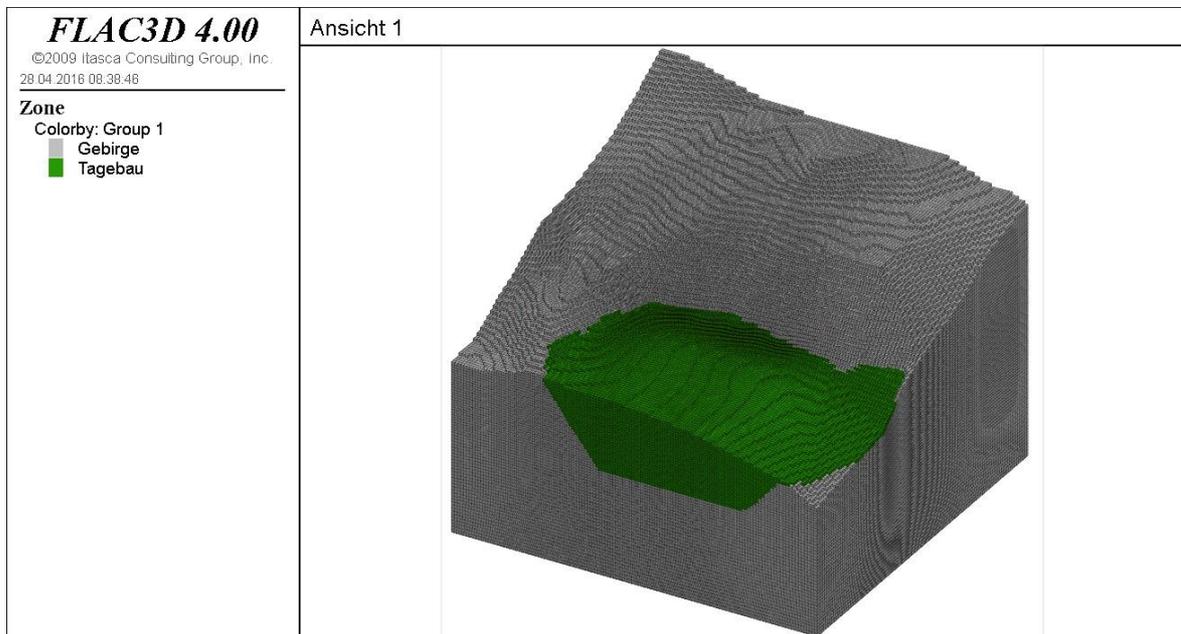


Abbildung 21: Simulationsmodell im FLAC 3D Netz; grau=anstehendes Gebirge im Tagebau-Endzustand; grün=anstehende Vorräte im Tagebau

5.1.3 Simulationsparameter

Die numerischen Simulationen werden mit den folgenden Eingangsparametern und Randbedingungen durchgeführt:

- Annahme eines homogenen Gebirges; das heißt, dass das gesamte Modell die gleichen Materialeigenschaften aufweist. Der Einfluss von unterschiedlichen Gebirgseigenschaften in den einzelnen Homogenbereichen und jener des Nebengesteins werden nicht berücksichtigt.
- Die Simulationen zu den allgemeinen gebirgsmechanischen Aspekten des Raise-mining werden mit den elastischen Gebirgsparametern von Gummern durchgeführt; vergleiche Abschnitt „3.2.4 Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit“. Dadurch wird ein Bezug zu einem zukünftig stattfindenden Raise-mining Abbau hergestellt, wodurch die Ergebnisse der Simulationen mit den Beobachtungen des Raise-mining Abbaus in Gummern verglichen werden können.
- Die Simulation der Fallbeispiele aus dem Bergbau Gummern werden mit den Gebirgsparametern des Homogenbereichs 2 (vergleiche Abschnitte „3.2 Gebirgsverhältnisse“ und „3.2.4 Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit“) durchgeführt, weil dieser gebirgsmechanisch betrachtet etwas schlechtere Eigenschaften als der Homogenbereich 1 aufweist. Dadurch wird eine Überschätzung der Standfestigkeit von Kammern beziehungsweise der Tagebauendböschung vermieden.
- Ausbildung der primären Spannungen: Diese erfolgt in Abhängigkeit vom Ziel der jeweiligen Simulation entweder über die Gewichtskraft (Vertikalspannungen) und eine verhinderte Querdehnung (Horizontalspannungen) oder die primären Spannungen werden mit einer Anfangsbedingung initialisiert. Bei der Initialisierung mit der Anfangsbedingung wird eine Spannung von 1MPa gewählt, weil dadurch zugleich die Ergebnisse auf 1MPa normalisiert werden. Die Verwendung dieser Spannung von 1MPa ist möglich, weil in den damit durchgeführten

Simulationen ausschließlich ein linear elastisches Materialgesetz verwendet wird. Daher sind die berechneten Spannungen und Verformungen immer relativ zur primären Spannung von 1MPa. In weiterer Folge können dadurch die Spannungsumlagerungen für andere primäre Spannungsverhältnisse durch Multiplikation berechnet werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass das Verhältnis der primären Spannungen jenem Verhältnis aus den Simulationen entspricht. Ist dies nicht der Fall unterscheiden sich die Spannungsumlagerungen von Realität und Simulation deutlich voneinander.

- Gewichtskraft und verhinderte Querdehnung:
 - Vertikalspannung:
 - Erdbeschleunigung $g=9,81\text{m/s}^2$
 - Dichte des Gebirges $\rho=2700\text{kg/m}^3$
 - Horizontalspannung:
 - Poisson-Zahl $\nu=0,26$
 - Seitendruckbeiwert $k=\nu/(1-\nu)=0,35$ (k beschreibt das Verhältnis der primären Horizontal- zur Vertikalspannung)
- Anfangsbedingung:
 - Vertikalspannung $\sigma_v=1\text{MPa}$
 - Horizontalspannung $\sigma_H=1\text{MPa}$
 - Seitendruckbeiwert $k=\sigma_H/\sigma_v=1$
- Materialgesetze:
 - Null-Materialgesetz
 - verwendet zum Abbau von Kammern beziehungsweise Tagebau
 - keine Materialparameter zugeordnet
 - linear elastisches Materialgesetz:
 - verwendet bei der Simulation zu den allgemeinen gebirgsmechanischen Aspekten des Raise-mining und zur

Berechnung der primären Spannungen bei den Fallbeispielen aus dem Bergbau Gummern

- Dichte $\rho=2700\text{kg/m}^3$
- E-Modul $E_m=35,4\text{GPa}$
- Poisson-Zahl $\nu=0,26$
- Mohr-Coulomb (linear elastisch – ideal plastisches Materialverhalten)
 - verwendet für numerische Simulation der Fallbeispiele
 - Dichte $\rho=2700\text{kg/m}^3$
 - E-Modul $E_m=35,4\text{GPa}$
 - Poisson-Zahl $\nu=0,26$
 - Reibungswinkel $\phi=44,65^\circ$
 - Kohäsion $c=2,55\text{MPa}$
 - Zugfestigkeit $\sigma_t=0,5\text{MPa}$
- Keine Simulation des Versatzes
- Lagerung des Modells: Abhängig von der Art der Ausbildung des primären Spannungszustands ist das Modell unterschiedlich gelagert.
 - Ausbildung des primären Spannungszustands über Gewichtskraft und verhinderte Querdehnung: Die Unterseite sowie die vier Seitenflächen sind jeweils in Richtung ihrer Normalvektoren eingespannt. Damit wird einerseits der Verbund mit dem umliegenden Gebirgskörper simuliert und andererseits können sich die primären Spannungen über die Gewichtskraft ausbilden.
 - Ausbildung des primären Spannungszustands über eine Anfangsbedingung: Alle sechs Seitenflächen sind jeweils in Richtung ihrer Normalvektoren eingespannt. Damit wird der Verbund mit dem umliegenden Gebirgskörper simuliert und eine Entspannung im Zuge der Simulation aufgrund der fehlenden Gewichtskraft verhindert.

In einzelnen Fällen ist es möglich, dass die Simulationsparameter von den oben angeführten abweichen. Ist dies der Fall werden die Abweichungen bei den jeweiligen Simulationen beschrieben und der Grund der Abweichung diskutiert.

5.1.4 Simulationsablauf

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Simulationsabläufe verwendet; einer für die allgemeinen Simulationen zu den gebirgsmechanischen Aspekten des Raise-mining der andere für die Fallbeispiele aus dem Bergbau Gummern.

Simulationsablauf für die allgemeinen Simulationen:

1. Erstellung des Berechnungsnetzes mit der zu analysierenden Geometrie (Anmerkung: Die Kammer ist beziehungsweise die Kammern sind noch nicht abgebaut.)
2. Zuweisung des linear elastischen Materialgesetzes in alle Zellen
3. Zuweisung der Lagerung des Modells
4. Initialisierung der primären Spannungen im Modell (Anmerkung: Der primäre Spannungszustand und die Lagerung des Modells sind so gewählt, dass dieses sich nach der Initialisierung bereits im Gleichgewicht befindet. Das heißt, dass das Gleichgewicht nicht erst durch eine erste Simulation ermittelt werden muss.)
5. Abbau einer Kammer beziehungsweise mehrerer Kammern (Anmerkung: Die Kammern werden immer als Ganzes in einem Schritt abgebaut, weil in dieser Arbeit die Spannungsumlagerungen während des Abbaus von einzelnen Kammern nicht betrachtet werden.)
6. Start der numerischen Simulation
7. Bei Bedarf werden die Schritte 5. und 6. mehrmals wiederholt. Dadurch kann der nacheinander erfolgende Abbau von Kammern simuliert werden.

Simulationsablauf für die Fallbeispiele:

1. Erstellung des Berechnungsnetzes mit der zu analysierenden Geometrie beziehungsweise Import des Simulationsmodells des Bergbaus Gummern (Anmerkung: Die Kammer ist beziehungsweise die Kammern oder Teile

des Tagebaus sind noch nicht abgebaut.)

2. Zuweisung des linear elastischen Materialgesetzes in alle Zellen
3. Zuweisung der Lagerung des Modells
4. Implementierung der primären Spannungen. Die primären Vertikalspannungen bilden sich dabei durch die Gewichtskraft des Gebirges (Gleichung 1) und die primären Horizontalspannungen über die verhinderte Querdehnung (Gleichung 2) aus. Aufgrund von Oberflächeneinflüssen der Tagebauböschung, der Tagebausohle oder des Rands des Simulationsnetzes sind geringe Abweichungen der primären Horizontalspannung von den hier beschriebenen Gleichungen möglich. Dieser Umstand hat jedoch keine signifikanten Auswirkungen auf die weitere Simulation und wird daher vernachlässigt. Für die Implementierung des primären Spannungszustands wird ein linear elastisches Materialgesetz verwendet. Da bei der Berechnung des primären Spannungszustands aufgrund des großen anfänglichen Ungleichgewichts an manchen Stellen eine Überbelastung des Gebirges, die auf die Berechnung zurückzuführen ist und in der Realität nicht auftritt, möglich ist, wird ein linear elastisches Materialgesetz verwendet, weil es bei diesem zu keinem Versagen des Gebirges kommt. Würde in diesen Fällen ein plastisches Materialgesetz, das die Gebirgsfestigkeit berücksichtigt, verwendet werden, würden sich Bruchbereiche in diesen überlasteten Bereichen ausbilden, die die weiteren Berechnungen verfälschen würden.

$$\sigma_V = \rho * g * T * 10^{-6} [MPa]$$

Gleichung 1

$$\sigma_H = \sigma_V * k = \sigma_V * \left(\frac{\nu}{1 - \nu} \right) [MPa]$$

Gleichung 2

- g ... Erdbeschleunigung [m/s²]
- k ... Seitendruckbeiwert [1]
- T ... Teufe/Überlagerungshöhe [m]

- ν ... Poisson-Zahl [1]
- ρ ... Dichte des Gebirges [kg/m^3]
- σ_H ... primäre Horizontalspannung [MPa]
- σ_V ... primäre Vertikalspannung [MPa]

5. Zuweisung des Mohr-Coulomb'schen Materialgesetzes in allen Zellen
6. Abbau einer Kammer beziehungsweise mehrerer Kammern oder Abbau von Teilen des Tagebaus (Anmerkung: Die Kammern werden immer als Ganzes in einem Schritt abgebaut, weil in dieser Arbeit die Spannungsumlagerungen während des Abbaus von einzelnen Kammern nicht betrachtet werden.)
7. Start der numerischen Simulation
8. Bei Bedarf werden die Schritte 6. und 8. mehrmals wiederholt. Dadurch kann der nacheinander erfolgende Abbau von Kammern beziehungsweise von Kammern und Teilen des Tagebaus simuliert werden.

5.1.5 Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse der numerischen Simulationen erfolgt primär an Hand der resultierenden Spannungen. Dabei werden die Vertikal- und Horizontalspannungen sowie die Differenz der größten (σ_1) und kleinsten (σ_3) Hauptnormalspannung betrachtet. Diese Spannungen werden entweder in Form von farbkodierten Spannungsverteilungen in Schnitten im Modell dargestellt oder deren Verlauf wird entlang von ausgewählten Messlinien ausgewiesen. Die Lage der Schnitte und der Messlinien hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab und wird daher in den entsprechenden Abschnitten gesondert beschrieben.

Bei den Untersuchungen zur Stabilität der untertägigen Abbaue in Gummern sowie bei ausgewählten Analysen zu den allgemeinen gebirgsmechanischen Aspekten des Raise-mining Abbaufahrens wird zusätzlich die Verteilung des Auslastungsgrads in bestimmten Schnitten im Modell ausgewertet. Die Definition

des Auslastungsgrads ist in Gleichung 3 ersichtlich. Er wird für jede Zelle des Modells berechnet und beschreibt, ob das Gebirge die Spannungen aufnehmen kann oder ob es unter diesen zu Bruch geht. Ist der Auslastungsgrad größer 1, so kann das Gebirge die Spannungen aufnehmen; ist dieser kleiner 1, geht das Gebirge zu Bruch. Der Auslastungsgrad kann demnach zur Beurteilung des Belastungszustands des Gebirges herangezogen werden.

$$\text{Auslastungsgrad} = \frac{\text{Gebirgsfestigkeit}}{\text{Spannung}} [1]$$

Gleichung 3

Die Gebirgsfestigkeit wird nach Mohr-Coulomb berechnet. Die maximal aufnehmbare größte Hauptnormalspannung berechnet sich nach Gleichung 4. Diese wird für jede Zelle des Modells ermittelt und mit der in der jeweiligen Zelle vorherrschenden größten Hauptnormalspannung ins Verhältnis gesetzt, woraus sich der Auslastungsgrad ergibt.

$$\sigma_{1,max} = \frac{2 * c * \cos \phi + \sigma_3 * (1 + \sin \phi)}{1 - \sin \phi}$$

Gleichung 4

- c ... Kohäsion [MPa]
- $\sigma_{1,max}$... maximal aufnehmbare größte Hauptnormalspannung [MPa]
- σ_3 ... kleinste Hauptnormalspannung [MPa]
- ϕ ... Reibungswinkel [°]

Aus Gleichung 3 geht zudem hervor, dass die Definition des Auslastungsgrads vergleichbar mit jener des Sicherheitsfaktors ist. Eine Unterscheidung dieser beiden Begriffe ist dennoch zweckmäßig, weil mit dem Sicherheitsfaktor üblicherweise die Standfestigkeit von größeren Teilbereichen des Gebirges, wie zum Beispiel einer Feste oder einer Böschung, beschrieben wird. Im Gegensatz

dazu beschreibt der Auslastungsgrad, wie stark einzelne, lokale Bereiche des Gebirges belastet sind. Diese lokale Belastung wird vom Sicherheitsfaktor in einer Vielzahl von Fällen nicht erfasst. Da für die nachfolgenden Studien vor allem die lokale Belastung von Interesse ist, wird der Auslastungsgrad verwendet. In Abhängigkeit vom Ausmaß der lokalen Belastungserscheinungen können zudem Aussagen über die regionale Standfestigkeit abgeleitet werden.

Parallel zum Auslastungsgrad wird zudem der Zustand des Gebirges in den einzelnen Zellen des Modells betrachtet. Dieser sagt aus, ob das Gebirge intakt ist oder ob es sich in einem plastischen Zustand (Versagen des Gebirges) befindet. Im Falle eines Versagens wird zudem ausgewiesen, ob es sich um ein Scher- oder Zugversagen handelt.

5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen

Bei der Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse sind die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Die numerischen Simulationen stellen im Allgemeinen eine Vereinfachung und Idealisierung der realen Gegebenheiten dar. Aus diesem Grund muss bei der Beurteilung der Ergebnisse beachtet werden, dass diese mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Eine weitere Quelle für solche Unsicherheiten liegt in der Bestimmung der Gebirgsparameter (vergleiche Abschnitt „3.2 Gebirgsverhältnisse“) und der Ermittlung des primären Spannungszustands. Diese Unsicherheiten können jedoch durch weitere Studien und Erkenntnisse über das Raise-mining Abbaufahren und das Gebirgsverhalten im Bergbau Gummern, die im Zuge des fortschreitenden Abbaus gewonnen werden, sukzessive verringert werden. Dennoch können nach dem derzeitigen Kenntnisstand mit Hilfe der Simulationen, Aussagen über die gebirgsmechanischen Aspekte des Raise-mining und die Standfestigkeit des geplanten Raise-mining Abbaus in Gummern gemacht werden.

- Da bei den allgemeinen Untersuchungen zum Raise-mining Abbauverfahren ausschließlich ein linear-elastisches Materialgesetz verwendet wird und die Gebirgsfestigkeit nicht in die Untersuchungen einfließt, werden auch unter anderen Gebirgsbedingungen bei ebenfalls linear elastischen Betrachtungen sehr ähnliche Ergebnisse erzielt. Aus diesem Grund können die allgemeinen Untersuchungen zum Raise-mining unter Berücksichtigung einer linear elastischen Betrachtung und den übrigen, anderweitig ausgewiesenen Limitierungen auf andere Gebirgsverhältnisse übertragen werden.
- Demgegenüber sind die Simulationen zu den Fallbeispielen aus dem Bergbau Gummern nur unter den betrachteten Gebirgsverhältnissen aus dem Bergbau Gummern gültig, weil bei diesen ein plastisches Materialgesetz, das die Gebirgsfestigkeit einbezieht, verwendet wird.
- Bezüglich der Spannungsconvention ist festzuhalten, dass die Druckspannungen negativ sind.
- Der Begriff hohe Spannung bezeichnet eine Spannung, die größer als die primäre Spannung ist. In diesem Sinn bezeichnet der Begriff niedrige Spannung eine Spannung, die niedriger als die primäre Spannung ist. Der Begriff druckentspannt ist dem Begriff niedrige Spannung gleichzusetzen. Da die Unterteilung der Spannungen in niedrige und hohe in Bezug auf die primären Spannungen erfolgt, erlauben diese Bezeichnungen keine Aussagen auf die Auswirkungen der Spannungen auf die Standfestigkeit der Grubenbaue. Der Begriff Spannungsspitzen beschreibt die Spannungskonzentrationen in den Eckbereichen von Hohlräumen. In diesen Bereichen treten zudem sehr hohe Spannungen auf.
- Die Festigkeit des Gebirges wird bei den allgemeinen Untersuchungen zum Raise-mining Abbauverfahren nicht berücksichtigt. Für eine qualitative Aussage, ob das Gebirge die resultierenden Spannungen aufnehmen kann, müssen diese daher mit der Gebirgsfestigkeit verglichen werden. Aus diesem Grund soll die Höhe der Spannungen auch immer relativ zur Gebirgsfestigkeit betrachtet werden.
- Bei den Fallbeispielen aus dem Bergbau Gummern wird die

Gebirgsfestigkeit betrachtet. Daher sind in diesen Fällen Aussagen über die Standsicherheit möglich.

- Da die Berechnungen zu den allgemeinen Untersuchungen des Raise-mining mit einem elastischen Materialgesetz durchgeführt werden, ist die Reihenfolge der Auffahrung der Hohlräume für die resultierenden Spannungsverteilungen nicht relevant.
- Demgegenüber werden die Fallstudien aus dem Bergbau Gummern mit einem plastischen Materialgesetz berechnet. Daher hat die Abbaureihenfolge der Kammern einen Einfluss auf die resultierenden Spannungsverteilungen.
- Aufgrund des elastischen Berechnungsmodells können Spannungsspitzen in den Eckbereichen auftreten. Allerdings werden diese in der Praxis nicht in dieser Art auftreten, weil das Gebirge diese nicht aufnehmen kann und es zu lokalen Brucherscheinungen kommen wird. Diese Brucherscheinungen führen einerseits zu einem Abbau der Spannungsspitzen in den Eckbereichen und andererseits zu einer Verlagerung der Spannungsspitzen weiter in das Gebirge hinein. Da der Umschließungsdruck in diesen Bereichen jedoch höher ist, wird die Ausdehnung solcher Bruchzonen relativ gering sein.
- Die Hauptnormalspannungsdifferenz ist ein Indikator für die Größe der Schubspannungen. Dieses Prinzip wird an Hand von Abbildung 22 und Abbildung 23 beschrieben. Werden auf einen ebenen Probenkörper zwei unterschiedlich große Hauptnormalspannungen σ_1 und σ_3 aufgebracht, so bilden sich in eine Normalspannung σ_N und eine Schubspannung τ in einer um den Winkel β aus der Horizontalen geneigten Ebene aus; vergleiche Abbildung 22. Die Größe dieser Normal- und Schubspannung hängt dabei von der Hauptnormalspannungsdifferenz und dem Neigungswinkel β der Ebene ab. Dieser Zusammenhang kann im Mohr'schen Spannungskreis dargestellt werden; vergleiche Abbildung 23. Die beiden Hauptnormalspannungen sind auf der Abszisse aufgetragen und ein Kreis ist durch die beiden Hauptnormalspannungen gelegt. Die Schub- und Normalspannung in der Ebene erhält man, wenn man ausgehend vom

Mittelpunkt des Kreises eine Gerade mit einem Winkel von 2β mit dem Kreis schneidet. Der Schnittpunkt beschreibt die Schub- und Normalspannung in der betrachteten Ebene. Aus dem Mohr'schen Spannungskreis folgt auch, dass im Falle für $\beta=0^\circ$ und $\beta=90^\circ$ keine Schubspannungen und für $\beta=45^\circ$ die maximalen Schubspannungen bei einer gegebenen Hauptnormalspannungsdifferenz in der jeweiligen Ebene auftreten. In der Umgebung von Hohlräumen ist dabei allerdings zu beachten, dass sich die Richtungen der Hauptnormalspannungen aufgrund des Einflusses der Hohlräume verändern. Dieser Umstand muss beim Winkel β der Ebene unbedingt berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist auch ersichtlich, dass sich im Falle von $\sigma_1=\sigma_3$ entsprechend einer Hauptnormalspannungsdifferenz von 0MPa keine Schubspannungen ausbilden.

- Die aufgebrachten primären Vertikal- und Horizontalspannungen sind grundsätzlich Hauptnormalspannungen. Allerdings kommt es durch den Einfluss von Hohlräumen zu Spannungsumlagerungen, wodurch die Hauptnormalspannungen im Einflussbereich ungleich den resultierenden Vertikal- und Horizontalspannungen sind. Daraus folgt, dass die Hauptnormalspannungsdifferenz ungleich der Differenz zwischen den resultierenden Vertikal- und Horizontalspannungen ist.
- Es kann keine negative Hauptnormalspannungsdifferenz auftreten, weil σ_1 immer größer gleich σ_3 ist.
- Der Auslastungsgrad gibt Aufschluss über die aktuell vorliegenden Belastungsverhältnisse im Gebirge. Da das Gebirge nach seinem Versagen noch immer eine gewisse Restfestigkeit aufweist, kommt es nicht zu einem vollständigen Bruch. Anstatt dessen deformiert sich das Gebirge, wobei sich die Spannungen abbauen und unter die Restfestigkeit absinken. In weiterer Folge stellt sich daher ein Gleichgewichtszustand ein. Da sich der Auslastungsgrad jedoch nur auf die aktuell vorliegenden Verhältnisse bezieht, weist er kein Versagen in solchen, durch eine frühere Überlastung, geschädigten Gebirgsbereichen aus. Aus diesem Grund muss der Zustand des Gebirges parallel zum Auslastungsgrad für die Beurteilung der Standfestigkeit betrachtet werden.

- Üblicherweise wird bei Fragestellungen betreffend die Gebirgsmechanik in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem folgende Achsenanordnung gewählt: die X- und Y-Achse sind horizontal und die Z-Achse ist vertikal. Die Achsen stehen allesamt normal aufeinander. Da die Modellerstellung, abgesehen von den Studien betreffend den Auswirkungen des untertägigen Abbaus auf die Tagebauendböschung, mit FLAC 3D erfolgt, muss für diese die Achsenkonvention von FLAC 3D übernommen werden. Dabei zeigt die Y-Achse immer in Längsrichtung des Hohlraums. Aus diesem Grund ist bei diesen Modellen die Y-Achse die Vertikalachse und die X- und Z-Achse sind die beiden Horizontalachsen; vergleiche Abbildung 24. Von dieser Veränderung der Achsanordnung ist das Modell, das zur Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem ober- und untertägigen Abbau herangezogen wird, ausgenommen, weil es nicht mit Flac erstellt worden ist; vergleiche Abschnitt „5.1.2 Simulationsnetze“.
- Da die Richtung der Achsen bei den meisten Modellen aufgrund der Vorgabe von FLAC 3D von der in der Gebirgsmechanik üblichen abweicht, wird die Richtung der primären Spannungen in den entsprechenden farbkodierten Spannungsverteilungen zur besseren Übersicht nochmals angezeigt. Dabei entspricht die Richtung des Pfeils der Richtung der primären Spannungen. Stehen die primären Spannungen normal auf die Schnittebene, wird dies durch ein eingekreistes X angezeigt.

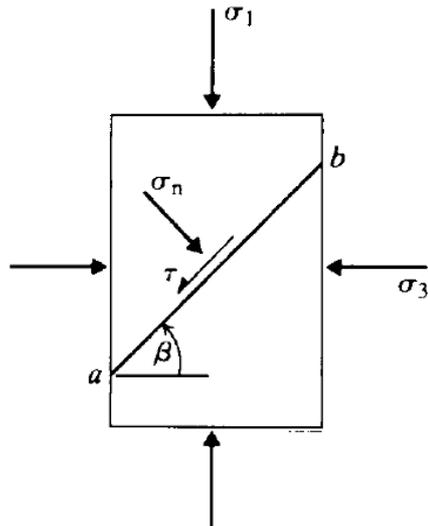


Abbildung 22: Normal- und Schubspannungen in einer Ebene hervorgerufen durch Aufbringen von Hauptnormalspannungen (Brady and Brown 2004)

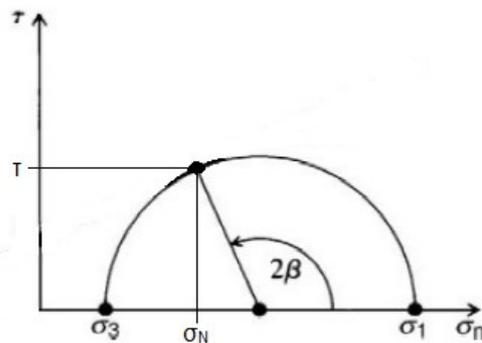


Abbildung 23: Mohr'scher Spannungskreis (Brady and Brown 2004)

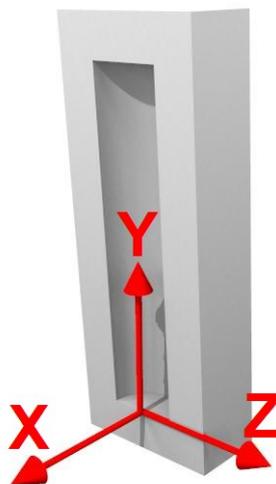


Abbildung 24: Koordinatensystem für die mit FLAC 3D genierten Modelle

5.1.7 Anmerkungen zu den Materialgesetzen

Bei den numerischen Simulationen werden zwei unterschiedliche Materialgesetze verwendet: ein linear-elastisches Materialgesetz und das Materialgesetz nach Mohr-Coulomb, das in dieser Arbeit ein linear elastisches – ideal plastisches Materialverhalten annimmt. Das linear-elastische Materialgesetz wird zur Untersuchung der allgemeinen gebirgsmechanischen Aspekte des Raise-mining Abbauverfahrens herangezogen und das Mohr-Coulomb'sche Materialgesetz zur Analyse der Standfestigkeit der Kammern im Bergbau Gummern in den entsprechenden Fallstudien. In diesem Abschnitt werden diese beiden Materialgesetze kurz beschrieben und ihre Umsetzung in den Simulationen sowie deren Einfluss auf Simulationsergebnisse diskutiert.

linear-elastisches Materialgesetz

Das linear elastische Materialgesetz beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen der Spannung im Gebirge (σ) und der Stauchung beziehungsweise Dehnung (ϵ); vergleiche Abbildung 25. Dieser Zusammenhang kann für einen eindimensionalen Fall mit Hilfe des Hook'schen Gesetzes (Gleichung 5) dargestellt werden. Die Proportionalitätskonstante ist dabei der Elastizitätsmodul des Gebirges (E_m) und die auftretenden Verformungen sind vollkommen elastisch. Da beim linear elastischen Materialgesetz die Gebirgsfestigkeit nicht betrachtet wird, können sich theoretisch unendlich hohe Spannungen ausbilden. Das Gebirge kann in der Realität jedoch nur jene Spannungen aufnehmen, die geringer als seine Festigkeit sind. Wird das Gebirge überlastet, kommt es zu einem Versagen und in weiterer Folge zu Spannungsumlagerungen. Obwohl dieser Umstand vom linear elastischen Materialgesetz nicht berücksichtigt wird, bietet es dennoch eine adäquate Möglichkeit, die Spannungsumlagerungen in der Umgebung von Hohlräumen abzuschätzen. Weitere Vorteile des linear elastischen Materialgesetzes gegenüber einem plastischen Materialgesetz, das die Gebirgsfestigkeit berücksichtigt, sind einerseits ein geringerer Aufwand für die Ermittlung der Materialgesetzparameter und eine schnellere Simulation.

Andererseits ist die ermittelte und im plastischen Materialgesetz hinterlegte Gebirgsfestigkeit mit Unsicherheiten behaftet, vergleiche Abschnitt „3.2.3 Gebirgsklassifikation“. Aus diesem Grund ist die Interpretation der Ergebnisse einer Simulation, die mit einem linear elastischen Materialgesetz durchgeführt wird, im Allgemeinen einfacher als bei einer Simulation, die ein plastisches Materialverhalten erlaubt.

$$\sigma = E_m * \varepsilon$$

Gleichung 5

- E_m ... E-Modul des Gebirges [MPa]
- ε ... Dehnung [1]
- σ ... Spannung [MPa]

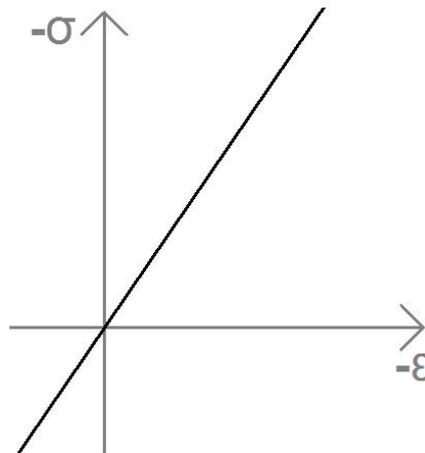


Abbildung 25: Linear-elastisches Materialgesetz

Mohr-Coulomb'sche Materialgesetz

Das Materialgesetz von Mohr-Coulomb ist in Abbildung 26 dargestellt. Es beschreibt die Abhängigkeit der Gebirgsfestigkeit vom Spannungszustand im Gebirge. Da der Fokus dieses Abschnitts auf dem Materialverhalten in der numerischen Simulation liegt, werden keine weiteren Erläuterungen zum Mohr-Coulomb'schen Materialgesetz gemacht. Eine detaillierte Beschreibung von diesem kann jedoch in Brady und Brown (2004) vorgefunden werden. In den

durchgeführten Simulationen wird bei Verwenden des Materialgesetzes nach Mohr-Coulomb das Gebirge linear elastisch – ideal plastisch modelliert. Dabei verhält sich jenes linear elastisch, so lange die Gebirgsfestigkeit nicht überschritten worden ist. Bei einer Überlastung ändert sich das Materialverhalten auf ideal plastisch; vergleiche Abbildung 27. Das ideal plastische Verhalten beschreibt die Restfestigkeit des Gebirges und besagt, dass die Festigkeit bei zunehmender Deformation gleich bleibt. Da durch zunehmende plastische Verformungen die Spannungen in den entsprechenden überlasteten Gebirgsbereichen im Allgemeinen abnehmen, wird sich wiederum ein statisches Gleichgewicht einstellen. Bei einer erneuten stärkeren Belastung wird sich das Gebirge in diesen Bereichen zunächst wiederum linear elastisch verhalten, bis die Restfestigkeit erreicht worden ist und sich das Verhalten auf ideal plastisch ändert. Dieser Zyklus kann mehrere Male durchlaufen werden, wobei die plastischen Deformationen immer größer werden. Die Annahme einer konstanten Restfestigkeit des ideal plastischen Verhaltens trifft allerdings nicht auf ein reales Gebirge zu, weil bei diesem die Restfestigkeit üblicherweise mit zunehmender Verformung abnimmt. Eine weitere Abweichung vom realen Verhalten ist, dass die Verringerung der Steifigkeit des überlasteten Gebirges nicht berücksichtigt wird. Obwohl das Verhalten des Gebirges in der Realität deutlich vom ideal plastischen abweicht, ermöglicht ein linear elastisches – ideal plastisches Materialverhalten dennoch eine adäquate Ermittlung der Auslastung des Gebirges und der Ausdehnung möglicher Bruchzonen. Daraus können in weiterer Folge Aussagen über die Standfestigkeit abgeleitet werden.

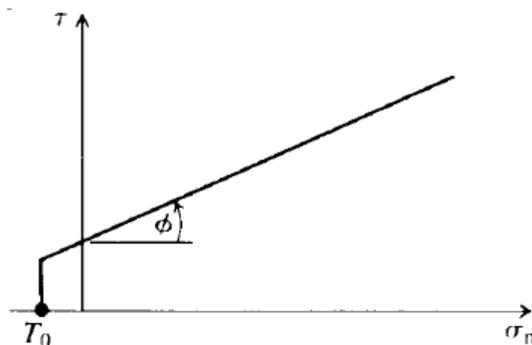


Abbildung 26: Materialgesetz nach Mohr-Coulomb (Brady und Brown 2004)

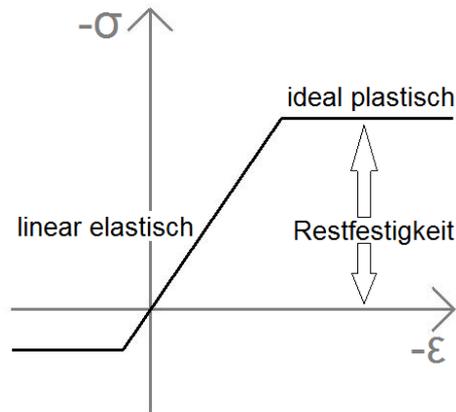


Abbildung 27: Linear elastisches – ideal plastisches Materialverhalten

5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer

Inhalt dieses Kapitels ist die Analyse einer einzelnen isolierten Abbaukammer. Aus dieser werden anschließend Richtlinien für die Dimensionierung einer Raise-mining Abbaukammer abgeleitet. Dafür wird insbesondere untersucht, welchen Einfluss die Geometrie der Kammer und der primäre Spannungszustand auf die Spannungsumlagerungen in der Umgebung der Kammer haben. Die Geometrie einer Kammer wird im Wesentlichen durch die Parameter Höhe und Durchmesser der Kammer sowie Ausbildung der Firsten und Sohlen bestimmt. Beim primären Spannungszustand werden zwei gegensätzliche Fälle untersucht, tiefe (oberflächenferne) Kammern und Kammern in der unmittelbaren Umgebung von Tagebauböschungen. Neben den bereits angeführten Einflussparametern können die vorherrschenden geologischen Strukturen die Geometrie der Kammer und in weiterer Folge die Spannungsumlagerungen und die Standfestigkeit einer Kammer wesentlich beeinflussen. Aus diesem Grund wird einerseits der Einfluss einer ausgeprägten Schichtung auf die Kammergeometrie und auf die Spannungsumlagerungen untersucht. Andererseits wird analysiert, wie sich unterschiedliche geologische Strukturbedingungen auf die Standfestigkeit einer Kammer auswirken. Ausgangspunkt für die bis dahin angeführten Untersuchungen bilden die Kammergeometrie und die Gebirgsverhältnisse des Bergbaus Gummern, die für die Analysen entsprechend variiert werden. Des Weiteren werden Überlegungen angestellt, wie die empirischen Kriterien nach Laubscher

und Matthews an die Bedingungen der Raise-mining Abbaukammern angepasst werden können. Diese beiden Kriterien benutzt man zurzeit oft zur Auslegung von gewöhnlichen Kammern mit rechteckförmigen Ulmen. Allerdings können diese nicht für runde Kammerulmen genutzt werden, wodurch eine Anpassung zweckmäßig erscheint. Abschließend wird die Standfestigkeit einer Kammer im Bergbau Gummern beurteilt.

5.2.1 Kammergeometrie

5.2.1.1 Höhen- zu Durchmesser Verhältnis

Sowohl die Höhe als auch der Durchmesser stellen die beiden wesentlichen Parameter bei der Auslegung von Kammern im Raise-mining Abbauverfahren dar. Grundsätzlich sollen die Höhe und der Durchmesser so groß als möglich sein, weil dadurch die Vorteile des Zuschnitts des Raise-minings am besten zu tragen kommen; vergleiche Kapitel „2 Raise-mining Abbauverfahren“. Limitierende Faktoren für die Höhe sind einerseits die Mächtigkeit (Erstreckung) der Lagerstätte und andererseits die gebirgsmechanischen Einflüsse auf die Standfestigkeit. Für den Durchmesser gelten dieselben Überlegungen, wobei allerdings der Einfluss der Gebirgsmechanik stärker zu gewichten ist, weil die Lagerstättenerstreckung in vielen Fällen den größtmöglichen stabilen Durchmesser überschreitet. Um den Einfluss der Gebirgsmechanik auf die Höhe und den Durchmesser zu untersuchen, werden ausgehend von der Kammergeometrie des Bergbaus Gummern entweder die Höhe oder der Durchmesser variiert. Bei dieser Variation wird auch darauf geachtet, dass gleiche Höhen- zu Durchmesser Verhältnisse (h/d) gewählt werden. Dadurch können die Ergebnisse der Variation der Höhe und des Durchmessers miteinander verglichen werden. Das oben genannte Höhen- zu Durchmesser Verhältnis beschreibt neben der Höhe beziehungsweise dem Durchmesser auch die Geometrie der Kammer. Aus diesem lässt sich erkennen, ob es sich um gedrungene ($h/d < 3$) oder um langgestreckte ($h/d > 3$) Kammern handelt. Die Einteilung in gedrungene und langgestreckte Kammern basiert auf den Ergebnissen der Untersuchungen zum Einfluss des Höhen- zu

Durchmesserverhältnis. Die analysierten Geometrien sind in Tabelle 8 dargestellt.

| | Höhe [m] | Durchmesser [m] | h/d [1] |
|-----------------------------|----------|-----------------|---------|
| Kammergeometrie von Gummern | 160 | 35 | 4,57 |
| Variation der Höhe | 35 | 35 | 1 |
| | 105 | 35 | 3 |
| | 210 | 35 | 6 |
| | 315 | 35 | 9 |
| Variation des Durchmessers | 160 | 26,7 | 6 |
| | 160 | 53,3 | 3 |

Tabelle 8: Analyisierte Geometrien von Raise-mining Kammern

Die numerischen Simulationen werden ausschließlich linear elastisch durchgeführt. Die primären Vertikalspannungen betragen 1MPa und das Verhältnis der primären Horizontal- zu Vertikalspannungen (k) ist 1. Es wird eine primäre Spannung von 1MPa gewählt, weil dadurch die resultierenden Spannungsumlagerungen für andere primäre Spannungen bei $k=1$ einfach durch Multiplikation berechnet werden können. Die weiteren Simulationsparameter sind im Abschnitt „5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen“ beschrieben. Des Weiteren befinden sich in diesem auch generelle Anmerkungen zu den numerischen Simulationen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen sowie Spannungsverläufen entlang ausgewählter Messlinien. Es werden dabei die Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen berücksichtigt. Die Spannungsverteilungen werden in zwei Schnitten betrachtet. Schnitt 1 ist vertikal und verläuft mittig durch die Kammer in X-Richtung. Schnitt 2 ist horizontal und durchschneidet die Kammer auf halber Höhe. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 28 dargestellt. Bei den Spannungsverteilungen ist auch auf die Intervalle der Spannungen zu achten, da diese nicht für alle Spannungen gleich gewählt worden sind.

Zu den Ergebnissen ist auch festzuhalten, dass die Spannungsumlagerungen nur für $k=1$ gültig sind. Eine veränderte Höhe der primären Spannungen kann durch Multiplikation berechnet werden. Ergänzend zu den Spannungsverteilungen werden drei Messlinien für die Beurteilung der Spannungsumlagerungen herangezogen. Die Lage ist in Abbildung 28 ersichtlich. Sie beginnen jeweils am Hohlraumrand und verlaufen bis zum Rand des Modells. Es wird immer nur eine Seite des Modells dargestellt, weil dieses symmetrisch ist. Die Messlinie 1 ist horizontal und befindet sich auf halber Kammerhöhe, die Messlinie 2 ist horizontal und hat einen Abstand von $0,1 \cdot \text{Höhe}$ von der Kammerfirse, die Messlinie 3 ist vertikal und verläuft durch den Mittelpunkt der Kammerfirse. Messlinie 1 stellt die Spannungsverläufe in den Ulmbereichen dar. Diese ist weit genug entfernt, um außerhalb des Randeinflussbereichs der Firsten und Sohlen zu liegen. Im Gegensatz dazu soll Messlinie 2 die Randeinflüsse der Firsten aufzeigen und Messlinie 3 stellt die Spannungsverläufe in der Firste dar. Um die einzelnen Spannungsverläufe entlang der Messlinien zwischen den verschiedenen Geometrien beurteilen zu können, ist der Abstand vom Hohlraumrand auf den Radius der Kammer normiert.

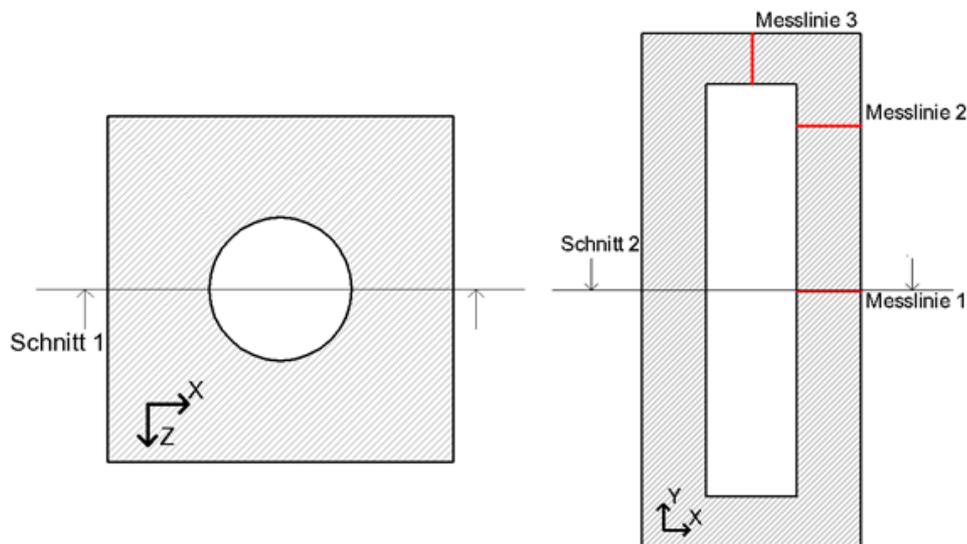


Abbildung 28: Lage der Schnitte und Messlinien

Vertikalspannungen

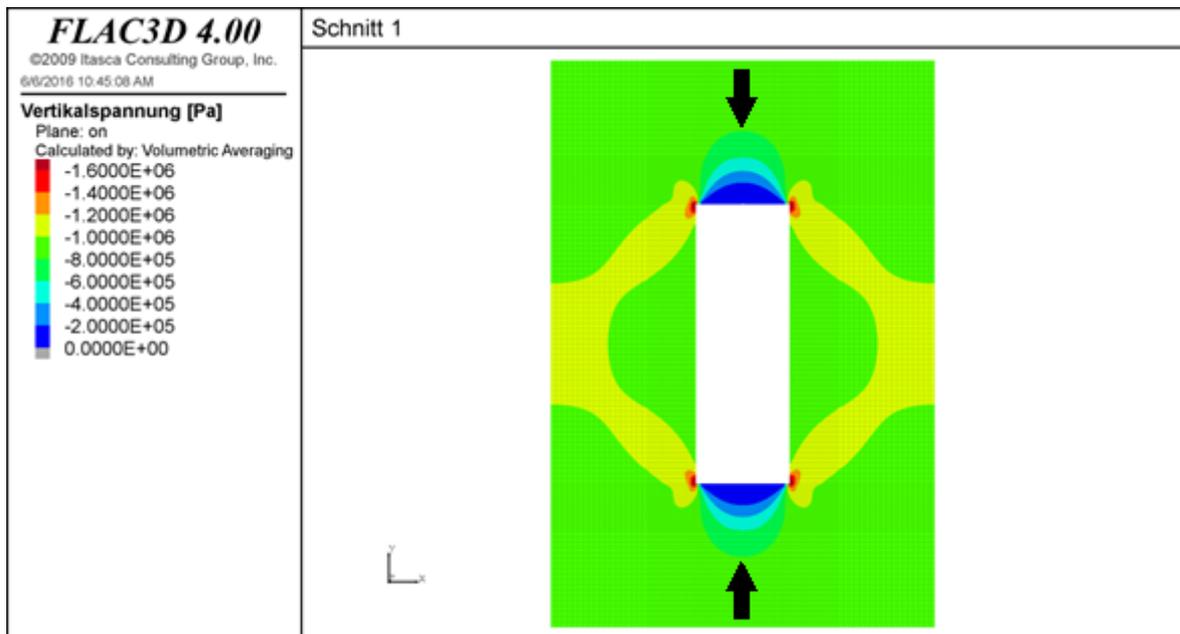


Abbildung 29: Vertikalspannungsverteilung für $h=105\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=3$) im Schnitt 1

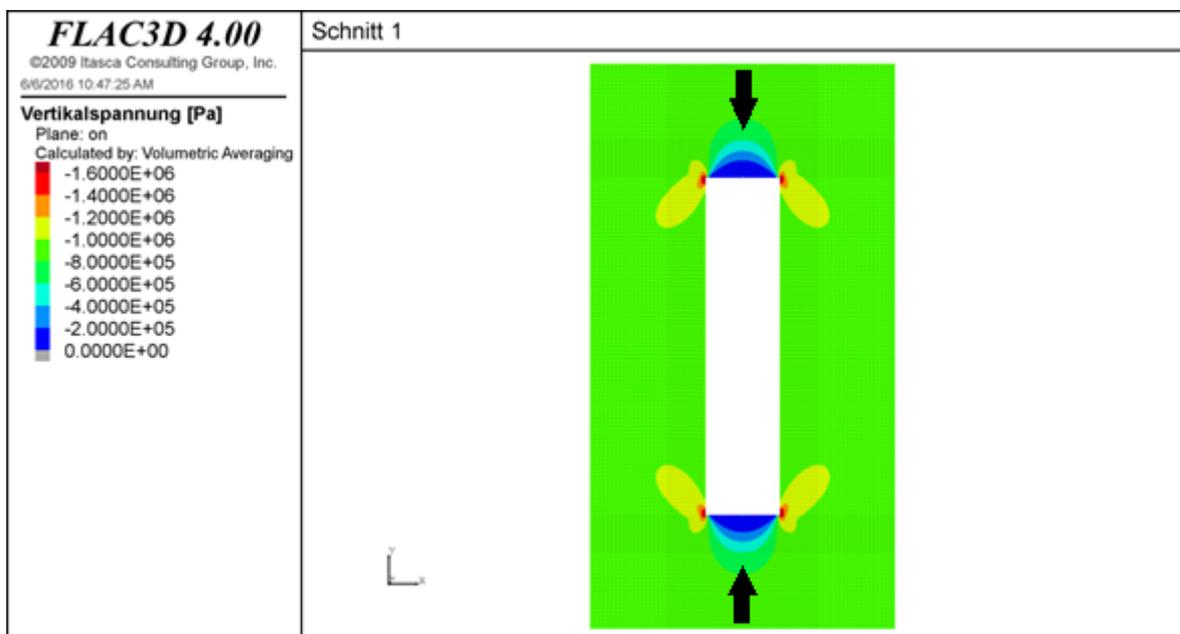


Abbildung 30: Vertikalspannungsverteilung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 1

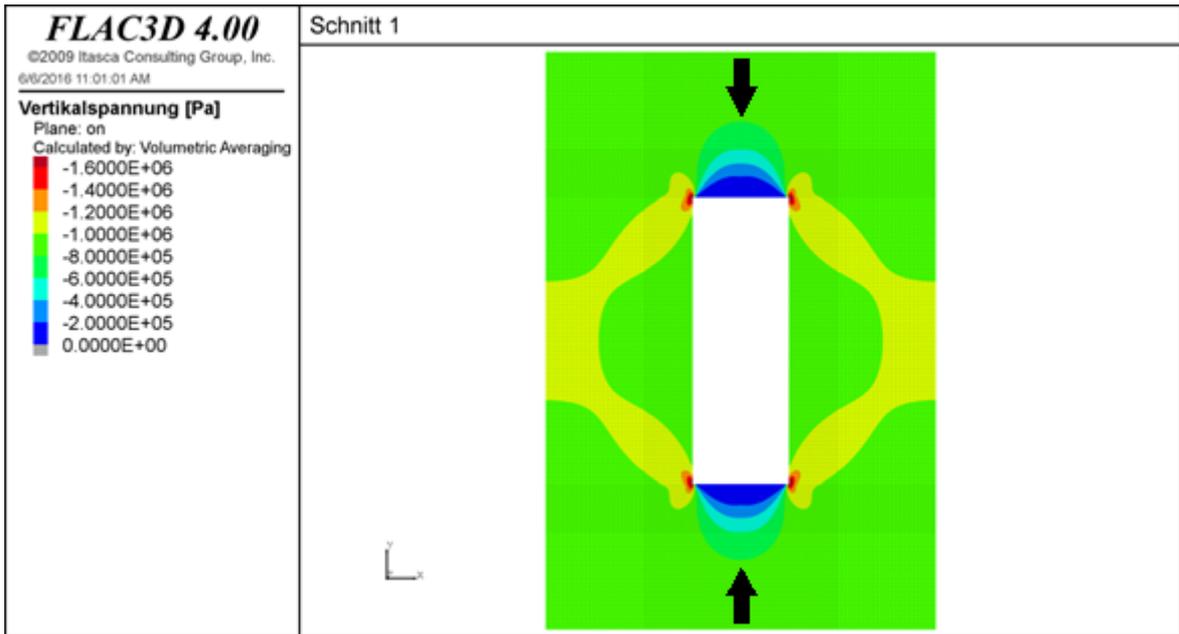


Abbildung 31: Vertikalspannungsverteilung für $h=160\text{m}$ und $d=53,3\text{m}$ ($h/d=3$) im Schnitt 1

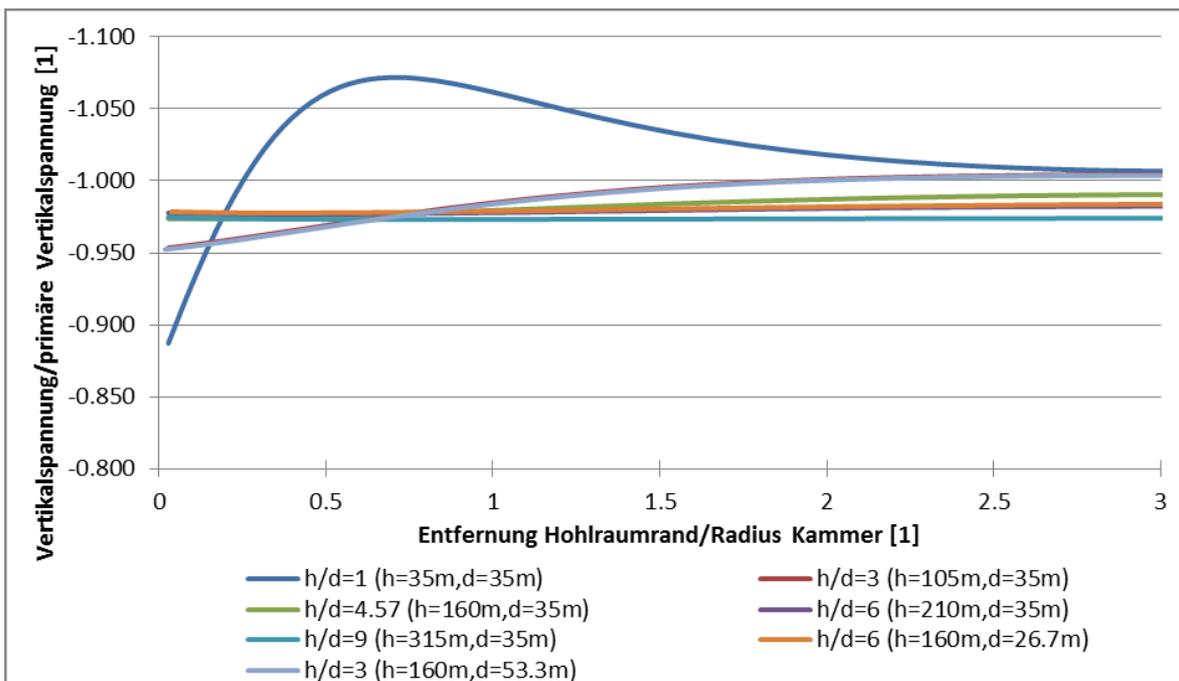


Abbildung 32: Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 1

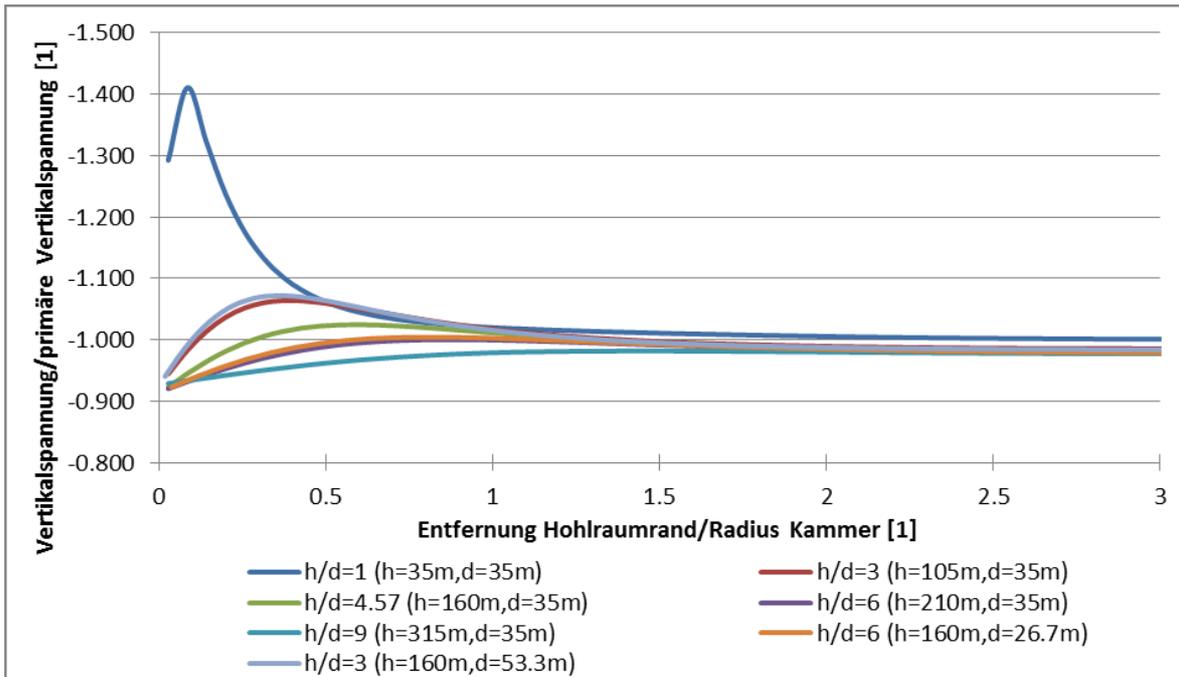


Abbildung 33: Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 2

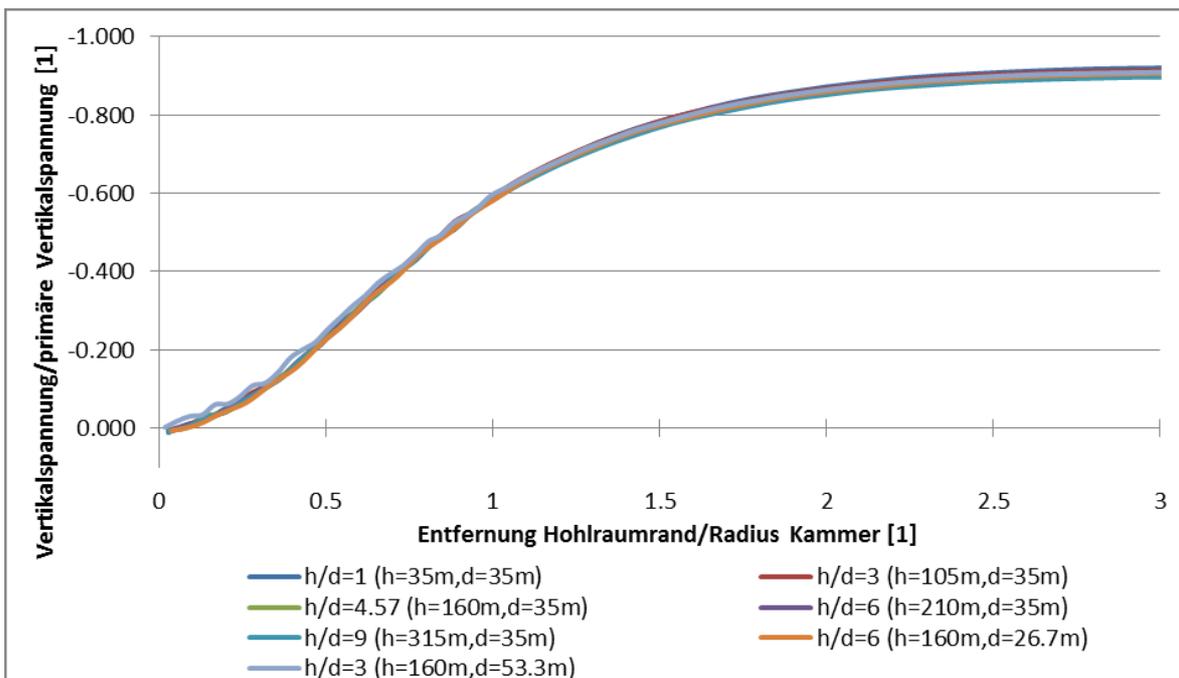


Abbildung 34: Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 3

Die Vertikalspannungsverteilungen sowie Vertikalspannungsverläufe entlang der Messlinien sind in Abbildung 29 bis Abbildung 34 dargestellt. Die wichtigsten Punkte und Erkenntnisse aus diesen sind im Folgenden zusammengefasst. Für die Beurteilung der Ergebnisse sind auch die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen

zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte zu berücksichtigen.

- In den Firsten und Sohlen bilden sich druckentspannte Bereiche bis zu einem Abstand von in etwa einem Durchmesser aus. In unmittelbarer Nähe der Firsten beziehungsweise Sohlen können auch geringe Zugspannungen auftreten.
- Die Spannungsumlagerungen in den Ulmbereichen wirken sich mit Ausnahme der gedrunghenen Kammer nicht signifikant aus.
- In den Eckbereichen treten Spannungsspitzen auf.
- Das Höhen- zu Durchmesser Verhältnis für gestreckte Kammern ($h/d > 3$) hat lediglich einen äußerst geringen Einfluss auf die Spannungsumlagerungen, wenn diese auf den Durchmesser der Kammer bezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass ein größerer Kammerdurchmesser auch großräumigere Spannungsumlagerungen zur Folge hat.
- Für gleiche Höhen- zu Durchmesser Verhältnisse ist die Spannungsumlagerung bezogen auf den Durchmesser sehr ähnlich.
- Die Randeinflüsse der Firsten beziehungsweise Sohlen sind für gestreckte Kammern im Allgemeinen auf eine Reichweite von in etwa $0,5 \cdot d$ beschränkt.

Horizontalspannungen

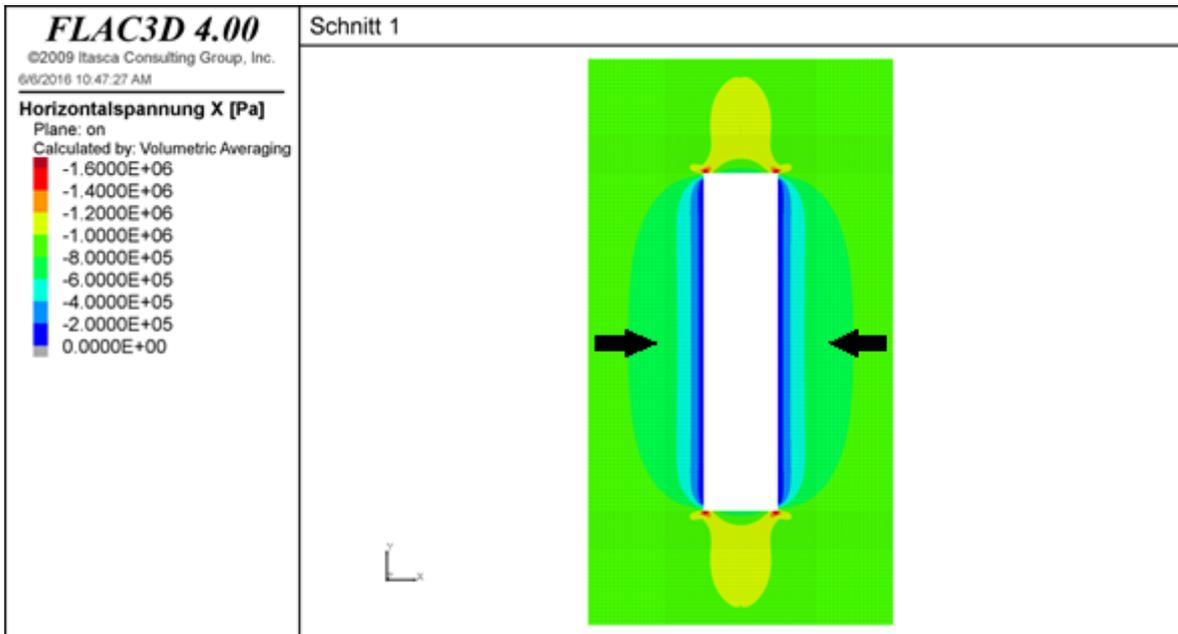


Abbildung 35: Horizontalspannungsverteilung in X-Richtung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 1

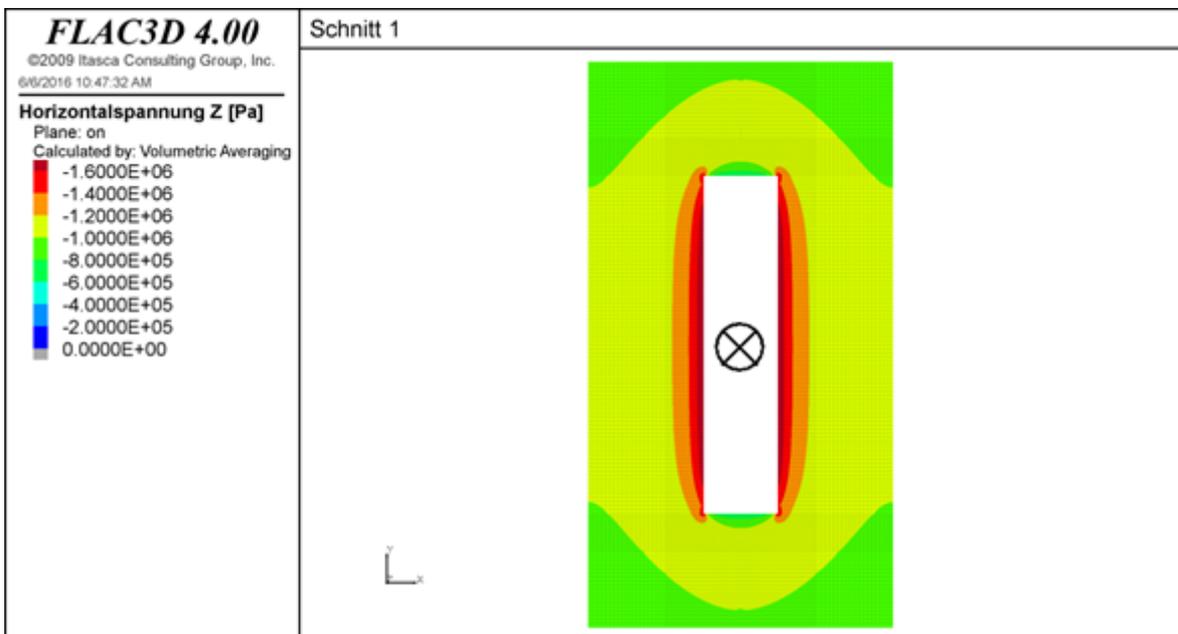


Abbildung 36: Horizontalspannungsverteilung in Z-Richtung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 1

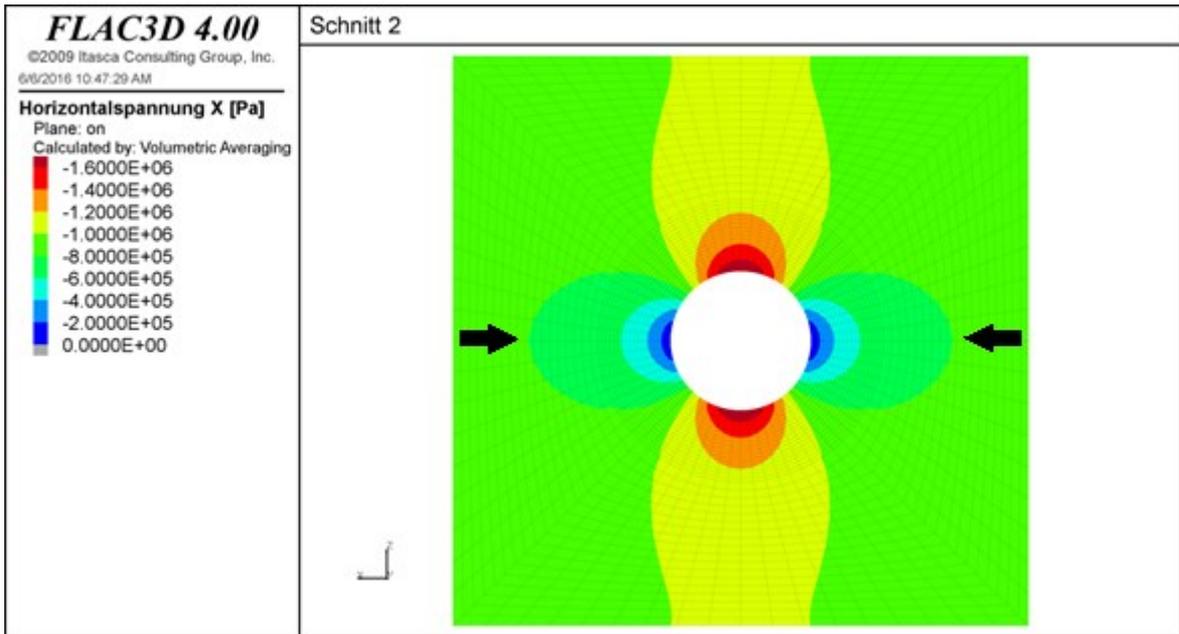


Abbildung 37: Horizontalspannungsverteilung in X-Richtung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 2

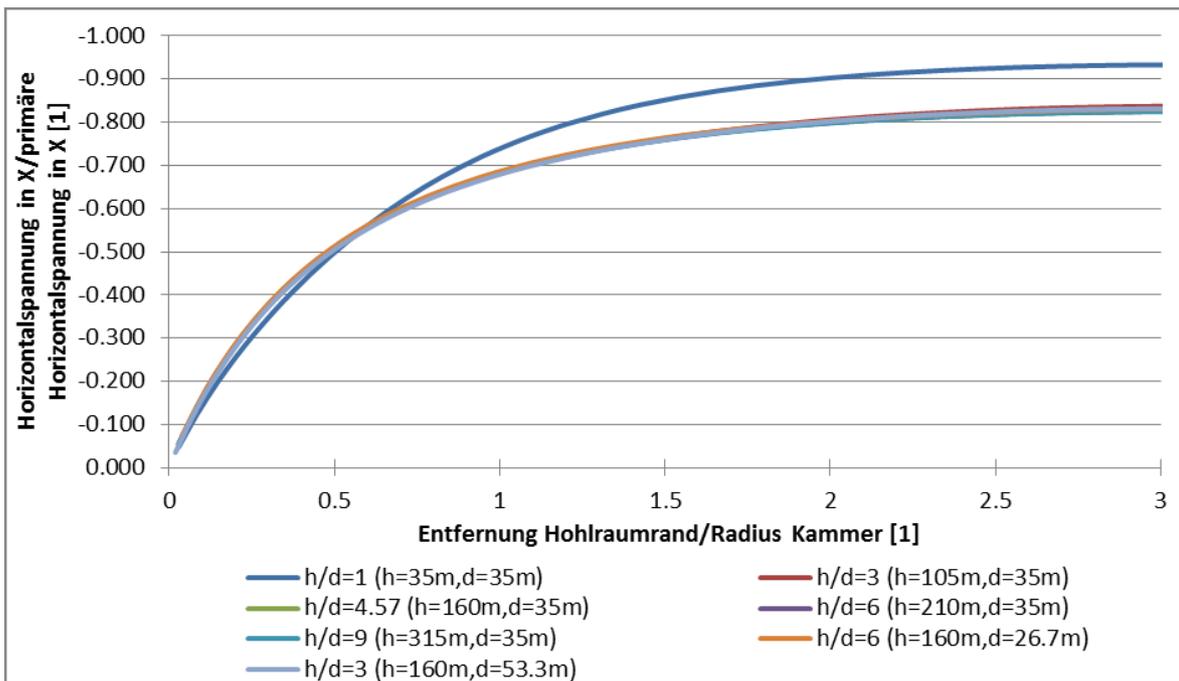


Abbildung 38: Horizontalspannungsverläufe in X-Richtung entlang von Messlinie 1

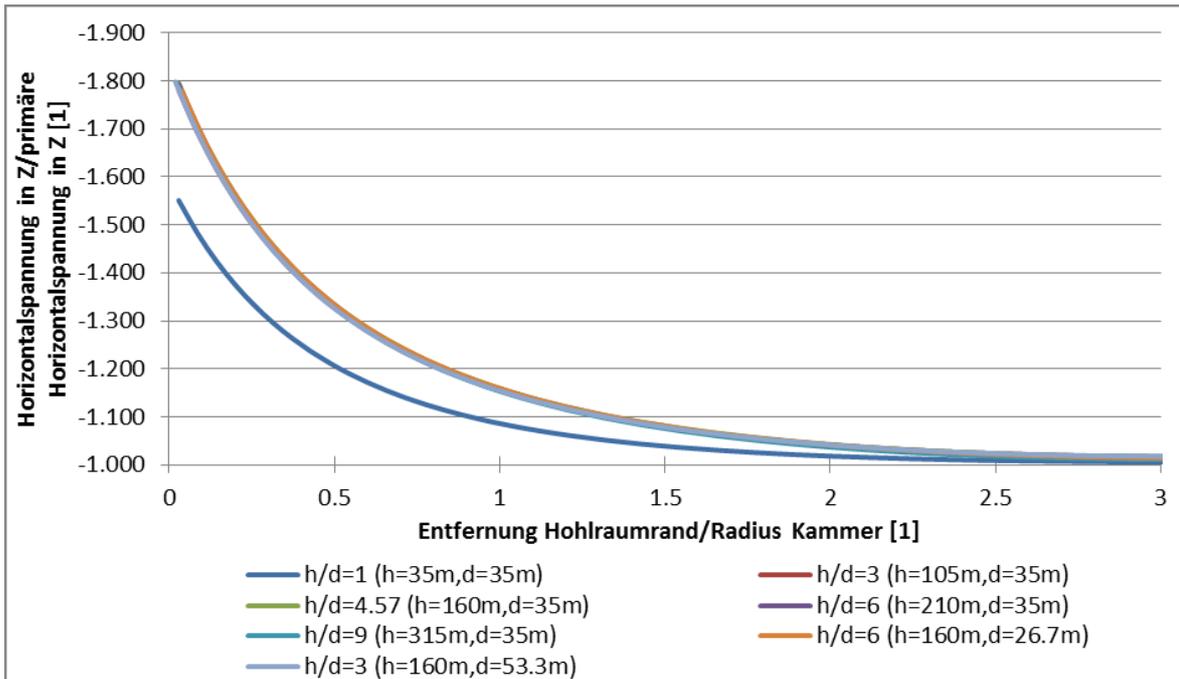


Abbildung 39: Horizontalspannungsverläufe in Z-Richtung entlang von Messlinie 1

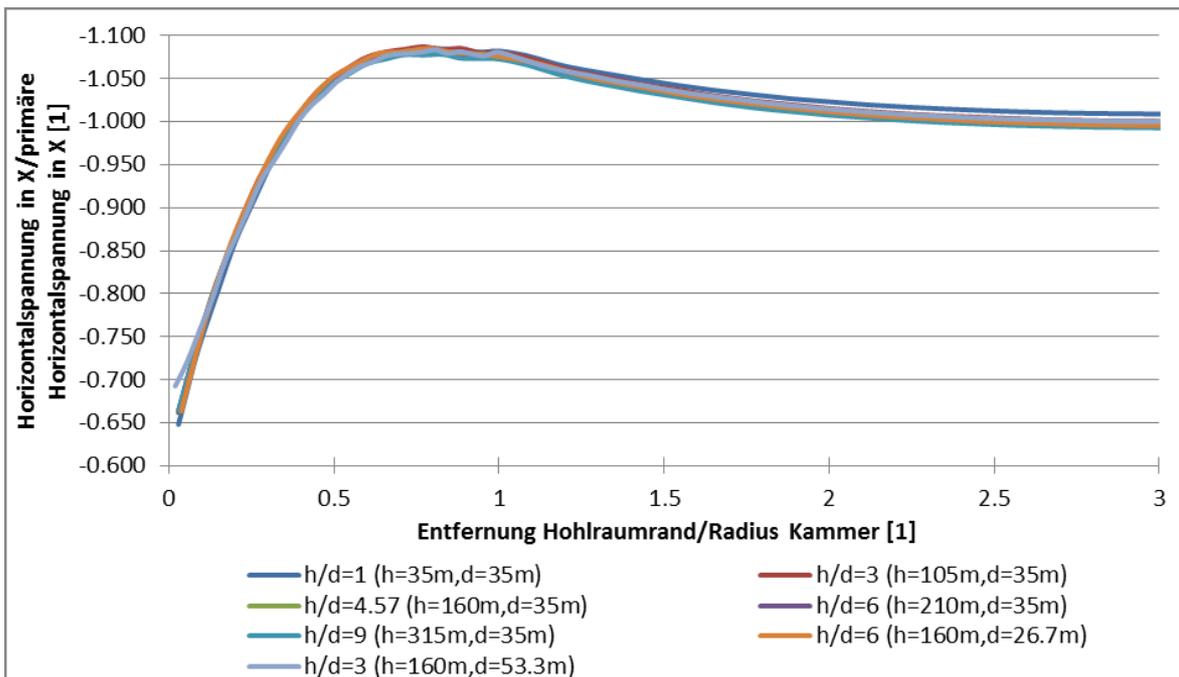


Abbildung 40: Horizontalspannungsverläufe in X-Richtung entlang von Messlinie 3

Die Horizontalspannungsverteilungen sowie Horizontalspannungsverläufe entlang der Messlinien sind in Abbildung 35 bis Abbildung 40 dargestellt. Die wichtigsten Punkte und Erkenntnisse aus diesen sind im Folgenden zusammengefasst. Für die Beurteilung der Ergebnisse sind auch die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen

zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte zu berücksichtigen.

- In den Firsten beziehungsweise Sohlen bilden sich die Horizontalspannungsumlagerungen in X- und Z-Richtung gleich aus. Dabei ist die Umgebung des Hohlraumrands entspannt. Mit zunehmender Entfernung steigen die Horizontalspannungen jedoch über das primäre Spannungsniveau an.
- Abhängig von der Richtung der Horizontalspannungen gibt es am Kammerulm entweder einen starken Spannungsanstieg (Tangente am Kammerulm in Richtung der jeweiligen Horizontalspannungen) oder eine deutliche Entspannung (Tangente am Kammerulm gegen die Richtung der jeweiligen Horizontalspannungen). Allerdings tritt ein hoher Spannungsgradient auf, wodurch nur ein Bereich von in etwa $0,5 \cdot d$ betroffen ist.
- Für langgestreckte Kammern lagern sich die Horizontalspannungen bezogen auf den Durchmesser für unterschiedliche Geometrien beinahe gleich um. Die absolute Erstreckung der Spannungsumlagerungen ist jedoch für größere Durchmesser größer.
- Die Horizontalspannungsumlagerungen für gedrungene Kammern unterscheiden sich aufgrund des Randeinflusses der Firsten und Sohlen von jenen für gestreckte Kammern.

Schubspannungen

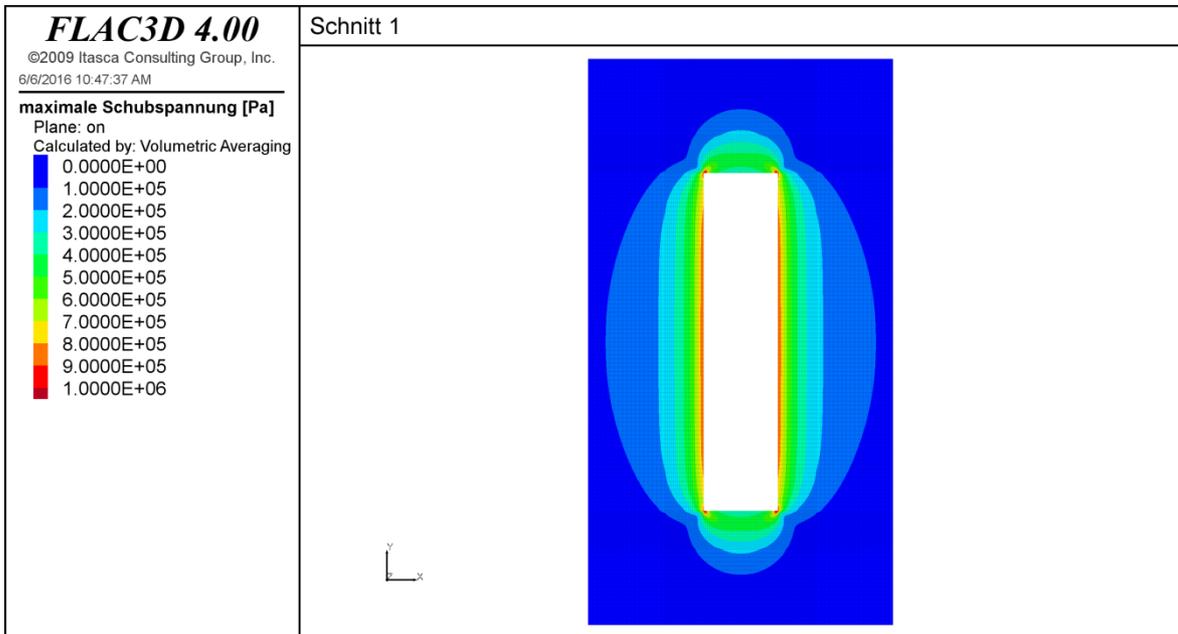


Abbildung 41: Schubspannungsverteilung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 1

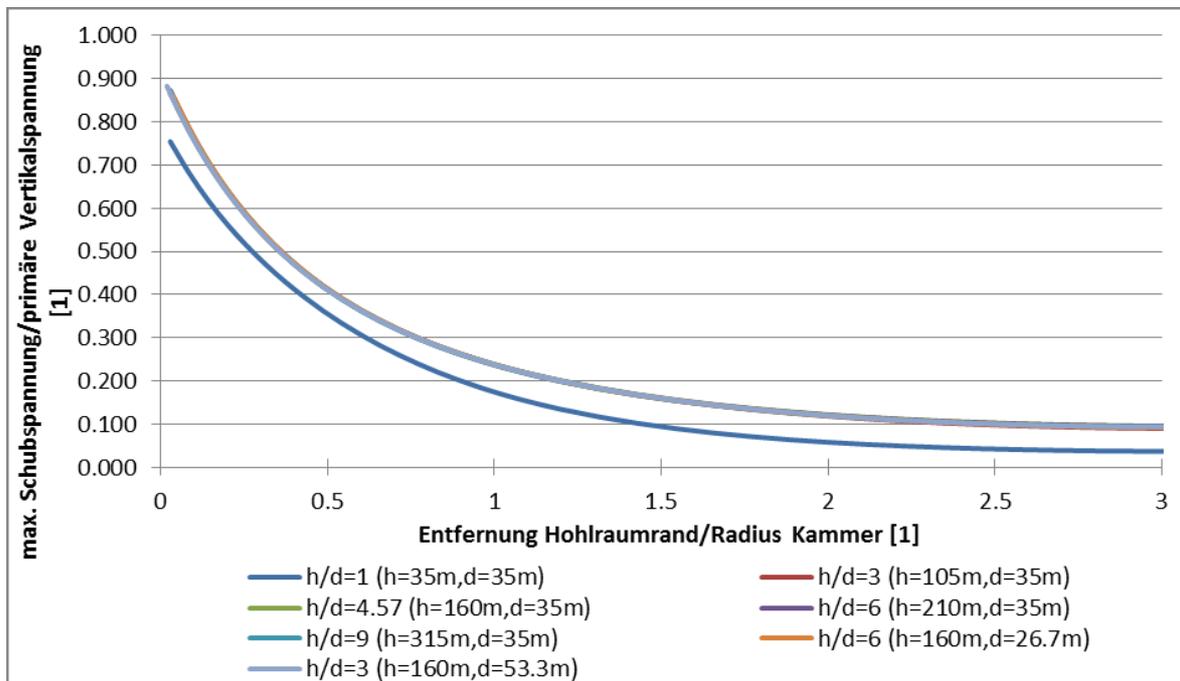


Abbildung 42: Schubspannungsverläufe entlang von Messlinie 1

Abbildung 41 und Abbildung 42 stellen eine Schubspannungsverteilung im Schnitt 1 beziehungsweise die Schubspannungsverläufe entlang von Messlinie 1 dar.

Daraus ist ersichtlich, dass die Schubspannungen vorwiegend an den Kammerulmen auftreten. Diese werden hauptsächlich durch die Spannungsumlagerungen der Horizontalspannungen hervorgerufen. Die Schubspannungen, die in den Firsten auftreten, sind deutlich geringer. Für langgestreckte Kammern bilden sich die Schubspannungen bezogen auf den Durchmesser der Kammer annähernd gleich aus.

Die Analyse der Spannungsumlagerungen um eine isolierte Kammer zeigt Ähnlichkeiten mit jener um den Querschnitt eines unendlich langen kreisförmigen Tunnels auf. Die analytisch ermittelten Kirsch-Gleichungen beschreiben die Spannungsumlagerungen in der Umgebung eines kreisförmigen unendlich langen Hohlraums; vergleiche Abbildung 43. (Brady und Brown 2004)

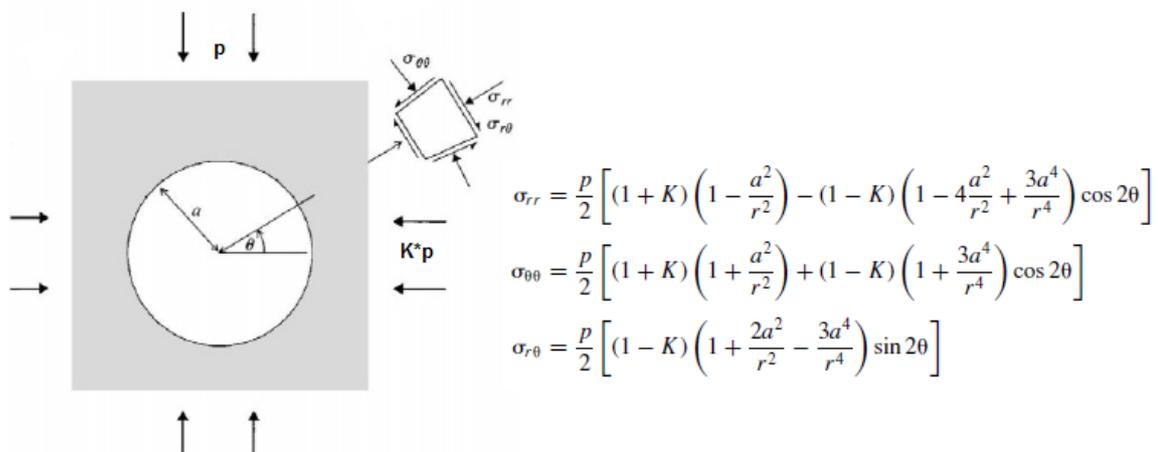


Abbildung 43: Zusammenhang zwischen den Spannungsumlagerungen um einen unendlich langen kreisförmigen Tunnel und dem primären Spannungsverhältnis (vgl. Brady und Brown 2004)

Aus Abbildung 43 ist zu erkennen, dass die Spannungsumlagerungen um einen horizontalen Tunnel von der primären vertikalen Spannung (p), dem Verhältnis der primären Horizontal- zu Vertikalspannungen (K) sowie der Lage des betrachteten Punkts in Bezug auf den Tunnel abhängen (a , r , θ). Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Gebirgsparameter (E-Modul) und der Radius des Hohlraums die Höhe der Spannungsumlagerungen nicht beeinflussen. Bei größeren Durchmessern wird jedoch die Ausdehnung der Zonen, in denen sich die Spannungen verändern, entsprechend größer.

Die Anwendung der Kirsch-Gleichungen an die Raise-mining Kammern ist in Abbildung 44 dargestellt. Da die Kammern vertikal sind, entsprechen die primären Spannungen jeweils den primären Horizontalspannungen in X- beziehungsweise Z-Richtung; p ist demnach die Horizontalspannung in X-Richtung und K ist das Verhältnis der primären Horizontalspannung in Z-Richtung zur primären Horizontalspannung in X-Richtung. Betrachtet man den Verlauf der Spannungen entlang der Messlinie 1A so entsprechen die Tangentialspannungen $\sigma_{\theta\theta}$ den resultierenden Horizontalspannungen in Z-Richtung und die Radialspannungen σ_{rr} den resultierenden Horizontalspannungen in X-Richtung. Die Messlinie 1A hat zudem die gleiche Position wie die Messlinie 1 bei der Analyse der Auswirkungen der Geometrie auf die Spannungsumlagerungen; vergleiche Abbildung 28. Der Vergleich der normalisierten Horizontalspannungsverläufe entlang dieser Messlinie für die Kirsch-Gleichungen und einer Kammer mit einer Höhe von 160m und einem Durchmesser von 35m ($h/d=4,57$) ist in Abbildung 45 dargestellt. Diese Geometrie ist dabei repräsentativ für die weiteren langgestreckten Kammern; zu Beginn dieses Abschnitts ist gezeigt worden, dass sich die Spannungsumlagerungen bezogen auf den Durchmesser der Kammer bei langgestreckten Kammern lediglich geringfügig unterscheiden. Es kann festgehalten werden, dass die Kirsch-Gleichungen die Charakteristika der Umlagerung der Horizontalspannungen in der Umgebung einer langgestreckten Raise-mining Kammer adäquat beschreiben, die Spannungen jedoch im Allgemeinen überschätzen. Diese Überschätzung resultiert aus dem Umstand, dass die Kirsch-Gleichungen den zweidimensionalen Fall (unendlich lange Kammer) betrachten und aus diesem Grund keine Spannungen in die Auflager der First- und Sohlbereiche umgelagert werden können. Diese Umlagerung bedingt die niedrigeren Spannungen im dreidimensionalen numerischen Modell. Dennoch stellen die Kirsch-Gleichungen eine gute Möglichkeit dar, um die Horizontalspannungen in der Umgebung von langgestreckten Raise-mining Kammern abzuschätzen. Ausgenommen davon sind die First- und Sohlbereiche, weil in diesen die Auflagerwirkung der Firsten und Sohlen stark zum Tragen kommt und diese die Spannungsverteilungen dementsprechend beeinflusst.

Für gedrungene Kammern liefern die Kirsch-Gleichungen keine vergleichbaren Ergebnisse, weil die Auflagerwirkung der Firsten und Sohlen über die gesamte Höhe der Kammer präsent ist.

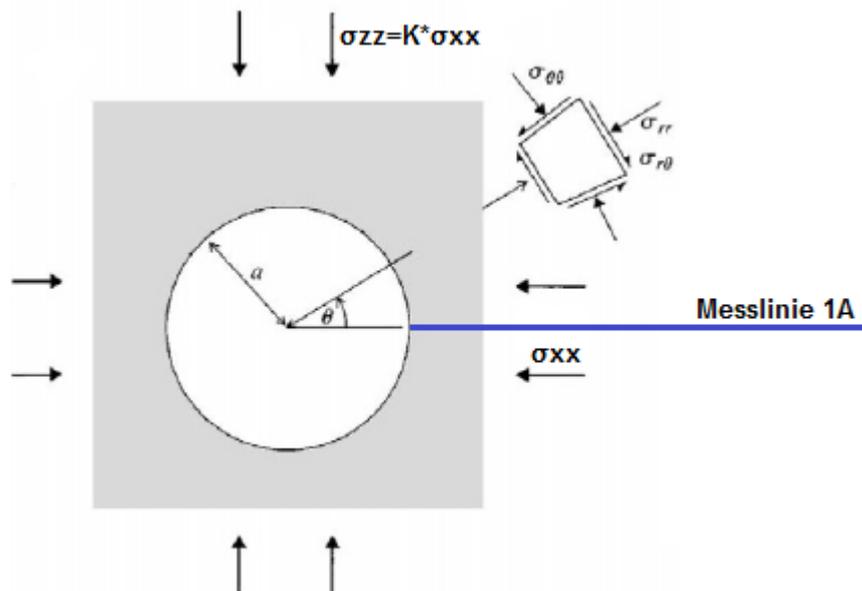


Abbildung 44: Eingangsparemeter für Kirsch-Gleichungen für die betrachteten Raise-mining Kammern (vgl. Brady und Brown 2004)

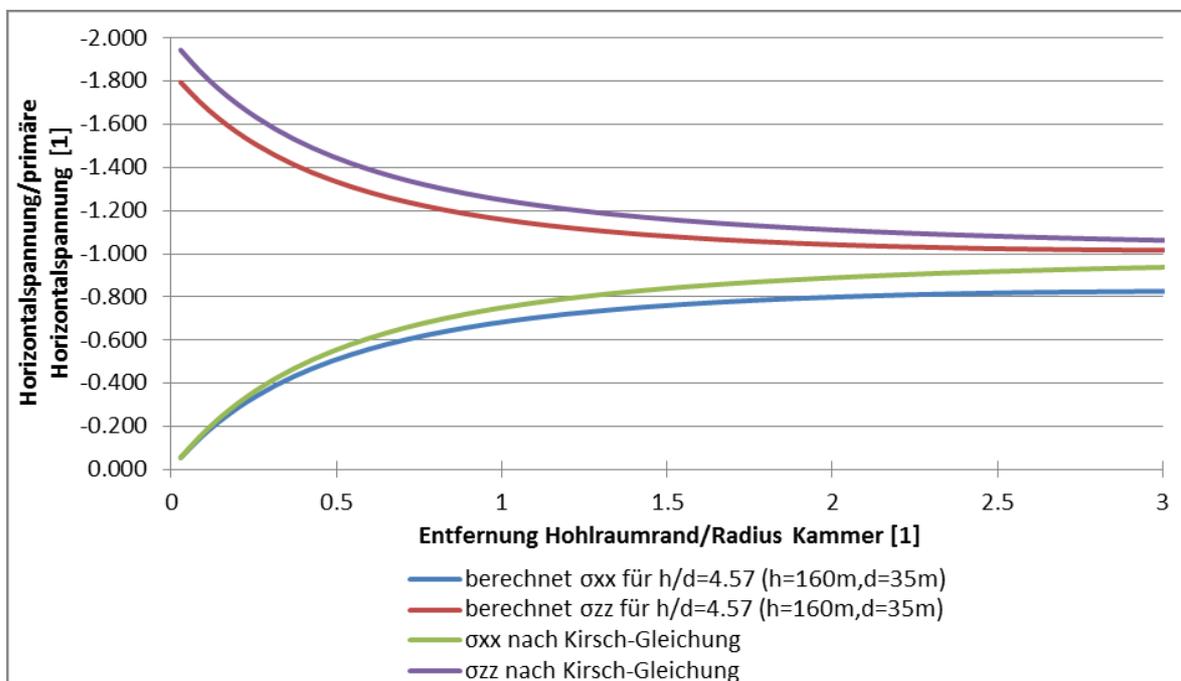


Abbildung 45: Vergleich der Horizontalspannungsverläufe aus der numerischen Simulation mit jenen, die sich aus den Kirsch-Gleichungen ergeben

5.2.1.2 Ausbildung der Kammerfirse beziehungsweise Sohle

Die Untersuchungen im vorhergehenden Abschnitt haben gezeigt, dass es bei horizontalen Firten und Sohlen zur Ausbildung von großräumigen entspannten Zonen kommt, in welchen auch Zugspannungen auftreten können. Durch die Entspannung ist in den Firten ein Abgleiten von Blöcken entlang bestehender Trennflächen möglich. Dies ist einerseits ein Sicherheitsrisiko im Raise und in der Fördersohle, kann aber auch die Bohr- und Sprengbarkeit der Firte negativ beeinflussen. Durch eine geneigte Ausführung der Firte können die druckentspannten Zonen verkleinert werden. In den Sohlen stellen die entspannten Bereiche an sich keine Problemzonen dar, so lange keine Brucherscheinungen aufgrund der Zugspannungen auftreten. Dennoch muss die Sohle auch geneigt ausgeführt werden, damit das gebrochene Gestein aus der Kammer abgezogen werden kann. Da aus gebirgsmechanischer Sicht die Firte als kritischer einzustufen ist, wird in diesem Abschnitt nur die Auswirkung von unterschiedlichen Firtnegungen untersucht und keine Untersuchungen betreffend die Sohlneigung angestellt. Prinzipiell soll die Sohlneigung zumindest so groß gewählt werden, dass das gebrochene Material hinunterfließen kann. Dazu muss der Sohlneigungswinkel größer als der Reibungswinkel des gesprengten Gesteins sein, wobei dieser im Allgemeinen in etwa 45° bis 55° beträgt.

Für die Analyse der Auswirkung der Firtnegung wird die Kammergeometrie des Bergbaus Gummern herangezogen (Höhe 160m, Durchmesser 35m, $h/d=4,57$), wobei insgesamt drei verschiedene Neigungen untersucht werden; vergleiche Tabelle 9. Die geneigten Firten verändern allerdings nicht die Kammerhöhe, sondern nur die Höhe der Kammerulmen. Des Weiteren wird das Raise-Bohrloch simuliert, um den Übergang zwischen den geneigten Firten und dem Raise zu untersuchen. Der Durchmesser des Raise beträgt 4m.

| Neigung [°] | Verringerung der Höhe der Kammerulme [m] |
|-------------|--|
| 20 | 5,6 |
| 30 | 8,9 |
| 40 | 13,0 |

Tabelle 9: Zeigt die Reduktion der Höhe des Kammerulms für verschiedene Firstneigungen bei einem Kammerdurchmesser von 35m und einem Raise-Durchmesser von 4m.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen, wobei die Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen im Schnitt 1 (vergleiche Abbildung 46) betrachtet werden. Im Gegensatz zur Variation der Geometrie werden keine Spannungsverläufe analysiert. Bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse sind zudem, die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ genannten Punkte zu berücksichtigen.

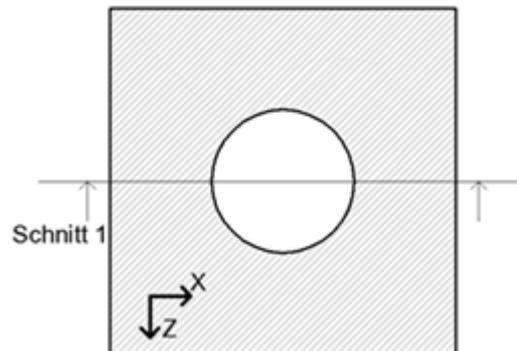


Abbildung 46: Lage von Schnitt 1

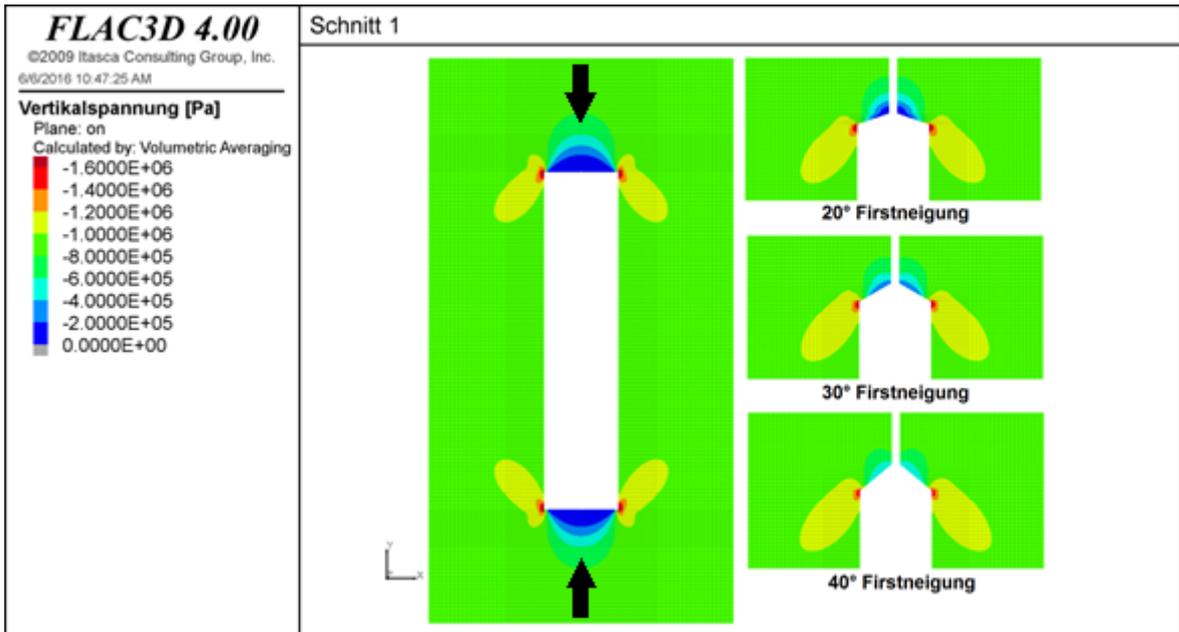


Abbildung 47: Vertikalspannungen für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, $h/d=4,57$

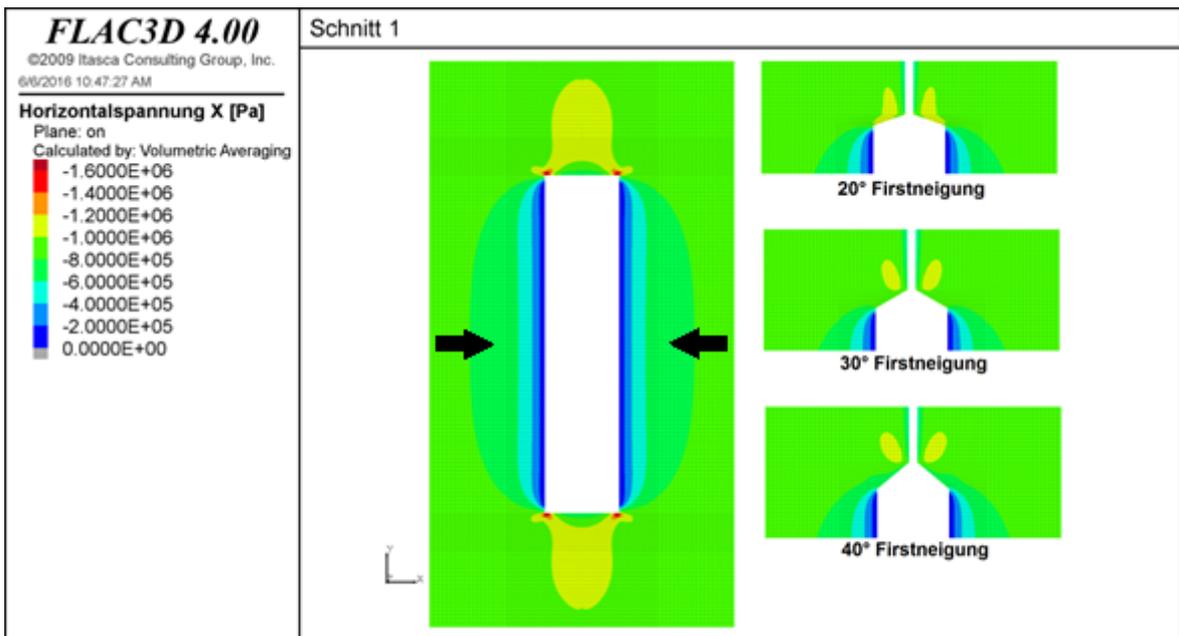


Abbildung 48: Horizontalspannungen in X-Richtung für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, $h/d=4,57$

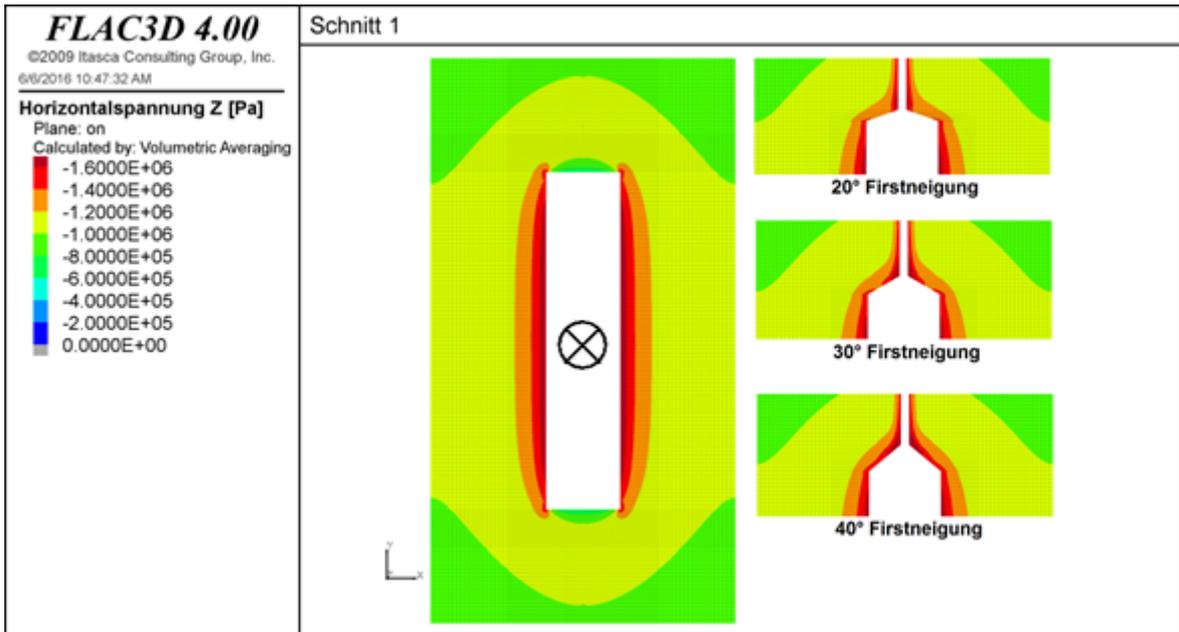


Abbildung 49: Horizontalspannungen in Z-Richtung für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, $h/d=4,57$

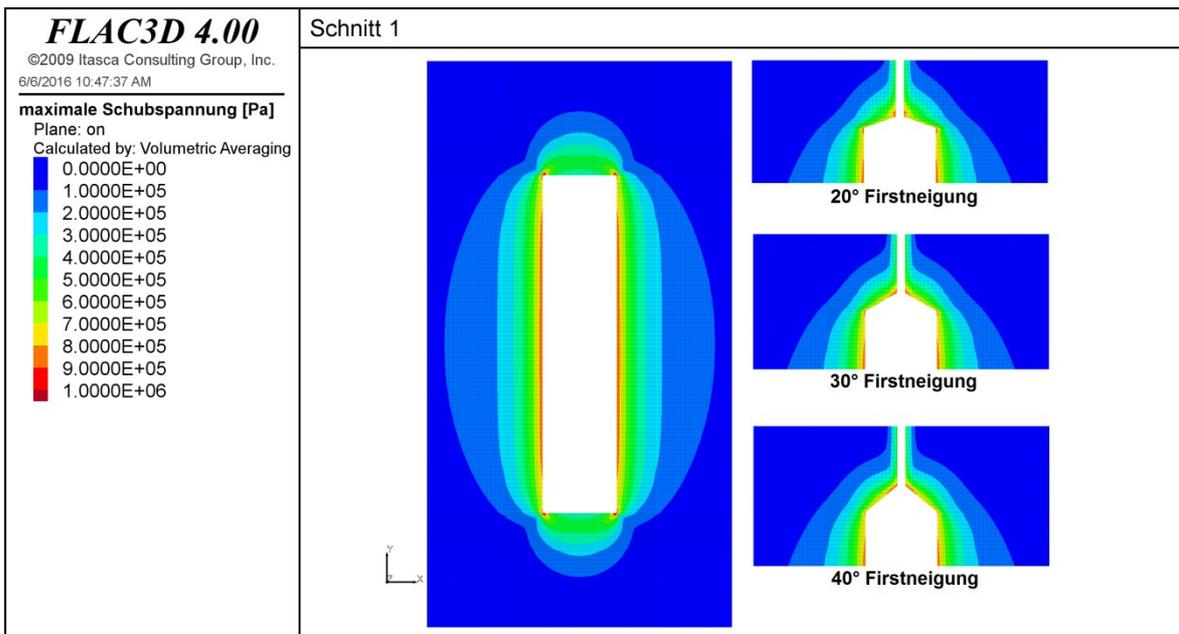


Abbildung 50: Schubspannungen für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, $h/d=4,57$

Abbildung 47 bis Abbildung 50 stellen die farbkodierten Spannungsverteilungen bei den untersuchten Firstneigungen dar. Im Folgenden sind die wesentlichen Punkte zusammengefasst.

- Eine geneigte Firste beeinflusst die Spannungsverteilungen nur lokal im

Firstbereich und hat keinen Einfluss auf die großräumigen Spannungsumlagerungen.

- Bei den Vertikalspannungen kommt es zu einer deutlichen Verringerung der druckentspannten Bereiche bei zunehmenden Firstneigungen. Dabei ist das Ausmaß der Spannungsverringern auch deutlich geringer ausgeprägt.
- Bei den Horizontalspannungen steigen die Spannungen abhängig von der Richtung der primären Horizontalspannungen bei zunehmenden Firstneigungen entweder deutlich an oder verringern sich geringfügig.
- Die Schubspannungen steigen mit zunehmenden Firstneigungen signifikant an.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine geneigte Firste die Spannungssituation im Allgemeinen günstig beeinflusst. Einerseits verkleinern sich die druckentspannten Bereiche und andererseits steigen die Horizontalspannungen an. Dadurch wird die Einspannung von rutschgefährdeten Blöcken erhöht, wodurch sich wiederum die Stabilität der Firste verbessert. Wird die Neigung jedoch zu groß (größer $30-40^\circ$) so steigen vor allem die Horizontalspannungen aber auch die Schubspannungen deutlich an, wodurch ein Bruch des Gebirges in der Firste nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Dieser wird zunächst am Übergang zwischen Firste und Raise sichtbar.

5.2.2 Primäre Spannungszustand

5.2.2.1 Tiefe Kammern

In diesem Abschnitt wird betrachtet, wie sich eine Veränderung des primären Spannungszustands auf die Spannungsumlagerung in der Umgebung einer tiefen Kammer auswirkt. Dabei wird angenommen, dass die primären Vertikal- und Horizontalspannungen Hauptnormalspannungen sind. In der Nähe der Tagesoberfläche und in der Umgebung von Störzonen ist jedoch mit einer deutlich

anderen Ausrichtung der Hauptnormalspannungen zu rechnen.

Brady und Brown (2004) fassen die Ergebnisse von zahlreichen Messungen des primären Spannungszustands in Bergwerken zusammen, vergleiche Abbildung 51. Daraus ist erkennbar, dass die primären Vertikalspannungen annähernd linear mit der Tiefe zunehmen. Das Verhältnis der primären Horizontal- zu Vertikalspannungen variiert im Wesentlichen zwischen 0,5 und 3. Dabei ist es in geringeren Teufen im Allgemeinen größer als 1, sinkt in größeren Teufen allerdings ab und ist dann zumeist um beziehungsweise kleiner als 1.

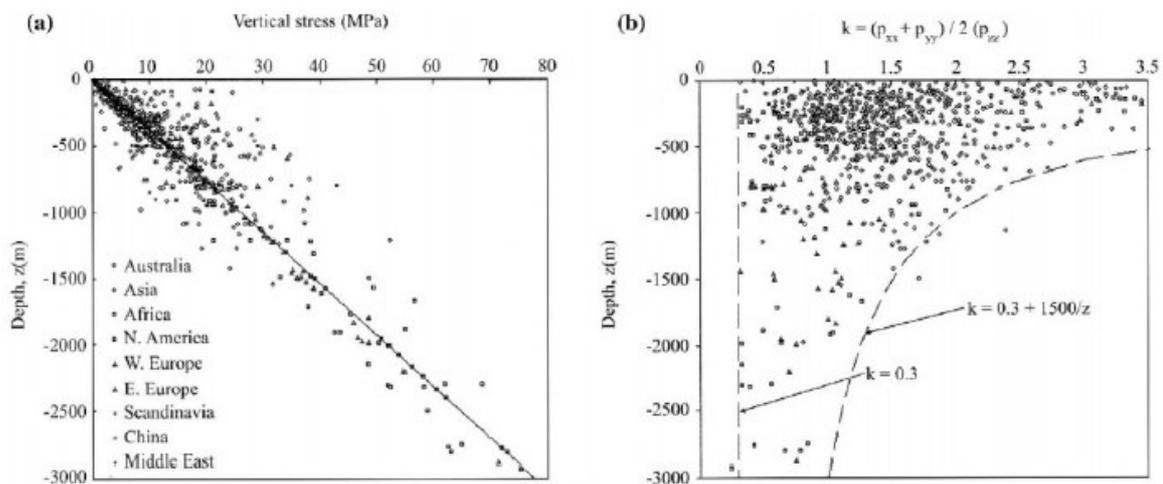


Abbildung 51: Zusammenhang zwischen den primären Spannungen und der Tiefe (Brady und Brown 2004)

Aus Abbildung 51 ist auch ersichtlich, dass die bisherige Annahme von $k=1$ für die allgemeinen Untersuchungen des Raise-mining herangezogen werden kann, weil dieser Spannungszustand sowohl in geringeren als auch größeren Teufen häufig auftritt. Dennoch ist aus Abbildung 51 auch ersichtlich, dass vor allem in geringeren Teufen das Verhältnis der primären Vertikal- zu Horizontalspannungen über einen breiten Bereich variiert. Da im vorhergehenden Abschnitt „5.2.1 Kammergeometrie“ gezeigt worden ist, dass die Spannungsverteilungen in der Umgebung der Kammerulme durch die Kirsch-Gleichungen abgeschätzt werden können, können diese für eine erste Beurteilung eines veränderten primären Spannungszustands herangezogen werden. Aus diesem Grund werden keine Simulationen zu einem veränderten primären Spannungszustand für tiefe Kammern gemacht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Kirsch-Gleichungen

die Spannungen im Allgemeinen überschätzen, weil diese von einer unendlich langen Kammer ausgehen und daher die Auflager der Firsten und Sohlen nicht berücksichtigen. Des Weiteren sei festgehalten, dass die Kirsch-Gleichungen die Spannungssituation in den Firsten und Sohlen sowie an jenen Teilen der Kammerulme, die im Einflussbereich der Firsten und Sohlen liegen, nicht beschreiben. Die Spannungsumlagerungen in diesen Bereichen müssen daher mit anderen Methoden, beispielsweise einer numerischen Simulation, ermittelt werden. Bei den primären Spannungen muss zudem berücksichtigt werden, dass diese im Allgemeinen aufgrund der Gewichtskraft des Gebirges mit der Teufe zunehmen. Da die Kammern beim Raise-mining Abbaufahren üblicherweise relativ hoch sind, muss dieser Umstand bei der Beurteilung der Standfestigkeit einer Kammer einfließen.

Unter Umständen kann es bei unterschiedlich hohen primären Horizontalspannungen vorteilhaft sein, den kreisförmigen Querschnitt einer Kammer durch einen ellipsenförmigen Querschnitt zu ersetzen. Dies ist jedoch nicht Inhalt dieser Arbeit. Nähere Information dazu kann in Brady und Brown (2004) sowie Jaeger, Cook und Zimmerman (2007) gefunden werden.

5.2.2.2 Tagebaunahe Kammern

Da das Raise-mining Abbaufahren, wie im Falle von Gummern, verwendet werden kann, um Lagerstättenteile hinter der Endböschung eines Tagebaus zu gewinnen, wird in diesem Abschnitt untersucht, wie sich der Spannungszustand in der Umgebung einer Tagebauböschung auf eine Kammer auswirkt. In der Umgebung von Böschungen sind die primären Hauptnormalspannungen geneigt. Dabei verlaufen die erste und zweite Hauptnormalspannung parallel zur Böschung und die dritte steht normal auf diese; vergleiche Abbildung 52. Aufgrund der Oberflächennähe ist die dritte Hauptnormalspannung üblicherweise deutlich kleiner als die beiden anderen.

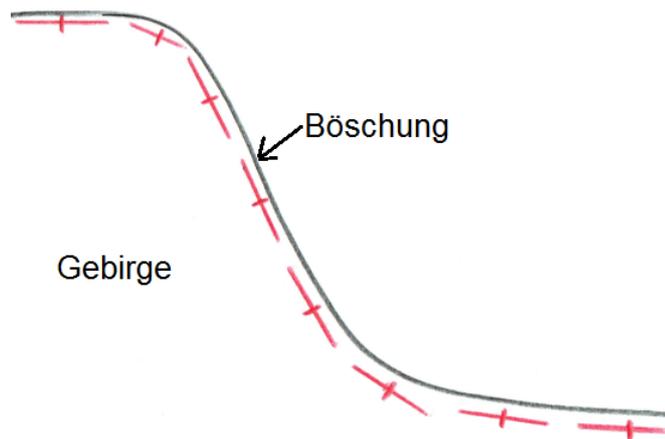


Abbildung 52: Schematische Darstellung des Verlaufs der größten und kleinsten Hauptnormalspannung unmittelbar hinter einer Tagebauböschung. Die größte Hauptnormalspannung verläuft parallel zur Böschung und die kleinste steht normal auf diese.

Um die Auswirkung eines nahen Tagebaus zu analysieren, ist eine numerische Simulation einer Kammer mit einer Höhe von 160m und einem Durchmesser von 35m ($h/d=4,57$) durchgeführt worden. Die Neigung der Böschung wird mit 45° angenommen. Die primäre erste Hauptnormalspannung (σ_1) beträgt 1MPa und ist um 45° aus der Horizontalen geneigt. Die primäre zweite Hauptnormalspannung (σ_2) verläuft horizontal und beträgt ebenso 1MPa. Die dritte primäre Hauptnormalspannung (σ_3) beträgt 0,2MPa und steht normal auf die erste und zweite Hauptnormalspannung. Abbildung 53 stellt den primären Spannungszustand dar. Nähere Information betreffend der Eingangsparameter und der Vorgangsweise der numerischen Simulation befindet sich im Abschnitt „5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen“.

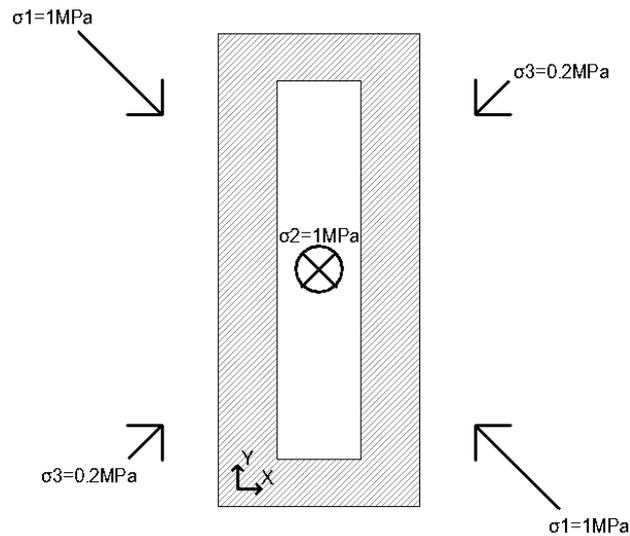


Abbildung 53: Primärer Spannungszustand zur Simulation einer tagebaunahen Kammer

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen (Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen) in den Schnitten 1 und 2 (Abbildung 55 bis Abbildung 58). Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 54 ersichtlich. Im Gegensatz zur Variation der Geometrie werden keine Spannungsverläufe analysiert. Für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse sind die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte zu berücksichtigen.

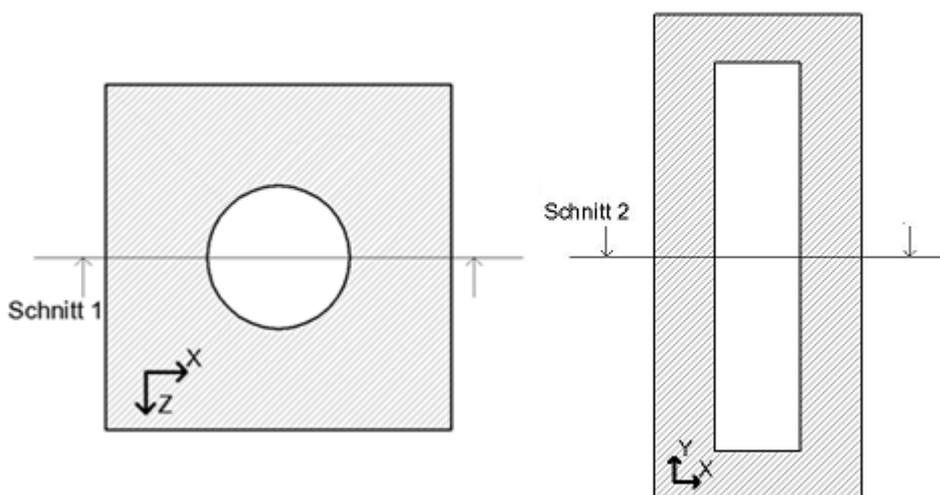


Abbildung 54: Lage der Schnitte 1 und 2

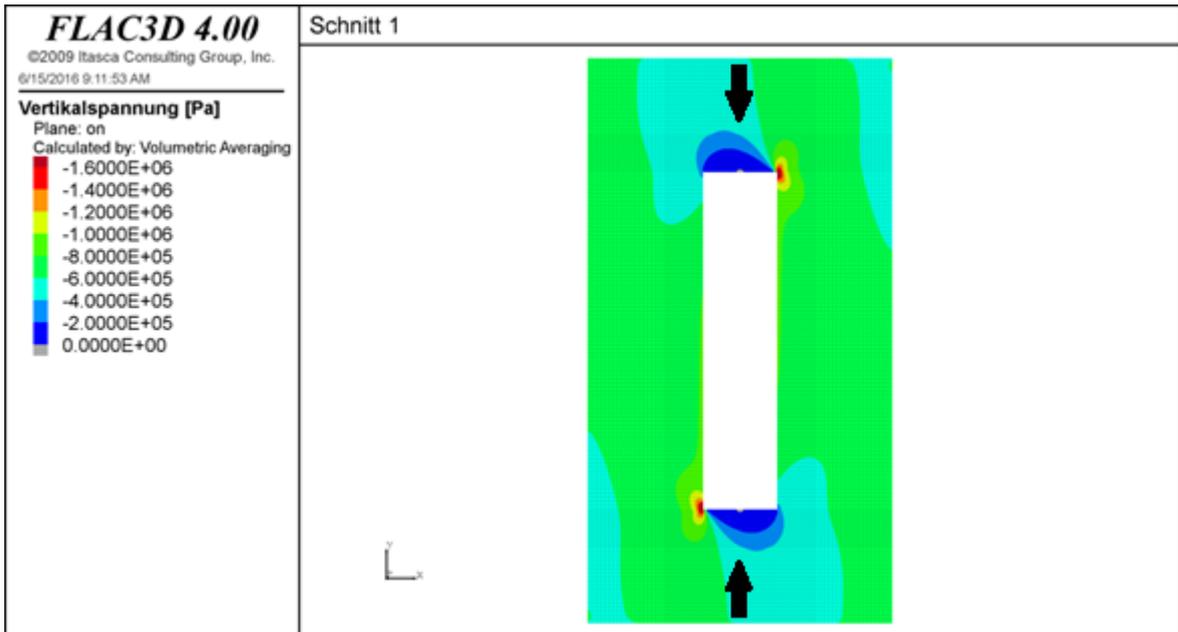


Abbildung 55: Vertikalspannungen in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, ($h/d=4,57$); Die Richtung der Pfeile entspricht in diesem Fall nicht der Richtung der primären Spannung, sondern zeigt die Richtung der ausgewerteten Spannung an.

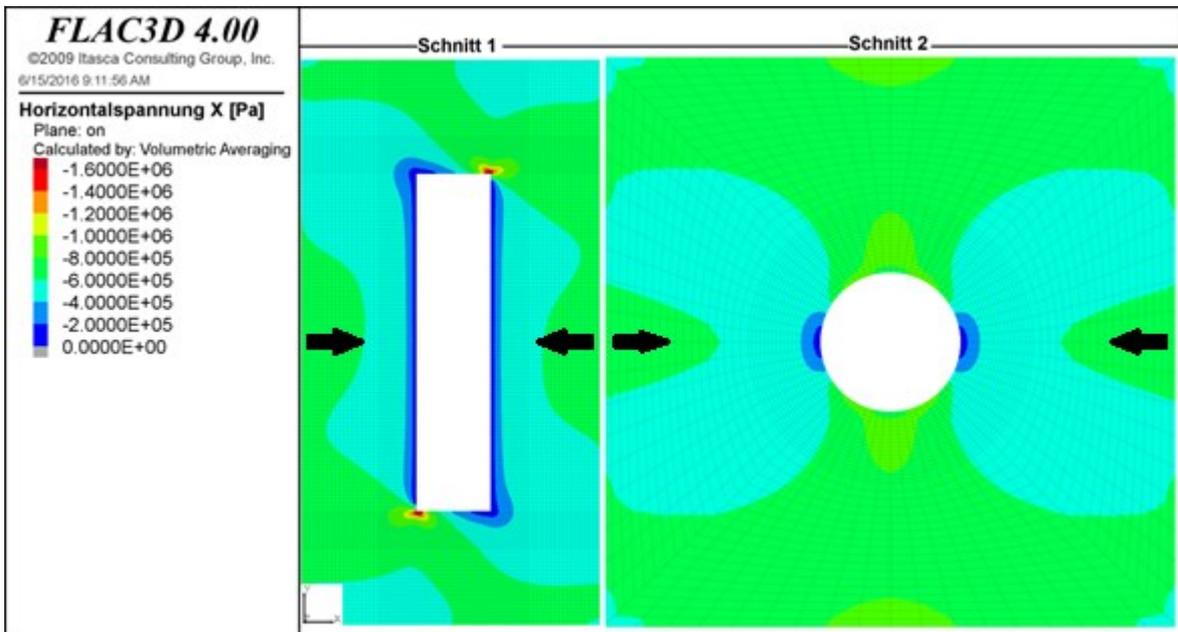


Abbildung 56: Horizontalspannungen in X-Richtung in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, ($h/d=4,57$); Die Richtung der Pfeile entspricht in diesem Fall nicht der Richtung der primären Spannung, sondern zeigt die Richtung der ausgewerteten Spannung an.

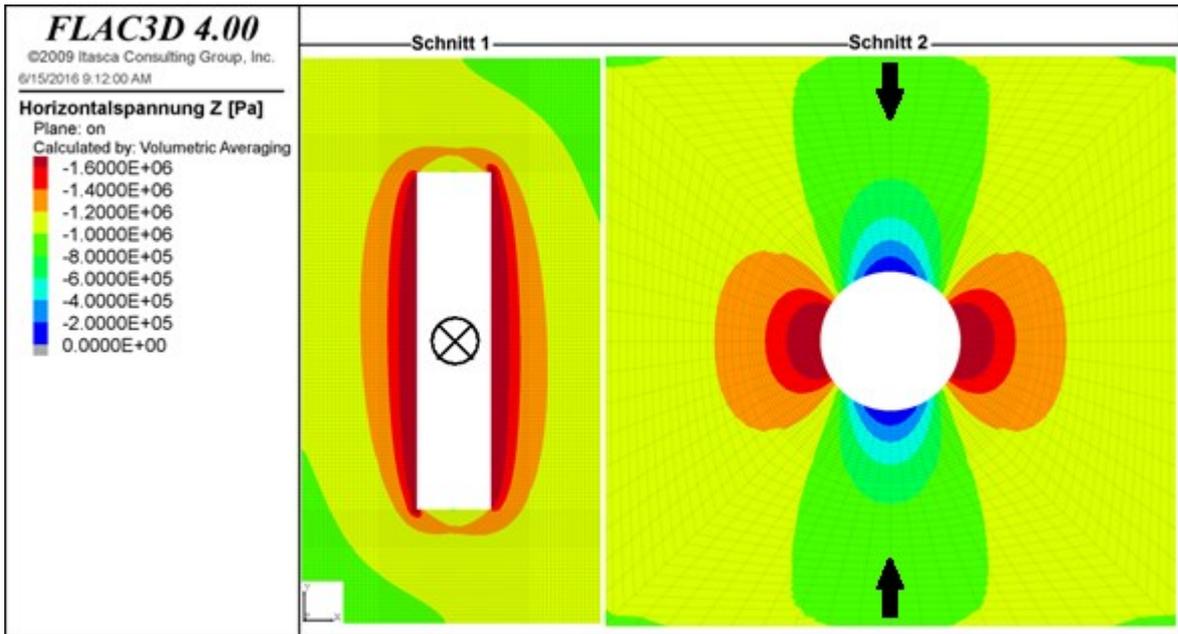


Abbildung 57: Horizontalspannungen in Z-Richtung in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, (h/d=4,57)

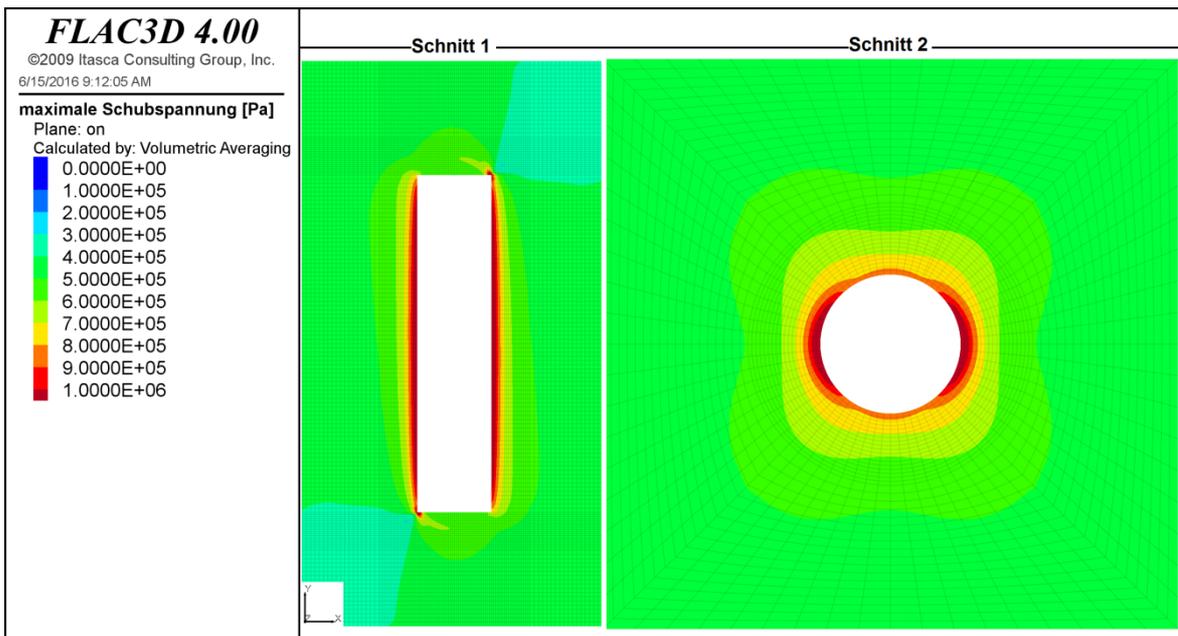


Abbildung 58: Schubspannungen in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, (h/d=4,57)

Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die wesentlichen Charakteristika der Spannungsverteilungen für tagebaunahe Kammern vergleichbar mit jenen von tieferliegenden Kammern sind. Aus diesem Grund wird auf eine nähere Beschreibung der einzelnen Verteilungen verzichtet. Allerdings lagern sich die Spannungen aufgrund der geneigten primären Hauptnormalspannungen

asymmetrisch um. Die Vertikalspannungen sind dabei niedriger als im Falle einer tiefen Kammer und die Horizontal- und Schubspannungen bilden sich ähnlich aus, wie bei einem unterschiedlichen Verhältnis der beiden Horizontalspannungen zueinander; vergleiche die Kirsch-Gleichungen in Abbildung 43. Die Ursachen für die angeführten Effekte liegen in der Richtung und Stärke der Hauptnormalspannungen. Auf Grund der unterschiedlichen Höhe der Primärspannungen sind die maximale Tangential- und maximale Schubspannung in den Ulmen der Kammer daher signifikant höher als im Falle einer horizontalen Tagesoberfläche mit vertikalen und horizontalen Primärspannungen.

5.2.3 Gebirgsstruktur

5.2.3.1 ausgeprägte Trennflächen in eine Richtung

In einer Vielzahl von Fällen treten Trennflächen im Gebirge bevorzugt in einer Richtung auf, wobei Trennflächen in andere Richtungen selten vorkommen. Diese ausgeprägten Trennflächen in einer Richtung können beispielsweise durch die Bildung des Gebirges oder durch eine spätere tektonische Beanspruchung hervorgerufen werden. Eine solche ausgeprägte Trennflächenrichtung ist zum Beispiel die Schichtung eines Sedimentgesteins, die Trennflächen in einer Falte oder ein ausgeprägtes Kluftsystem. In diesem Abschnitt wird analysiert, wie sich ein solches ausgeprägtes Trennflächensystem auf die Standfestigkeit einer isolierten Kammer auswirkt und wie diese bei der weiteren Auslegung eines Abbaufelds zu berücksichtigen ist. Dieses Trennflächensystem wird geologisch durch das Streichen und Fallen beschrieben; vergleiche Abbildung 59. Das Streichen ist der Winkel zwischen der Schnittgerade einer Trennfläche mit der Horizontalen und der Nordrichtung. Das Fallen ist die Neigung der Trennfläche aus der Horizontalen nach unten.

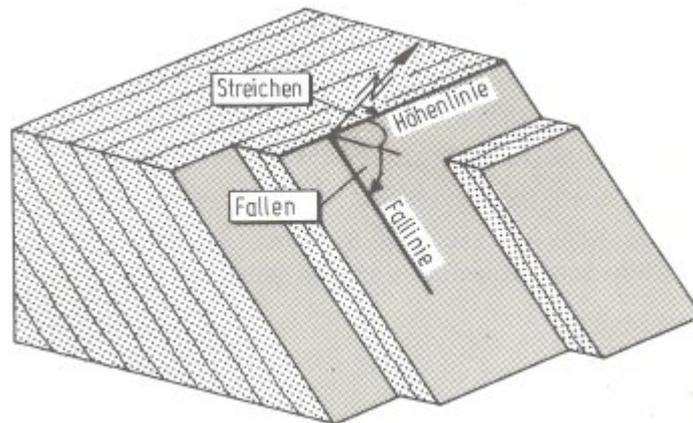


Abbildung 59: Streichen und Fallen (Wittke 1984)

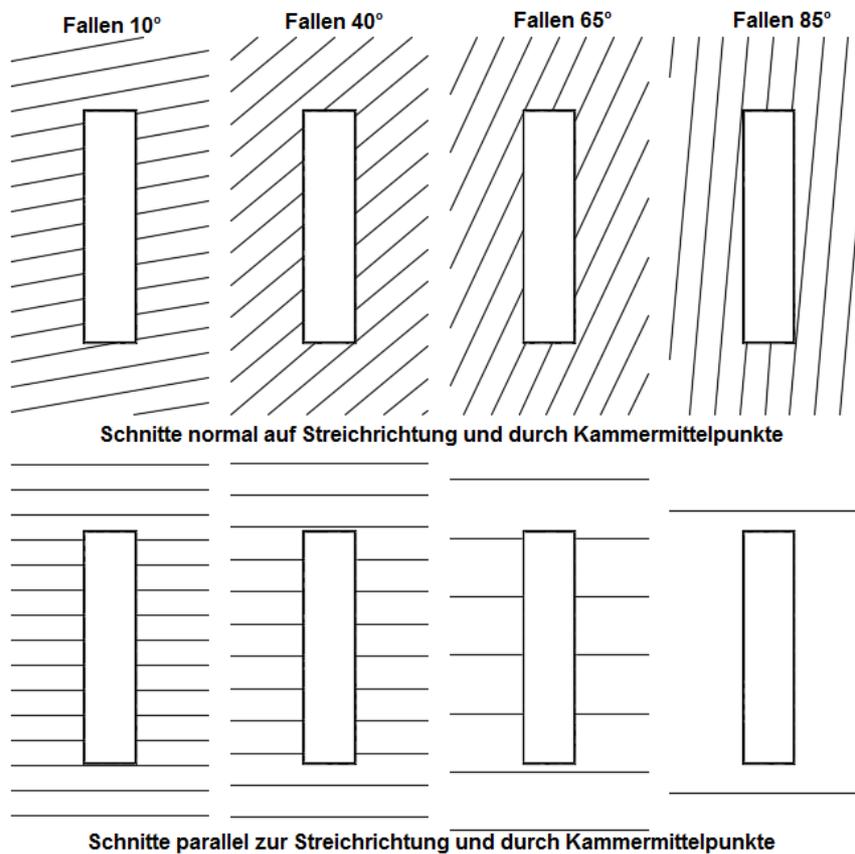


Abbildung 60: Streichen und Fallen eines ausgeprägten Trennflächensystems in Bezug auf die Kammer

Abbildung 60 zeigt einen Schnitt durch eine Kammer, der normal auf das Streichen steht, sowie einen weiteren Schnitt, der parallel zum Streichen ist. Die Schnitte verlaufen jeweils durch den Kammermittelpunkt und es sind mehrere Fälle für unterschiedliches Fallen des Trennflächensystems abgebildet. Betrachtet

man die Schnitte, die normal auf das Streichen stehen, so ist erkennbar, dass ein Abrutschen von Gesteinsblöcken entlang der Trennflächen möglich ist. Diese Gesteinsblöcke werden durch die ausgeprägten Trennflächen sowie durch weitere Trennflächen, die das dominante Trennflächensystem durchschneiden, gebildet. Diese weiteren Trennflächen können beispielsweise von einem untergeordneten Kluftsystem stammen, durch die Sprengarbeit entstanden sein oder durch Gebirgsdruckerscheinungen hervorgerufen werden. Die Gesteinsblöcke werden abrutschen, wenn die rückhaltenden Kräfte kleiner als die treibenden Kräfte sind. Je steiler die Trennflächen sind, umso größer werden die treibenden Kräfte und umso kleiner werden die rückhaltenden Kräfte. Aus diesem Grund ist ein Abrutschen der Blöcke bei einem steilstehenden dominanten Trennflächensystem wahrscheinlicher. Des Weiteren haben die mechanischen Eigenschaften der Klüfte, der Bergwasserzustand und der Spannungszustand einen signifikanten Einfluss auf die rückhaltenden und treibenden Kräfte. Das Abgleiten beziehungsweise Ausbrechen von Gesteinsblöcken führt dazu, dass sich die Kammerulme weiter in das Gebirge hinein verlagern, vergleiche Abbildung 61. Daraus resultiert in weiterer Folge eine Veränderung des Kammerquerschnitts. Betrachtet man im Gegensatz dazu den Schnitt, der parallel zum Streichen ist, ist erkennbar, dass die Trennflächen unabhängig von deren Fallen die Kammerulme horizontal durchschneiden. Aus diesem Grund ist ein Abrutschen von Gesteinsblöcken in diesen Bereichen äußerst unwahrscheinlich. In den Bereichen zwischen diesen beiden extremen Fällen nimmt die Wahrscheinlichkeit des Abgleitens hin zum Kammerulm, dessen Tangente parallel zum Streichen verläuft, zu. Daraus folgt, dass ein dominantes Trennflächensystem im Falle von abrutschenden und ausbrechenden Blöcken den Kammerquerschnitt von einem Kreis zu einer Ellipse ändert; vergleiche Abbildung 61.

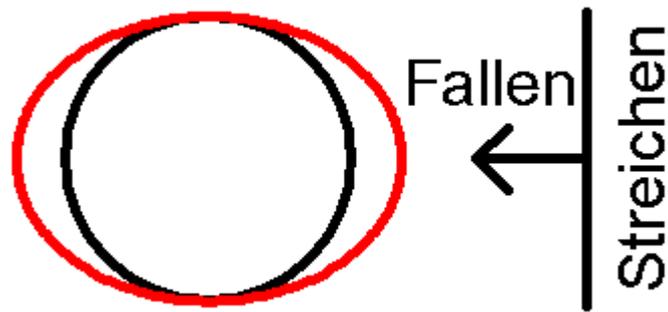


Abbildung 61: Darstellung der Veränderung von einem kreis- zu einem ellipsenförmigen Querschnitt aufgrund einer ausgeprägten Trennflächenrichtung.

Neben dem Streichen und Fallen der dominanten Trennflächen beeinflussen die Gebirgsstruktur nach dem Abbau der Kammer, der Spannungszustand, die Festigkeiten in den Trennflächen, der Bergwasserzustand und im Falle eines Ausbaus dessen aufgebrauchte Kräfte die rückhaltenden und treibenden Kräfte. Aus diesem Grund hängt das Ausmaß der Ellipsenbildung von vielen Parametern ab und kann daher nicht verallgemeinert werden. Aufgrund dessen werden in weiterer Folge nur die Auswirkungen einer Ellipsenbildung auf die Spannungsumlagerungen an Hand von analytischen Untersuchungen diskutiert. Dies ist möglich, weil im Abschnitt „5.2.1 Kammergeometrie“ bereits gezeigt worden ist, dass die analytischen Kirsch-Gleichungen den Spannungszustand in der Umgebung einer zylindrischen Kammer gut annähern. Brady und Brown (2004) beschreiben die Tangentialspannungen an den Ulmen in den Punkten A und B eines unendlich langen Hohlraums mit elliptischen Querschnitt; vergleiche Abbildung 62 und Gleichung 6 bis Gleichung 8. Für den vorliegenden Fall von vertikalen Kammern entsprechen die Tangentialspannungen den Horizontalspannungen am Ulm.

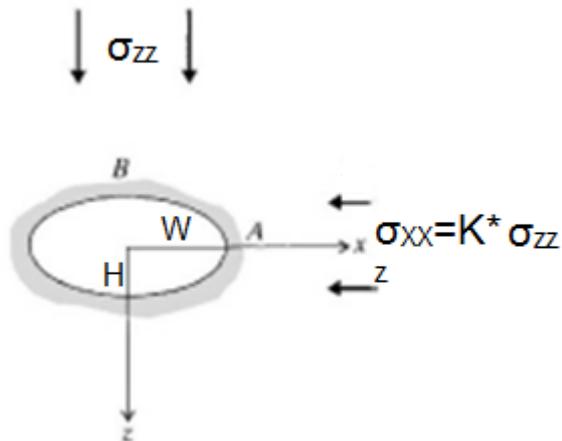


Abbildung 62: Darstellung der Begriffe für die Analyse des Ellipsenquerschnitts

$$\sigma_A = \sigma_{zz} * \left(1 - K + 2 * \frac{W}{H} \right)$$

Gleichung 6

$$\sigma_B = \sigma_{zz} * \left(K - 1 + 2 * \frac{K * H}{W} \right)$$

Gleichung 7

$$K = \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{zz}}$$

Gleichung 8

- σ_A ... Tangentialspannung im Punkt A [MPa]
- σ_B ... Tangentialspannung im Punkt B [MPa]
- σ_{zz} ... Primäre Horizontalspannung in Z-Richtung [MPa]
- K ... Verhältnis der primären Horizontalspannungen [1]
- W ... Kurze Halbachse der Ellipse [m]
- H ... Lange Halbachse der Ellipse [m]

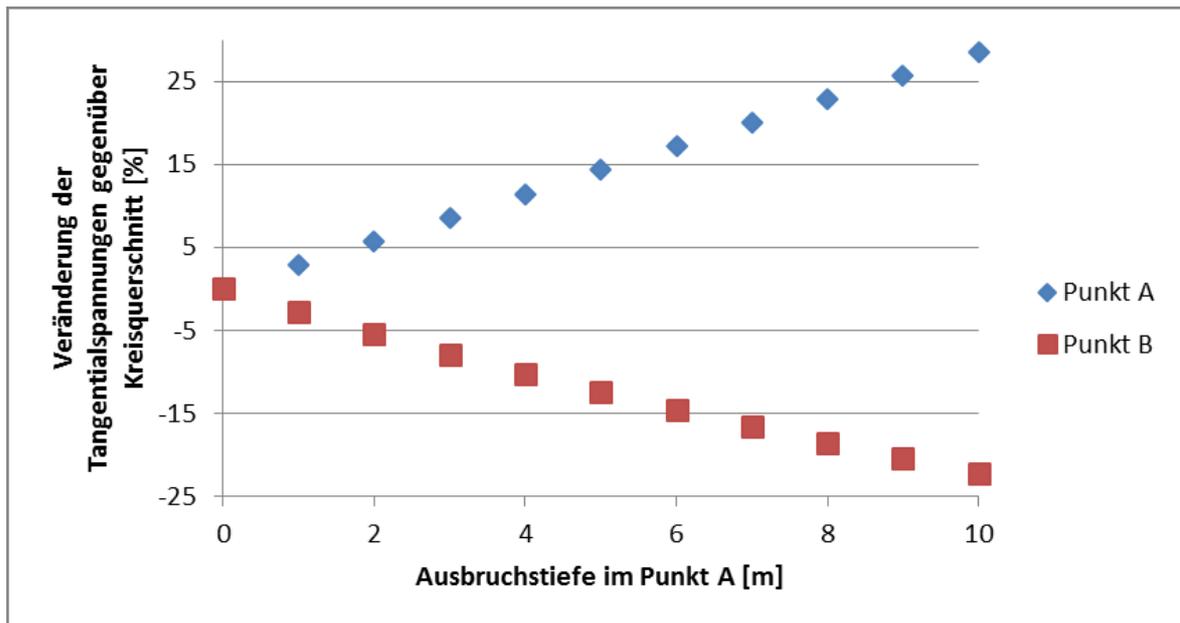


Abbildung 63: Prozentuelle Veränderung der Tangentialspannungen in den Punkten A und B eines ellipsenförmigen Querschnitts gegenüber den Tangentialspannungen eines kreisförmigen Querschnitts in denselben Punkten bei unterschiedlichen Ausbruchstiefen im Punkt A

Der Punkt A entspricht dabei jenem Punkt, an dem ein Abrutschen von Keilen aufgrund einer ausgeprägten Trennfläche am wahrscheinlichsten ist, und der Punkt B jenem Punkt, an dem ein Abrutschen von Keilen aufgrund der Geometrie nicht möglich ist. Durch die Ausbildung der Ellipse vergrößern sich die Tangentialspannungen im Punkt A und verringern sich im Punkt B. Fallen die Achsen der Ellipse mit den Richtungen der primären Horizontalspannungen zusammen, so entsprechen die Tangentialspannungen in den Punkten A beziehungsweise B den resultierenden Horizontalspannungen in Z-beziehungsweise X-Richtung. Für die weiteren Anmerkungen wird dieser idealisierte Fall angenommen. Des Weiteren wird angenommen, dass das Verhältnis der primären Horizontalspannungen zueinander 1 ist, das heißt, dass die primäre Horizontalspannung in X-Richtung jener primären in Z-Richtung entspricht. Abbildung 63 stellt die prozentuelle Veränderung der resultierenden Horizontalspannungen in den Punkten A und B einer Kammer (geplanter Kammerdurchmesser von 35m) bei unterschiedlich tiefen Ausbrüchen im Punkt A dar. Die Ausbrüche an den Ulmen haben unter den getroffenen Annahmen einerseits negative Auswirkungen auf die Stabilität der Kammer, weil sich die Spannungen im Punkt A signifikant erhöhen. Andererseits werden durch die

Ausbrüche die Festen zwischen den Kammern verkleinert, wodurch die Stabilität des gesamten Abbaufelds verringert wird; vergleiche Abbildung 64. Aufgrund dieser Umstände ist bei Auftreten einer solchen dominanten Trennflächenrichtung diese unbedingt in die Planung des Zuschnitts einzubeziehen.

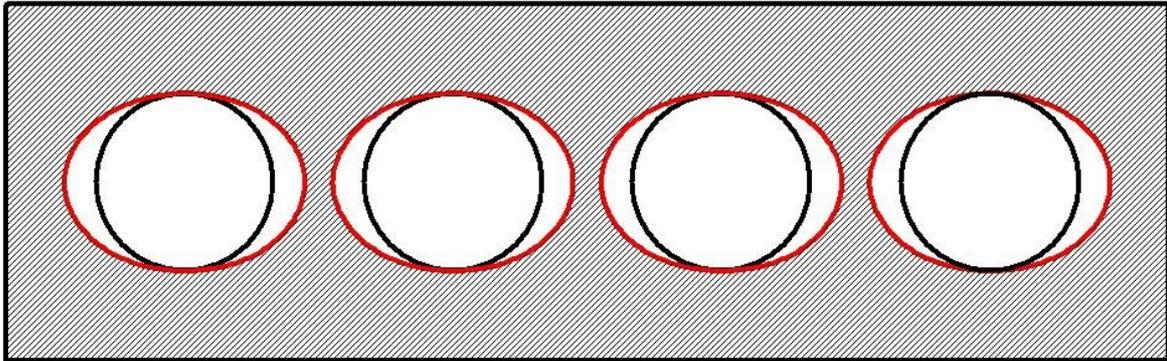


Abbildung 64: Die roten Ellipsen stellen die Kammerquerschnitte mit den Ausbrüchen und die schwarzen Kreise die Kammerquerschnitte ohne Ausbrüche dar. Es ist zu erkennen, dass sich der Festenquerschnitt durch die Ausbrüche stark verringern kann.

5.2.3.2 Einfluss der Gebirgsstruktur

Die Gebirgsstruktur beschreibt im Wesentlichen die Trennflächen im Gebirge, wobei in erster Linie deren Anzahl, Orientierung und Festigkeit berücksichtigt werden. Das Trennflächengefüge sowie dessen Zustand reduzieren die Festigkeit eines intakten Gesteins maßgeblich und haben daher einen entscheidenden Einfluss auf die Gebirgsfestigkeit. Dieser Einfluss wird üblicherweise mit unterschiedlichen Gebirgsklassifikationssystemen erfasst; häufig angewandt, werden die Systeme nach Barton (2002), Bieniawski (1989), Marinos und Hoek (2000) und Laubscher (1990). Das Ziel dieses Abschnitts ist es zu untersuchen, wie sich die Veränderung der Gebirgsstruktur im Allgemeinen auf die Standfestigkeit einer Kammer auswirkt. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt nicht die Standfestigkeit einer Kammer des Bergbaus Gummern nachgewiesen. Dies erfolgt im Abschnitt „5.2.6 Fallbeispiel: Einzelne Kammer in Gummern“.

Um den Einfluss der Gebirgsstruktur auf die Standfestigkeit einer Kammer zu

beurteilen, wird in dieser Arbeit die Beschreibung des Gebirges in Form des GSI-Werts nach Marinos und Hoek (2000) herangezogen. Dieser verwendet dazu einerseits die Anzahl und den Abstand der Trennflächen sowie den Zustand der Trennflächen und wird mittels dem in Abbildung 65 dargestellten Diagramm ermittelt. Mit Hilfe des GSI-Werts kann mit der Methode von Hoek und Brown (Hoek, Carranza-Torres und Corkum 2002) die Gebirgsfestigkeit ermittelt werden. Nähere Information zur Ermittlung der Gebirgsfestigkeit und zu den weiteren Eingangsparametern können im Abschnitt „3.2.4 Gebirgsparameter und Gebirgsfestigkeit“ gefunden werden.

| GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS | | SURFACE CONDITIONS | | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--|--|----|-----|-----|----|
| <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p> | | SURFACE CONDITIONS | | | | | | | | |
| | | VERY GOOD very rough, fresh unweathered surfaces | GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces | FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces | POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments | VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings | | | | |
| STRUCTURE | | DECREASING SURFACE QUALITY → | | | | | | | | |
| DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓ | | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
| | INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities | | | | | | | N/A | N/A | |
| | BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets | | | | | | | | | |
| | VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets | | | | | | | | | |
| | BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity | | | | | | | | | |
| | DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces | | | | | | | | | |
| | LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes | N/A | N/A | | | | | | | |

Abbildung 65: Tabelle für die Ermittlung des GSI-Werts (Marinos und Hoek 2000)

Die Auswirkung von unterschiedlichen Gebirgsstrukturen auf die Standfestigkeit einer Kammer wird in dieser Arbeit wie folgt ermittelt: Zunächst wird die linear-elastische Spannungsverteilung um eine isolierte Abbaukammer mit einer Höhe von 160m und einem Durchmesser von 35m ermittelt. Im Gegensatz zu den übrigen Berechnungen betragen die primären Vertikal- und Horizontalspannungen jeweils 10MPa. Anschließend werden die resultierenden Spannungen mit der nach Mohr-Coulomb berechneten Gebirgsfestigkeit verglichen. Diese wird dabei mit den Gebirgseigenschaften des Homogenbereichs 2 des Bergbaus Gummern (vergleiche Abschnitt „3.2 Gebirgsverhältnisse“) ermittelt, wobei der GSI-Wert wie folgt variiert wird:

1. GSI=85
2. GSI=65
3. GSI=45

Das Resultat dieses Vergleichs ist die Verteilung des Auslastungsgrads des Gebirges.

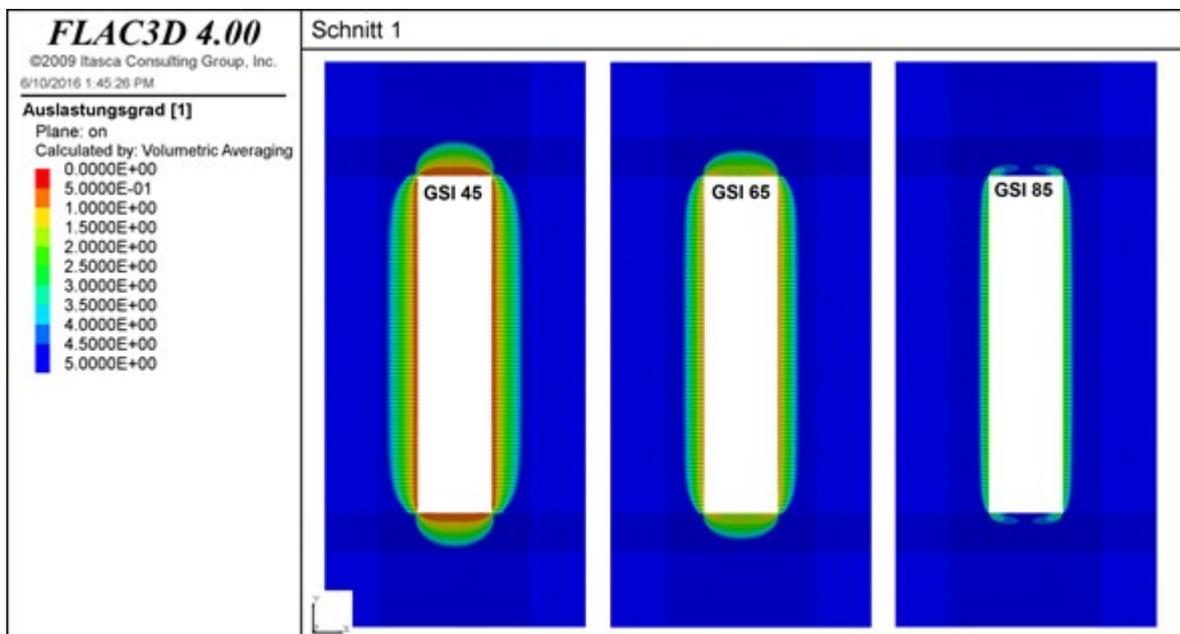


Abbildung 66: Auslastungsgrad einer Kammer mit Durchmesser 35m und Höhe 160m bei Variation des GSI-Werts unter den beschriebenen Eingangsparametern im Schnitt 1

Abbildung 66 stellt den Auslastungsgrad des Gebirges in der Umgebung einer

einzelnen isolierten Kammer für drei verschiedene Gebirgsstrukturen dar. Die Lage von Schnitt 1 ist in Abbildung 46 ersichtlich. Es ist erkennbar, dass die Stabilität der Kammer bei schlechteren Gebirgsverhältnissen (niedrigeren GSI-Werten) abnimmt. Bruchbereiche bilden sich dabei in den Ulmen, sowie Firsten und Sohlen aus. Da die Firsten und Sohlen jedoch geneigt ausgeführt werden und im Abschnitt „5.2.1 Kammergeometrie“ gezeigt worden ist, dass dadurch der Spannungszustand günstig beeinflusst wird, wird ein Versagen bevorzugt an den Ulmen sowie dem Übergang Firste-Raise auftreten. Aus diesem Grund ist eine mögliche Überlastung des Gebirges zunächst an den Kammerulmen sowie im Übergangsbereich Firste-Raise erkennbar.

5.2.4 Überlegungen zu einer möglichen Anpassung der empirischen Designkriterien nach Laubscher und Matthews an die zylindrische Kammerform

Neben numerischen Simulationen finden die empirischen Designkriterien nach Laubscher (1994) und Mathews, das von Mawdesley, Trueman und Whiten (2001) erweitert worden ist, bei der gebirgsmechanischen Planung von Kammern Anwendung. Beiden Verfahren ist gemein, dass die Gebirgseigenschaften der Hohlraumgröße gegenübergestellt werden und daraus Aussagen bezüglich der Stabilität von Hohlräumen gemacht werden. Beim Verfahren nach Laubscher (Abbildung 67) wird das Gebirge an Hand des Mining Rock Mass Rating, kurz MRMR, beschrieben. Nähere Information zur Ermittlung dieses Werts befindet sich in Laubscher (1990 und 1994). Die Größe des Hohlraums wird an Hand des Hydraulischen Radius der Firste beschrieben. Dieser ist die Fläche der Firste dividiert durch deren Umfang. Durch diese beiden Parameter werden die Kammern in drei Kategorien unterteilt: Offener Kammerbau, Bruchbau und Übergangszone. In Abhängigkeit des gewählten Abbauverfahrens (Bruchbau oder Kammerbau) werden die Kammern entsprechend ausgelegt. Eine Auslegung in der Übergangszone muss vermieden werden, weil in dieser nicht sicher ist, ob eine Kammer verbricht oder nicht. Die Basis bei der Entwicklung des Verfahrens nach Laubscher sind dessen Untersuchungen aus verschiedenen Bergwerken, die

Bruchbaumethoden zur Gewinnung einsetzen. Aus diesem Grund eignet sich dieses Designkriterium eher zur Dimensionierung von Bruchbauten.

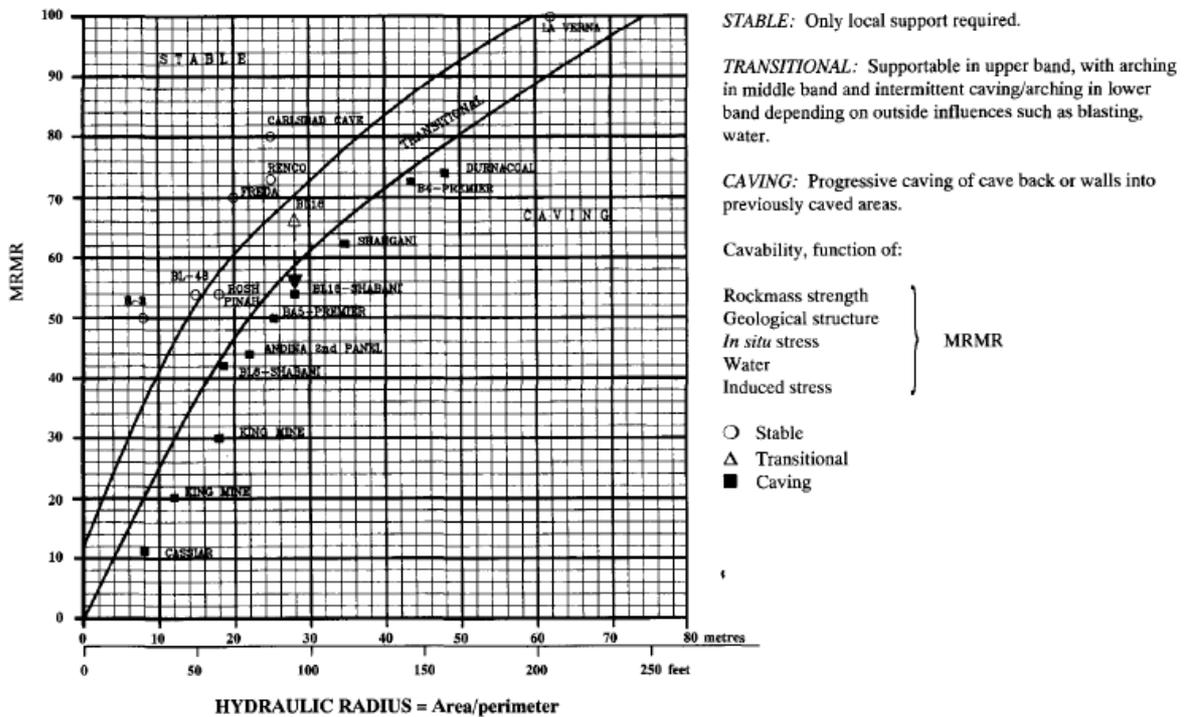


Abbildung 67: Auslegungskriterium für Kammern nach Laubscher (1994)

Das Verfahren nach Mathews (Mawdesley, Trueman und Whiten 2001) beschreibt das Gebirge über die so genannte Standfestigkeitszahl (Abbildung 68). Diese wird durch Modifikation des Q-Werts nach Barton (2002) berechnet. Durch Gegenüberstellung mit der Hohlraumdimension, die wiederum in Form des Hydraulischen Radius ausgedrückt wird, können die Kammern in die Kategorien, stabil, instabil und Übergangsbereich eingeteilt werden. Im Gegensatz zu Laubscher, der ausschließlich die Firste betrachtet, werden bei Mathews die Stabilitätszahlen und Hydraulischen Radii sowohl für die Firste als auch für alle Ulmen einzeln betrachtet. Dadurch ist es möglich, Aussagen über die Stabilität der einzelnen Ulme und der Firste getrennt voneinander zu machen. Des Weiteren ist das Verfahren nach Mathews aus Untersuchungen von Kammerbauten abgeleitet. Aus diesem Grund und dem Umstand, dass die Ulme separat betrachtet werden, eignet sich das Verfahren nach Mathews etwas besser zur Dimensionierung von Kammerbauten als jenes nach Laubscher.

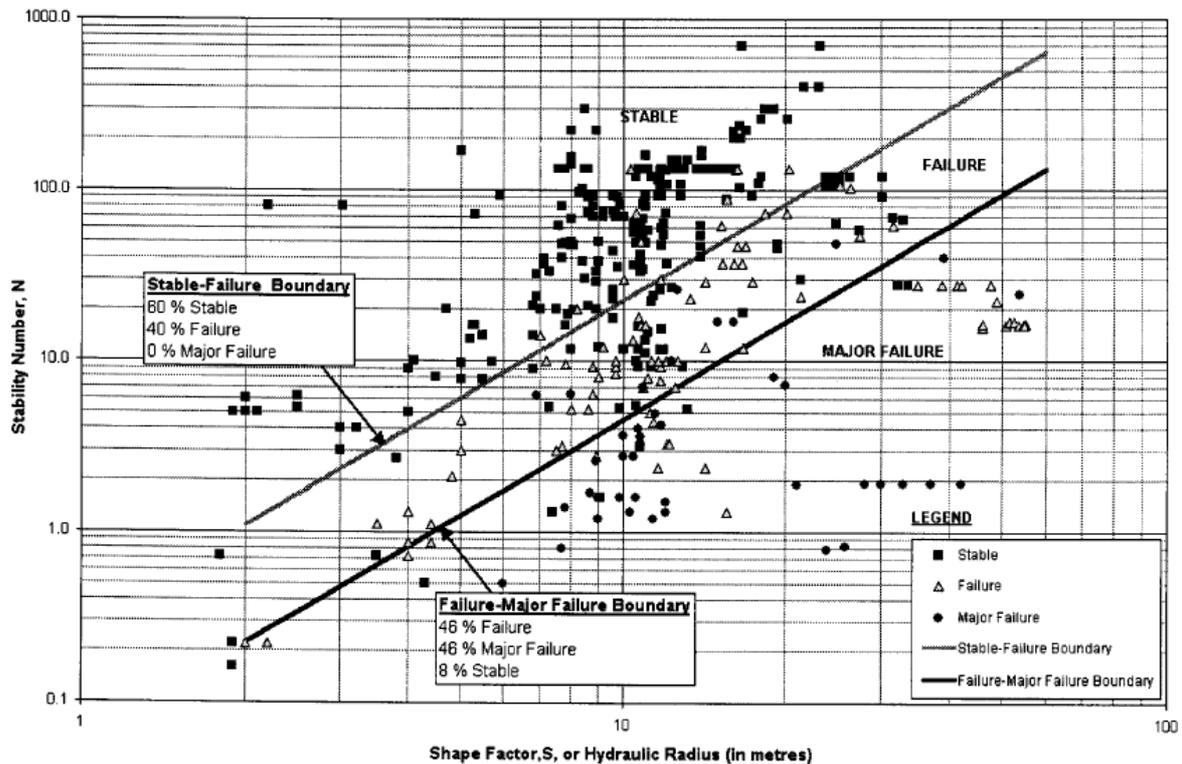


Abbildung 68: Auslegungskriterium für Kammern nach Mathews (Mawdesley, Trueman und Whiten 2001)

Für die Beurteilung der Standfestigkeit von Raise-mining Abbaukammern können beide Verfahren herangezogen werden. Aufgrund des Umstands, dass die Höhe der Raise-mining Kammern üblicherweise deutlich größer als dessen Durchmesser ist, darf die Höhe bei der Beurteilung der Standfestigkeit solcher Kammern nicht vernachlässigt werden. Da das Verfahren nach Laubscher nur die Firste einer Kammer betrachtet und die Höhe nicht berücksichtigt, sollte das Verfahren nach Mathews für die Dimensionierung von Raise-mining Kammern herangezogen werden. Die Problematik bei der Anwendung des Verfahrens nach Mathews für einen Raise-mining Abbau liegt im kreisförmigen Querschnitt der Kammern. Die Berechnung eines einzelnen Hydraulischen Radius für den gesamten Kammerum ist nicht zulässig, weil dadurch einerseits der Einfluss des Streichen und Fallens der Trennflächen in Bezug auf die Orientierung des Ulms nicht berücksichtigt werden kann und andererseits die Stabilität des Kammerulms unterschätzt werden würde, weil die kreisförmige Ausbildung des Ulms nicht berücksichtigt wird. Eine Möglichkeit, das Verfahren nach Mathews an die zylindrische Kammergeometrie anzupassen, ist die Beschreibung des kreisförmigen Querschnitts durch einen quadratischen Querschnitt. Dabei besteht

die Möglichkeit, dass der quadratische Querschnitt den kreisförmigen umschreibt; vergleiche Abbildung 69. In diesem Fall dürfte aber die Standfestigkeit im Allgemeinen unterschätzt werden, weil die Größe des Kammerulms dadurch überschätzt wird, wodurch der Hydraulische Radius größer wird. Dieser Umstand könnte durch eine Verkleinerung des quadratischen Querschnitts verbessert werden. Möglichkeiten dazu wären beispielsweise ein gleicher Flächeninhalt oder Umfang des quadratischen und kreisförmigen Querschnitts. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Orientierung des quadratischen Querschnitts. Diese beeinflusst die Orientierung der Trennflächen zur Orientierung der Kammerulme maßgeblich, wodurch in weiterer Folge die Stabilitätszahl signifikant beeinflusst wird. Aufgrund des Umstands, dass das Verfahren nach Matthews empirisch abgeleitet worden ist, ist es schwierig, ausschließlich mit numerischen Simulationen das Verfahren an den kreisförmigen Kammerquerschnitt anzupassen. Aus diesem Grund erscheint es zweckmäßiger, das Verfahren mit den Erkenntnissen, Erfahrungen und Beobachtungen, die während des Abbaus der Kammern in Gummern gesammelt werden, und der Unterstützung von darauf aufbauenden, numerischen Simulationen an die Anforderungen des Raise-mining Abbauverfahrens anzupassen.

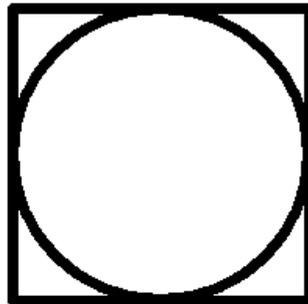


Abbildung 69: Umschreibung eines quadratischen Querschnitts. Es ist auch zu erkennen, dass die Ulme im Gegensatz zum kreisförmigen Querschnitt deutlich größer sind.

5.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Untersuchungen einer einzelnen isolierten Kammer zusammengefasst. Diese

befindet dabei außerhalb des Einflussbereichs der Oberfläche oder ausgeprägter Störzonen, so dass die Spannungsumlagerungen nicht durch diese beeinflusst werden.

- Das Höhen- zu Durchmesser Verhältnis der Kammer bestimmt die Charakteristika der Spannungsumlagerungen maßgeblich und der Durchmesser ist für die räumliche Erstreckung von diesen entscheidend.
- Bei langgestreckten Kammern ($h/d > 3$) ist der Einfluss der Firsten und Sohlen auf die Spannungsumlagerungen an den Kammerulmen gering, so dass sich an diesen ein ähnlicher Spannungszustand einstellt.
- Bei gedrungenen Kammern ($h/d < 3$) beeinflussen die Firsten und Sohlen die Spannungsumlagerungen an den Kammerulmen maßgeblich. Aus diesem Grund ist eine Unterscheidung zwischen gedrungenen und langgestreckten Kammern zweckmäßig.
- Bei langgestreckten Kammern sind für unterschiedliche Höhen- zu Durchmesser Verhältnisse die Spannungsumlagerungen bezogen auf den Kammerdurchmesser annähernd gleich.
- Die Umlagerungen der Horizontalspannungen in der Umgebung von langgestreckten Kammern können durch die Kirsch-Gleichungen, die die Spannungsumlagerungen um einen unendlich langen Tunnel mit kreisförmigem Querschnitt beschreiben, abgeschätzt werden. Voraussetzung dafür ist, dass sowohl die primäre Vertikalspannung als auch die primären Horizontalspannungen Hauptnormalspannungen sind. Zudem muss beachtet werden, dass die Kirsch-Gleichungen die resultierenden Horizontalspannungen im Allgemeinen überschätzen, weil sie einen unendlich langen Hohlraum betrachten und somit die stabilisierende Wirkung der Firsten und Sohlen nicht berücksichtigen.
- Befindet sich eine Kammer im Einflussbereich der Tagesoberfläche oder einer ausgeprägten Störzone, sind die Charakteristika der Spannungsumlagerungen jenen von tiefen Kammern ähnlich. Allerdings hängen sie im Allgemeinen von den vorherrschenden Bedingungen betreffend den primären Spannungszustand ab, so dass keine allgemeinen Aussagen zu den Spannungsumlagerungen möglich sind.

- Betreffend die Standfestigkeit einer Kammer sind die Horizontalspannungen kritischer als die Vertikalspannungen. Der Grund dafür liegt in der Art der Spannungsumlagerungen: Die Vertikalspannungen lagern sich großräumig um, wodurch die Spannungserhöhungen im Allgemeinen gering ausfallen. Demgegenüber lagern sich die Horizontalspannungen primär in der Umgebung der Kammerulme und Firsten und Sohlen um, wodurch einerseits Bereiche mit stark erhöhten Horizontalspannungen und andererseits ausgedehnte druckentspannte Bereiche auftreten. Die Umlagerung der Horizontalspannungen ist auch für die Ausbildung von Schubspannungen in der Umgebung der Kammer verantwortlich.
- An den Kammerulmen ist ein Versagen durch Überlastung des Gebirges hervorgerufen durch die Spannungsumlagerungen möglich. Demgegenüber ist bei horizontal ausgeführten Firsten ein Versagen von dieser durch Abrutschen von Blöcken aufgrund einer fehlenden Einspannung möglich. Wird die Firste jedoch geneigt ausgeführt, so erhöht sich die Einspannung deutlich, wodurch die Stabilität positiv beeinflusst wird. Allerdings darf die Firstneigung nicht zu steil gewählt werden (größer $30-40^\circ$), weil ansonsten die Horizontal und Schubspannungen in der Firste und speziell im Übergangsbereich zum Raise stark ansteigen und eine Überlastung des Gebirges möglich ist. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Standfestigkeit einer Kammer mit schlechteren Gebirgseigenschaften im Allgemeinen signifikant abnimmt.
- Unter Umständen, beispielsweise bei unterschiedlich hohen primären Horizontalspannungen, kann es vorteilhaft sein, den kreisförmigen Kammerquerschnitt durch einen ellipsenförmigen zu ersetzen.
- Bei Auftreten einer dominanten Trennflächenrichtung ist mit dem bevorzugten Abrutschen von Gesteinsblöcken an zwei gegenüberliegenden Punkten des Kammerulms zu rechnen. Dadurch verändert sich in weiterer Folge der kreisförmige Querschnitt zu einem ellipsenförmigen Querschnitt. Dies hat einerseits negative Auswirkungen auf die Spannungsumlagerungen, weil sich die resultierenden Horizontalspannungen in den Bereichen des Blockversagens signifikant

erhöhen. Andererseits wird dadurch in einem Abbaufeld der Festenquerschnitt verringert, wodurch die Festigkeit von den Festen abnimmt.

- Die derzeit häufig angewandten Auslegungskriterien von Kammern nach Laubscher und Mathews sind für Raise-mining Kammern nur bedingt geeignet, weil sie den kreisförmigen Querschnitt der Kammern nicht berücksichtigen.

5.2.6 Fallbeispiel: Einzelne Kammer in Gummern

In den letzten Abschnitten sind generelle Studien zu den Spannungsumlagerungen in der Umgebung einer isolierten Raise-mining Kammer durchgeführt worden. Dabei sind sowohl Zuschnitts- als auch Gebirgseigenschaften variiert und analysiert worden. Darauf aufbauend wird in diesem Abschnitt die Standfestigkeit einer Raise-mining Kammer mit der in Gummern geplanten Geometrie und unter den Gebirgsverhältnissen des Bergbaus Gummern untersucht. Die Höhe der Kammer beträgt 160m, der Durchmesser 35m und der Durchmesser des Raise 4m. Die Firste wird mit einer Neigung von 30° ausgeführt und die Überlagerung von dieser beträgt 200m. Bei einer Dichte des Gebirges von 2700kg/m³ und einem Seitendruckbeiwert von 0,35 ergeben sich im Firstbereich primäre Vertikalspannungen von in etwa 5,4MPa und primäre Horizontalspannungen von in etwa 1,9MPa. Diese steigen bis zur Sohle linear auf in etwa 9,7MPa (Vertikalspannung) und 3,4MPa (Horizontalspannung) an. Die Standfestigkeit wird mit den Gebirgseigenschaften des Homogenbereichs 2 untersucht; vergleiche Abschnitt „3.2 Gebirgsverhältnisse“. Dabei wird die Kammer als eine tiefe Kammer simuliert, das heißt, dass die Auswirkungen der Tagebauböschung auf die Spannungsumlagerungen nicht berücksichtigt werden. Deren Einfluss auf die Standfestigkeit kann an Hand der Ergebnisse von Abschnitt „5.2.2.2 Tagebaunahe Kammern“ abgeschätzt werden. Des Weiteren befasst sich Kapitel „5.6 Interaktion zwischen Tagebauböschung und Kammern“ mit den Wechselwirkungen des unter- und obertägigen Abbaus, wobei unter anderem auch die Standfestigkeit der Kammern diskutiert wird. Generelle Information zum

Ablauf und den Eingangsparametern der numerischen Simulation kann im Abschnitt „5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen“ gefunden werden und die Auswirkung von veränderten Eingangsparametern auf die Standfestigkeit kann mit Hilfe der Ergebnisse der vorhergehenden Abschnitte, in denen die allgemeinen Untersuchungen betreffend eine einzelne isolierte Kammer beschrieben sind, abgeschätzt werden.

Für die Beurteilung der Standfestigkeit werden farbkodierte Verteilungen des Auslastungsgrads und des Zustands des Gebirges ausgewiesen (Abbildung 71 und Abbildung 72). Dafür wird ein vertikaler Schnitt (Schnitt 1) durch den Kammermittelpunkt betrachtet. Die Lage des Schnitts ist in Abbildung 70 ersichtlich. Des Weiteren sind die Spannungsumlagerungen analysiert worden. Da deren Charakteristika allerdings vergleichbar mit jenen der bisherigen Studien sind, können diese aus den bisherigen Untersuchungen abgeleitet werden und werden daher nicht mehr ausgewiesen. Für die Beurteilung der Ergebnisse müssen die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte, insbesondere jene betreffend den Auslastungsgrad und Zustand des Gebirges, beachtet werden.

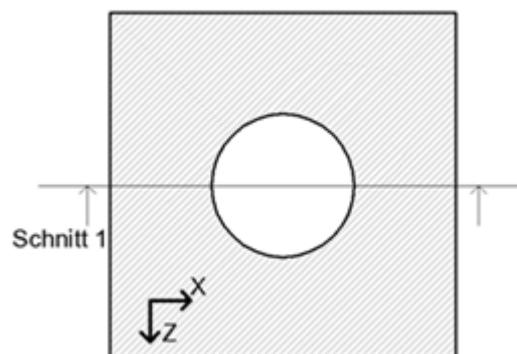


Abbildung 70: Lage von Schnitt 1

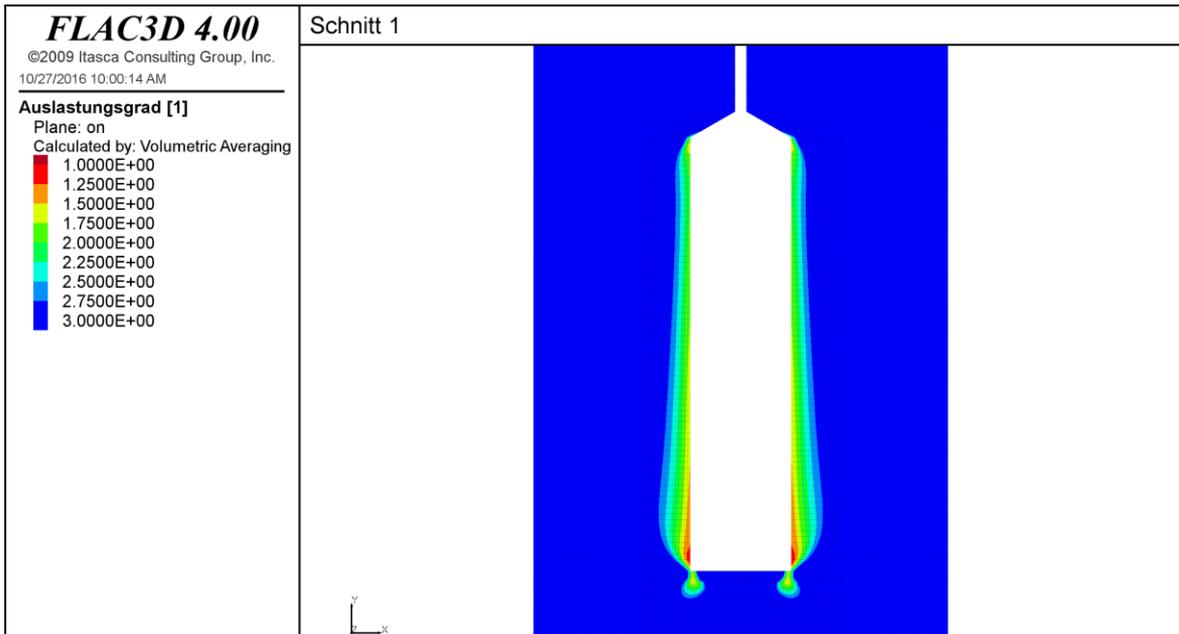


Abbildung 71: Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 1 für eine einzelne Kammer im Bergbau Gummern

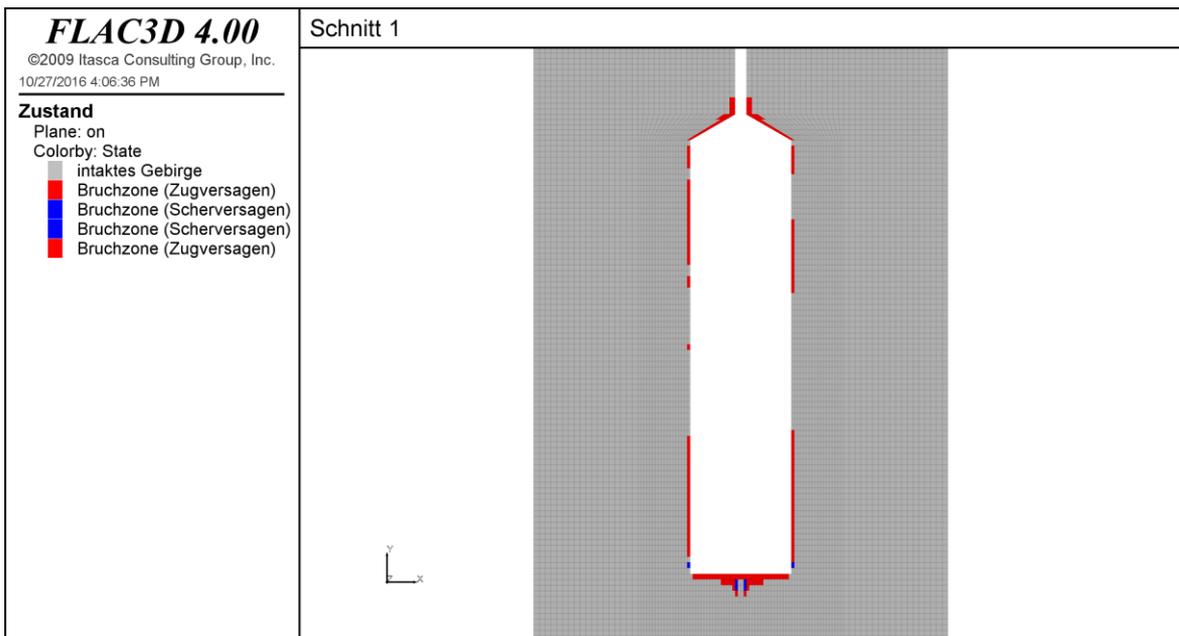


Abbildung 72: Zustand des Gebirges im Schnitt 1 für eine einzelne Kammer im Bergbau Gummern

Die Verteilung des Auslastungsgrads ist in Abbildung 71 und jene des Zustands des Gebirges in Abbildung 72 ersichtlich. Die wesentlichen Punkte betreffend die Standfestigkeit einer einzelnen isolierten Kammer unter den erwarteten Gebirgsbedingungen im Bergbau Gummern sind im Folgenden zusammengefasst:

- Das Gebirge wird überwiegend im Bereich der Kammerulme stärker ausgelastet, wobei bereits in geringer Entfernung (kleiner 5m) die Belastung nur mehr geringfügig ist. Zudem ist ersichtlich, dass sich sowohl die Ausdehnung als auch die Höhe der Auslastung aufgrund der ansteigenden primären Spannungen mit zunehmender Teufe vergrößern.
- Die Bruchzonen werden größtenteils durch Zugspannungen hervorgerufen und treten vorwiegend in den First- und Sohlbereichen sowie teilweise an den Kammerulmen auf. Allerdings beschränken sich diese im Allgemeinen auf die unmittelbare Umgebung der Hohlräume.
- Die Bruchzonen in den First- und Sohlbereichen werden vom Auslastungsgrad nicht erfasst; vergleiche Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“.
- Aufgrund dieser Erkenntnisse ist die Standfestigkeit einer isolierten Kammer unter den betrachteten Umständen und Annahmen gegeben. Allerdings kann ein lokales Versagen kleinräumiger Bereiche des Hohlraumrands nicht ausgeschlossen werden.
- Da das Laden des gebrochenen Gesteins aus der Kammer ferngesteuert erfolgt und keine anderen Arbeiten in der Kammer durchgeführt werden, ist das Auftreten eines solchen lokalen Versagens im Allgemeinen unbedeutend. Ausgenommen davon ist jedoch der Übergangsbereich zwischen der Firste und dem Raise. In diesem finden neben den Bohr- auch die Ladearbeiten statt, wodurch ein entsprechender Ausbau zur Stabilisierung des Gebirges eingebracht werden muss.
- Die Bruchbereiche in der Sohle werden in Realität deutlich kleinräumiger sein, weil diese ebenfalls geneigt (in etwa 55°) ausgeführt wird. Dennoch wird der Übergang Sohle-Förderstrecke ähnlich dem Übergang Firste-Raise stärker belastet werden und muss dementsprechend ausgebaut werden.
- Liegt eine Kammer in ausgeprägten Stör- oder Karstzonen oder anderen Gebirgsbereichen, die eine deutlich geringere Gebirgsfestigkeit aufweisen, sind die hier durchgeführten Standfestigkeitsuntersuchungen nicht mehr gültig und dementsprechend eine neue Analyse der Standfestigkeit notwendig.

- Die Ergebnisse der Standfestigkeitsanalyse sind aufgrund von schwierig quantifizierbaren Einflüssen der Gebirgsstruktur auf die Gebirgsfestigkeit mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Allerdings werden im Laufe des fortschreitenden Abbaus neue Erkenntnisse zur Gebirgsfestigkeit und dem Gebirgsverhalten durch den Einsatz eines entsprechenden Monitoringprogramms gewonnen. Diese können anschließend dazu genutzt werden, um die numerischen Simulationen zu kalibrieren und die Unsicherheiten sukzessive zu verringern.

5.3 Standsicherheit des gesamten Abbaubereichs

Nachdem im letzten Kapitel „5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer“ die gebirgsmechanischen Aspekte und die Standsicherheit einer isolierten Raise-mining Kammer untersucht worden sind, wird in diesem Kapitel analysiert, wie der Abbau von mehreren Kammern die Spannungsumlagerungen beeinflusst. Die Kammern werden dabei nebeneinander in einer Richtung angeordnet. Eine Anordnung in zwei Richtungen, wie sie im Kapitel „5.4 Geometrie des Abbausystems“ beschrieben wird, wird nicht vorgenommen, weil sich dadurch einerseits der Rechenaufwand bei den Simulationen signifikant verringert und andererseits die Interpretation der Ergebnisse einfacher ist. Dazu wird der Abbau von 4, 8 beziehungsweise 12 Kammern nebeneinander simuliert. Dabei wird insbesondere darauf geachtet, wie sich die Spannweite des Baufelds auf die Höhe der Spannungen auswirkt. Des Weiteren werden die Spannungsumlagerungen innerhalb eines solchen Baufelds bei verschiedenen Zentralabständen der Kammern untersucht. Abschließend werden die Auswirkungen des Versagens einer Feste näher betrachtet.

5.3.1 Zentralabstand

Die Untersuchungen zu den generellen gebirgsmechanischen Aspekten der

Baufeldbreite beinhalten zunächst die Analyse von unterschiedlichen Zentralabständen der Kammern. Im Kapitel „2 Raise-mining Abbaufverfahren“ ist bereits gezeigt worden, dass im Gegensatz zum klassischen Kammerbau der Begriff Festenbreite nicht zur Beschreibung des Abstands von benachbarten Kammern herangezogen werden soll. Anstatt dessen soll der Begriff Zentralabstand verwendet werden soll. Für die folgenden Simulationen wird die Kammergeometrie des Bergbaus Gummern (Höhe=160m, Durchmesser=35m, $h/d=4,57$) verwendet, wobei 4 Kammern nebeneinander abgebaut werden; vergleiche Abbildung 73. Insgesamt werden dabei 3 verschiedene Zentralabstände untersucht:

1. Zentralabstand = $1,5 \cdot d = 52,5\text{m}$
2. Zentralabstand = $1,33 \cdot d = 46,5\text{m}$
3. Zentralabstand = $1,66 \cdot d = 58,3\text{m}$

Die Simulationen werden wiederum ausschließlich linear elastisch mit primären Vertikal- und Horizontalspannungen von jeweils 1MPa durchgeführt. Da die Simulationen linear elastisch erfolgen, hat die Abbaureihenfolge keinen Einfluss auf die Spannungsumlagerungen. Aus diesem Grund werden alle Kammern zugleich abgebaut. Eine Variation von weiteren Parametern wie im Kapitel „5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer“ wird nicht durchgeführt. Allerdings können die Ergebnisse aus dem Kapitel „5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer“ dazu herangezogen werden, um den Einfluss von geänderten Kammergeometrien, primären Spannungsverhältnissen, der First- beziehungsweise Sohlausbildung und einer ausgeprägten Trennfläche in einer Richtung abschätzen zu können.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wiederum an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen, wobei die Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen betrachtet werden. Dazu werden zwei Schnitte verwendet: Schnitt 1 ist vertikal und durchschneidet die Kammern in deren Mittelpunkten und Schnitt 2 ist horizontal und durchschneidet die Kammern auf halber Kammerhöhe. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 73 ersichtlich. Des Weiteren werden die Spannungsverläufe entlang einer Messlinie ausgewertet. Diese wird als Messlinie 1 bezeichnet und befindet sich auf halber Höhe der Kammern und verläuft durch

deren Mittelpunkte; vergleiche Abbildung 73. Sie beginnt und endet in den Auflagern und hat von den äußersten Kammerulmen jeweils einen Abstand von 5 Zentralabständen. Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

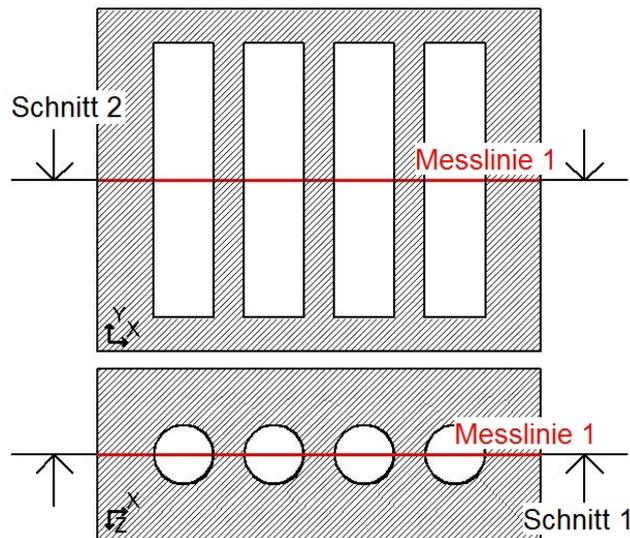


Abbildung 73: Lage der Schnitte 1 und 2 sowie der Messlinie 1

Die untersuchten Spannungsverteilungen für einen Zentralabstand von $1,5 \cdot \text{Durchmesser}$ sind in Abbildung 74 bis Abbildung 80 dargestellt. Sie weisen im Wesentlichen dieselben Merkmale und Charakteristika wie die Spannungsumlagerungen in der Umgebung einer einzelnen isolierten Kammer auf. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Spannungsverteilungen verzichtet und anstatt dessen werden die wichtigsten Punkte und Unterschiede im Folgenden angeführt.

- Die Vertikalspannungen erhöhen sich in den Festen geringfügig.
- Betreffend die Horizontalspannungen in X-Richtung kann festgehalten werden, dass der Abbau von mehreren Kammern die Spannungsumlagerungen günstig beeinflusst. Die Entspannung in den Festen fällt geringer aus als jene bei einer isolierten Kammer und an den übrigen Kammerulmen ist die Spannungserhöhung deutlich niedriger. Zudem erhöhen sich die Spannungen in den Firsten und Sohlen kaum. Des

Weiteren kann festgestellt werden, dass die Randkammern etwas stärker belastet werden. Der Umstand für die positiven Auswirkungen auf die Horizontalspannungen in X-Richtung liegt in der Anordnung der Kammern in X-Richtung.

- Bei den Horizontalspannungen in Z-Richtung bilden sich die druckentspannten Ulme vergleichbar mit jenen einer isolierten Kammer aus. Allerdings kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Spannungen in den Festen zwischen den Kammern und den Auflagern. Diese Situation ist mit jener eines klassischen Festenbaus vergleichbar; vergleiche Abbildung 85. Bei einem klassischen Festenbau tritt diese Spannungserhöhung allerdings aufgrund der Orientierung der Festen bei den Vertikalspannungen auf. Des Weiteren bilden sich die Spannungen in den Firsten und Sohlen ähnlich zu jenen in X-Richtung aus.
- Betreffend die Schubspannungen kann festgehalten werden, dass diese sich nicht mehr um den gesamten Kammerulm ausbilden, sondern vorwiegend in jenen Teilen des Ulms, der an die Festen angrenzt, auftreten.

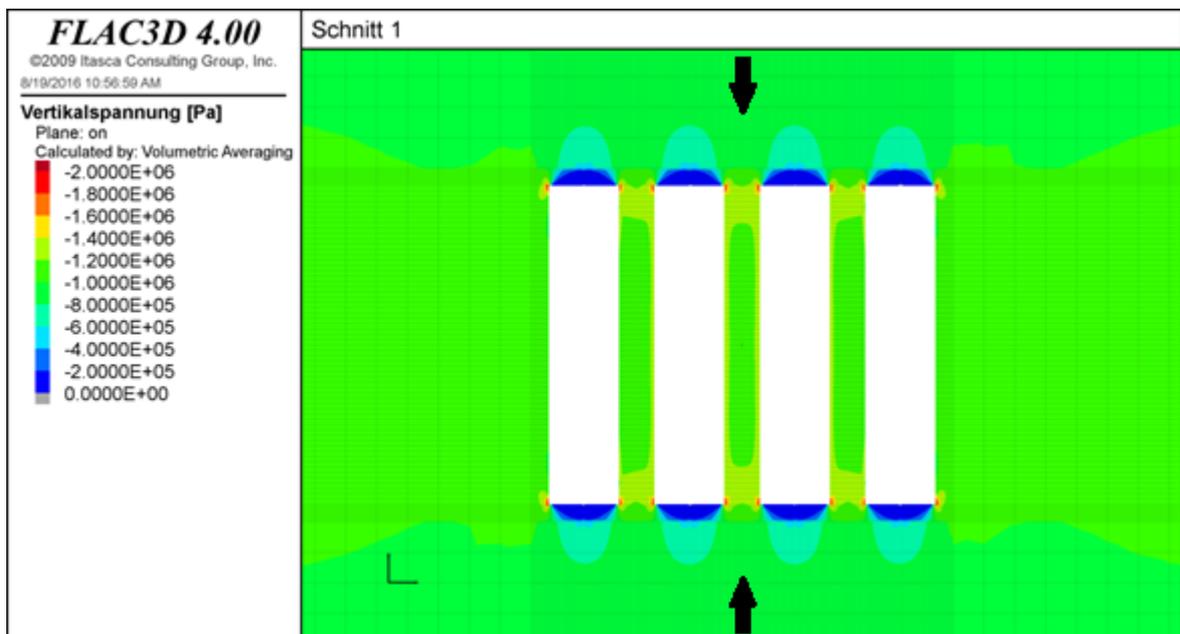


Abbildung 74: Vertikalspannungen im Schnitt 1; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

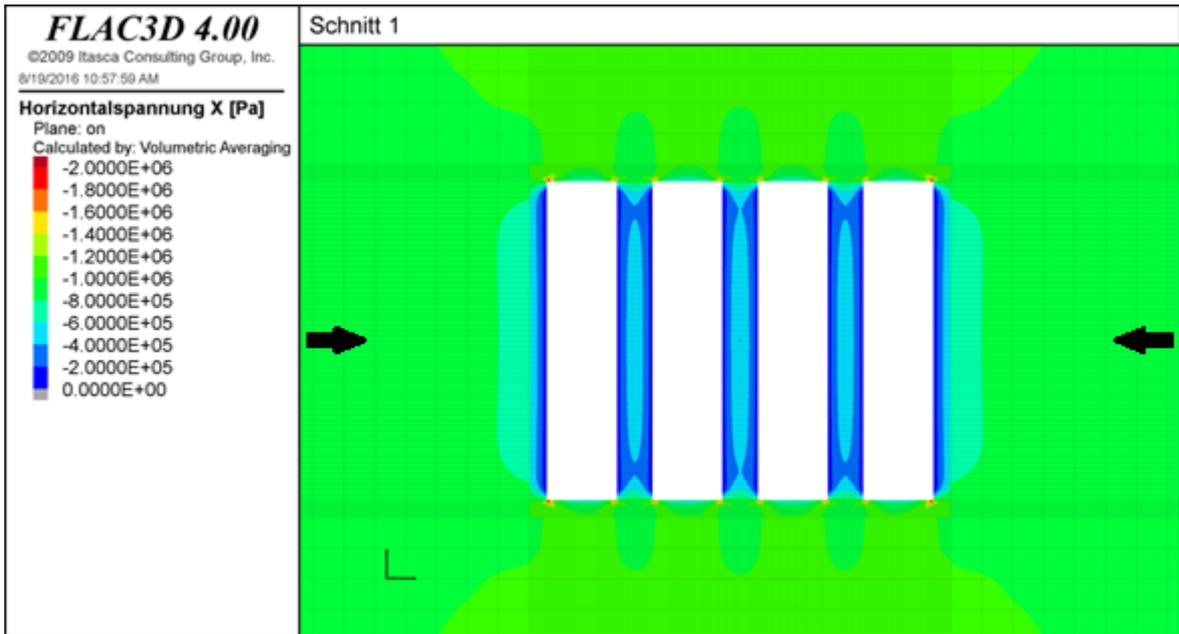


Abbildung 75: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 1; 4Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

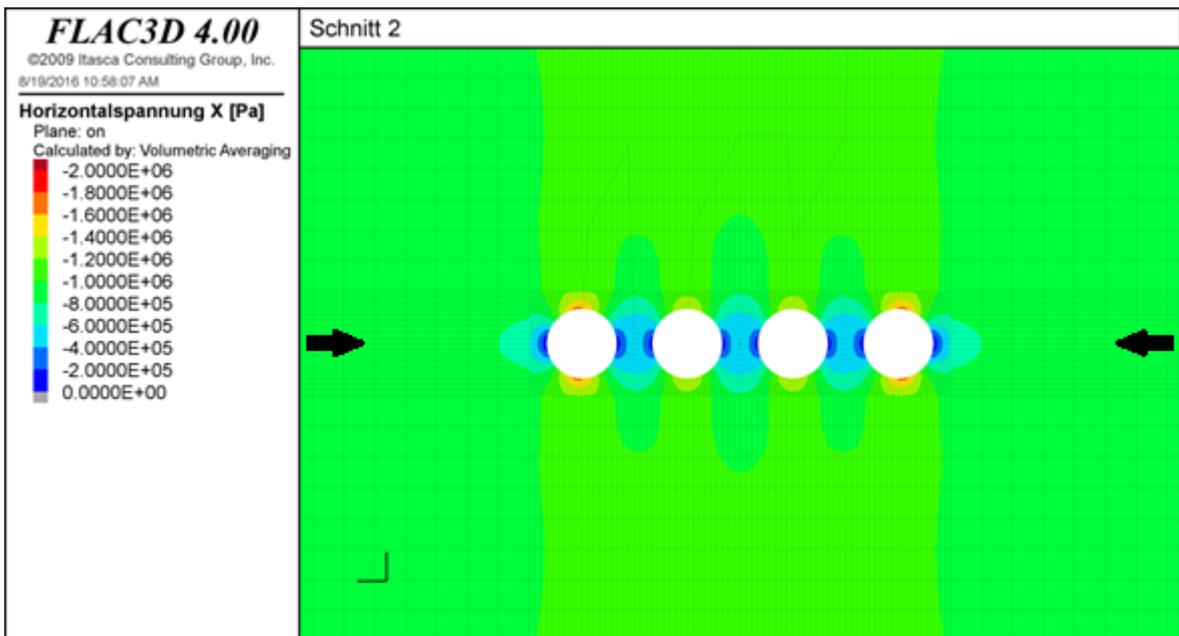


Abbildung 76: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

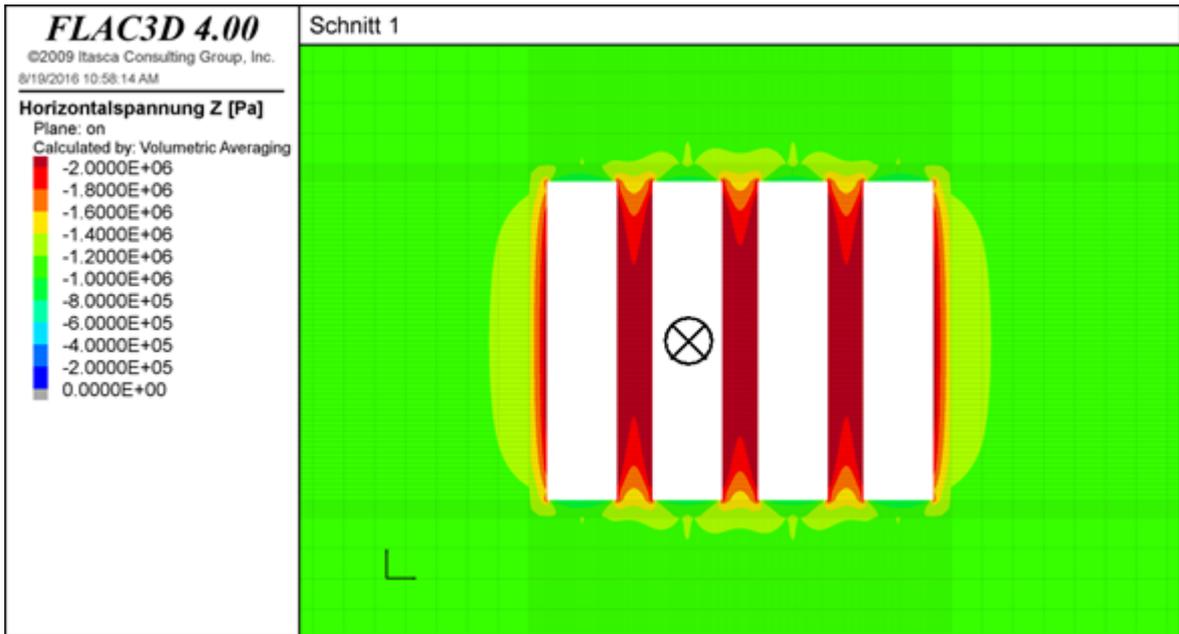


Abbildung 77: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 1; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

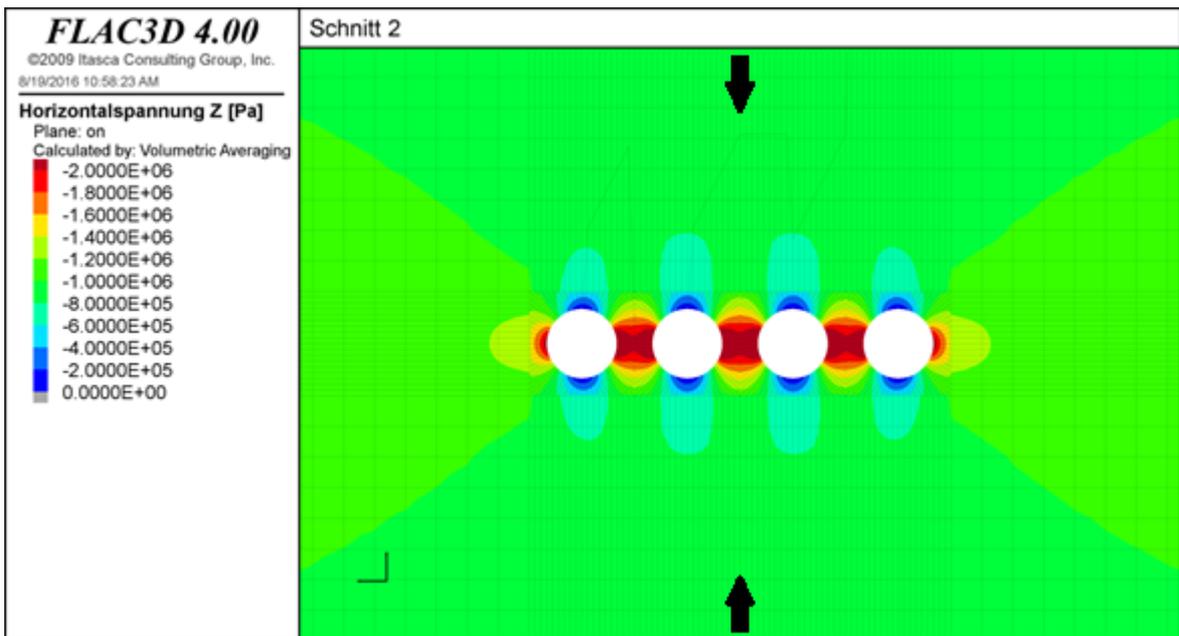


Abbildung 78: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

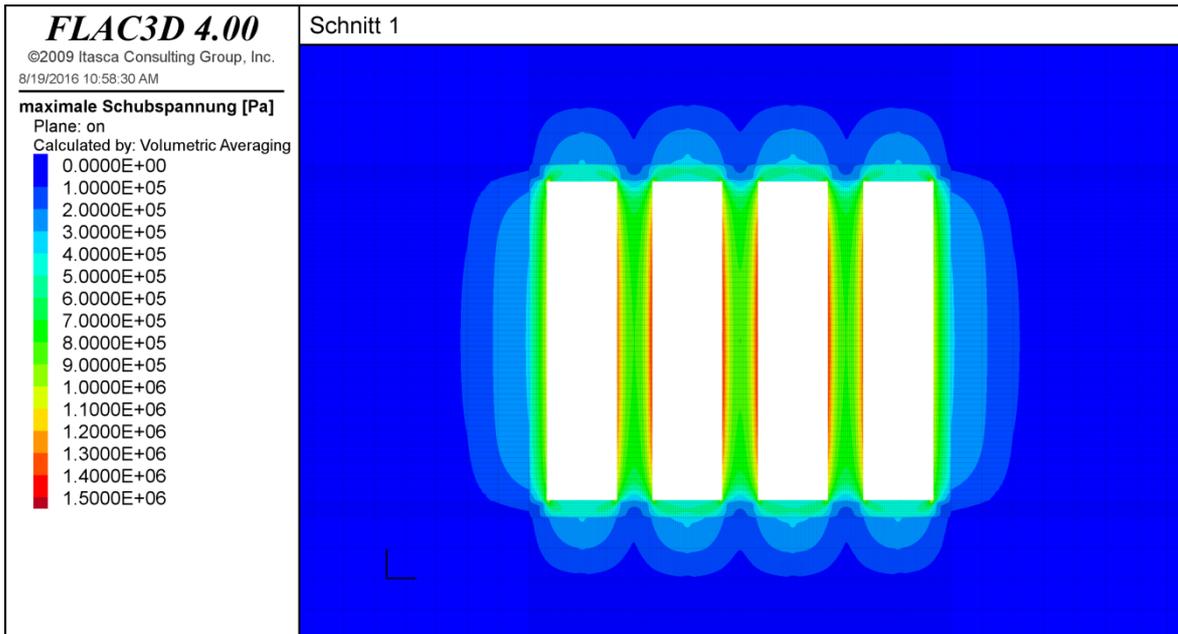


Abbildung 79: Schubspannungen im Schnitt 1; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

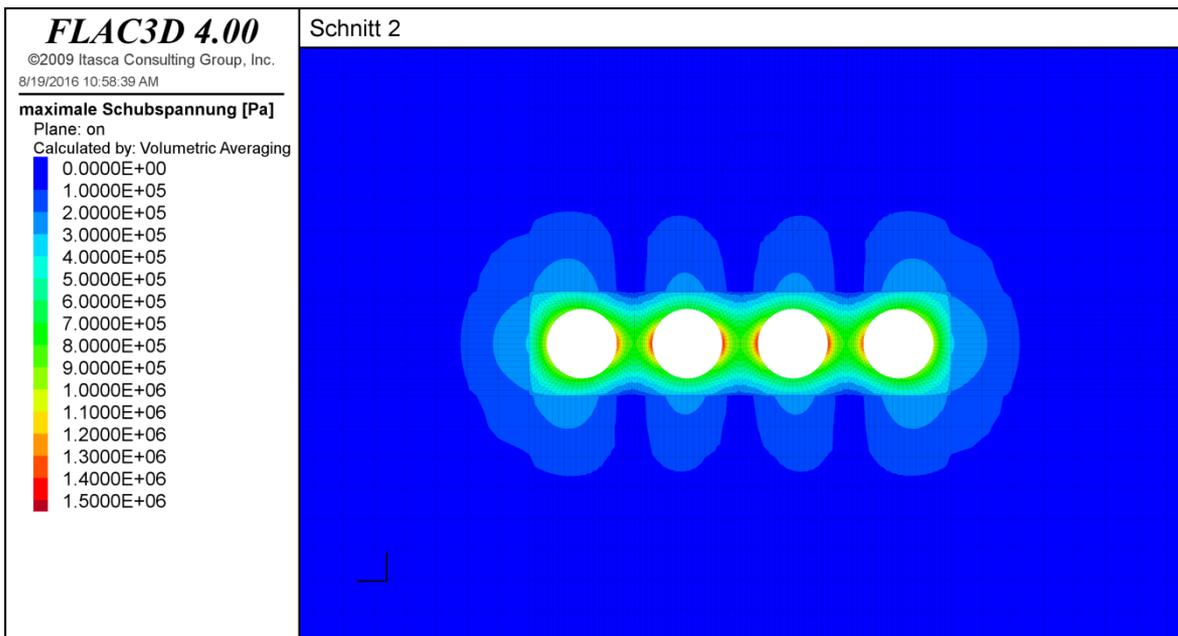


Abbildung 80: Schubspannungen im Schnitt 2; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

Die Spannungsverteilungen mit den beiden anderen analysierten Zentralabständen ($1,33*d$ und $1,66*d$) weisen dieselben Merkmale wie jene für einen Zentralabstand von $1,5*d$ auf. Aus diesem Grund werden die Spannungsverteilungen nicht mehr ausgewiesen. Der Vergleich der Spannungen für die unterschiedlichen Zentralabstände erfolgt anstatt dessen mit Hilfe der

Spannungsverläufe entlang von Messlinie 1; vergleiche Abbildung 81 bis Abbildung 84. Des Weiteren liefert die Messlinie 1 zusätzliche Erkenntnisse zur Höhe der Spannungsumlagerungen in den Festen und Auflagern. Die Lage der Messlinie 1 ist in Abbildung 73 ausgewiesen. Die Spannungsverläufe sind dabei auf den Zentralabstand des jeweiligen Abbaufelds normalisiert, um einen übersichtlicheren Vergleich zu ermöglichen.

Auf eine detaillierte Auswertung der einzelnen Messlinien wird verzichtet. Anstatt dessen sind im Folgenden die wichtigsten Punkte zusammengefasst:

- Die Spannungsverläufe innerhalb der Festen bilden sich ähnlich zu jenen eines herkömmlichen Festenbaus in Form von Parabeln aus.
- Die Spannungsanstiege der Horizontalspannungen sind deutlich stärker ausgeprägt als jene der Vertikalspannungen. Die auftretenden Schubspannungen werden wiederum primär durch die Umlagerungen der Horizontalspannungen hervorgerufen.
- Die Belastung der mittleren Feste ist etwas größer als jene der beiden Randfesten, weil die Spannungen teilweise in die Auflager umgelagert werden.
- Bei einer Verringerung des Zentralabstands steigen die Vertikal-, Horizontalspannungen in Z-Richtung und Schubspannungen überproportional stark an.
- Demgegenüber hat eine Veränderung des Zentralabstands auf die Horizontalspannungen in X-Richtung einen deutlich geringeren Einfluss. Der Grund dafür liegt im Umstand, dass die Kammern in X-Richtung angeordnet sind, wodurch diese unabhängig vom Zentralabstand gegenseitig in deren Spannungsschatten liegen.
- Die Spannungsumlagerungen in den Auflagern werden durch eine Veränderung des Zentralabstands nur unwesentlich beeinflusst.

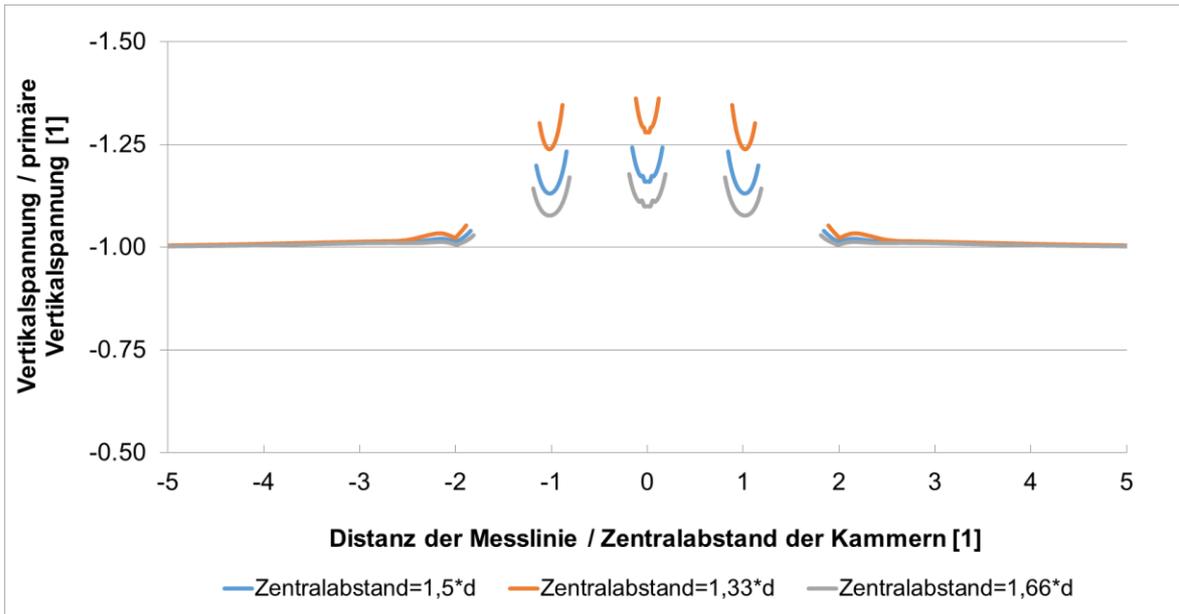


Abbildung 81: Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$

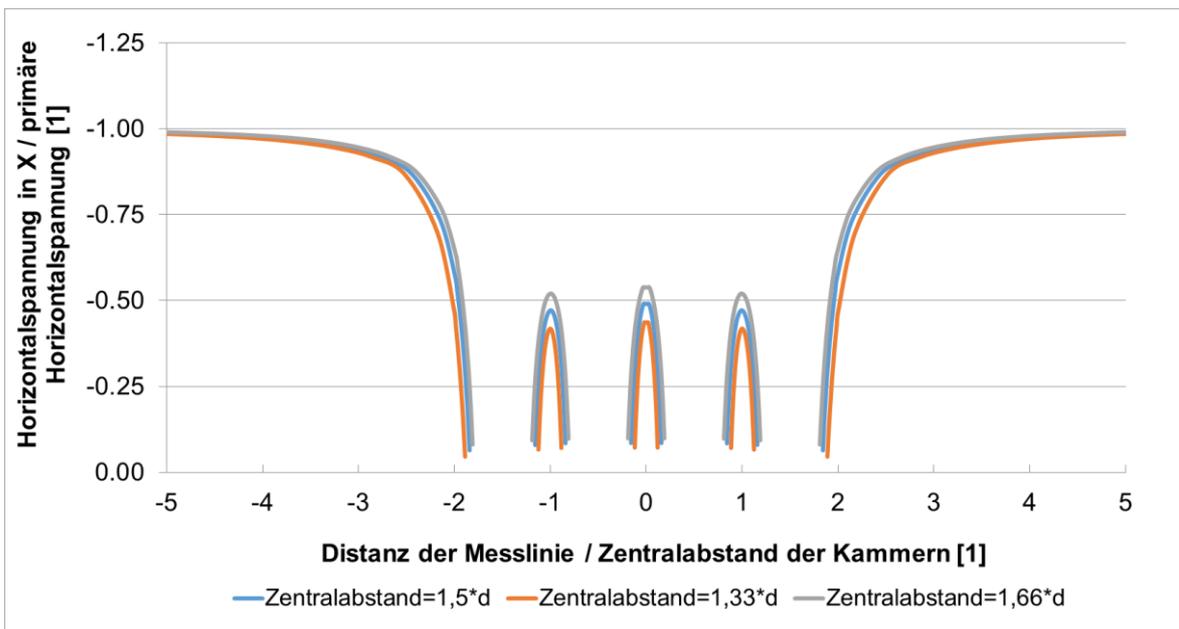


Abbildung 82: Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$

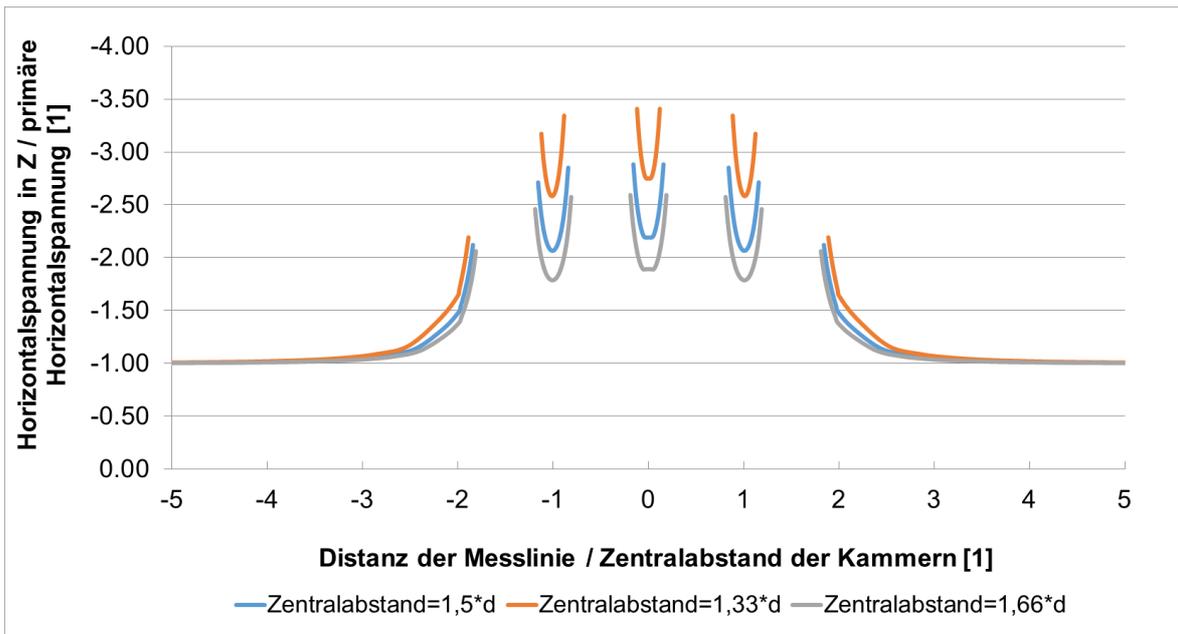


Abbildung 83: Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$

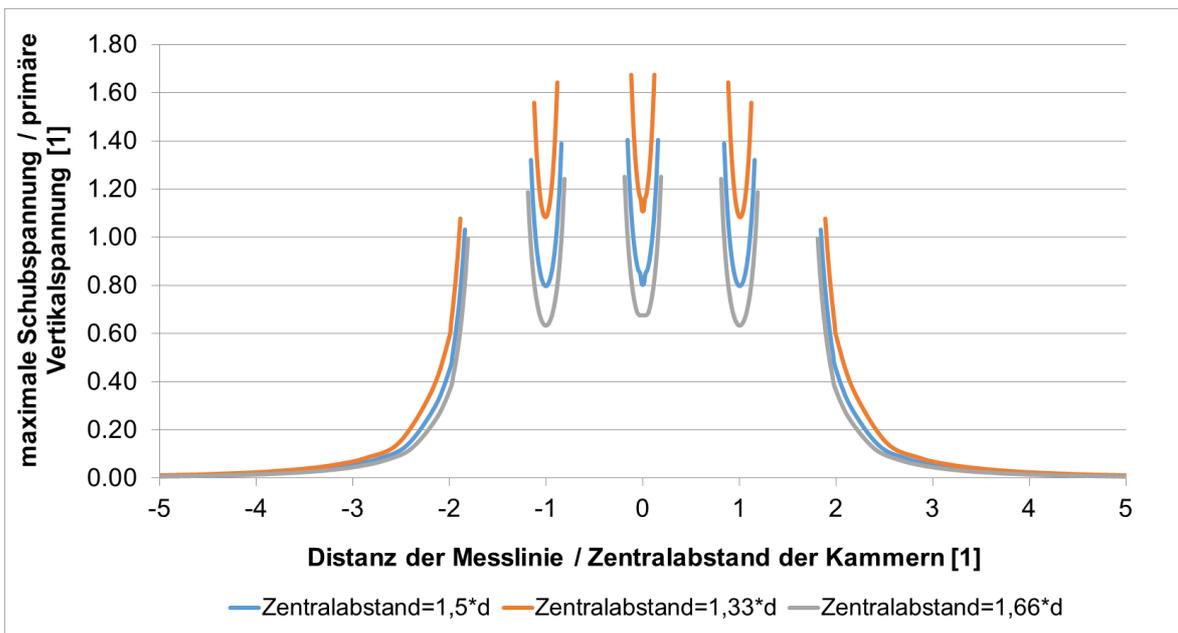


Abbildung 84: Vergleich der maximalen Schubspannungen entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$

Die bisherigen Untersuchungen zur Baufeldbreite haben gezeigt, dass die Spannungsumlagerungen in den Festen eines Raise-mining Abbaus gewisse Ähnlichkeiten zu jenen eines klassischen Festenbaus aufweisen. Abbildung 85 stellt die Vertikalspannungsverteilung innerhalb der Festen eines klassischen

Festensbaus dar. Betrachtet man das Festensystem eines Raise-mining Abbaus in einem horizontalen Schnitt, so ist eine ähnliche Situation wie in einem klassischen Festensbau erkennbar. Abbildung 85 zeigt diesen Umstand auf und stellt auch schematisch die Horizontalspannungsverläufe in Z-Richtung innerhalb der Festen dar.

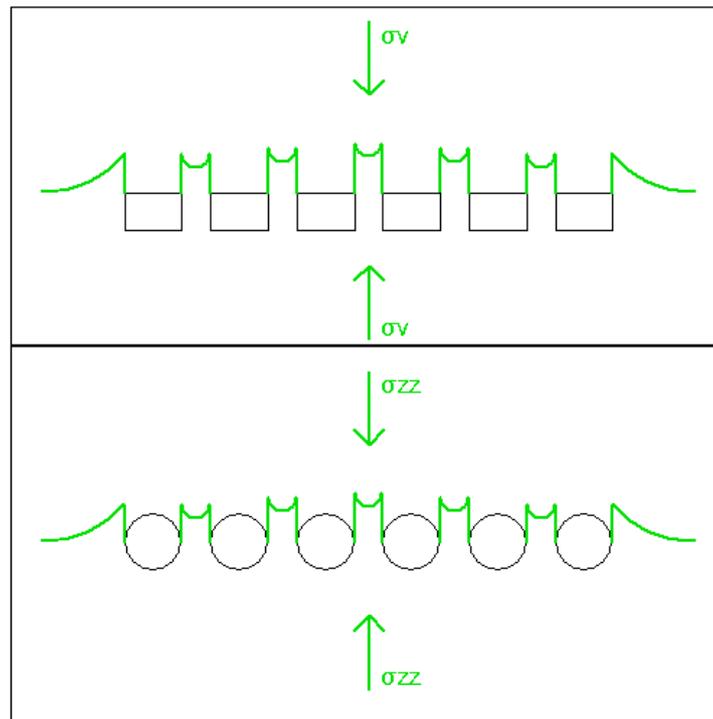


Abbildung 85: Vergleich der Festenspannung eines klassischen Kammerbaus (oben) mit den Horizontalspannungen in den Festen eines Raise-mining Abbaus (unten)

Eine Methode zur Auslegung der Festen im herkömmlichen Festensbau ist die so genannte Theorie der zugeordneten Flächen. Diese besagt, dass jede Feste das Gewicht der über ihr liegenden Gesteinsmassen trägt; vergleiche Abbildung 86. Die Festenspannung hängt in diesem Fall direkt vom Ausbringen ab und kann durch Gleichung 9 bis Gleichung 11 berechnet werden. Die damit berechnete Festenspannung stellt zugleich auch die maximal mögliche Festenspannung dar. In Realität wird diese allerdings nur in den mittleren Festen von sehr großen Baufeldern erreicht. Bei kleineren Baufeldgrößen lagern sich die Spannungen in die umliegenden Auflager um; vergleiche Abbildung 87. Das Ausmaß dieser Umlagerungen hängt im Wesentlichen von den Deformationseigenschaften des

überlagernden Gebirges und der Steifigkeit der Festen ab. Dabei gilt, je höher die Steifigkeit einer Feste (Gleichung 12) ist, umso höher sind die Spannungen in dieser. Die Steifigkeit einer Feste nimmt mit dem E-Modul und deren Querschnitt zu und mit der Festenhöhe ab. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass eine höhere Steifigkeit die Stabilität des Gesamtsystems positiv beeinflusst, weil in den Festen eine deutlich geringere Energiemenge gespeichert ist. Im Falle eines Festenversagens wird dementsprechend einerseits weniger Energie frei und andererseits die Gefahr eines schlagartigen Versagens in Form eines Gebirgsschlags reduziert.

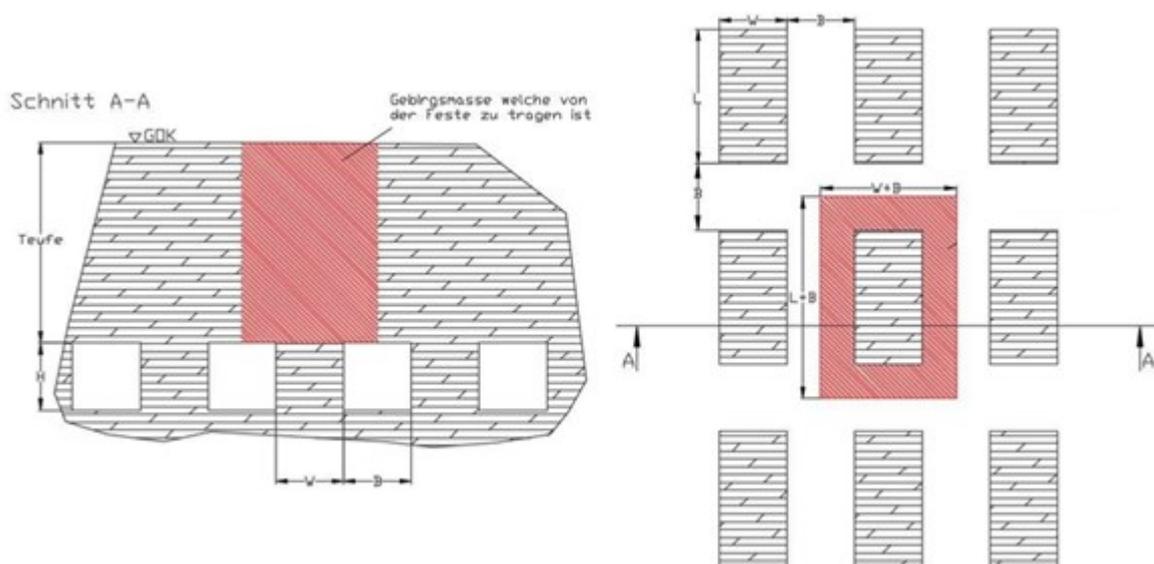


Abbildung 86: Theorie der zugeordneten Flächen

$$\sigma_F = \frac{\sigma_V}{1 - ea} \text{ [MPa]}$$

Gleichung 9

$$\sigma_V = \rho * g * T * 10^{-6} \text{ [MPa]}$$

Gleichung 10

$$ea = 1 - \frac{W_F * L_F}{(W_F + B) * (W_F + L_F)} \text{ [1]}$$

Gleichung 11

- B ... Örtbreite [m]
- ea ... Ausbringen [1]
- g ... Erdbeschleunigung [m/s²]
- L_F ... Festenlänge [m]
- T ... Teufe/Überlagerung [m]
- W_F ... Festenbreite [m]
- ρ ... Dichte des Gebirges [kg/m³]
- σ_F ... Festenspannung [MPa]
- σ_V ... primäre Vertikalspannung [MPa]

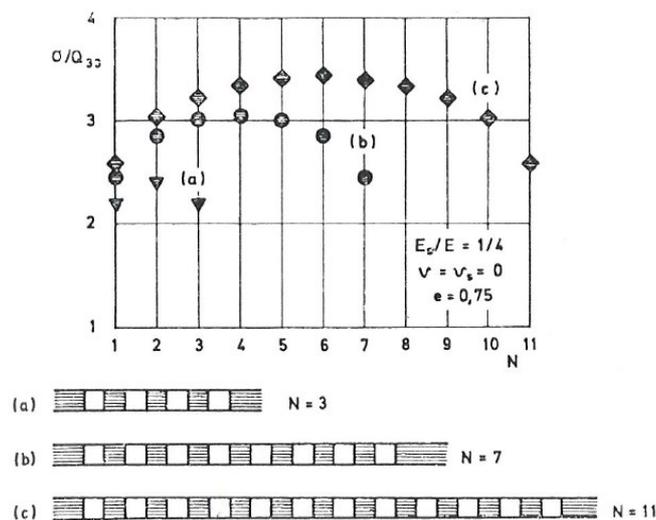


Abbildung 87: Festenspannungen für unterschiedliche Baufeldbreiten. Die maximal mögliche Festenspannung beträgt für den dargestellten Fall $4 \cdot \sigma_V$ (Ausbringen 75%). Es ist gut zu erkennen, dass die Spannungen in die Auflager umgelagert werden und mit zunehmender Baufeldbreite in den Festen ansteigen. (Salamon 1983)

$$k_F = \frac{E * A_F}{H_F} \left[\frac{N}{m} \right]$$

Gleichung 12

- A_F ... Querschnitt der Feste [m]
- E_m ... E-Modul des Gebirge [Pa]
- H_F ... Festenhöhe [m]

- k_F ... Steifigkeit der Feste [N/m]

Wendet man die oben diskutierten Ansätze auf die Festen eines Raise-mining Abbaus an, so können folgende Schlüsse daraus gezogen werden:

- Nimmt man unendlich lange Festen an und legt einen horizontalen Schnitt durch diese (vergleiche Abbildung 85), so kann das Ausbringen in horizontaler Richtung nach Gleichung 13 berechnet werden. Dazu sei angemerkt, dass bei dieser Berechnung des Ausbringens die schmalste Stelle der Feste betrachtet wird. Da aber die gesamten Spannungen durch diese Engstelle laufen müssen, ist diese Betrachtung zweckmäßig. Bei einem Kammerdurchmesser von 35m und einem Zentralabstand von $1,5 \cdot d$ ergibt sich somit ein Ausbringen von 67% (Gleichung 13). Nimmt man zudem an, dass die Festen die gesamten Horizontalspannungen in Z-Richtung aufnehmen, so beträgt die durchschnittlichen Spannungen in den Festen $3 \cdot \sigma_{zz}$. Vergleicht man diesen Wert mit der durchschnittlichen Spannung aus der Simulation von $2,4 \cdot \sigma_{zz}$ (Abbildung 83), folgt der Schluss, dass die Theorie der zugeordneten Flächen auch auf die Horizontalspannungen in Z-Richtung (quer zum Abbaufeld) angewandt werden kann. Dass die Spannungen aus der Simulation niedriger sind als jene aus der Theorie der zugeordneten Flächen, ist wiederum auf den Umstand der Spannungsumlagerungen in die Auflager zurückzuführen.

$$e_h = \frac{d}{ZA} [1]$$

Gleichung 13

- d ... Kammerdurchmesser [m]
 - e_h ... „horizontale“ Ausbringen [1]
 - ZA ... Zentralabstand der Kammern [m]
- Wird dieselbe Berechnung auf die Vertikalspannungen angewandt, so kann ein ähnliches Ergebnis festgestellt werden. Das vertikale Ausbringen bei einem Kammerdurchmesser von 35m und einem Zentralabstand $52,5m$ ($1,5 \cdot d$) beträgt 35%; vergleiche Abschnitt „5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld“. Daraus berechnet sich nach der Theorie der

zugeordneten Flächen eine Festenspannung von ca. $1,5 \cdot \sigma_{yy}$. Der Vergleich mit jener aus der Simulation von $1,2 \cdot \sigma_{yy}$ (Abbildung 81) zeigt ebenso, dass die Theorie der zugeordneten Flächen in gewissem Maße zur Abschätzung der Vertikalspannungen herangezogen werden kann.

- Die Steifigkeit einer freistehenden Feste kann nach Gleichung 12 berechnet werden. Da es sich beim Raise-mining Festensystem um eine Art Festenverbund handelt, kann diese Definition der Steifigkeit nicht zur Berechnung der Steifigkeit des Festensystems herangezogen werden. Untersuchungen betreffend diese sind nicht Umfang dieser Arbeit. Allerdings sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Festen des Raise-mining Abbaus mit großer Wahrscheinlichkeit eine höhere Steifigkeit als jene eines klassischen Festenbaus besitzen. Der Grund dafür liegt im Umstand der horizontalen Einspannung der Festen.

5.3.2 Abbaufeldbreite

In diesem Abschnitt wird untersucht wie eine zunehmende Breite des Abbaufelds die Spannungsumlagerungen in den Festen und Auflagern beeinflusst. Dabei wird zusätzlich zum Abbaufeld mit 4 Kammern aus dem vorhergehenden Abschnitt noch ein Abbaufeld mit 8 beziehungsweise 12 Kammern betrachtet. Die Simulation erfolgt unter denselben Randbedingungen wie jene für das Abbaufeld mit 4 Kammern. Da der vorhergehende Abschnitt gezeigt hat, dass die Spannungsumlagerungen für verschiedene Zentralabstände dieselben Merkmale aufweisen, werden die Simulationen der Abbaufelder mit 8 beziehungsweise 12 Kammern nur mehr mit einem Zentralabstand von $1,5 \cdot d$ durchgeführt. Die Spannungserhöhungen für andere Zentralabstände können an Hand jener des Abbaufelds mit 4 Kammern abgeschätzt werden. Des Weiteren kann eine Variation der Parameter aus dem Kapitel „5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer“ mit den Ergebnissen aus diesem beurteilt werden.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wiederum an Hand von farbkodierten

Spannungsverteilungen, wobei die Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen betrachtet werden. Dazu werden zwei Schnitte verwendet: Schnitt 1 ist vertikal und durchschneidet die Kammern in deren Mittelpunkten. Schnitt 2 ist horizontal und durchschneidet die Kammern auf halber Kammerhöhe; vergleiche Abbildung 88. Des Weiteren werden die Spannungsverläufe entlang einer Messlinie ausgewertet. Diese wird als Messlinie 1 bezeichnet und befindet sich auf halber Höhe der Kammern und verläuft durch deren Mittelpunkte. Sie beginnt und endet in den Auflagern und hat von den äußersten Kammerulmen jeweils einen Abstand von 5 Zentralabständen; vergleiche Abbildung 88. Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

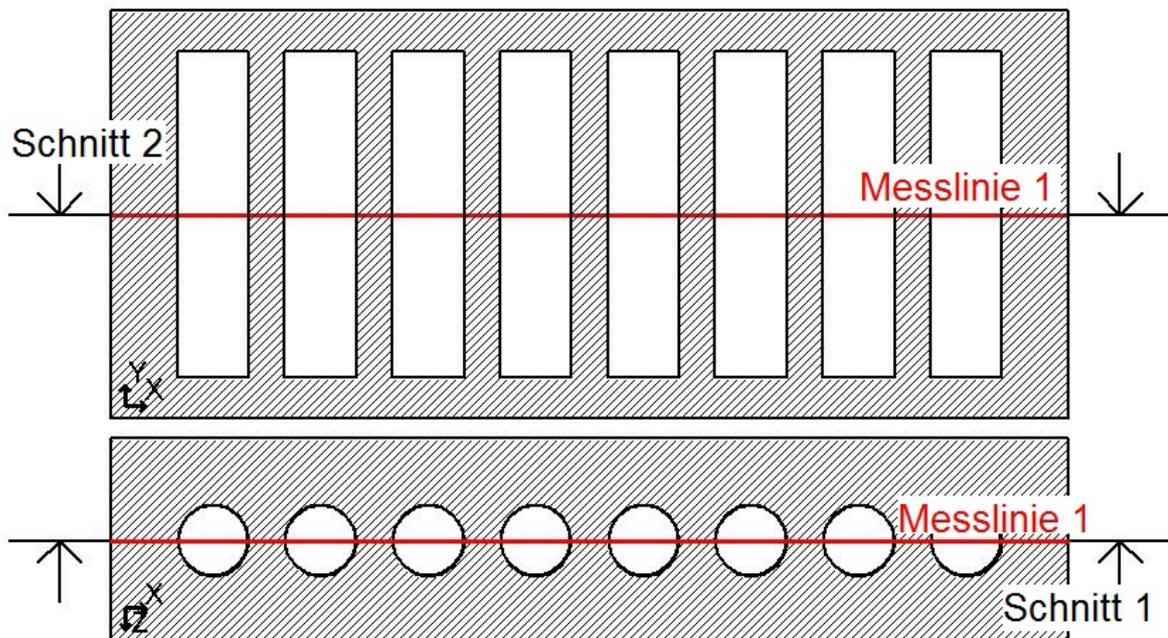


Abbildung 88: Lage von Schnitt 1 und 2 sowie Messlinie 1

In Abbildung 89 bis Abbildung 95 sind die farbkodierten Spannungsverteilungen eines Abbaufelds mit 8 nebeneinander angeordneten Kammern mit einem Zentralabstand von $1,5 \cdot d$ dargestellt. Da sie dieselben Eigenschaften und Merkmale wie jene eines Abbaufelds mit 4 Kammern (Abbildung 74 bis Abbildung 80) aufweisen, werden keine weiteren Anmerkungen zu diesen gemacht.

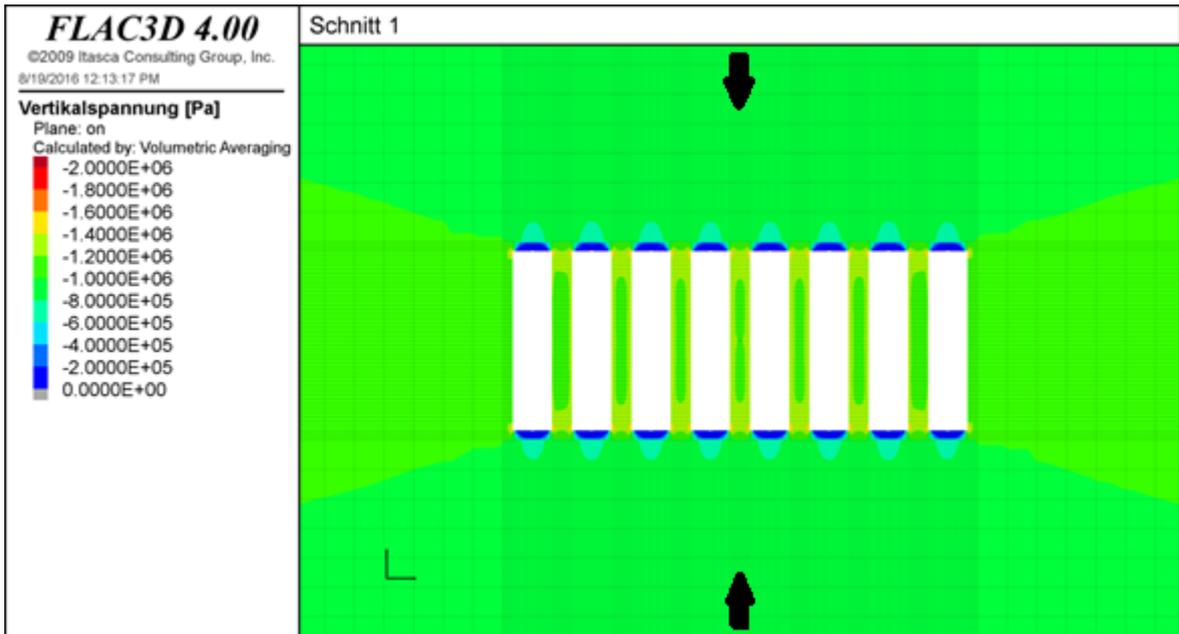


Abbildung 89: Vertikalspannungen im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

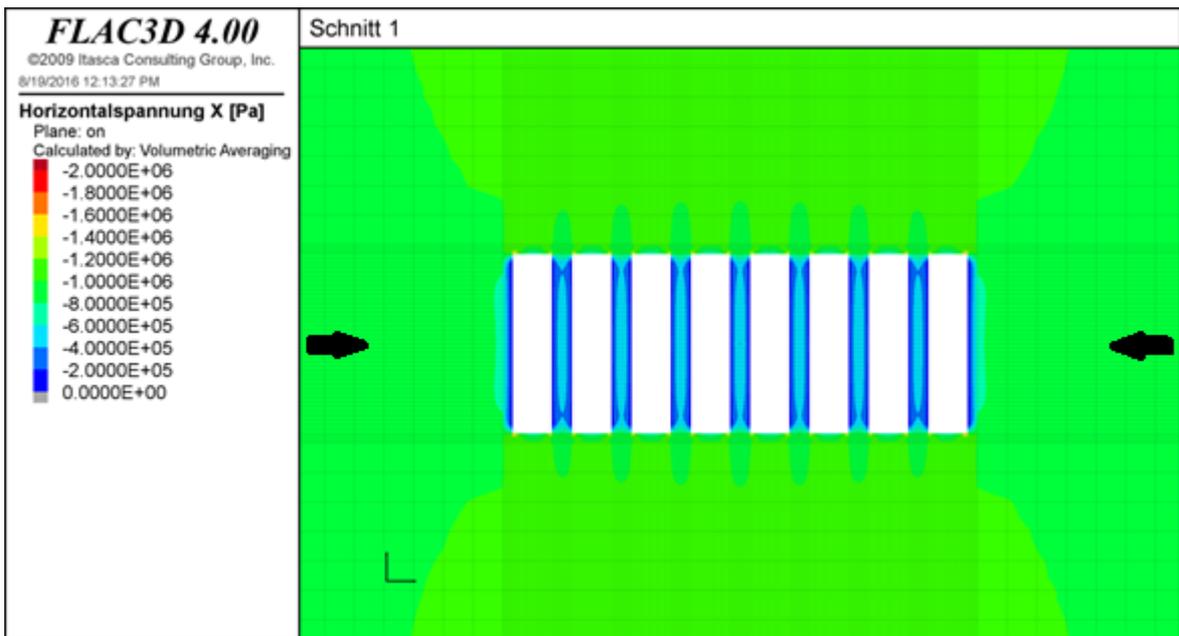


Abbildung 90: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

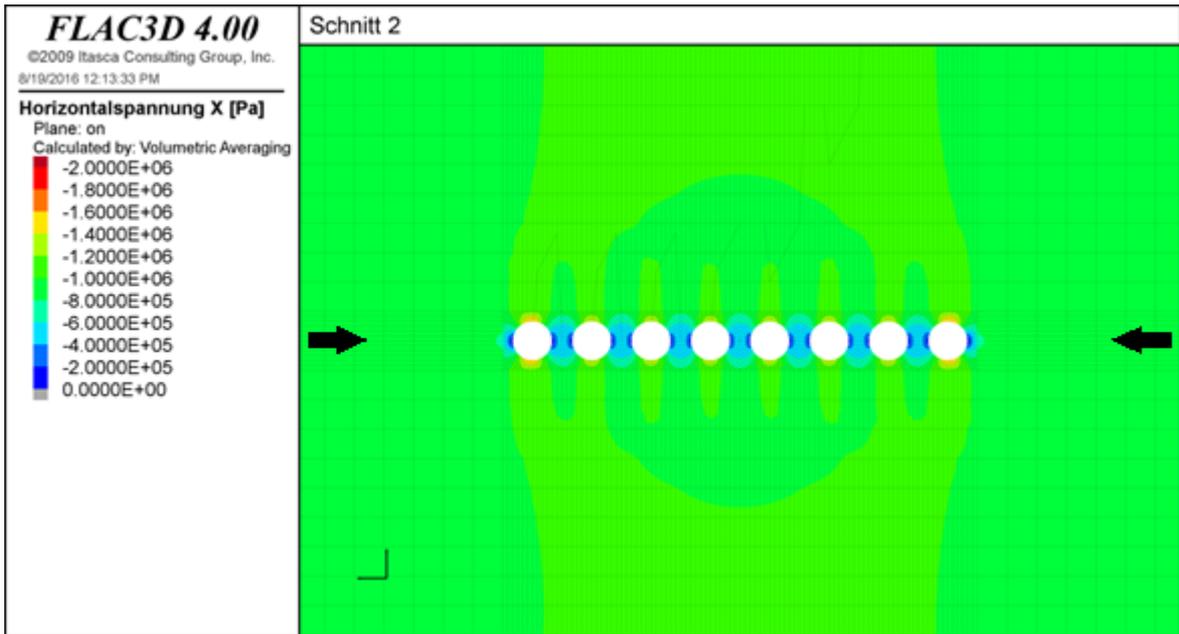


Abbildung 91: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

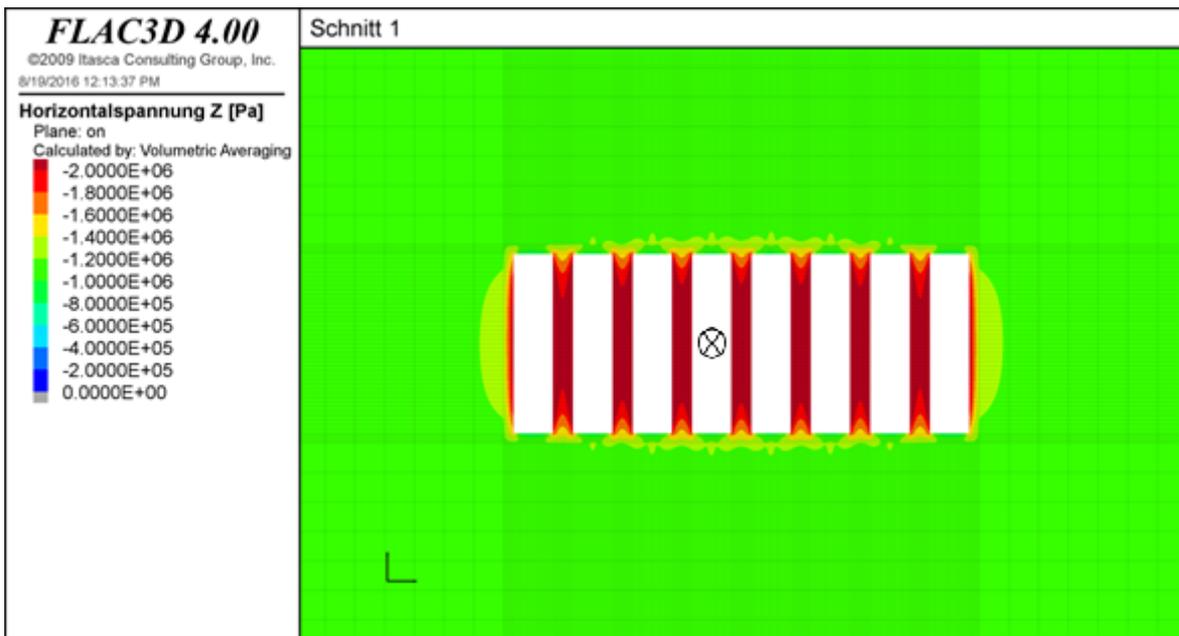


Abbildung 92: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

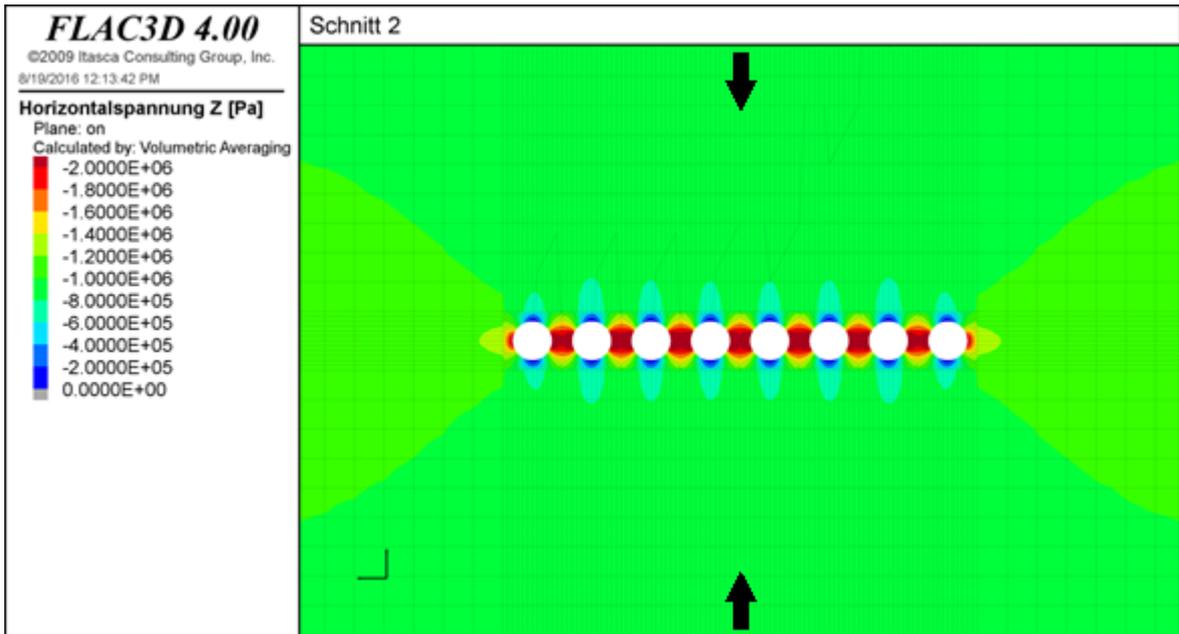


Abbildung 93: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

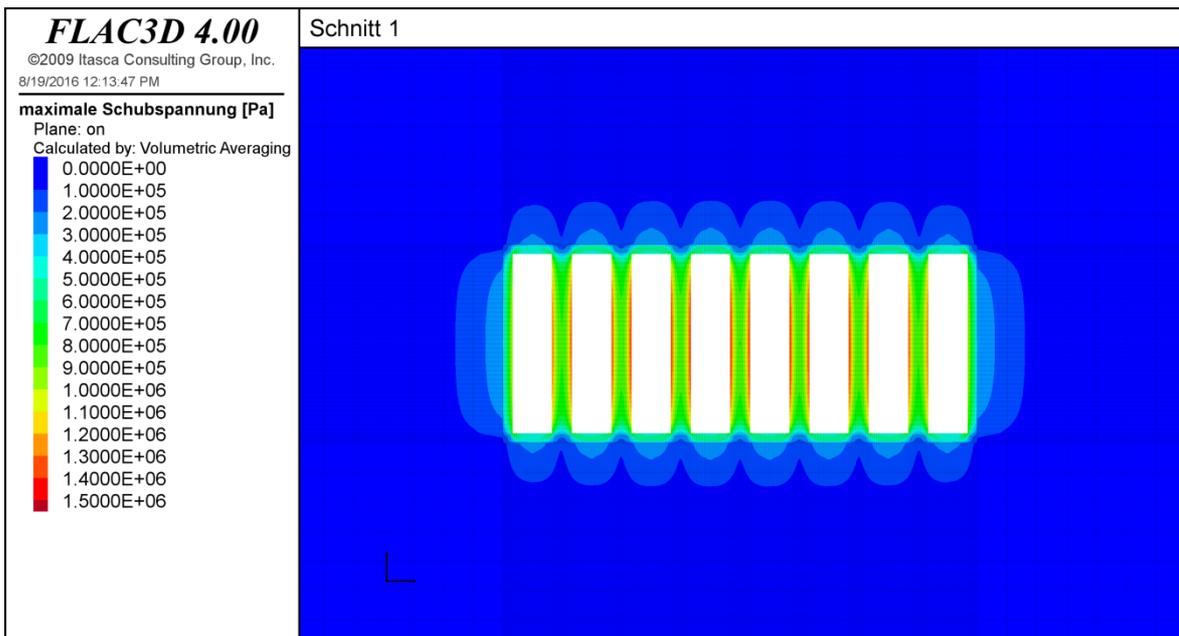


Abbildung 94: Schubspannungen im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

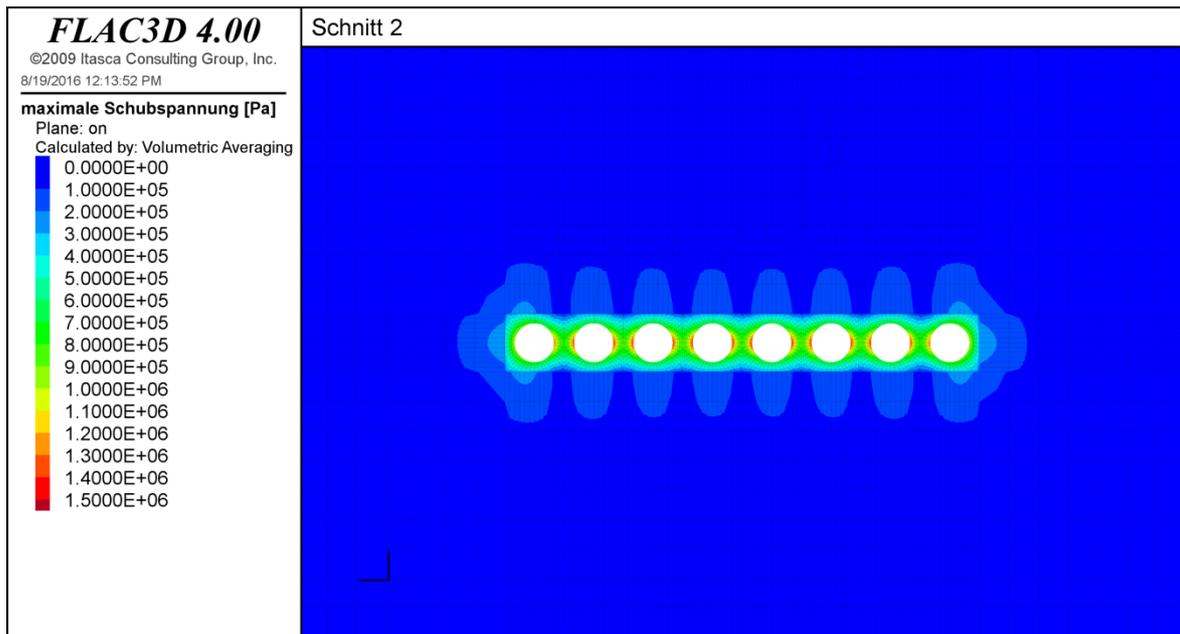


Abbildung 95: Schubspannungen im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

Die Spannungsverläufe entlang von Messlinie 1 werden nicht einzeln ausgewiesen. Anstatt dessen werden die durchschnittlichen Spannungen in den Festen herangezogen, um den Einfluss der Vergrößerung des Abbaufelds zu quantifizieren (Abbildung 96 bis Abbildung 99). Die Bezeichnung der Festen beginnt dabei jeweils ausgehend von der linken Seite des Baufelds mit der Nummer 1. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte bei einer Vergrößerung des Abbaufelds zusammengefasst:

- Die Festen in der Mitte des Baufelds sind am stärksten belastet.
- Im Allgemeinen steigen die Spannungen in den Festen bei einer Vergrößerung der Baufeldbreite an.
- Der Anstieg der Spannungen zwischen einem Baufeld mit 4 und 8 Kammern ist deutlich größer als jener zwischen einem Baufeld mit 8 und 12 Kammern.

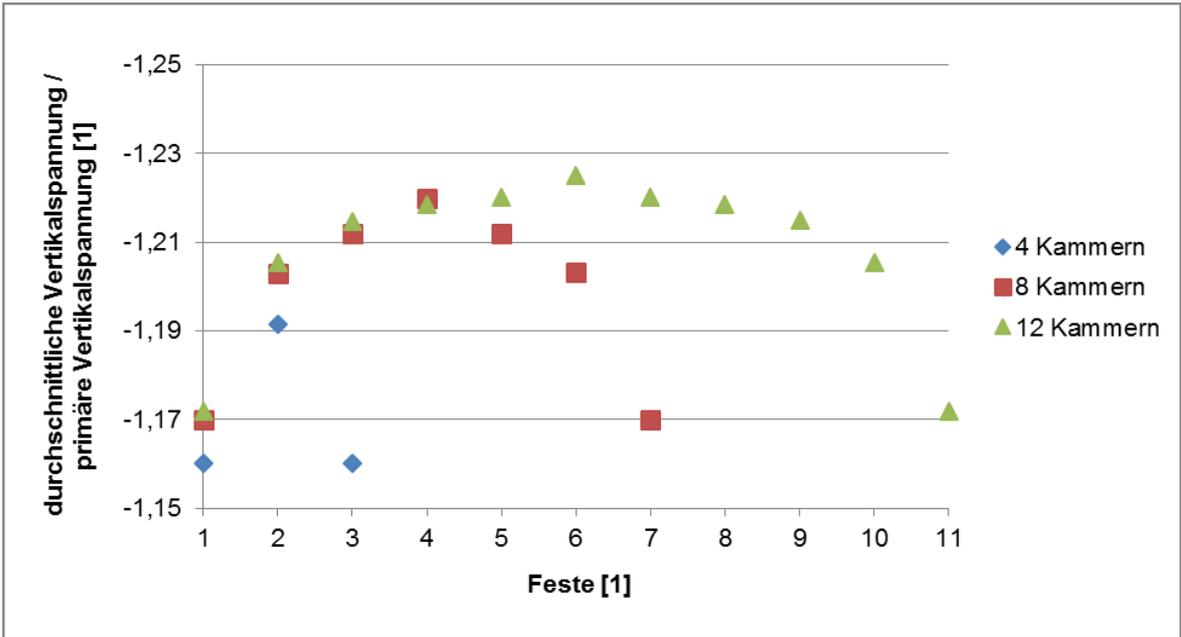


Abbildung 96: Vergleich der durchschnittlichen Vertikalspannungen in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

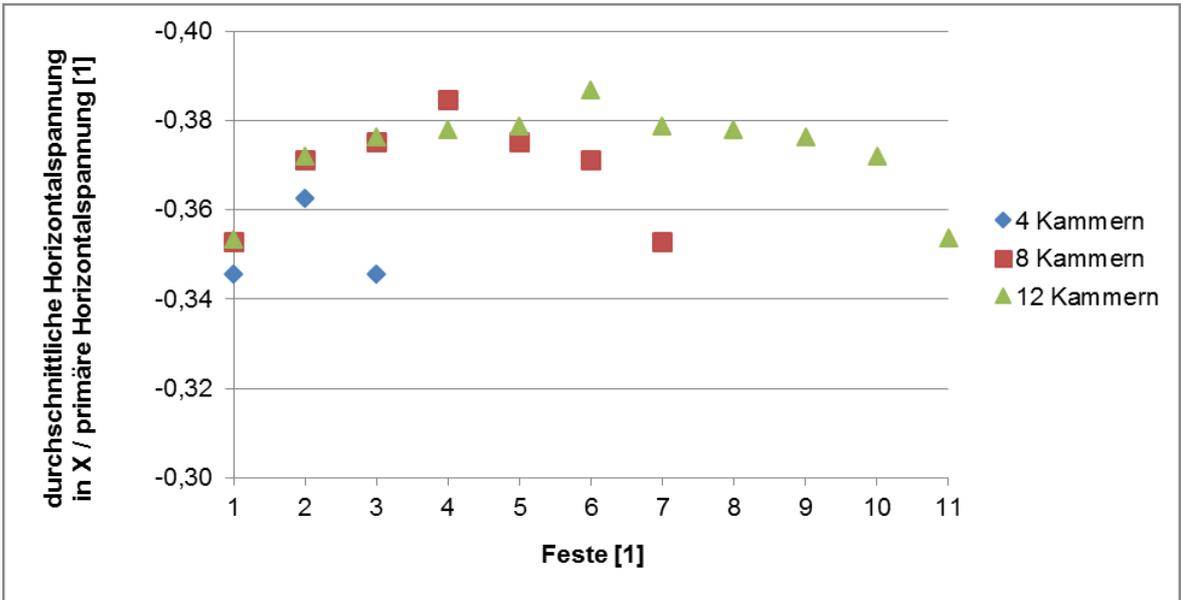


Abbildung 97: Vergleich der durchschnittlichen Horizontalspannungen in X-Richtung in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

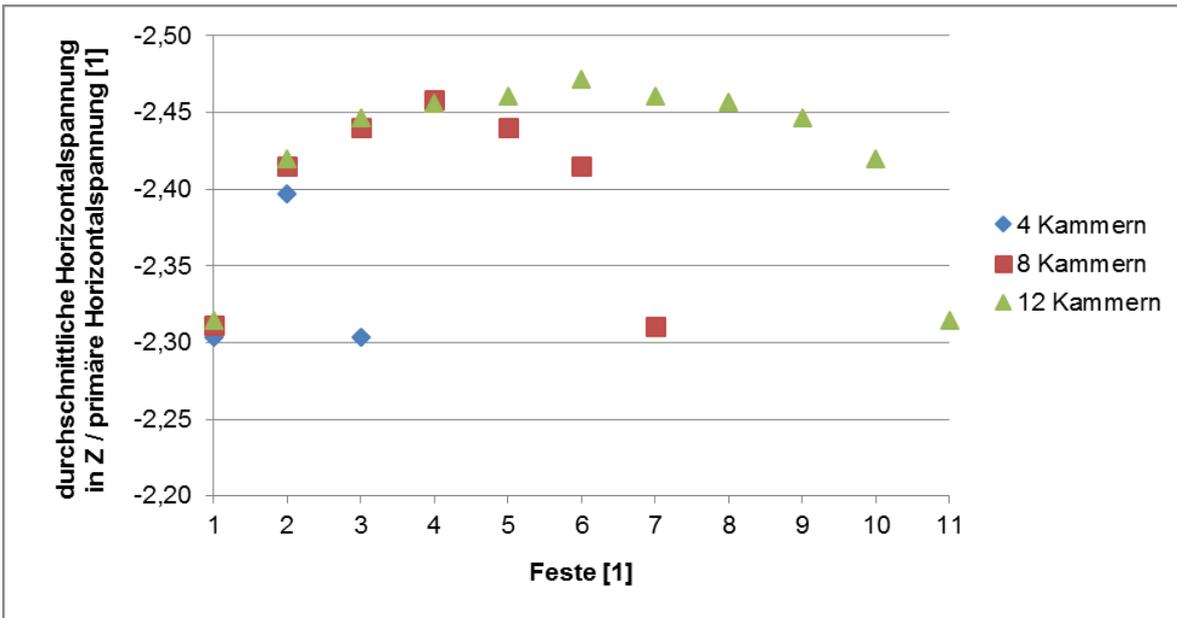


Abbildung 98: Vergleich der durchschnittlichen Horizontalspannungen in Z-Richtung in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

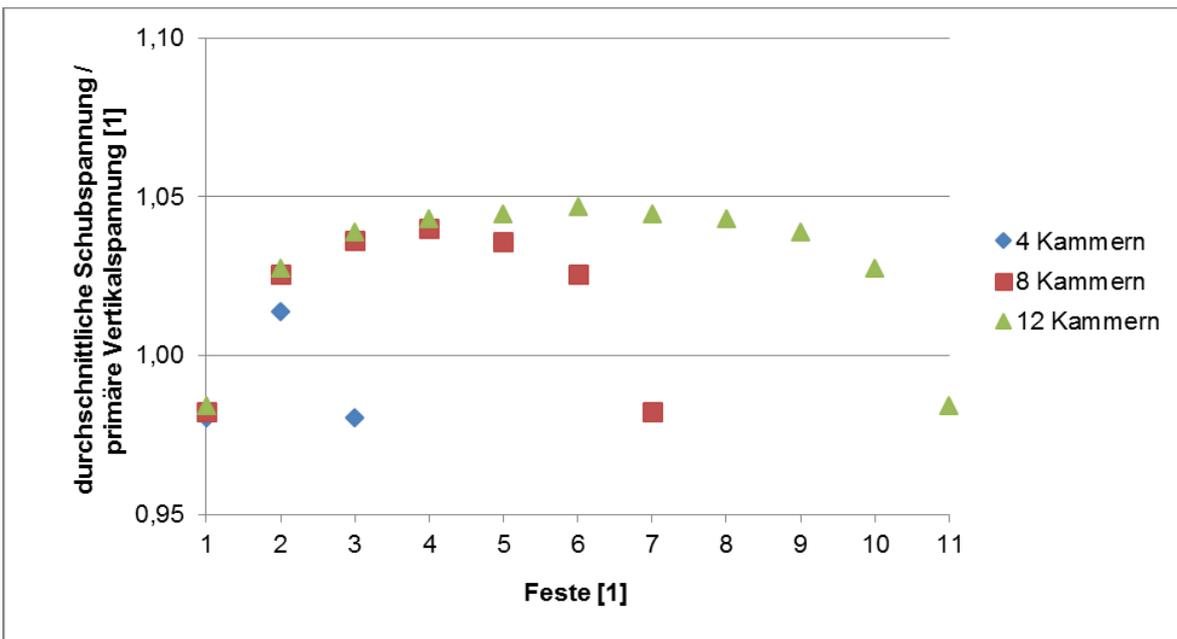


Abbildung 99: Vergleich der durchschnittlichen Schubspannungen in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

Der Vergleich der Spannungsanstiege mit jenen eines klassischen Festenbaus zeigt, dass sich die Festenspannungen beim klassischen Festenbau bei einer Vergrößerung des Baufelds von 8 auf 12 Örter deutlich stärker erhöhen als beim betrachteten Raise-mining Abbauverfahren; vergleiche Abbildung 87. Eine

mögliche Ursache, dass sich beim Raise-mining Abbau die Spannungen bereits ab einer deutlich kleineren Spannweite nicht mehr erhöhen, könnte sein, dass sich die Horizontalspannungen bereits bei kleinen Spannweiten hauptsächlich in die First- und Sohlbereiche des Abbaufelds umlagern und die Vertikalspannungen in die Auflagerbereiche entlang des Baufelds.

5.3.3 Versagen von Festen

Nachdem im letzten Abschnitt die Vergrößerung des Baufelds analysiert worden ist, wird in diesem Kapitel untersucht, wie sich das Versagen einer Feste auf die Spannungsumlagerungen in einem Baufeld auswirkt. Dabei wird ein Baufeld mit 8 Kammern, dessen Geometrie jener aus dem vorhergehenden Abschnitt entspricht, herangezogen. Die versagende Feste ist die mittlere Feste des Abbaufelds, vergleiche Abbildung 100. Das Versagen wird durch ein vollständiges Entfernen der Feste simuliert. An dieser Stelle wird zudem festgehalten, dass der hier betrachtete Fall eine Extremsituation darstellt. In der Realität ist ein solches, komplettes Versagen der Feste äußerst unwahrscheinlich, weil die Festen in Versatz eingebettet sind, dadurch nicht vollständig Versagen können und eine gewisse Restfestigkeit besitzen. Durch diese stützen sie das umliegende Gebirge auch im Versagensfall zumindest geringfügig.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wiederum an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen, wobei die Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen betrachtet werden. Dazu werden zwei Schnitte verwendet: Schnitt 1 ist vertikal und durchschneidet die Kammern in deren Mittelpunkten; Schnitt 2 ist horizontal und durchschneidet die Kammern auf halber Kammerhöhe; vergleiche Abbildung 100. Des Weiteren werden die Spannungsverläufe entlang einer Messlinie ausgewertet. Diese wird als Messlinie 1 bezeichnet und befindet sich auf halber Höhe der Kammern und verläuft durch deren Mittelpunkte. Sie beginnt und endet in den Auflagern und hat von den äußersten Kammerulmen jeweils einen Abstand von 5 Zentralabständen; vergleiche Abbildung 100. Bei der Auswertung der

Ergebnisse müssen die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden. Die Kammer, die durch das Versagen der Feste entsteht, wird als „vereinte Kammer“ bezeichnet.

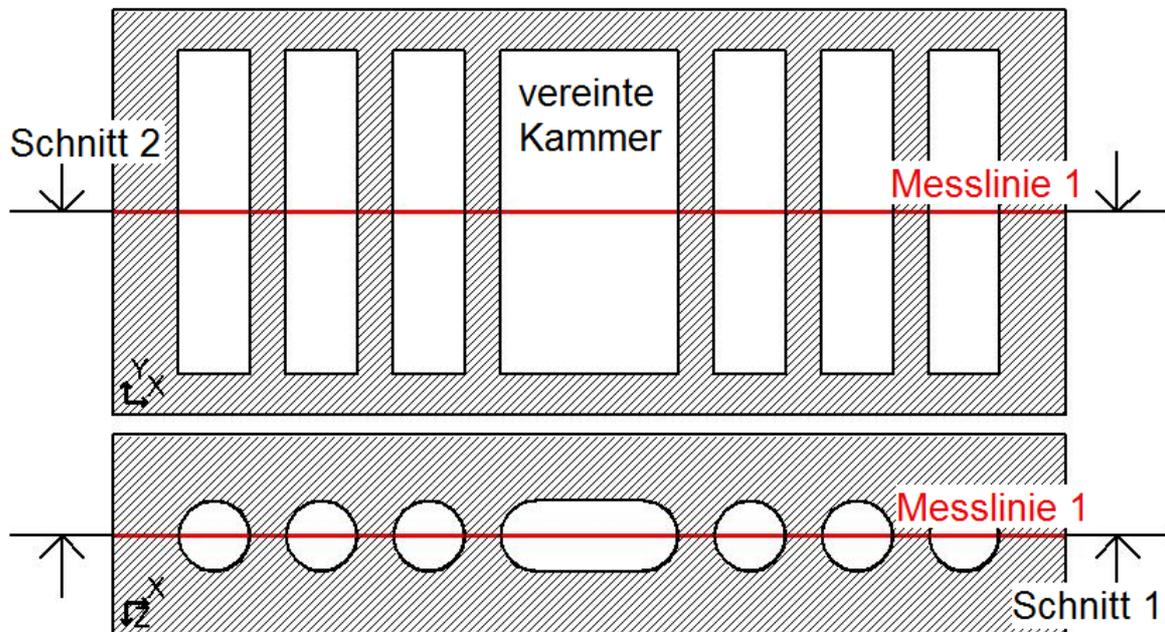


Abbildung 100: Lage der Schnitte 1 und 2 sowie der Messlinie 1

Abbildung 101 bis Abbildung 108 stellen die farbkodierte Spannungsverteilungen in den Schnitten 1 und 2 dar. Vergleicht man diese mit jenen des Abbaufelds ohne Versagen einer Kammer (Abbildung 89 bis Abbildung 95), so ist zu erkennen, dass sich die Spannungsverteilungen im Allgemeinen nur in der Umgebung der versagten Feste ändern. Die wesentlichen Punkte dieser Veränderungen werden im Folgenden kurz beschrieben:

- Die Spannungen in den Festen, die unmittelbar an die vereinte Kammer angrenzen, steigen signifikant an.
- An den langen Ulmen der vereinten Kammer bilden sich große druckentspannte Bereiche aus, wobei allerdings keine Zugspannungen auftreten.
- Die Horizontalspannungen in Z-Richtung in der Firste und Sohle der vereinten Kammer steigen signifikant an.
- Die Auswirkungen des Versagens der Feste betreffen im Allgemeinen

ausschließlich die unmittelbare Umgebung dieser Feste. Bereits in den übernächsten Festen wirkt sich das Versagen der Feste nur mehr geringfügig aus.

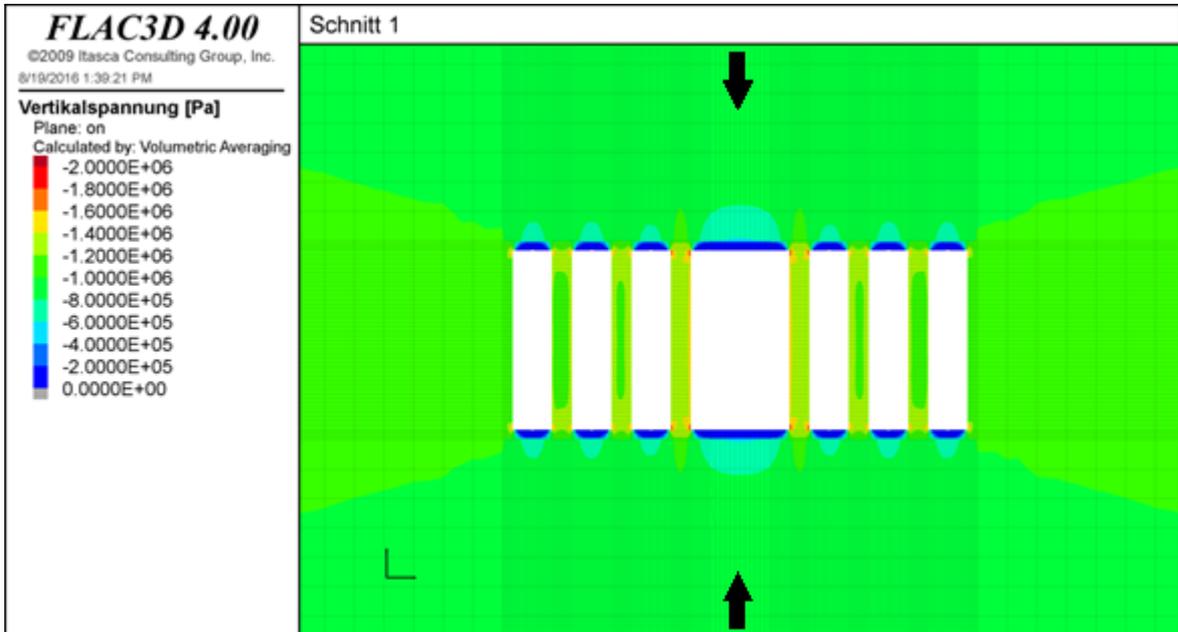


Abbildung 101: Vertikalspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

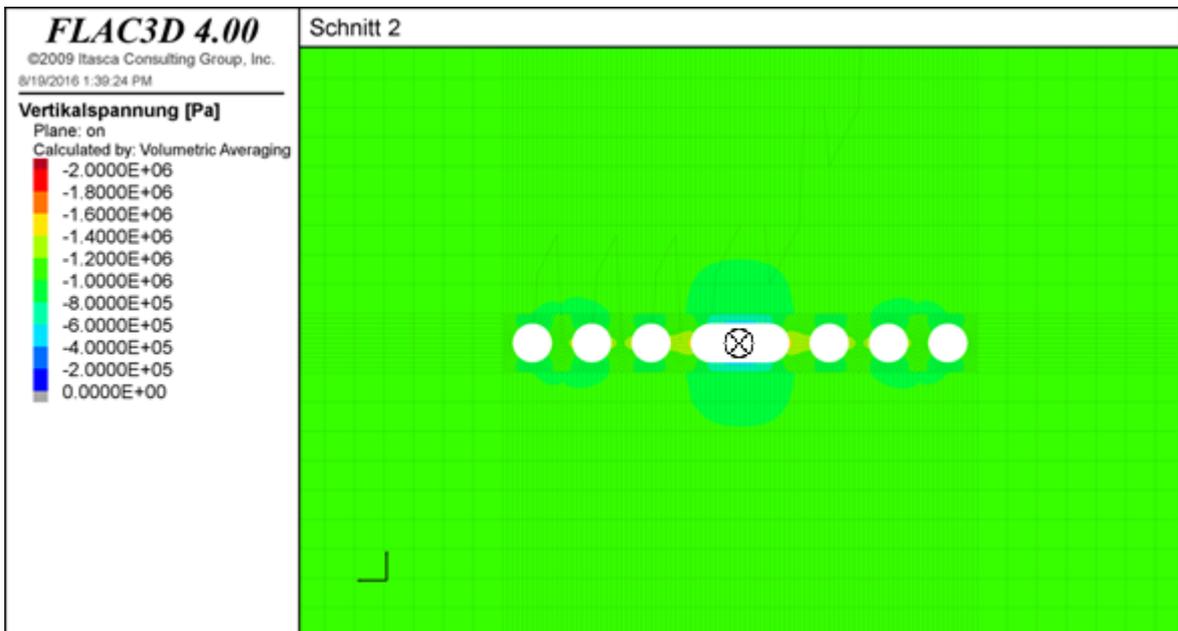


Abbildung 102: Vertikalspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

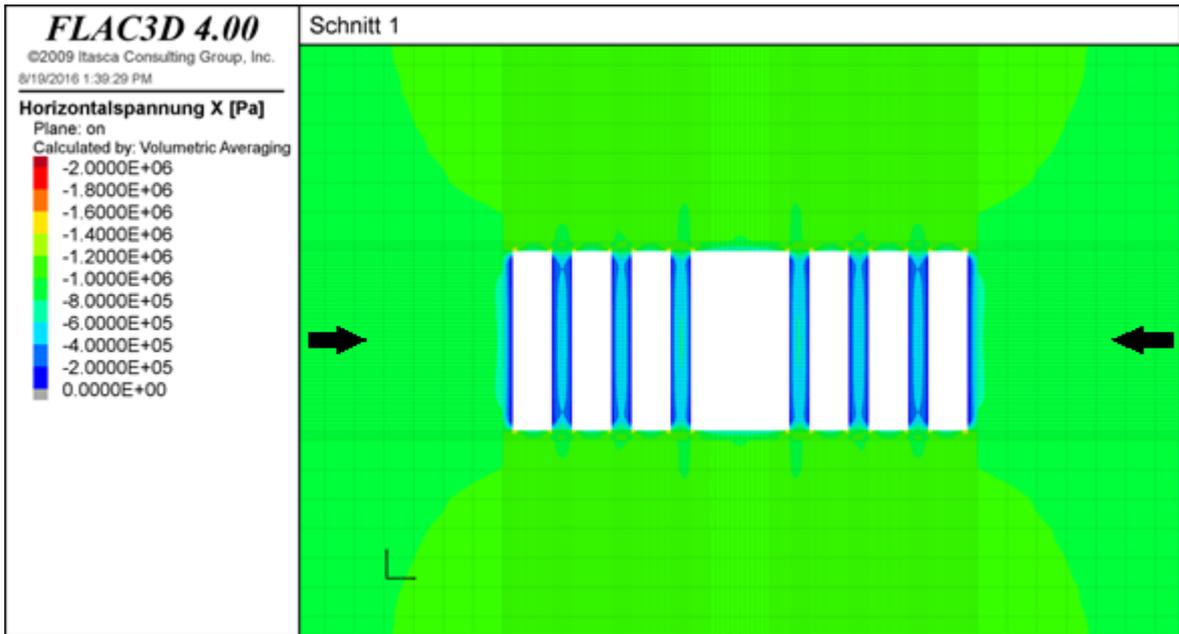


Abbildung 103: Horizontalspannungen in X-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

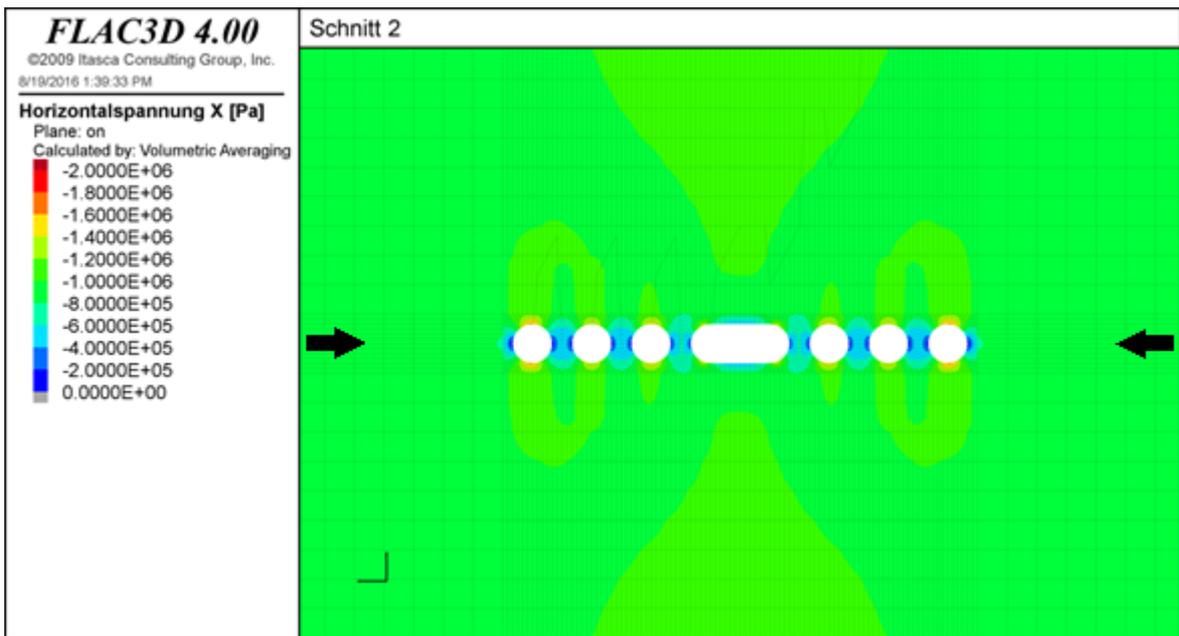


Abbildung 104: Horizontalspannungen in X-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

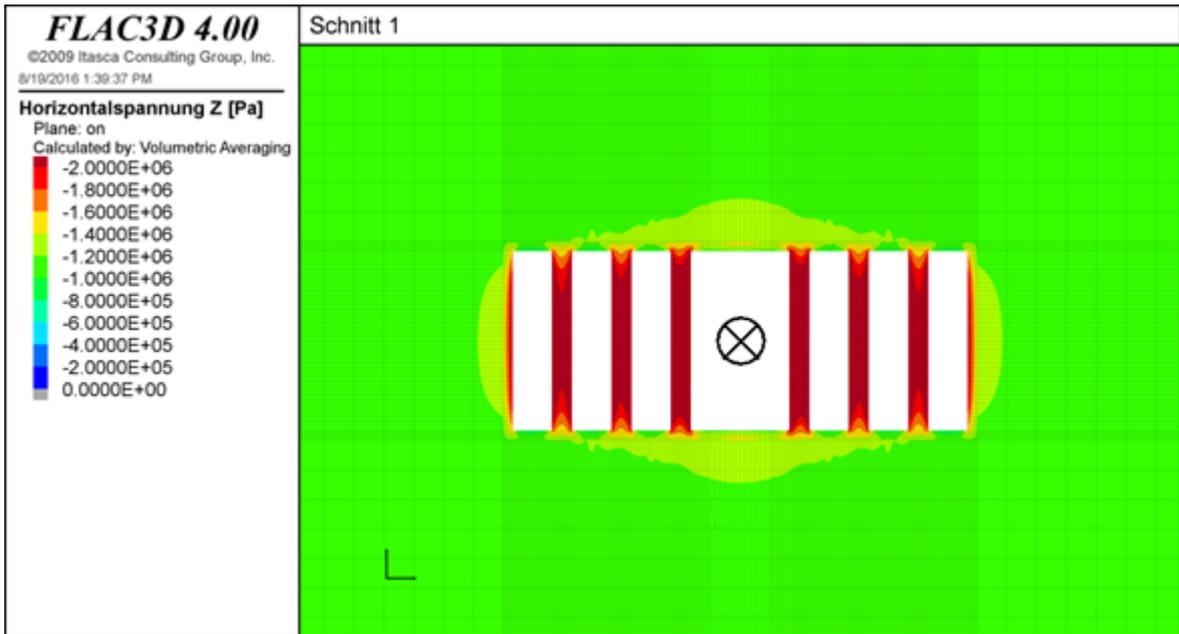


Abbildung 105: Horizontalspannungen in Z-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

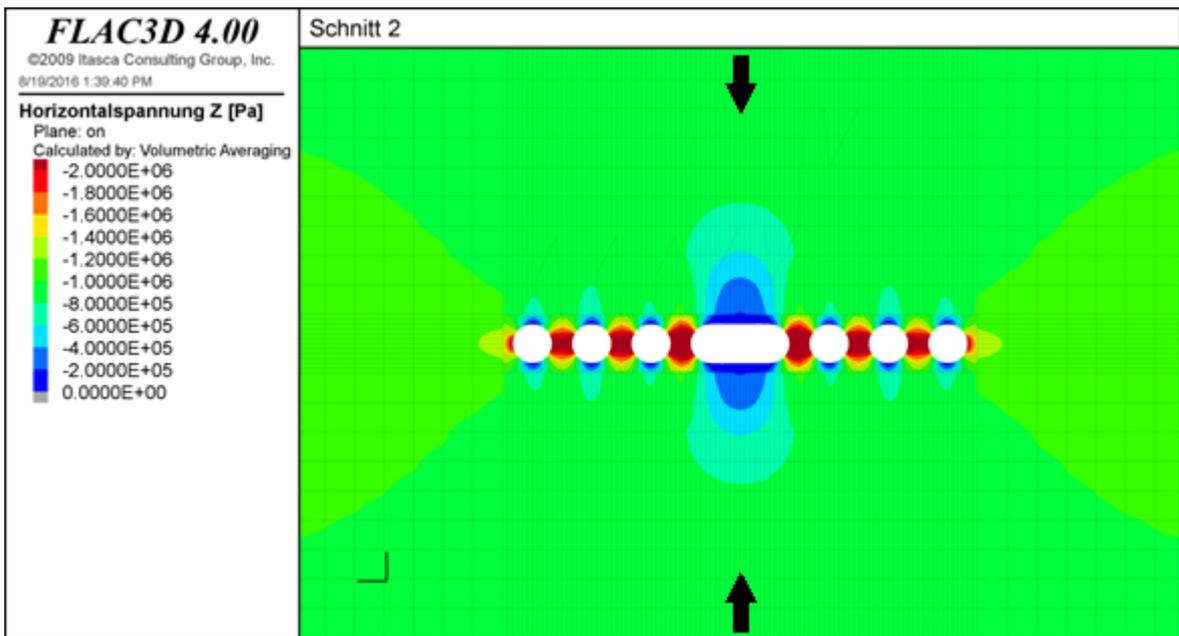


Abbildung 106: Horizontalspannungen in Z-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

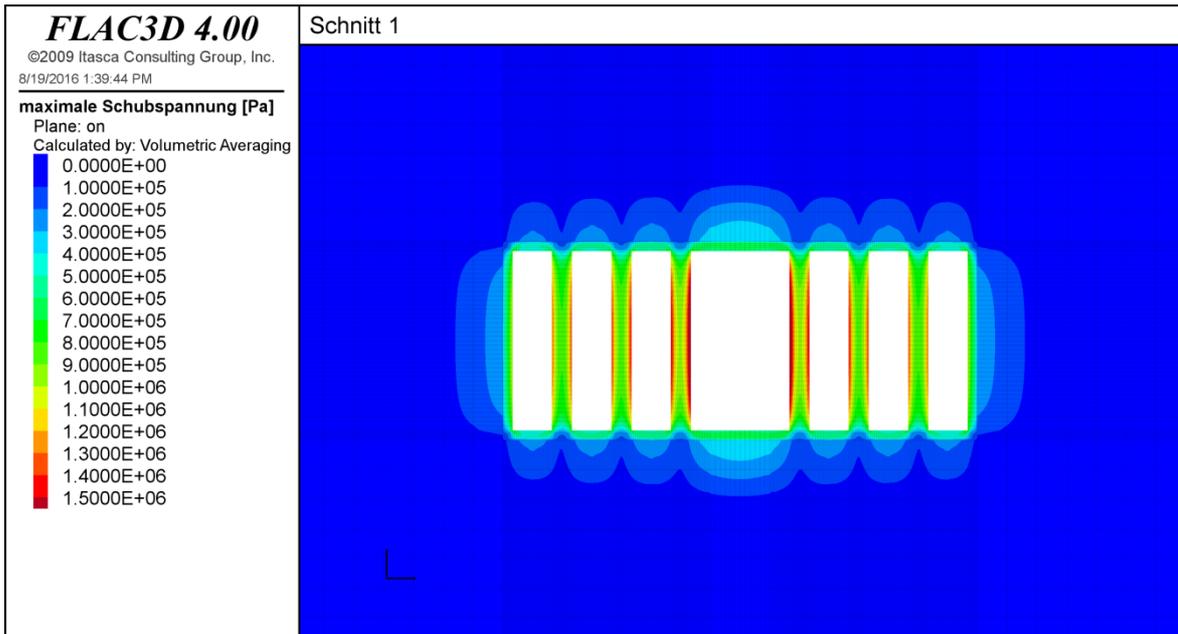


Abbildung 107: Schubspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

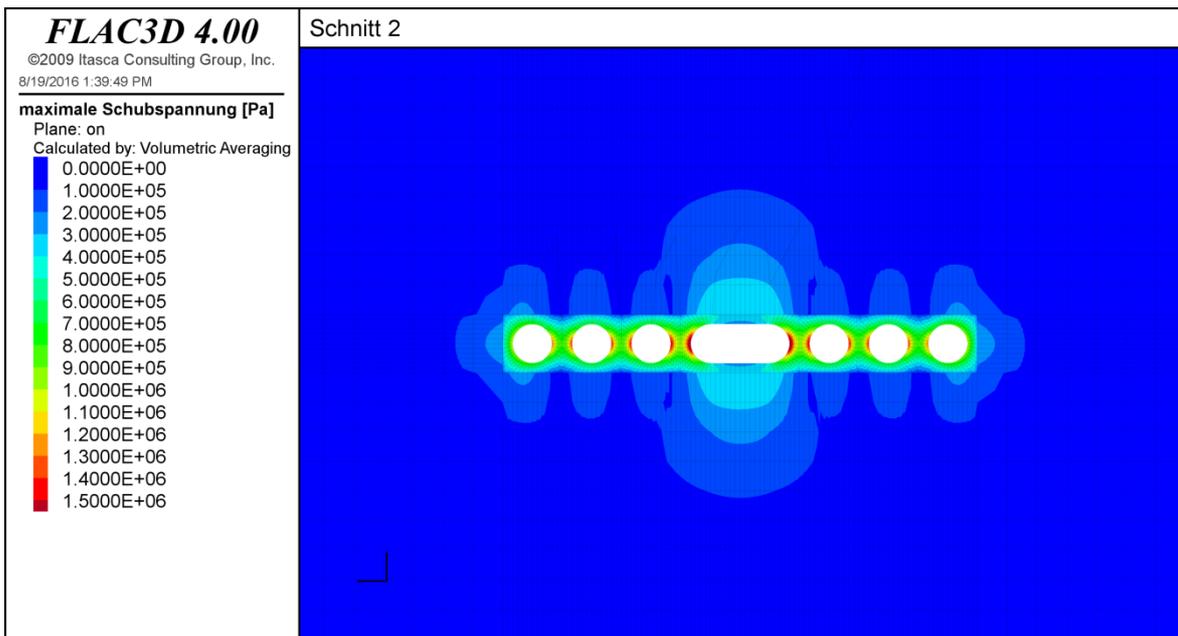


Abbildung 108: Schubspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

Die Spannungsverläufe entlang von Messlinie 1 bei Versagen der mittleren Feste in einem Abbaufeld mit 8 Kammern sind in Abbildung 109 bis Abbildung 112 dargestellt. Zum Vergleich sind zudem die Spannungsverläufe ohne Versagen der Feste ausgewiesen. Des Weiteren zeigt Abbildung 113 die prozentuelle Erhöhung der durchschnittlichen Spannungen im Abstand von einer beziehungsweise zwei

Festen von der versagten Feste. Im Wesentlichen werden durch die Analyse der Spannungen entlang von Messlinie 1 die Erkenntnisse aus den Spannungsverteilungen bestätigt: Die Horizontal- und Schubspannungen in den Festen, die an die vereinte Kammer angrenzen, steigen um in etwa 20% und die Vertikalspannungen um in etwa 10% an. In den darauf folgenden Festen wirkt sich das Versagen der Feste nur mehr äußerst geringfügig auf die Spannungsumlagerungen aus.

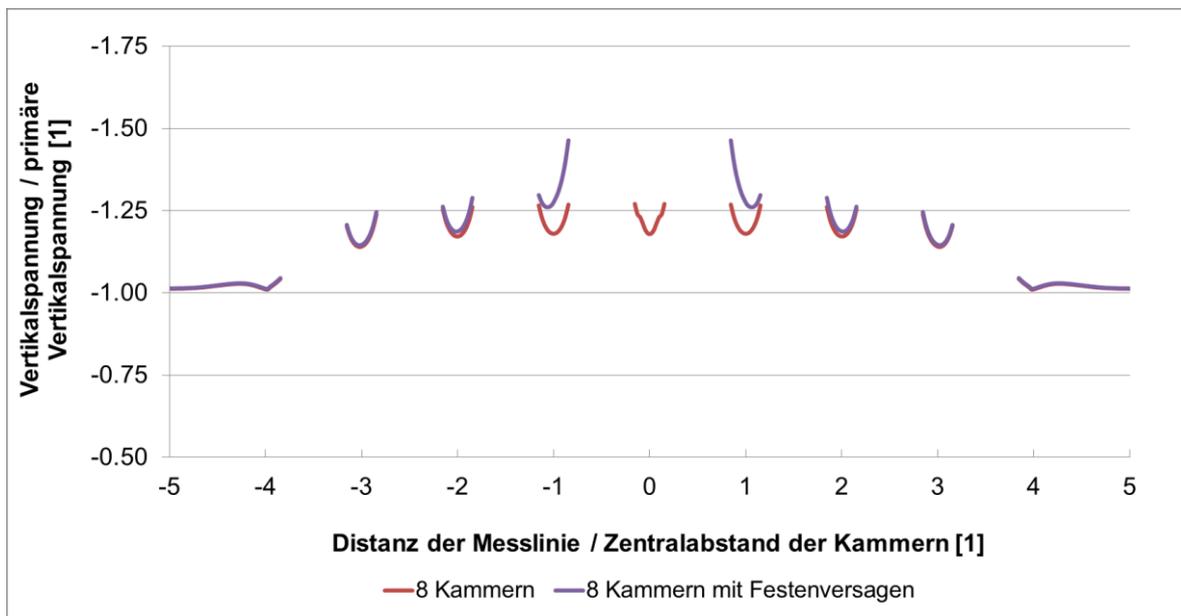


Abbildung 109: Vergleich der Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

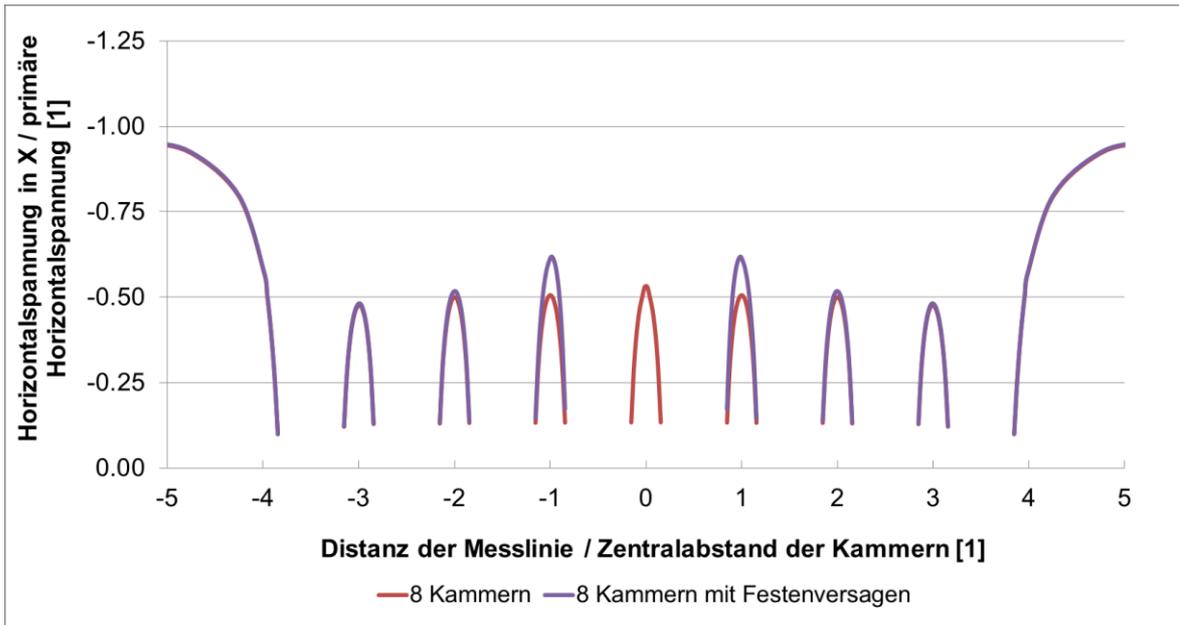


Abbildung 110: Vergleich der Horizontalspannungsverläufe in X-Richtung entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

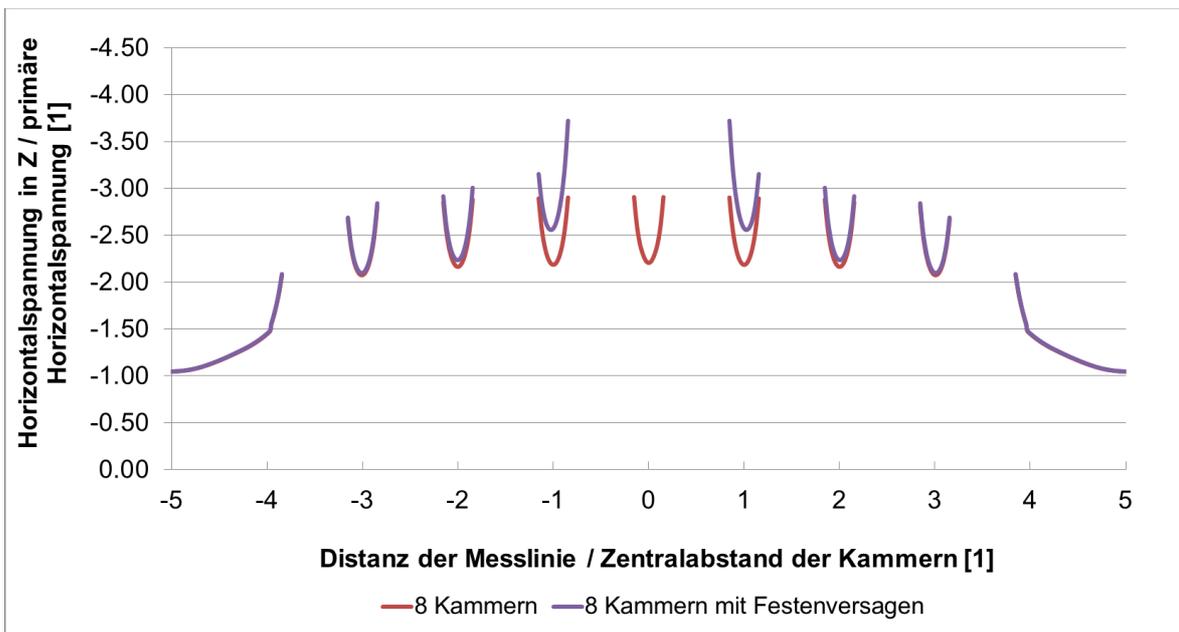


Abbildung 111: Vergleich der Horizontalspannungsverläufe in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

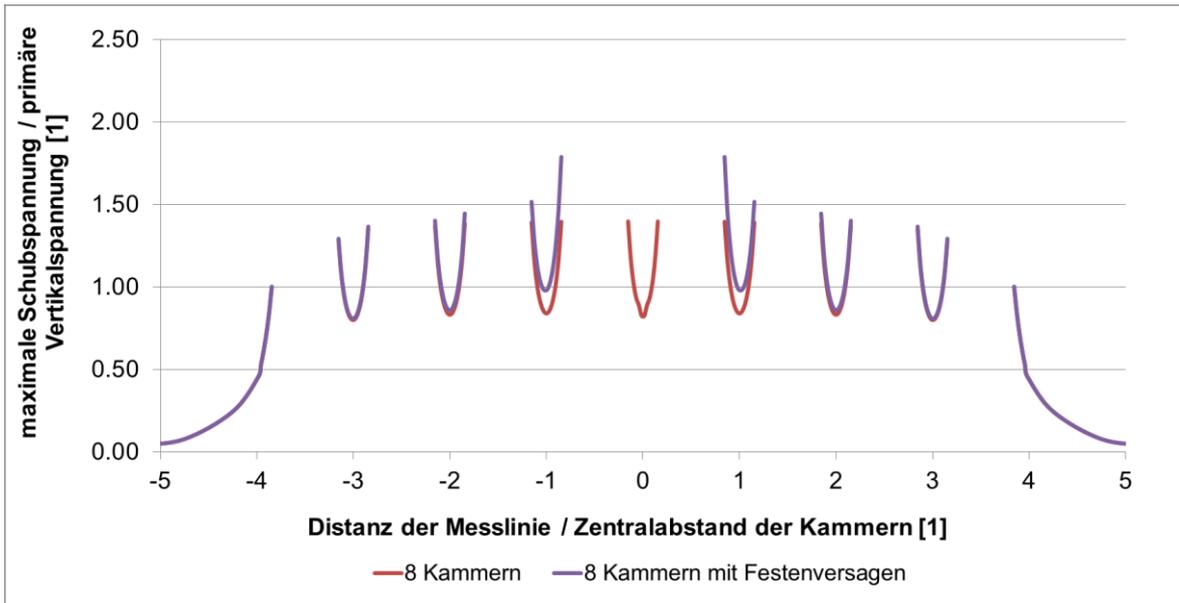


Abbildung 112: Vergleich der Schubspannungsverläufe entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

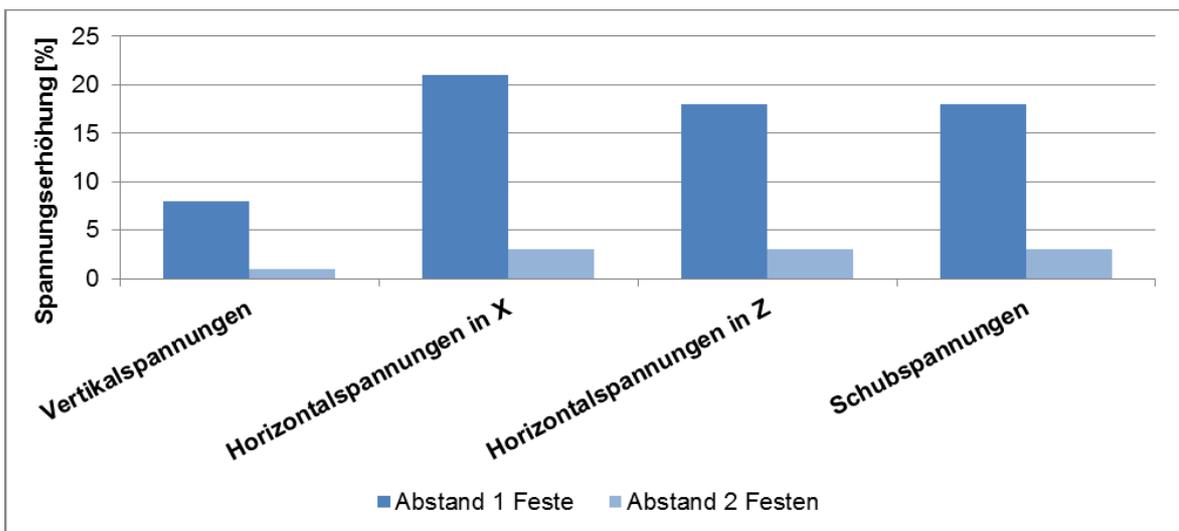


Abbildung 113: Durchschnittliche Erhöhung der jeweiligen durchschnittlichen Spannungen entlang von Messlinie 1 im Abstand von einer beziehungsweise zwei Festen von der versagten Feste

5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Untersuchungen bezüglich der Wechselwirkung und Standfestigkeit von mehreren Kammern kurz zusammengefasst. Bei diesen Untersuchungen sind die Kammern

in einer Richtung nebeneinander angeordnet. Die Auswirkungen einer Anordnung der Kammern in zwei Richtungen werden im nächsten Abschnitt diskutiert. Es sind Kammern, die außerhalb des Einflussbereichs von der Tagesoberfläche beziehungsweise großen Störzonen liegen, simuliert worden. Die Kammergeometrie hat dabei durchwegs jener des Bergbaus Gummern entsprochen (Höhe 160m, Durchmesser 35m, Höhen- zu Durchmesser Verhältnis 4,57), wobei die Firsten horizontal simuliert worden sind. Die primären Vertikal- und Horizontalspannungen haben jeweils 1MPa betragen. Eine Abschätzung des Einflusses von veränderten Eingangsparametern kann mit Hilfe der Ergebnisse des Kapitels „5.2 Einzelne isolierte Abbaukammer“ gemacht werden.

- Die Eigenschaften und Merkmale der resultierenden Spannungsverteilungen sind vergleichbar mit jenen einer einzelnen isolierten Kammer. Allerdings werden sowohl die Höhe als auch die Ausdehnung der Spannungsumlagerungen durch den Abbau von mehreren Kammern nebeneinander stark beeinflusst. Dabei ist jene der Horizontalspannungen und folglich der Schubspannungen deutlich ausgeprägter als jene der Vertikalspannungen.
- Die Festen stellen im Allgemeinen Bereiche mit stark erhöhten beziehungsweise erniedrigten Horizontal- und Schubspannungen dar. Ob sich die Horizontalspannungen in den Festen erhöhen oder verringern, hängt von der Orientierung des Abbaufelds in Bezug auf die primären Horizontalspannungen ab. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die Orientierung des Abbaufelds zur Richtung der primären Horizontalspannungen einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsumlagerungen und somit auf die Standfestigkeit der Festen hat.
- Aufgrund der oben angeführten Punkte wird der Umstand aus dem vorhergehenden Kapitel bestätigt, dass die Horizontalspannungen für das Raise-mining Abbauverfahren als kritischer als die Vertikalspannungen anzusehen sind.
- Unter der Annahme, dass das Abbaufeld quer zur Richtung einer primären Horizontalspannung ist, sind die resultierenden Verteilungen dieser Horizontalspannung mit jener der Vertikalspannungen in einem

herkömmlichen Festenbau vergleichbar. Aus diesem Grund kann die Theorie der zugeordneten Flächen zur Abschätzung der Horizontalspannungen in den Festen herangezogen werden. Dazu ist das Ausbringen verständlicherweise in horizontaler Richtung zu betrachten. Die Untersuchungen haben des Weiteren gezeigt, dass die Theorie der zugeordneten Flächen auch für die Abschätzung der resultierenden vertikalen Festenspannung verwendet werden kann.

- Die Steifigkeit des Festensystems eines Raise-mining Abbaus ist aufgrund der allseitigen horizontalen Einspannung mit großer Wahrscheinlichkeit größer als diejenige der Festen eines klassischen Kammerbaus. Dieser Umstand beeinflusst in weiterer Folge die Stabilität des Raise-mining Festensystems positiv.
- Der Zentralabstand der Kammern hat keinen Einfluss auf die wesentlichen Eigenschaften und Merkmale der resultierenden Spannungsverteilungen. Bei einer Verringerung des Zentralabstands steigen allerdings die Spannungen in den Festen überproportional stark an. Eine Aussage über den minimal möglichen Zentralabstand, der zur Maximierung des Ausbringens angestrebt werden sollte, kann jedoch nicht gemacht werden, weil dieser im Allgemeinen von den spezifischen Bedingungen betreffend Gebirge und primären Spannungszustand eines Bergbaus abhängt.
- Bei Erhöhung der Spannweite eines Baufelds steigen die Spannungen in den Festen in der Mitte des Baufelds zunächst signifikant an. Ab einer Baufeldbreite von 8 Kammern fallen diese Erhöhungen jedoch nur mehr geringfügig aus. Dies ist ein deutlicher Unterschied zum klassischen Festenbau, bei dem die Festenspannungen auch bei größeren Spannweiten noch deutlich zunehmen.
- Das Versagen einer Feste hat nur eine lokal begrenzte Auswirkung auf die Spannungsumlagerungen und somit auf die Standfestigkeit der Festen in der unmittelbaren Umgebung. Bereits in einem Abstand von zwei Festen wirkt sich das Versagen einer Feste nur mehr äußerst geringfügig aus.

5.3.5 Fallbeispiel: Erweiterung eines Abbaufelds in Gummern

Für eine Erweiterung des Abbaufelds in eine Richtung werden an dieser Stelle keine Standfestigkeitsuntersuchungen für den Bergbau Gummern gemacht. Eine Analyse der Standfestigkeit eines Abbaufelds kann im Abschnitt „5.5.4 Fallbeispiel: Abbaufeld inklusive Abbausequenz in Gummern“ gefunden werden.

5.4 Geometrie des Abbausystems

Im letzten Kapitel „5.3 Standsicherheit des gesamten Abbaubereichs“ sind die Auswirkungen des Abbaus von mehreren Kammern untersucht worden. Diese sind dabei ausschließlich in einer Richtung nebeneinander angeordnet worden, weil dadurch die Anzahl der variablen Zuschnittsparameter sinkt und in weiterer Folge die Interpretation der Ergebnisse einfacher ist. In diesem Kapitel werden nun die Auswirkungen einer Anordnung der Kammern in zwei Richtungen untersucht und analysiert, inwiefern die Ergebnisse aus den letzten Abschnitten auf eine solche Abbausituation zutreffen. Dazu wird zunächst ein Abbaufeld mit 12 Kammern betrachtet, wobei in X-Richtung 4 Kammern und in Z-Richtung 3 Kammern nebeneinander angeordnet sind. Dabei werden zudem die Anordnung der Kammern zueinander variiert und die Auswirkungen des Versagens einer Feste analysiert. In weiterer Folge wird das Abbaufeld als „weicher Einschluss“ beschrieben und mit Hilfe dessen die Auswirkungen von größeren Abbaufeldern sowie die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Abbaufeldern untersucht.

5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld

In diesem Abschnitt werden die Spannungsumlagerungen in einem Abbaufeld mit 12 Kammern untersucht. Dieses hat eine Größe von 4 Kammern in X-Richtung mal 3 Kammern in Z-Richtung. Als Kammergeometrie wird wiederum jene des

Bergbaus Gummern herangezogen (Höhe 160m und Durchmesser 35m) und es werden zwei verschiedene Anordnungen der Kammern in einem Abbaufeld untersucht:

1. „quadratische Anordnung“
2. „dreiecksförmige Anordnung“

Die beiden möglichen Anordnungen sind in Abbildung 114 gezeigt. Bei der quadratischen Anordnung sind die Abstände der Kammerreihen in X- und Z-Richtung gleich groß. Daraus resultieren sowohl in X- als auch in Z-Richtung durchgehende Festen; vergleiche Abbildung 114. Im Gegensatz dazu sind die Kammerreihen bei der dreiecksförmigen Anordnung in X-Richtung zueinander versetzt. Da die Zentralabstände jedoch zwischen allen Kammern gleich sind, resultiert daraus ein geringerer Abstand der Kammerreihen in Z-Richtung; vergleiche Abbildung 114.

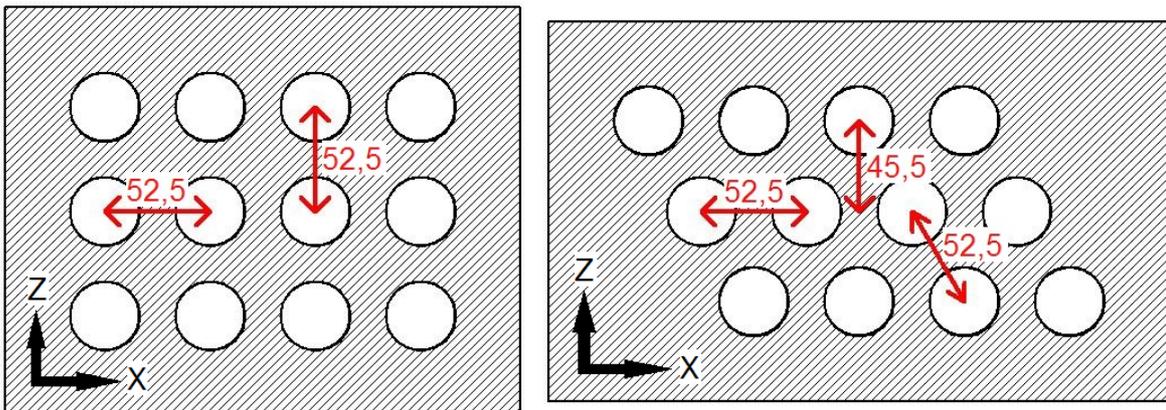


Abbildung 114: Grundrisse einer quadratischen und dreiecksförmigen Kammeranordnung in einem Abbaufeld mit 12 Kammern

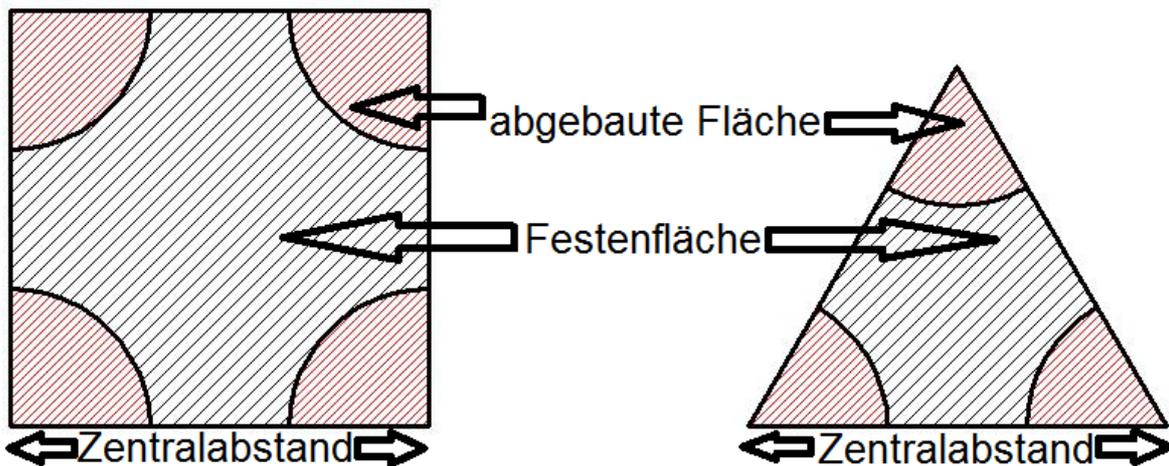


Abbildung 115: Abgebaute Fläche und Festenfläche für eine quadratische (links) und dreiecksförmige (rechts) Kammeranordnung

Damit die beiden Anordnungen miteinander verglichen werden können, werden die Zentralabstände in diesen so gewählt, dass mit beiden Anordnungen dasselbe Ausbringen realisiert werden kann. Dazu wird in dieser Arbeit der Zentralabstand der dreiecksförmigen Kammeranordnung mit einem entsprechenden Faktor angepasst. Die Ermittlung dieses Faktors ist im Folgenden beschrieben.

Das Ausbringen einer quadratischen Kammeranordnung kann nach Gleichung 14 berechnet werden. Die Lagerstättenfläche, die dabei einer abgebauten Kammer zugeordnet werden kann, ist ein Quadrat dessen Seitenlänge dem Zentralabstand der Kammern entspricht; vergleiche Abbildung 115. Die Lagerstättenfläche entspricht dabei der abgebauten Fläche der Kammer und der Festenfläche, die dieser Kammer zugeordnet werden kann. Im Vergleich dazu stellt die rechte Seite von Abbildung 115 das Ausbringen einer dreiecksförmigen Kammeranordnung dar. Die Lagerstättenfläche entspricht dabei der Fläche eines gleichseitigen Dreiecks, dessen Seitenlänge der Zentralabstand ist. Dieser Fläche kann die halbe Fläche einer Kammer zugeordnet werden: Jeder Eckpunkt des Dreiecks fällt mit dem Mittelpunkt einer Kammer zusammen. Da die Winkel im gleichseitigen Dreieck jeweils 60° betragen, werden 180° beziehungsweise die halbe Fläche einer Kammer von diesem Dreieck eingeschlossen und das Ausbringen der dreiecksförmigen Kammeranordnung kann nach Gleichung 15 berechnet werden. Setzt man die Ausbringen für die quadratische und dreiecksförmige Anordnung der Kammern gleich (Gleichung 16), so erhält man den Zusammenhang zwischen

den Zentralabständen einer quadratischen und dreiecksförmigen Kammeranordnung bei gleichem Ausbringen. Dieser ist unabhängig vom Kammerdurchmesser und beträgt 1,075.

$$A_Q = \frac{A_{abgebaut}}{A_{Lagerstätte}} = \frac{\frac{d^2 * \pi}{4}}{ZA_Q^2}$$

Gleichung 14

$$A_D = \frac{A_{abgebaut}}{A_{Lagerstätte}} = \frac{\frac{1}{2} * \frac{d^2 * \pi}{4}}{\frac{\sqrt{3}}{4} * ZA_D^2}$$

Gleichung 15

$$A_Q = A_D \rightarrow \frac{\frac{d^2 * \pi}{4}}{ZA_Q^2} = \frac{\frac{1}{2} * \frac{d^2 * \pi}{4}}{\frac{\sqrt{3}}{4} * ZA_D^2} \rightarrow \frac{A_D}{A_Q} = 1,075$$

Gleichung 16

- $A_{abgebaut}$... Abgebaute Grundfläche der Lagerstätte [m²]
- $A_{Lagerstätte}$... Einer Kammer zuordenbare Grundfläche der Lagerstätte [m²]
- A_D ... Ausbringen bei dreiecksförmiger Kammeranordnung [1]
- A_Q ... Ausbringen bei quadratischer Kammeranordnung [1]
- d ... Kammerdurchmesser [m]
- ZA_D ... Zentralabstand bei dreiecksförmiger Kammeranordnung [m]
- ZA_Q ... Zentralabstand bei quadratischer Kammeranordnung [m]
- π ... Kreiszahl [1]

| Zentralabstand | Ausbringen [%] | Zentralabstand quadratische Anordnung [m] | Zentralabstand dreiecksförmige Anordnung [m] |
|----------------|----------------|---|--|
| 1,5*d | 35 | 52,5 | 56,4 |
| 1,33*d | 44 | 46,5 | 50,0 |
| 1,66*d | 29 | 58,1 | 62,5 |

Tabelle 10: Darstellung des Ausbringens und der Zentralabstände bei unterschiedlichen Kammeranordnungen für einen Kammerdurchmesser von 35m

Tabelle 10 stellt das Ausbringen für einen Kammerdurchmesser von 35m bei unterschiedlichen Zentralabständen dar. Dabei sind sowohl die Zentralabstände für eine quadratische als auch dreiecksförmige Anordnung ausgewiesen. Zu den Zentralabständen ist festzuhalten, dass diese, wenn diese auf den Durchmesser bezogen werden, den Zentralabstand einer quadratischen Kammeranordnung bezeichnen. Die folgenden Untersuchungen werden mit einem Zentralabstand von 1,5*d durchgeführt, weil die vorhergehenden Untersuchungen auf diesem Zentralabstand aufbauen und dadurch die Ergebnisse verglichen werden können. Dementsprechend beträgt der Zentralabstand bei einer quadratischen Anordnung 52,5m beziehungsweise bei einer dreiecksförmigen Anordnung 56,4m. Die Variation von Parametern, wie zum Beispiel dem Zentralabstand oder der Kammergeometrie, können mit Hilfe der Ergebnisse aus den vorhergehenden Abschnitten abgeschätzt werden.

Zum Bergbau Gummern ist des Weiteren anzumerken, dass in diesem eine dreiecksförmige Kammeranordnung mit einem Zentralabstand von 50m vorgesehen ist. Dieser Zentralabstand entspricht einem Zentralabstand von 46,5m im Falle einer quadratischen Anordnung beziehungsweise 1,33*d. Da die vorhergehenden Untersuchungen alle von einem Zentralabstand von 1,5*d ausgehen, werden auch die folgenden Analysen mit einem Zentralabstand von 1,5*d durchgeführt. Die Spannungsumlagerungen im Bergbau Gummern können an Hand der Ergebnisse und Zusammenhänge des vorhergehenden Abschnitts, in dem die Auswirkungen von unterschiedlichen Zentralabständen beschrieben werden, abgeschätzt werden.

Quadratische Anordnung:

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wiederum an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen, wobei die Vertikal-, Horizontal- und Schubspannungen betrachtet werden. Dazu werden jedoch nur mehr die Spannungen im Schnitt 2 betrachtet; dieser ist horizontal und durchschneidet die Kammern auf halber Kammerhöhe; vergleiche Abbildung 116. Die Spannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) werden nicht mehr betrachtet, weil sich die resultierenden Spannungen in den Firsten und Sohlen ähnlich zu jenen eines Abbaufelds mit 4 nebeneinander angeordneten Kammern (vergleiche Abschnitt „5.3.1 Zentralabstand“) ausbilden und Schnitt 2 die Spannungsumlagerungen in den Kammerulmen und Auflagern gut beschreibt. Des Weiteren werden die Spannungsverläufe entlang zweier Messlinien ausgewertet: Messlinie 1 befindet sich auf halber Höhe der Kammern, verläuft horizontal in X-Richtung und durchschneidet die mittlere Kammerreihe. Messlinie 2 befindet sich ebenfalls auf halber Höhe der Kammern, verläuft auch horizontal in X-Richtung, durchschneidet aber eine äußere Kammerreihe. Beide Messlinien beginnen und enden in den Auflagern und haben jeweils einen Abstand von 5 Zentralabständen zur ersten beziehungsweise letzten Kammer entlang der Messlinie. Abbildung 116 zeigt nochmals die Lage der Messlinien. Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

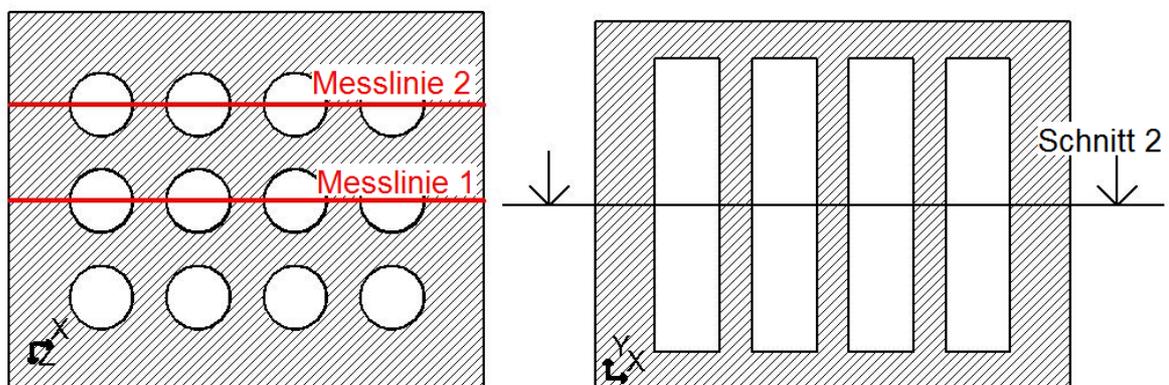


Abbildung 116: Lage von Schnitt 2 sowie der Messlinien 1 und 2

Abbildung 117 bis Abbildung 120 stellen die farbkodierten Spannungsverteilungen im Schnitt 2 dar. Der Vergleich mit den Spannungsumlagerungen in einem Baufeld mit 4 Kammern (Abschnitt „5.3.1 Zentralabstand“) zeigt, dass sich die wesentlichen Merkmale der Spannungsverteilungen nicht ändern, es aber zu Unterschieden in der Höhe der Spannungen kommt. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Beschreibung der Spannungsumlagerungen verzichtet. Anstatt dessen sind die wesentlichen Punkte im Folgenden zusammengefasst:

- In Bezug auf die betrachtete Spannung bilden sich Bereiche mit erhöhten beziehungsweise erniedrigten Spannungen an denselben Stellen wie bei einer Anordnung von Kammern in einer Richtung aus.
- Im Allgemeinen ist erkennbar, dass die Spannungssituation positiv beeinflusst wird. Das heißt, dass die auftretenden Spannungen deutlich geringer sind als bei einem Abbaufeld mit 4 Kammern. Die Ursache dafür ist der Umstand, dass das Abbaufeld auch in die zweite Richtung erweitert worden ist (Abbau von mehreren Kammerreihen nebeneinander).
- Die Vertikalspannungsumlagerungen sind wiederum deutlich geringer ausgeprägt als jene der Horizontalspannungen. Die Schubspannungen werden demnach erneut durch die Horizontalspannungsumlagerungen hervorgerufen.
- Die Kammern in den äußeren Reihen des Abbaufelds werden am stärksten belastet. Innerhalb einer Kammerreihe werden die mittleren Kammern etwas stärker belastet als die äußeren.
- Aufgrund des größeren Abbaufelds ist die Erstreckung der Spannungsumlagerungsbereiche in den Auflagern etwas größer. Dabei fallen allerdings die Veränderungen in der Höhe der Spannungen lediglich gering aus.

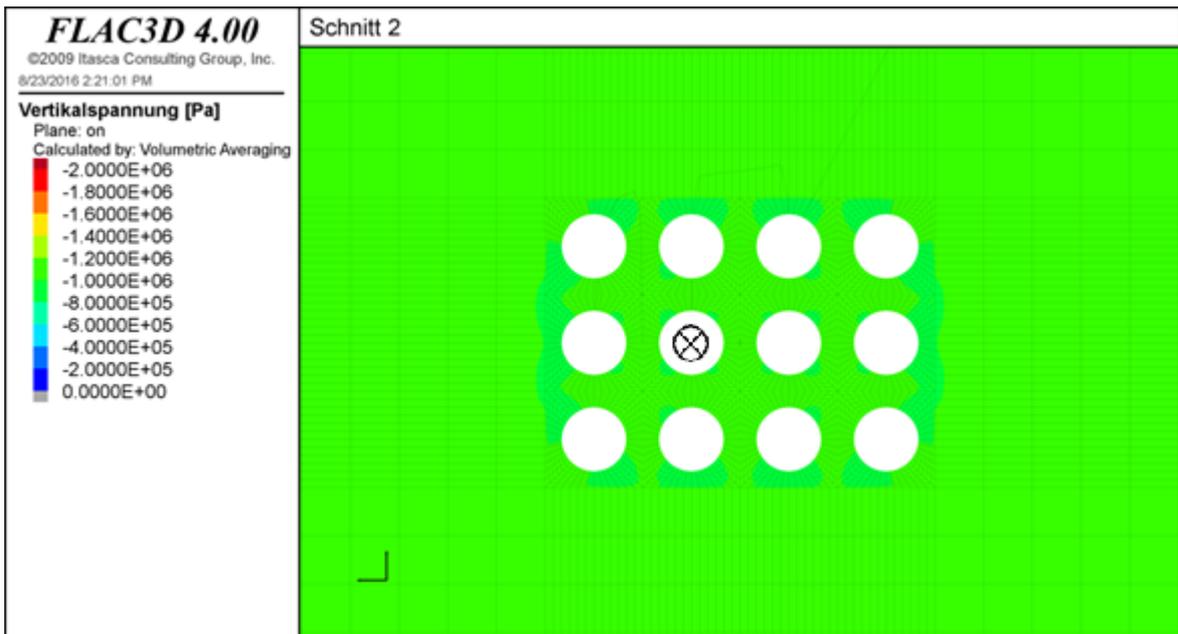


Abbildung 117: Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

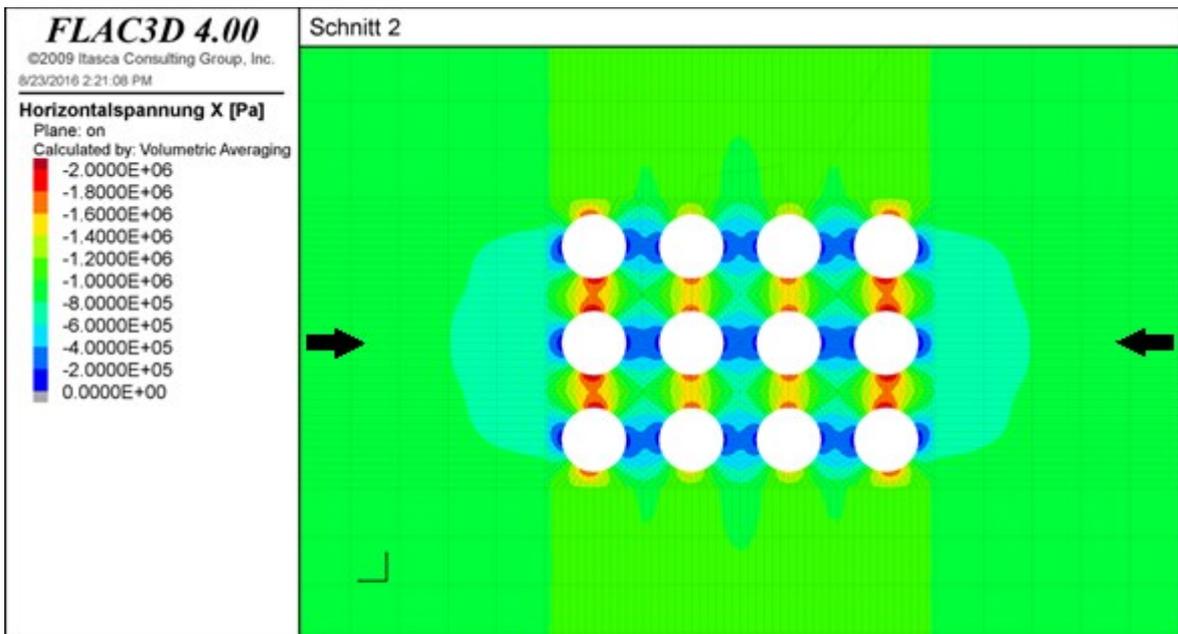


Abbildung 118: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

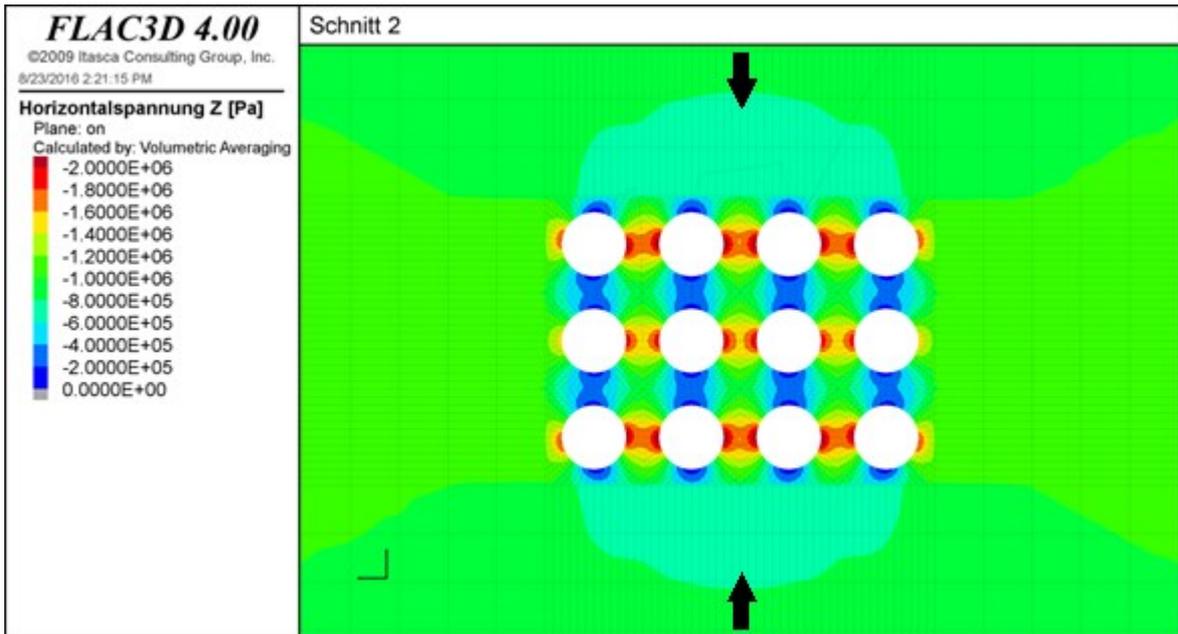


Abbildung 119: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

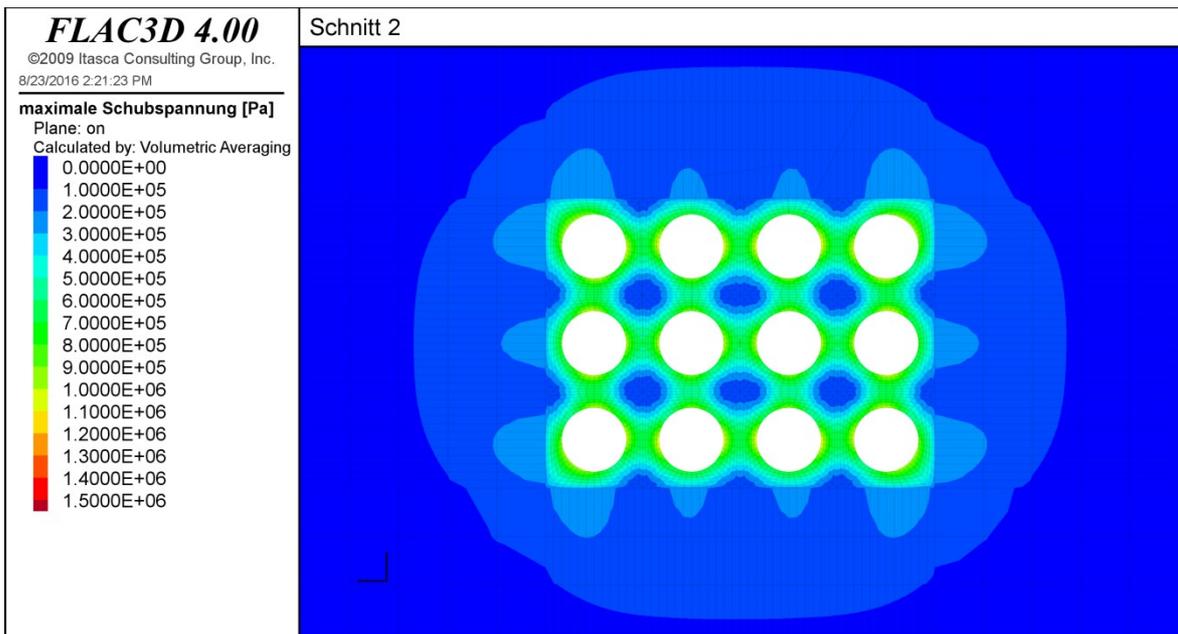


Abbildung 120: Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)

Die Spannungsverläufe entlang der Messlinien 1 und 2 sind in Abbildung 121 bis Abbildung 124 dargestellt. Zum Vergleich sind in diesen auch die Spannungsverläufe entlang der Messlinie 1 eines Abbaufelds mit 4 Kammern

ausgewiesen. Da die Messlinien im Wesentlichen die Ergebnisse der farbkodierten Spannungsverteilungen bestätigen, wird auf eine Beschreibung von diesen verzichtet.

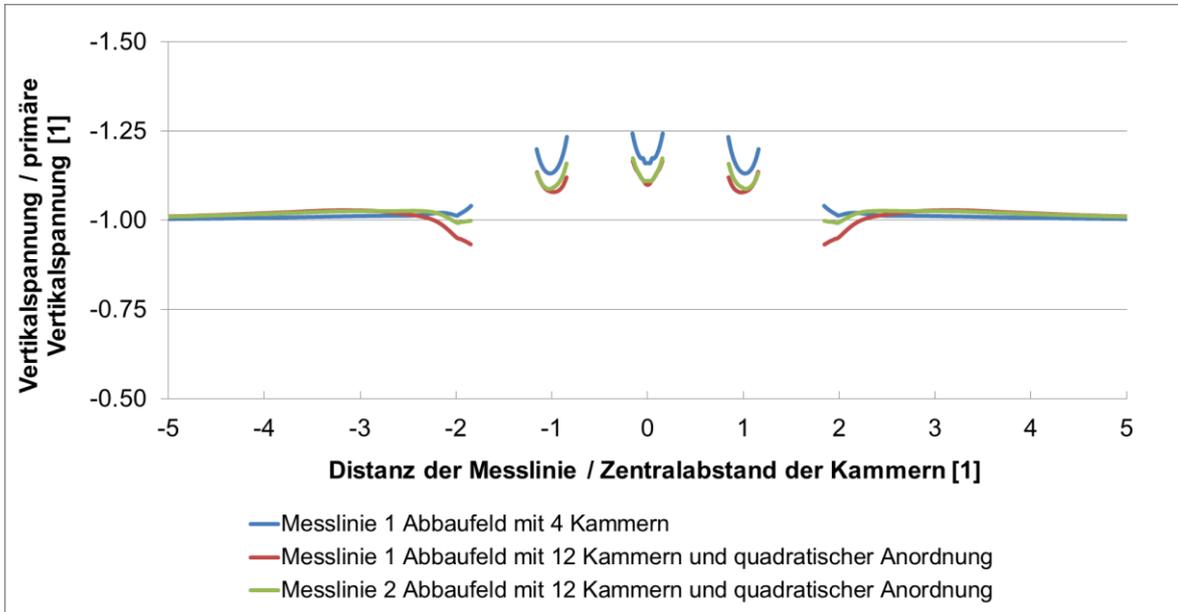


Abbildung 121: Vergleich der Vertikalspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern

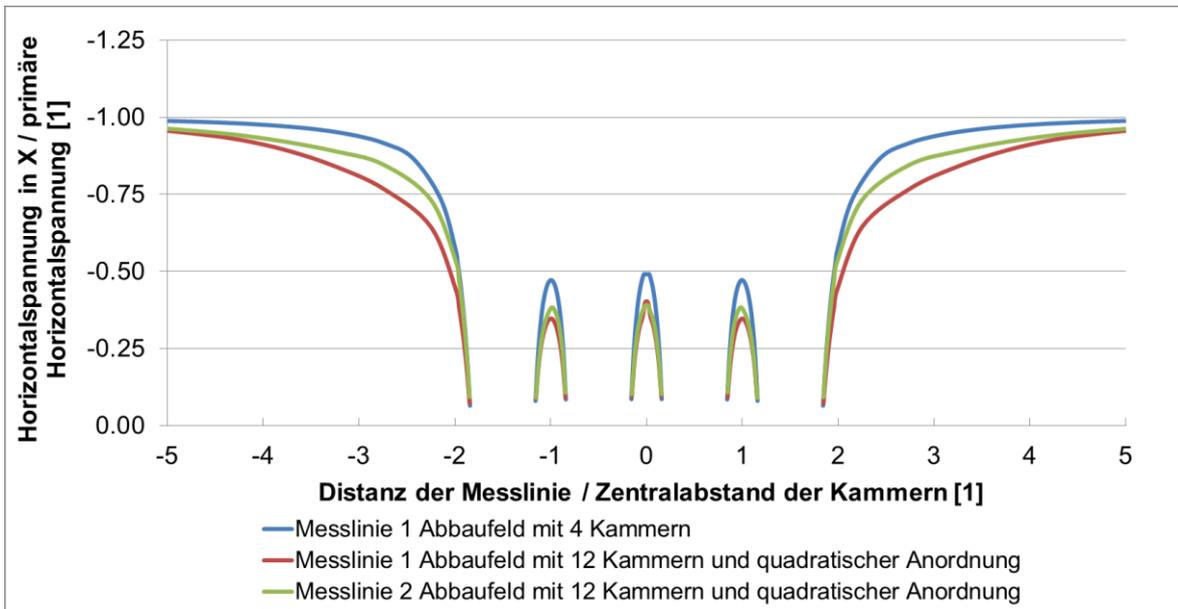


Abbildung 122: Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern

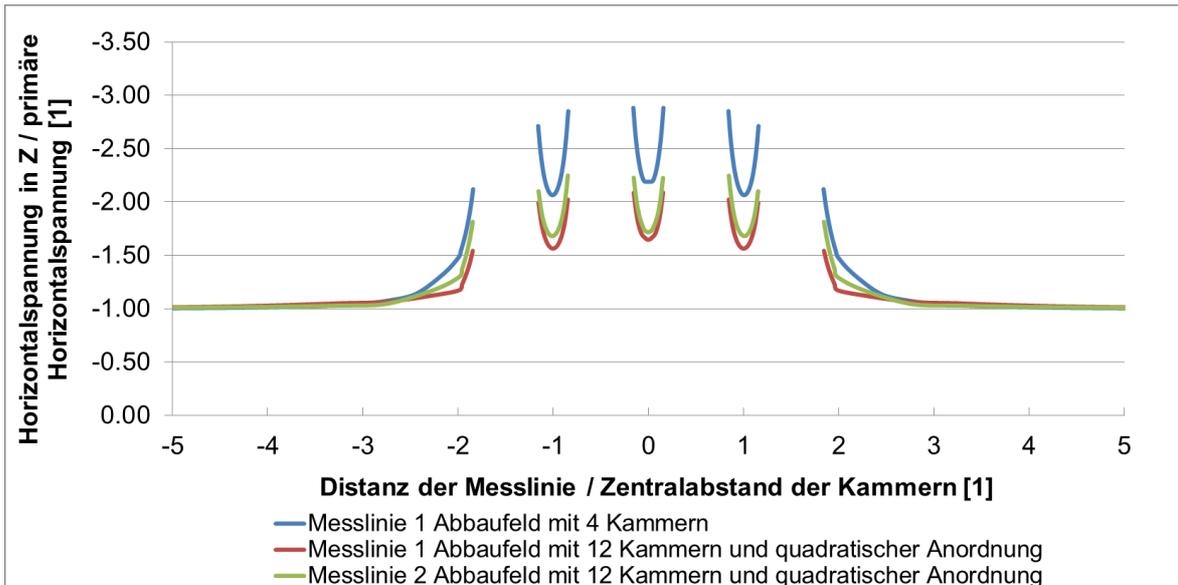


Abbildung 123: Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern

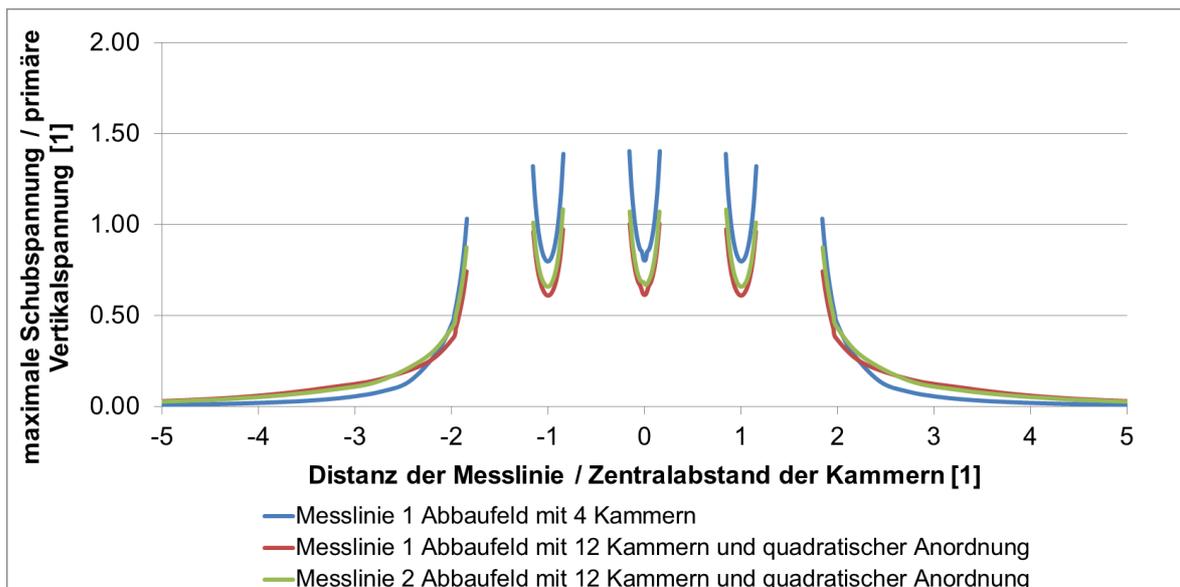


Abbildung 124: Vergleich der Schubspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern

Dreiecksförmige Anordnung:

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wiederum an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen und Spannungsverläufen entlang ausgewählter Messlinien. Dazu werden dieselben Schnitte und Messlinien wie bei der

Auswertung der quadratischen Kammeranordnung herangezogen. Dadurch ist es möglich, die beiden Anordnungen einander gegenüberzustellen und etwaige Vor- und Nachteile der verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Die Lage der Schnitte und Messlinien ist bei der Auswertung zur quadratischen Kammeranordnung ersichtlich; vergleiche Abbildung 116. Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

Abbildung 125 bis Abbildung 128 stellen die farbkodierten Spannungsverteilungen im Schnitt 2 dar. Im Vergleich zu den Spannungsumlagerungen einer quadratischen Anordnung können folgende Punkte festgestellt werden:

- Die Vertikalspannungsumlagerungen sind wiederum äußerst gering.
- Die Umlagerungen der Horizontalspannungen sind vergleichbar mit jenen der quadratischen Anordnung. Allerdings fallen die Spannungserhöhungen in den Bereichen mit erhöhten Spannungen im Allgemeinen signifikant niedriger aus. Des Weiteren sinken die Spannungen in den druckentspannten Bereichen weniger stark ab, wodurch die Einspannung erhöht wird.
- Die Schubspannungen werden wiederum durch die Umlagerungen der Horizontalspannungen hervorgerufen und treten vor allem im Bereich der Kammerulme und Festen zwischen den Kammern auf. Im Gegensatz zur quadratischen Anordnung sind die Bereiche, in denen keine Schubspannungen auftreten, deutlich kleiner.
- Die äußeren Kammerreihen sind wiederum etwas stärker belastet. Innerhalb einer mittleren Kammerreihe ist die Belastung der Festen in der Mitte der Reihe ebenfalls etwas größer. In den äußeren Kammerreihen nimmt die Belastung aufgrund der Geometrie des Abbaufelds in Richtung einer Randkammer zu. Dabei sind jene Randkammern stärker belastet, in denen der Winkel zwischen den Kammermittelpunkten der benachbarten Kammern kleiner ist.

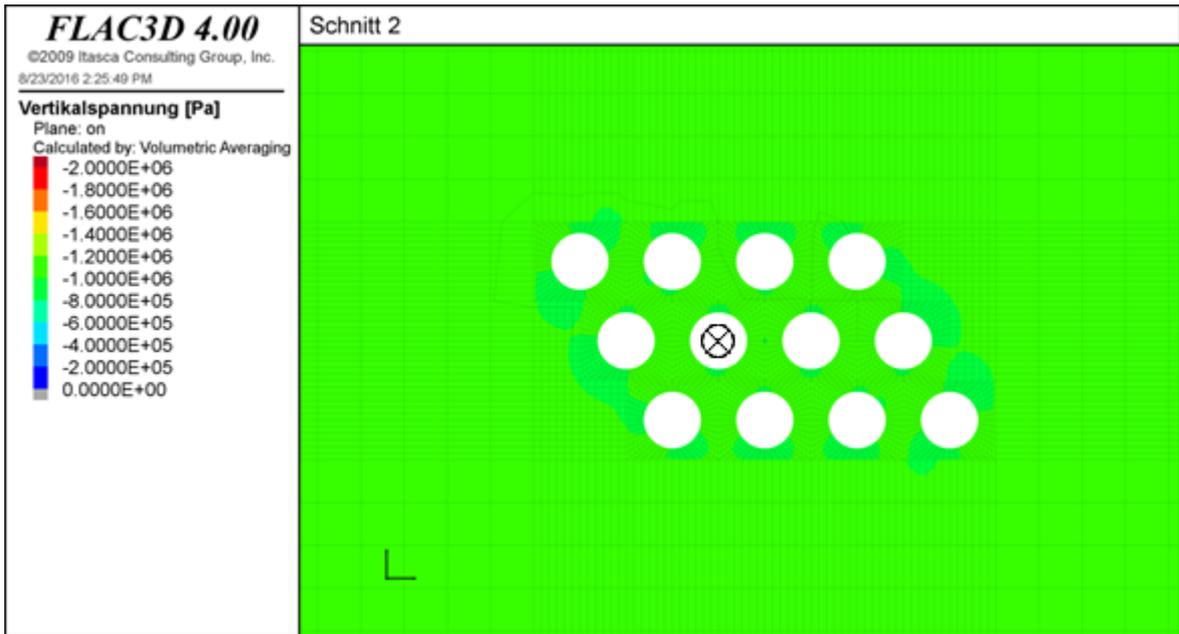


Abbildung 125: Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

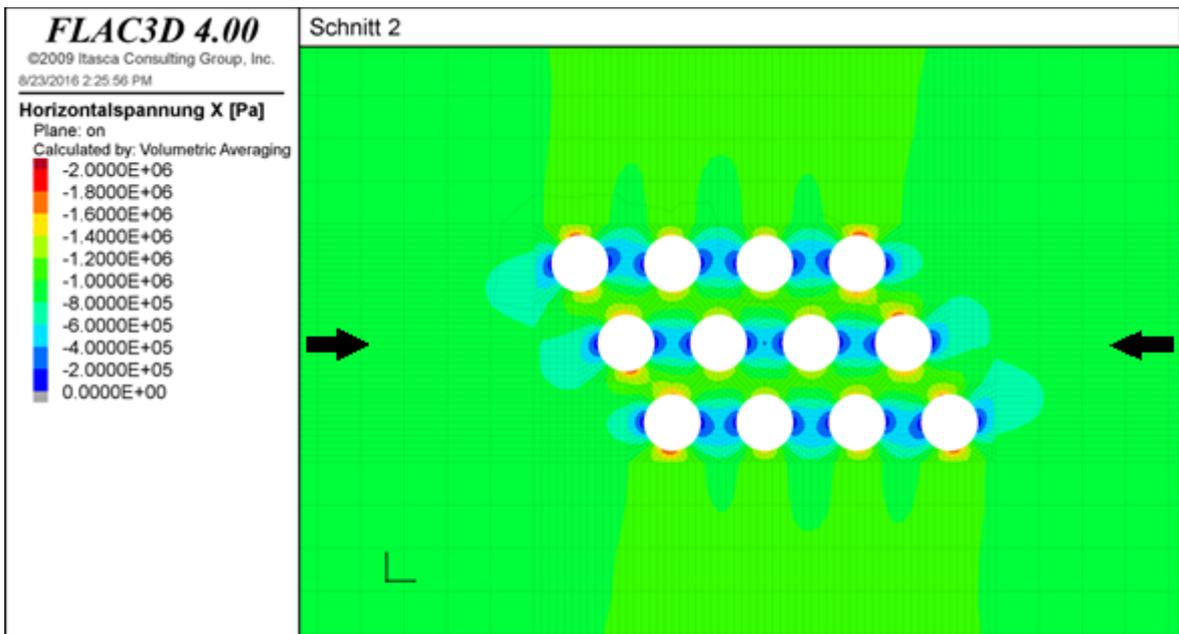


Abbildung 126: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

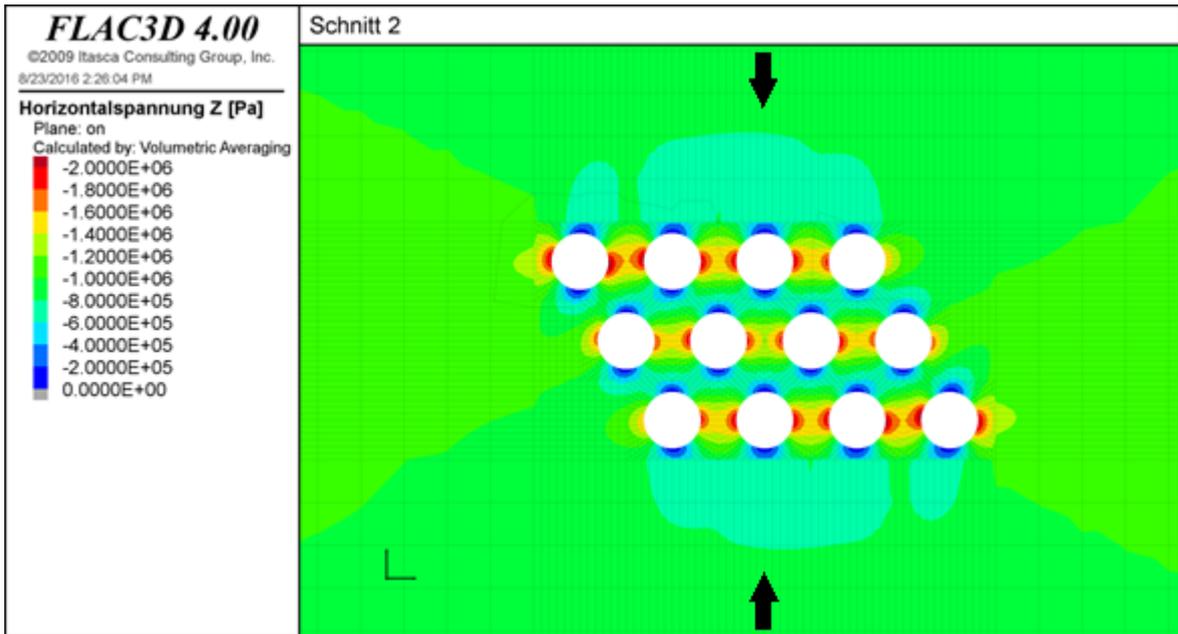


Abbildung 127: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5*d$)

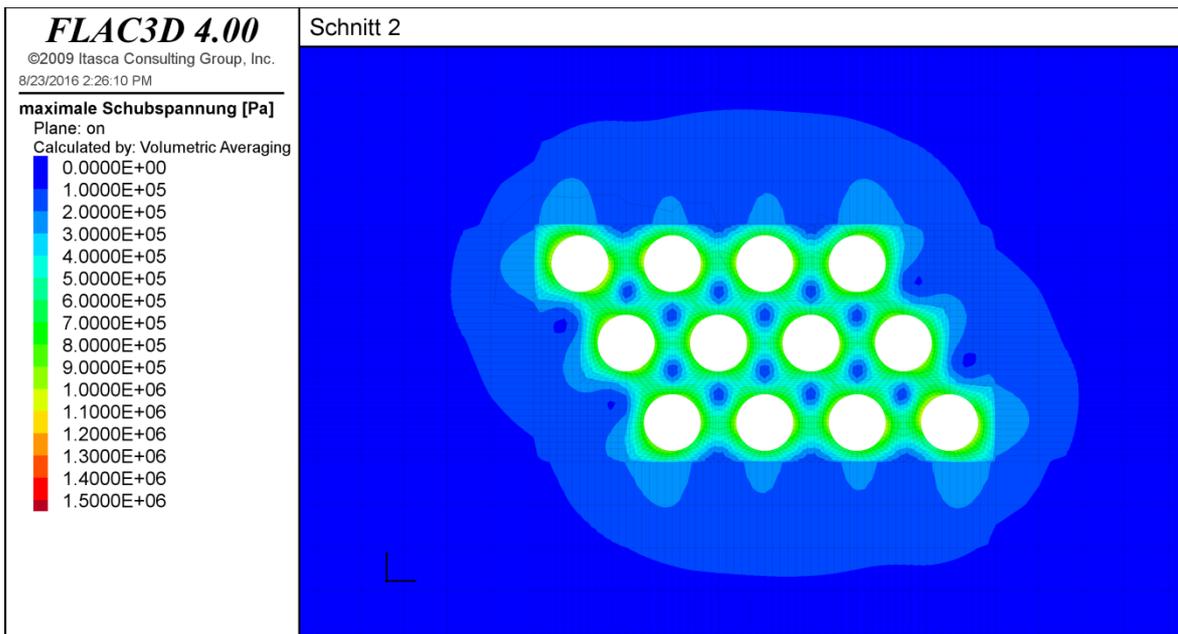


Abbildung 128: Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5*d$)

Die Spannungsverläufe entlang der Messlinien 1 und 2 für ein Abbaufeld mit dreiecksförmiger beziehungsweise quadratischer Kammeranordnung ist in Abbildung 129 bis Abbildung 132 dargestellt. Da im Wesentlichen die Ergebnisse

aus den Analysen der Spannungsverteilungen bestätigt werden, werden die Spannungsverläufe entlang der Messlinien nicht näher beschrieben. Zu den Verläufen in den Auflagern ist jedoch festzuhalten, dass die unterschiedlichen Spannungsverläufe primär durch die Geometrie des Abbaufelds und nicht durch die Art der Anordnung der Kammern hervorgerufen werden.

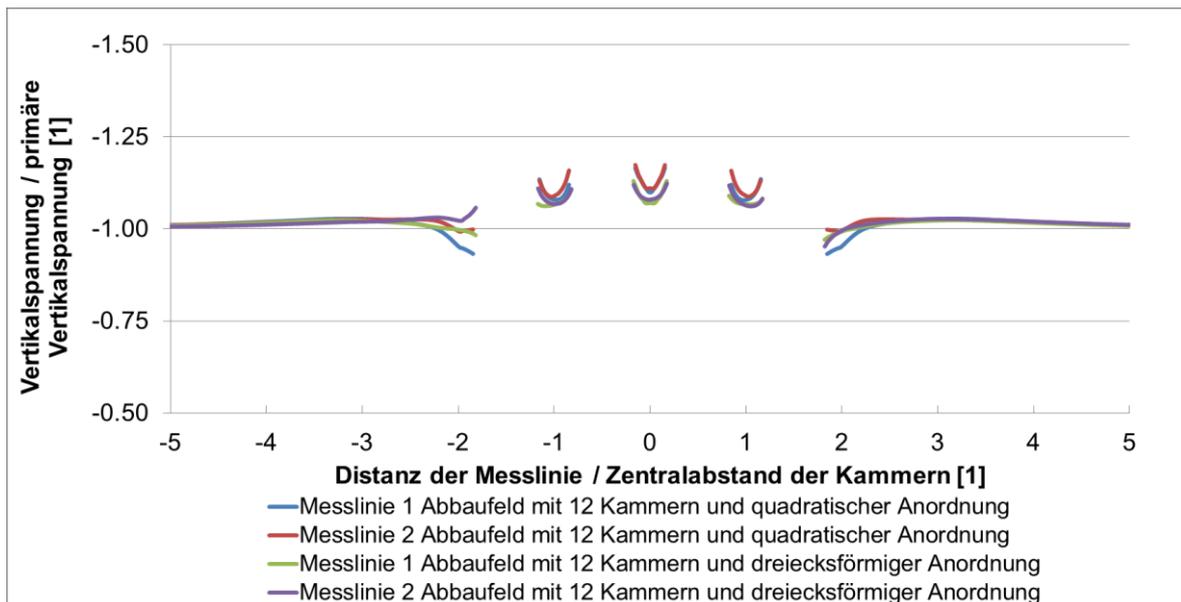


Abbildung 129: Vergleich der Vertikalspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung

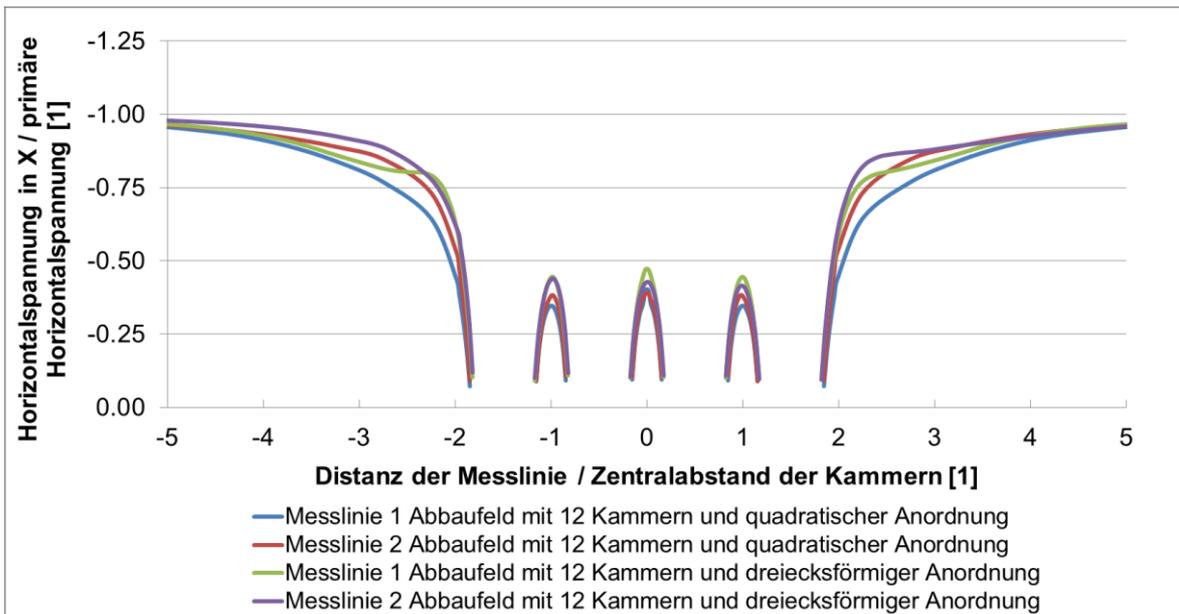


Abbildung 130: Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung

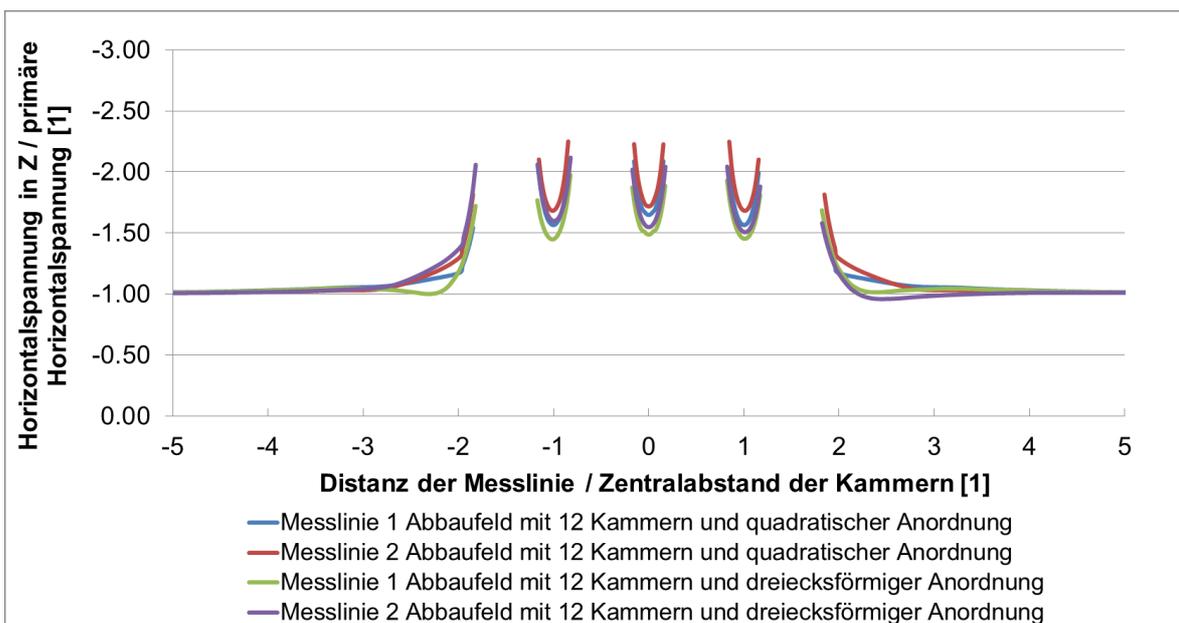


Abbildung 131: Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung

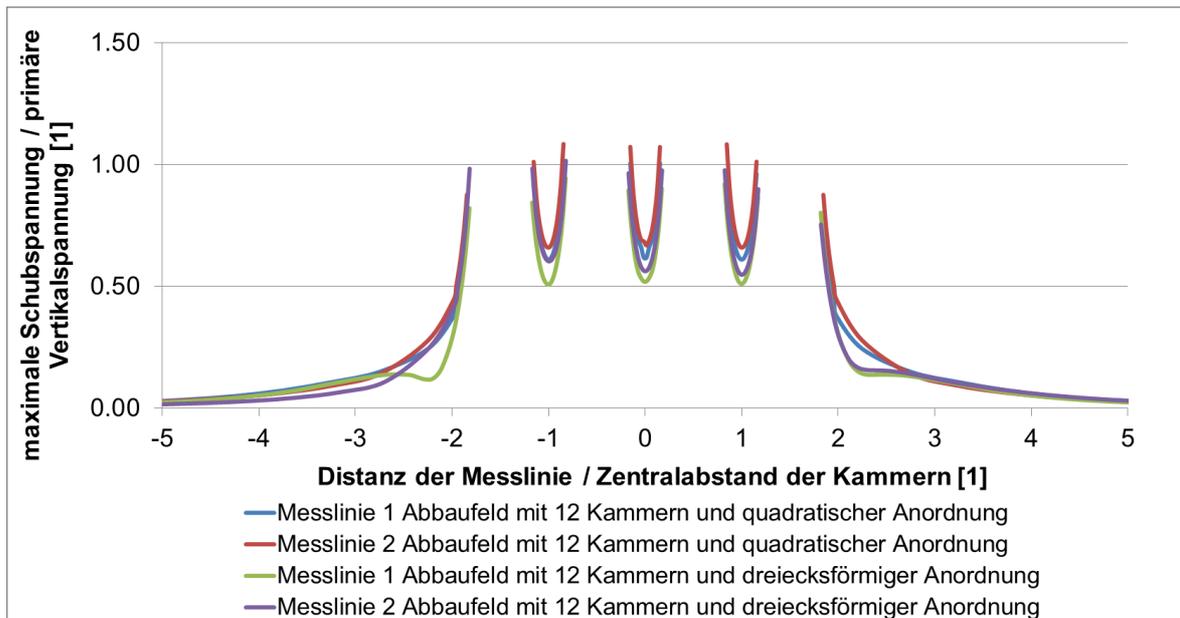


Abbildung 132: Vergleich der Schubspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung

5.4.2 Versagen einer Feste in einem Abbaufeld

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich das Versagen einer Feste auf die Spannungsumlagerungen in einem Abbaufeld mit 12 Kammern auswirkt. Dazu wird angenommen, dass die Feste in der Mitte des Abbaufelds vollständig versagt. Die Simulationsergebnisse aus Abschnitt „5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld“ haben zwar gezeigt, dass die Festen in den äußeren Reihen etwas stärker belastet sind und daher vor der Feste in der Mitte des Abbaufelds versagen dürften. Dennoch wird in diesem Abschnitt das Versagen der Feste in der Mitte des Abbaufelds simuliert, weil in diesem Fall die Auswirkungen auf die übrigen Festen voraussichtlich am größten sein dürften. Dazu wird sowohl eine quadratische als auch eine dreiecksförmige Anordnung der Kammern betrachtet. Die Lage der versagten Feste ist in Abbildung 134 oder Abbildung 135 zu erkennen.

Das Versagen der Feste wird durch ein vollständiges Entfernen von dieser simuliert. An dieser Stelle wird zudem festgehalten, dass der hier betrachtete Fall eine Extremsituation darstellt. In der Realität ist ein solches, komplettes Versagen

der Feste äußerst unwahrscheinlich, weil die Festen im Versatz eingebettet sind und dadurch nicht vollständig Versagen können und eine gewisse Restfestigkeit besitzen. Durch diese stützen sie das umliegende Gebirge auch im Versagensfall zumindest geringfügig. Die Kammer, die durch das Versagen der Feste entsteht, wird als „vereinte Kammer“ bezeichnet.

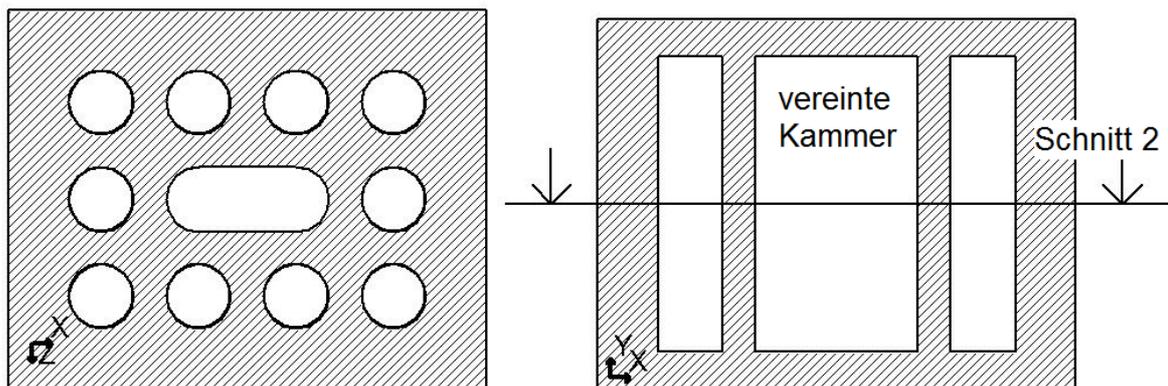


Abbildung 133: Lage von Schnitt 2

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt ausschließlich an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen im Schnitt 2 (Abbildung 133). Es werden keine weiteren Schnitte und Messlinien betrachtet, weil die Auswirkungen des Festenversagens in den Firsten und Sohlen sowie die prozentuellen Spannungsveränderungen an Hand der Ergebnisse des Abschnitts „5.3.3 Versagen von Festen“ abgeschätzt werden können. Die Spannungsumlagerungen sind in Abbildung 134 bis Abbildung 141 dargestellt. Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Spannungsverteilungen wird verzichtet, weil die Merkmale von diesen mit jenen der Spannungsumlagerungen aus Abschnitt „5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld“ und Abschnitt „5.3.3 Versagen von Festen“ vergleichbar sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte zusammengefasst:

- Das Versagen der Feste hat nur einen geringen Einfluss auf die Vertikalspannungsumlagerungen in den Festen und Auflagern.
- Die Horizontalspannungsumlagerungen werden durch das Versagen der Feste deutlich beeinflusst. Dabei sind jene Bereiche stärker betroffen, die sich an den langen Ulmen der vereinten Kammer befinden. In diesen bilden sich vor allem druckentspannte Zonen aus, die bis zu den nächsten

Kammerreihen reichen und in denen zudem deutliche Zugspannungen auftreten können. Des Weiteren erhöhen sich die Horizontalspannungen vor allem in den Festen, die an die vereinte Kammer angrenzen, signifikant. Bei den vorhergehenden Anmerkungen zu den Horizontalspannungen ist auch immer die Richtung der Horizontalspannungen in Bezug auf die vereinte Kammer zu berücksichtigen.

- Die Schubspannungen treten im Allgemeinen etwas stärker an den Ulmen der vereinten Kammer auf.
- Das Versagen der Feste hat seinen hauptsächlichsten Einfluss auf die Spannungsumlagerungen in der Umgebung von dieser. Bereits in einem Abstand von zwei Festen sind die Auswirkungen deutlich geringer.
- Das Versagen der Feste wirkt sich auf die Standfestigkeit der übrigen Festen bei einer dreiecksförmigen Anordnung negativer aus als bei einer quadratischen: Die Ausdehnung der druckentspannten Bereiche erfasst die nächsten Kammerreihen und des Weiteren treten in diesen Bereiche deutliche Zugspannungen, die sich bis zu den nächstliegenden Kammern erstrecken, auf. Die Ursache dafür liegt einerseits im geringeren Abstand der Kammerreihen und andererseits darin, dass die nächsten Kammern gegenüber dem langen Ulm der vereinten Kammer liegen.

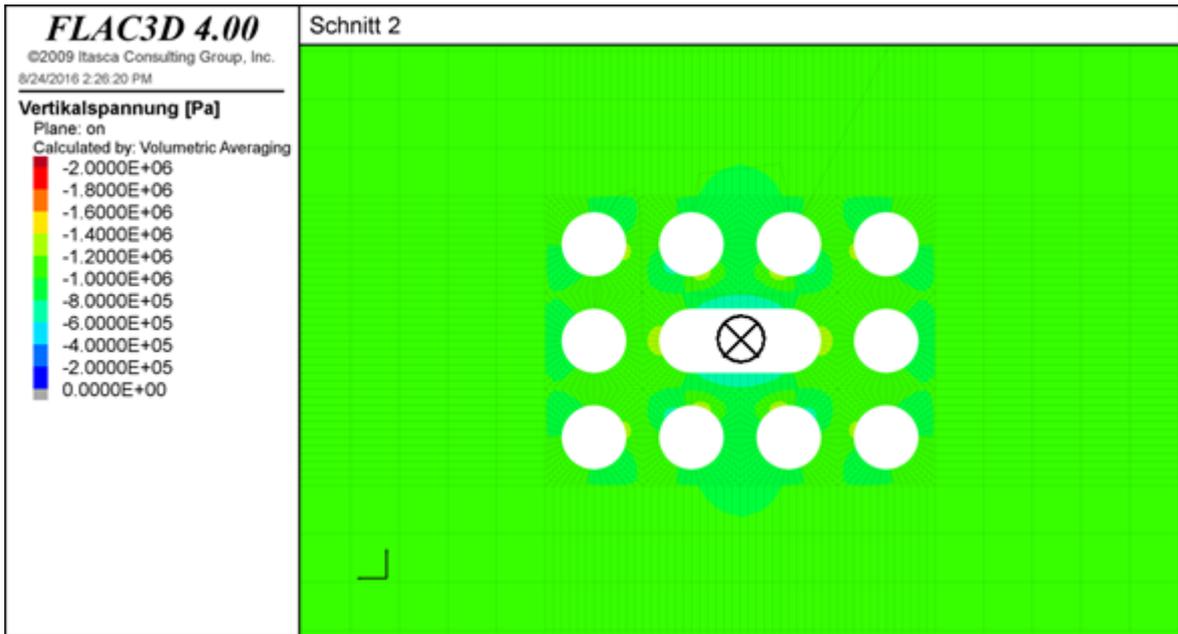


Abbildung 134: Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

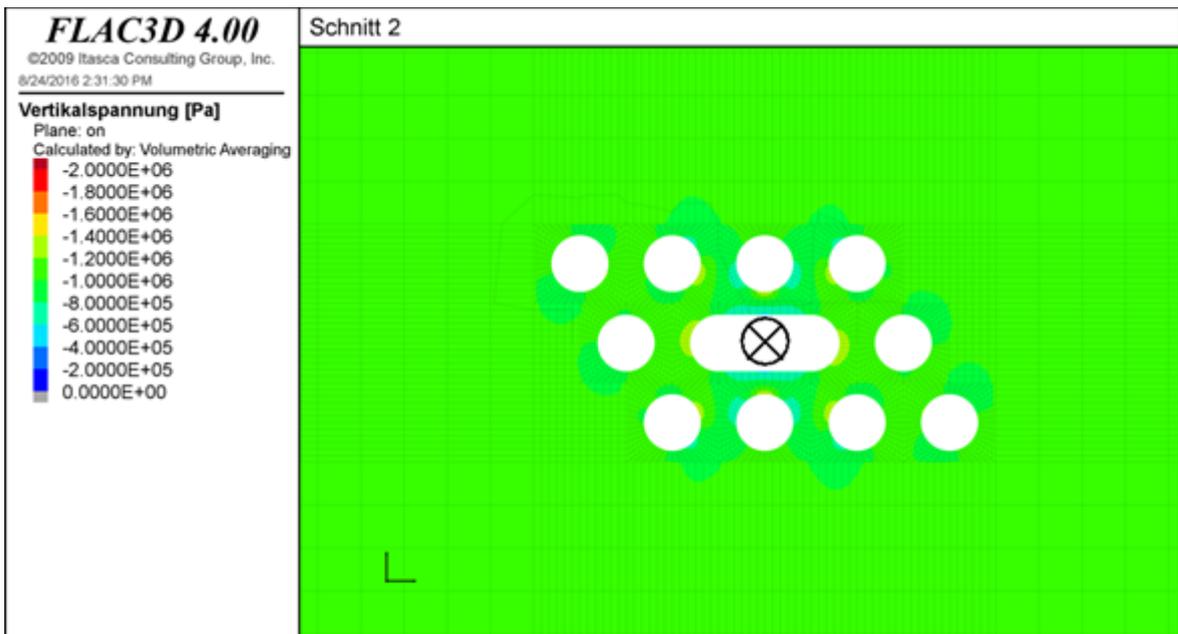


Abbildung 135: Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

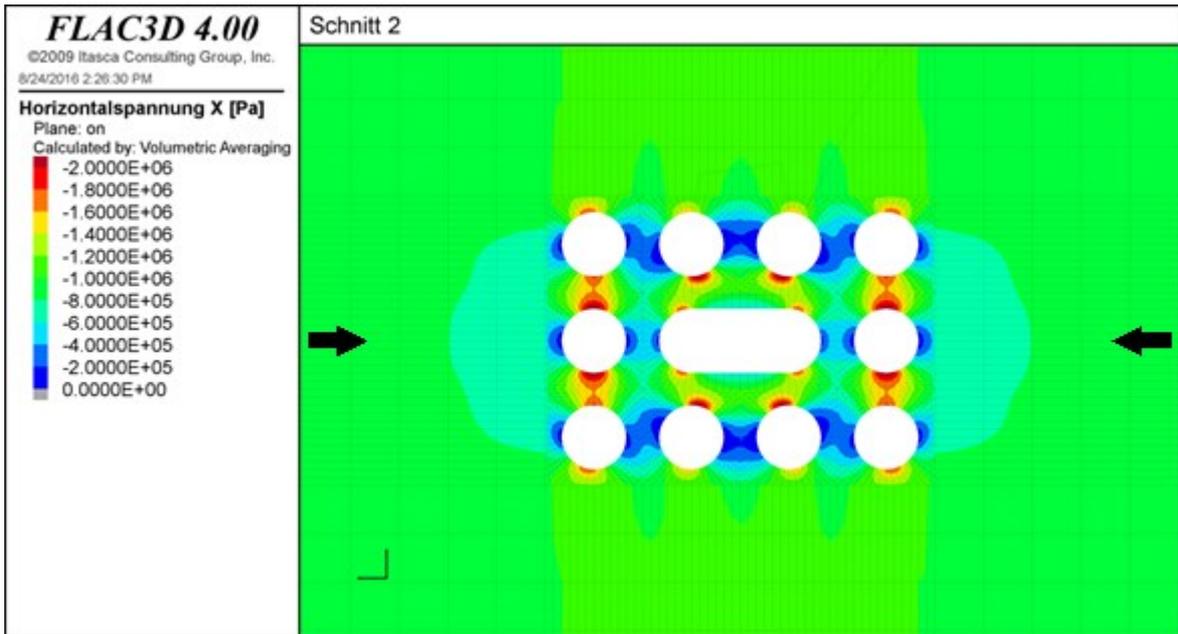


Abbildung 136: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

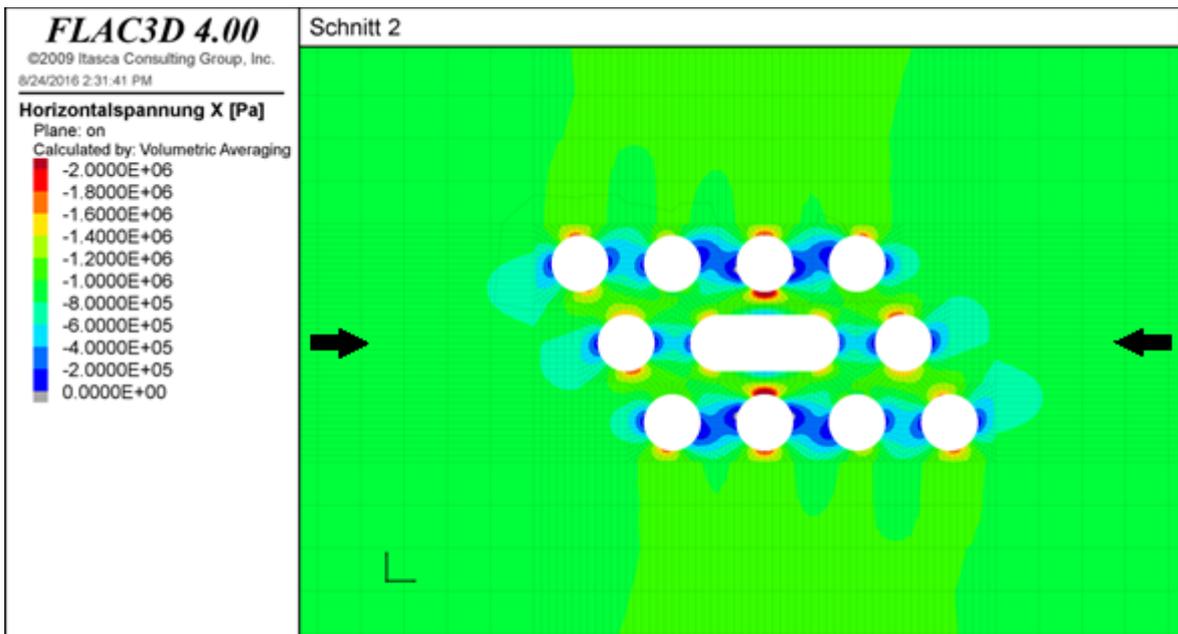


Abbildung 137: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

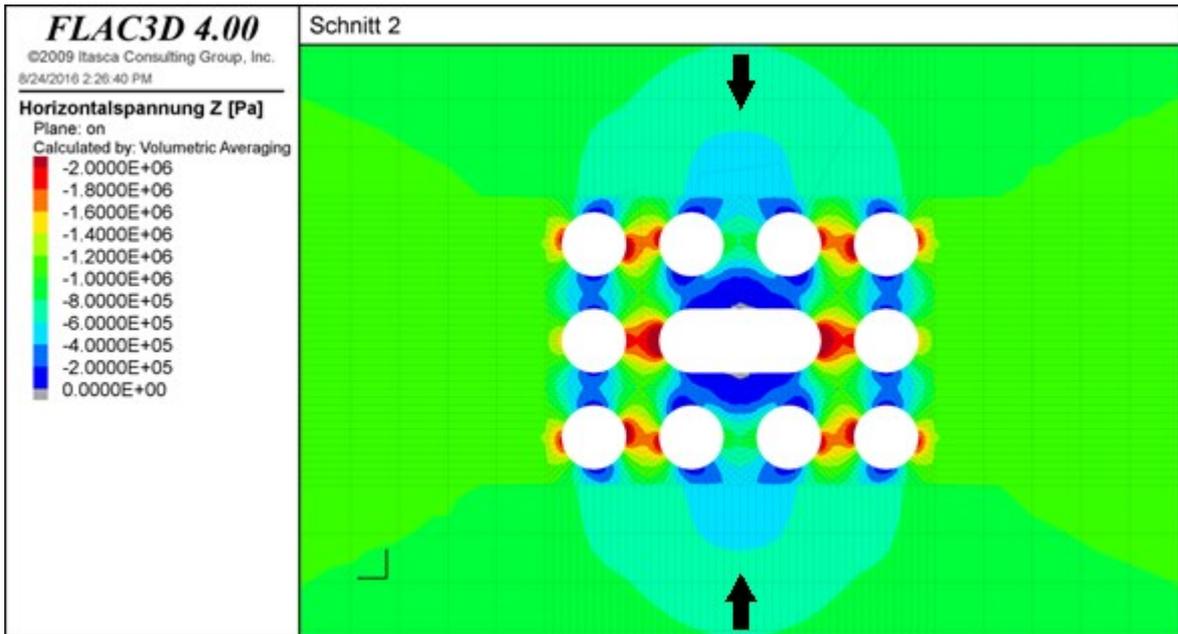


Abbildung 138: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

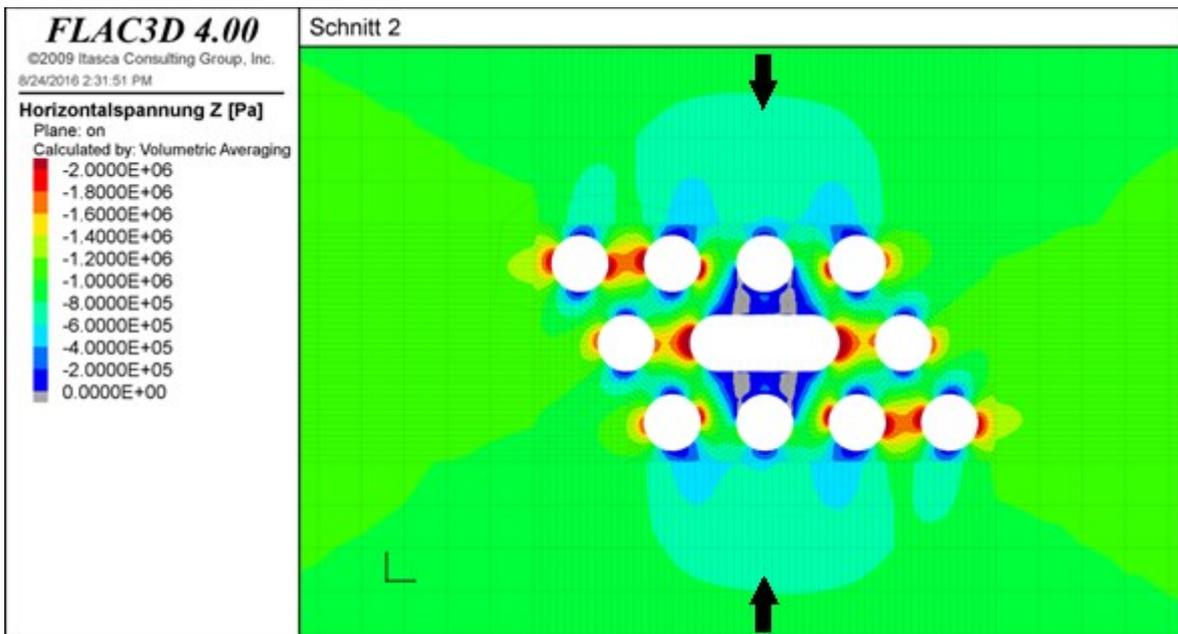


Abbildung 139: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

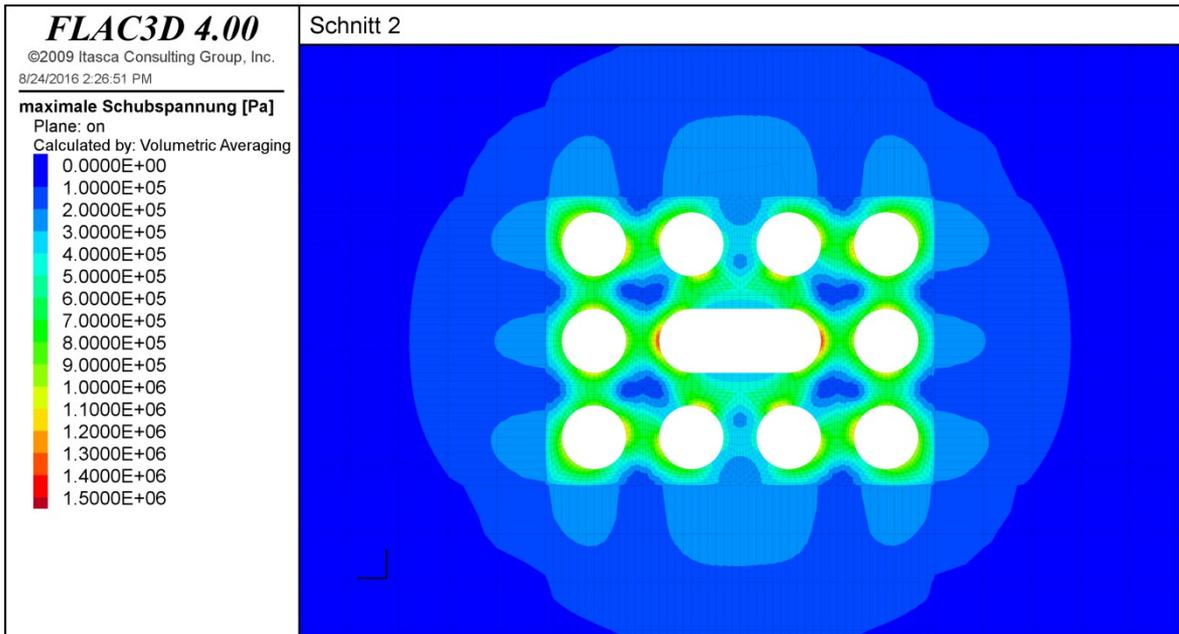


Abbildung 140: Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $52,5\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

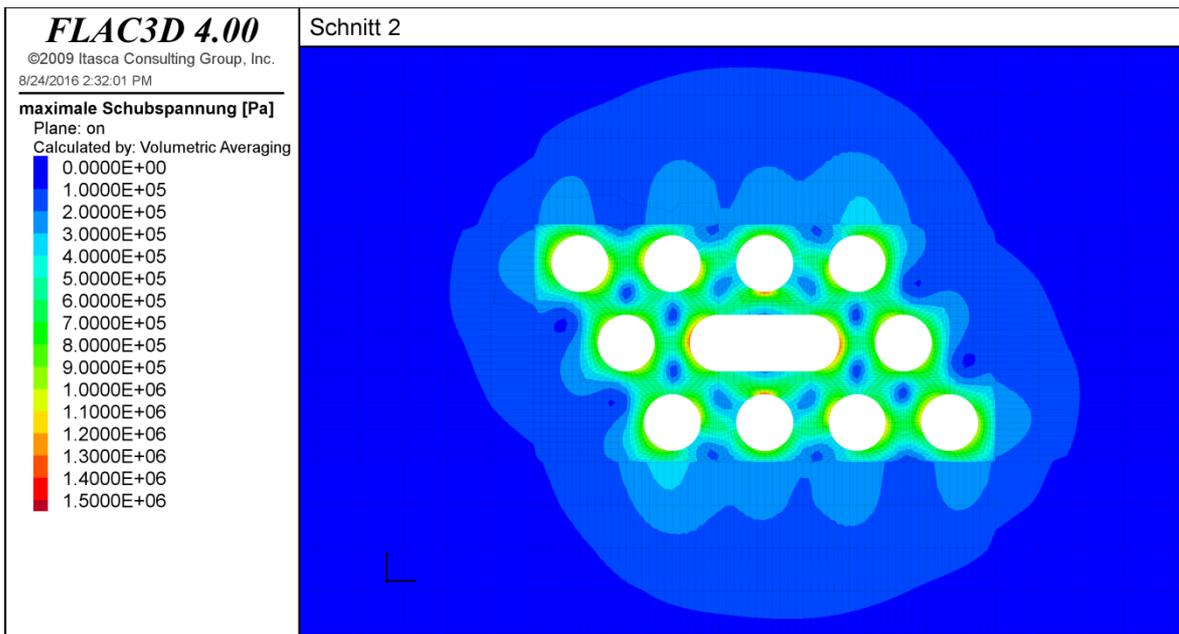


Abbildung 141: Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand= $56,4\text{m}$ ($1,5 \cdot d$)

5.4.3 Lage/Größe/Form der Abbaufelder

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie sich einerseits die Größe eines Abbaufelds auf die Spannungsumlagerungen auswirkt und andererseits wie sich mehrere nebeneinanderliegende Abbaufelder gegenseitig beeinflussen. Der Abbau von mehreren Kammern innerhalb eines Abbaufelds verringert die Steifigkeit des Gebirges im Bereich des Baufelds im Allgemeinen signifikant. Dieser Umstand wird bei den in diesem Abschnitt durchgeführten Simulationen genutzt. Dazu werden diese im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen nicht in Form von abgebauten Kammern sondern mit Hilfe so genannter soft-inclusions („weiche Einschlüsse“) durchgeführt. Diese unterscheiden sich vom umliegenden Gebirge durch einen geringeren E-Modul und besitzen in Folge dessen eine geringere Steifigkeit. Aufgrund dessen sind die Spannungen in diesen soft-inclusions niedriger als im umliegenden Gebirge. (Jaeger, Cook und Zimmerman 2007) Die Folge daraus sind erhöhte Spannungen im Bereich der Auflager. Dieser Umstand kann in erster Linie dazu genutzt werden, um regionale Spannungsumlagerungen von Abbaufeldern mit einem deutlich geringeren Rechenaufwand zu analysieren. Betreffend solche regionalen Spannungsumlagerungen ist von besonderem Interesse, wie sich einerseits eine Veränderung der Größe, des Ausbringens oder der Form des Abbaufelds auf diese auswirkt und andererseits wie benachbarte Abbaufelder untereinander interagieren und welche Spannungssituation in den Barrierefesten zwischen Abbaufeldern auftritt. Ein weiteres Anwendungsgebiet der soft-inclusions ist, die Spannungen innerhalb der Abbaufelder abzuschätzen. Kritisch bei der Anwendung von soft-inclusions ist die Reduktion des E-Moduls. Generell gilt, dass der E-Modul der soft-inclusion gleich der Systemsteifigkeit des Abbaufelds ist. Aus diesem Grund wird zunächst ein Abbaufeld mit 12 Kammern in Form einer soft-inclusion mit den bisherigen Ergebnissen verglichen und darauf aufbauend die Verringerung des E-Moduls kalibriert. Anschließend werden die regionalen Spannungsumlagerungen bei einer Vergrößerung des Abbaufelds sowie beim Abbau von drei Baufeldern an Hand von soft-inclusions untersucht.

5.4.3.1 Abbaufeld mit 12 Kammern

Zunächst wird ein Abbaufeld mit 12 Kammern in Form einer soft-inclusion simuliert und ausgewertet. Damit wird gezeigt, dass eine Modellierung der Abbaufelder in Form von soft-inclusions möglich und aussagekräftig ist. Die Kammern befinden sich dabei in einer quadratischen Anordnung und der Zentralabstand beträgt $1,5 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$. Dadurch ergibt sich eine Größe der soft-inclusion von $210\text{m} \times 195\text{m} \times 157,5\text{m}$ (X- x Y- x Z-Erstreckung); vergleiche Abbildung 142. (Anmerkung: Zu den Hohlraumrändern von äußeren Kammern werden in X- und Z-Richtung jeweils noch $8,75\text{m} = 0,25 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$ und in Y-Richtung $17,5\text{m} = 0,5 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$ zur soft-inclusion addiert.) Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Reduktion des E-Moduls in der soft-inclusion für die Qualität der Ergebnisse kritisch. Durch den Abbau von Kammern verringert sich die Systemsteifigkeit des Abbaufelds; im Allgemeinen umso stärker, je größer das Ausbringen ist. Aus diesem Grund wird der E-Modul der soft-inclusion mit dem Ausbringen des Abbaufelds modifiziert.

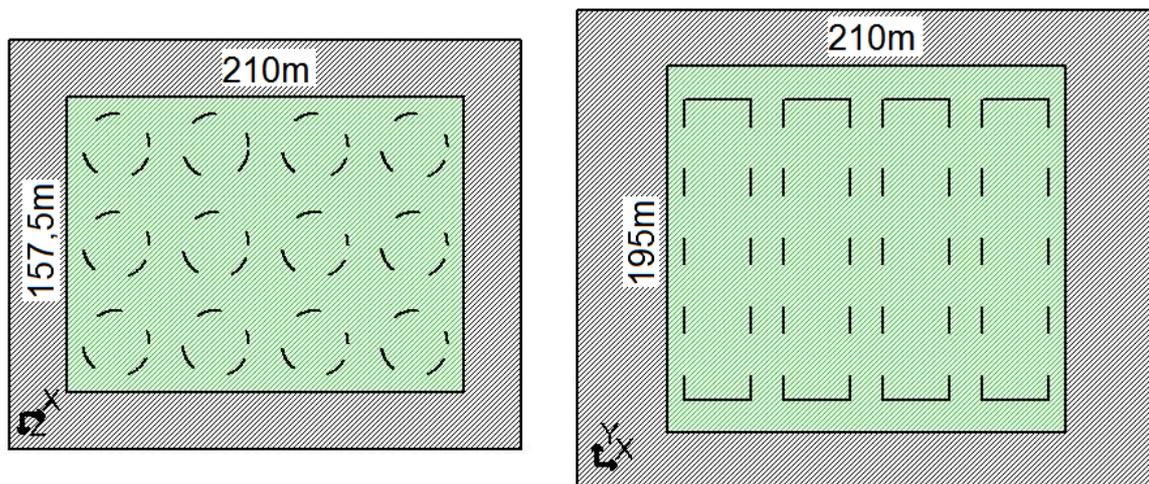


Abbildung 142: Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion (grün) im Grundriss (links) und Aufriss (rechts). Die Position der Kammern in einem solchen Abbaufeld ist strichliert gekennzeichnet.

Im ersten Schritt wird untersucht, wie stark der E-Modul in der soft-inclusion reduziert werden muss, um vergleichbare Ergebnisse wie bei einer Simulation mit abgebauten Kammern zu erhalten. Dazu werden die Verschiebungen von 3

Punkten am Rand des Abbaufelds sowohl für ein Abbaufeld mit 12 Kammern als auch für dasselbe Abbaufeld in Form einer soft-inclusion ermittelt und ausgewertet. Die Lage der Punkte ist in Abbildung 143 dargestellt. Sie ist so gewählt, dass sich diese mittig in den jeweiligen Seitenflächen des Abbaufelds befinden. Da die Verschiebungen dieser Punkte überwiegend normal zur jeweiligen Seitenfläche erfolgen, werden jeweils nur diese Verschiebungen ausgewertet. Für die Reduktion des E-Moduls wird einerseits das Ausbringen des Abbaufelds herangezogen. Andererseits wird eine Simulation mit dem im Abschnitt „5.3.1 Zentralabstand“ eingeführten horizontalen Ausbringen durchgeführt. Der Grund für die Simulation mit dem horizontalen Ausbringen ist, dass dieses jene Bereiche des Festensystems, die im horizontalen Druckschatten der Kammern liegen, nicht berücksichtigt und ermittelt werden soll, ob diese Bereiche zur Systemsteifigkeit beitragen. Die beiden verwendeten Ausbringen sind nochmals im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Ausbringen von 35%. Dies entspricht dem Ausbringen der betrachteten quadratischen Kammeranordnung bei einem Zentralabstand von $1,5 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$. Die Reduktion des E-Moduls beträgt demnach 35%, wodurch sich ein E-Modul der soft-inclusion von 16,0GPa ergibt.
- Horizontales Ausbringen von 67%. Dieses ist im Abschnitt „5.3.1 Zentralabstand“ zur Ermittlung der maximalen Horizontalspannungsumlagerungen in den Festen eingeführt worden. Die Reduktion des E-Moduls beträgt demnach 67%, wodurch sich ein E-Modul der soft-inclusion von 11,7Gpa ergibt.

Im Gegensatz zu den bisherigen Simulationen werden die primären Spannungen von 1MPa vor Beginn der Simulation nur im umliegenden Gebirge und nicht in der soft-inclusion initialisiert. Die weiteren Parameter und der weitere Ablauf der Simulation sind unverändert und im Abschnitt „5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen“ beschrieben.

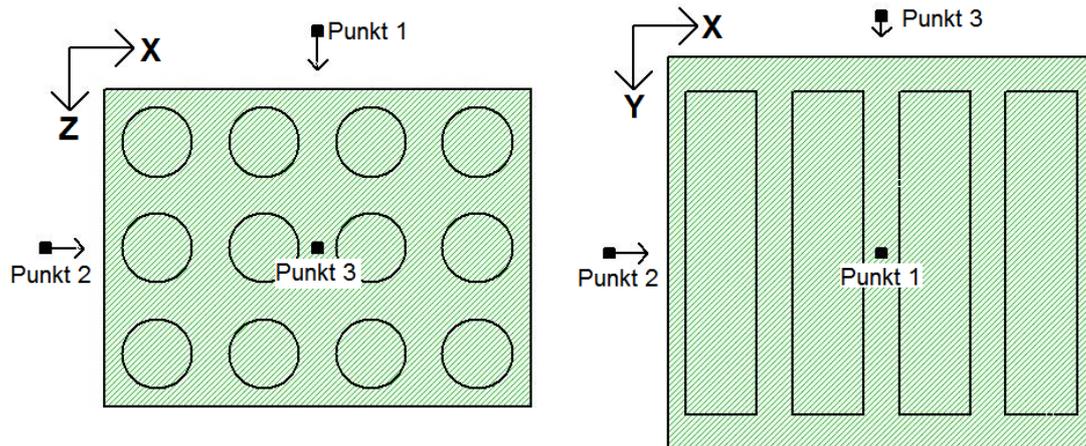


Abbildung 143: Lage der Punkte, in denen die Verschiebungen analysiert worden sind, im Grundriss (links) und im Aufriss (rechts). Die Pfeile stellen jeweils die untersuchte Verschiebungsrichtung dar.

| | Verschiebung in Z-Richtung im Punkt 1 [mm] | Verschiebung in X-Richtung im Punkt 2 [mm] | Verschiebung in Y-Richtung im Punkt 3 [mm] |
|---|--|--|--|
| Abbaufeld mit 12 Kammern | 0,75 | 0,66 | 0,28 |
| soft-inclusion mit E-Modul-Reduktion von 35% | 0,89 | 0,85 | 0,95 |
| soft-inclusion mit E-Modul-Reduktion von 67% | 1,32 | 1,21 | 1,35 |

Tabelle 11: Vergleich der Verschiebungen in den betrachteten Punkten. Ein positiver Wert bedeutet eine Verschiebung in Richtung des Abbaufelds.

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Betrachtet man die Verschiebungen für ein Abbaufeld mit 12 Kammern ist zu erkennen, dass die Verschiebungen in horizontaler Richtung (Punkt 1 und Punkt 2) deutlich größer sind als in vertikaler Richtung (Punkt 3). Daraus kann abgeleitet werden, dass ein Raise-mining Abbaufeld in vertikaler Richtung eine deutlich größere Steifigkeit als in horizontaler Richtung aufweist. Die Verschiebungen im Punkt 1 sind zudem etwas größer als im Punkt 2. Dieser Umstand ist auf die größere Spannweite des Abbaufelds in X-Richtung zurückzuführen. Der Vergleich der Verschiebungen des

Abbaufelds mit 12 Kammern mit jenen aus den mit soft-inclusions modellierten Abbaufeldern zeigt, dass die Reduktion des E-Moduls mit dem horizontalen Ausbringen von 67% zu starke Verschiebungen ergibt. Daher darf das horizontale Ausbringen nicht zur Reduktion des E-Moduls herangezogen werden, weil die Steifigkeit des Festensystems stark unterschätzt werden würde. Aus diesem Umstand kann in weiterer Folge der Schluss gezogen werden, dass jene Teile des Festensystems, die im horizontalen Druckschatten der Kammern liegen, zu dessen Systemsteifigkeit beitragen. Dies wird auch von den Verschiebungen in der Umgebung eines Abbaufelds, das als soft-inclusion mit einer Reduktion des E-Moduls von 35% (Ausbringen) modelliert wird, bestätigt. Aus den Verschiebungen in den Punkten 1 und 2 geht hervor, dass die Steifigkeit des Festensystems in horizontaler Richtung mit einem um das Ausbringen reduzierten E-Modul zwar etwas unterschätzt wird, aber dennoch für eine erste Analyse der regionalen Spannungsumlagerungen herangezogen werden kann. In vertikaler Richtung wird die Steifigkeit in diesem Falle jedoch stark unterschätzt. Da in den vorhergehenden Abschnitten allerdings gezeigt worden ist, dass die Horizontalspannungen im Allgemeinen als kritischer zu betrachten sind, wird die unterschätzte Systemsteifigkeit in vertikaler Richtung in den folgenden Untersuchungen vernachlässigt. Für detailliertere Analysen sollte jedoch die anisotrope Steifigkeit des Festensystems berücksichtigt werden.

Bei der Auswertung der Ergebnisse werden zunächst die Spannungen entlang der Messlinie 1 ausgewertet und mit jenen eines Abbaufelds mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung entlang derselben verglichen. Innerhalb der Auflager ist der Vergleich ohne zusätzliche Berechnungen möglich, allerdings muss für diesen innerhalb des Abbaufelds die durchschnittliche Festenlast im Abbaufeld mit 12 Kammern bestimmt werden. Messlinie 1 ist horizontal und verläuft auf halber Kammerhöhe in X-Richtung durch die Mitte des Abbaufelds; vergleiche Abbildung 144 beziehungsweise Abbildung 116. Für die Ermittlung der durchschnittlichen Festenlast entlang der Messlinie 1 werden zunächst die einzelnen Festenlasten ermittelt. Dies ist die durchschnittliche Kraft, die entlang der betrachteten Messlinie über die Feste übertragen wird. Anschließend werden die einzelnen Festenlasten aufsummiert und auf die gesamte Breite des Abbaufelds bezogen und dadurch die

durchschnittliche Festenlast berechnet. Die durchschnittliche Festenlast wird für alle untersuchten Spannungen separat ermittelt. Nach der Auswertung der Spannungen entlang von Messlinie 1 werden die Spannungsverteilungen in den Schnitten 1 und 2 analysiert und beurteilt. Schnitt 1 ist ein Vertikalschnitt, der in X-Richtung und mittig durch das Abbaufeld verläuft. Schnitt 2 ist ein Horizontalschnitt, der das Abbaufeld auf halber Kammerhöhe durchschneidet. Abbildung 144 zeigt nochmals die Lage der Schnitte für das Modell der soft-inclusion. Bei der Beurteilung der Ergebnisse müssen zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

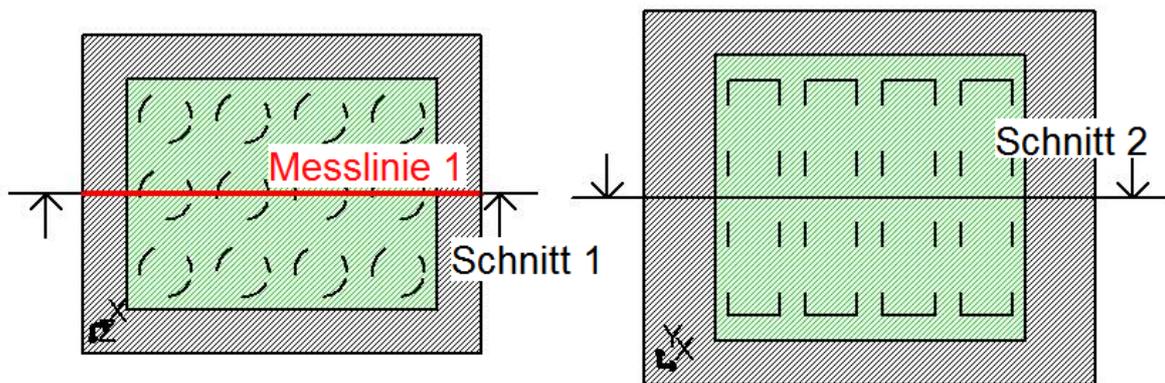


Abbildung 144: Lage der Schnitte 1 und 2 sowie der Messlinie 1

Die Spannungsverläufe entlang von Messlinie 1 sind in Abbildung 145 bis Abbildung 148 dargestellt und die wichtigsten Punkte sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die Spannungsverläufe der betrachteten Spannungen sind für das Abbaufeld mit 12 Kammern und dasselbe Abbaufeld in Form der soft-inclusion in den Auflagern vergleichbar.
- Innerhalb des Abbaufelds unterscheiden sich die Spannungsverläufe für die soft-inclusion zum Teil deutlich von den durchschnittlichen Festenlasten des Abbaufelds mit 12 Kammern. Die Vertikal- sowie Horizontalspannungen in Z-Richtung werden einigermaßen gut beschrieben. Demgegenüber werden die Horizontalspannungen in X-Richtung stark überschätzt und die Schubspannungen stark unterschätzt.

Dieser Umstand muss bei der Beurteilung der Ergebnisse der soft-inclusions berücksichtigt werden.

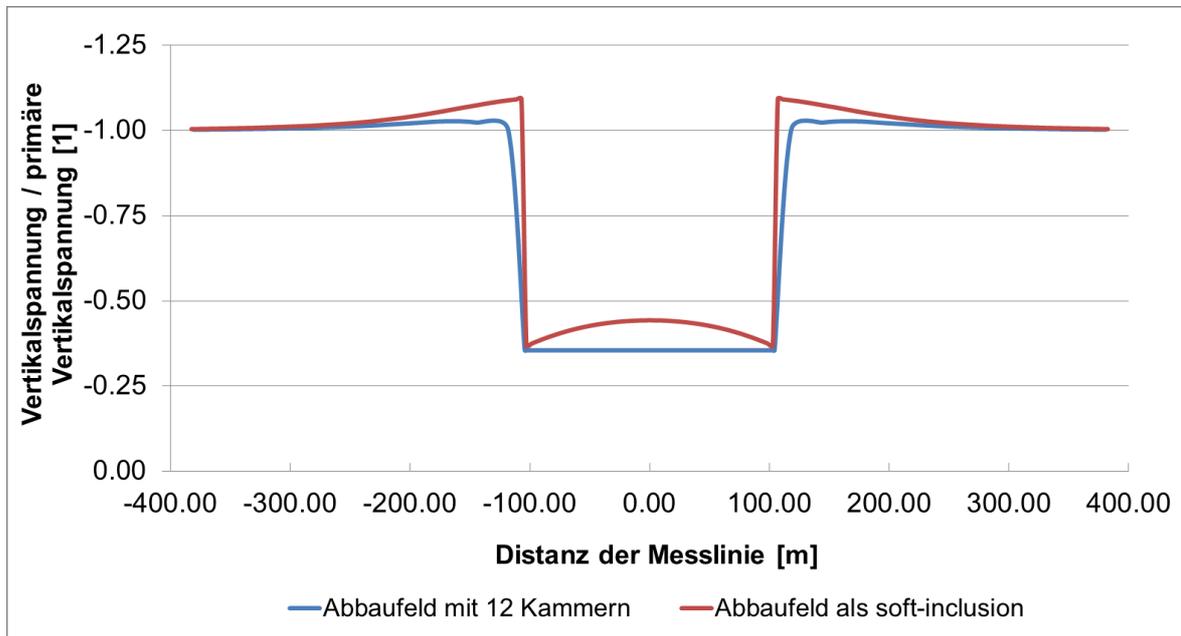


Abbildung 145: Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

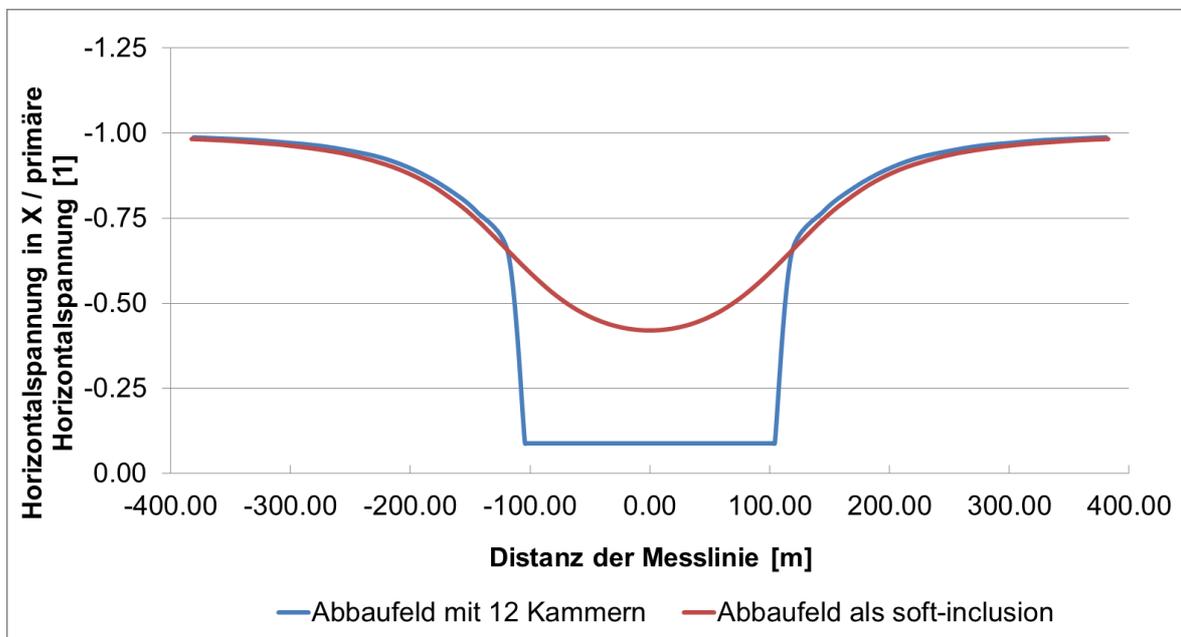


Abbildung 146: Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

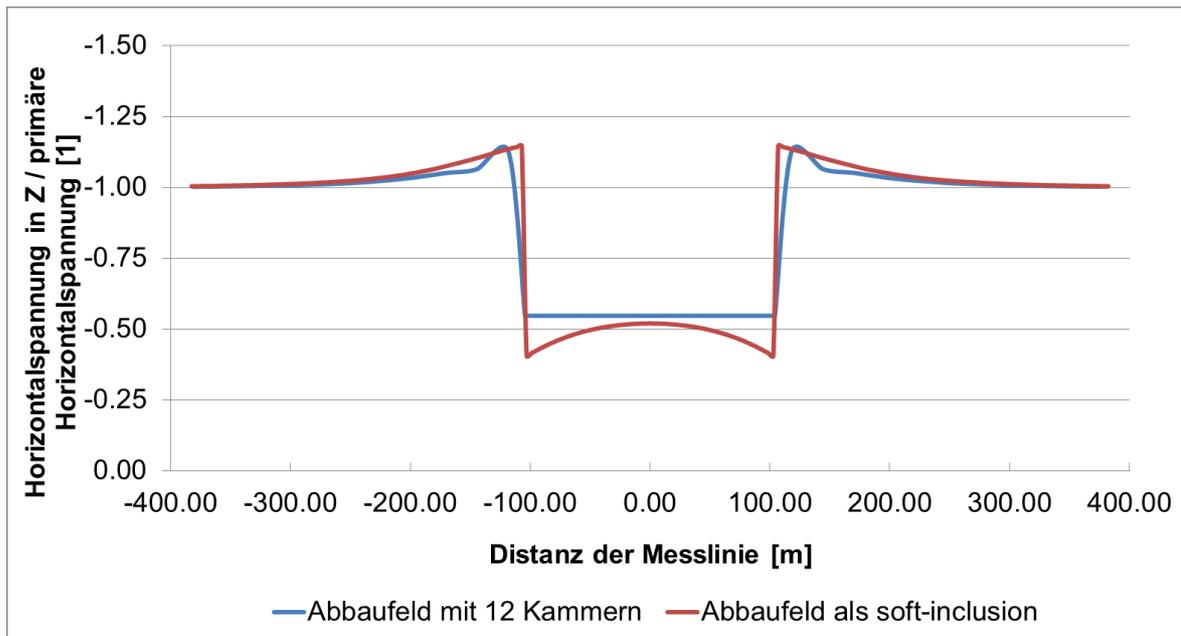


Abbildung 147: Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

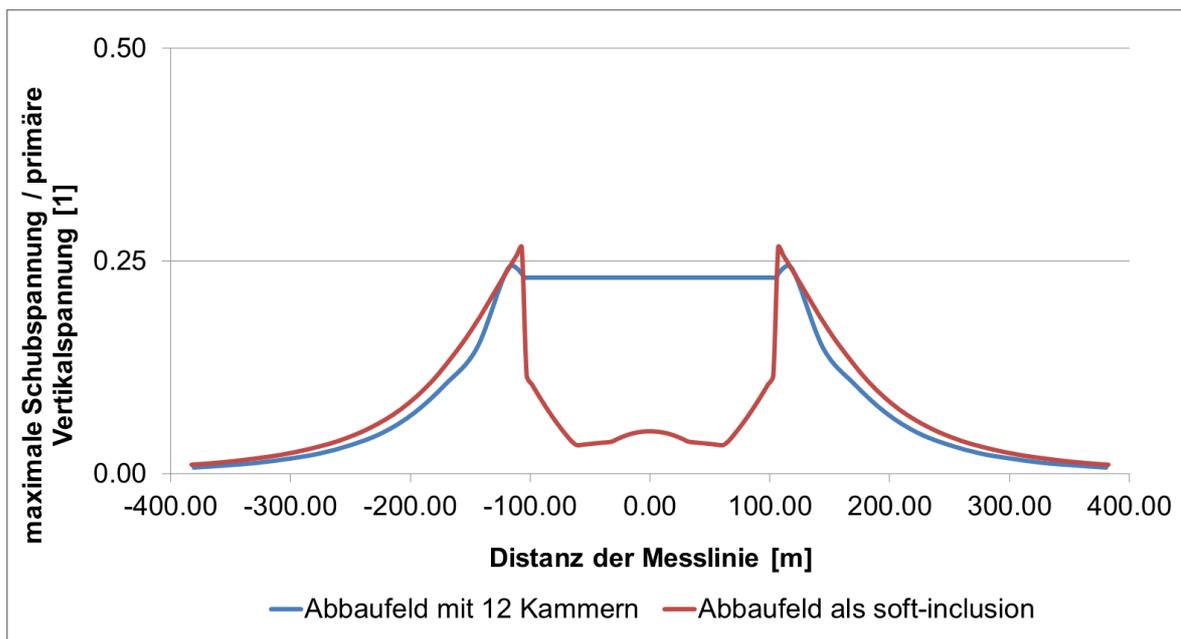


Abbildung 148: Vergleich der Schubspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

Abbildung 149 bis Abbildung 156 zeigen die farbkodierten Spannungsverteilungen in den Schnitten 1 und 2 in der Umgebung eines Abbaufelds mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung, das als soft-inclusion modelliert wird. Bei den folgenden

Spannungsverteilungen ist zudem zu beachten, dass die Spannungsintervalle sich von den bisher verwendeten unterscheiden. Dadurch ist eine bessere Beurteilung der soft-inclusions möglich. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die soft-inclusions nur im Bereich der Auflager die Höhe der Spannungen wiedergeben. Innerhalb eines Abbaufelds sind sie nur ein Anhaltspunkt für die Art der Spannungsumlagerungen (relatives Ausmaß der Spannungserhöhung beziehungsweise –erniedrigung im Abbaufeld). Im Folgenden werden die Spannungsumlagerungen mit jenen, die aus der Simulation eines Abbaufelds mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung (Abschnitt „5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld“) resultieren, verglichen:

- Die Vertikal- sowie Horizontalspannungen in den Firsten, Sohlen und Auflagerbereichen werden sowohl in der Höhe der Spannungsänderungen als auch in der Erstreckung von diesen gut durch die soft-inclusion beschrieben.
- Innerhalb eines Abbaufelds können die Vertikal- sowie Horizontalspannungen in X-Richtung nur bedingt für die Abschätzung der Art der Spannungsumlagerungen herangezogen werden. Bei den Vertikalspannungen werden die Spannungen in den äußeren Kammerreihen unterschätzt und bei Horizontalspannungen in X-Richtung die Spannungen in den äußeren Kammerreihen sowie die Spannungen in den mittleren Festen einer Kammerreihe.
- Die Art der Spannungsumlagerungen der Horizontalspannungsverteilung in Z-Richtung wird durch die soft-inclusions jedoch einigermaßen gut beschrieben. Die äußeren Kammerreihen werden etwas stärker belastet als die inneren und innerhalb einer Kammerreihe sind die Spannungen in den mittleren Festen etwas höher als in den äußeren.
- Betreffend die Schubspannungen kann festgehalten werden, dass diese im Bereich der Auflager einigermaßen gut beschrieben werden. Innerhalb des Abbaufelds sind jedoch keine Aussagen über die Schubspannungen möglich, weil im Falle der Simulation mit soft-inclusions in diesen keine auftreten.

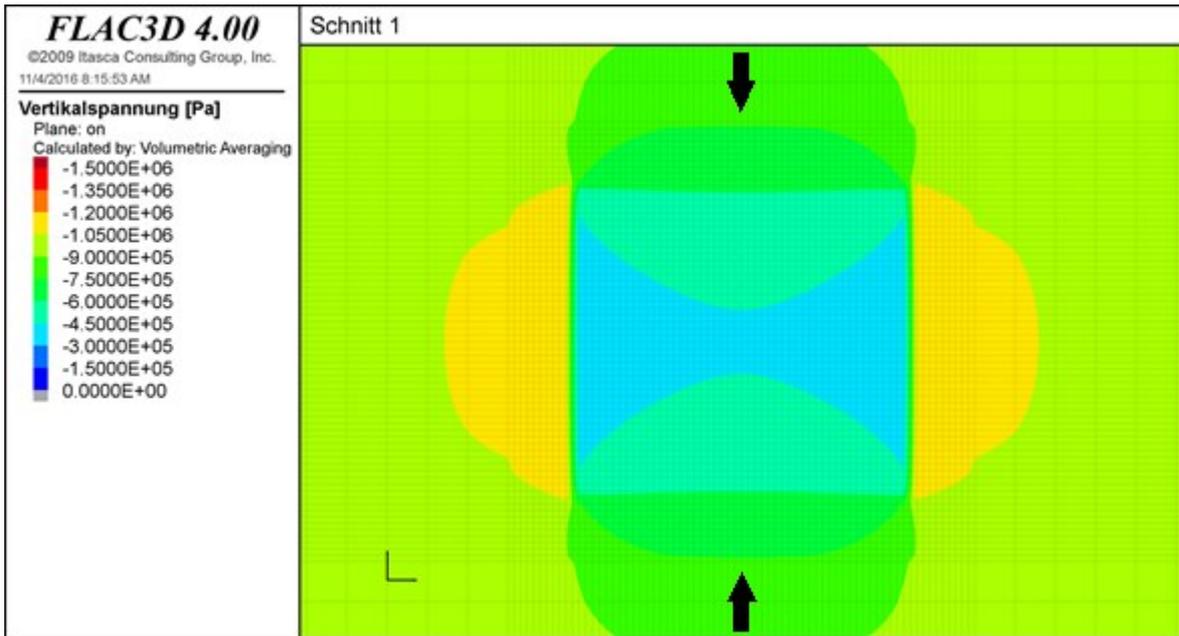


Abbildung 149: Vertikalspannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

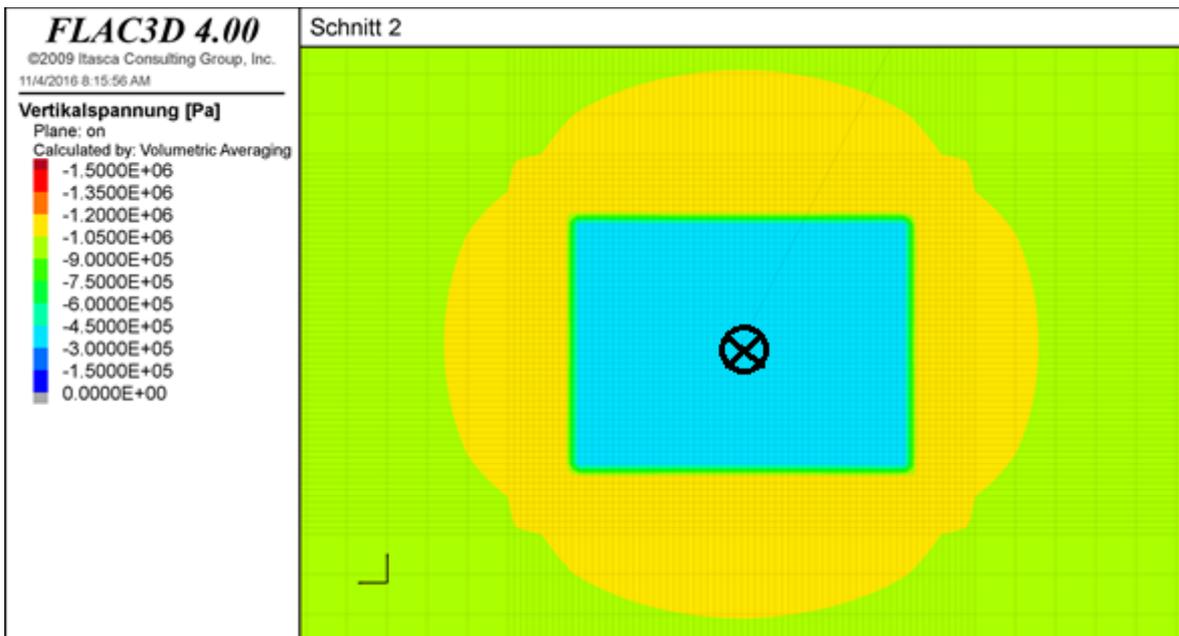


Abbildung 150: Vertikalspannungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

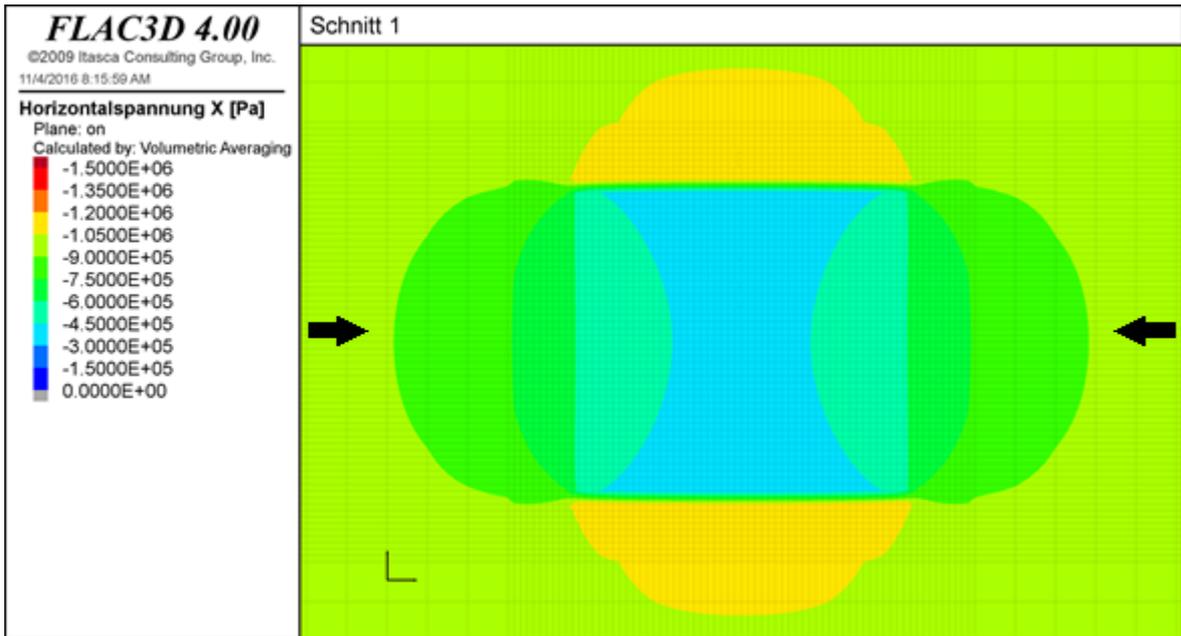


Abbildung 151: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

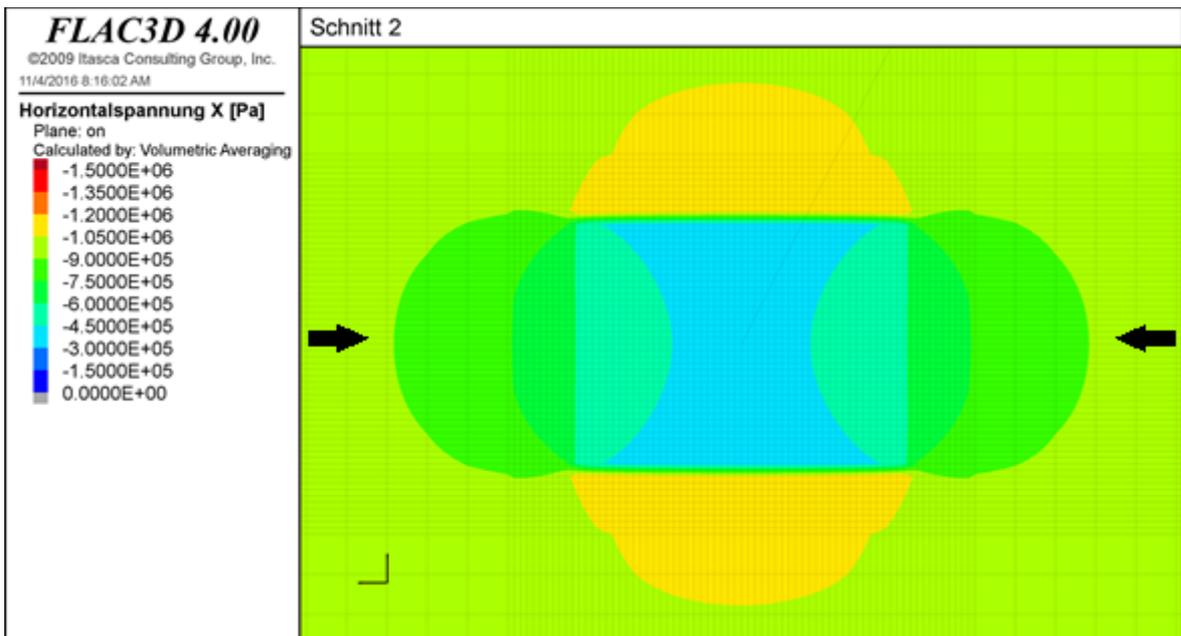


Abbildung 152: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

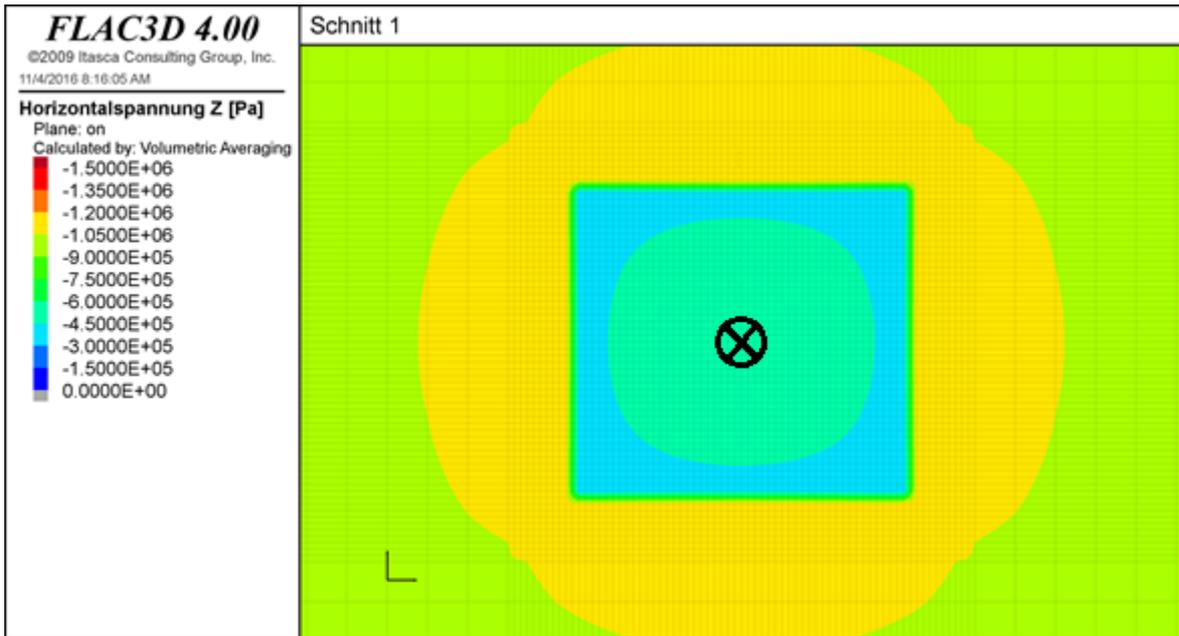


Abbildung 153: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

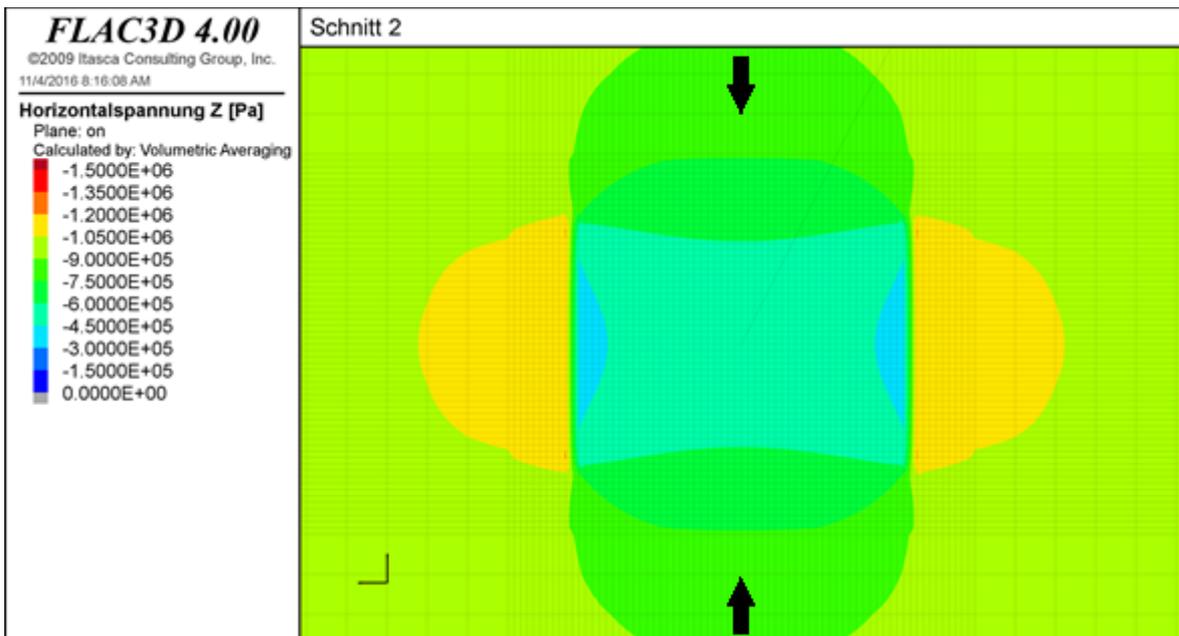


Abbildung 154: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

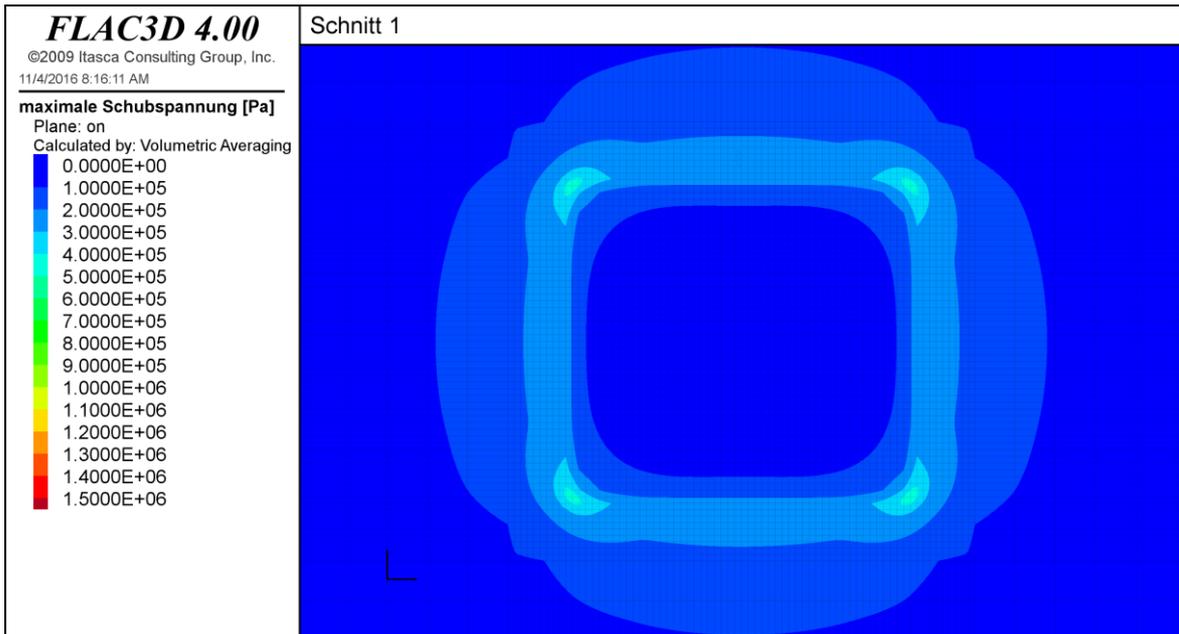


Abbildung 155: Schubspannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

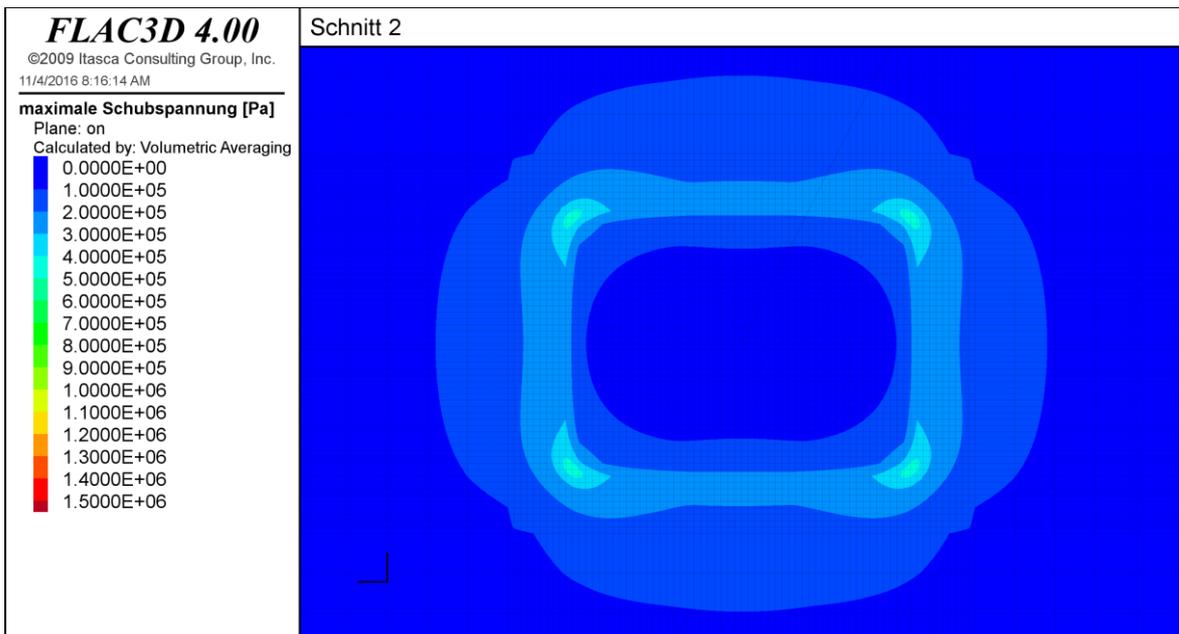


Abbildung 156: Schubspannungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

5.4.3.2 3 Abbaufelder mit 12 Kammern

In diesem Abschnitt werden die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Raise-mining Abbaufeldern untersucht. Da im letzten Abschnitt gezeigt worden ist, dass die Spannungsumlagerungen in einem Abbaufeld und in dessen Umgebung durch eine soft-inclusion abgeschätzt werden können, werden für die Simulation von benachbarten Abbaufeldern wiederum soft-inclusions herangezogen: Es werden 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern simuliert. Die zugehörigen soft-inclusion haben wiederum eine Abmessung von 210m x 195m x 157,5m und die Reduktion des E-Moduls beträgt 35%. Die Abbaufelder sind durch Barrierefesten mit einer Breite von einem Kammerdurchmesser (35m) voneinander getrennt. Zur Barrierefestenbreite ist anzumerken, dass diese den Abstand zwischen den zwei soft-inclusions bezeichnet. Da der Abstand der Mittelpunkte der Randkammern zum Rand der soft-inclusion $0,75 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$ (26,25m) beträgt, entspricht der Abstand der Mittelpunkte von zwei Randkammern aus benachbarten Baufeldern 2,5 Kammerdurchmessern. Dadurch vergrößert sich die Barrierefeste stark; vergleiche Abbildung 157. Die Annahme einer solch breiten Barrierefeste ist im Vergleich mit im klassischen Kammerfestenbau üblichen Barrierefestenbreiten konservativ. Aus diesem Grund sollten zukünftige Untersuchungen mit einer geringeren Barrierefestenbreite durchgeführt werden.

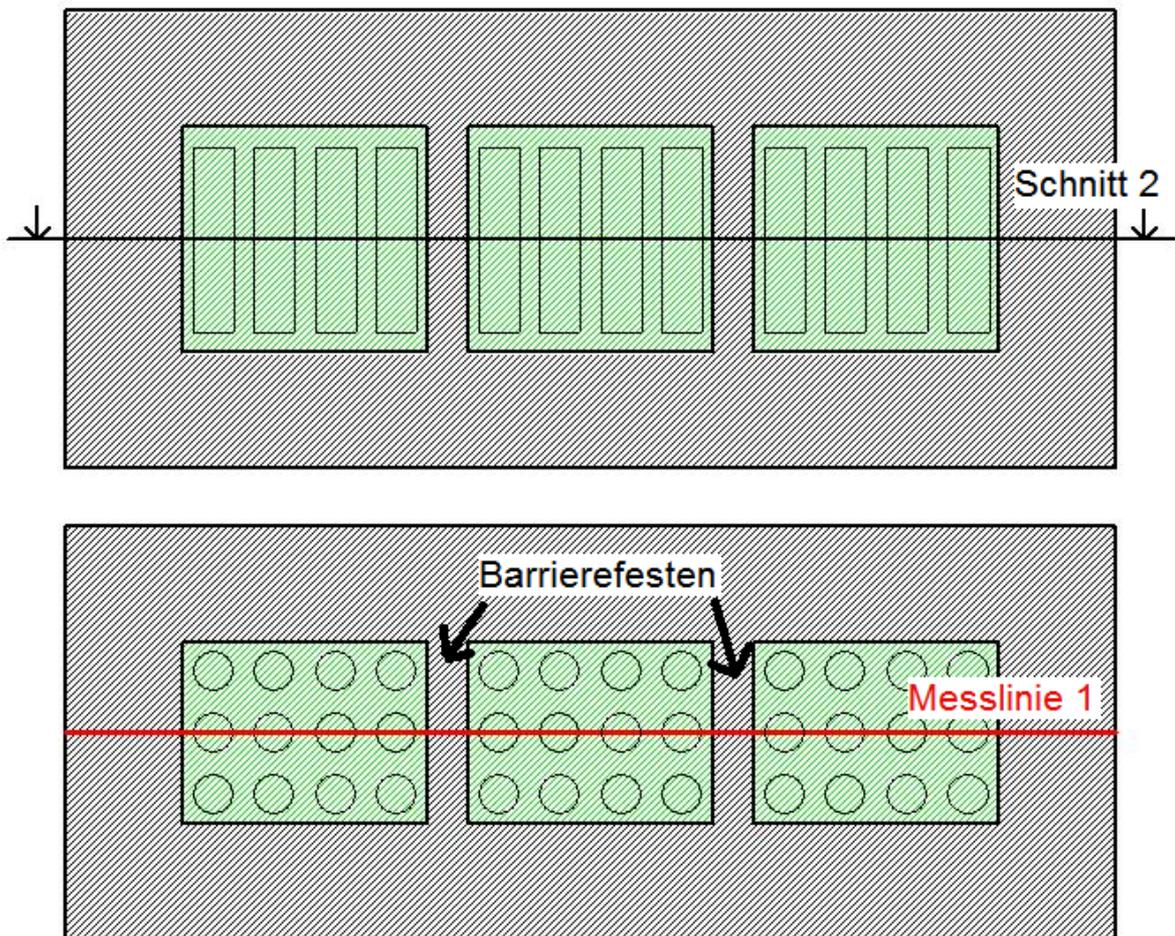


Abbildung 157: Aufriss (oben) und Grundriss (unten) von 3 Abbaufeldern mit je 12 Kammern in Form von soft-inclusions. Die Barrierefestenbreite zwischen den einzelnen Abbaufeldern beträgt 35m, der Zentralabstand zwischen zwei Kammern aus benachbarten Abbaufeldern jedoch 87,5m (2,5*Kammerdurchmesser). Zudem ist die Lage von Schnitt 2 und Messlinie 1 ausgewiesen.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe der Spannungsverläufe entlang von Messlinie 1 und der farbkodierten Spannungsverteilungen im Schnitt 2 (Abbildung 158 bis Abbildung 163). Die Lage der Messlinie und des Schnitts entspricht dabei jener aus dem vorhergehenden Abschnitt und ist in Abbildung 157 dargestellt. Die Spannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) werden nicht dargestellt, weil die Spannungsumlagerungen in den First- und Sohlbereichen an Hand der Spannungsumlagerungen einer einzelnen soft-inclusion abgeschätzt werden können. Des Weiteren sind die wesentlichen Merkmale und Eigenschaften der Spannungsverteilungen und Spannungsverläufe mit jenen einer einzelnen soft-inclusion vergleichbar. Aus diesem Grund werden diese nicht näher beschrieben sondern die wichtigsten Punkte im Folgenden zusammengefasst. Zudem muss

beachtet werden, dass die folgenden Anmerkungen immer relativ zu einem Abbaufeld in Form einer soft-inclusion sind. Dies gilt im Speziellen für die Spannungsumlagerungen innerhalb der Abbaufelder (soft-inclusions), weil im Abschnitt „5.4.3.1 Abbaufeld mit 12 Kammern“ gezeigt worden ist, dass sich diese teilweise deutlich von den Spannungsumlagerungen in einem Abbaufeld, das mit Kammern modelliert wird, unterscheiden. Bei der Auswertung der Ergebnisse sind zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte zu beachten.

- Durch den Abbau von mehreren Abbaufeldern verändern sich die Spannungen in den Barrierefesten zwischen den Baufeldern deutlich. Die Vertikalspannungen in den Barrierefesten steigen um in etwa 25% gegenüber den primären Vertikalspannungen an und die Horizontalspannungen in Z-Richtung um in etwa 35% gegenüber den primären. Demgegenüber sinken die Horizontalspannungen in X-Richtung um in etwa 65% gegenüber den primären Spannungen ab. Die Ursache für die unterschiedliche Ausbildung der Horizontalspannungen in den Barrierefesten liegt in der Richtung der Anordnung der Baufelder in Bezug auf die Richtung der Horizontalspannungen.
- Die Vertikal- sowie Horizontalspannungen in Z-Richtung sind im mittleren Baufeld geringfügig größer und die Horizontalspannungen in X-Richtung geringfügig niedriger als in den beiden äußeren Baufeldern. Aus diesem Umstand kann gefolgert werden, dass die Barrierefesten mit einer Breite von einem Kammerdurchmesser die Abbaufelder effektiv voneinander isolieren.
- Da im letzten Abschnitt gezeigt worden ist, dass die soft-inclusions betreffend die Schubspannungen bei den regionalen Spannungsumlagerungen nur einigermaßen gute und innerhalb der Abbaufelder keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern, werden diese nicht mehr betrachtet. Allerdings wird angemerkt, dass aufgrund der Unterschiede in der Höhe der Horizontalspannungen mit dem Auftreten von ausgeprägten Schubspannungen in den Barrierefesten zu rechnen ist.

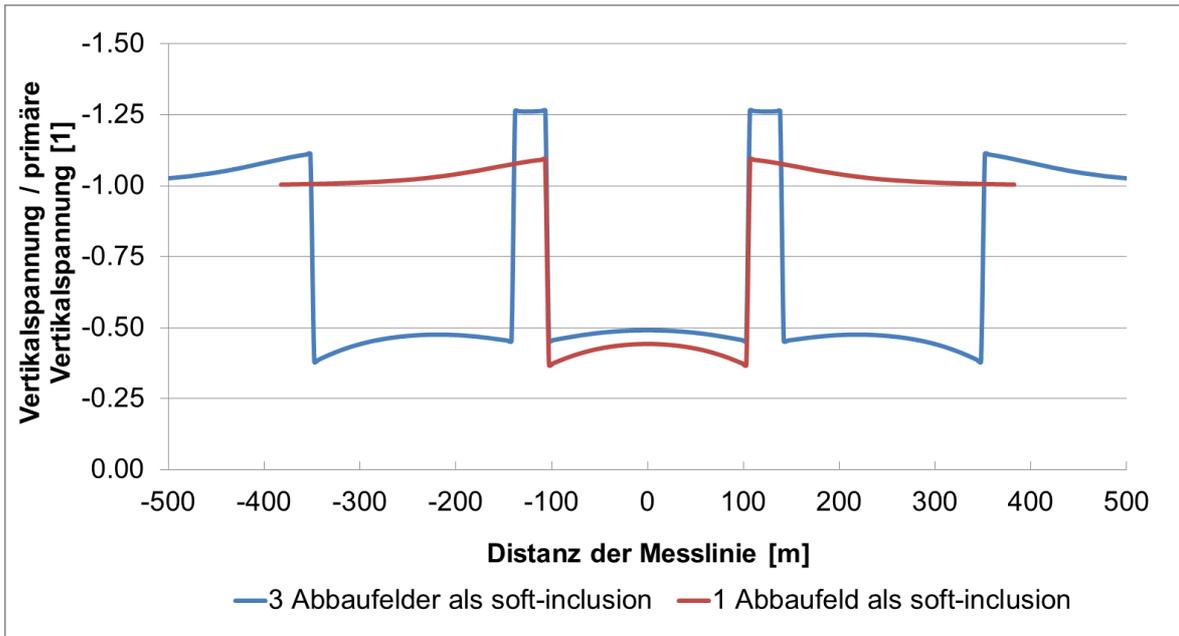


Abbildung 158: Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld und 3 Abbaufeldern (Barrierefestenbreite 35m) in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35%

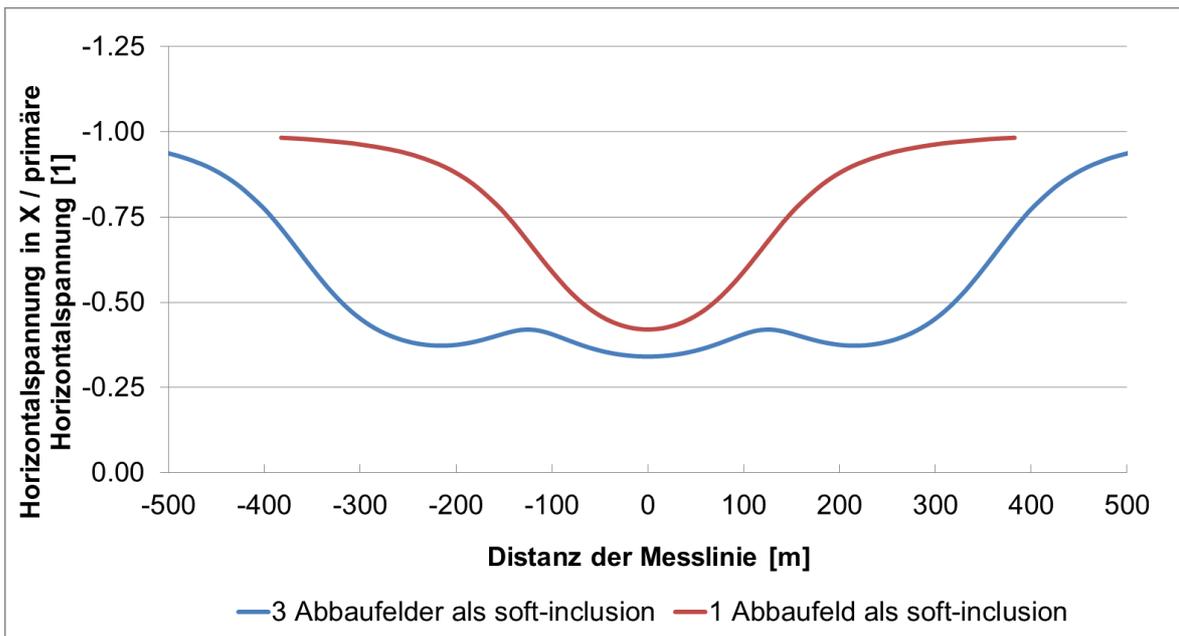


Abbildung 159: Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld und 3 Abbaufeldern (Barrierefestenbreite 35m) in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35%

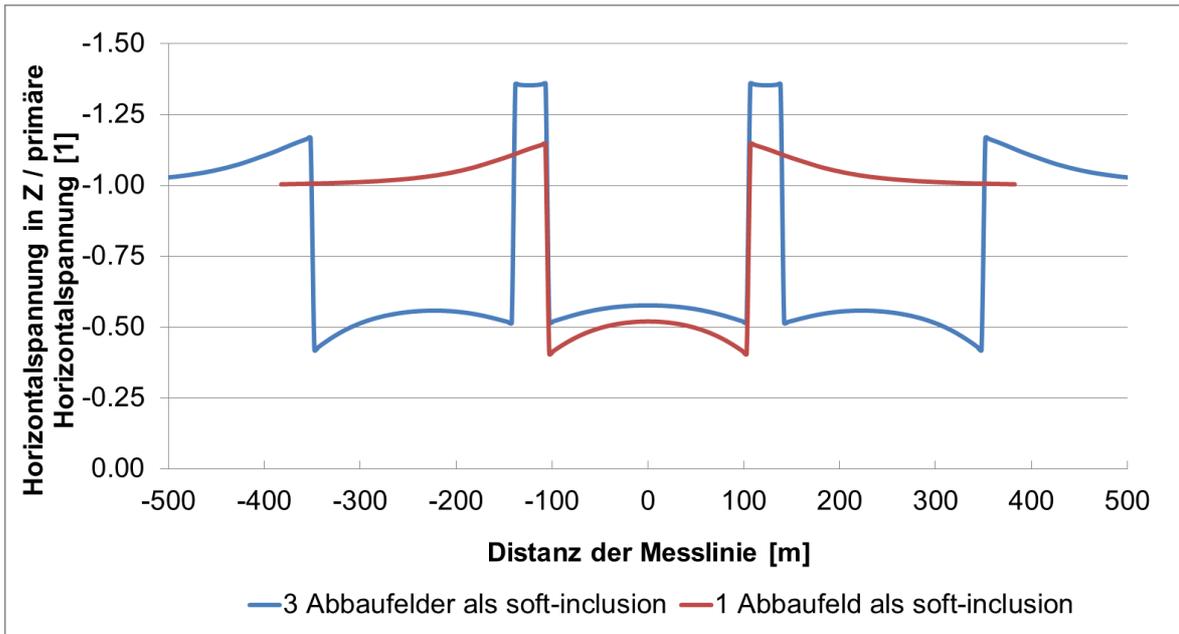


Abbildung 160: Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld und 3 Abbaufeldern (Barrierefestenbreite 35m) in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35%

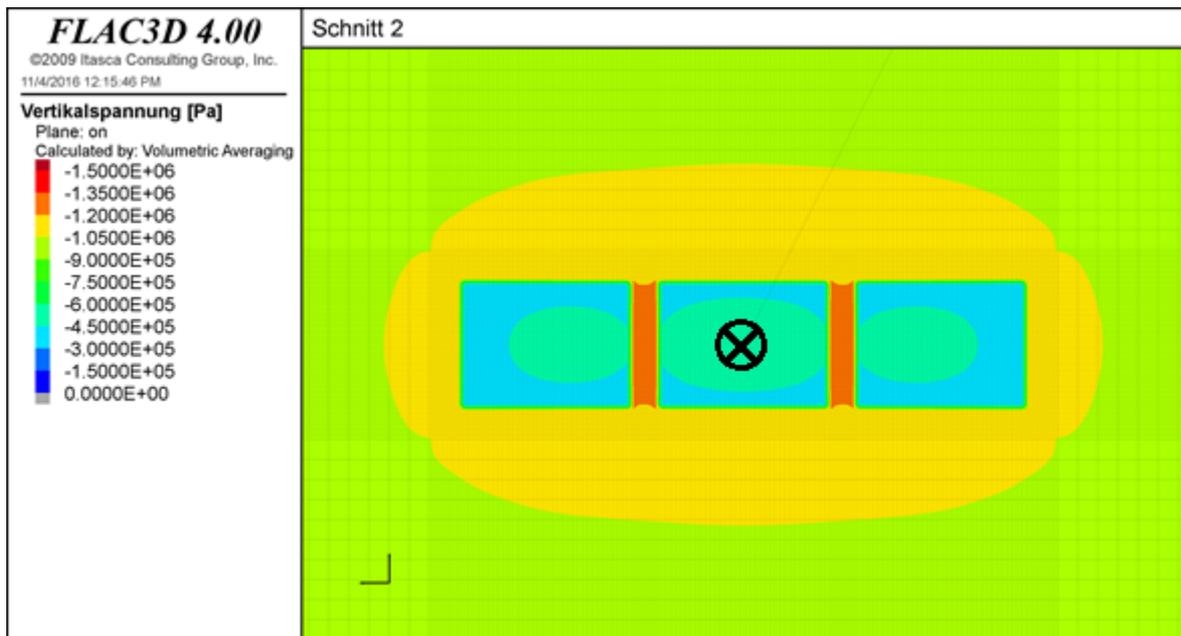


Abbildung 161: Vertikalspannungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) für 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% und Barrierefestenbreite von 35m

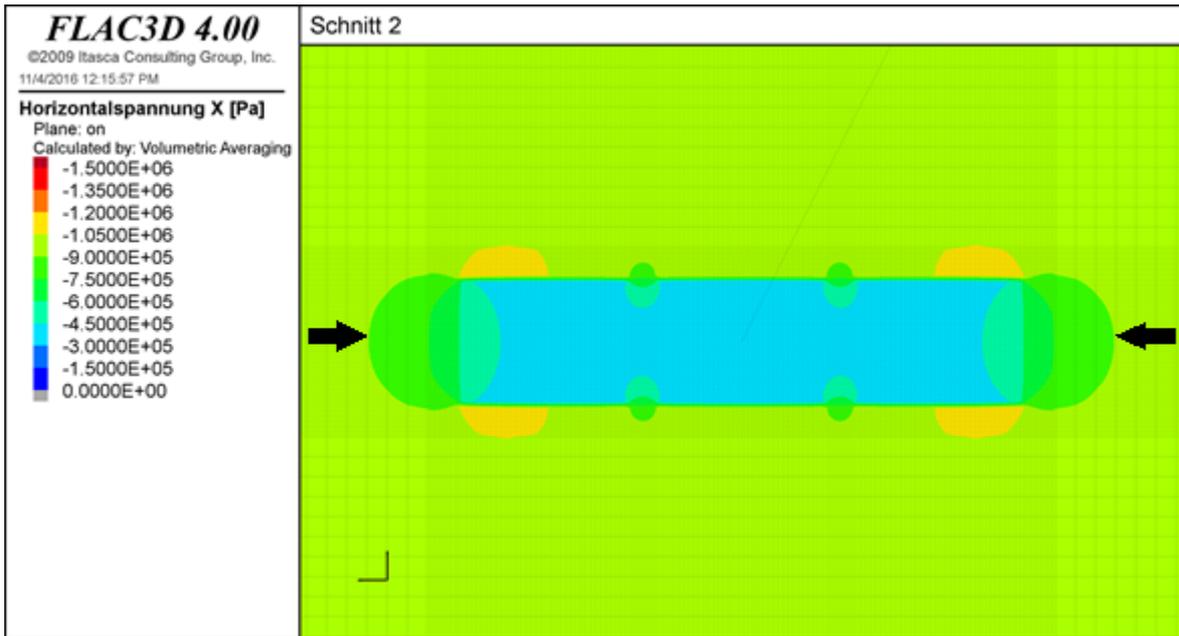


Abbildung 162: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) für 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% und Barrierefestenbreite von 35m

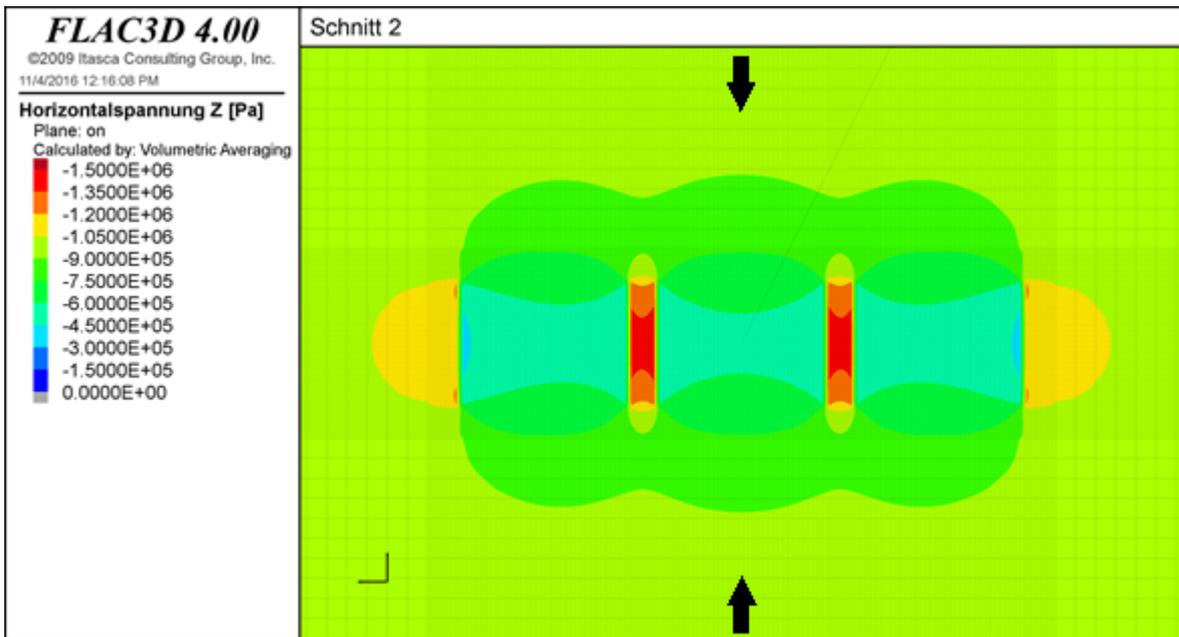


Abbildung 163: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) für 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% und Barrierefestenbreite von 35m

5.4.3.3 Abbaufeld mit 48 Kammern

In diesem Abschnitt ist von Interesse, inwiefern sich die Spannungsumlagerungen bei einer Vergrößerung des Abbaufelds verändern. Dazu wird ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Kammerordnung und einem Zentralabstand von 52,5m in Form einer soft-inclusion untersucht. Die Abmessungen eines solchen Abbaufelds betragen 420m x 195m x 315m und die E-Modul Reduktion beträgt wiederum 35%.

Bei der Auswertung der Ergebnisse werden die Spannungen eines solchen Abbaufelds mit jenen eines Abbaufelds mit 12 Kammern verglichen. Dazu werden die Spannungsverläufe entlang von Messlinie 1 und die Spannungsumlagerungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) ausgewertet, vergleiche Abbildung 164 bis Abbildung 169. Die Lage der Messlinie und des Schnitts ist dabei dieselbe, wie bei der Auswertung der Ergebnisse eines Abbaufelds mit 12 Kammern; vergleiche Abbildung 144. Die Spannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) werden nicht dargestellt, weil die Spannungsumlagerungen in den First- und Sohlbereichen an Hand der Spannungsumlagerungen einer einzelnen soft-inclusion abgeschätzt werden können. Allerdings ist die Erstreckung der Spannungsumlagerungen in den Firsten und Sohlen etwas größer, weil die Spannweite des Abbaufelds größer ist. Des Weiteren sind die wesentlichen Merkmale und Eigenschaften der Spannungsverteilungen und Spannungsverläufe mit jenen eines Abbaufelds mit 12 Kammern, das in Form einer soft-inclusion simuliert worden ist, vergleichbar. Aus diesem Grund werden diese nicht näher beschrieben sondern die wichtigsten Punkte im Folgenden zusammengefasst. Zudem muss beachtet werden, dass die folgenden Anmerkungen immer relativ zu einem Abbaufeld mit 12 Kammern in Form einer soft-inclusion sind. Dies gilt im Speziellen für die Spannungsumlagerungen innerhalb der Abbaufelder (soft-inclusions) , weil im Abschnitt „5.4.3.1 Abbaufeld mit 12 Kammern“ gezeigt worden ist, dass sich diese teilweise deutlich von den Spannungsumlagerungen in einem Abbaufeld, das mit Kammern modelliert wird, unterscheiden. Bei der Auswertung der Ergebnisse sind zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte zu beachten.

- Die Vergrößerung des Baufelds hat auf die Horizontalspannungen einen geringeren Einfluss als auf die Vertikalspannungen. Die Ursache dafür dürfte im Umstand liegen, dass die Grundfläche des Abbaufelds vervierfacht worden ist, die Seitenfläche einer Seite jedoch nur verdoppelt worden ist.
- Die Vertikalspannungen steigen sowohl in den Auflagern als auch innerhalb des Abbaufelds signifikant an. Des Weiteren vergrößert sich die Erstreckung der Spannungsumlagerungen in den Auflagern signifikant.
- Die Horizontalspannungen verringern sich in den Auflagern und innerhalb des Abbaufelds. Im Abbaufeld fällt die Verringerung in der Mitte dabei deutlich stärker aus als am Rand. Dies bestätigt das Ergebnis, dass die Horizontalspannungssituation innerhalb eines Abbaufelds durch den Abbau von mehreren Kammern positiv beeinflusst wird.
- Die Schubspannungen sind wiederum nicht analysiert worden, weil die Simulation mit soft-inclusion diese in der Umgebung von Abbaufeldern nur einigermaßen gut und in Abbaufeldern nicht adäquat beschreibt.

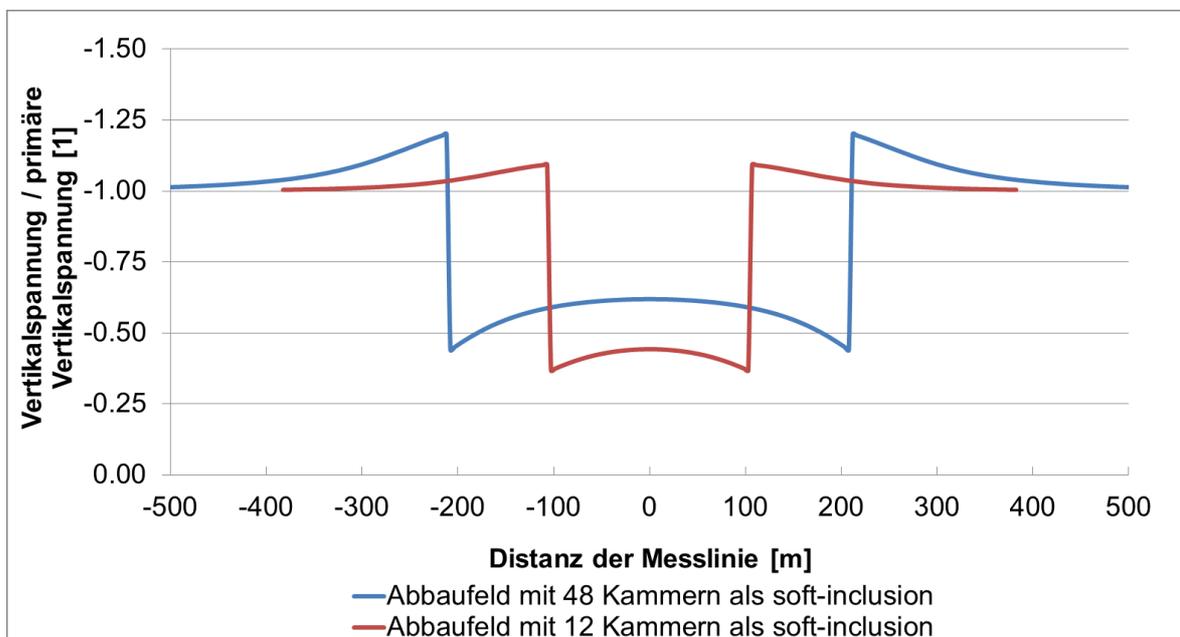


Abbildung 164: Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern und ein Abbaufeld mit 48 Kammern in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35%

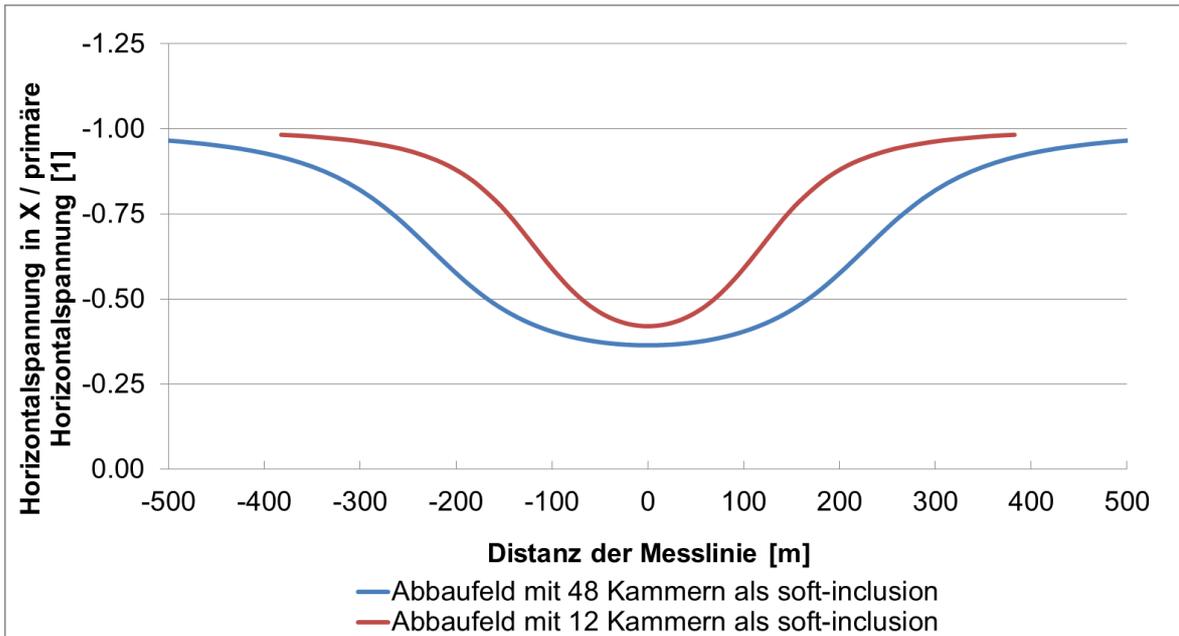


Abbildung 165: Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern und ein Abbaufeld mit 48 Kammern in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35%

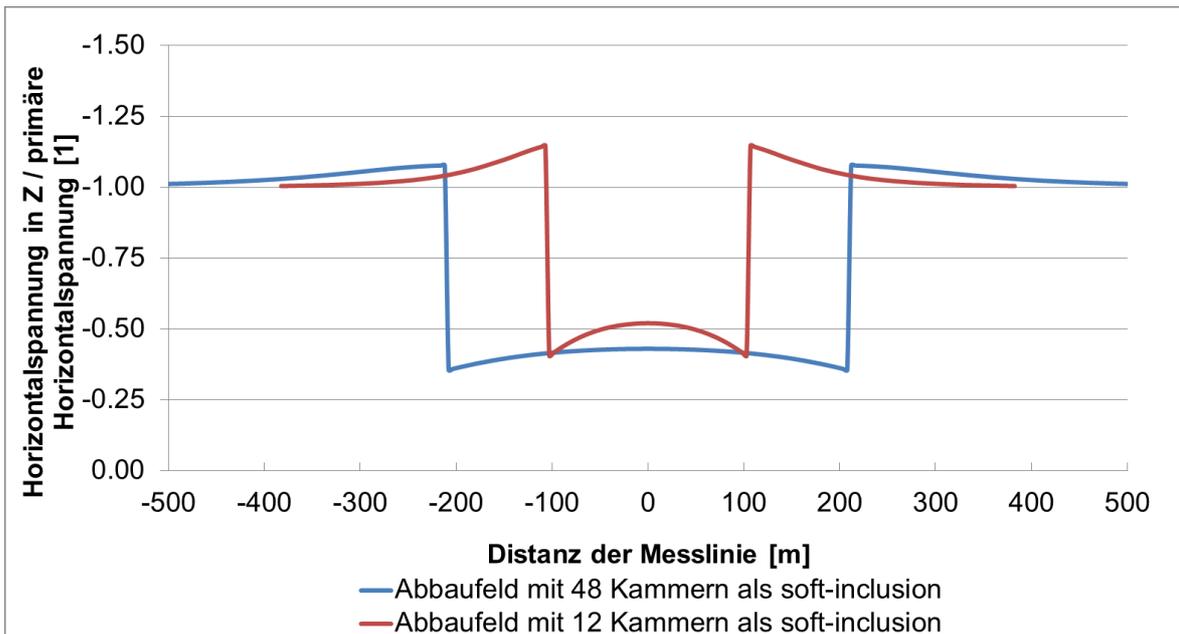


Abbildung 166: Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern und ein Abbaufeld mit 48 Kammern in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35%

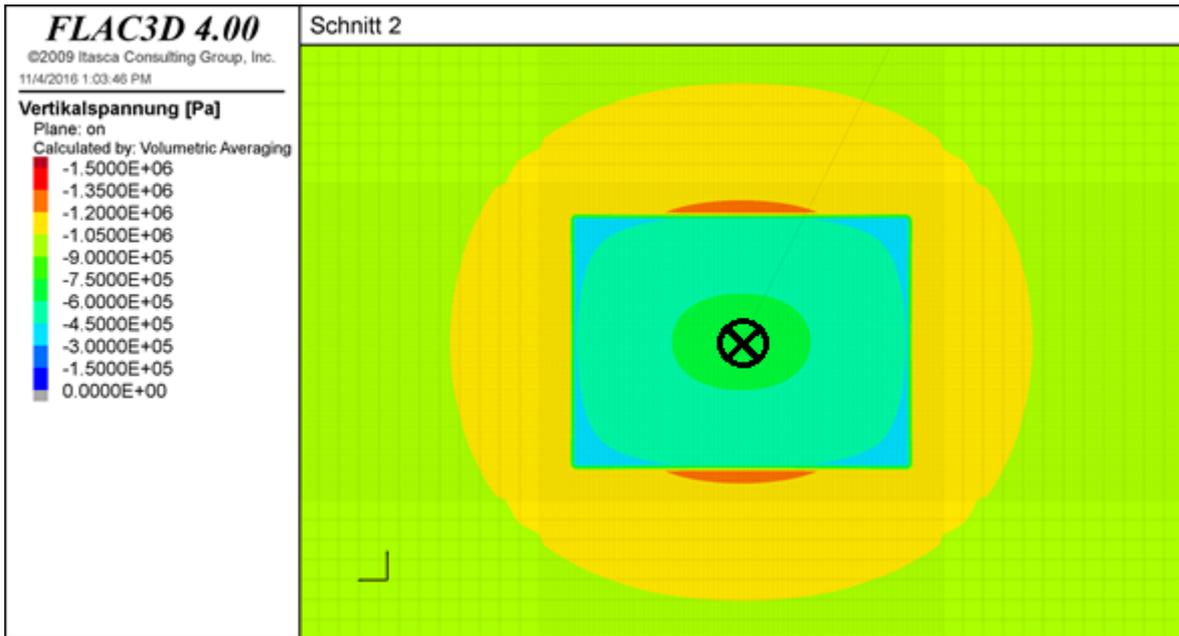


Abbildung 167: Vertikalspannungen im Schnitt 2 für ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

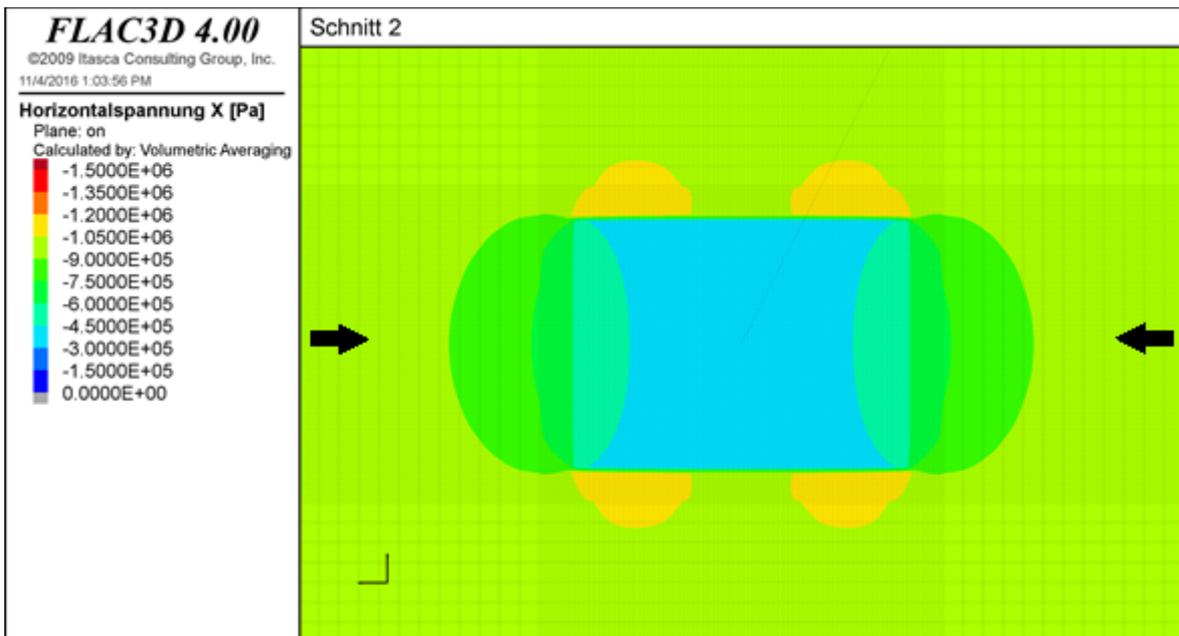


Abbildung 168: Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2 für ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

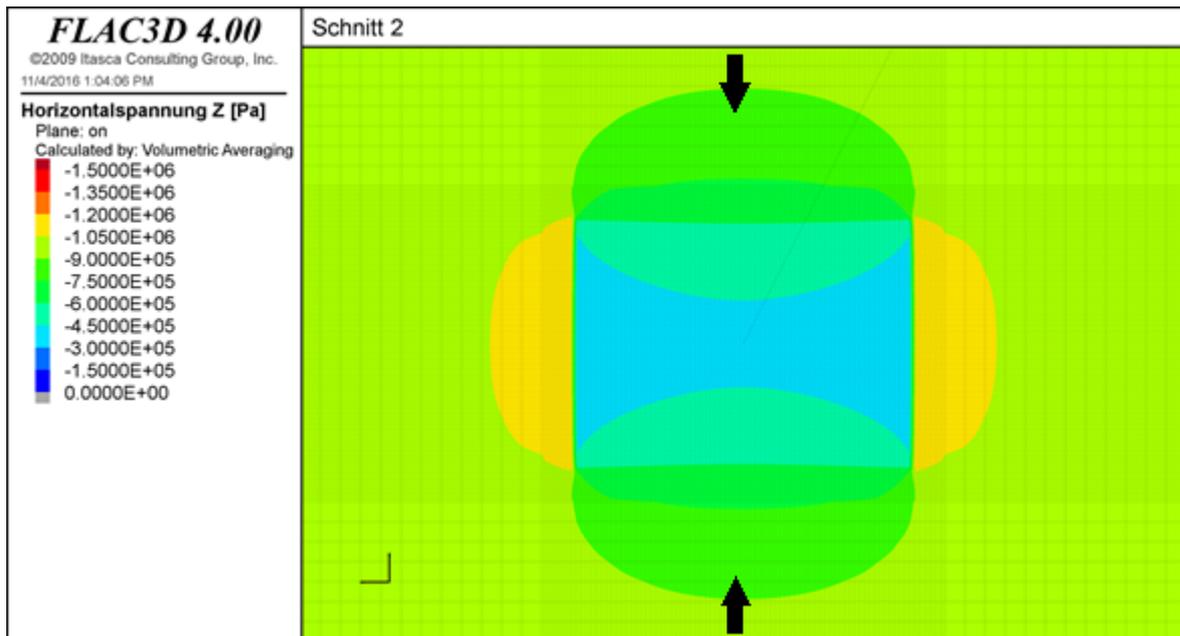


Abbildung 169: Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2 für ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%

5.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Untersuchungen bezüglich der Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld kurz zusammengefasst. Dazu ist ein Abbaufeld mit 12 Kammern, die entweder quadratisch oder dreiecksförmig angeordnet sind, sowie das Versagen einer Feste in einem solchen Abbaufeld untersucht worden. In weiterer Folge ist zunächst ein Abbaufeld in Form einer soft-inclusion modelliert und simuliert worden und anschließend die Auswirkungen einer Vergrößerung des Abbaufelds sowie der Anordnung von mehreren Abbaufeldern nebeneinander mit Hilfe solcher soft-inclusions beurteilt worden. Eine soft-inclusion ist dabei ein Bereich des Gebirges, der einen geringeren E-Modul aufweist. Da die Systemsteifigkeit eines Baufelds geringer ist, kann dieser Ansatz für die Modellierung von Abbaufeldern gewählt werden. Die Kammergeometrie hat dabei durchwegs jener des Bergbaus Gummern entsprochen (Höhe 160m, Durchmesser 35m, Höhen- zu Durchmesser Verhältnis 4,57), wobei die Firsten horizontal simuliert worden sind. Der Zentralabstand ist dabei als $1,5 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$ gewählt worden. Die

primären Vertikal- und Horizontalspannungen haben jeweils 1MPa betragen. Eine Abschätzung des Einflusses von veränderten Eingangsparametern kann mit Hilfe der Ergebnisse der vorhergehenden Abschnitte gemacht werden.

- Die Spannungsumlagerungen in Abbaufeldern mit mehreren Kammerreihen sind vergleichbar mit jenen eines Abbaufelds, das nur aus einer Kammerreihe besteht. Allerdings wirkt sich der Abbau von mehreren Kammerreihen im Allgemeinen positiv auf die Standfestigkeit des Abbaufelds aus, weil sich die Spannungen in den Festen signifikant verringern.
- Für die Standfestigkeit sind wiederum die Horizontalspannungen entscheidend, weil die Vertikalspannungsumlagerungen äußerst gering sind.
- Die äußeren Kammerreihen eines Abbaufelds werden im Allgemeinen etwas stärker belastet als die inneren Kammerreihen.
- Die Spannungsumlagerungen einer quadratischen und dreiecksförmigen Kammeranordnung sind einander ähnlich, wobei allerdings die Umlagerung der Horizontalspannungen in Bezug auf die Standfestigkeit bei einer dreiecksförmigen Kammeranordnung etwas günstiger ist.
- Bei Versagen einer Feste ist die Umgebung von dieser am stärksten betroffen. Bereits in einem Abstand von zwei Festen wirkt sich das Versagen der Feste nur mehr geringfügig aus.
- Die Spannungsumlagerungen, die aus dem Versagen einer Feste resultieren, wirken sich auf die Standfestigkeit einer dreiecksförmigen Kammeranordnung etwas ungünstiger aus als auf jene einer quadratischen Anordnung.
- Durch den Abbau von Kammern wird die Steifigkeit des Gebirges im Bereich der Kammern reduziert. Dieser Umstand wird bei den Simulationen, in denen die Abbaufelder als soft-inclusions modelliert werden, ausgenutzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die soft-inclusions die Vertikal- und Horizontalspannungen in den Auflagern gut beschreiben. Innerhalb des Abbaufelds beschreiben sie die Vertikal- und

Horizontalspannungsumlagerungen zwar ungenügend, geben aber zumindest Aufschluss über die relative Höhe der Spannungen innerhalb des Abbaufelds. Im Gegensatz dazu werden die Schubspannungsumlagerungen speziell innerhalb von Abbaufeldern durch die soft-inclusions nicht entsprechend beschrieben.

- Beim Abbau mehrerer Abbaufelder nebeneinander steigen die Spannungen in den Barrierefesten zwischen den einzelnen Abbaufeldern signifikant an. Die untersuchte Barrierefestenbreite (Zentralabstand von zwei Kammern aus benachbarten Feldern von 2,5 Kammerdurchmessern) isoliert die einzelnen Abbaufelder gut voneinander. Da diese Barrierefestenbreite im Vergleich mit klassischen Kammerfestenbauten jedoch konservativ ist, sollten zukünftige Untersuchungen mit kleineren Barrierefesten durchgeführt werden, um die Lagerstättenverluste in diesen zu minimieren.
- Eine Erhöhung der Kammeranzahl in einem Abbaufeld wirkt sich stärker auf die Vertikal- als auf die Horizontalspannungen aus. Die Vertikalspannungen steigen sowohl in den Auflagern als auch innerhalb des Abbaufelds signifikant an. Die Horizontalspannungen bleiben indes eher unverändert beziehungsweise sinken leicht ab.
- Das Raise-mining Festensystem weist in vertikaler und horizontaler Richtung signifikante Unterschiede in der Steifigkeit auf. Dabei ist diese in vertikaler Richtung deutlich größer als in horizontaler.
- Die Reduktion des E-Moduls in den soft-inclusion ist kritisch für die Qualität der Ergebnisse. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Reduktion mit dem horizontalen Ausbringen nicht zulässig ist. Anstatt dessen kann das Ausbringen für erste Analysen herangezogen werden. Allerdings unterschätzt dieses die Steifigkeit in horizontaler Richtung geringfügig und in vertikaler Richtung stark. Aus diesem Grund ist eine Aufgabenstellung für zukünftige Untersuchungen, die Steifigkeit des Raise-mining Festensystems im Detail zu analysieren, um die Qualität der Ergebnisse von Simulationen mit soft-inclusions zu verbessern.

5.4.5 Fallbeispiel: Abbaufeld in Gummern

Die Analyse der Standfestigkeit eines Abbaufelds im Bergbau Gummern wird unter Berücksichtigung der Abbausequenz im Abschnitt „5.5.4 Fallbeispiel: Abbaufeld inklusive Abbausequenz in Gummern“ durchgeführt. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle keine Standfestigkeitsuntersuchung.

5.5 Abbausequenz

In diesem Kapitel wird untersucht, wie die Abbausequenz von Kammern die Spannungsumlagerungen und in weiterer Folge die Standfestigkeit eines Abbaufelds beeinflusst. Dazu wird ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung simuliert, wobei zwei verschiedene Abbausequenzen untersucht werden:

1. Abbau startet von einer Seite des Abbaufelds aus und entwickelt sich in eine Richtung.
2. Abbau verteilt sich von Beginn an gleichmäßig übers Abbaufeld, wobei zunächst nur weiter voneinander entfernt liegende Kammern abgebaut werden.

Als Kammergeometrie wird wiederum jene des Bergbaus Gummern (Höhe 160m, Durchmesser 35m) herangezogen und der Zentralabstand beträgt 52,5m ($1,5 \cdot d$). Eine Variation der Eingangsparameter, wie beispielsweise ein anderer Zentralabstand der Kammern oder eine dreiecksförmige Kammeranordnung, wird nicht vorgenommen. Die Auswirkungen von veränderten Eingangsparametern können an Hand der Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen abgeschätzt werden.

5.5.1 Abbausequenz 1: Abbau entwickelt sich in eine Richtung

In dieser Abbausequenz werden immer drei Kammern zugleich abgebaut. Dabei startet der Abbau von einer Seite des Abbaufelds aus und entwickelt sich zur anderen Seite hin. Dazu werden die Kammern in folgender Reihe abgebaut:

- Schritt 1 → Kammern 1, 2, 3
- Schritt 2 → Kammern 4, 5, 6
- Schritt 3 → Kammern 7, 8, 9
- Schritt 4 → Kammern 10, 11, 12

Abbildung 170 stellt die Lage der Kammern dar und zeigt zudem die Richtung des Abbaus an.

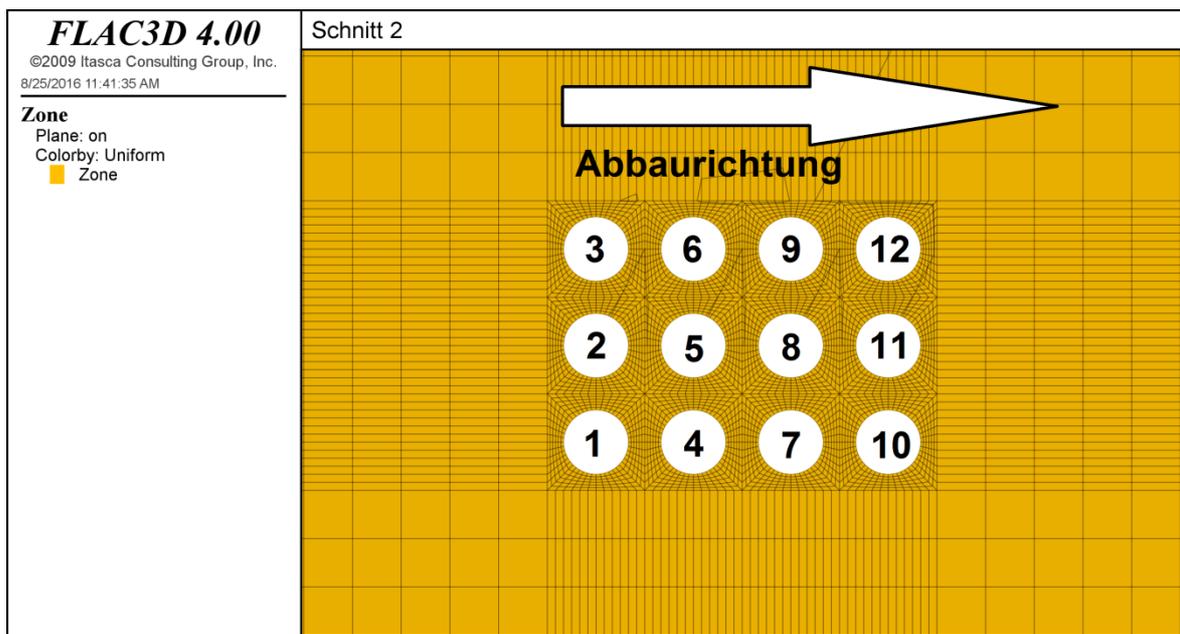


Abbildung 170: Lage der Kammern und Richtung des Abbaus

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt an Hand von farbkodierten Horizontalspannungsverteilungen im Schnitt 2. Dieser ist in Abbildung 171 dargestellt. Die Vertikal- und Schubspannungsverteilungen werden nicht analysiert, weil die Untersuchungen aus den letzten Kapiteln gezeigt haben, dass erstere lediglich einen geringen Einfluss auf die Standfestigkeit haben und zweitere aus

den Horizontalspannungen resultieren. Des Weiteren werden keine weiteren Schnitte und Messlinien analysiert, weil die Spannungsverteilungen in den weiteren Schnitten und die Verläufe entlang der Messlinien mit den Ergebnissen der vorhergehenden Untersuchungen abgeschätzt werden können. Abbildung 172 bis Abbildung 177 stellen die Horizontalspannungsverteilungen der Abbauschritte 1 bis 3 dar. Die Spannungsverteilungen nach dem Abbauschritt 4 entsprechen Abbildung 118 und Abbildung 119 aus Abschnitt „5.4.1 Anordnung der Kammern in einem Abbaufeld“. Da diese dieselben Merkmale wie jene aus den vorhergehenden Kapiteln aufweisen, werden diese nicht beschrieben, sondern lediglich mit jenen der zweiten untersuchten Abbausequenz verglichen. Dieser Vergleich findet im Punkt „5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse“ statt. Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

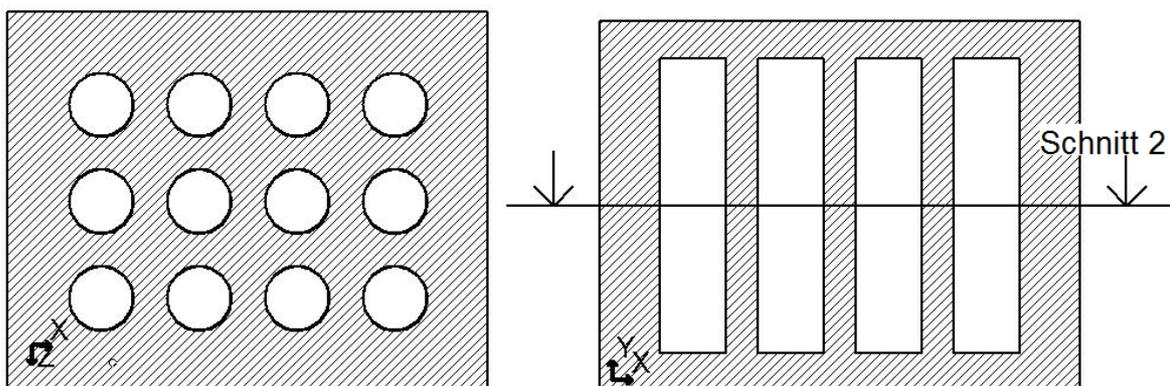


Abbildung 171: Lage von Schnitt 2

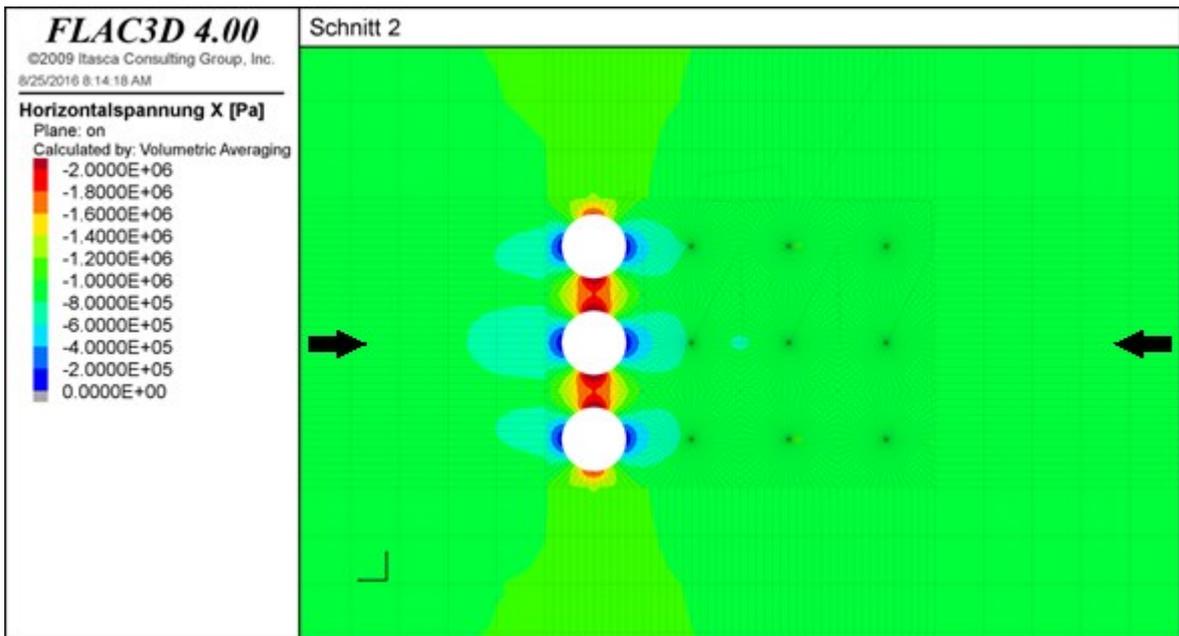


Abbildung 172: Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 1 im Schnitt 2

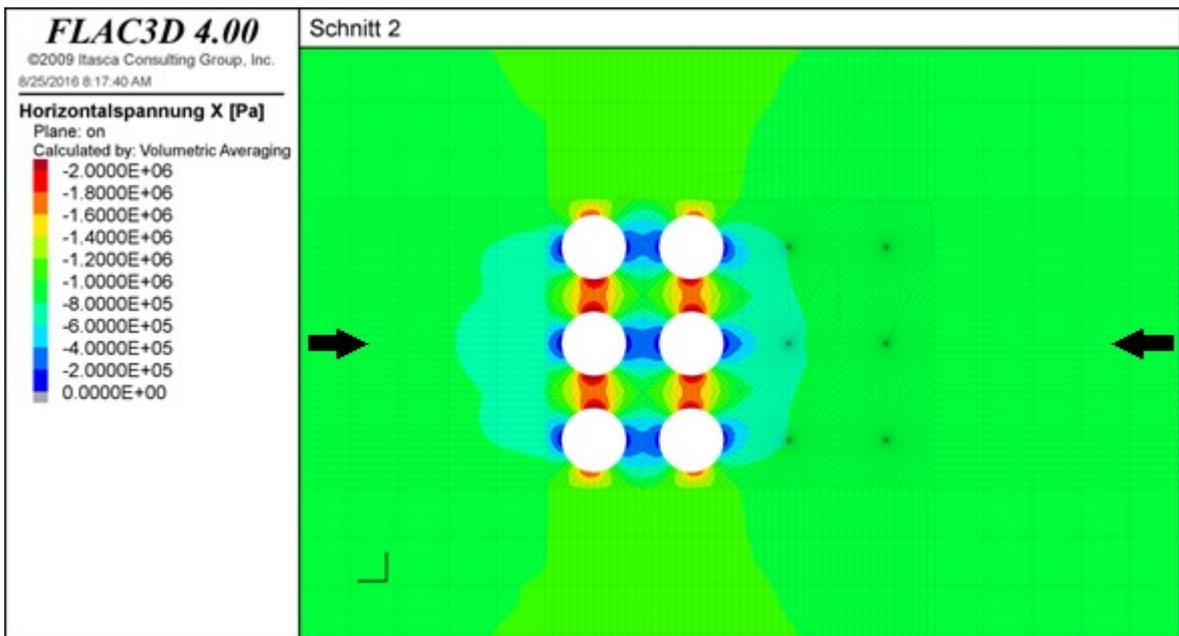


Abbildung 173: Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 2 im Schnitt 2

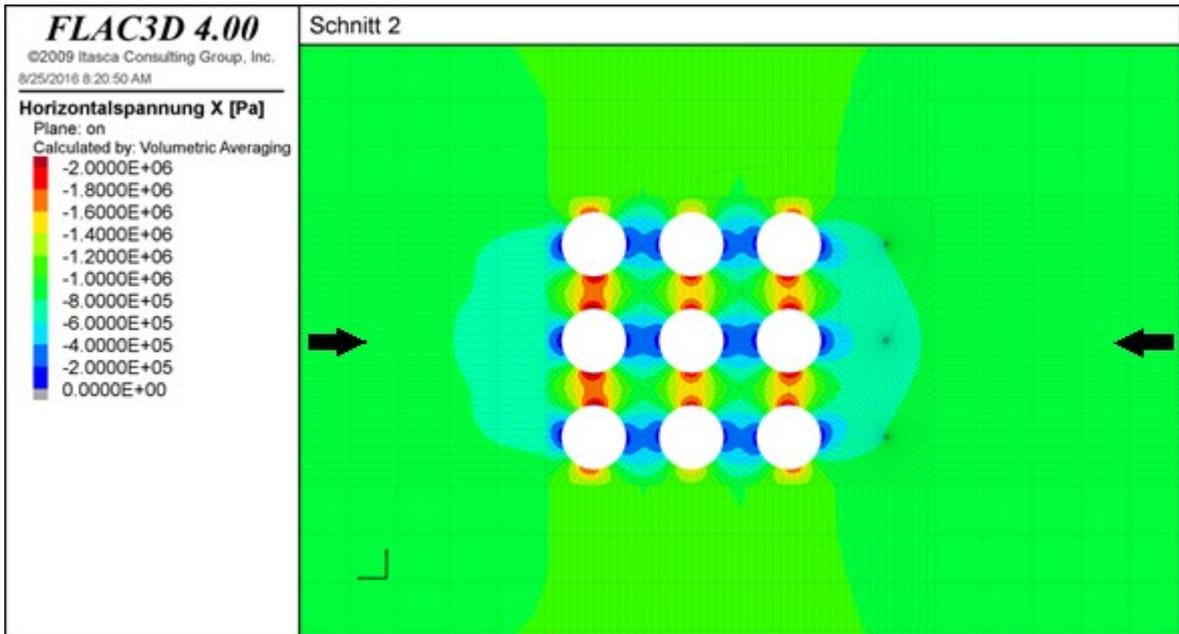


Abbildung 174: Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 3 im Schnitt 2

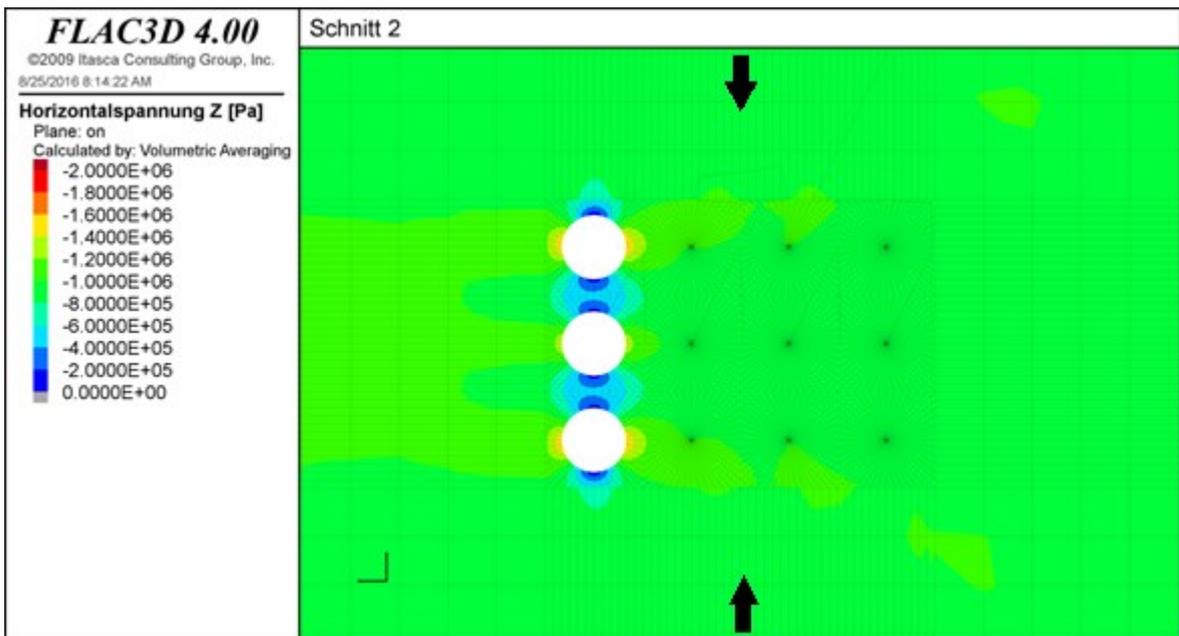


Abbildung 175: Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 1 im Schnitt 2

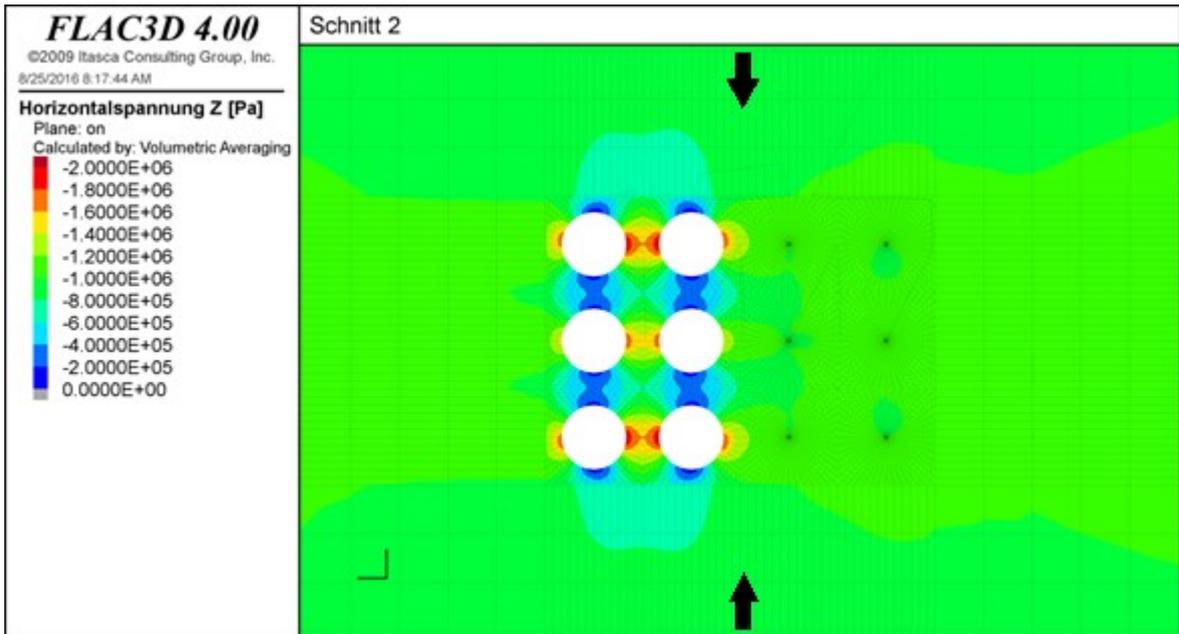


Abbildung 176: Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 2 im Schnitt 2

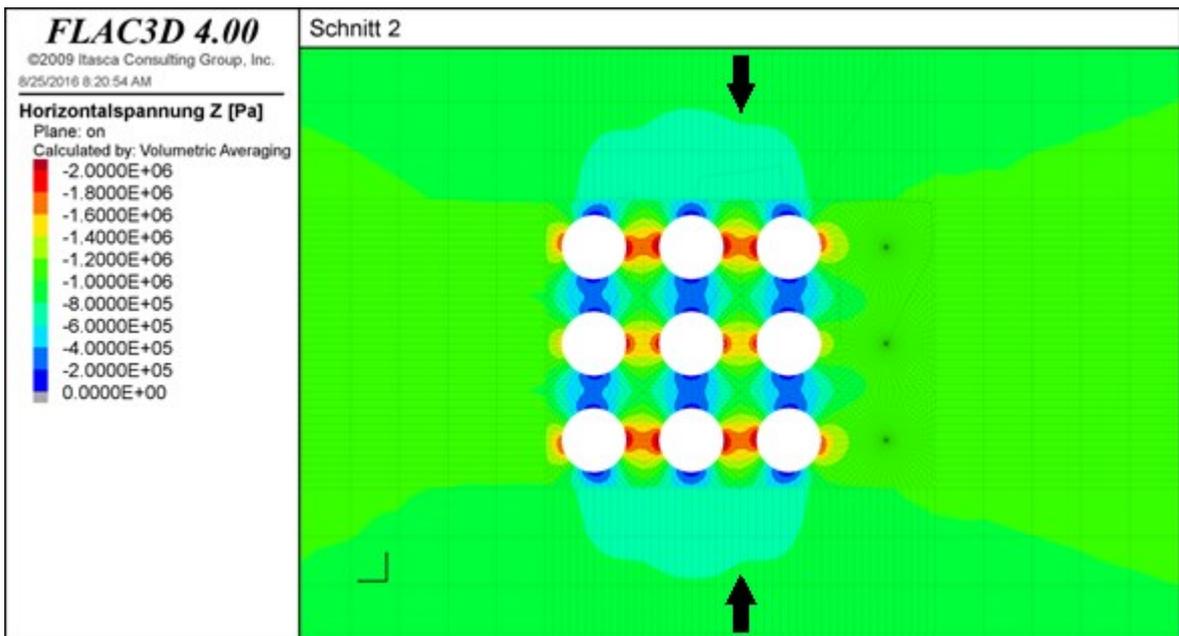


Abbildung 177: Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 3 im Schnitt 2

5.5.2 Abbausequenz 2: Abbau von voneinander entfernten Kammern

In dieser Abbausequenz werden wiederum drei Kammern zugleich abgebaut. Dabei startet der Abbau jedoch nicht auf einer Seite, sondern die Kammern werden zu Beginn weiter voneinander entfernt abgebaut. Dadurch sollen negative Wechselwirkungen beim Abbau der Kammern vermieden werden. Mit fortschreitendem Abbau wird nach und nach das gesamte Abbaufeld abgebaut. Dabei wird jedoch auch darauf geachtet, dass nicht benachbarte Kammern zugleich abgebaut werden. Dazu werden die Kammern in folgender Reihe abgebaut:

- Schritt 1 → Kammern 1, 6, 10
- Schritt 2 → Kammern 2, 7, 12
- Schritt 3 → Kammern 3, 4, 8
- Schritt 4 → Kammern 5, 9, 11

Abbildung 178 stellt die Lage der Kammern dar. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach demselben Prinzip wie bei Abbausequenz 1. Abbildung 179 bis Abbildung 184 stellen die Spannungsverteilungen dar.

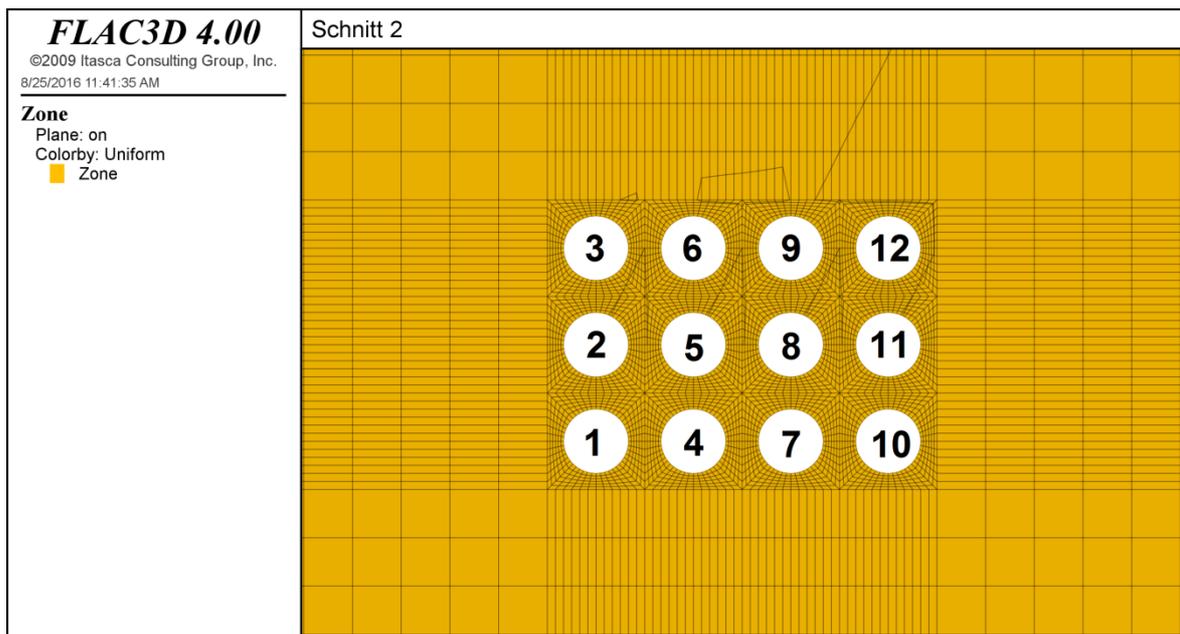


Abbildung 178: Lage der Kammern

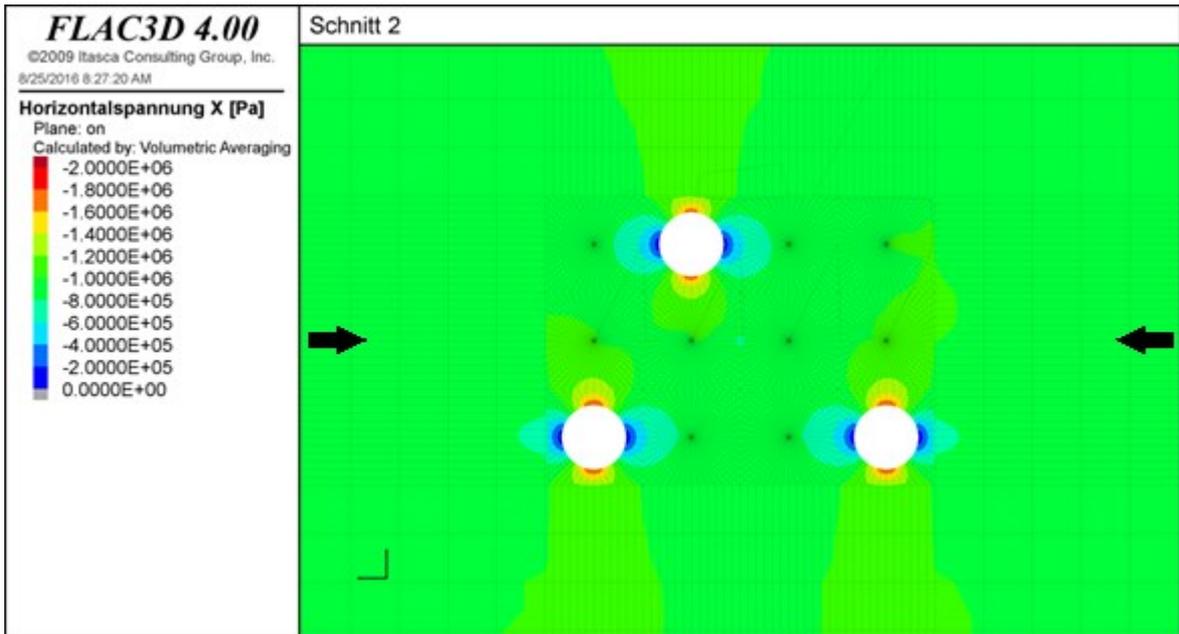


Abbildung 179: Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 1 im Schnitt 2

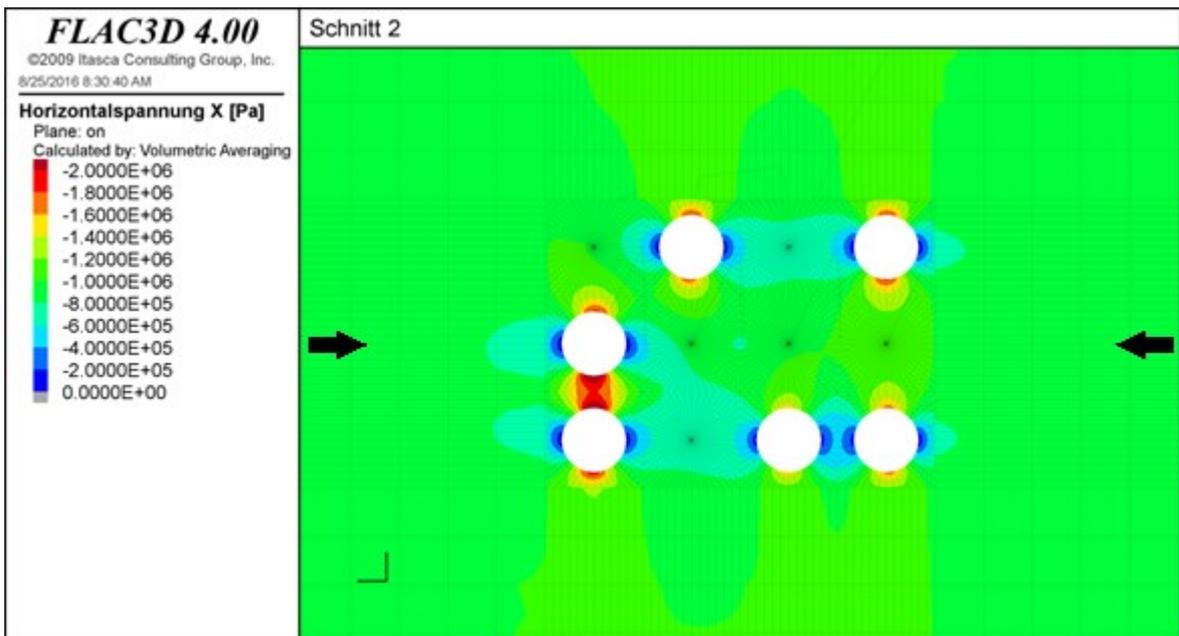


Abbildung 180: Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 2 im Schnitt 2

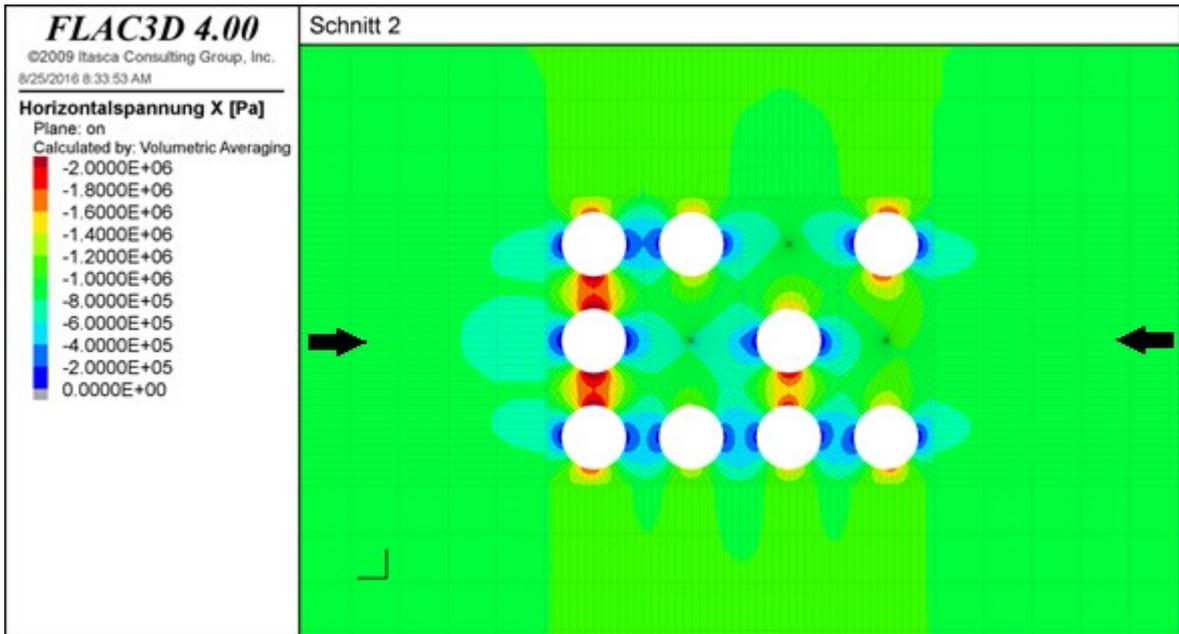


Abbildung 181: Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 3 im Schnitt 2

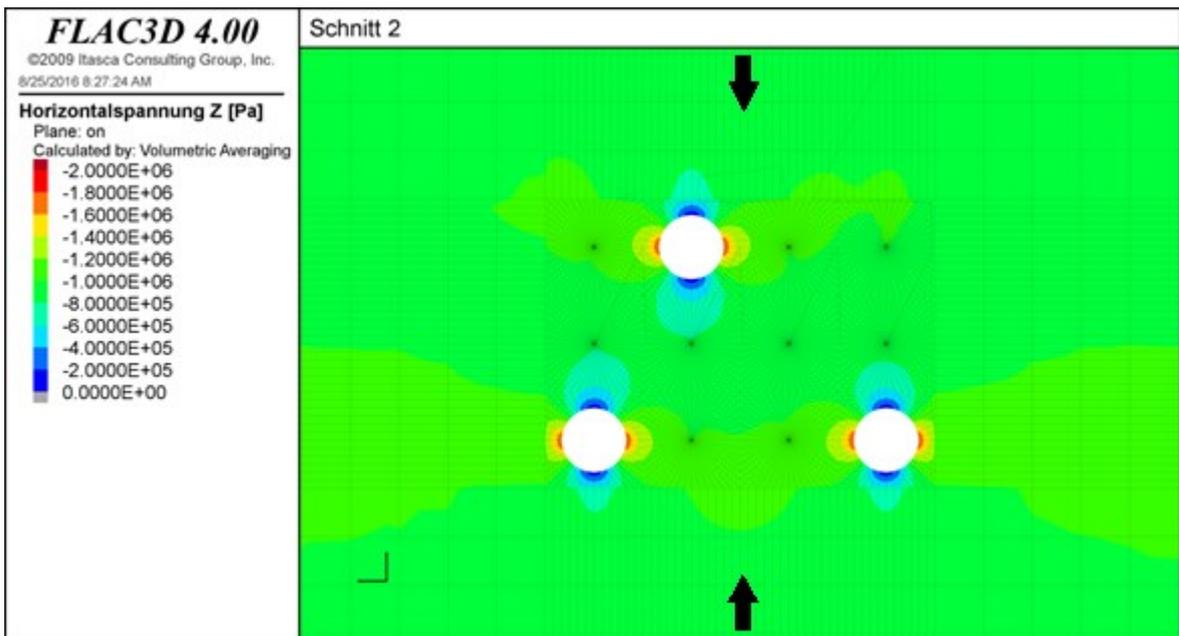


Abbildung 182: Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 1 im Schnitt 2

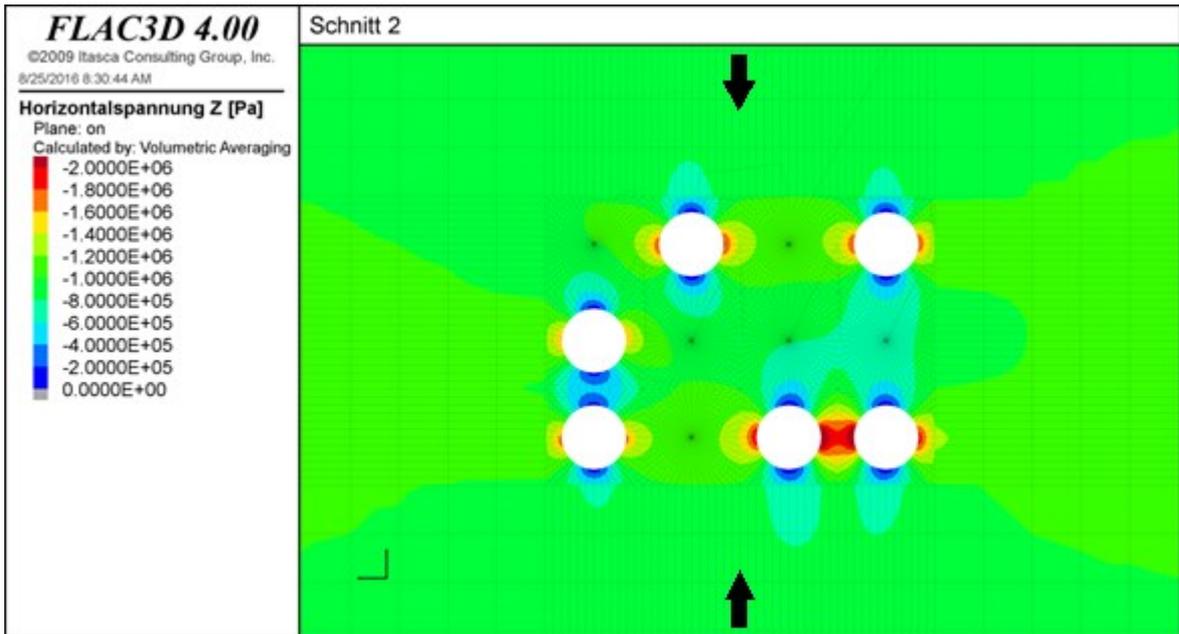


Abbildung 183: Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 2 im Schnitt 2

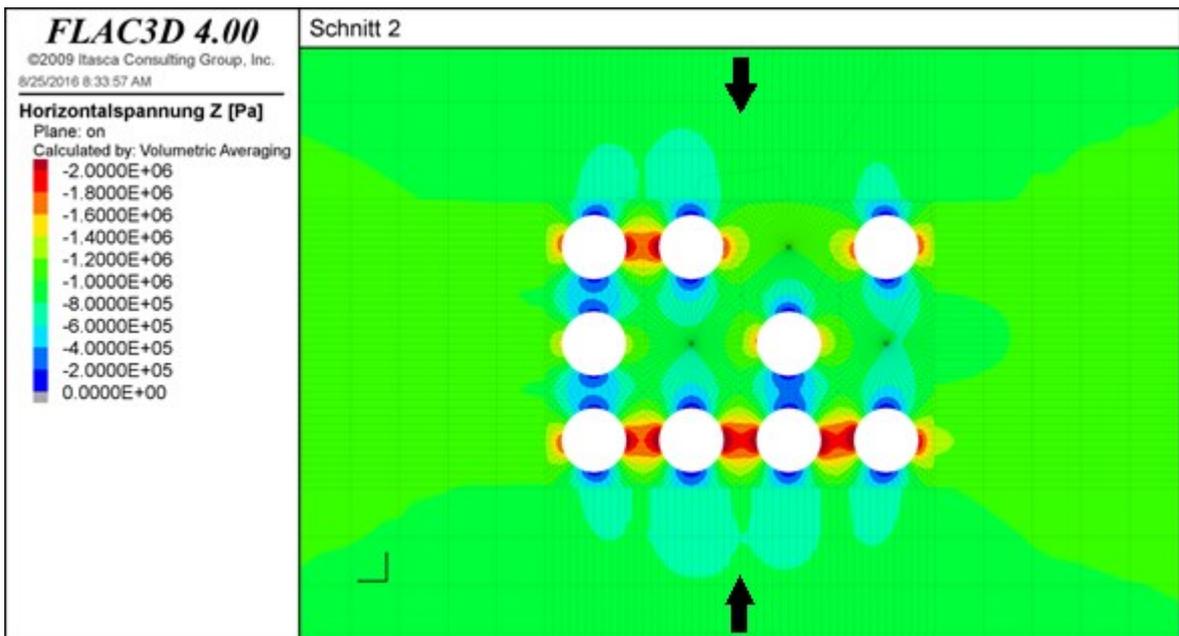


Abbildung 184: Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 3 im Schnitt 2

5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die beiden untersuchten Abbausequenzen einander gegenübergestellt und beurteilt. Die Kammergeometrie hat dabei durchwegs jener des Bergbaus Gummern entsprochen (Höhe 160m, Durchmesser 35m, Höhen- zu Durchmesser Verhältnis 4,57), wobei die Firsten horizontal simuliert worden sind. Der Zentralabstand ist dabei als $1,5 \cdot \text{Kammerdurchmesser}$ gewählt worden und die Kammern sind quadratisch angeordnet. Die primären Vertikal- und Horizontalspannungen haben jeweils 1MPa betragen. Eine Abschätzung des Einflusses von veränderten Eingangsparametern kann mit Hilfe der Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen gemacht werden.

- Entwickelt sich der Abbau in eine Richtung (Abbausequenz 1), so befinden sich immer mehrere Kammern nebeneinander in Verhieb beziehungsweise sie werden neben bereits bestehenden Kammern abgebaut.
- Werden die Kammern immer voneinander entfernt abgebaut (Abbausequenz 2), so befinden sich nie Kammern nebeneinander in Verhieb und zumindest zu Beginn des Abbaus nicht neben bereits bestehenden Kammern.
- Aufgrund der oben angeführten Punkte ist daher die Abbausequenz 2 der Abbausequenz 1 vorzuziehen, weil dadurch der Spannungszustand in der Umgebung der Kammern zumindest zu Beginn des Abbaus günstiger ist und andererseits Kammern erst nebeneinander abgebaut werden, wenn die zuvor abgebauten Kammern bereits versetzt sind. Der Versatz erhöht die Stabilität der Feste und verringert somit die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Feste während des Abbaus der Kammern.
- Bei Abbausequenz 2 muss allerdings beachtet werden, dass vor Beginn des Abbaus der Aufwand für die Aus- und Vorrichtung größer und eine Veränderung des Zuschnitts des Abbaufelds nach Beginn des Abbaus schwieriger ist.
- Die großräumigen Spannungsumlagerungen in der Umgebung der Abbaufelder sind für beide untersuchten Abbausequenzen vergleichbar.

Des Weiteren sind diese regionalen Spannungsumlagerungen eher gering. Dadurch haben diese keinen signifikanten Einfluss auf die Standfestigkeit der Aus- und Vorrichtung.

5.5.4 Fallbeispiel: Abbaufeld inklusive Abbausequenz in Gummern

In den letzten beiden Kapiteln sowie in diesem („5.3 Standsicherheit des gesamten Abbaubereichs“, „5.4 Geometrie des Abbausystems“ und „5.5 Abbausequenz“) sind generelle gebirgsmechanische Aspekte betreffend die Interaktionen zwischen benachbarten Kammern analysiert worden. Die Schwerpunkte in diesen sind die Wechselwirkungen von mehreren Kammern innerhalb eines Abbaufelds, die Auswirkungen des Versagens von Festen, der Einfluss der Größe und Anzahl der Abbaufelder sowie jener der Abbausequenz innerhalb eines Abbaufelds. Für die Kammern innerhalb eines Abbaufelds im Bergbau Gummern sind in diesen vorhergehenden Kapiteln jedoch keine Standfestigkeitsanalysen durchgeführt worden, weil für die Ermittlung der Standfestigkeit der Kammern in einem Abbaufeld sowohl die Anordnung der Kammern und die Größe des Abbaufelds als auch die Abbausequenz gemeinsam betrachtet werden müssen. Dazu wird in diesem Abschnitt ein Abbaufeld mit 12 Kammern analysiert. Der Zuschnitt und die Abbausequenz entsprechen den Planungen des Bergbaus Gummern; die Kammerhöhe beträgt 160m und der Kammerdurchmesser 35m; die Anordnung ist dreiecksförmig mit einem Zentralabstand von 50m; der Abbau gliedert sich in 4 Schritte, wobei am Beginn weiter voneinander entfernte Kammern abgebaut werden (vergleiche Abbildung 185):

- Schritt 1 → Kammern 1, 6, 10
- Schritt 2 → Kammern 2, 7, 12
- Schritt 3 → Kammern 3, 4, 8
- Schritt 4 → Kammern 5, 9, 11

Die Überlagerung des Abbaufelds beträgt 200m, daraus resultieren bei einer

Dichte des Gebirges von 2700kg/m^3 primäre Vertikalspannungen im Bereich der Kammerfirsten von in etwa $5,4\text{MPa}$ und im Bereich der Kammersohlen von in etwa $9,7\text{MPa}$. Die primären Horizontalspannungen betragen bei einem Seitendruckbeiwert von $0,35$ in etwa $1,9\text{MPa}$ in den Firstbereichen und in etwa $3,4\text{MPa}$ in den Sohlbereichen. Die Neigung der Firsten und Sohlen sowie der Einfluss der Tagebauböschung auf die primäre Spannungsverteilung werden in den Simulationen nicht berücksichtigt. Sowohl der Einfluss dieser beiden Parameter als auch die Auswirkungen eines veränderten Zuschnitts können mit den Ergebnissen der vorhergehenden Kapitel abgeschätzt werden. Für eine detaillierte Betrachtung der Standfestigkeit wird, insbesondere bei einer Veränderung des Zentralabstands oder der Anordnung der Kammern, eine neuerliche Simulation empfohlen. Die Auswirkungen der veränderten primären Spannungen in der Nähe der Tagebauböschung auf die Standfestigkeit des untersuchten Abbaufelds werden zudem im Kapitel „5.6 Interaktion zwischen Tagebauböschung und Kammern“ diskutiert.

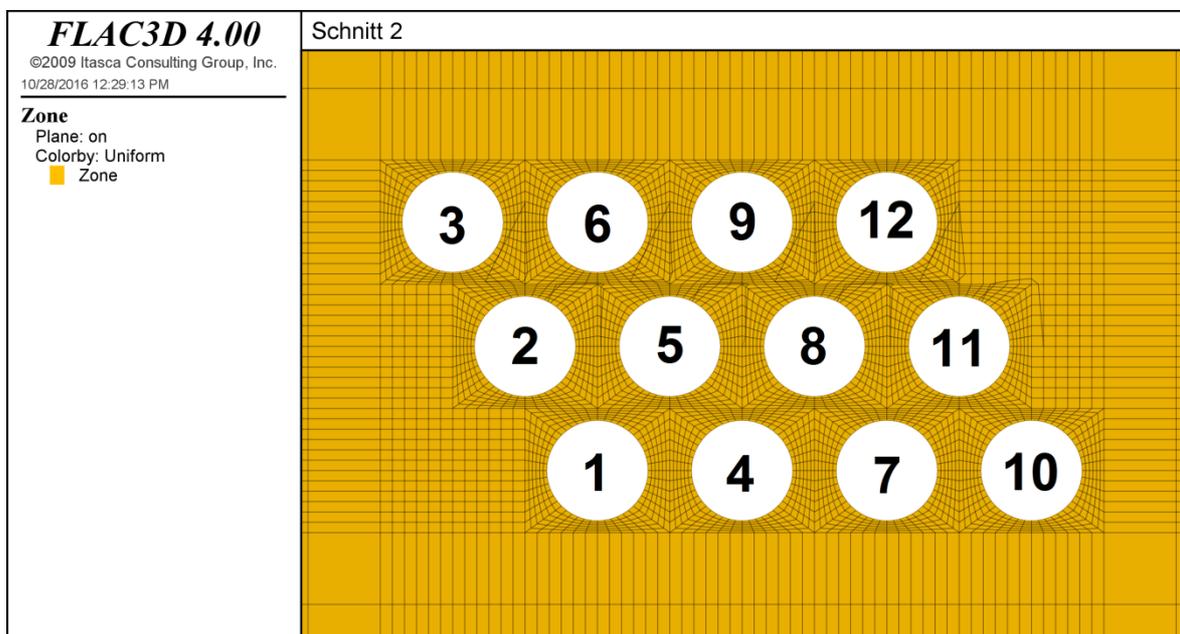


Abbildung 185: Lage der Kammern

Für die Beurteilung der Standfestigkeit werden farbkodierte Verteilungen des Auslastungsgrads und des Zustands des Gebirges ausgewiesen. Dafür wird ein vertikaler Schnitt (Schnitt 3) durch die Kammermittelpunkte einer der beiden

äußeren Kammerreihen betrachtet, weil vorhergehende Untersuchungen gezeigt haben, dass die Kammern am Rand des Abbaufelds im Allgemeinen etwas stärker als jene in der Mitte des Abbaufelds belastet werden. Zudem wird ein zweiter Schnitt (Schnitt 2) betrachtet. Dieser ist horizontal und durchschneidet das Abbaufeld auf halber Kammerhöhe. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 186 ersichtlich. Des Weiteren sind die Spannungsumlagerungen analysiert worden. Da deren Charakteristika allerdings mit jenen der bisherigen Studien vergleichbar sind, können diese aus den bisherigen Untersuchungen abgeleitet werden. Daher werden sie an dieser Stelle nicht ausgewiesen. Für die Beurteilung der Ergebnisse müssen die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte, insbesondere jene betreffend den Auslastungsgrad und Zustand des Gebirges, beachtet werden.

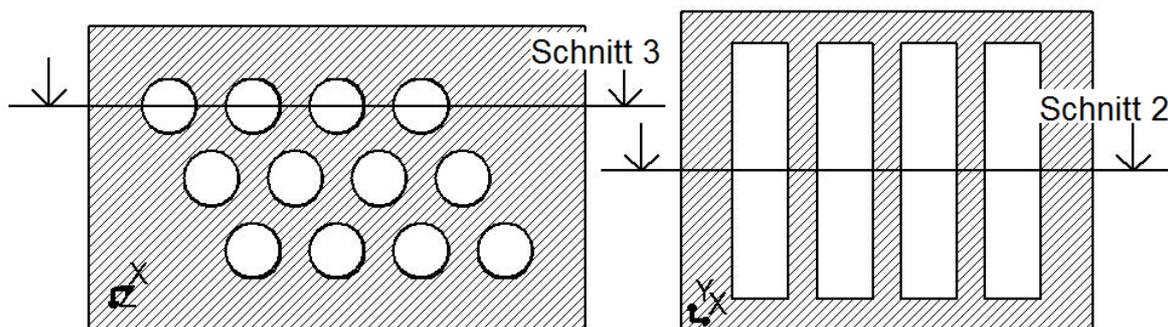


Abbildung 186: Lage der Schnitte 2 und 3

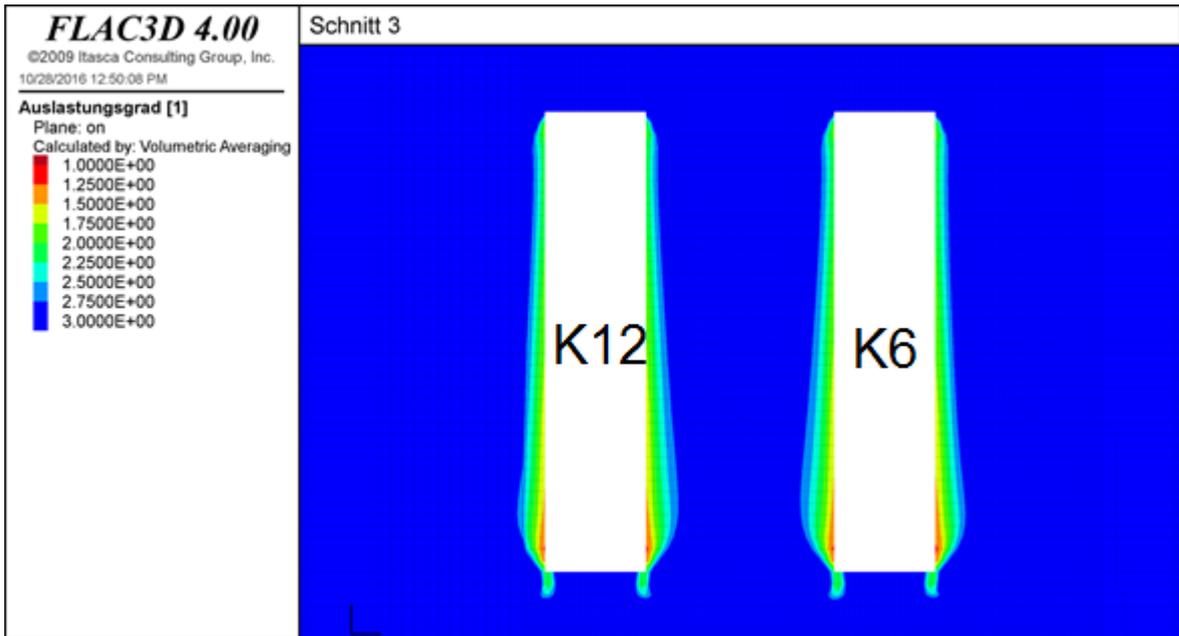


Abbildung 187: Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 2

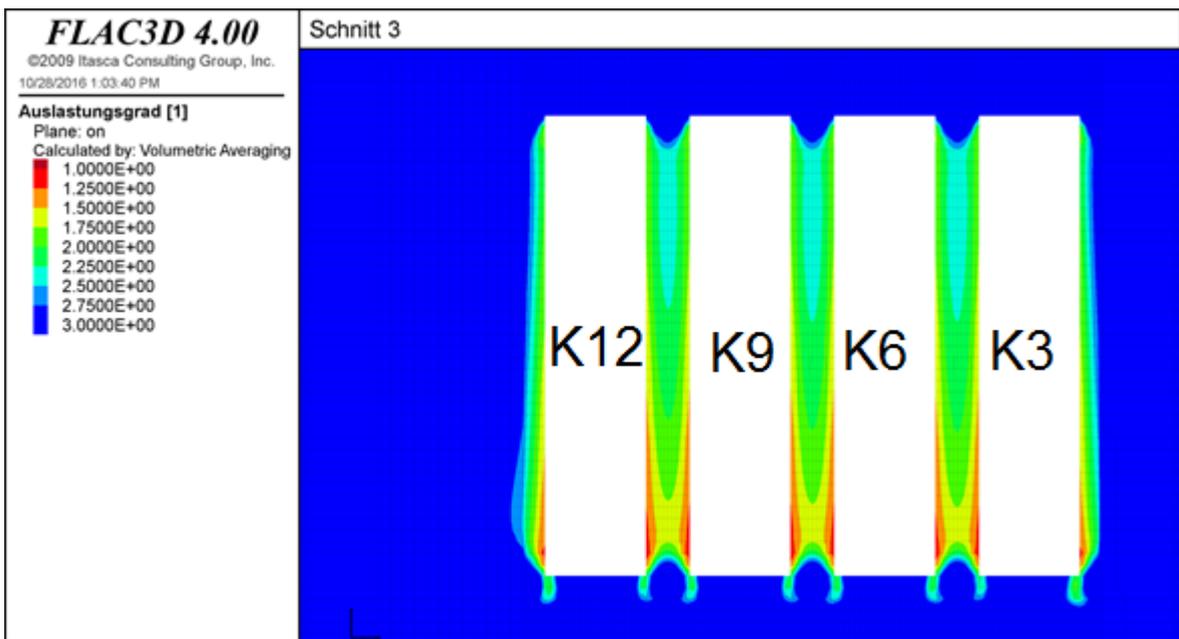


Abbildung 188: Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 4

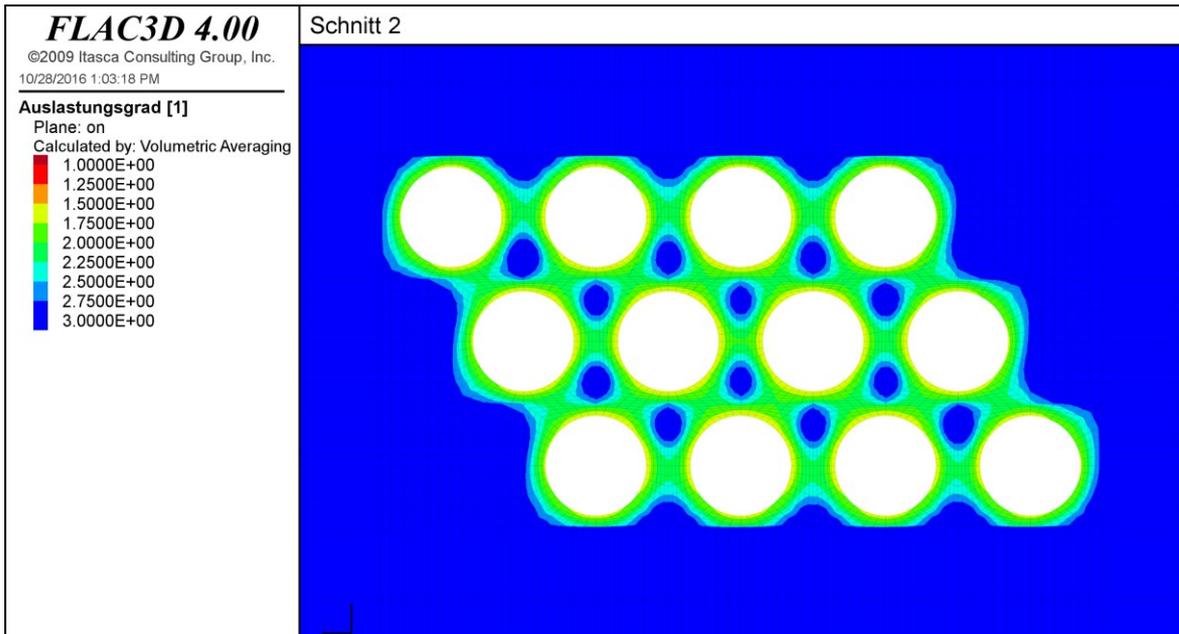


Abbildung 189: Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 2 nach dem Abbauschritt 4

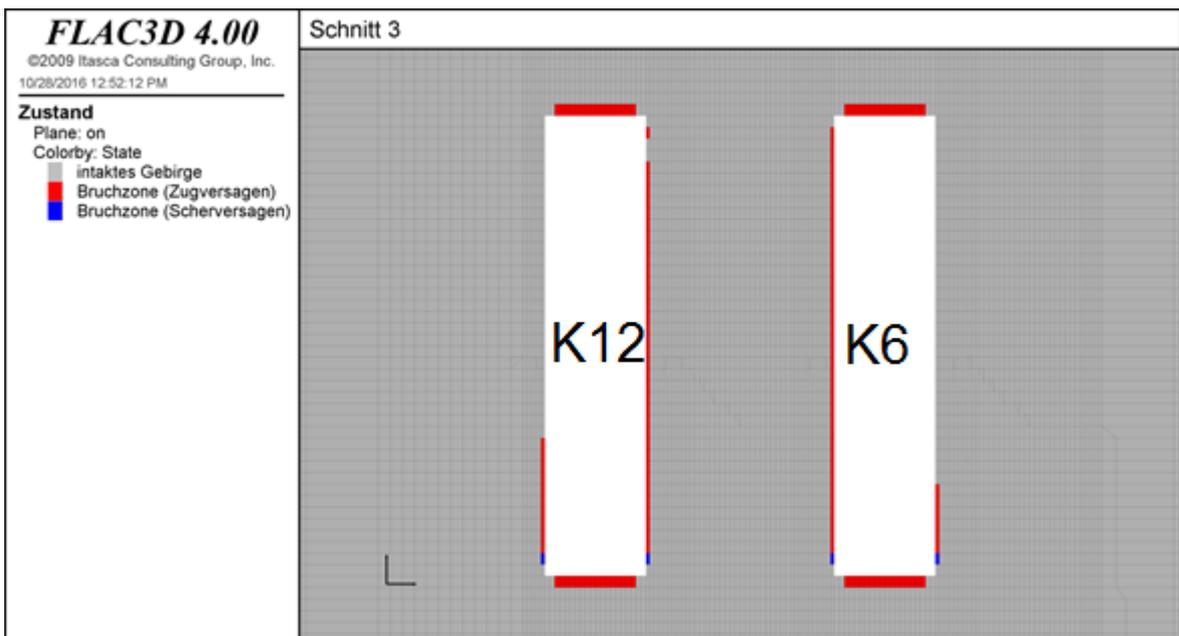


Abbildung 190: Zustand des Gebirges im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 2

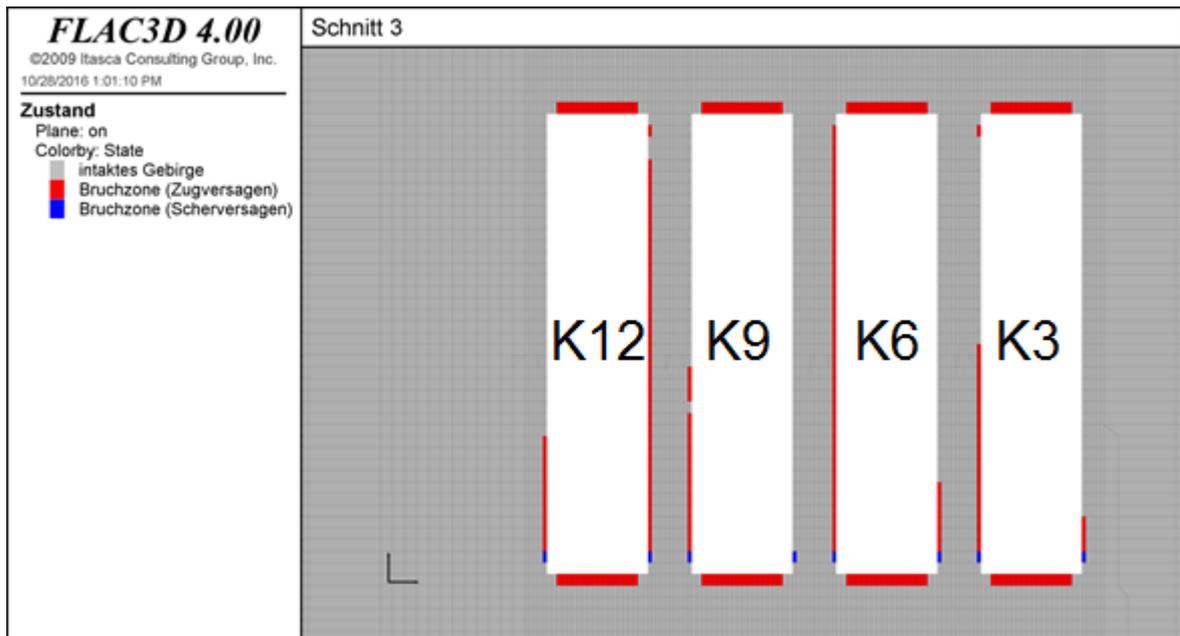


Abbildung 191: Zustand des Gebirges im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 4

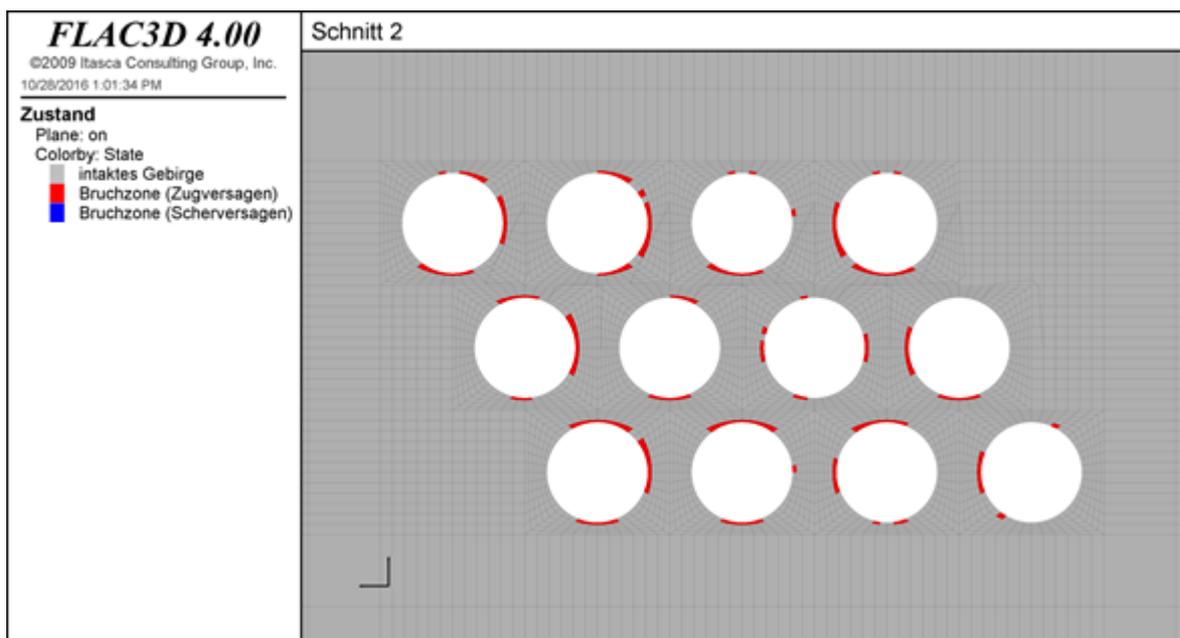


Abbildung 192: Zustand des Gebirges im Schnitt 2 nach dem Abbauschritt 4

Abbildung 187 bis Abbildung 192 zeigen die Verteilungen des Zustands und des Auslastungsgrads. Die wesentlichen Punkte betreffend die Standfestigkeit der Kammern innerhalb des betrachteten Abbaufelds unter den erwarteten Gebirgsbedingungen im Bergbau Gummern sind im Folgenden zusammengefasst. Zur Stabilität der einzelnen Kammern werden keine weiteren Anmerkungen gemacht. Für diese gelten die unter Abschnitt „5.2.6 Fallbeispiel: Einzelne

Kammer in Gummern“ angeführten Punkte.

- Eine stärkere Belastung des Gebirges tritt vor allem im Bereich des Festensystems auf. Dabei wird ein Auslastungsgrad von kleiner 1,5 allerdings nur im Bereich der unmittelbaren Umgebung der Kammerulme erreicht. Im Allgemeinen nimmt die Auslastung des Gebirges mit zunehmender Teufe aufgrund der steigenden primären Spannungen zu.
- Die Bruchzonen werden größtenteils durch Zugspannungen hervorgerufen und treten vorwiegend in den First- und Sohlbereichen sowie teilweise an den Kammerulmen auf. Allerdings beschränken sich diese im Allgemeinen auf die unmittelbare Umgebung der Hohlräume.
- Die Bruchzonen in den First- und Sohlbereichen werden vom Auslastungsgrad nicht erfasst; vergleiche Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“.
- Der Abbau von zusätzlichen Kammern hat nur einen geringen Einfluss auf die Verteilung des Auslastungsgrads und der Bruchzonen in der Umgebung von bereits bestehenden Kammern. Das heißt, dass der Zentralabstand groß genug ist, um die einzelnen Kammern gut voneinander zu isolieren.
- Aufgrund dieser Erkenntnisse ist die Standfestigkeit eines Abbaufelds mit 12 Kammern unter den betrachteten Umständen und Annahmen gegeben. Das heißt, dass die Festen im Allgemeinen nicht überlastet werden und aus diesem Grund ein Versagen von Festen unwahrscheinlich ist. Daher sind in weiterer Folge die Auswirkungen eines Festenversagens nicht näher analysiert worden.
- Durchschneidet eine ausgeprägte Stör- oder Karstzone das Abbaufeld oder liegt dieses in einem Gebirgsbereich mit einer deutlich geringeren Gebirgsfestigkeit, sind die hier durchgeführten Standfestigkeitsuntersuchungen nicht mehr gültig und dementsprechend eine neue Analyse der Standfestigkeit notwendig. Eine Möglichkeit zur Anpassung eines Abbaufelds an schlechtere Gebirgsbedingungen sind beispielsweise der Nichtabbau von ausgewählten Kammern oder eine Veränderung des Zuschnitts (Anordnung und Zentralabstand der Kammern).

- Die Ergebnisse der Standfestigkeitsanalyse sind aufgrund von schwierig quantifizierbaren Einflüssen der Gebirgsstruktur auf die Gebirgsfestigkeit mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Allerdings werden im Laufe des fortschreitenden Abbaus neue Erkenntnisse zur Gebirgsfestigkeit und dem Gebirgsverhalten durch den Einsatz eines entsprechenden Monitoringprogramms gewonnen. Diese können anschließend dazu genutzt werden, um die numerischen Simulationen zu kalibrieren und die Unsicherheiten sukzessive zu verringern.

5.6 Interaktion zwischen Tagebauböschung und Kammern

Nachdem in den letzten Kapiteln Untersuchungen und Analysen zur Standfestigkeit des Raise-mining Abbausystems und zur Standfestigkeit des Raise-mining Abbaus im Bergbau Gummern durchgeführt worden sind, wird in diesem Kapitel analysiert, wie sich der untertägige Abbau im Bergbau Gummern auf die Standsicherheit der Tagebauböschung auswirkt. Die Standfestigkeit der Tagebauböschung selbst wird dabei jedoch nicht analysiert, weil diese für den derzeit geplanten Tagebauendzustand von Wagner et al. (2010) bereits nachgewiesen worden ist. Anstatt dessen wird betrachtet, wie der untertägige Abbau die Spannungsumlagerungen im Gebirge beeinflusst. An Hand dieser Ergebnisse kann beurteilt werden, ob der untertägige Abbau eine Auswirkung auf die Stabilität der Tagebauböschung hat. Dafür wird die Situation, die sich nach dem Erreichen des derzeitig geplanten Tagebauendstands ergibt, untersucht. Ein weiterer Punkt, der im Zuge der Untersuchungen zwischen dem Abbau der Kammern und des Tagebaus betrachtet wird, ist die Auswirkung des obertägigen Abbaus und der Einfluss des veränderten primären Spannungszustands in der Umgebung der Tagebauböschung auf die Standfestigkeit der Kammern. Da die Standfestigkeit der Kammern in einem Abbaufeld bereits im Abschnitt „5.5.4 Fallbeispiel: Abbaufeld inklusive Abbausequenz in Gummern“ analysiert worden ist, wird diese in diesem Kapitel nicht mehr im Detail betrachtet, sondern nur mehr die Auswirkungen des Tagebaus auf jene abgeschätzt. Abbildung 193 zeigt nochmals die Lage des untertägigen Abbaus im Bergbau Gummern. An dieser

Stelle wird zudem angemerkt, dass keine allgemeinen Untersuchungen wie in den vorhergehenden Kapiteln durchgeführt werden, weil zur Beurteilung der Standsicherheit einer Tagebauböschung die Gebirgsfestigkeit und Geometrie der Böschung berücksichtigt werden müssen. Da diese im Allgemeinen spezifisch für einen Bergbau sind, sind allgemeine Untersuchungen nicht zielführend.

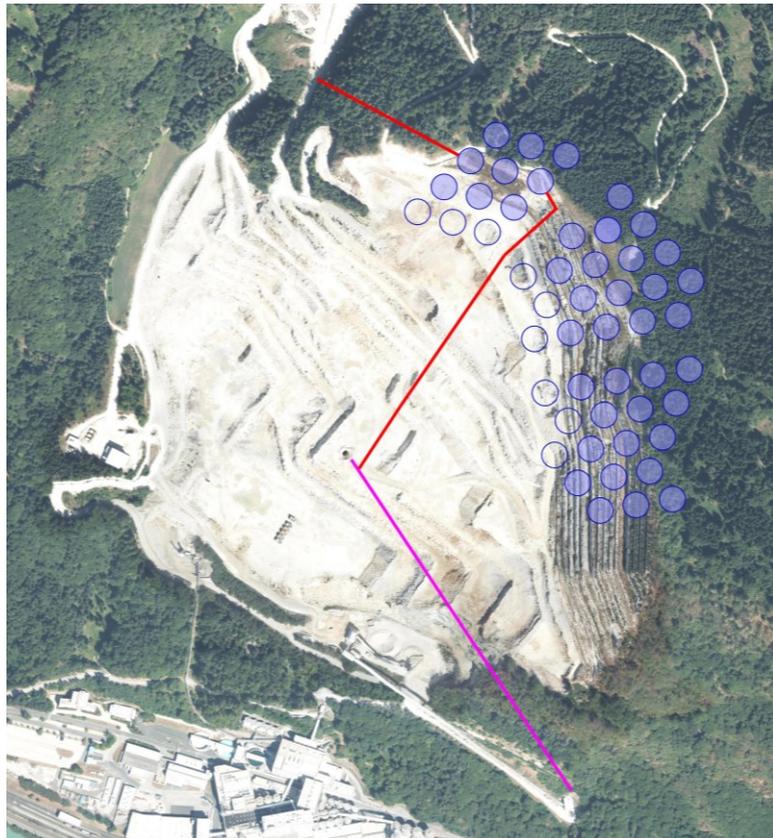


Abbildung 193: Luftbild des Tagebaus mit den geplanten Abbaukammern (blau), dem Aufschluss (rot) und dem bestehenden Förderstollen (violett). (KAGIS 25.10.2016)

5.6.1 Simulationsverlauf

Eine Beschreibung des Ablaufs der numerischen Simulation sowie der Eingangsparameter befindet sich im Abschnitt „5.1 Anmerkungen zu den numerischen Simulationen“. Die Abbausequenz der Kammern und des Tagebaus entspricht dabei jener, die im Bergbau Gummern geplant ist. Abbildung 194 und Abbildung 195 weisen die einzelnen Teilschritte im Tagebau beziehungsweise Untertagebau aus.

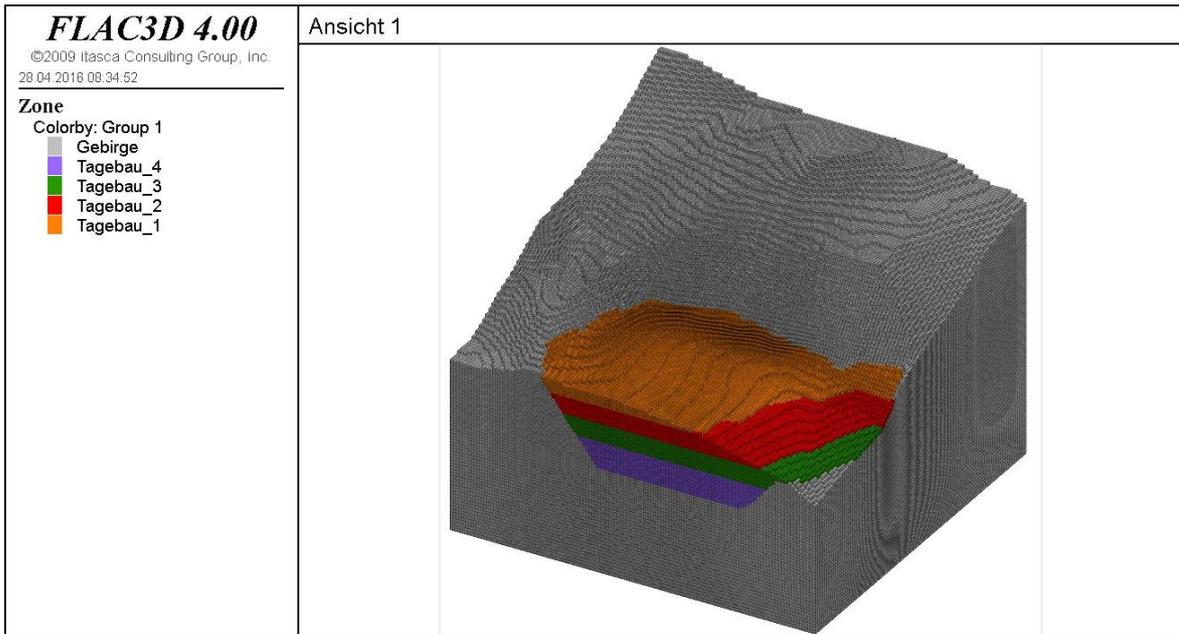


Abbildung 194: Abbausequenz im Tagebau; grau=anstehendes Gebirge im Tagebau-Endzustand, braun=Tagebau-Abbauschritt 1, rot=Tagebau-Abbauschritt 2, grün=Tagebau-Abbauschritt 3, violett=Tagebau-Abbauschritt 4

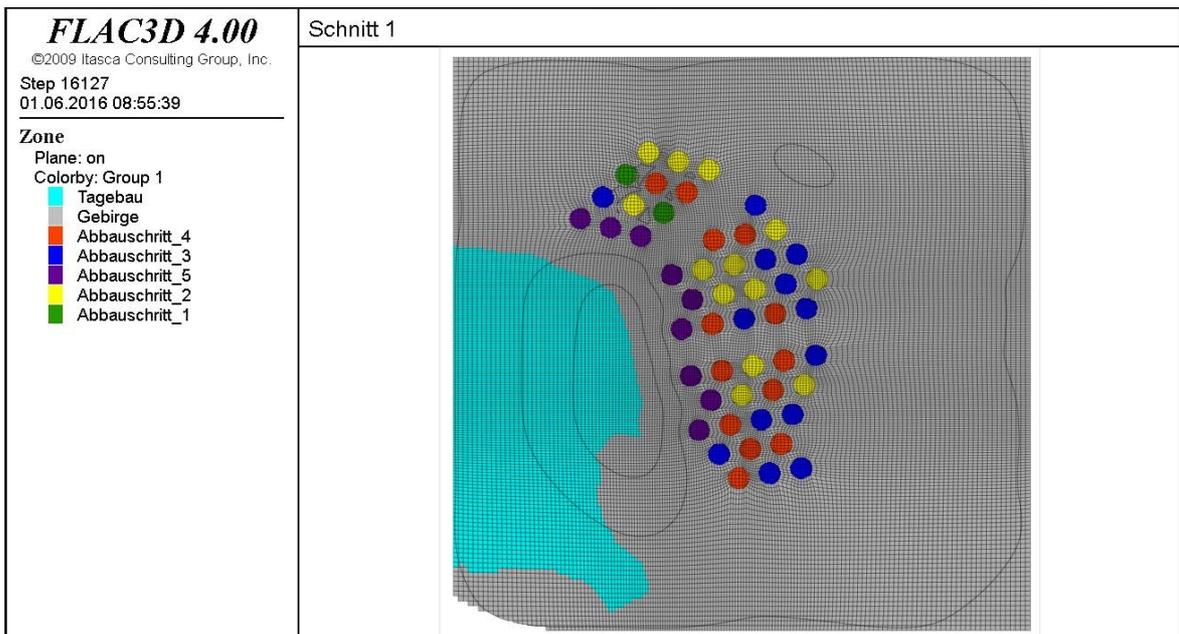


Abbildung 195: Untertägige Abbausequenz; grau=anstehendes Gebirge im Tagebau-Endzustand, türkis=anstehende Vorräte im Tagebau, grün=Untertage-Abbauschritt 1, gelb=Untertage-Abbauschritt 2, blau=Untertage-Abbauschritt 3, orange=Untertage-Abbauschritt 4, violett=Untertage-Abbauschritt 5

Die Teilschritte zwischen werden wie folgt hintereinander simuliert:

- Schritt 1 → Untertage-Abbauschritt 1
- Schritt 2 → Tagebau-Abbauschritt 1
- Schritt 3 → Untertage-Abbauschritt 2
- Schritt 4 → Tagebau-Abbauschritt 2
- Schritt 5 → Untertage-Abbauschritt 3
- Schritt 6 → Tagebau-Abbauschritt 3
- Schritt 7 → Untertage-Abbauschritt 4
- Schritt 8 → Tagebau-Abbauschritt 4
- Schritt 9 → Untertage-Abbauschritt 5

Zum Untertage-Abbauschritt 5 ist anzumerken, dass in diesem die tagebaunahen Kammern, die sich unmittelbar hinter der Endböschung befinden, abgebaut werden. Der Abbau von diesen Kammern ist allerdings nicht mehr simuliert worden, weil mit der zurzeit vorhandenen Information bezüglich Gebirgsfestigkeit und Gebirgsverhalten Aussagen über die gebirgsmechanischen Auswirkungen des Abbaus der tagebauböschungsnahen Kammern mit zu großen Unsicherheiten verbunden sind. Durch den Abbau der ersten Kammern können neue Erkenntnisse zur Gebirgsfestigkeit und zum Gebirgsverhalten gewonnen werden. Diese ermöglichen darauffolgend eine aussagekräftige Simulation des Abbaus der tagebauböschungsnahen Kammern.

5.6.2 Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wiederum an Hand von farbkodierten Spannungsverteilungen. Zu den Spannungen ist festzuhalten, dass die Horizontalspannungen in X-Richtung in Ost-West- und die Horizontalspannungen in Y-Richtung in Nord-Süd-Richtung verlaufen. Die Spannungsumlagerungen werden in einem Schnitt (Schnitt 19) betrachtet; dessen Lage ist in Abbildung 196 ausgewiesen. Schnitt 19 ist vertikal und verläuft mittig durch die Kammern 27 bis

31, den Festen zwischen diesen Kammern und er durchschneidet das gesamte Modell. Neben den Spannungsverteilungen wird die Verteilung des Auslastungsgrads analysiert. Um Aussagen über die Auswirkungen des untertägigen Abbaus auf die Standsicherheit der Tagebauböschung machen zu können, werden die Spannungsverteilungen, die aus dem parallelen unter- und obertägigen Abbau resultieren, mit jenen, die aus einem ausschließlich obertägigen Abbau resultieren verglichen. Dasselbe gilt für die Verteilung des Auslastungsgrads. Bei der Simulation des ausschließlich obertägigen Abbaus werden nur die Schritte 2, 4, 6 und 8 durchgeführt. Zu den Auswertungen der Ergebnisse müssen zudem die unter Abschnitt „5.1.6 Anmerkungen zu den Ergebnissen“ angeführten Punkte berücksichtigt werden.

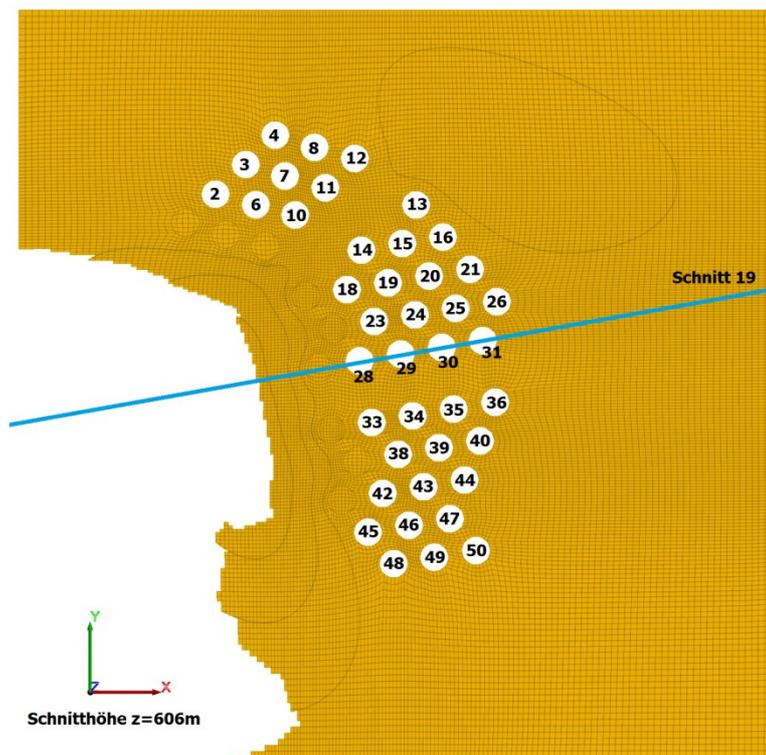


Abbildung 196: Lage von Schnitt 19; die tagebaunahen Kammern sind nicht abgebaut

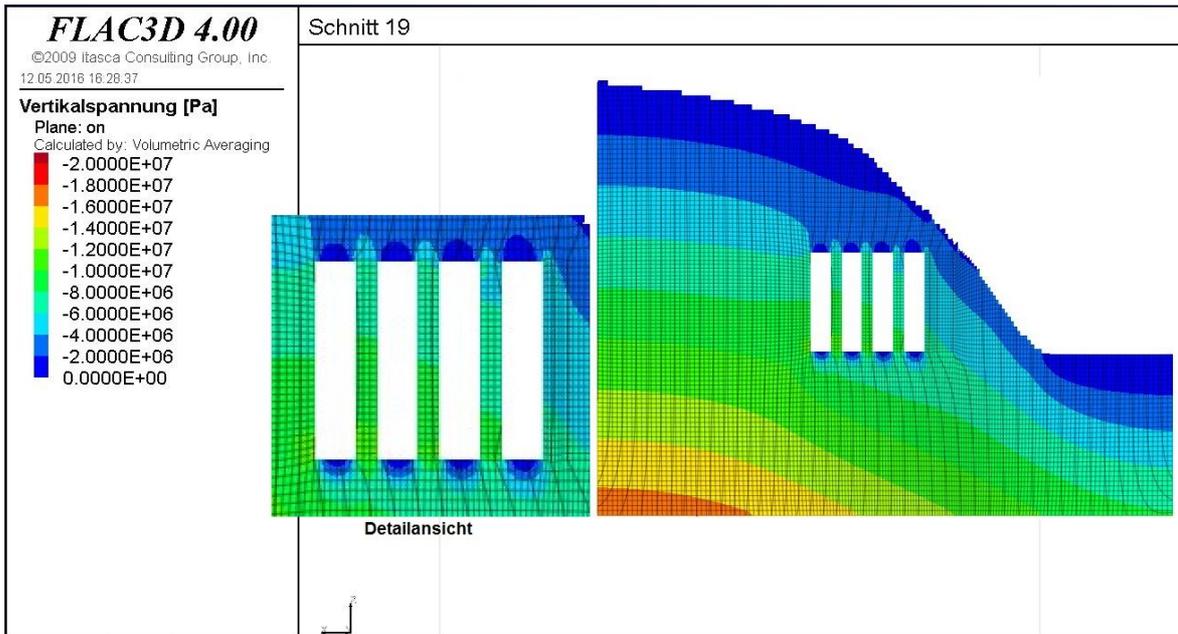


Abbildung 197: Vertikalspannungen im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationsende

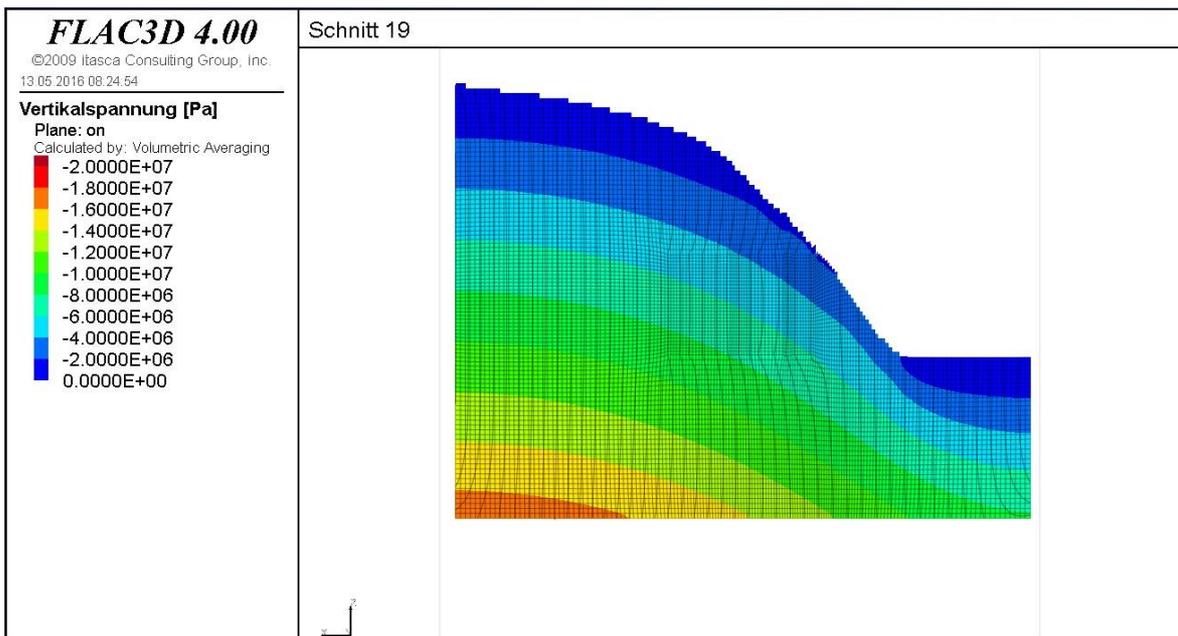


Abbildung 198: Vertikalspannungen im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationsende

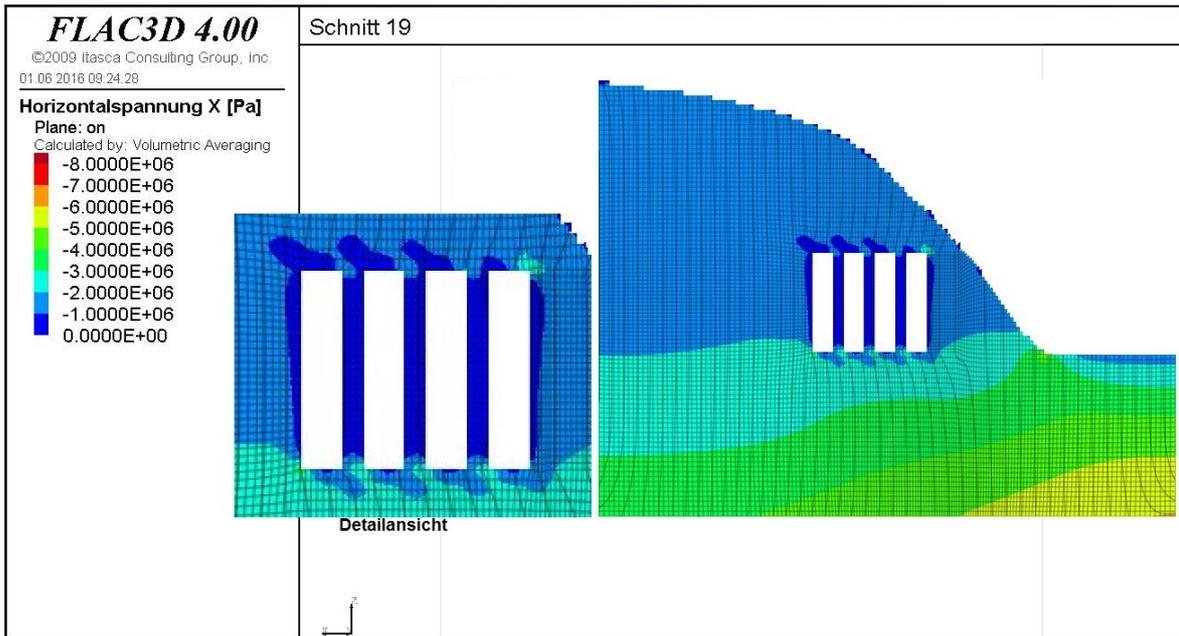


Abbildung 199: Horizontalspannungen in X-Richtung (Ost-West) im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationsende

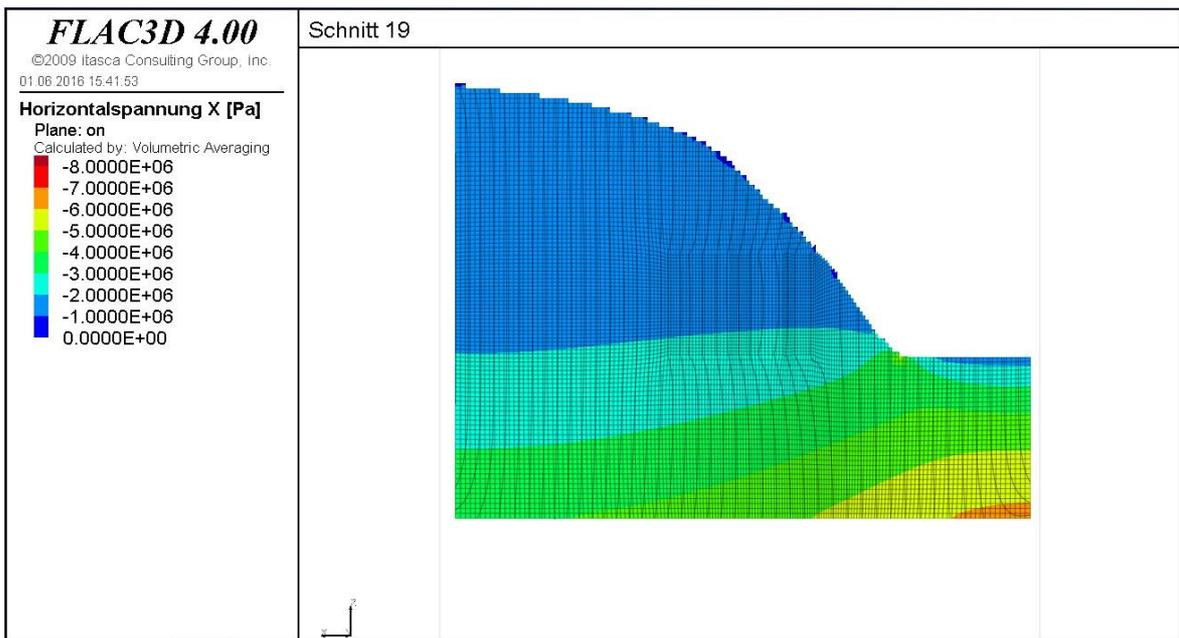


Abbildung 200: Horizontalspannungen in X-Richtung (Ost-West) im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationsende

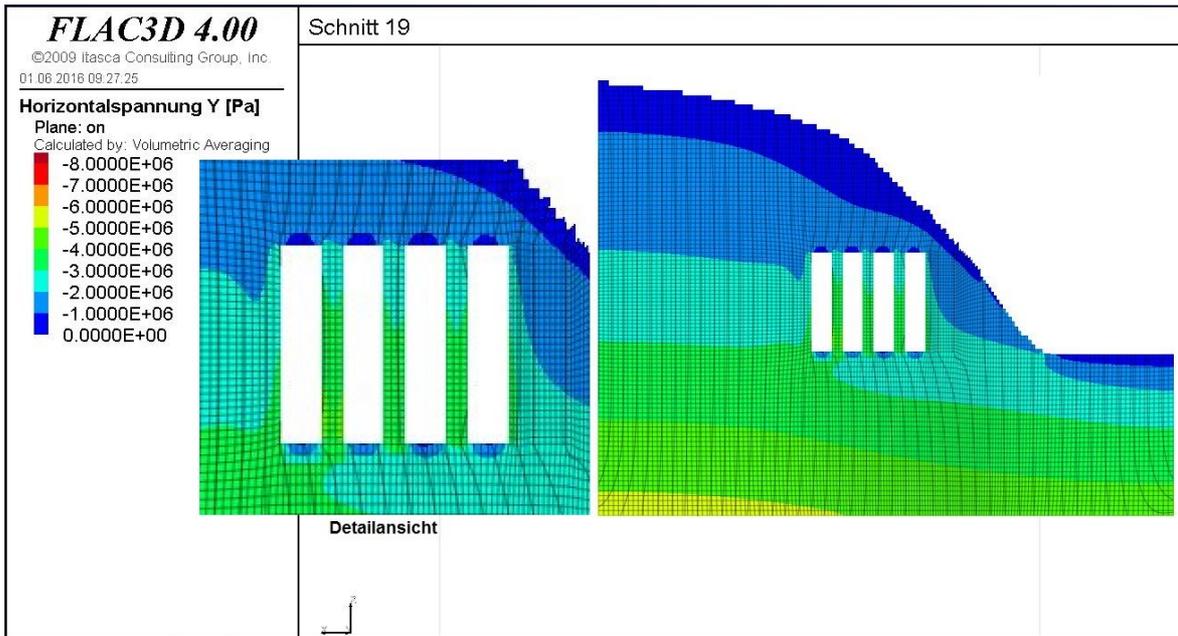


Abbildung 201: Horizontalspannungen in Y-Richtung (Nord-Süd) im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationsende

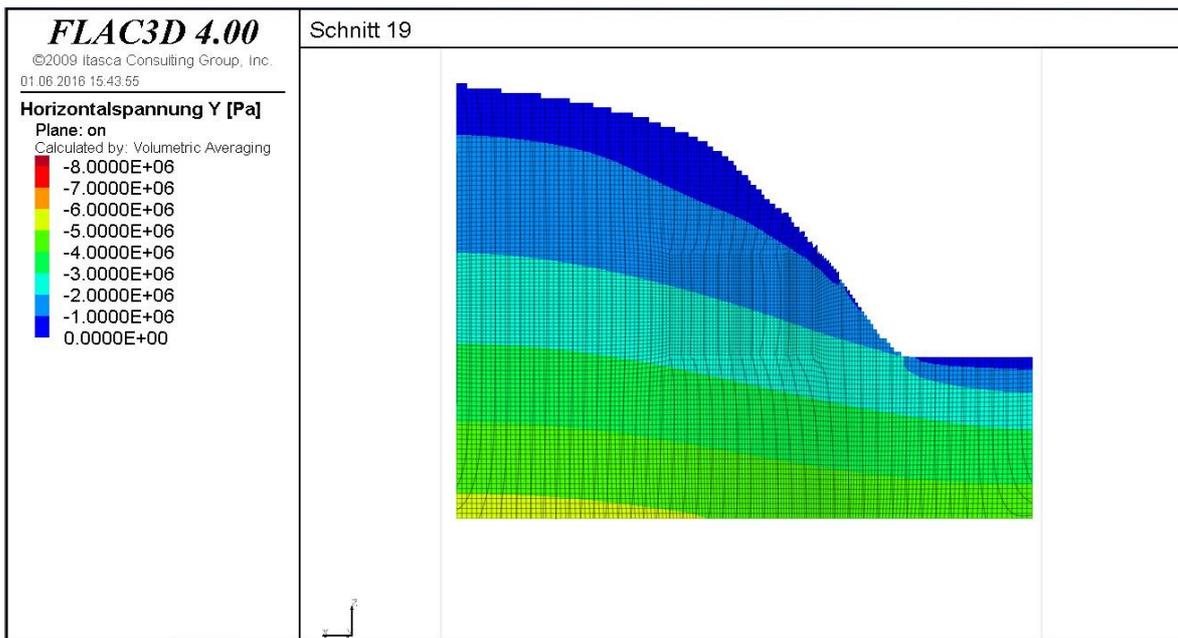


Abbildung 202: Horizontalspannungen in Y-Richtung (Nord-Süd) im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationsende

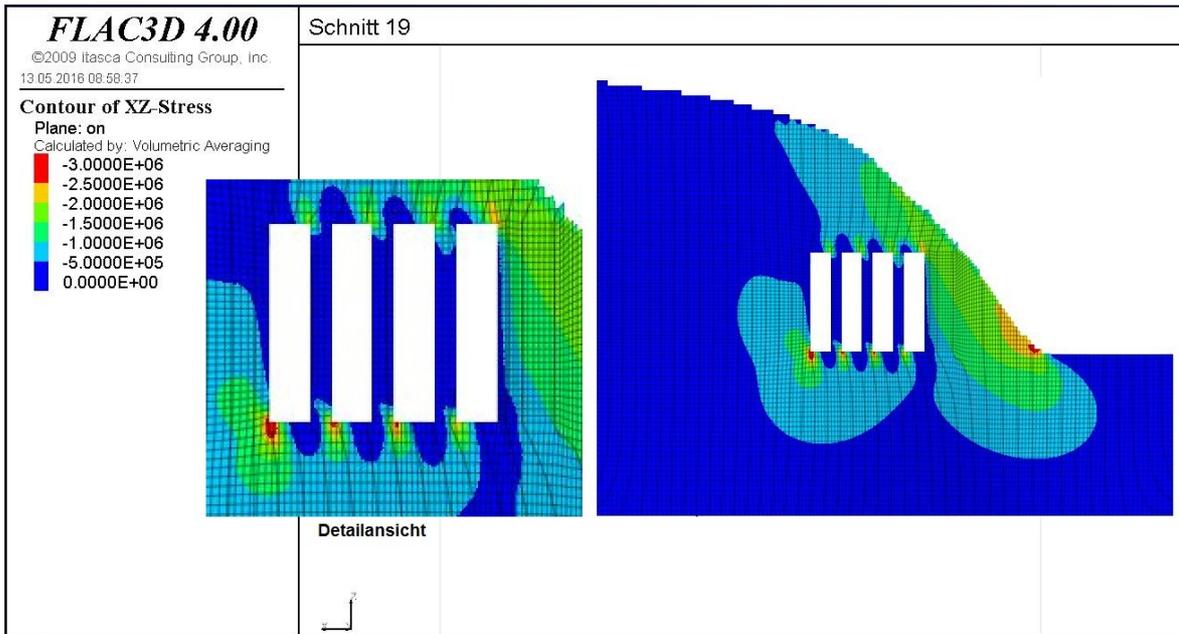


Abbildung 203: Schubspannungen in XZ-Ebene im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationsende

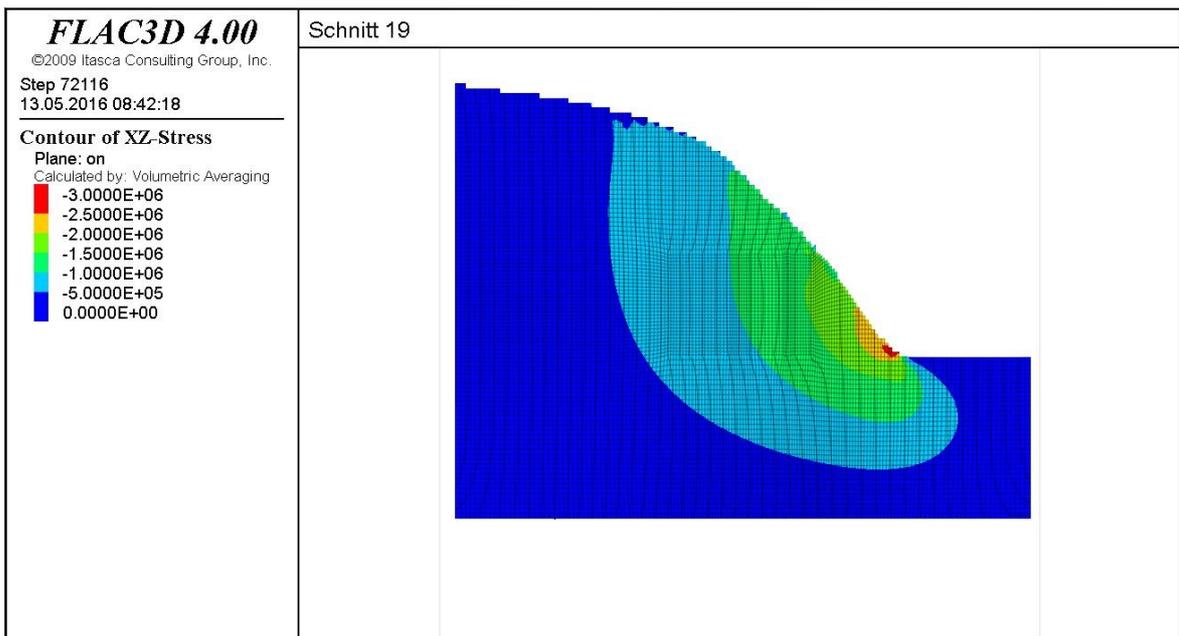


Abbildung 204: Schubspannungen in XZ-Ebene im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationsende

Abbildung 197 bis Abbildung 204 stellen die einzelnen Spannungsverteilungen im Schnitt 19 farbkodiert dar. Dabei ist zu beachten, dass die Farbintervalle für die Vertikal- und Horizontalspannungen sowie für die Schubspannungen aufgrund des deutlichen Unterschieds in der Höhe der einzelnen Spannungen unterschiedlich sind. Im Allgemeinen kann festgehalten werden, dass die unter- und obertägige

Gewinnung im Vergleich zur ausschließlich obertägigen Gewinnung zwar zu stärker ausgeprägten Spannungsumlagerungen führt, diese aber in erster Linie den Bereich und die nähere Umgebung des untertägigen Abbaus betreffen und die Unterschiede in der Spannungshöhe größtenteils gering ausfallen. Der Umstand, dass die regionalen Spannungsumlagerungen in der Umgebung von Abbaufeldern lediglich gering sind, wird von den Analysen der vorhergehenden Kapitel bestätigt. In weiterer Folge kann daher in Bezug auf die Stabilität der Tagebauböschung gefolgert werden, dass nach jetzigem Kenntnisstand bezüglich der Gebirgseigenschaften und unter den betrachteten Umständen und den getroffenen Annahmen die Spannungsumlagerungen resultierend aus dem zusätzlichen untertägigen Abbau die Stabilität der Böschung nicht beeinträchtigen werden.

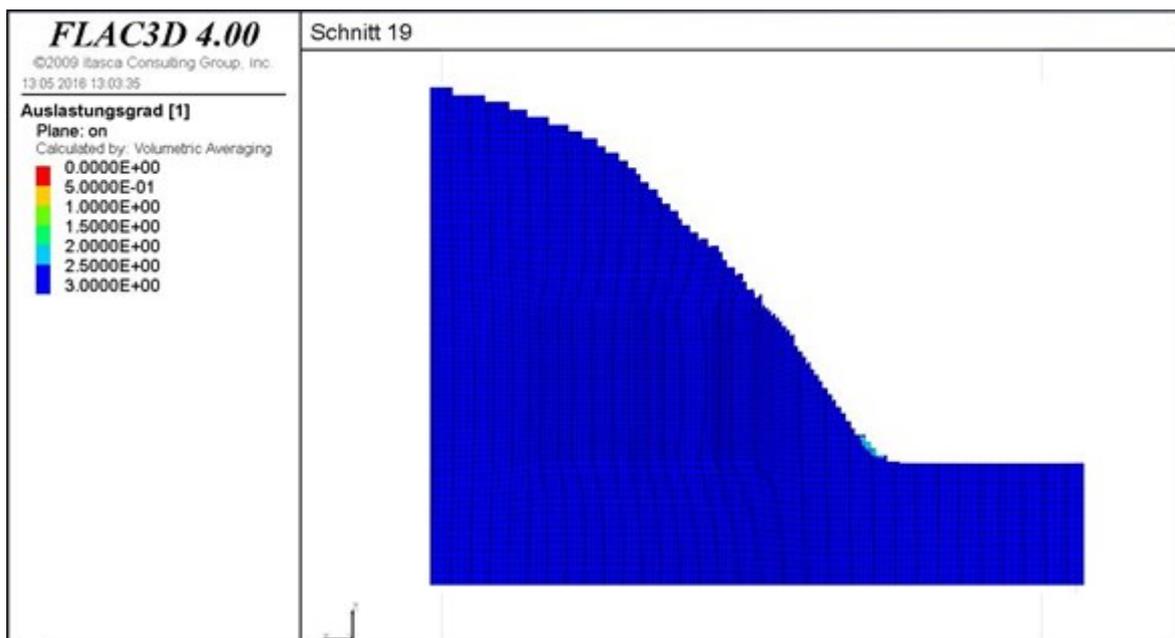


Abbildung 205: Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationsende

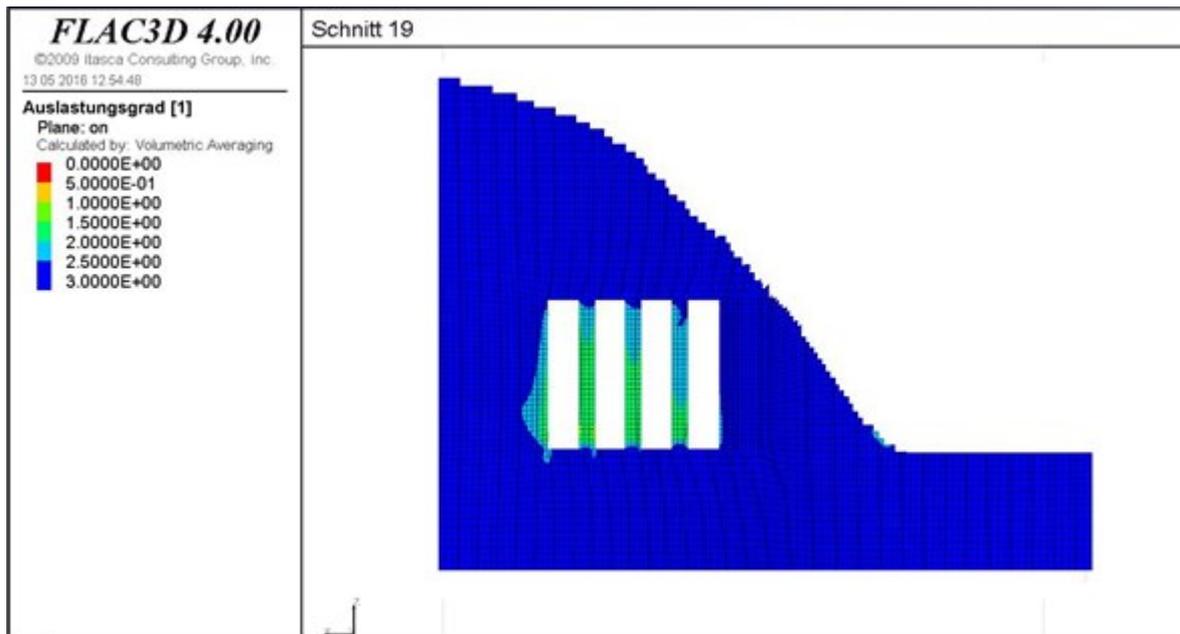


Abbildung 206: Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationseende

Abbildung 205 und Abbildung 206 stellen die Verteilung des Auslastungsgrads für einen unter- und obertägigen sowie für einen ausschließlich obertägigen Abbau im Schnitt 19 farbkodiert dar. Im Falle eines ausschließlich obertägigen Abbaus ergibt sich beinahe im gesamten Schnitt 19 ein Auslastungsgrad, der größer als 2,5 ist; vergleiche Abbildung 205. Aus Abbildung 206 geht hervor, dass die zusätzliche untertägige Gewinnung den Auslastungsgrad nur in der Umgebung der Kammern beeinflusst. Dabei ist der Auslastungsgrad durchwegs größer als 1,5. Aus diesem Grund tritt kein Versagen des Gebirges im Bereich des untertägigen Abbaus auf. Daher kann gefolgert werden, dass unter den betrachteten Umständen und den getroffenen Annahmen die regionale Stabilität des untertägigen Abbaus gegeben ist und dass dieser keine signifikanten Auswirkungen auf die Tagebauböschung hat.

5.6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den Untersuchungen betreffend der Auswirkungen der untertägigen Abbaue auf die Tagebauböschung kurz zusammengefasst:

- Wagner et al. (2010) haben die Standfestigkeit der Tagebauböschung des Bergbaus Gummern untersucht und beurteilt. Im Zuge dieser Arbeit ist diese nicht erneut beurteilt worden, sondern lediglich die Auswirkung des untertägigen Abbaus auf diese. Dazu sind die durchgeführten Simulationen zwischen einem ausschließlich obertägigen und einem unter- und obertägigen Abbau als relativ zu betrachten.
- Der untertägige Abbau hat unter den betrachteten Umständen und den getroffenen Annahmen keine negativen Auswirkungen auf die Tagebauböschung. Aus diesem Grund ist die regionale Stabilität der Tagebauböschung bei fortschreitender ober- und untertägiger Gewinnung unter den betrachteten Umständen und den getroffenen Annahmen gegeben.
- Der Abbau der tagebauböschungsnahen Kammern ist nicht simuliert worden, weil mit den derzeitigen Kenntnissen betreffend die Gebirgsfestigkeit und das Gebirgsverhalten eine aussagekräftige Simulation nicht möglich ist.
- Im Laufe des Abbaus werden neue Erkenntnisse zum Verhalten und zur Festigkeit des Gebirges gewonnen. Diese können anschließend genutzt werden, um die numerische Simulation betreffend die Standfestigkeit der Tagebauböschung zu kalibrieren und die Unsicherheiten in dieser zu verringern. Des Weiteren ist dadurch auch die Simulation des Abbaus der tagebauböschungsnahen Kammern aussagekräftig.
- Der fortschreitende Abbau im Tagebau sowie der Einfluss der Tagebauböschung auf die primäre Spannungsverteilung haben keine negativen Auswirkungen auf die im Abschnitt „5.5.4 Fallbeispiel: Abbaufeld inklusive Abbausequenz in Gummern“ analysierte Standfestigkeit eines Abbaufelds.

Nachfolgend sind weitere Überlegungen zu möglichen, zukünftigen Untersuchungen betreffend die Wechselwirkungen zwischen dem untertägigen Abbau und der Standfestigkeit der Tagebauböschung angeführt.

- Der Raise-mining Abbau kann als soft-inclusion simuliert werden und mit

Hilfe davon sein Einfluss auf die Standfestigkeit der Böschung beurteilt werden. Ein Vorteil dieser Simulationen wäre, dass man eine Variation des Ausbringens des Raise-mining Abbaus über die Steifigkeit der soft-inclusion einfach simulieren könnte.

- Aufgrund der Tagebauböschung treten Schubspannungen im dahinterliegenden Gebirge vor allem in der Umgebung jenes Gleitkreises, an dem ein Böschungsversagen stattfinden würde, auf. Deren Einfluss auf die Standfestigkeit des Festensystems des Raise-mining Abbaufahrens kann über Aufbringen von Schubspannungen in den Festen analysiert werden.

6 Schlussfolgerungen

Im Bergbau Gummern ist geplant, Teile der Lagerstätte, die sich hinter der Tagebauendböschung befinden und daher im Tagebau nicht gewonnen werden können, mit Hilfe von Raise-mining abzubauen. Da Raise-mining derzeit jedoch nicht angewandt wird, stehen keine Studien oder Erfahrung betreffend den gebirgsmechanischen Zuschnitt zur Verfügung. Aus diesem Grund sind im Zuge dieser Arbeit einerseits Untersuchungen zu den generellen gebirgsmechanischen Aspekten des Raise-mining Abbaufahrens und andererseits zur Standfestigkeit der geplanten Abbaue im Bergbau Gummern durchgeführt worden. Dazu werden in erster Linie numerische Simulationen herangezogen, weil keine Bergwerke für in-situ Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Der Schwerpunkt der generellen Analysen liegt dabei auf der Art und dem Ausmaß der Spannungumlagerungen in der Umgebung eines Raise-mining Abbaus. An Hand von diesen werden einerseits kritische Bereiche und Parameter für die Standfestigkeit von Kammern aufgezeigt und andererseits untersucht, wie sich der fortschreitende Abbau innerhalb eines Abbaufelds sowie das Versagen von Festen auf die Spannungumlagerungen und in weiterer Folge auf die Standfestigkeit auswirken. Im Zuge dieser Studien werden die Abbaufelder auch als „weiche Einschlüsse“ (soft-inclusions) modelliert, um den Einfluss der Größe

eines Abbaufelds auf die regionalen Spannungsumlagerungen zu beurteilen sowie die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Baufeldern zu analysieren. Die generellen gebirgsmechanischen Untersuchungen können zudem als Ausgangspunkt für den Zuschnitt zukünftiger Raise-mining Abbaue herangezogen werden. Des Weiteren fließen die Erkenntnisse der allgemeinen Studien in die Beurteilung der Standfestigkeit der Abbaue in Gummern ein, wobei die Standfestigkeit einer einzelnen Kammer und eines Abbaufelds sowie die Wechselwirkungen des unter- und obertägigen Abbaus betrachtet worden sind.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse der Untersuchungen dieser Arbeit zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in den entsprechenden Kapiteln.

- Die wichtigsten Zuschnittsparameter eines Raise-mining Abbaus sind die Kammergeometrie, der Zentralabstand zwischen benachbarten Kammern, die Kammeranordnung zueinander, die Abbaufeldgröße und die Barrierefestenbreite. Diese bestimmen das Ausmaß und die Höhe der Spannungsumlagerungen und haben somit einen bedeutenden Einfluss auf die Standfestigkeit.
- Die Spannungsumlagerungen in der Umgebung einer einzelnen Abbaukammer sind vergleichbar mit jenen in der Umgebung eines kreisförmigen Tunnels. Die wesentlichen Charakteristika von diesen bleiben auch beim Abbau von mehreren nebeneinander angeordneten Kammern erhalten.
- Die Spannungsumlagerungen beschränken sich grundsätzlich auf die unmittelbare Umgebung von Raise-mining Kammern und Abbaufeldern. Aus diesem Grund ist der regionale Einfluss eines Raise-mining Abbaus als gering einzustufen.
- Die Horizontalspannungen sind im Allgemeinen kritischer für die Standfestigkeit als die Vertikalspannungen, weil deren Umlagerungen deutlich ausgeprägter sind. Des Weiteren werden die Schubspannungen primär durch diese Horizontalspannungsumlagerungen hervorgerufen.
- Der Abbau von mehreren Kammerreihen innerhalb eines Abbaufelds wirkt sich im Allgemeinen positiv auf die Spannungsumlagerungen aus.

- Ein mögliches Versagen von Festen wirkt sich überwiegend lokal aus, kann aber dennoch eine Überlastung von weiteren Festen verursachen. Aus diesem Grund ist eine Einteilung der Abbaue in Abbaufelder zweckmäßig. Diese werden durch Barrierefesten voneinander getrennt, um bei einem Festenversagen ein Übergreifen von diesem auf das gesamte Bergwerk zu verhindern.
- Die Gebirgsstruktur kann den Querschnitt einer Kammer durch bevorzugtes Abgleiten von Blöcken an bestimmten Punkten des Kammerulms signifikant verändern und vergrößern. Dieser Umstand muss bei der Planung des Zuschnitts berücksichtigt werden, weil er eine starke Verringerung des Festenquerschnitts verursachen kann und in weiterer Folge die Standfestigkeit negativ beeinflusst.
- Das Festensystem eines Raise-mining Abbaus unterscheidet sich grundsätzlich von jenem eines klassischen Kammerfestenbaus. Die Festen sind nicht isoliert, sondern bilden einen Festenverbund, der allseitig eingespannt ist. Daraus resultieren eine höhere Festigkeit der Festen und eine größere Steifigkeit des Festensystems. In weiterer Folge wird dadurch die Standfestigkeit positiv beeinflusst.
- Der Abbau von mehreren Kammern innerhalb eines Baufelds verringert die Steifigkeit des Gebirges in diesem Bereich. Daher kann ein Abbaufeld als „weicher Einschluss“ (soft-inclusion) modelliert werden. Diese Art der Simulation bietet eine gute Möglichkeit zur Ermittlung der regionalen Spannungsumlagerungen in der Umgebung von Abbaufeldern mit einem deutlich geringeren Zeit- und Rechenaufwand. Kritisch bei der Anwendung von soft-inclusions ist das Ausmaß der Reduktion des E-Moduls in dieser.
- Die Standfestigkeit der geplanten Abbaue sowie der Tagebauendböschung im Bergbau Gummern ist unter den betrachteten Umständen und getroffenen Annahmen gegeben. Allerdings sind die Ergebnisse dieser Standfestigkeitsanalysen aufgrund von schwierig quantifizierbaren Einflüssen der Gebirgsstruktur auf die Gebirgsfestigkeit und der vereinfachten Darstellung der realen Gegebenheiten in den numerischen Simulationen mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Der Kenntnisstand bezüglich Gebirgsfestigkeit und Gebirgsverhalten wird sich jedoch im Laufe des Abbaus der ersten Kammern durch den Einsatz eines

Gebirgsmonitoringprogramms signifikant vergrößern. Die dadurch gewonnen Erkenntnisse können anschließend genutzt werden, um die numerischen Simulationen zu kalibrieren und die Unsicherheiten sukzessive zu verringern.

Die Untersuchungen dieser Arbeit haben des Weiteren gezeigt, dass in Zukunft weitere Studien betreffend den gebirgsmechanischen Zuschnitt durchgeführt werden sollen. Das Ziel von diesen ist, den Zuschnitt so zu optimieren, dass einerseits das Ausbringen maximiert und somit die Lagerstätte nachhaltig genutzt werden kann. Andererseits soll mit Hilfe dieser Studien die Arbeitssicherheit und der Schutz der Umwelt gewährleistet werden. Dazu müssen in erster Linie die Auswirkungen eines veränderten Zuschnitts auf die Spannungsumlagerungen und die Eigenschaften des Raise-mining Festensystems, das sich von den Festensystemen herkömmlicher Kammerfestenbaue vor allem in der Festigkeit und Systemsteifigkeit unterscheidet, analysiert werden. Ein weiterer Punkt von Interesse sind die Auswirkungen von veränderten Gebirgseigenschaften, im Speziellen der Einfluss der Gebirgsstruktur und Gebirgsfestigkeit sowie des primären Spannungsfelds. Darüber hinaus ist vor allem im Falle des Bergbaus Gummern wichtig, wie sich die Wechselwirkungen zwischen dem unter- und obertägigen Abbau auf die Standfestigkeit auswirken. Im Allgemeinen kann abschließend festgehalten werden, dass der zukünftige Raise-mining Abbau im Bergbau Gummern durch den Einsatz eines umfangreichen Gebirgsmonitoringprogramms wichtige Erkenntnisse zu den gebirgsmechanischen Aspekten des Raise-mining Abbauverfahrens liefern wird. Diese können anschließend in zukünftige Studien und Analysen einbezogen werden, damit der gebirgsmechanische Zuschnitt von Raise-mining Abbauen optimiert werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- Barton, N., (2002): Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design, in International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 39, p. 185 – 216
- Bieniawski, Z.T., (1989): Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering, Wiley New York
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T., (2004): Rock Mechanics for underground mining, 3rd ed., Springer Science + Business Media Inc.
- Hoek, E., (2004): Estimates of rock mass strength, Discussion paper # 4
- Hoek, E. Carranza-Torres, C. und Corkum, B., (2002): Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition, in Proceedings of NARMS-TAC Conference, Toronto, p. 276 – 273
- Itasca Consulting Group Inc. (2009): FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User`s Guide, 4th ed.
- Jaeger, J.C. Cook, N.G.W. und Zimmerman, R.W., (2007): Fundamentals of Rock Mechanics, 4th ed., Blackwell Publishing
- Land Kärnten – Amt der Kärntner Landesregierung, (2016): http://www.kagis.ktn.gv.at/154138_DE, 25.10.2016
- Laubscher, D.H., (1990): A geomechanics classification system for the rating or rock mass in mine design, in: The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, volume 90, p. 257 – 273
- Laubscher, D.H., (1994): Cave mining – the state of the art, in: The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, p. 279 – 293
- Mawdesley, C.A., Trueman, R. und Whiten, W.J., (2001): Extending the Mathews stability graph for open-stope design, in Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, volume 110, p. 27 – 39
- Marinos, P. und Hoek, E., (2000): GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation, in Proceedings of GeoEng2000 Conference, Melbourne, p. 1422 – 1442
- Moore, E., (2014): A cut above – Raise climbing brings production gains to Canadian companies, <https://magazine.cim.org/en/2014/November/upfront/A-cut-above.aspx>, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, (21.08.2016)
- Noble, R., (2012): Hemlo Shines, <http://www.canadianminingjournal.com/features/hemlo-shines/1000938133/>, The Northern Miner Group, (21.08.2016)
- Nußbacher, H-P., (2009): Ermittlung der Lanfriststabilität einer ausbringensoptimierten Tagbauendböschung am Standort Gummern,

Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Montanuniversität Leoben

- Pakalnis, R. T. und Hughes, P. B., (2011): Sublevel Stopping, in SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed., Darling, P. (ed.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., p. 1355 – 1363
- Ran, J. und Mfula, C., (2012): Geomechanical aspects in Alimak stopping at Barrick's Bulyanhulu Mine, in Mining Technology, volume 121, p. 1 – 10
- Salamon, M.D.G., (1983): The role of Pillars in Mining, in The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, volume 5, p. 173 – 200
- Wagner, H. und Blaha, H., (2015): Bericht über den Zwischenstand der Untersuchungen bezüglich des geplanten untertägigen Abbaus am Standort Gummern der Fa. OMYA GmbH., Teilbericht 1, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Montanuniversität Leoben
- Wagner, H. et al., (2010): Untersuchungen zur Optimierung der Tagebauendböschung im Tagebau Gummern der Fa. OMYA, Bericht, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Montanuniversität Leoben
- Wittke, W., (1984): Felsmechanik: Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo

8 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---------------|---|
| Abbildung 1: | Schematische Darstellung (Grundriss – oben, Aufriss – unten) der Vorrichtung einer Raise-mining Kammer; Im Aufriss sind zudem die Installationen im Raise gezeigt. Der Streckenquerschnitt beträgt 5 x 5m; die Höhe der Kammer kann bis zu mehrere Hundertmeter betragen. Die Geometrie der Kaverne in der Kopfstrecke hängt von den verwendeten Geräten und Installationen ab; alle Größenangaben in Meter. 2 |
| Abbildung 2: | linke Seite → Im Abbau befindliche Raise-mining Kammern; rechte Seite → vollständig abgebaute Kammer, die Installationen zur Befahrung des ehemaligen Raise sind bereits entfernt worden; alle Größenangaben in Meter. 3 |
| Abbildung 3: | Darstellung des Begriffs Zentralabstand der Kammern. Zudem sind zwei Möglichkeiten der Kammeranordnung ausgewiesen: links → quadratische Anordnung; rechts → dreiecksförmige Anordnung..... 5 |
| Abbildung 4: | Gegenüberstellung der Festensysteme im Grundriss eines Raise-mining Abbaus (links) und eines herkömmlichen Kammerbaus (rechts)..... 6 |
| Abbildung 5: | Abbau einer Kammer mit Alimak-mining (Pakalnis and Hughes 2011) 7 |
| Abbildung 6: | Luftbildaufnahme des Bergbaus Gummern; blau = Tagebau; rot=geplanter untertägiger Abbau; orange = Halde; braun = Werk (KAGIS 25.10.2016) 11 |
| Abbildung 7: | Luftbildaufnahme des Tagebaus Gummern (KAGIS 25.10.2016) 12 |
| Abbildung 8: | Luftbild des Tagebaus mit den geplanten Abbaukammern (blau), dem Aufschluss (rot) und dem bestehenden Förderstollen (violett). (KAGIS 25.10.2016)..... 14 |
| Abbildung 9: | Zuschnitt der ersten Abbauphase im Bergbau Gummer (vgl. Wagner und Blaha 2015)..... 15 |
| Abbildung 10: | Detailansichten zum Zuschnitt in der ersten Abbauphase (vgl. Wagner und Blaha 2015)..... 15 |
| Abbildung 11: | Erstreckung der einzelnen Homogenbereiche; Tagebaustand 2009 (vgl. Nußbacher 2009)..... 17 |
| Abbildung 12: | Erstreckung der einzelnen Homogenbereiche; geplanter Tagebauendstand (vgl. Nußbacher 2009)..... 18 |
| Abbildung 13: | Lage der geplanten untertägigen Abbaue (lila) und Erstreckung der Homogenbereiche sowie Lage der lokalen Karstbereiche im geplanten Tagebauendstand (vgl. Nußbacher 2009) 20 |
| Abbildung 14: | Gebirge im Tagebau Gummern..... 25 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 15: | Gebirge in einer Ausrichtungsstrecke..... | 25 |
| Abbildung 16: | Gebirge in einer Ausrichtungsstrecke..... | 26 |
| Abbildung 17: | Gebirgsfestigkeit nach Hoek und Brown (blau) und interpolierte Gebirgsfestigkeit nach Mohr-Coulomb (grün)..... | 29 |
| Abbildung 18: | Zusammenhänge zwischen Gebirgsfestigkeit, Gesteinsdruckfestigkeit und Gebirgsklassifikationssysteme (Hoek 2004); ersichtlich ist auch der Streubereich für den Homogenbereich 2; zur dessen Ermittlung ist jedoch die Gebirgsfestigkeit nach der blau strichlierten Linie nicht berücksichtigt worden, weil diese stark von den übrigen Festigkeiten abweicht. | 30 |
| Abbildung 19: | Luftbildaufnahme des Tagebaus Gummern; Eingezeichnet sind die Grenzen des Simulationsmodells (rot) und die geplanten Abbaukammern (blau) (KAGIS 25.10.2016)..... | 35 |
| Abbildung 20: | Simulationsmodell in der Software Surpac. braun=Tagebau-Endzustand und restliche Topografie; blau=Vorräte im Tagebau; weiß markiert = Abbaufelder 1 bis 3 | 36 |
| Abbildung 21: | Simulationsmodell im FLAC 3D Netz; grau=anstehendes Gebirge im Tagebau-Endzustand; grün=anstehende Vorräte im Tagebau | 36 |
| Abbildung 22: | Normal- und Schubspannungen in einer Ebene hervorgerufen durch Aufbringen von Hauptnormalspannungen (Brady and Brown 2004) | 49 |
| Abbildung 23: | Mohr'scher Spannungskreis (Brady and Brown 2004)..... | 49 |
| Abbildung 24: | Koordinatensystem für die mit FLAC 3D genierten Modelle | 49 |
| Abbildung 25: | Linear-elastisches Materialgesetz | 51 |
| Abbildung 26: | Materialgesetz nach Mohr-Coulomb (Brady und Brown 2004) . | 52 |
| Abbildung 27: | Linear elastisches – ideal plastisches Materialverhalten | 53 |
| Abbildung 28: | Lage der Schnitte und Messlinien..... | 56 |
| Abbildung 29: | Vertikalspannungsverteilung für $h=105\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=3$) im Schnitt 1 | 57 |
| Abbildung 30: | Vertikalspannungsverteilung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 1 | 57 |
| Abbildung 31: | Vertikalspannungsverteilung für $h=160\text{m}$ und $d=53,3\text{m}$ ($h/d=3$) im Schnitt 1..... | 58 |
| Abbildung 32: | Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 1 | 58 |
| Abbildung 33: | Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 2 | 59 |
| Abbildung 34: | Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 3 | 59 |
| Abbildung 35: | Horizontalspannungsverteilung in X-Richtung für $h=160\text{m}$ und $d=35\text{m}$ ($h/d=4,57$) im Schnitt 1 | 61 |
| Abbildung 36: | Horizontalspannungsverteilung in Z-Richtung für $h=160\text{m}$ und | |

| | | |
|---------------|---|----|
| | d=35m (h/d=4,57) im Schnitt 1 | 61 |
| Abbildung 37: | Horizontalspannungsverteilung in X-Richtung für h=160m und d=35m (h/d=4,57) im Schnitt 2 | 62 |
| Abbildung 38: | Horizontalspannungsverläufe in X-Richtung entlang von Messlinie 1..... | 62 |
| Abbildung 39: | Horizontalspannungsverläufe in Z-Richtung entlang von Messlinie 1..... | 63 |
| Abbildung 40: | Horizontalspannungsverläufe in X-Richtung entlang von Messlinie 3..... | 63 |
| Abbildung 41: | Schubspannungsverteilung für h=160m und d=35m (h/d=4,57) im Schnitt 1..... | 65 |
| Abbildung 42: | Schubspannungsverläufe entlang von Messlinie 1..... | 65 |
| Abbildung 43: | Zusammenhang zwischen den Spannungsumlagerungen um einen unendlich langen kreisförmigen Tunnel und dem primären Spannungsverhältnis (vgl. Brady und Brown 2004)..... | 66 |
| Abbildung 44: | Eingangsparameter für Kirsch-Gleichungen für die betrachteten Raise-mining Kammern (vgl. Brady und Brown 2004)..... | 68 |
| Abbildung 45: | Vergleich der Horizontalspannungsverläufe aus der numerischen Simulation mit jenen, die sich aus den Kirsch-Gleichungen ergeben | 68 |
| Abbildung 46: | Lage von Schnitt 1 | 70 |
| Abbildung 47: | Vertikalspannungen für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: h=160m, d=35m, h/d=4,57 | 71 |
| Abbildung 48: | Horizontalspannungen in X-Richtung für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: h=160m, d=35m, h/d=4,57 | 71 |
| Abbildung 49: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: h=160m, d=35m, h/d=4,57 | 72 |
| Abbildung 50: | Schubspannungen für unterschiedliche Firstneigungen im Schnitt 1; Kammergeometrie: h=160m, d=35m, h/d=4,57 | 72 |
| Abbildung 51: | Zusammenhang zwischen den primären Spannungen und der Teufe (Brady und Brown 2004)..... | 74 |
| Abbildung 52: | Schematische Darstellung des Verlaufs der größten und kleinsten Hauptnormalspannung unmittelbar hinter einer Tagebauböschung. Die größte Hauptnormalspannung verläuft parallel zur Böschung und die kleinste steht normal auf diese. 76 | 76 |
| Abbildung 53: | Primärer Spannungszustand zur Simulation einer tagebaunahen Kammer..... | 77 |
| Abbildung 54: | Lage der Schnitte 1 und 2 | 77 |
| Abbildung 55: | Vertikalspannungen in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, | |

| | | |
|---------------|--|----|
| | ($h/d=4,57$); Die Richtung der Pfeile entspricht in diesem Fall nicht der Richtung der primären Spannung, sondern zeigt die Richtung der ausgewerteten Spannung an. | 78 |
| Abbildung 56: | Horizontalspannungen in X-Richtung in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, ($h/d=4,57$); Die Richtung der Pfeile entspricht in diesem Fall nicht der Richtung der primären Spannung, sondern zeigt die Richtung der ausgewerteten Spannung an. | 78 |
| Abbildung 57: | Horizontalspannungen in Z-Richtung in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, ($h/d=4,57$)..... | 79 |
| Abbildung 58: | Schubspannungen in der Umgebung einer tagebaunahen Kammer; Kammerdurchmesser 35m, Kammerhöhe 160m, ($h/d=4,57$) | 79 |
| Abbildung 59: | Streichen und Fallen (Wittke 1984) | 81 |
| Abbildung 60: | Streichen und Fallen eines ausgeprägten Trennflächensystems in Bezug auf die Kammer | 81 |
| Abbildung 61: | Darstellung der Veränderung von einem kreis- zu einem ellipsenförmigen Querschnitt aufgrund einer ausgeprägten Trennflächenrichtung..... | 83 |
| Abbildung 62: | Darstellung der Begriffe für die Analyse des Ellipsenquerschnitts | 84 |
| Abbildung 63: | Prozentuelle Veränderung der Tangentialspannungen in den Punkten A und B eines ellipsenförmigen Querschnitts gegenüber den Tangentialspannungen eines kreisförmigen Querschnitts in denselben Punkten bei unterschiedlichen Ausbruchtiefen im Punkt A..... | 85 |
| Abbildung 64: | Die roten Ellipsen stellen die Kammerquerschnitte mit den Ausbrüchen und die schwarzen Kreise die Kammerquerschnitte ohne Ausbrüche dar. Es ist zu erkennen, dass sich der Festenquerschnitt durch die Ausbrüche stark verringern kann. | 86 |
| Abbildung 65: | Tabelle für die Ermittlung des GSI-Werts (Marinos und Hoek 2000) | 87 |
| Abbildung 66: | Auslastungsgrad einer Kammer mit Durchmesser 35m und Höhe 160m bei Variation des GSI-Werts unter den beschriebenen Eingangsparametern im Schnitt 1..... | 88 |
| Abbildung 67: | Auslegungskriterium für Kammern nach Laubscher (1994)..... | 90 |
| Abbildung 68: | Auslegungskriterium für Kammern nach Mathews (Mawdesley, Trueman und Whiten 2001)..... | 91 |
| Abbildung 69: | Umschreibung eines quadratischen Querschnitts. Es ist auch zu erkennen, dass die Ulme im Gegensatz zum kreisförmigen Querschnitt deutlich größer sind..... | 92 |
| Abbildung 70: | Lage von Schnitt 1 | 96 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 71: | Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 1 für eine einzelne Kammer im Bergbau Gummern..... | 97 |
| Abbildung 72: | Zustand des Gebirges im Schnitt 1 für eine einzelne Kammer im Bergbau Gummern | 97 |
| Abbildung 73: | Lage der Schnitte 1 und 2 sowie der Messlinie 1 | 101 |
| Abbildung 74: | Vertikalspannungen im Schnitt 1; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 102 |
| Abbildung 75: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 1; 4Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 103 |
| Abbildung 76: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 103 |
| Abbildung 77: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 1; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 104 |
| Abbildung 78: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 104 |
| Abbildung 79: | Schubspannungen im Schnitt 1; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 105 |
| Abbildung 80: | Schubspannungen im Schnitt 2; 4 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 105 |
| Abbildung 81: | Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$ | 107 |
| Abbildung 82: | Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$ | 107 |
| Abbildung 83: | Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$ | 108 |
| Abbildung 84: | Vergleich der maximalen Schubspannungen entlang von Messlinie 1 für unterschiedliche Zentralabstände bei 4 Kammern; Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$ | 108 |
| Abbildung 85: | Vergleich der Festenspannung eines klassischen Kammerbaus (oben) mit den Horizontalspannungen in den Festen eines Raise-mining Abbaus (unten) | 109 |
| Abbildung 86: | Theorie der zugeordneten Flächen..... | 110 |
| Abbildung 87: | Festenspannungen für unterschiedliche Baufeldbreiten. Die maximal mögliche Festenspannung beträgt für den dargestellten Fall $4*\sigma_v$ (Ausbringen 75%). Es ist gut zu erkennen, dass die Spannungen in die Auflager umgelagert werden und mit zunehmender Baufeldbreite in den Festen ansteigen. (Salamon 1983) | 111 |
| Abbildung 88: | Lage von Schnitt 1 und 2 sowie Messlinie 1 | 114 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 89: | Vertikalspannungen im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 115 |
| Abbildung 90: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 115 |
| Abbildung 91: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 116 |
| Abbildung 92: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 116 |
| Abbildung 93: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$) ... | 117 |
| Abbildung 94: | Schubspannungen im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 117 |
| Abbildung 95: | Schubspannungen im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 118 |
| Abbildung 96: | Vergleich der durchschnittlichen Vertikalspannungen in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 119 |
| Abbildung 97: | Vergleich der durchschnittlichen Horizontalspannungen in X-Richtung in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 119 |
| Abbildung 98: | Vergleich der durchschnittlichen Horizontalspannungen in Z-Richtung in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 120 |
| Abbildung 99: | Vergleich der durchschnittlichen Schubspannungen in den Festen für unterschiedliche Abbaufeldbreiten; Kammergeometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 120 |
| Abbildung 100: | Lage der Schnitte 1 und 2 sowie der Messlinie 1 | 122 |
| Abbildung 101: | Vertikalspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 123 |
| Abbildung 102: | Vertikalspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 123 |
| Abbildung 103: | Horizontalspannungen in X-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 124 |
| Abbildung 104: | Horizontalspannungen in X-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, Zentralabstand $52,5\text{m}$ ($1,5*d$)..... | 124 |
| Abbildung 105: | Horizontalspannungen in Z-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie $h=160\text{m}$, $d=35\text{m}$, | |

| | | |
|----------------|---|-----|
| | Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 125 |
| Abbildung 106: | Horizontalspannungen in Z-Richtung bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 125 |
| Abbildung 107: | Schubspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 1; 8 Kammern, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 126 |
| Abbildung 108: | Schubspannungen bei Versagen einer Feste im Schnitt 2; 8 Kammern, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 126 |
| Abbildung 109: | Vergleich der Vertikalspannungsverläufe entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 127 |
| Abbildung 110: | Vergleich der Horizontalspannungsverläufe in X-Richtung entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 128 |
| Abbildung 111: | Vergleich der Horizontalspannungsverläufe in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 128 |
| Abbildung 112: | Vergleich der Schubspannungsverläufe entlang von Messlinie 1 in einem Abbaufeld mit 8 Kammern bei Versagen der mittleren Feste; Kammergeometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand 52,5m (1,5*d)..... | 129 |
| Abbildung 113: | Durchschnittliche Erhöhung der jeweiligen durchschnittlichen Spannungen entlang von Messlinie 1 im Abstand von einer beziehungsweise zwei Festen von der versagten Feste | 129 |
| Abbildung 114: | Grundrisse einer quadratischen und dreiecksförmigen Kammeranordnung in einem Abbaufeld mit 12 Kammern | 133 |
| Abbildung 115: | Abgebaute Fläche und Festenfläche für eine quadratische (links) und dreiecksförmige (rechts) Kammeranordnung..... | 134 |
| Abbildung 116: | Lage von Schnitt 2 sowie der Messlinien 1 und 2..... | 137 |
| Abbildung 117: | Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d)..... | 139 |
| Abbildung 118: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d)..... | 139 |
| Abbildung 119: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d)..... | 140 |
| Abbildung 120: | Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische | |

| | | |
|----------------|---|-----|
| | Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d)..... | 140 |
| Abbildung 121: | Vergleich der Vertikalspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern | 141 |
| Abbildung 122: | Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern | 141 |
| Abbildung 123: | Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern | 142 |
| Abbildung 124: | Vergleich der Schubspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und ein Abbaufeld mit 4 Kammern | 142 |
| Abbildung 125: | Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d)..... | 144 |
| Abbildung 126: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d)..... | 144 |
| Abbildung 127: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d)..... | 145 |
| Abbildung 128: | Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d)..... | 145 |
| Abbildung 129: | Vergleich der Vertikalspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung | 146 |
| Abbildung 130: | Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung..... | 147 |
| Abbildung 131: | Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung..... | 147 |
| Abbildung 132: | Vergleich der Schubspannungen entlang der betrachteten Messlinien für ein Abbaufeld mit 12 Kammern mit quadratischer und dreiecksförmiger Kammeranordnung | 148 |
| Abbildung 133: | Lage von Schnitt 2..... | 149 |
| Abbildung 134: | Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d)..... | 151 |
| Abbildung 135: | Vertikalspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie | |

| | | |
|----------------|--|-----|
| | h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d)..... | 151 |
| Abbildung 136: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d) .. | 152 |
| Abbildung 137: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d) .. | 152 |
| Abbildung 138: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d) .. | 153 |
| Abbildung 139: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d) .. | 153 |
| Abbildung 140: | Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, quadratische Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=52,5m (1,5*d)..... | 154 |
| Abbildung 141: | Schubspannungen im Schnitt 2; 12 Kammern, dreiecksförmige Kammeranordnung und Versagen einer Feste, Geometrie h=160m, d=35m, Zentralabstand=56,4m (1,5*d)..... | 154 |
| Abbildung 142: | Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion (grün) im Grundriss (links) und Aufriss (rechts). Die Position der Kammern in einem solchen Abbaufeld ist strichliert gekennzeichnet..... | 156 |
| Abbildung 143: | Lage der Punkte, in denen die Verschiebungen analysiert worden sind, im Grundriss (links) und im Aufriss (rechts). Die Pfeile stellen jeweils die untersuchte Verschiebungsrichtung dar. | 158 |
| Abbildung 144: | Lage der Schnitte 1 und 2 sowie der Messlinie 1 | 160 |
| Abbildung 145: | Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 161 |
| Abbildung 146: | Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 161 |
| Abbildung 147: | Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 162 |
| Abbildung 148: | Vergleich der Schubspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung und demselben Abbaufeld in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 162 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Abbildung 149: | Vertikalspannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 164 |
| Abbildung 150: | Vertikalspannungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 164 |
| Abbildung 151: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 165 |
| Abbildung 152: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 165 |
| Abbildung 153: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 166 |
| Abbildung 154: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 166 |
| Abbildung 155: | Schubspannungen im Schnitt 1 (Vertikalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 167 |
| Abbildung 156: | Schubspannungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) in einem Abbaufeld mit 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 167 |
| Abbildung 157: | Aufriss (oben) und Grundriss (unten) von 3 Abbaufeldern mit je 12 Kammern in Form von soft-inclusions. Die Barrierefestenbreite zwischen den einzelnen Abbaufeldern beträgt 35m, der Zentralabstand zwischen zwei Kammern aus benachbarten Abbaufeldern jedoch 87,5m (2,5*Kammerdurchmesser). Zudem ist die Lage von Schnitt 2 und Messlinie 1 ausgewiesen..... | 169 |
| Abbildung 158: | Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld und 3 Abbaufeldern (Barrierefestenbreite 35m) in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 171 |
| Abbildung 159: | Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld und 3 Abbaufeldern (Barrierefestenbreite 35m) in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 171 |
| Abbildung 160: | Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld und 3 Abbaufeldern (Barrierefestenbreite 35m) in Form von soft-inclusions mit einer | |

| | | |
|----------------|--|-----|
| | E-Modul Reduktion von 35% | 172 |
| Abbildung 161: | Vertikalspannungen im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) für 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% und Barrierefestenbreite von 35m | 172 |
| Abbildung 162: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) für 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% und Barrierefestenbreite von 35m | 173 |
| Abbildung 163: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2 (Horizontalschnitt) für 3 Abbaufelder zu je 12 Kammern in quadratischer Anordnung in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% und Barrierefestenbreite von 35m | 173 |
| Abbildung 164: | Vergleich der Vertikalspannungen entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern und ein Abbaufeld mit 48 Kammern in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 175 |
| Abbildung 165: | Vergleich der Horizontalspannungen in X-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern und ein Abbaufeld mit 48 Kammern in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 176 |
| Abbildung 166: | Vergleich der Horizontalspannungen in Z-Richtung entlang von Messlinie 1 für ein Abbaufeld mit 12 Kammern und ein Abbaufeld mit 48 Kammern in Form von soft-inclusions mit einer E-Modul Reduktion von 35% | 176 |
| Abbildung 167: | Vertikalspannungen im Schnitt 2 für ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 177 |
| Abbildung 168: | Horizontalspannungen in X-Richtung im Schnitt 2 für ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 177 |
| Abbildung 169: | Horizontalspannungen in Z-Richtung im Schnitt 2 für ein Abbaufeld mit 48 Kammern in quadratischer Anordnung in Form einer soft-inclusion mit einer E-Modul Reduktion von 35%..... | 178 |
| Abbildung 170: | Lage der Kammern und Richtung des Abbaus..... | 182 |
| Abbildung 171: | Lage von Schnitt 2..... | 183 |
| Abbildung 172: | Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 1 im Schnitt 2..... | 184 |
| Abbildung 173: | Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 2 im Schnitt 2..... | 184 |
| Abbildung 174: | Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 3 im Schnitt 2..... | 185 |
| Abbildung 175: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 1 im Schnitt 2..... | 185 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 176: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 2 im Schnitt 2..... | 186 |
| Abbildung 177: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 1 nach Schritt 3 im Schnitt 2..... | 186 |
| Abbildung 178: | Lage der Kammern..... | 187 |
| Abbildung 179: | Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 1 im Schnitt 2..... | 188 |
| Abbildung 180: | Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 2 im Schnitt 2..... | 188 |
| Abbildung 181: | Horizontalspannungen in X-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 3 im Schnitt 2..... | 189 |
| Abbildung 182: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 1 im Schnitt 2..... | 189 |
| Abbildung 183: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 2 im Schnitt 2..... | 190 |
| Abbildung 184: | Horizontalspannungen in Z-Richtung für Abbausequenz 2 nach Schritt 3 im Schnitt 2..... | 190 |
| Abbildung 185: | Lage der Kammern..... | 193 |
| Abbildung 186: | Lage der Schnitte 2 und 3 | 194 |
| Abbildung 187: | Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 2..... | 195 |
| Abbildung 188: | Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 4..... | 195 |
| Abbildung 189: | Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 2 nach dem Abbauschritt 4..... | 196 |
| Abbildung 190: | Zustand des Gebirges im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 2 | 196 |
| Abbildung 191: | Zustand des Gebirges im Schnitt 3 nach dem Abbauschritt 4 | 197 |
| Abbildung 192: | Zustand des Gebirges im Schnitt 2 nach dem Abbauschritt 4 | 197 |
| Abbildung 193: | Luftbild des Tagebaus mit den geplanten Abbaukammern (blau), dem Aufschluss (rot) und dem bestehenden Förderstollen (violett). (KAGIS 25.10.2016)..... | 200 |
| Abbildung 194: | Abbausequenz im Tagebau; grau=anstehendes Gebirge im Tagebau-Endzustand, braun=Tagebau-Abbauschritt 1, rot=Tagebau-Abbauschritt 2, grün=Tagebau-Abbauschritt 3, violett=Tagebau-Abbauschritt 4..... | 201 |
| Abbildung 195: | Untertägige Abbausequenz; grau=anstehendes Gebirge im Tagebau-Endzustand, türkis=anstehende Vorräte im Tagebau, grün=Untertage-Abbauschritt 1, gelb=Untertage-Abbauschritt 2, blau=Untertage-Abbauschritt 3, orange=Untertage-Abbauschritt 4, violett=Untertage-Abbauschritt 5 | 201 |
| Abbildung 196: | Lage von Schnitt 19; die tagebaunahen Kammern sind nicht abgebaut | 203 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Abbildung 197: | Vertikalspannungen im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationseende | 204 |
| Abbildung 198: | Vertikalspannungen im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationseende | 204 |
| Abbildung 199: | Horizontalspannungen in X-Richtung (Ost-West) im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationseende | 205 |
| Abbildung 200: | Horizontalspannungen in X-Richtung (Ost-West) im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationseende .. | 205 |
| Abbildung 201: | Horizontalspannungen in Y-Richtung (Nord-Süd) im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationseende | 206 |
| Abbildung 202: | Horizontalspannungen in Y-Richtung (Nord-Süd) im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationseende .. | 206 |
| Abbildung 203: | Schubspannungen in XZ-Ebene im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationseende | 207 |
| Abbildung 204: | Schubspannungen in XZ-Ebene im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationseende | 207 |
| Abbildung 205: | Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 19 bei ausschließlich obertägigem Abbau bei Simulationseende..... | 208 |
| Abbildung 206: | Verteilung des Auslastungsgrads im Schnitt 19 bei unter- und obertägigem Abbau bei Simulationseende | 209 |

9 Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Gesteinsparameter von Proben aus dem Tagebau Gummern (Wagner et al. 2010)..... | 22 |
| Tabelle 2: | Gesteinsparameter für die numerischen Simulationen | 22 |
| Tabelle 3: | Ergebnisse der Gebirgsklassifikation nach Wagner et al. (2010) | 23 |
| Tabelle 4: | Ergebnis der untertägigen Gebirgsklassifikation vom 11.04.2016 | 24 |
| Tabelle 5: | Gebirgsfestigkeiten der beiden Homogenbereiche..... | 28 |
| Tabelle 6: | Streubreite der Gebirgsfestigkeiten nach den Untersuchungen von Hoek (2004)..... | 30 |
| Tabelle 7: | Ebene Koordinaten der Eckpunkte des Simulationsmodells; Koordinaten im System der österreichischen Landesvermessung Bezugsmeridian M31 | 35 |
| Tabelle 8: | Analysierte Geometrien von Raise-mining Kammern | 55 |
| Tabelle 9: | Zeigt die Reduktion der Höhe des Kammerulms für verschiedene Firstneigungen bei einem Kammerdurchmesser von 35m und einem Raise-Durchmesser von 4m. | 70 |
| Tabelle 10: | Darstellung des Ausbringens und der Zentralabstände bei unterschiedlichen Kammeranordnungen für einen Kammerdurchmesser von 35m..... | 136 |
| Tabelle 11: | Vergleich der Verschiebungen in den betrachteten Punkten. Ein positiver Wert bedeutet eine Verschiebung in Richtung des Abbaufelds..... | 158 |

10 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------|---|
| A_{abgebaut} | abgebaute Grundfläche der Lagerstätte |
| A_D | Ausbringen dreiecksförmige Kammeranordnung |
| A_F | Festenquerschnitt |
| $A_{\text{Lagerstätte}}$ | Grundfläche der Lagerstätte |
| A_Q | Ausbringen quadratische Kammeranordnung |
| a | Tunnelradius |
| B | Örterbreite |
| c | Kohäsion |
| D | Zerrüttungsfaktor |
| d | Kammerdurchmesser |
| E_i | Elastizitätsmodul des intakten Gesteins |
| E_m | Elastizitätsmodul des Gebirges |
| E-Modul | Elastizitätsmodul |
| ea | Ausbringen |
| e_h | horizontales Ausbringen |
| GPa | Gigapascal |
| GSI | geological strength index |
| g | Erdbeschleunigung |
| H | kurze Halbachse der Ellipse |
| H_F | Festenhöhe |
| h | Kammerhöhe |
| K | Verhältnis der Horizontalspannungen |
| k | Seitendruckbeiwert |
| k_F | Festensteifigkeit |
| kg | Kilogramm |
| km | Kilometer |
| L_F | Festenlänge |
| LHD | load-haul-dump vehicle |
| Mio | Million |
| MPa | Megapascal |

| | |
|------------------|---|
| MRMR | mining rock mass rating |
| m | Meter |
| m_i | Materialkonstante des Gesteins |
| N | Newton |
| Pa | Pascal |
| p | Vertikalspannung |
| Q | Q-Wert |
| RMR | rock mass rating |
| r | Abstand Tunnelmittelpunkt-Messpunkt |
| s | Sekunde |
| SLKW | Schwerlastkraftwagen |
| T | Teufe |
| t | Tonne |
| W | lange Halbachse der Ellipse |
| W_F | Festenbreite |
| x | mal |
| ZA | Zentralabstand |
| ZA_D | Zentralabstand dreiecksförmige Kammeranordnung |
| ZA_Q | Zentralabstand quadratische Kammeranordnung |
| Θ | Winkel der Messlinie |
| ν | Poisson-Zahl |
| β | Neigung der Ebene |
| ε | Dehnung |
| π | Kreiszahl |
| ρ | Dichte |
| σ | Spannung |
| σ_1 | erste Hauptnormalspannung |
| σ_2 | zweite Hauptnormalspannung |
| σ_3 | dritte Hauptnormalspannung |
| $\sigma_{1,max}$ | maximal aufnehmbare größte Hauptnormalspannung |
| σ_A | Tangentialspannung |
| σ_B | Tangentialspannung |
| σ_C | einaxiale Gebirgsdruckfestigkeit |

| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| σ_{ci} | einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit |
| σ_{cm} | globale Gebirgsdruckfestigkeit |
| σ_F | Festenspannung |
| σ_N | Normalspannung |
| σ_{rr} | Radialspannung |
| σ_t | Zugfestigkeit des Gebirges |
| σ_H | Horizontalspannung |
| σ_V | Vertikalspannung |
| σ_{xx} | Horizontalspannung in X-Richtung |
| σ_{yy} | Vertikalspannung |
| σ_{zz} | Horizontalspannung in Z-Richtung |
| $\sigma_{\theta\theta}$ | Tangentialspannung |
| τ | Schubspannung |
| ϕ | Reibungswinkel |
| * | mal |
| ° | Grad |
| % | Prozent |