

Gebirgsmechanische Aspekte des "Post-Pillar"- Abbauverfahrens

Hannes Blaha

Dissertation

Eingereicht an der Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik
und Bergwirtschaft.

Juli 2012

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Hannes Blaha

Danksagung

Für das Zustandekommen dieser Arbeit bin ich meinem Betreuer,

Herrn o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont Horst Wagner

zu ganz besonderem Dank verpflichtet.

Seine Betreuung erstreckte sich nicht nur auf den technisch-wissenschaftlichen Teil, sondern er verstand es durch Gespräche und Diskussionen meine Motivation und Ausdauer zu unterstützen.

Herrn o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Wulf Schubert möchte ich ganz besonders für die Unterstützung bei der Anfertigung der Arbeit und für seine Bereitschaft als Gutachter und Prüfer zu fungieren bedanken.

Besonderen Dank auch an die Bergbaubetriebsleitung am Standort Breitenau der RHI AG Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Garber und an die Werksleitung Herrn Ing. Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt Thomas Frömmer.

Herr Dipl.-Ing. Hanspeter Nussbacher erweiterte das numerische Simulationsmodell und war eine unschätzbare Hilfe bei der Auswertung der Ergebnisse der Berechnungen.

Zwei für mich sehr wichtige Personen haben die Fertigstellung dieser Arbeit leider nicht mehr miterleben können. Mein Vater Heinz Blaha, der immer eine große Stütze und Ratgeber in allen Belangen war, und Herr Dipl.-Ing. Hannes Hasewend.

Die Arbeit möchte ich meiner Frau Agnes und meinen Kindern Kilian und Leo widmen. Sie haben vor allem in der letzten Phase der Fertigstellung, unglaublich viel Verständnis und Geduld für mich und meine Arbeit aufgebracht.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1-1
2	ZUSAMMENFASSUNG	2-1
3	DAS „POST PILLAR“ ABBAUVERFAHREN	3-1
3.1	Beispiele aus der Praxis	3-3
3.1.1	Strathcona Mine - Falconbridge Nickel Mines Limited	3-4
3.1.2	Dolphin Ore Body - King Island Scheelite	3-6
3.1.3	Rajpura Dariba Mine – Hindustan Zink Limited	3-10
3.1.4	Magnesitbergbau Breitenau – RHI AG	3-13
3.2	Vorteile des Abbauverfahrens	3-17
3.3	Nachteile des Abbauverfahrens	3-17
3.4	Schlussfolgerungen	3-19
3.5	Literaturverzeichnis Kapitel 3	3-20
4	GEBIRGSMECHANISCHE ASPEKTE	4-1
4.1	Einleitung	4-1
4.2	Festigkeit von Bergfesten	4-2
4.2.1	Kritische Beurteilung der Festenformeln aus der Sicht des „Post Pillar“ Abbauverfahrens	4-9
4.2.2	Schlussfolgerungen	4-11
4.3	Belastung von Bergfesten	4-12
4.3.1	Belastungskontrollierte Situation	4-13
4.3.2	Verformungskontrollierte Situation	4-14
4.4	Geometrische Veränderung des Abbaufeldes	4-18
4.4.1	Festensystem A	4-22
4.4.2	Festensystem B	4-26
4.4.3	Festensystem C	4-33
4.4.4	Abschätzung der Festenbelastung über den Ansatz der Hypothese nach Winkler	4-34
4.5	Einfluss des Versatzes auf die Standfestigkeit von Bergfesten	4-48
4.5.1	Wirkung des Versatzruhedruckes	4-49
4.5.2	Widerstand des Versatzes gegen die Querverformung der Bergfeste	4-51
4.5.3	Qualitative Auswirkungen	4-57
4.5.4	Zusätzliche Auswirkungen des Versatz beim „Post Pillar“ Abbauverfahren	4-60
4.5.5	Bemerkungen	4-64
4.6	Gebirgsspannungen	4-66
4.7	Konzept des Sicherheitsfaktors - Dimensionierung von Bergfesten beim „Post Pillar“ Abbauverfahren	4-70

4.8	Stabiles - Instabiles Verhalten von Bergfesten	4-70
4.9	Entwicklung des Abbaufahrens	4-80
4.10	Schlussfolgerungen	4-81
4.11	Literaturverzeichnis Kapitel 4	4-83
5	NUMERISCHE SIMULATIONEN	5-1
5.1	Das Simulationsmodell	5-2
5.1.1	Aufbau	5-3
5.1.2	Simulationssequenz	5-4
5.1.3	Materialparameter	5-5
5.1.4	Überprüfung der Plausibilität	5-6
5.2	Vergleich mit dem gebirgsmechanischen Modell	5-8
5.2.1	Veränderung der Abbaugeometrie – Festensystem B	5-9
5.2.2	Verhalten bzw. Einfluss des Versatzes auf das Verhalten des Modells	5-14
5.2.3	Schlussfolgerungen	5-17
5.3	Vergleich mit Messergebnissen aus der Literatur	5-19
5.3.1	Konvergenzmessungen	5-20
5.3.2	Spannungsmessungen	5-23
5.4	Variation der Eingangsparameter der Simulation	5-24
5.4.1	Einfluss des Seitendruckbeiwertes	5-24
5.4.2	Einfluss des Elastizitätsmoduls der Bergfesten	5-27
5.4.3	Erhöhung des Seitendruckbeiwertes & Verringerung des Elastizitätsmoduls – Schlussfolgerungen.	5-30
5.5	Höhe der Auflockerungszone über dem Abbaufeld	5-33
5.6	Offene Fragen – Diskussion bezüglich der numerischen Simulation	5-36
5.6.1	Versagenskriterium nach Mohr Coulomb	5-36
5.6.2	Randbedingungen der Simulation	5-37
5.6.3	Geometrie des Simulationsmodells	5-37
5.7	Literaturverzeichnis Kapitel 5	5-38
6	OFFENE FRAGEN & SCHLUSSFOLGERUNGEN	6-1
7	ANHANG 1: BERECHNUNGSDATEIEN – NUMERISCHE SIMULATION	7-1
7.1	Berechnungsdatei	7-1
7.2	Materialparameter	7-1
7.3	Randbedingungen	7-1

1 Einleitung

Der Abbau unregelmäßiger linsenförmiger Lagerstättenkörper stellt eine besondere technische und gebirgsmechanische Herausforderung dar. Dies gilt insbesondere für alpine Lagerstätten. Im Rahmen eines Arbeitsabkommens zwischen der Rohstoffabteilung der RHI AG und dem Lehrstuhl für Bergbaukunde an der Montanuniversität wurde die Frage der Entwicklung neuer bzw. Verbesserung bestehender Abbaufahren für einige der Bergbaubetriebe der RHI AG untersucht. Ziel dieser Arbeiten war die Verbesserung der Sicherheit der Abbautätigkeiten, die Erhöhung des Lagerstättenausbringens und die gebirgsmechanische Planung der Abbautätigkeiten. Im Rahmen dieser Aktivitäten ergab sich die Notwendigkeit, sich näher mit den gebirgsmechanischen Grundlagen des sogenannten „Post Pillar“ Abbaufahrens, welches in den oberen Abbaurevieren des Magnesitbergbaus Breitenau zur Anwendung kommt, auseinanderzusetzen. Bei diesem Abbaufahren wird der mächtige mit etwa 25° einfallende linsenförmige Lagerstättenkörper im Fußbereich mit einem Kammerfestenbau aufgeschlossen. In weiterer Folge werden die Kammern durch Firstverhieb scheibenweise hochgezogen und mit Sturzversatz verfüllt. Aufgabe des Versatzes ist einerseits eine Arbeitsplattform für die Gewinnungstätigkeiten zu bilden und andererseits die schlanken Bergfesten zu stützen. Je nach Lagerstättenkörper werden auf diese Weise 15 bis 30 etwa 3,5 m hohe Abbauscheiben hereingewonnen. In der Endphase erreichen die im Versatz stehenden Bergfesten Höhen von 50m bis weit über 100 m. Dieses Abbaufahren, welches in der Fachliteratur unter dem Namen „Post Pillar“ Abbaufahren bekannt ist, hat sich über viele Jahre entwickelt und als recht erfolgreich erwiesen.

Das Fehlen gesicherter gebirgsmechanischer Grundlagen für dieses Abbaufahren hat sich als nachteilig für den Einsatz des Verfahrens in größeren Lagerstättenteufen erwiesen, da weder das mechanische Verhalten der schlanken im Versatz stehenden Bergfesten noch deren Belastung einigermaßen zuverlässig bestimmt werden können. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die traditionellen Verfahren der gebirgsmechanischen Planung von Kammer-Festen-Abbaufahren wie die Formeln zur Bestimmung der Festigkeit der Bergfesten oder die Bestimmung der Belastung der Bergfesten auf der Basis der Theorie der zugeordneten Flächen beim „Post Pillar“-Abbaufahren angewendet werden können.

Eine Besonderheit des „Post Pillar“ Abbaufahrens ist die sich als Folge des Abbaus ständig verändernde Geometrie des Abbaubereiches. Dies gilt sowohl in lateraler wie auch in vertikaler Richtung. In dieser Hinsicht unterscheidet sich das Verfahren deutlich von vielen anderen Abbaufahren, wo sich die Geometrie entweder in lateraler oder in vertikaler Richtung verändert, jedoch nicht gleichzeitig in beiden Richtungen. Eng verbunden mit der geometrischen Veränderung des Abbaubereiches sind die geänderten Spannungsverhältnisse im Gebirge und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Bergfesten.

Die komplexen, geometrischen und mechanischen Zusammenhänge verbundenen mit der sich kontinuierlich ändernden Abbaugeometrie haben eine ingenieurmäßige gebirgsmechanische Planung, wie dies heute beim Örterbau in der Kohle üblich ist, verhindert. Die Entwicklung leistungsfähiger Computer inkl. Hard- und Software hat die Situation verbessert und macht es nunmehr möglich die gebirgsmechanischen Grundlagen des „Post Pillar“ Abbauverfahrens näher zu untersuchen und die Basis für eine ingenieurmäßige Planung derartiger Abbausysteme zu schaffen.

Im Rahmen dieser Dissertation soll aufbauend auf einer Auswertung der relevanten Literatur und den im Magnesitbergbau Breitenau gewonnenen praktischen Erfahrungen ein zusammenhängendes gebirgsmechanisches Modell des „Post Pillar“ Abbauverfahrens zu entwickeln, wobei insbesondere die Fragen der Festigkeit der schlanken im Versatz stehenden Bergfesten und deren mechanisches Verhalten sowie deren Belastung im Vordergrund stehen. Besonderes Augenmerk soll auf den Einfluss der Geometrie des Abbaufeldes auf die Festenbelastung und die Stabilität des Gesamtsystems gelegt werden.

Ziel der Arbeit soll es sein, die gewonnenen Einblicke und Erkenntnisse in einer Weise darzustellen, dass diese bei der Planung und der Anwendung von „Post-Pillar“ Abbauverfahren nutzbringend angewendet werden können, um auf diese Weise einen Beitrag zur Sicherheit und Nachhaltigkeit beim Abbau unregelmäßiger linsenförmiger Lagerstättenkörper zu leisten und die ingenieurmäßigen Grundlagen dieses für den alpinen Bergbau wichtigen Abbauverfahrens zu erweitern.

2 Zusammenfassung

Das „Post Pillar“ Abbauverfahren ist eine Abbaumethode, welche vor allem in flach bis mittelsteil gelagerten Lagerstätten mit begrenzter Ausdehnung und hohen Freiheitsgraden bezüglich der Anpassung an die Lagerstätte, sowohl vertikal als auch lateral, zur Anwendung kommt.

Da das Abbausystem insgesamt flexibel ist und der Abbau unter Einsatz von Versatz von unten nach oben geführt wird, geht der Abbau nicht nur in die Breite sondern auch in die Höhe, d.h. es kommt zur Ausbildung einer komplexen Abbaugeometrie. Der Abbau in die Breite, dies geschieht hauptsächlich beim Abbau der ersten Scheiben, bewirkt die Ausbildung eines Spannungsgewölbes und somit Festenbelastungen, welche von der Breite des Baufeldes abhängen. Der folgende Abbau in die Höhe bewirkt ein Schlankerwerden der im Versatz eingebetteten Bergfesten. Diese Veränderung der Geometrie des Abbaus führt dazu, dass die Festen immer höher, d.h. schlanker und somit weicher werden. In einem verformungskontrollierten Belastungssystem, wie dem „Post Pillar“ Abbauverfahren bedeutet dies, dass die Festenbelastung mit zunehmender Abbauhöhe abnimmt.

Der Abbau in die Höhe bewirkt nicht nur das Schlankerwerden der Bergfesten, sondern auch einen Einfluss von der Geometrie des Abbaufeldes. Das Abbaufeld verwandelt sich in seinem Erscheinungsbild von einem liegenden Rechteck nach dem Abbau der ersten Abbauscheiben zu einem stehenden Rechteck am Ende des Abbaus. Dieses stehende Rechteck kann bei genügend großen Horizontalspannungen im Gebirge regelrecht „ausgequetscht“ werden und entlastet damit zusätzlich die Bergfesten. Es konnte klar dargestellt werden, dass die „Theorie der zugeordneten Flächen“ für das „Post Pillar“ Abbauverfahren nicht angewendet werden kann.

Mit Hilfe der Hypothese nach Winkler kann sowohl der Einfluss der Breite des Baufeldes auf die Belastung der Bergfesten als auch der Einfluss der Abbauhöhe (Höhe der Bergfesten) auf die Belastungssituation ohne aufwändige numerische Simulation auf einfache Weise bestimmt werden.

Die Festigkeit der im Versatz eingebetteten Bergfesten ist weitgehend unbekannt. Einerseits liegen die schlanken Festen außerhalb der gesicherten Erfahrungsbereiche klassischer Örterbausituationen im Hartgestein mit einem B/H Verhältnis von zumindest $B/H > 0,5$ und andererseits ist der Einfluss geologischer Diskontinuitäten bei dieser Festenhöhe noch nicht im Detail untersucht worden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Versatz einen größeren Einfluss auf seine Umgebung nimmt als bisher angenommen. Durch seine flächenhafte Wirkung ergeben schon kleine Druckfestigkeiten große Reaktionswiderstände. Die Interaktion zwischen der Bergfeste und dem Versatzkörper konnte in Form von Spannungsverläufen und Konvergenzverteilungen mittels der numerischen Simulation dargestellt werden.

Als eine der wichtigsten Erkenntnisse stellte sich die Frage der Stabilität des Gesamtsystems „Post Pillar“ Abbaufahren heraus. Im Zuge der Diskussion rund um die Thematik zeigt sich die Baufeldbreite als ein Schlüsselparameter für eine erfolgreiche Anwendung des Abbaufahrens. Die Baufeldbreite bestimmt zum einen die Belastung der Bergfesten und zum anderen das Stabilitätsverhalten. Breitere Abbaufelder ergeben größere Festenbelastungen aber auch eine insgesamt instabilere Gesamtsituation. Andererseits wird die Abbaugeometrie mit zunehmender Höhe des Abbaubereiches steifer.

Neben der durch die Abbaukonvergenz verursachten verformungskontrollierten Belastung der Bergfesten muss bei breiten und hohen Abbaugeometrien die Möglichkeit zusätzlicher Festenbelastung durch die Totlast, der sich im Firstbereich des Abbaus auftretenden Auflockerungszone, berücksichtigt werden. Die dadurch verursachte Zusatzlast nimmt mit dem Quadrat der Baufeldbreite zu. Im Endstadium eines sehr hohen „Post Pillar“ Abbaubereiches kann es zur Ausbildung von ausgeprägten Scherzonen oberhalb des Abbaus und damit zu einer zusätzlichen Festenbelastung kommen. Die damit verbundene Sicherheitsproblematik ist vor allem bei der plötzlichen Erweiterung der Breite des Abbaufeldes durch den Abbau von Sicherheitsfesten, vor allem in der Endphase des Abbaus, zu berücksichtigen.

Somit bestätigt sich die am Beginn der Zusammenfassung getätigte Aussage „geeignet für Lagerstätten mit begrenzter Ausdehnung“ am Ende der Bearbeitung der Thematik als Schlüsselaussage. Das Abbaufahren ist gerade deswegen so erfolgreich, weil die maßgebenden Baufeldbreiten in allen Beispielen aus der Literatur eher klein gehalten wurden und der Stabilitätsnachteil der sehr schlanken Bergfesten, durch die vielleicht bisher unterschätzte Wirkung des Versatzes und das durch die begrenzte Baufeldgröße bedingte „steife“ und somit stabile Verhalten des Belastungssystems.

3 Das „Post Pillar“ Abbauverfahren

Das „Post Pillar“ Abbauverfahren kommt vor allem beim Abbau räumlich begrenzter, unregelmäßiger dreidimensionaler Lagerstättenkörper zur Anwendung. Es verbindet den klassischen Örterbau mit einem Abbau mit Versatz. Die Lagerstätte wird von unten nach oben, unter ständigem Nachführen des Versatzes, scheibenweise abgebaut. Die Bergfesten werden im Versatz zurückgelassen und unterstützen das unmittelbare Hangende. Auf Grund des scheibenweisen Abbaus besitzt das Abbauverfahren einen hohen Freiheitsgrad beim Abbau sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung. Insbesondere bei unregelmäßigen Lagerstätten kann auf jeder Höhe bis zur Grenze der Lagerstätte abgebaut und damit das Ausbringen erhöht werden. Daher bietet es sich vor allem für massige, mittelsteil bis steil gelagerte Lagerstätten an.

Durch die Verwendung von Bergversatz als integralen Bestandteil des Abbauverfahrens ist man in der Lage, die Vorteile des Örterbaus, wie z.B. hoher Mechanisierungsgrad und eine große Anzahl an Betriebspunkten und damit verbunden die Möglichkeit der Qualitätssteuerung, mit den Vorteilen eines Abbauverfahrens mit Versatz, wie hohes Ausbringen und Unterstützung der Bergfesten, zu kombinieren.

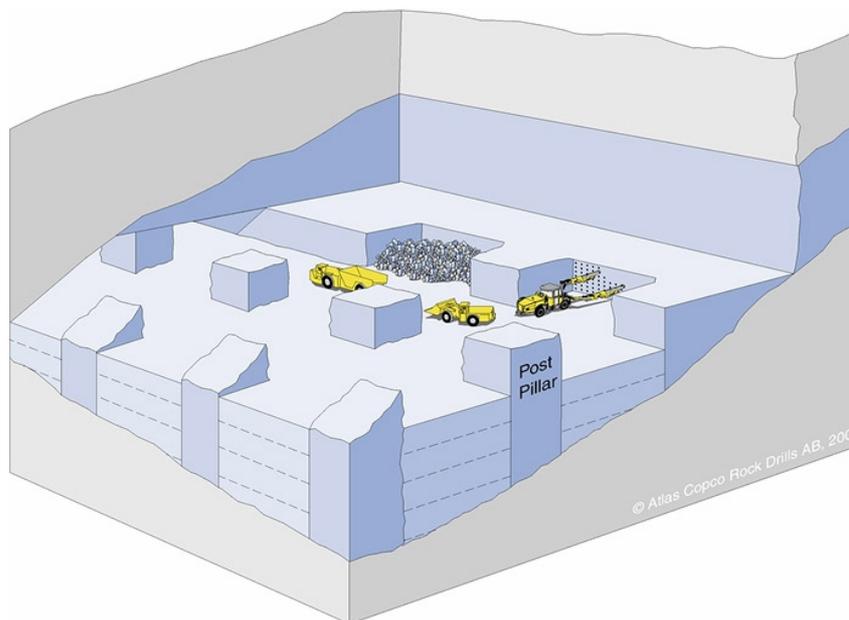


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Post Pillar Abbauverfahrens (Mining methods in underground mining, 2007)¹.

¹ Das Literaturverzeichnis für das Kapitel 3 befindet sich in Kap. 3.5 auf der S.3-20.

Der eingebrachte Versatz stützt zum Einen die Bergfesten und bewirkt somit eine Erhöhung der Tragfähigkeit und Stabilisierung der hohen schlanken Festen und zum Anderen wird die jeweils letzte Versatzscheibe als Arbeitsfläche für das Hereingewinnen der nächsten Abbauscheibe genutzt.

Weiterhin wird durch den Versatz gewährleistet, dass die Auswirkungen des Lagerstättenabbaus auf das Nebengebirge und die Tagesoberfläche gering gehalten werden. Dies ist insbesondere im Falle von wasserführenden Gebirgsformationen von Bedeutung; wie dies zum Beispiel im Magnesitbergbau Breitenau der RHI der Fall ist.

Ausgehend vom Liegendkontakt der Lagerstätte wird die gesamte Lagerstätte mit einem regelmäßigen System aus Örtern und Bergfesten unterfahren.

Die Höhe dieser Unterfahrung richtet sich nach dem vorhandenen Maschinenpark und liegt im Regelfall zwischen ca. 3,5m und 7m ².

In einem nächsten Schritt wird nun die ca. 7m hohe Abbauscheibe auf eine Höhe von ca. 3,5m mit Sturz-, Spül- oder Pumpversatz wieder versetzt. Die auf diese Weise geschaffene Versatzfläche dient in weiterer Folge als Arbeitsfläche für das Hereingewinnen der nächsten Abbauscheibe.

Unter ständigem Nachführen des Versatzes wandert die Abbaufont von unten nach oben. Der Zugang zur Abbauscheibe erfolgt, bedingt durch den Einsatz von gleislosen Förder- und Gewinnungsmaschinen, in den meisten Fällen über eine Wendel. Die Versatzwirtschaft und die Wetterführung werden über Sturzschächte und über im Versatz mitgezogene Schächte bewerkstelligt. Die Abförderung des gewonnenen Materials wird in der Regel mit gleislosen Fördermitteln über das Wendelsystem durchgeführt.

² Die angeführten Geometrien stellen die Abbaumächtigkeiten im untertägigen Magnesitbergbau Breitenau dar.

3.1 Beispiele aus der Praxis

Das „Post Pillar“ Abbauverfahren hat sich graduell entwickelt, die gebirgsmechanischen Grundlagen des Verfahrens sind weitgehend ungeklärt, dies gilt insbesondere für die Frage der Standfestigkeit und des Verhaltens der sehr schlanken im Versatz stehenden Abbaufesten und der Frage der Baufeldgrößen. Als Folge haben viele der Bergbauunternehmen, die dieses Verfahren anwenden, umfangreiche Untersuchungsprogramme eingerichtet um diese Fragen näher zu klären.

In der fach einschlägigen Literatur sind vor allem vier Bergwerke im Zusammenhang mit dem Post Pillar Abbauverfahren beschrieben worden.

Die Strathcona Mine der Falconbridge Nickel Mines Ltd., der Dolphin Ore Body der Firma King Island Scheelite, die Rajpura Dariba Mine der Hindustan Zink Ltd. und der untertägige Magnesitbergbau in der Breitenau der RHI AG.

Es hat sich gezeigt, dass vor allem zwischen 1975 und 1985 eine große Anzahl an Publikationen über das „Post Pillar“ Abbauverfahren veröffentlicht worden sind. Nach dieser Zeitspanne lassen sich, bis auf den Magnesitbergbau Breitenau, nur sehr wenige bis gar keine aussagekräftigen Veröffentlichungen mehr finden.

Die veröffentlichten Beschreibungen der einzelnen Abbaue in der Praxis zeigen, dass vor allem bei der Entwicklung des „Post Pillar Abbauverfahrens“ in einem Betrieb ein sehr umfangreiches Mess- und Analyseprogramm den eigentlichen Abbau begleitet.

Die Verbindung dieser Einzelbeobachtungen der angesprochenen Betriebe zu einer umfassenden Sicht der Dinge konnte nicht gefunden werden. Das kann unter Umständen damit begründet werden, dass das Abbauverfahren zu keiner Zeit sehr verbreitet war und es dadurch nie zur Entwicklung eines ingenieurmäßigen Standards bei der Auslegung, wie z.B. beim Örterbau in der Kohle, gekommen ist.

3.1.1 Strathcona Mine - Falconbridge Nickel Mines Limited

In der Strathcona Mine der Falconbridge Nickel Mines Limited wird eine 40m bis 60m mächtige Lagerstätte mit einem Einfallen von ca. 50° in einer Teufe von ca. 700m mit dem „Post Pillar“ Abbauverfahren abgebaut.

Die Beschreibung des „Post – Pillar“ Abbauverfahrens von (Cleland & Singh, 1973) ist besonders wegen seiner ausführlichen Behandlung der damals angestellten gebirgsmechanischen Überlegungen interessant. Zum ersten Mal sind Überlegungen über die Standfestigkeit der Bergfesten innerhalb eines „Post – Pillar“ Abbaureviers und die gebirgsmechanischen Zusammenhänge angestellt worden.

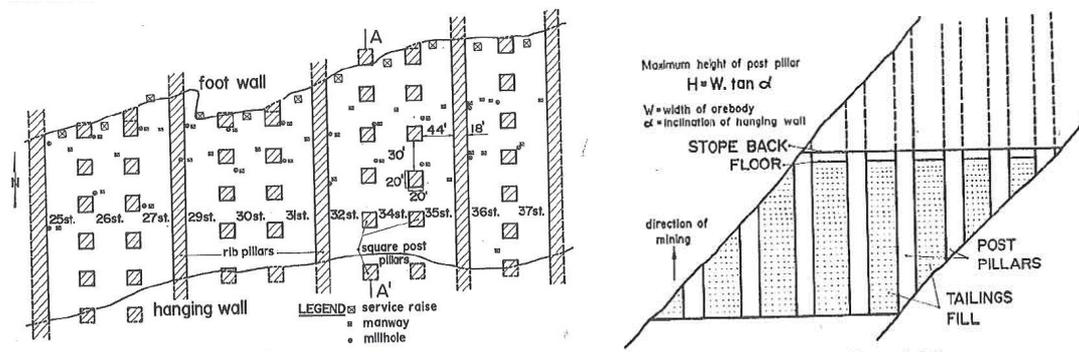


Abbildung 3-2: Zuschnitt des geplanten „Post Pillar“ Abbauverfahrens in der Strathcona Mine (Cleland & Singh, 1973).

Am Beginn des Abbaus sind die eigentlichen „Post Pillar“ Abbaubteilungen mit einer Breite von ca. 50m durch Streifenfesten mit einer Breite von 5,4m getrennt worden (siehe auch Abbildung 3-2 linke Abbildung). Ab der Hälfte der geplanten Endhöhe des Abbaufeldes ist das Zurücklassen dieser Streifenfeste aufgegeben worden (siehe Abbildung 3-4 S.3-5). Die Breite der Bergfesten beträgt 6m und die Örterbreite ca. 9m.

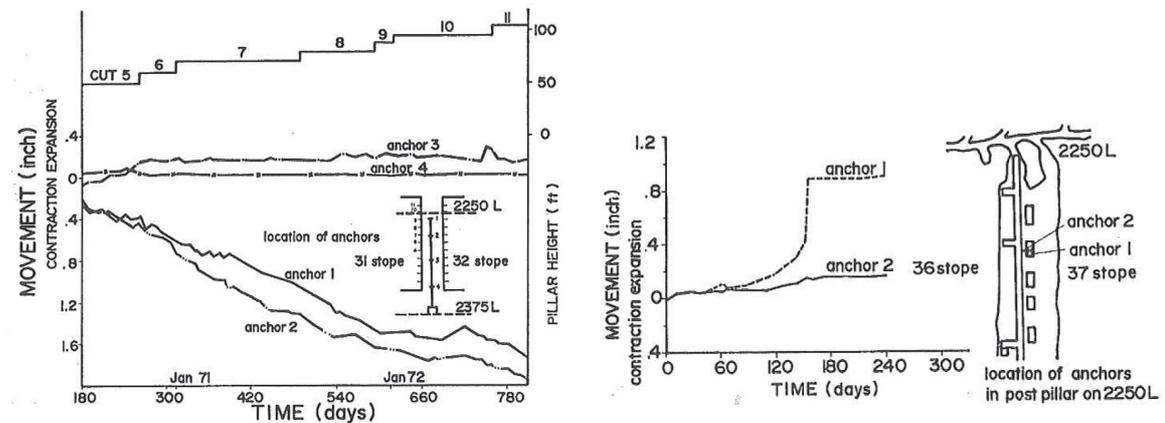


Abbildung 3-3: Ergebnisse verschiedener Konvergenzmessungen an speziellen Bergfesten im Abbaubereich.

Cleland & Sing berichten auch von umfangreichen Konvergenzmessungen während des Abbaus der Abbauscheiben 5-10. Nach dem Abbau der zehnten Abbauscheibe ergeben sich ca. 30m hohe, versetzte Bergfesten innerhalb des Abbaureviers.

Bharti (Bharti, 1983) berichtet dann in weiterer Folge von ersten Problemen bei der Durchführung des „Post Pillar“ Abbauverfahrens. Im Bereich des oberen Endes der Lagerstätte, in Richtung des Hangenden am Level 2250, ist die Anwendung des Verfahrens auf Grund der sehr hohen Steinfallgefahr sicherheitstechnisch als nicht mehr vertretbar eingestuft worden. Es wird vorgeschlagen, dass im Anschluss an das "Post Pillar" Abbauverfahren ein kammerartiges Abbauverfahren aufgesetzt wird. Hierbei soll die oberste, noch nicht versetzte "Post Pillar" Abbauscheibe, als Fußstreckenniveau des kammerartigen Abbaus dienen. Siehe auch Abbildung 3-4 auf S.3-5.

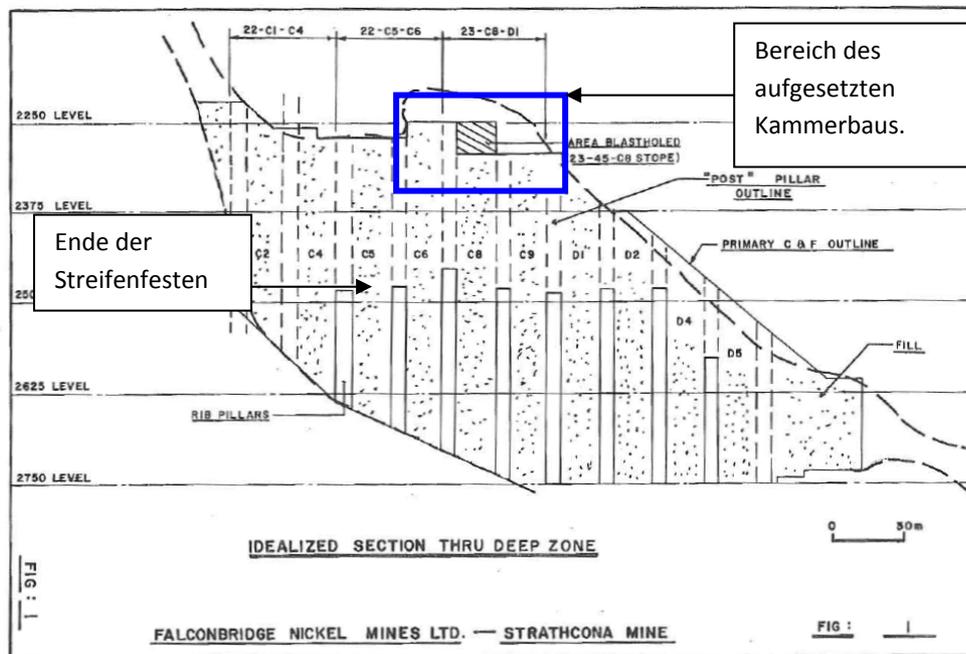


Abbildung 3-4: Schnitt durch das "Post Pillar" Abbaufeld im Jahre 1983 (Bharti, 1983).

3.1.2 Dolphin Ore Body - King Island Scheelite

Der „Dolphin Ore Body“ befindet sich auf der „King Island“ zwischen Australien und Tasmanien. Der Scheeliterzkörper liegt unmittelbar an der Küste und fällt mit 30° Richtung Osten unter das Meer ein. Der Erzkörper hat in Streichrichtung eine Erstreckung von ca. 450m und in Richtung des Einfallens eine zum damaligen Zeitpunkt explorierte Länge von ca. 350m. Die vertikale Mächtigkeit des Erzkörpers beträgt im Mittel 50m.

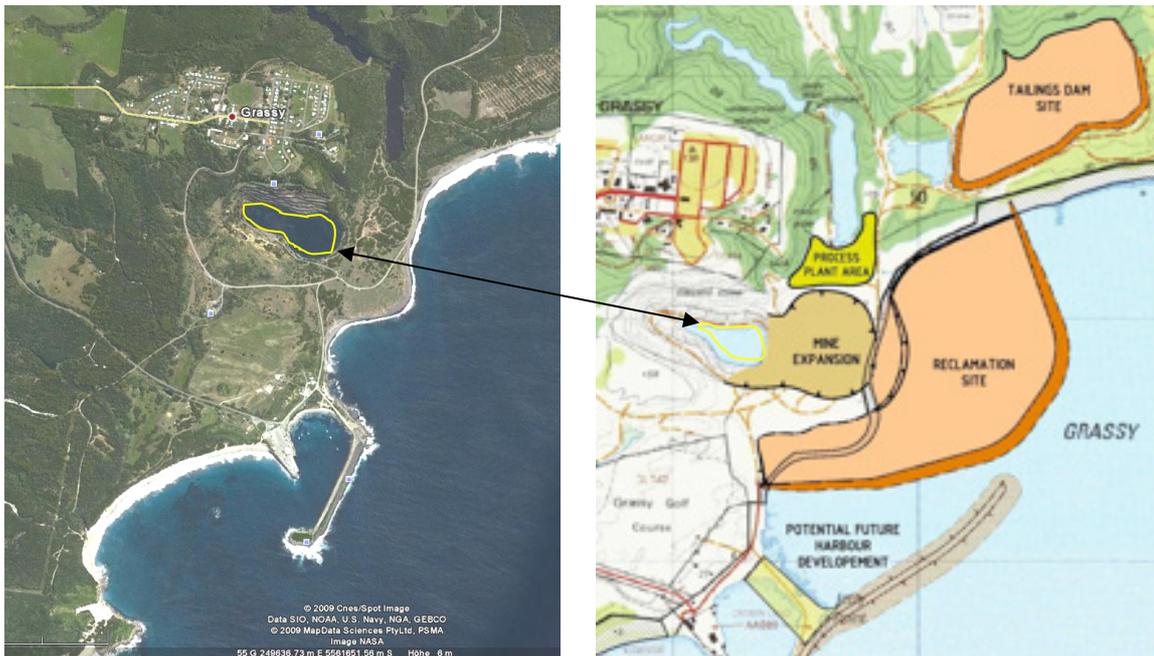


Abbildung 3-5: Lage des Dolphin Ore Bodys an der Südostküste der Insel „King Island“.

Auf der linken Seite der Abbildung 3-5 ist der geflutete Bereich der ehemaligen Tagebauoperation zu sehen. Auf der rechten Abbildung sind Pläne zur Wiedergewältigung und zum Ausbau der ehemaligen Abbaubereiche im Tagebau ersichtlich.

Entdeckt wurde die Lagerstätte im Jahre 1911 von einem gewissen Herrn Tom Farrell (King Island Scheelite 1967). In der Meinung Zinnstein am Strand gefunden zu haben, konnte er erst im Labor den richtigen Befund erstellen. Er hatte tatsächlich Scheelit in unmittelbarer Nähe des Tagebaus exploriert.

1917 ist die Produktion gestartet worden, musste aber 1920 aufgrund der niedrigen Weltmarktpreise wieder eingestellt werden. Erst 1937 ist die Produktion im Tagebau wieder aufgenommen worden.

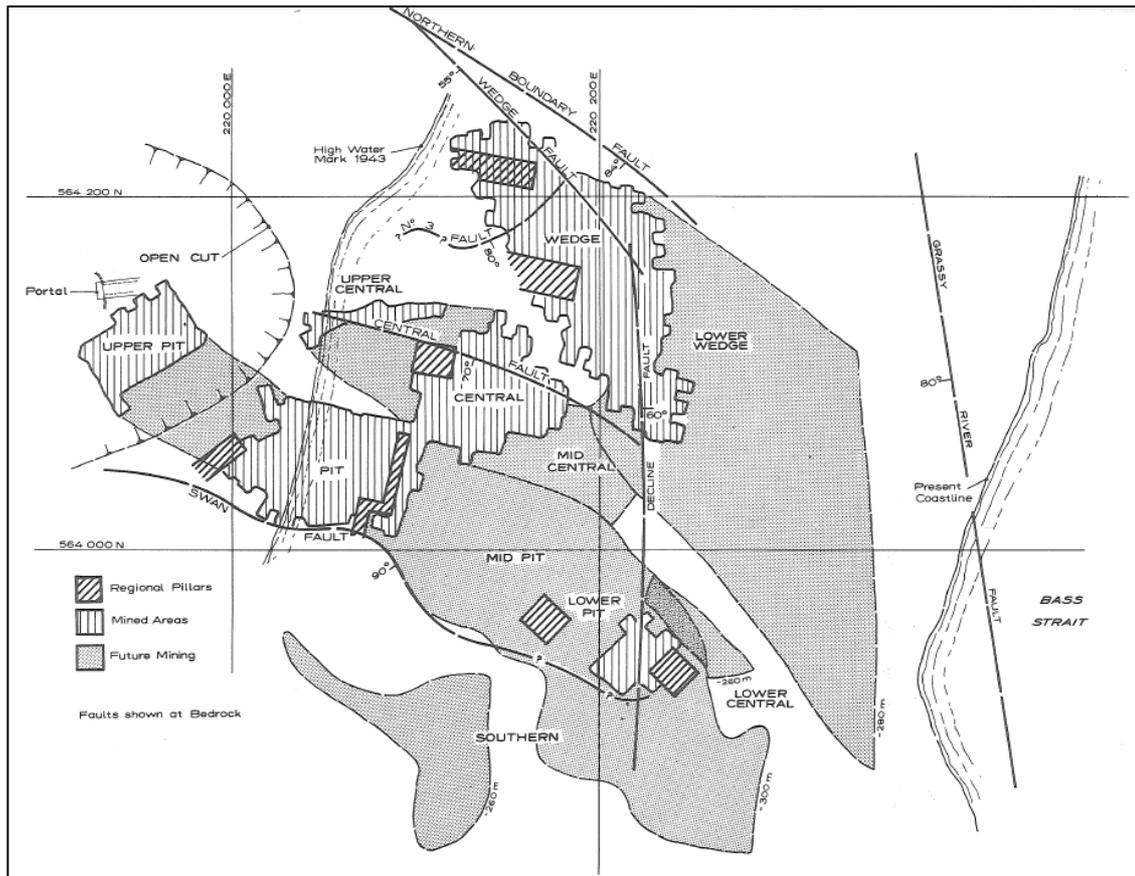


Abbildung 3-6: Übersicht über die Abbaubereiche unter Tage und die dokumentierten Großstörungssysteme (Barret & Chester, 1981).

In Abbildung 3-6 wird eine Übersicht gegeben über den Tagebau, die untertägig abgebauten Bereiche, die ausgewiesenen Hoffungsgebiete, die Großstörungssysteme sowie die Küstenlinie. Die in Abbildung 3-6 vertikal schraffierten Bereiche stellen die bereits abgebauten „Post Pillar“ Bereiche dar. Die diagonal schraffiert eingetragenen Bereiche stellen Restfesten im Abbaubereich dar und die grau flächig eingetragenen Bereiche sollen die damaligen Hoffungsgebiete, die zukünftigen Abbaubereiche darstellen.

Der Aufschluss der untertägigen Abbaubereiche erfolgte über ein Wendelsystem vom Tagebau aus. Zwischen 1975 und 1990 wurde der Erzkörper mit Hilfe des „Post Pillar“ Abbauverfahrens untertägig abgebaut.

Die Breite der quadratischen Bergfesten beträgt 6m und die Breite der Örter 8m. Der Zentralabstand der Festen ergibt sich nun aus der Breite der Bergfesten und Örter mit 14m. Ohne Berücksichtigung der regionalen Barrierefesten ist ein Ausbringen von ca. 82% erreicht worden. Die Bergfesten erreichten am Ende des Abbaus Höhen von bis zu 35m und die maximale Breite des Abbaufeldes betrug ca. 100m. Als Versatz sind die Abgänge der Aufbereitung als hydraulischer Versatz eingebracht worden.

Bereits zu Beginn des untertägigen Abbaus sind umfangreiche geotechnische Untersuchungen durchgeführt worden. Zum Einen ist der Versuch gestartet worden, den primären Spannungszustand zu bestimmen, zum Anderen sind zwei durch das „Post Pillar“ Abbauverfahren entstandene Bergfesten instrumentiert worden. Es sind sowohl die Spannungsänderungen als auch die Konvergenzen innerhalb der Feste als auch im unmittelbaren Liegendem und Hangendem der instrumentierten Bergfesten aufgezeichnet worden. Diese Messwerte sind dann in weiterer Folge den jeweiligen Abbauständen gegenübergestellt und analysiert worden.

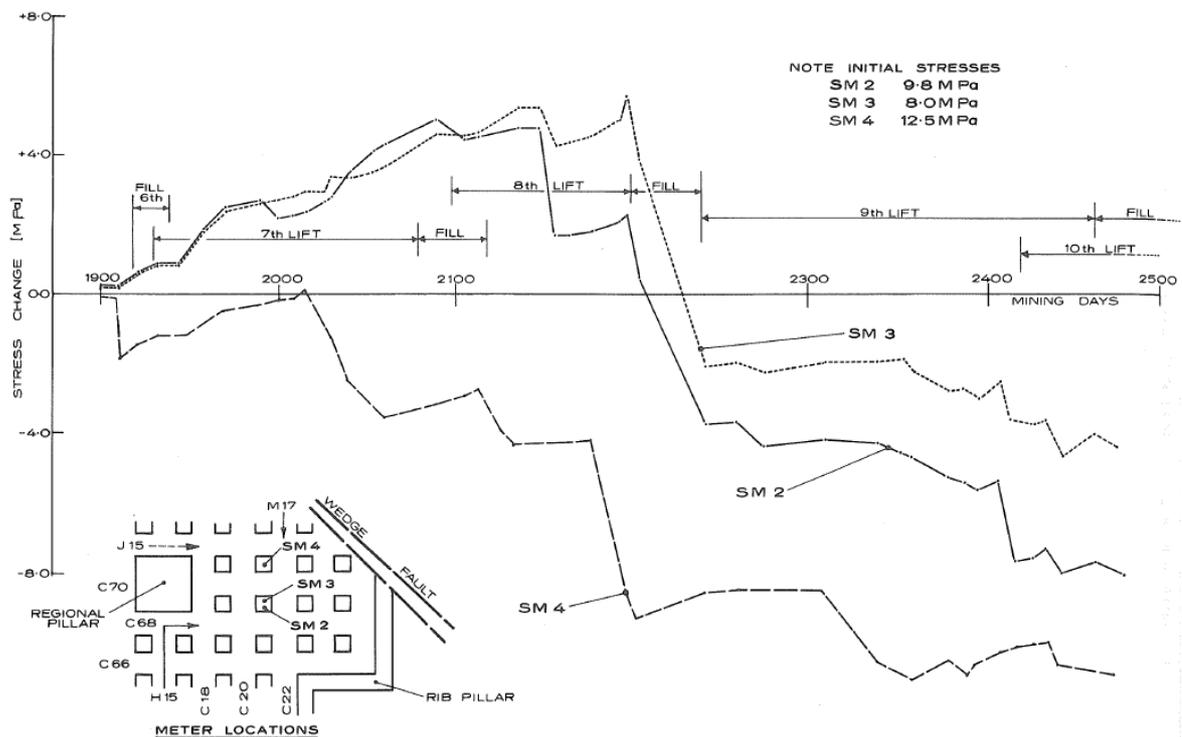


Abbildung 3-7: Messergebnisse dreier Spannungsmessungen in Bergfesten (Barret, 1981).

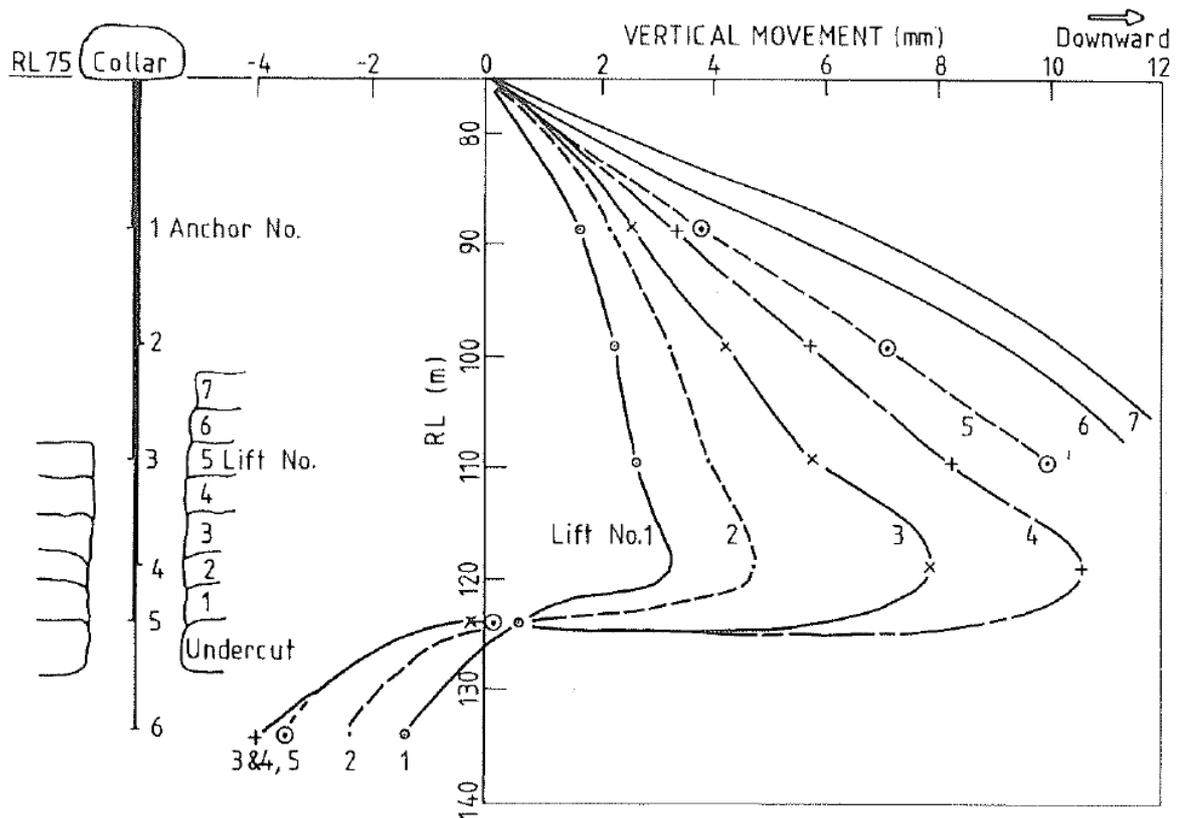


Abbildung 3-8: Messergebnisse eines Mehrfachextensometers innerhalb einer Bergfeste im „Post Pillar“ Abbaurevier (Barret, 1981).

Diese Ergebnisse spielen in weiterer Folge eine sehr wichtige Rolle bei der Diskussion des gebirgsmechanischen Modells und der Interpretation der Ergebnisse der numerischen Simulationen.

3.1.3 Rajpura Dariba Mine – Hindustan Zink Limited

In der Rajpura Dariba Mine der Hindustan Zink Limited wird ein Erzkörper mit einer söhligigen Mächtigkeit von 70m, einem Einfallen zwischen 60° und 70° und einer Erstreckung im Streichen von ca. 500m abgebaut. Die durchschnittliche Überlagerung in diesem Abbaubereich liegt zwischen 115m und 215m.

Dutta et. al. haben 1988 über die Planung und die Auslegung eines "Post Pillar" Abbauverfahrens in dem Bergwerk berichtet (Dutta 1988). Es handelt sich dabei um die Rajpura Dariba Mine der Hindustan Zink Limited, in welcher hauptsächlich Blei und Zink abgebaut wird.

Nachdem in einem ersten Versuchsabbau mit quadratischen "Post Pillar" Festen, mit einer Breite von 6m und einem Zentralabstand der Festen von 20m, über einen Zeitraum von zwei Jahren, keine geotechnischen Probleme aufgetreten sind, hat man sich zur Überarbeitung des ursprünglichen Konzeptes entschlossen. Ab diesem Zeitpunkt ist die Breite der quadratischen "Post - Pillar" Festen auf 5m reduziert worden. Die Örtbreite in Richtung des Einfallens der Lagerstätte ist auf 12m und in Richtung des Streichens auf 15m festgelegt worden. Jede Abbauabteilung (eine Festenreihe normal zum Streichen) ist in streichender Richtung durch eine 5m breite Streifenfeste von der nächsten Abteilung getrennt worden.

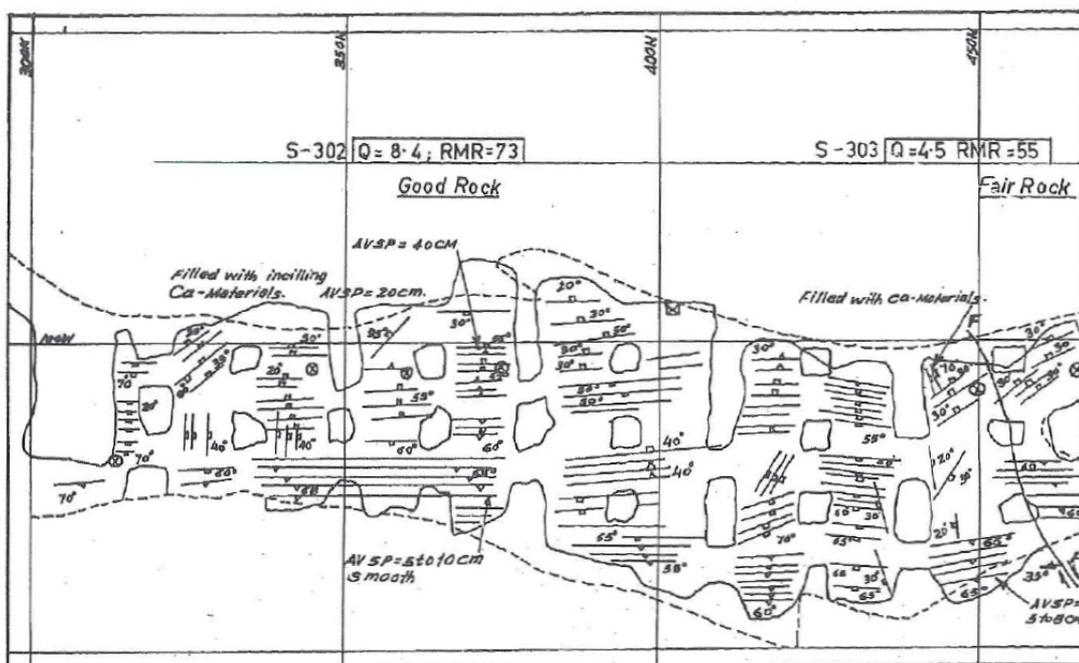


Abbildung 3-9: Grundrissliche Darstellung der geologischen Kartierung der Abbausohle 300 (Dutta, 1988).

Im Unterschied zu den bisher beschriebenen Abbauen, ist in der Rajpura Dariba Mine auch eine Schweben innerhalb des Abbaufeldes geplant worden.

Dieser Umstand muss in weiterer Folge bei den gebirgsmechanischen Überlegungen und der Interpretation der Messergebnisse berücksichtigt werden.

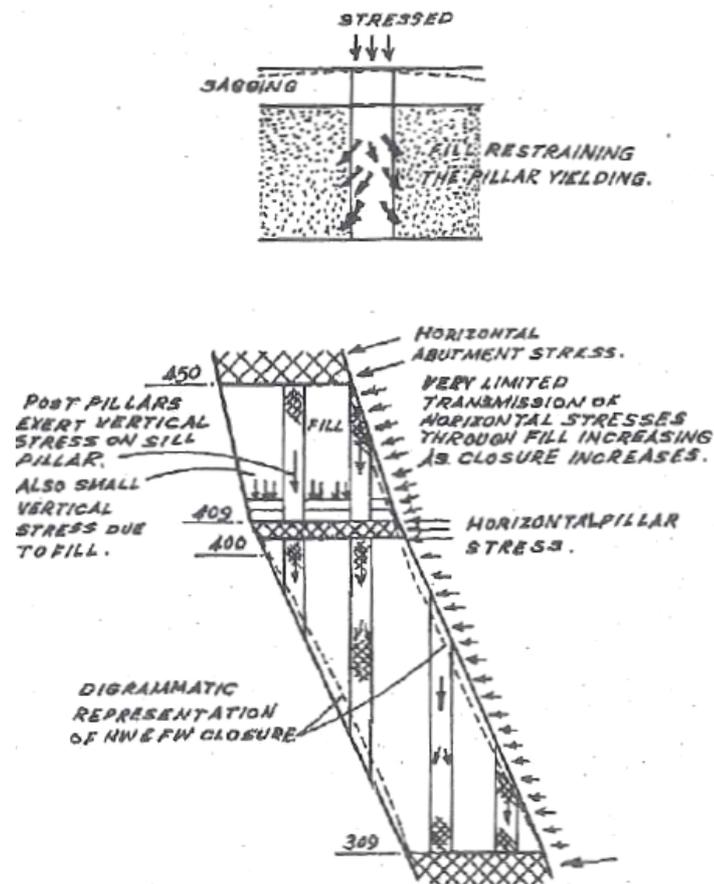


Abbildung 3-10: Darstellung der geplanten Schweben auf Höhe des Abbaulevels 400. Dargestellt ist außerdem der angenommene Spannungsverlauf innerhalb und in unmittelbarer Umgebung des Abbaubereiches (Dutta, 1988).

Innerhalb eines Jahres sind umfangreiche In-Situ Messungen im Abbaubereich durchgeführt worden. Spannungen sind sowohl im Versatzkörper als auch in den "Post - Pillar" Festen, Konvergenzen innerhalb der Bergfesten und vor allem in Richtung des Hangenden gemessen worden.

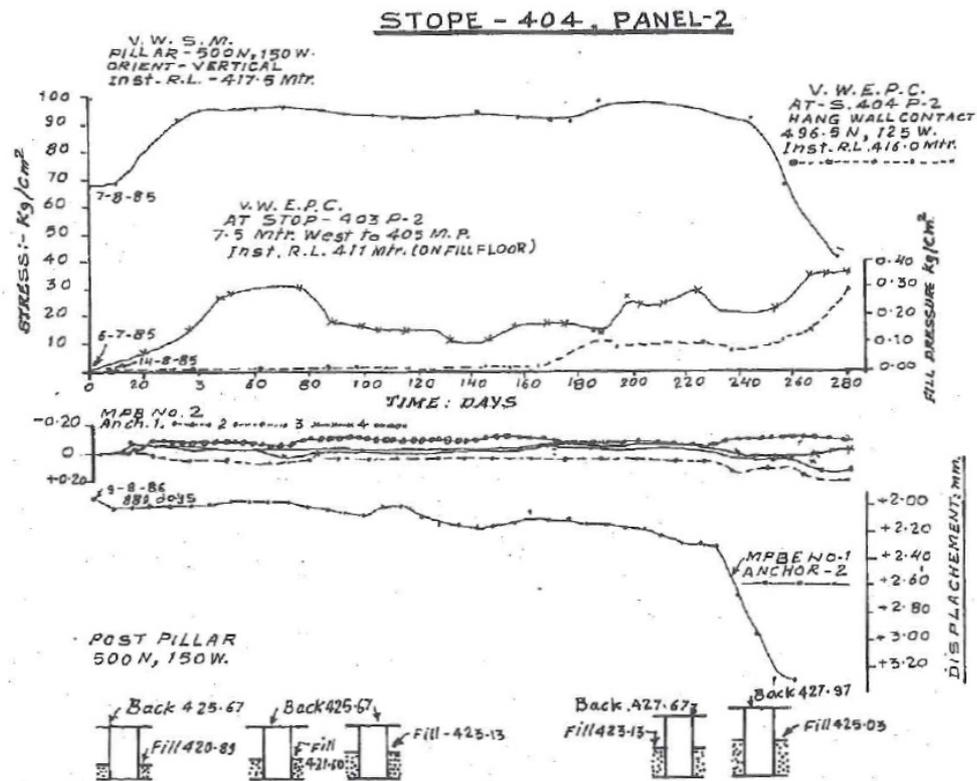


Abbildung 3-11: Darstellung eines Teiles der Ergebnisse der durchgeführten Messungen (Dutta, 1988).

3.1.4 Magnesitbergbau Breitenau – RHI AG

Die Magnesitlagerstätte der RHI AG am Standort Breitenau ist im Jahre 1867 erstmals aufgenommen worden. 1906 startete der Abbau von Magnesit im Tagebau und in den 40er Jahren begannen die ersten Versuche, den Magnesit auch untertägig zu gewinnen (RHI AG).

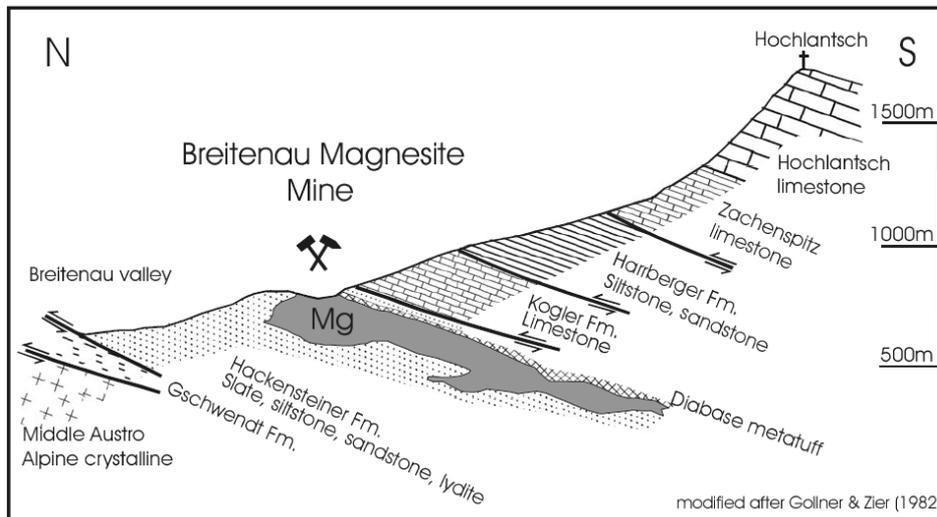


Abbildung 3-12: Geologischer Schnitt durch die Magnesitlagerstätte des Bergbaus Breitenau.

Die Lagerstätte weist ein Einfallen zwischen 20° und 25° und eine Mächtigkeit zwischen 50m und 200m auf. Die Lagerstätte ist durch Großstörungen sowohl im Einfallen als auch in Richtung des Streichens gestört. Durch diese regionale Zerlegung ergeben sich Streicherstreckungen des Lagerstättenkörpers von bis zu 500m. In Richtung des Einfallens ist die Lagerstätte auf eine Länge von ca. 2km nachgewiesen.

Die Überlagerung beträgt in den oberen Revieren, wo auch das "Post Pillar" Abbauverfahren angewendet wird, ca. 400m bis 500m und in den unteren Revieren bis zu 800m.

Die große Überlagerung ergibt sich auf Grund der Tatsache, dass der Lagerstättenkörper gegenläufig zur Topografie nach Süden einfällt, siehe Abbildung 3-12.

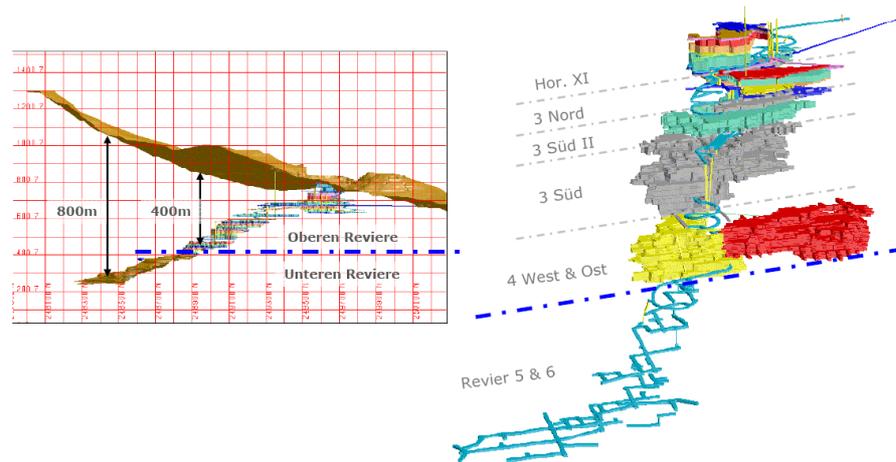


Abbildung 3-13: Darstellung und Benennung der einzelnen Reviere im Magnesitbergbau Breitenau.

Das "Post Pillar" Abbauverfahren findet in der Lagerstätte Breitenau vor allem in den oberen Revieren (Rev. 3Süd bis Rev. 5Nord) seine Anwendung.

Der Zuschnitt des "Post Pillar" Abbauverfahrens in diesen Bereichen stellt sich wie folgt dar:

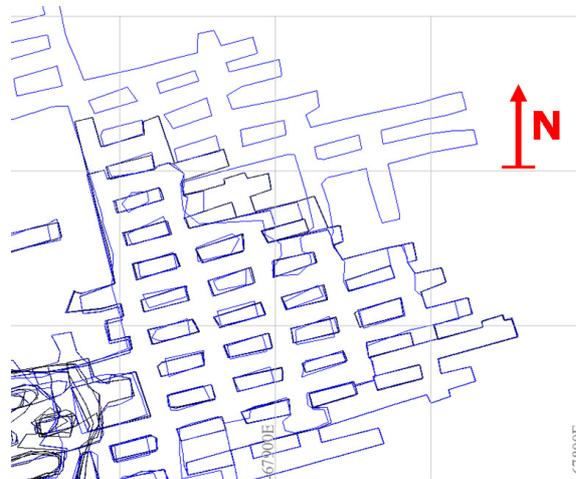


Abbildung 3-14: Auszug einer grundrisslichen Darstellung dreier Abbauscheiben im Revier 3Süd des Magnesitbergbaus Breitenau.

Die "Post Pillar" Festen besitzen eine Breite von 5m und eine Länge von 15m. Zusammen mit einer Örterbreite von 6m ergeben sich, abhängig von der Betrachtungsrichtung, zwei verschiedene Zentralabstände für die Bergfesten. In Richtung des Streichens der Lagerstätte, dies entspricht der Richtung der Längsseite der Festen, ergibt sich ein Zentralabstand von 21m und in Richtung des Einfallens der Lagerstätte, in Richtung SSO, von 11m.

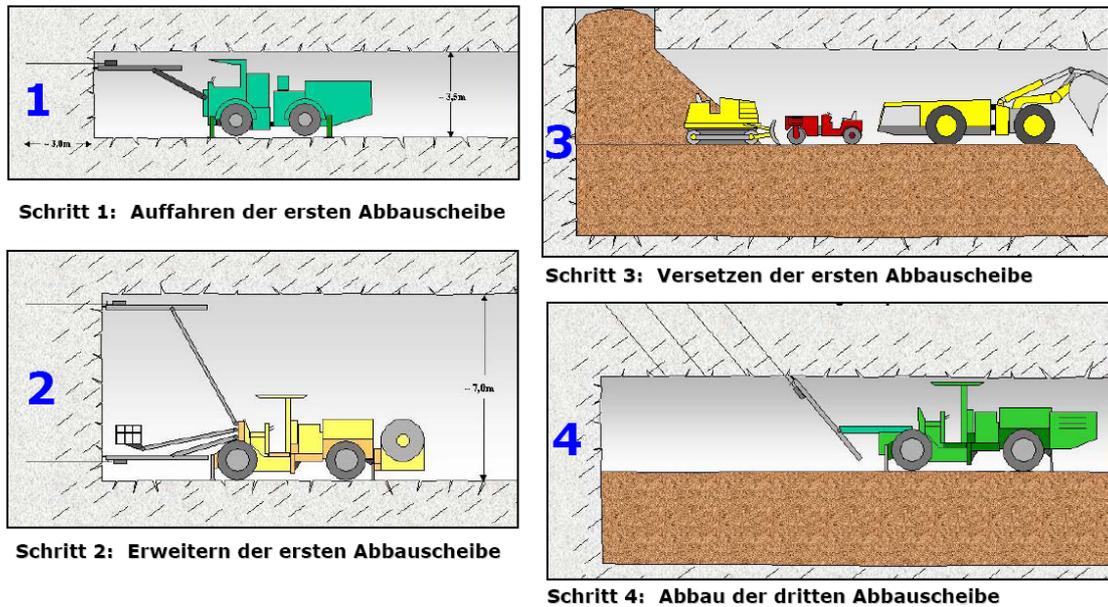


Abbildung 3-15: Abbauverfahren beim "Post Pillar" Abbauverfahren im Bergbau Breitenau.

Der in Abbildung 3-15 dargestellte "Post - Pillar" Abbau im Magnesitbergbau Breitenau besteht im Wesentlichen aus vier Schritten:

Der erste Schritt besteht im Auffahren der ersten Unterfahrungs- bzw. Abbauscheibe. Im Falle der Breitenau hat diese Unterfahrungs- bzw. Abbauscheibe eine Höhe von 3,5m. Im Zuge der Herstellung dieser Scheibe werden die Geometrien der Bergfesten und die Breite der Örter festgelegt.

In einem zweiten Schritt wird die Unterfahrungs- bzw. Abbauscheibe auf eine Höhe von 7m aufgeweitet.

Schritt drei stellt das Einbringen des bindemittellosen Sturzversatzes bis zu einer Höhe von 3,5m dar. Die auf diese Art geschaffene Versatzoberfläche dient in weiterer Folge als Arbeitsfläche für das Hereingewinnen der nächsten darüberliegenden Abbauscheibe.

Unter ständigem Nachführen des Versatzes wandert der scheibenweise Abbau von unten nach oben um am Ende bis zu 40 3,5m hohe Scheiben abzubauen.

Wenn in späterer Folge die Abbausituation in der Breitenau mit den bereits beschriebenen Fällen aus der Praxis und mit den numerischen Simulationen verglichen wird, muss auf eine geologisch bedingte Besonderheit des Abbauzuschnittes in der Breitenau hingewiesen werden:

Da das Nebengebirge des Magnesitkörpers aus geringfestem Schwarzschiefer besteht, mussten die Aus- und Vorrichtungsbaue in den standfesten Magnesitkörper gelegt werden.

Auch kann in der Breitenau nicht von isolierten "Post Pillar" Abbaubereichen, Revieren gesprochen werden. Bedingt durch den scheibenweisen Abbau von unten nach oben ergibt sich in der Endphase des Abbaus zwangsläufig immer eine Restschwebensituation zum darüberliegenden Revier und die damit verbundene gegenseitige Beeinflussung.

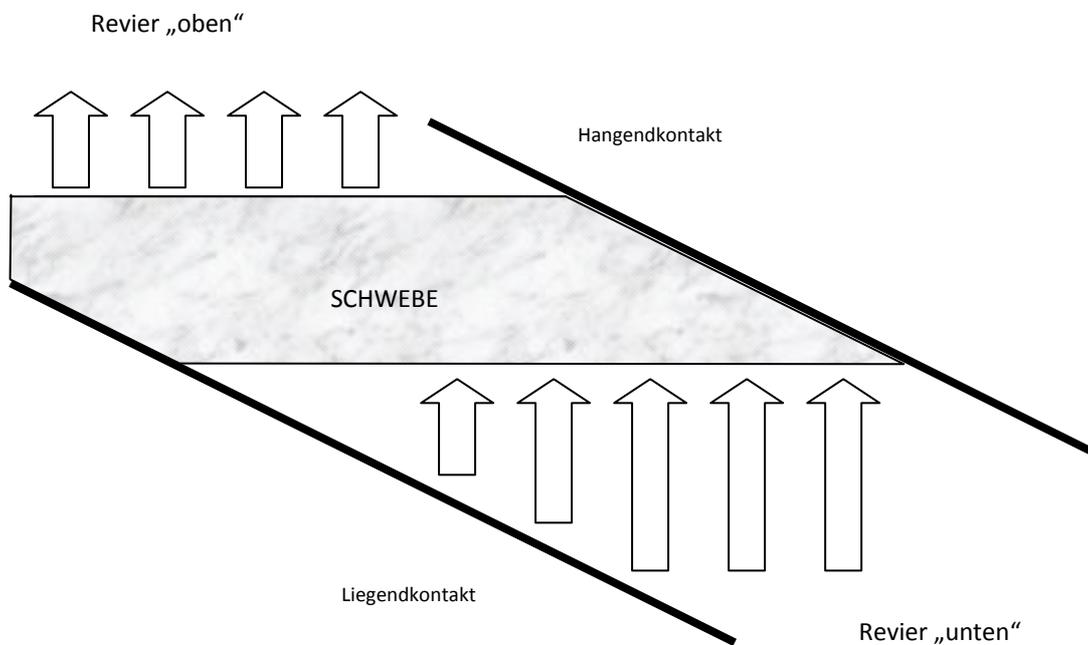


Abbildung 3-16: Schematische Darstellung der Restschwebenproblematik am Beispiel der Breitenau

All diese Punkte spielen eine wichtige Rolle im Vergleich mit dem gebirgsmechanischen Modell und den Ergebnissen der numerischen Simulationen.

3.2 Vorteile des Abbauverfahrens

Die Vorteile des Abbauverfahrens liegen einerseits im hohen Lagerstättenausbringen, in der Möglichkeit, viele Betriebspunkte parallel anzulegen und in der Möglichkeit, den Veränderungen im Verlauf der Lagerstätte durch laterales Vergrößern der Abbauscheiben zu folgen.

Auf Grund der Tatsache, dass sich der Abbau des „Post Pillar“ Verfahrens mit dem Zuschnitt des Örterbaus (System aus Bergfesten und Örtern) scheibenweise von unten nach oben entwickelt, kann das hohe Ausbringen des Örterbaus nicht nur über eine oder maximal zwei Scheiben, sondern über ganze Lagerstätten- bzw. Revierteile realisiert werden.

Ein weiterer großer Vorteil der Abbaumethode liegt in der Möglichkeit, viele Abbaubetriebspunkte einzurichten und zu betreiben. Vor allem bei Betrieben mit sehr strikten Qualitätsvorgaben und geringen Lagerressourcen über Tage, bietet sich hier die Möglichkeit, durch gezielten Abbau die gewünschten Rohmaterialqualitäten zu gewinnen.

Wie in Abbildung 3-12 S.3-13 ersichtlich, besteht bei jeder Abbauscheibe die Möglichkeit, den Abbau an die Grenzen der Lagerstätte lateral anzupassen.

Auf geologische Schwächezonen kann durch das „Zusammenwachsen“ von Bergfesten reagiert werden. In Bereichen geologischer Schwächezonen besteht die Möglichkeit, einzelne Örter nicht abzubauen und somit größere Einzelfesten innerhalb des Reviers entstehen zu lassen.

In Kombination mit einer Wendel als Ausrichtung, kann der Zugang zu jeder Abbauscheibe einfach und kostengünstig realisiert werden.

3.3 Nachteile des Abbauverfahrens

Bedingt durch den flächigen scheibenweisen Abbau und den damit verbundenen hohen Anteil an offenen Grubenbauen ergibt sich eine geringe Betriebspunktkonzentration, ein hoher Sicherungsaufwand und die damit verbundenen hohen Ausbaurkosten.

Ein weiterer Nachteil ergibt sich aus der Abbauführung. Durch den scheibenweisen Abbau von unten nach oben und dem damit verbundenen „Heranbauen“ an ein bereits bestehendes „Post Pillar Abbaurevier“ entstehen immer wieder Restschwebensituationen und die damit verbundenen Problematiken.

Der größte Nachteil des Verfahrens liegt im ungünstigen Verhältnis zwischen freigelegter Firstfläche und abgebautem Lagerstättenvolumen. Da der Abbau im Firstverhieb von unten nach oben scheibenweise durchgeführt wird, wird die Firste nach Abbau einer

Scheibe jedes Mal aufs Neue geschwächt und muss dann in weiterer Folge mit Gebirgsanker gesichert werden. Diese Sicherung wird dann im nächsten Abbauschritt wieder hereingewonnen und muss vom Wertmineral abgetrennt werden.

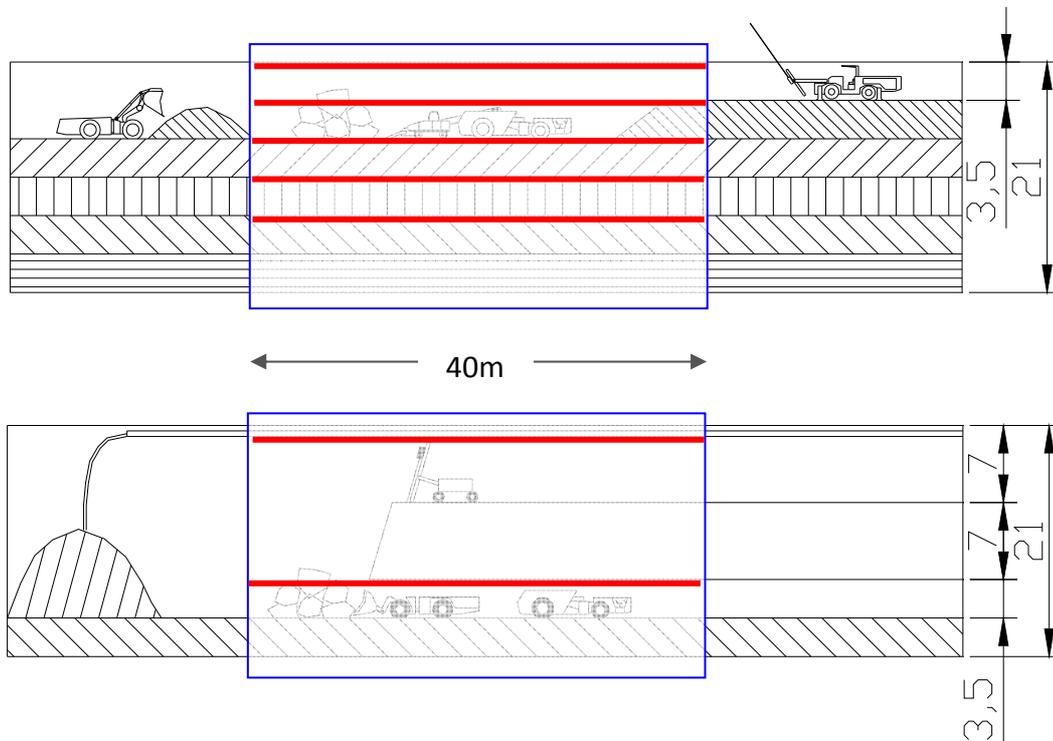


Abbildung 3-17: Darstellung der Unterschiede zwischen dem "Post - Pillar" Abbauverfahren und einem Kammerabbau bezüglich der Steinfallproblematik.

Im Gegensatz zum kammerartigen Abbau (siehe Abbildung 3-17 unten), bei dem für ein definiertes Abbauvolumen nur zwei freie Firstflächen geschaffen werden müssen, wird beim "Post Pillar" Abbauverfahren die Firste beim Hereingewinnen jeder einzelnen Abbauscheibe angegriffen und geschwächt.

Bei einer gegebenen Breite des Abbaus von 6m, einer Höhe von 21m und einer Länge von 40m ergeben sich folgende „herzustellende“ Firstflächen in [m²] für die unterschiedlichen Abbauverfahren:

Abbauverfahren	Anzahl der Firstflächen	Firstfläche [m ²]
Post - Pillar	5	1.200
Kammerbau	2	480

Tabelle 3-1: Vergleich der geschaffenen Firstfläche in [m²] zwischen dem "Post - Pillar" Abbauverfahren und dem Kammerabbau.

Für das gleiche Abbauvolumen müssen beim "Post Pillar" Abbaufverfahren 2,5 mal soviel Firstflächen freigelegt und gesichert werden wie bei einem vergleichbarem kammerartigen Abbaufverfahren.

In diesem Beispiel kann das Verhältnis der freigelegten Firstflächen zum abgebauten Volumen als Indikator für die größere Steinfallproblematik beim "Post Pillar" Abbaufverfahren herangezogen werden.

Bedingt durch das Fehlen von Schweben innerhalb eines Abbaublockes, und der damit geringen Möglichkeit Horizontalspannungen durch den Abbaublock abzuleiten, entstehen ab einer gewissen Höhe des Abbaublockes an der oberen Begrenzung sehr hohe Horizontalspannungskonzentrationen und die damit verbundenen Zerrüttungszonen und Steinfallproblematiken³.

3.4 Schlussfolgerungen

Auf Basis der Literaturrecherche können folgende Punkte angemerkt werden:

Planung von „Post Pillar“ Abbausystemen:

Es konnten keine Grundlagen für die Dimensionierung der Bergfesten in der Abbauabteilung gefunden werden. Es hat sich gezeigt, dass die Dimensionierung jeweils auf Grundlage der örtlichen Erfahrungen festgelegt wurde.

Es konnte außerdem keine akzeptable Vorgehensweise bei der Bemessung der Größe der Baufelder gefunden werden. In mehreren Betrieben ist am Beginn der Abbau in einem Revierteil durch kleinere, durch Streifenfesten geteilte, „Post Pillar“ Abbaureviere gestartet worden. Gründe, warum dies gemacht worden ist, fehlen jedoch.

Praktische Erfahrungen:

Das Abbaufverfahren stellt sich mit Vor- und Nachteilen als erfolgreich dar.

Als Hauptproblem stellt sich in nahezu allen Betrieben die Sicherung der Firste heraus.

Der Teufenbereich der Anwendung des Verfahrens liegt im Allgemeinen bei weniger als 500m.

³ Siehe auch Abbildung 5-39 S.5-31 und die nachfolgenden Erläuterungen.

3.5 Literaturverzeichnis Kapitel 3

- Mining methods in underground mining. 2. ed. (2007). Örebro: Atlas Copco Rock Drills AB.
- Barrett, J. R.; Chester, G. (1981): Post-pillar cut and fill mining: comparison of theory and practice. In: Stephansson, Ove.; Jones, Michael J. (Hg.): Application of rock mechanics to cut and fill mining. Proceedings of the Conference on the Application of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining ... held at the University of Luleå, Sweden, from 1 to 3 June, 1980. London: Inst. of Mining and Metallurgy, S. 272–283.
- Bharti, S.; Lebl, J.; Cornett, D. J. (1983): Conversation from "post" pillar cut-and-fill mining to blasthole - a case study at Falconbridge. In: CIM Bulletin, Jg. 76, H. 849, S. 61–68.
- Blaha, H. (2008): Zur Problematik der Festendimensionierung im oberflächennahen alpinen Bergbau. Berg- und hüttenmännische Monatshefte : BHM 153 2008 12, S. 476 - 480.
- Blaha, H.; Wagner, H. (2009): Die Wechselwirkung von Versatz und Bergfesten beim "Post-pillar" - Abbauverfahren. Berg- und hüttenmännische Monatshefte : BHM 154 2009 2, S. 60 - 66.
- Cleland, R. S.; Sing, K. H. (1973): Development of Post Pillar Mining at Falconbridge Nickel Mines Limited. In: CIM Bulletin, Jg. 1973, H. April, S. 57–64.
- Dutta, S. K.; Lahiri, D. (1988): Rock mechanics investigation in post pillar cut and fill mining and interior support for stabilisation. Proc International Symposium on Underground Engineering, New Delhi, 14-17 April 1988V1, P351-363. Publ Rotterdam: A A Balkema, 1988. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Jg. 28, H. 1, S. A35-A35.
- King Island Scheelite (1967): King Island Scheelite Mine. Grassy, King Island Tasmania 1937 - 1966. Unter Mitarbeit von King Island Scheelite. Herausgegeben von King Island Scheelite. Melbourne, zuletzt geprüft am 02.08.2011.
- RHI AG: Rohstoff- & Produktionsstandort Breitenau. Herausgegeben von RHI AG, zuletzt geprüft am 10.02.2011.

4 Gebirgsmechanische Aspekte

4.1 Einleitung

Die gebirgsmechanischen Fragestellungen hinter dem „Post pillar Abbauverfahren“ beschränken sich nicht nur auf die Anwendung des beim etablierten Örterbau weit verbreiteten Konzeptes des Sicherheitsfaktors, dh. die Bestimmung der Festigkeit der Bergfeste und die Bestimmung der Belastung der Bergfeste, sondern betreffen auch den Einfluss des Versatzes und den Einfluss der geometrischen Veränderung des Abbaufeldes.

Es ergeben sich insgesamt sechs Punkte, welche im Zuge der Diskussion der gebirgsmechanischen Mechanismen diskutiert und miteinander zu einem Modell verknüpft werden müssen:

Festigkeit der Bergfesten

Belastung der Bergfesten

Einfluss des Versatzes auf die Standfestigkeit von Bergfesten

Geometrische Veränderungen des Abbaufeldes

Baufeldgröße

Gebirgsspannungen

Da die erwähnten Parameter eng miteinander verknüpft sind, ergibt sich eine überaus komplexe gebirgsmechanische Situation.

Ein Beispiel ist die Festigkeit der Bergfesten. Diese hängt direkt mit der Höhe des Baufeldes zusammen. Der festigkeitssteigernde Einfluss des Versatzes hängt wiederum von der Kontaktfläche zwischen der Bergfeste und dem Versatz, der Abbauhöhe, der Örterbreite und den Versatzeigenschaften ab.

Ein noch ausgeprägterer Einflussbereich kann bei der Analyse der Belastung der Bergfesten beobachtet werden. Diese Belastung hängt nicht nur von der Geometrie der Bergfeste und der Örterbreite, sondern auch von der Höhe und der Breite des Abbaufeldes ab. Zusätzlich üben sowohl die Gebirgsspannungen, über das primäre Spannungsfeld, und der Versatz einen sehr großen Einfluss auf das Verhalten der Bergfesten aus.

4.2 Festigkeit von Bergfesten

Bergfesten sind Teile des Gebirges, welche nach dem Abbau der Lagerstätte zur Unterstützung der Hohlräume in der Lagerstätte verbleiben, um die Spannweiten und somit die Konvergenzen zu begrenzen. Das Zurücklassen von Bergfesten in der Lagerstätte, welches natürlich mit einem Verlust an gewinnbarem Material verbunden ist, ist für eine Reihe von Abbauverfahren ein integraler Bestandteil. Müssen Konvergenzen im unmittelbaren Nahbereich eines Abbaus beschränkt werden und ist man technisch oder wirtschaftlich nicht in der Lage dies mit Ausbau oder Versatz sicherzustellen, müssen Bergfesten zurückgelassen werden.

Die Bestimmung der Festigkeit von Bergfesten stellt eine besondere Herausforderung dar, da nicht nur das Material eine wichtige Rolle bei der Bestimmung der Festigkeit spielt, sondern auch die geometrische Form der Bergfeste und der Kontakt zwischen der Bergfeste und dem Nebengebirge.

Insbesondere muss darauf hingewiesen werden, dass die Dimensionen der Bergfesten im Allgemeinen so groß sind, dass Diskontinuitäten und unterschiedliche Gebirgsschichten eine bedeutende Rolle spielen. Bedingt durch die Größe der Festen, der Festigkeit des Festenmaterials und den Diskontinuitäten sowie den Kontakten der Feste mit Nebengesteinsschichten kann die Festigkeit der Festen nicht im Labor bestimmt werden.

Auf Grund der beschriebenen Einflussfaktoren können für die Bestimmung der Festigkeit keine geschlossenen absoluten Berechnungsalgorithmen, wie es z.B. im Maschinenbau bei der Berechnung der Festigkeit eines einfachen Druckstabes möglich ist, verwendet werden. Aus diesem Grund entwickelten sich die ersten Festigkeitsformeln für Bergfesten empirisch, d.h. aus der Beobachtung und Rückrechnung heraus.

Nach dem Grubenunglück von Coalbrook 1960 mit 437 Toten, welches durch ein schlagartiges Versagen von ca. 900 Kohlefesten verursacht worden ist, ist die Festigkeit von Bergfesten in der Kohle wissenschaftlich von Salamon & Munro (Salamon, 1967)⁴ aufgearbeitet worden. Zum ersten Mal sind Versagensfälle rückgerechnet und analysiert worden, dh. die Festigkeit und die Belastung der Bergfesten in der Kohle sind nachträglich errechnet und analysiert worden. Auf Basis dieser Untersuchungen etablierten Salamon & Munro eine Festenformel für Bergfesten in den südafrikanischen Kohlerevieren:

⁴ Das Literaturverzeichnis für das 4. Kapitel befindet sich in Kap. 4.11 auf der Seite 4-83.

$$S_p = S_o \times \frac{w^{0,46}}{H^{0,66}}$$

S_p	[MPa]	Festigkeit der Bergfeste
S_o	[MPa]	Festigkeit eines Kohlewürfels mit einer Kantenlänge von 1m. Für die südafrikanische Kohle ergibt sich ein Wert von $S_o = 7,176$ [MPa]
w	[m]	Breite der Bergfeste
H	[m]	Höhe der Bergfeste

Formel 4-1: Festigkeit der Bergfesten in der südafrikanischen Kohle nach Salamon & Munro (Salamon, 1967).

Sämtliche Festigkeitsbeziehungen für Hartgesteinsfesten haben einen ähnlichen Aufbau, stehen aber nicht auf so einer breiten Datenbasis wie die Untersuchungsergebnisse von Salamon & Munro.

Dies liegt zum Einen an der Tatsache, dass Südafrika zur damaligen Zeit an vorderster Front in der Bergbauforschung war und zum Anderen, dass sich gerade Kohlelagerstätten für eine nachträgliche Rückrechnung der gebirgsmechanischen Situation anbieten. Kohlelagerstätten besitzen im Allgemeinen, und vor allem in Südafrika, einen gleichförmigen Aufbau mit konstanter Mächtigkeit über große Bereiche, und sie besitzen eine große Erstreckung. Der gleichförmige Aufbau der Lagerstätten erleichtert die Bestimmung der Festigkeit der Bergfesten, und die große Ausdehnung der Abbaufelder rechtfertigt die Anwendung der Theorie der zugeordneten Flächen für die Abschätzung der Belastung der Bergfesten.

Der Örterbau im Hartgestein zeigt sich meist kleinräumiger und in einer eher unregelmäßigeren Gestaltung der Abbaufelder in einem inhomogenen Umfeld. Im Vergleich zum Kohlebergbau, hat man es im Örterbau im Hartgesteinsbergbau mit eher kleinräumigem Abbauen in einem Gebirge mit sehr stark schwankenden Festigkeits- und Verformungseigenschaften zu tun. Im großen Stil ist eine Rückrechnung, wie sie Salamon für den Kohlebergbau in Südafrika durchgeführt hat nahezu unmöglich. Durch die eher kleinräumigen und unregelmäßigen Abbaue ist auch die Bestimmung der Belastung der Bergfesten eine große Herausforderung. Die Theorie der zugeordneten Flächen kann in den seltensten Fällen angewendet werden und die Abschätzung des Gewölbeeffektes, welcher die Belastung der Bergfesten reduziert, ist schwierig.

Insgesamt muss also angemerkt werden, dass die Datenbasis für die Rückrechnung von Bergfesten im Hartgestein deutlich geringer wie in der Kohle ist und auch die Gesteine selbst sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen.

Bei der Anwendung der Formeln zur Bestimmung der Festigkeiten von Bergfesten im Hartgestein muss auf das Umfeld der einzelnen Untersuchungen, wie z.B. einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins oder die Anzahl der untersuchten Festen, eingegangen werden, um die Anwendbarkeit der formalen Beziehung zu verifizieren.

Basierend auf der Masterarbeit von Maybee (Maybee, 2000) veröffentlichten Martin & Maybee im Jahr 2000 (Martin, 2000) eine Zusammenfassung der gebräuchlichsten Festigkeitsformeln für Bergfesten im Hartgestein.

Reference	Pillar strength formulas (MPa)	σ_c (MPa)	Rock mass	No. of pillars
[3]	$133 \frac{W^{0.5}}{H^{0.35}}$	230	Quartzites	28
[4]	$65 \frac{W^{0.46}}{H^{0.56}}$	94	Metasediments	57
[5]	$35.4(0.778 + 0.222 \frac{W}{H})$	100	Limestone	14
[6]	$0.42 \sigma_c \frac{W}{H}$	—	Canadian Shield	23
[7]	$74(0.778 + 0.222 \frac{W}{H})$	240	Limestone/Skarn	9
[8]	$0.44 \sigma_c (0.68 + 0.52 \kappa)$	—	Hard rocks	178 ^a

Tabelle 4-1: Festigkeitsformeln für Bergfesten nach Martin & Maybee (Martin, 2000).

Die im Anschluss angeführten Literaturstellen beziehen sich auf die Literaturstellen in Tabelle 4-1.

- [3] (Hedley, 1972)
- [4] (Kimmelman, 1984)
- [5] (Krauland, 1987)
- [6] (Potvin, 1989)
- [7] (Sjöberg, 1992)
- [8] (Lunder, 1997)

An dieser Zusammenstellung ist vor allem die Anzahl der untersuchten Bergfesten pro Studie interessant. Aus dieser Zahl, aus der Höhe der einaxialen Druckfestigkeit des zugrunde liegenden Lagerstättenmaterials, kann die Aussagekraft der Formeln für eine bestimmte Anwendung abgeschätzt werden. Vor allem die Anzahl der zu Bruch gegangenen Bergfesten lässt auf die Genauigkeit der Kalibrierung rückschließen.

Gonzales (Gonzalez-Nicieza, 2006) veröffentlichte 2006 eine ergänzte Zusammenstellung der wichtigsten Festigkeitsformeln für Bergfesten im Hartgestein.

	Author	Equations	S_o	σ_c	Año
(1)	Hedley	$S_p = S_o \cdot \frac{a_p^{0,5}}{H_p^{0,75}}$	$0.578 \sigma_c$	230 MPa	1972
	Kimmelman	$S_p = S_o \cdot \frac{a_p^{0,46}}{H_p^{0,66}}$	$0.691 \sigma_c$	94 MPa	1984
	Potvin	$S_p = S_o \cdot \frac{a_p}{H_p}$	$0.420 \sigma_c$	–	1989
(2)	Krauland	$S_p = S_o \cdot \left(0.778 + 0.222 \cdot \frac{H_p}{a_p}\right)$	$0.354 \sigma_c$	100 MPa	1987
	Sjöberg	$S_p = S_o \cdot \left(0.778 + 0.222 \cdot \frac{H_p}{a_p}\right)$	$0.308 \sigma_c$	240 MPa	1992
	Lunder-Pakalnis	$S_p = S_o \cdot \left(0.680 + 0.520 \cdot \frac{H_p}{a_p}\right)$	$0.440 \sigma_c$	–	1997
(3)	CMRI	$S_p = S_o \cdot \left(\frac{1}{H_p}\right)^{0,36} + \left(\frac{H_p}{250} + 1\right) \cdot \left(\frac{a_p}{H_p} - 1\right)$	$0.270 \sigma_c$	–	2000
(4)	Hardy-Agapito	$S_p = S_o \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^{-0,118} \cdot \left(\frac{a_p}{H_p} \cdot \frac{a_s}{H_s}\right)^{0,833}$	σ_c	–	1982

Tabelle 4-2: Festigkeitsformeln für Bergfesten nach Gonzales Inkl. Einteilung der Gruppen.

Die Zusammenstellung von Gonzales ist sowohl um die Ergebnisse von CMRI⁵ (Sheorey, 2000) als auch um die Ergebnisse von Hardy-Agapito (Hardy, 1982) erweitert worden.

Zusammenfassend lassen sich die Festigkeitsformeln für Bergfesten im Hartgestein in vier Gruppen (siehe Tabelle 4-2) darstellen:

$$(1) \quad S_p = S_o * \frac{W_p^\alpha}{H_p^\beta}$$

Autor	So	α	β
Hedley (1972)	$0,578 * UCS_r$	0,5	0,75
Kimmelman (1984)	$0,691 * UCS_r$	0,46	0,66
Potvin (1989)	$0,42 * UCS_r$	1	1
Esterhuizen (2011)	$0,65 * UCS_r$	0,30	0,59

Formel 4-2: Festenfestigkeit – Formelgruppe 1

⁵ Central Mining Research Institute Dhanbad India

$$(2) \quad S_p = S_o * \left(A + B * \frac{H_p}{w_p} \right)$$

Autor	So	A	B
Krauland (1987)	0,354 * UCS _r	0,778	0,222
Sjöberg (1992)	0,308 * UCS _r	0,778	0,222
Lunder-Pakalnis (1997)	0,44 * UCS _r	0,680	0,520

Formel 4-3: Festenfestigkeit – Formelgruppe 2

$$(3) \quad S_p = S_o * \left(\frac{1}{H_p} \right)^\alpha + \left(\frac{H_p}{250} + 1 \right) * \left(\frac{w_p}{H_p} - 1 \right)$$

Autor	So	α
CMRI (Sheory 2000)	0,27 * UCS _r	0,36

Formel 4-4: Festenfestigkeit – Formelgruppe 3

$$(4) \quad S_p = S_o * \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^\alpha * \left(\frac{w_p}{H_p} * \frac{w_s}{H_s} \right)^\beta$$

Autor	So	α	β
Hardy-Agapito (1982)	1,0 * UCS _r	-0,118	0,833

Formel 4-5: Festenfestigkeit – Formelgruppe 4

Für alle Festenformelgruppen gilt:

S _p	[MPa]	Festigkeit der Bergfeste
UCS _r	[MPa]	Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins.
w _p	[m]	Breite der Bergfeste
H _p	[m]	Höhe der Bergfeste

Esterhuizen (Esterhuizen, 2011) von der NIOSH⁶ in den Vereinigten Staaten analysierte die Daten aus den amerikanischen Örterbaubetrieben im Hartgestein und ist zu folgender Beziehung für die Festigkeit von Bergfesten in diesem Bereich gekommen:

$$S_p = 0,65 \times \sigma_c \times \frac{w^{0,30}}{H^{0,59}}$$

S_p	[MPa]	Festigkeit der Bergfeste
σ_c	[MPa]	Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins.
w	[m]	Breite der Bergfeste
H	[m]	Höhe der Bergfeste

Formel 4-6: Festigkeit der Bergfesten in Bereichen der untertägigen Örterbaue im Hartgestein nach Esterhuizen (Esterhuizen, 2011).

In einem auf der Homepage der NIOSH veröffentlichten Artikel mit dem Titel „Assessment of stable and failed pillars in underground limestone mines“ (Esterhuizen, 2008) findet sich eine Zusammenfassung der Untersuchungen über die Festigkeit von Bergfesten im amerikanischen Hartgesteinsbergbau (Abbildung 4-1 S.4-8).

Auf der horizontalen Achse ist das Breiten- zu Höhenverhältnis der untersuchten Bergfesten aufgetragen und auf der vertikalen Achse ist die, auf die einaxiale Druckfestigkeit des festenbildenden Gesteins normierte, Belastung der Bergfeste abgebildet.

Jeder Kreis im Diagramm entspricht einer Festensituation, wobei die unmittelbare Größe der Kreise direkte Aussagen über den quantitativen Hintergrund der Ergebnisse zulässt. Jedes Kreuz im Diagramm entspricht wiederum einer überbelasteten und somit versagten Bergfeste.

Außerdem sind im beschriebenen Diagramm von Esterhuizen verschiedene Risikobereiche vermerkt, mögliche Versagensmechanismen dargestellt und es ist auch die „Grenze der gemachten Erfahrungen“ im Diagramm eingetragen.

⁶ “The National Institute for Occupational Safety and Health” (NIOSH) – Als Untergruppe fungiert das “Office of Mine Safety and Health Information” siehe auch <http://www.cdc.gov/niosh/mining/> auch bekannt als Nachfolgeorganisation des U.S. Bureau of Mines.

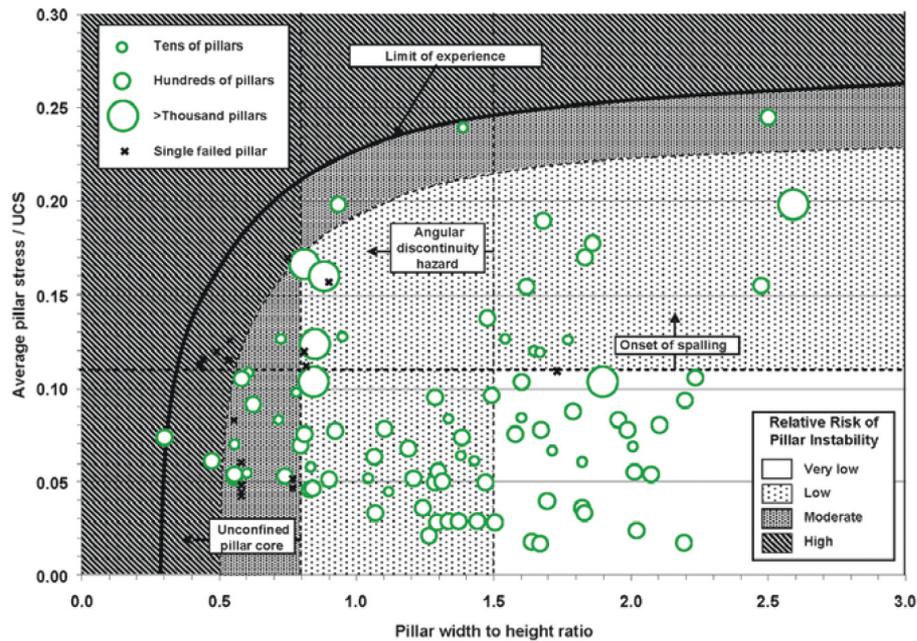


Abbildung 4-1: Standfestigkeitsdiagramm nach Esterhuizen (2011).

Vor allem die „Limit of Experience“, bezogen auf das Breiten- zu Höhenverhältnis der Festen, kann auch in anderen Literaturquellen in ähnlicher Weise bestätigt werden und hat sehr große Auswirkungen auf die Untersuchungen bezüglich der Standfestigkeit von Bergfesten in einem „Post Pillar“ Abbaubereich. Mit Ausnahme beim Abbau der ersten Abbauscheiben, besitzen die Bergfesten in einem solchen Abbaurevier in der Regel immer ein Breiten zu Höhen Verhältnis, welches sehr viel kleiner wie 0,5 ist.

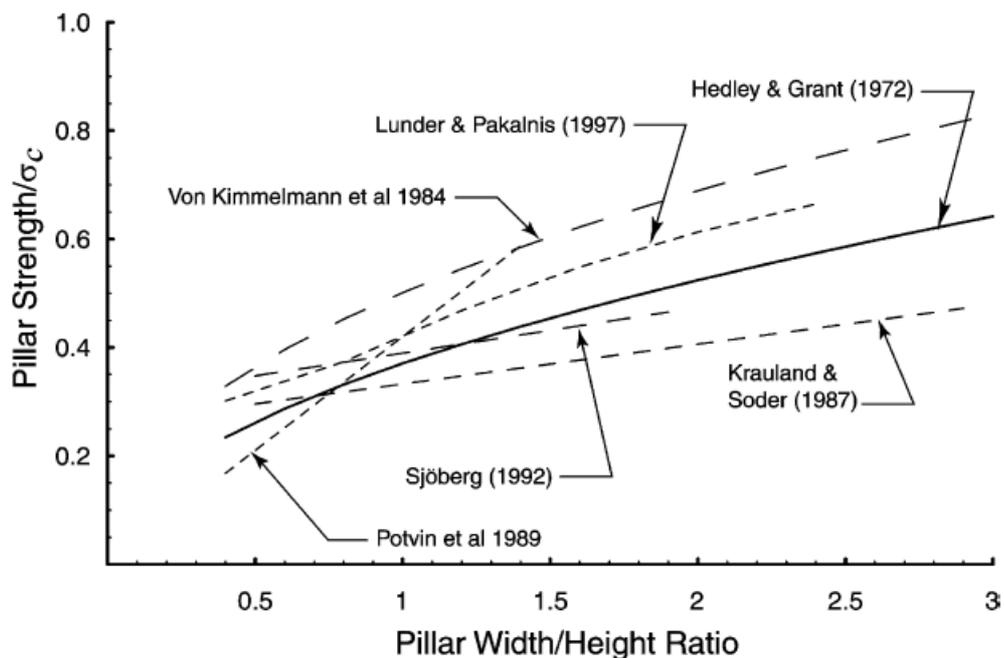


Abbildung 4-2: Vergleich verschiedener Festigkeitsformeln von Bergfesten. Daten aus (Martin, 2000).

Auch bei Martin (2000) beginnen die Untersuchungen ab einem Breiten- zu Höhenverhältnis von 0,5, d.h. ein gesicherter Vergleich mit Festigkeitsformeln für Bergfesten im Hartgestein kann erst über einem Breiten- zu Höhenverhältnis von 0,5 durchgeführt werden.

4.2.1 Kritische Beurteilung der Festenformeln aus der Sicht des „Post Pillar“ Abbauverfahrens

All diese Darstellungen der „Grenze der Erfahrung“ oder die beschriebenen Bandbreiten der Anwendbarkeit der einzelnen Festenformeln, stellen eine große Herausforderung für eine mögliche Anwendung der Zusammenhänge für das „Post Pillar“ Abbauverfahren dar. Beim „Post Pillar“ Abbauverfahren stehen die Bergfesten im Versatz und weisen im Allgemeinen ein Breiten- zu Höhenverhältnis von $\ll 0,5$ auf.

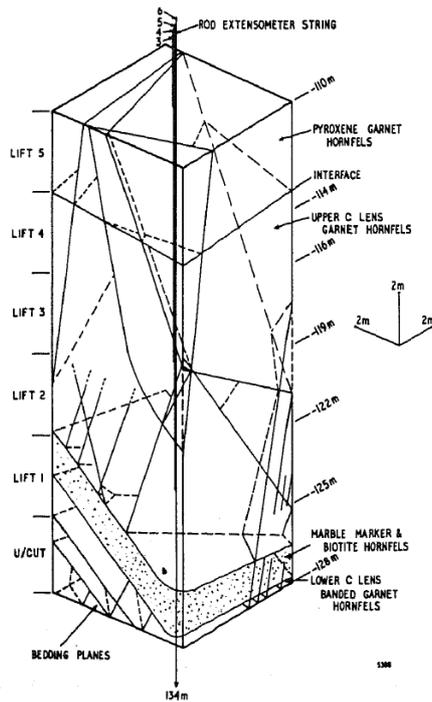
Da die Höhe H der Bergfeste mit jeder gewonnenen Abbauscheibe größer wird, verringert sich auch das Breiten- zu Höhenverhältnis der Bergfeste und man entfernt sich immer weiter vom „bekannten“ Erfahrungsbereich, der bei einem Breiten- zu Höhenverhältnis von $>0,5$ beginnt und ca. bei $B/H = 3$ im Hartgestein endet.

Die normierte Festigkeit S_o der Bergfesten liegt im Bereich von 0,27 bis 0,79 der einachsialen Druckfestigkeit der Gesteine aus denen die Bergfeste aufgebaut ist. Die häufigsten Werte fallen in den Bereich 0,27 – 0,44. Der Wert 1 stellt eine Ausnahme dar.

Dies bedeutet, dass nicht auf die Festigkeitsbeziehungen aus der Praxis zurückgegriffen werden kann und des Weiteren, dass die Festigkeit der Bergfesten unter dem derzeit als „Grenze der Erfahrungen“ etablierten Breiten- zu Höhenverhältnis von 0,5 liegt.

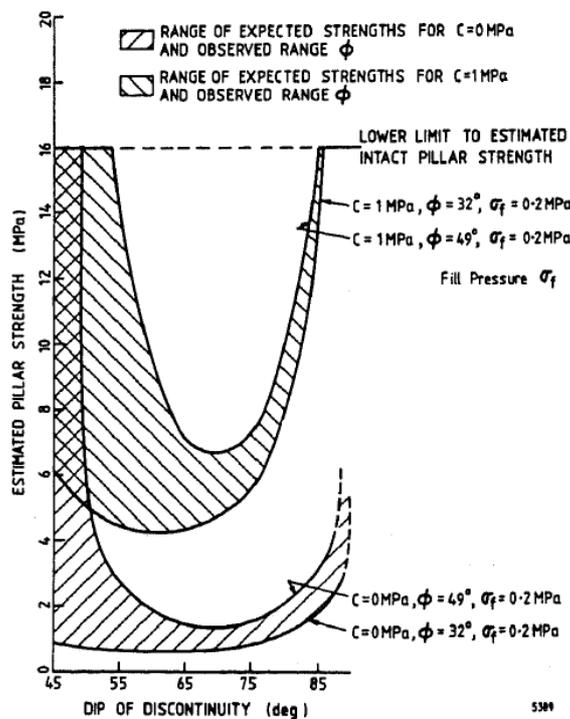
Außerdem muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass der Einfluss des Versatzes in keiner der besprochenen Festigkeitsbeziehungen Berücksichtigung findet.

Nicht nur das Breiten- zu Höhenverhältnis liegt beim „Post Pillar“ Abbauverfahren außerhalb jeder Erfahrungswerte, auch der Einfluss der geologischen Schwächezonen muss auf Grund der Schlankheit der Bergfesten verstärkt berücksichtigt werden. Die nachfolgende Abbildung 4-3 S.4-10 zeigt das Ergebnis einer den Abbau begleitenden geologischen Kartierung einer Bergfeste über eine Höhe von 18m. Dies entspricht beim „Post Pillar“ Abbauverfahren dem Abbau von ca. 6 Scheiben. Innerhalb einer jeden aktiven Abbauscheibe sind sowohl die Geologie, als auch die geologischen Diskontinuitäten kartiert und fotografisch dokumentiert worden.



Die Bergfeste ist in der im Kapitel 3.1.2 auf S. 3-6 beschriebenen Dolphin Mine auf der Insel King Island dokumentiert worden.

Abbildung 4-3: Ergebnis einer den Abbau begleitenden geologischen Kartierung einer Bergfeste beim „Post Pillar“ Abbauverfahren (Miller, 1979)



Aufgrund der Schlankheit und der relativ großen Höhe der Bergfesten beim „Post Pillar“ Abbauverfahren ist der Einfluss der geologischen Diskontinuitäten auf die Festigkeit der Bergfesten ein sehr wichtiger Faktor. Bei einer ungünstigen Orientierung der Diskontinuitäten kann sich eine Reduktion der Festigkeit um bis zu 90% ergeben.

Abbildung 4-4: Erwartete Festigkeit einer Bergfeste in Abhängigkeit des Einfallens der Diskontinuität und der Festigkeitsparameter des Festenmaterials (Miller, 1979).

4.2.2 Schlussfolgerungen

Aufgrund der großen Höhe der Bergfesten, und dem damit verbundenen sehr kleinen Breiten- zu Höhenverhältnis, liegen „Post Pillar“ Festen außerhalb jedes Erfahrungsbereiches etablierter Festigkeitsabschätzungen. Der Einfluss der geologischen Schwächebereiche kann quantitativ nicht erfasst und in einer formalen Beziehung ausgedrückt werden. Gerade die geologischen Diskontinuitäten haben bei derart schlanken, sehr hohen Bergfesten einen ungleich höheren Einfluss, als es bei gedrungenen Bergfesten der Fall ist.

Daraus folgt, dass die Tragfähigkeit von „Post Pillar“ Bergfesten kaum bekannt ist, voraussichtlich aber jedoch sehr gering sein wird.

Konventionelle Festenformeln haben in diesem Fall nur begrenzte Anwendbarkeit, da die „Post Pillar“ Bergfesten außerhalb jeder Geometrie für die Anwendung der herkömmlichen Festenformeln sind, die geologischen Diskontinuitäten einen sehr großen Einfluss auf die sehr schlanken Bergfesten ausüben und der Einfluss des Versatzes in keiner Festenformel berücksichtigt wird.

Insbesondere der Einfluss des Versatzes auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften der sehr schlanken „Post Pillar“ Bergfesten ist weitgehend ungeklärt und muss noch tiefergehender untersucht werden.

4.3 Belastung von Bergfesten

Wird die Belastung und somit die Standfestigkeit von Bergfesten untersucht, muss auch auf die Art und Weise eingegangen werden, wie die Last auf die Bergfesten eingetragen wird. Wird die Last rein durch ein Gewicht eingetragen spricht man von einer belastungskontrollierten Situation. Wird im Gegensatz dazu die Last über eine Konvergenz, dh. eine Bewegung in die Bergfeste eingetragen, spricht man von einer verformungskontrollierten Situation.

Für die Analyse der Belastung von Bergfesten sind also zwei unterschiedliche Belastungssituationen zu unterscheiden:

- Belastungskontrollierte Situation
- Verformungskontrollierte Situation

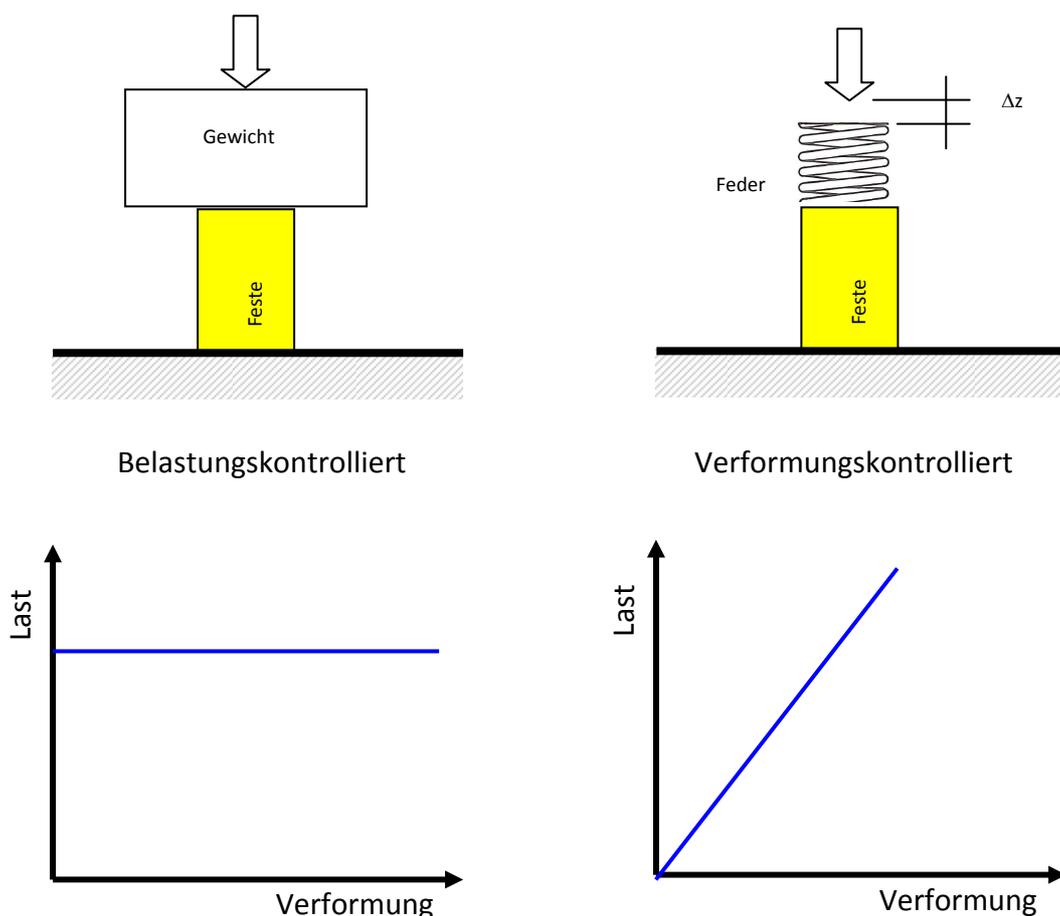


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung einer belastungskontrollierten Situation (linke Abbildung) und einer verformungskontrollierten Situation (rechte Abbildung).

Eine belastungskontrollierte Situation entsteht dann, wenn die Feste nur durch eine „Totlast“ beansprucht wird. Dies kann einerseits durch das Gewicht der Gebirgsmasse innerhalb einer Auflockerungszone sein, welches auf die Feste wirkt oder andererseits durch das Gewicht eines Felskeiles, das auf die Feste wirkt.

Einen Sonderfall stellt die Festenbelastung nach der Theorie der zugeordneten Flächen dar. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass alle Festen in einem sehr großen Baufeld das Gewicht der überlagernden Schichten gleichmäßig unterstützen und das Baufeld so groß ist, dass der Anteil der Baufeldränder (Auflager) vernachlässigt werden kann. In allen anderen Fällen ist die Belastung der Festen verformungskontrolliert, dh. sie wird durch die Konvergenz des Baufeldes und der Steifigkeit der Festen bestimmt. Das „Post Pillar“ System mit den kleinen Baufelddimensionen und den weichen Festen, ist ein klassisches Beispiel einer verformungskontrollierten Festenbelastung.

4.3.1 Belastungskontrollierte Situation

Die klassische Grundlage zur Bestimmung der Belastung einer Bergfeste ist die Theorie der zugeordneten Flächen (Salamon, 1967). In diesem Fall wird jeder Feste der Gebirgsblock über ihr, von der Hangendbegrenzung der Bergfeste bis zur Tagesoberfläche, als Belastung zugerechnet.

Sie stellt die konservativste Lastannahme für eine Bergfeste dar und ergibt, auf Grund der Tatsache, dass keine Gewölbeeefekte belastungsreduzierend eingerechnet werden, die maximal mögliche Belastung der Festen in einem Baufeld.

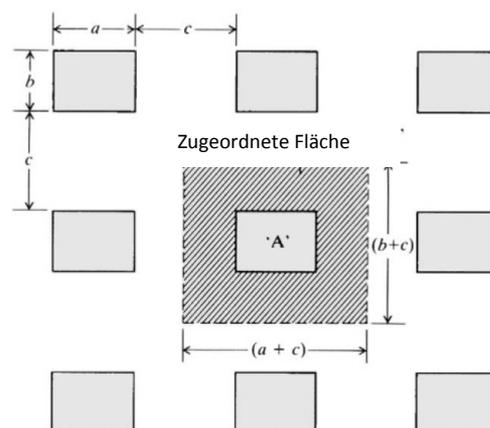


Abbildung 4-6: Darstellung des Grundprinzips der Theorie der zugeordneten Flächen (Brady 2006).

Für die uneingeschränkte Anwendung müssen folgende Punkte berücksichtigt und eingehalten werden (Hartman, 1992):

- Das Verhältnis der Breite des Abbaufeldes zur Teufe sollte größer als der Faktor 1,3 sein.
- Konstante Überlagerung über das gesamte Abbaufeld.
- Keine Veränderungen in der Abbaugeometrie.
- Konstante Festigkeits- und Verformungsparameter innerhalb des Abbaubereiches.
- Gleichbleibende Festen- und Örtergeometrien.

4.3.2 Verformungskontrollierte Situation

In einer verformungskontrollierten Belastungssituation hängt die Belastung der Bergfesten von mehreren Einflussfaktoren ab. Salamon und Oravec (Salamon, 1976) geben ein sehr anschauliches Beispiel über die Zusammenhänge, wenn eine verformungskontrollierte Situation vorliegt.

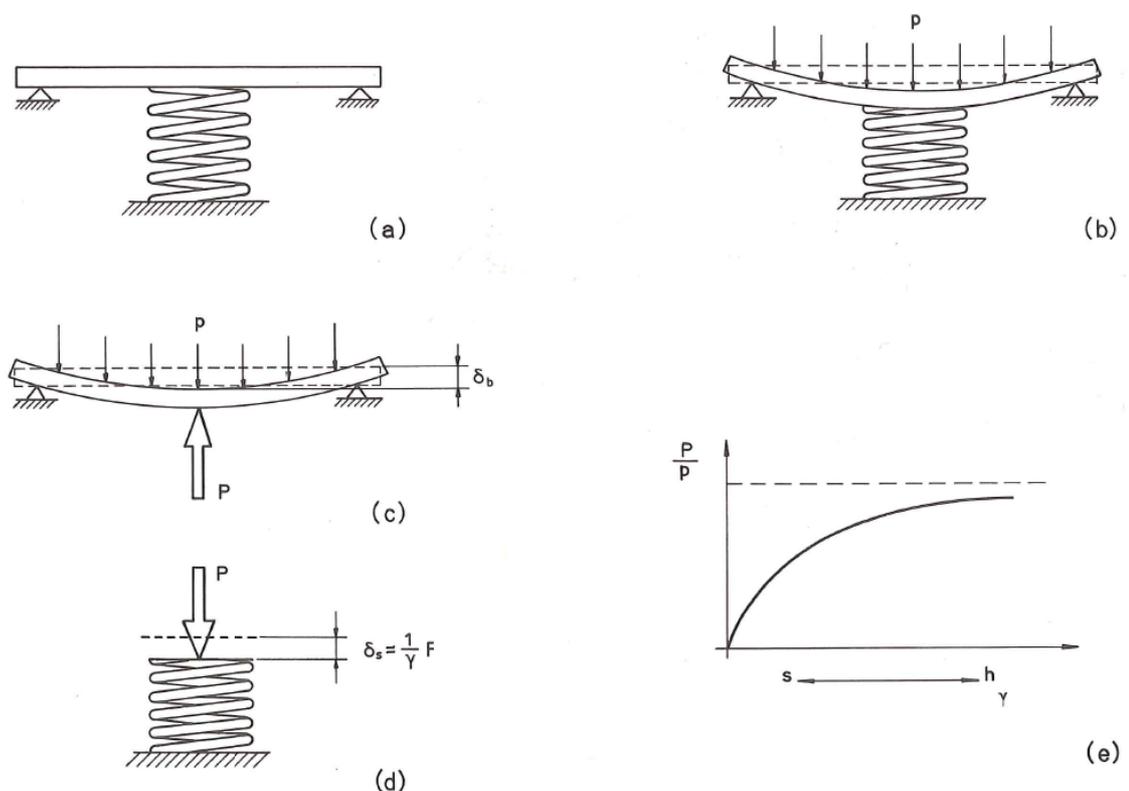


Abbildung 4-7: Vereinfachte Darstellung der Winkler Hypothese mittels eines Biegebalkens und einer Feder für die Anwendung beim Örterbau (Salamon, 1976).

In diesem Beispiel wird die Bergfeste als Feder und das Gebirge im Hangenden als Biegebalken angenommen. Das Gebirge über der Bergfeste bestimmt über seine Durchbiegung die Lasteinleitung in die Bergfeste. Salamon veranschaulicht dieses Durchbiegen des unmittelbaren Gebirges als Biegeträger. Das Maß der Durchbiegung belastet wiederum die als Feder dargestellte Bergfeste und leitet auf diese Weise die Last ein. Die Belastung der Bergfeste hängt nun nicht nur vom Verhalten des Gebirges, der Abbaugeometrie und dem Maß der Durchbiegung ab, sondern auch vom Widerstand und der Steifigkeit der Bergfesten.

Zieht man das Beispiel des „Post Pillar“ Abbauverfahrens heran, hängt die Belastung der Bergfesten von der Höhe und der Breite des Abbaubereiches, von den Gebirgsspannungen und dem Anteil der plastischen Verformungen⁷ ab.

Die Veränderung der Abbaugeometrie ist, neben der sich ständig ändernden Abbauhöhe, der maßgebende Faktor für die „Nichtanwendbarkeit“ der Theorie der zugeordneten Flächen. Salamon und Oravec haben für die typischen Verhältnisse des Kohlenbergbaus gezeigt, dass erst bei einem Verhältnis der Breite des Abbaufeldes zur Teufe von $> 1,3$ die Verhältnisse im zentralen Bereich des Baufeldes so sind, dass die Theorie der zugeordneten Flächen angewendet werden kann.

Im Falle des „Post Pillar“ Abbauverfahrens ist diese Bedingung meist nicht erfüllt und die Festenbelastung wird durch die Baufeldkonvergenz und die Festensteifigkeit bestimmt. Des Weiteren ist diese im Allgemeinen deutlich geringer als nach der Theorie der zugeordneten Flächen zu erwarten wäre.

Kann die Theorie der zugeordneten Flächen angewendet werden, stellt sie aus der Sicht der Sicherheit die konservativste Annahme dar. Der Sicherheitsfaktor wird in diesem Fall mit der größtmöglichen Festenbelastung bestimmt. Liegt nun der kleinräumige Abbau in größerer Teufe kann der konservative Ansatz nicht angewendet werden. Die Belastung der Festen hängt primär von den In-Situ Gebirgsspannungen, der Geometrie des Abbaubereiches, den Verformungseigenschaften des Gebirges und der Bergfesten und den Auswirkungen des Versatzes ab und liegt in der Regel unter der durch die Theorie der zugeordneten Flächen definierten Belastung der Bergfesten.

⁷ Ist der „Post Pillar“ Abbau vorangeschritten und es befindet uns in einer Phase in welcher das Breiten- zu Höhenverhältnis des Abbaufeldes $B/H < 1$ beträgt, ergeben sich oberhalb des Abbaubereiches Gebirgsanteile mit plastischer Verformung. Diese Anteile können als „Totlast“ auf den Bergfesten wirken und stellen die Ausnahme einer belastungskontrollierten Situation innerhalb des „Post Pillar“ Abbauverfahrens dar.

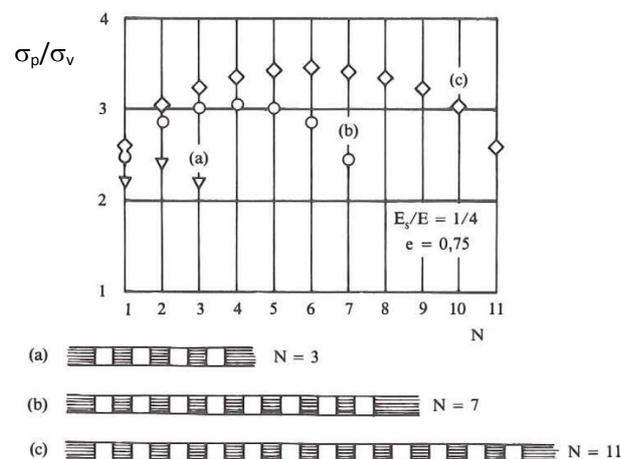


Abbildung 4-8: Festenbelastung in Abhängigkeit der Anzahl der gebauten Örter, normiert auf den primären vertikalen Spannungszustand nach Salamon (1983).

Salamon (Salamon, 1983) zeigt sehr anschaulich die Abhängigkeit zwischen der Festenbelastung und der Breite des Abbaufeldes oder, wie in diesem Diagramm ausgedrückt, der Anzahl der gebauten Örter.

Alle drei Beziehungen (a), (b) & (c) repräsentieren Örterbaue mit identen Verformungseigenschaften und Ausbringen (75%) innerhalb der Abbaubteilungen. Die Festenbelastung hängt rein von der Anzahl der gebauten Örter und der Lage innerhalb des Abbaufeldes ab. Die höchste Festenbelastung liegt immer in der Mitte des Abbaufeldes. Bei drei gebauten Örtern ergibt sich eine Festenbelastung von $\sigma_p = 2,5 \cdot q$. σ_p repräsentiert die Belastung der Bergfeste und q stellt den primären vertikalen Spannungszustand dar. Bei 11 gebauten Örtern ergeben sich, in der Mitte des Abbaufeldes, maximale Festenbelastungen von $\sigma_p = 3,5 \cdot q$.

Vergleicht man zu diesen Zahlen die Festenbelastung nach der Theorie der zugeordneten Flächen (TAT), erreicht man einen Wert von $\sigma_p = 4,0 \cdot q$.

Anzahl der gebauten Örter [1]	Festenbelastung [1]	Belastung nach TAT [%]
3	$2,5 \cdot \sigma_v$	62,5
11	$3,5 \cdot \sigma_v$	87,5
∞	$4,0 \cdot \sigma_v$	100

Tabelle 4-3: Festenbelastung, ausgedrückt als Vielfaches der primären Vertikalspannung, in Abhängigkeit der Anzahl der gebauten Örter nach Salamon.

Die Spalte „Belastung nach TAT“ beschreibt den Unterschied in der Belastung zwischen der Theorie der zugeordneten Flächen (TAT), dieser Wert würde 100% entsprechen, und der Berücksichtigung des Gewölbeeffektes nach Salamon. Sind drei Örter gebaut worden (1. Zeile in der Tabelle) tritt eine Festenbelastung nach Salamon von nur 62,5 % der Festenbelastung nach der Theorie der zugeordneten Flächen auf. Wird eine sehr große Anzahl an Örter gebaut (3. Zeile in der Tabelle) kann der Gewölbeeffekt nach Salamon nicht mehr berücksichtigt werden und die Belastung erreicht die Belastungswerte der Theorie der zugeordneten Flächen (100%).

Besitzt nun ein Abbaufeld oder ein Abbaubereich gegenüber der Überlagerung eine eher geringe Breite, führt der Ansatz der Theorie der zugeordneten Flächen zu einer unnötigen Überdimensionierung der Bergfesten, da die Belastung überschätzt wird.

Die Festenbelastung muss in diesem Fall individuell untersucht werden. Dazu können entweder empirische Abschätzungen, wie die von Salamon, oder das Hilfsmittel der numerischen Simulation herangezogen werden.

Diese Diskrepanz bezüglich der Annahme der Belastung zwischen der Theorie der zugeordneten Flächen und des Ansatzes von Salamon (Berücksichtigung des Gewölbes) kann zu drastischen Auswirkungen führen.

Die Beurteilung der Festigkeit einer Abbaufeste in einer Abbauabteilung unterkritischer Breite, auf der Basis visueller Beobachtungen oder Verformungsmessungen, kann zu einer Überschätzung der Festenfestigkeit führen, da die tatsächliche Festenbelastung deutlich geringer ist, als jene auf Basis der Theorie der zugeordneten Flächen ermittelten Belastung. Dieser Fall ist kritisch zu beurteilen, da die daraus abgeleitete Annahme einer zu hohen Festigkeit, vor allem bei breiteren Abbauabteilungen, zu einem regionalen Festenversagen führen kann.

4.4 Geometrische Veränderung des Abbaufeldes

Wie bereits im Kap. 4.3.2 auf S.4-14 über die verformungskontrollierte Situation bei der Belastung der Bergfesten dargelegt, hängt die Höhe der Festenbelastung im großen Maße von der Geometrie des Baufeldes ab.

In einem derartigen System hängt die Festenbelastung einerseits von den Verformungen des Gebirges um den Abbau und andererseits von der Festenhöhe (bei konstantem Festenquerschnitt) ab. Da sich jedoch einer der beiden oder beide Parameter im Laufe des Abbaus einer „Post Pillar“ Abteilung ändern, hat dies zur Folge, dass sich auch die Festenbelastung ändern wird.

Die geometrische Veränderungen des Abbaufeldes betreffen, sowohl die Höhe des Abbaufeldes, bedingt durch den scheibenweisen Abbau von unten nach oben, als auch die Breite des Abbaufeldes. Ein großer Vorteil des Abbaufahrens ist der Freiheitsgrad des Abbaus in lateraler Richtung, dh. innerhalb jeder aktiven Abbauscheibe kann der Abbau ausgedehnt bzw. zurückgenommen werden.

Die größten Herausforderungen bei der Analyse der gebirgsmechanischen Auswirkungen des „Post Pillar“ Abbaufahrens stellen die, bedingt durch den Abbau, hervorgerufenen geometrischen Veränderungen des Abbaufeldes dar.

Beim Abbau der untersten Abbauscheibe entwickelt sich das Abbaugeschehen, bei konstanter Abbauhöhe, in die Breite. Üblicherweise wird der Abbau mit einer Abbauhöhe von ca. zwei Abbauscheiben lateral bis an die Grenze der Lagerstätte vorangetrieben. In dieser Situation nimmt die Belastung der Bergfeste mit der Breite zu. Die Belastungen der Bergfesten innerhalb des Abbaubereiches sind unterschiedlich und hängen von der Lage der individuellen Bergfesten im Abbaufeld ab. Im Kapitel 4.3 auf S. 4-12 wird dieser Umstand als verformungskontrollierte Belastungssituation von Bergfesten dargestellt. Bei einem breiter werdenden Abbaufeld können die Gebirgsspannungen nicht mehr in diesem großen Umfang an den seitlichen Auflagern aufgenommen werden. Betrachtet man den Extremfall eines sehr ausgedehnten Abbaufeldes, können keine Kräfte mehr seitlich abgeleitet werden und die Belastung der Bergfesten innerhalb des Abbaus nähert sich der Belastung nach der Theorie der zugeordneten Flächen an.

Ist die Lagerstätte auf diese Weise auf einer Höhe komplett mit einer Mächtigkeit von zwei Abbauscheiben mit einem Örterbau unterschritten, entwickelt sich der Abbau in die Höhe.

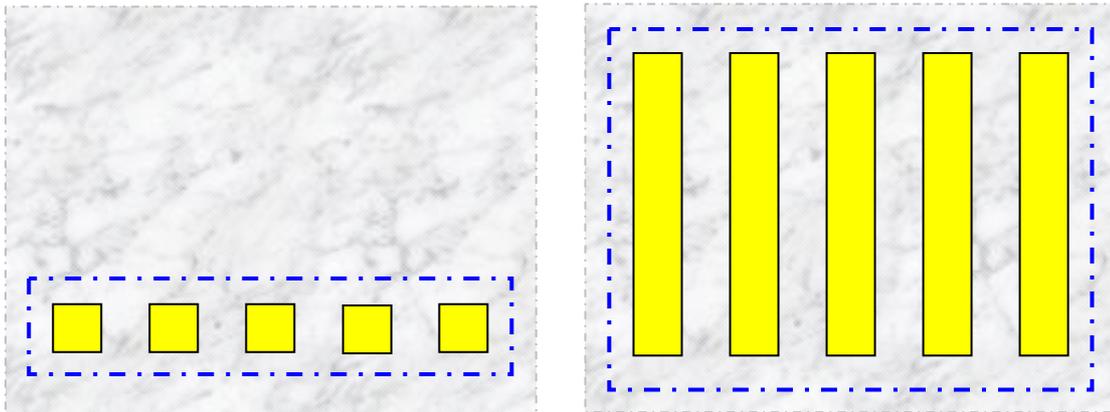


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines Abbaufeldes nach dem Abbau einer Scheibe (linke Seite) und dem Abbau mehrerer Scheiben (rechte Seite). Die gelben Felder sollen die gebauten und wieder versetzten Örters symbolisieren.

Ausgehend von den beiden aufgefahrenen Örtersbauscheiben, wird der Abbau mittels eines Firstverhiebes schwebend vorangetrieben. Bei gleichbleibender Breite des Abbaufeldes und unter ständigem Nachführen des Versatzes, entwickelt sich das Abbaufeld, wie in Abbildung 4-9 S. 4-19 dargestellt, von einer eher flachen Geometrie zu einer kubischen. Damit verbunden ist eine Änderung des Verformungsverhaltens der Bergfeste. Dies kann an Hand eines sehr einfachen Modells veranschaulicht werden:

Die Bergfesten können in einer sehr vereinfachten Art und Weise als Druckstäbe abgesehen werden. Die Steifigkeit einer Bergfeste [k] kann mit den formalen Beziehungen der Steifigkeit eines Zug- bzw. Druckstabes angenähert werden und beinhaltet den Elastizitätsmodul [E] des Gebirges, die Querschnittsfläche der Bergfeste [A] und die Höhe [H] derselben.

$$k = \frac{E * A}{H}$$

Formel 4-7. Formale Beziehung zur Abschätzung der Steifigkeit von Bergfesten. Qualitative Beschreibung.

Dieser Zusammenhang vernachlässigt die Randbedingungen der Bergfeste, den Kontakt zwischen der Bergfeste und dem Gebirge, zeigt aber die qualitativen Abhängigkeiten der Steifheit von Bergfesten.

Der Elastizitätsmodul als Materialeigenschaft wird zusammen mit der Geometrie, über die Höhe und der Querschnittsfläche der Bergfeste, zu der Systemeigenschaft „Steifigkeit“ übergeführt. Aus dieser einfachen Beziehung können bereits die grundlegenden Schlüsse herausgelesen werden. Die Steifigkeit der Bergfesten hängt natürlich vom Elastizitätsmodul, als Materialeigenschaft, und von den geometrischen

Randbedingungen der Bergfesten ab. Bei gegebener Höhe einer Bergfeste verhalten sich Bergfesten mit einem größerem Festenquerschnitt A steifer, „härter“ als Bergfesten mit einem kleineren Querschnitt. Da im Regelfall aber der Querschnitt der Bergfesten über den gesamten Abbaubereich konstant ist, besitzt die Höhe der Bergfeste den größten Einfluss auf das Verhalten des Systems „Bergfeste“. Werden im Zuge des Abbaus die Bergfesten höher, verhalten sie sich weicher und übertragen weniger Kräfte.

Umgekehrt kann man auch beobachten, dass die „härtesten“ Bergfesten mit der kürzesten Höhe, innerhalb der ersten beiden Abbauscheiben zu erwarten sind. In dieser Abbauphase werden die höchsten Kräfte über die Bergfesten übertragen und am ehesten Überbelastungserscheinungen beobachtet.

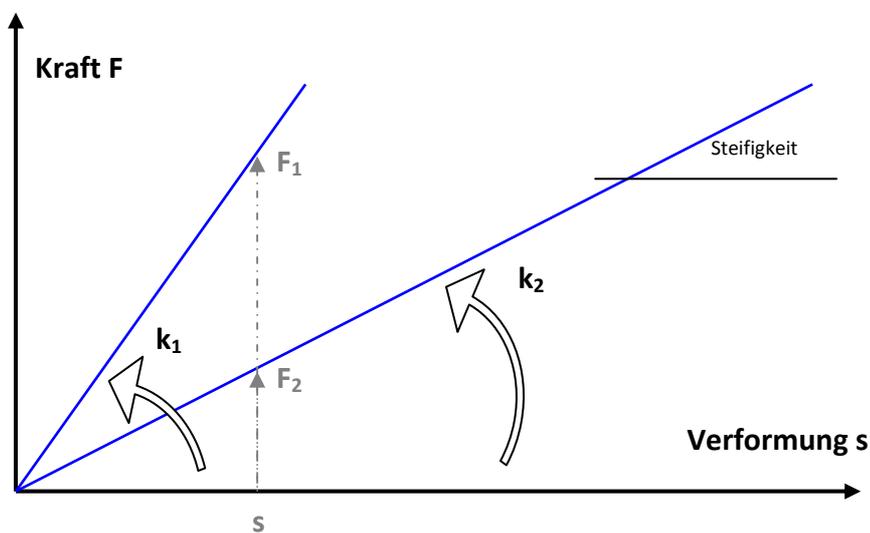


Abbildung 4-10: Darstellung der Unterschiede verschiedener Systemsteifigkeiten bei einer verformungskontrollierten Belastung.

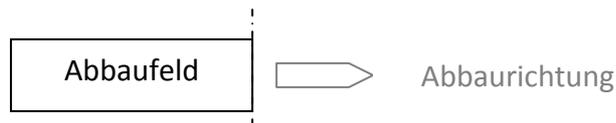
Liegt in einem System, wie z.B. beim „Post Pillar“ Abbauverfahren, ein verformungskontrollierter Zustand vor, hängt die Kraftübertragung auf die Bergfesten von deren Steifigkeit ab. Das Verformungsverhalten der Bergfesten innerhalb der ersten Abbauscheiben gestaltet sich steifer und es werden mehr Kräfte über die Festen übertragen. Höhere Bergfesten verhalten sich „weicher“ und übertragen nur mehr einen geringeren Anteil der Kräfte. Dies bedeutet wiederum, dass die Auflager der Abbaubteilungen stärker belastet werden müssen, um das Kräftegleichgewicht zu gewährleisten.

Die dem System aufgezwungenen Konvergenzen ergeben sich natürlich aus den Gebirgsspannungen und den Verformungsparametern des Gebirges, der maßgebende Anteil ergibt sich aber aus den geometrischen Veränderungen des Abbaufeldes.

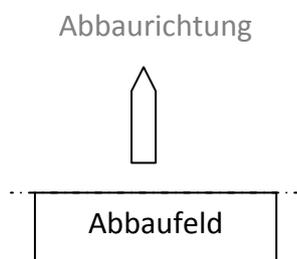
Zu diesem Zweck werden drei unterschiedliche Festensysteme A, B & C betrachtet und analysiert. Im ersten Festensystem A werden die Auswirkungen des Abbaus in die Breite analysiert und zusammengefasst.

Festensystem A

Die Abbauörter entwickeln sich bei konstanter Abbauhöhe in die Breite.

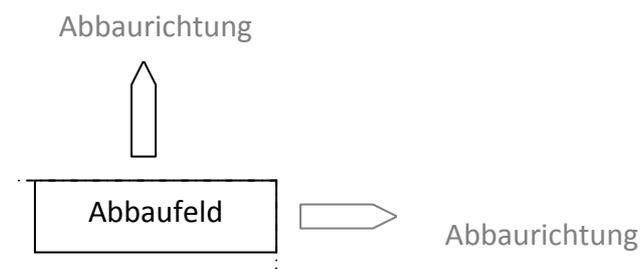


Festensystem B



Das Festensystem „B“ soll die Auswirkungen des Abbaus in die Höhe veranschaulichen.

Festensystem C



Das Festensystem „C“ stellt eine Kombination zwischen den Festensystemen A & B dar. Die Auswirkungen des Abbaus in die Breite und die Auswirkungen des Abbaus in die Höhe werden zeitgleich analysiert.

4.4.1 Festensystem A

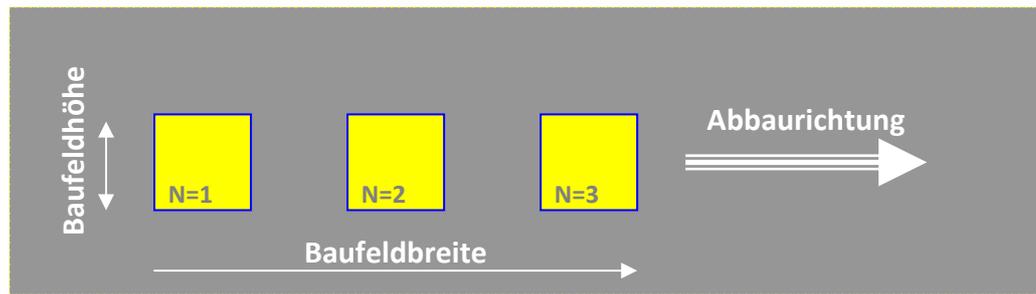


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung des Festensystems A

Anhand des ersten Festensystems A sollen die Auswirkungen des Abbaus in die Breite dargestellt und analysiert werden. Unter Beibehaltung einer konstanten Abbauhöhe (= Baufeldhöhe) entwickelt sich der Abbau in die Breite.

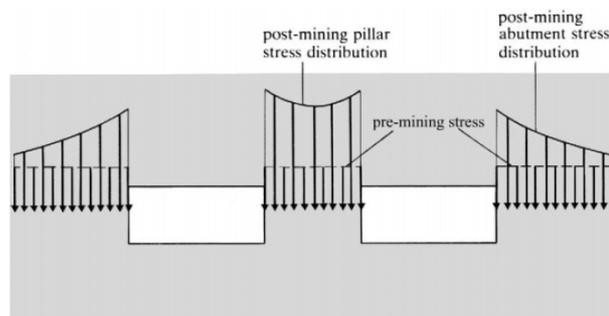


Abbildung 4-12: Veränderung des vertikalen Spannungsfeldes im Zuge des Abbaus (Brady, 2006).

Der Abbau verändert naturgemäß das Spannungsfeld in unmittelbarer Umgebung des Abbaus. Brady & Brown zeigen diese Änderungen deutlich am Beispiel der vertikalen Spannungen. Die Vertikalkräfte werden nach dem Auffahren der Abbaue, in diesem Fall nach dem Auffahren der Örter, über die Bergfesten und den seitlichen Auflagerbereichen abgeleitet. Ausgehend vom primären Spannungszustand erhöhen sich nun die Spannungen in diesen Bereichen in Abhängigkeit verschiedener Parameter. Neben der Geometrie der Örter und der Bergfesten (Ausbringen) und den Materialeigenschaften des Gebirges und der Bergfesten, ist die Breite des Abbaufeldes und das Verhältnis zwischen der Breite des Abbaufeldes und der Teufe ein wichtiger Parameter für das Maß dieser Spannungsverteilung.

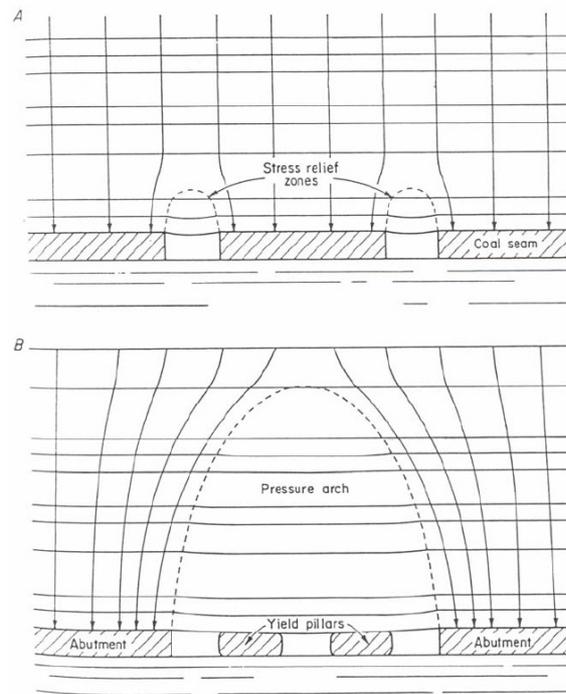


Abbildung 4-13: Darstellung des Spannungsgewölbes über einem kleinräumigen Örterbau am Beispiel eines Abbaus in der Kohle (Mark, 1990).

Abhängig von der Breite des Abbaufeldes bildet sich ein unterschiedlich stark ausgeprägtes Spannungsgewölbe aus. Mark zeigt sehr deutlich die Abhängigkeit des Gewölbes von der Breite des Abbaufeldes anhand der Verteilung der Kraftlinien in unmittelbarer Nähe des Abbaufeldes.

Oravec (1977) zeigt den Einfluss der Breite des Abbaufeldes auf die Spannungsumlagerungen in Richtung der seitlichen Auflager. Oravec führte die dargestellten Berechnungen zwar für unterschiedliche Flöze (Teufenlagen) durch, der Einfluss der Breite des Abbaufeldes auf die unmittelbare Spannungssituation kann aber trotzdem analysiert werden.

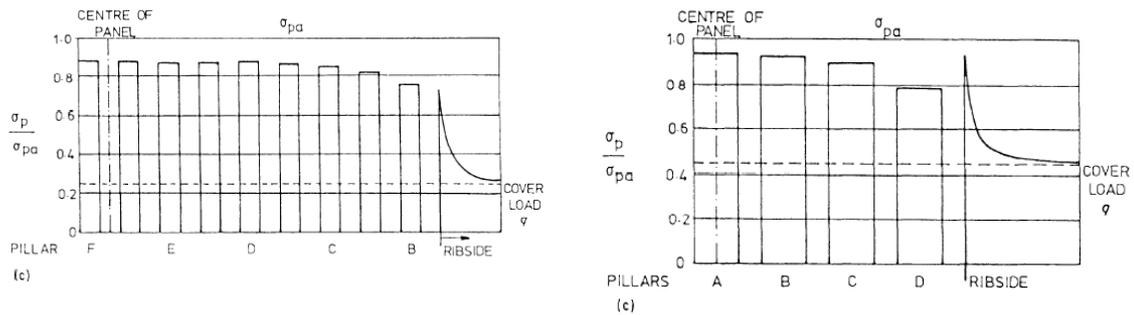


Abbildung 4-14: Festenbelastung in Abhängigkeit der Breite des Abbaufeldes. Es ist die Mitte des Abbaufeldes und der Beginn des seitlichen Auflagers angegeben. σ_{pa} Festenspannung nach der Theorie der zugeordneten Flächen. σ_p errechnete Festenbelastung als Funktion der Baufeldbreite und Lage der Feste im Baufeld (Oravec 1977).

Ist die Breite des Abbaufeldes gering (rechte Abbildung) werden die Kräfte in höherem Maße in die Auflager über ein Spannungsgewölbe abgeleitet. In der linken Abbildung ist die Spannungsverteilung eines eher breiteren Abbaufeldes dargestellt. Es kann eine eher gleichförmige Belastung der Bergfesten innerhalb des Abbaufeldes, und eine geringere Spannungskonzentration im Bereich der seitlichen Auflager beobachtet werden. In diesem Fall werden die Kräfte in einem größeren Ausmaß über die Bergfesten abgeleitet und die Anwendung der Theorie der zugeordneten Flächen würde in diesem Fall realistischere Werte für die Belastung der Bergfesten erbringen, als in dem Fall eines nicht so breiten Abbaufeldes (rechte Abbildung).

Je breiter sich das Abbaufeld gestaltet oder je näher man einem Teufen- zu Breitenverhältnis von ca. 1,3 kommt, desto eher entsprechen die zu erwartenden Festenbelastungen den Ergebnissen der Theorie der zugeordneten Flächen. Bestimmt man aber in einem kleinräumigen Abbaufeld die Belastung der Bergfesten nach der Theorie der zugeordneten Flächen, ergeben sich zu hohe Festenbelastungen und die damit verbundenen ökonomischen Nachteile.

Wertet man die Ergebnisse von Salamon (1983) Abbildung 4-8 S.4-16 aus, dann stellt sich der Zusammenhang zwischen Baufeldgröße (Zahl der Feste) und der maximalen Festenbelastung, wie in Abbildung 4-15 gezeigt, dar.

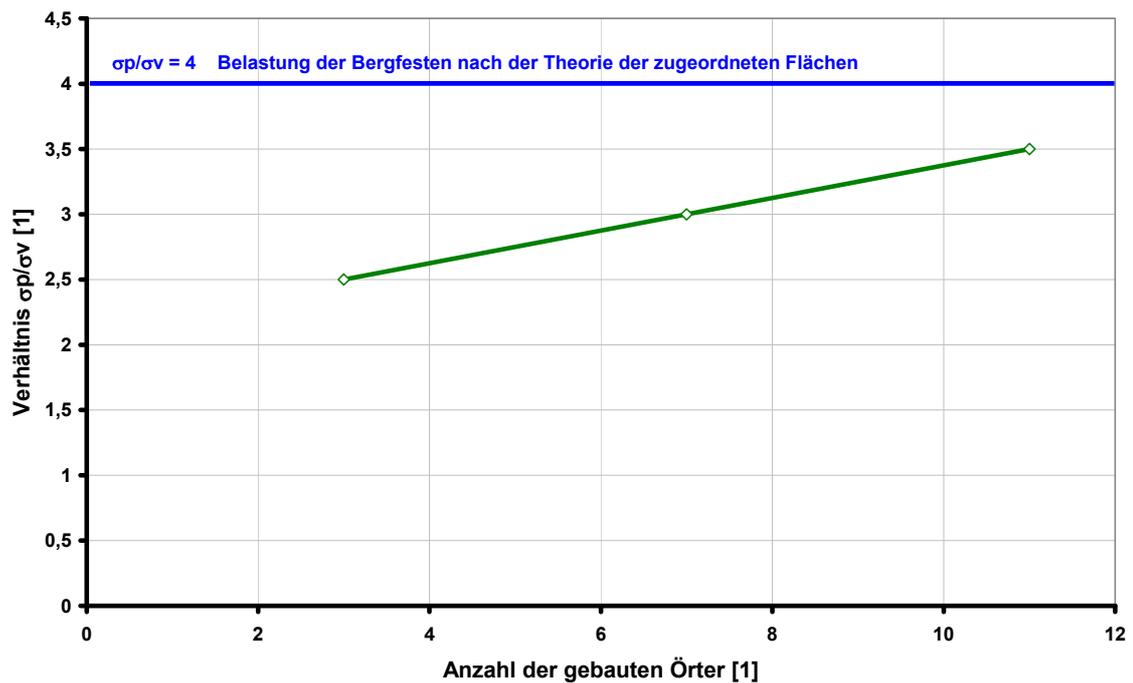


Abbildung 4-15: Zusammenhang zwischen der Belastung der Bergfesten und der Breite der Abbauabteilung, ausgedrückt in der Zahl der gebauten Festen für ein Ausbringen von 75 % und der Annahme eines „weichen Flözes“, dh. der Elastizitätsmodul des Flözes beträgt 25% des Gebirges (siehe Zusammenhänge von Salamon Abbildung 4-8 S.4-16).

Auf Grund der Tatsache, dass In-Situ Spannungsmessungen im Gebirge sehr kostenintensiv und schwer durchzuführen sind und die numerische Beurteilung der reduzierten Belastung innerhalb des Spannungsgewölbes sich sehr kompliziert gestaltet, stellt die Bestimmung der Belastung einer Bergfeste, nach Ansicht des Autors dieser Arbeit, eine ebenso große Herausforderung dar, wie die Bestimmung der Festigkeit einer Bergfeste.

4.4.2 Festensystem B

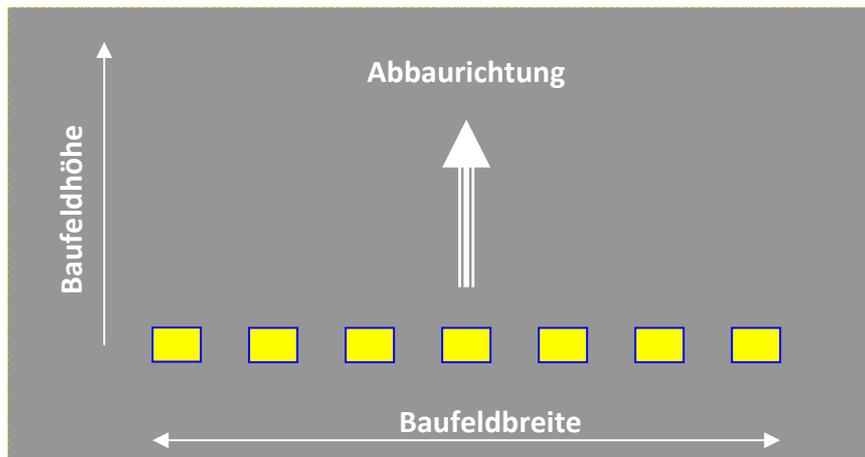


Abbildung 4-16: Schematische Darstellung des Festensystems B

Auf Grund der Tatsache, dass sich der Abbau beim „Post Pillar“ Abbauverfahren nicht nur in die Breite (Festensystem A) sondern hauptsächlich in die Höhe entwickelt, müssen auch diese Auswirkungen näher untersucht werden. Für die Darstellungen der Auswirkungen des Festensystems B wird die Breite des Baufeldes konstant belassen und nur die Höhe des Abbaufeldes variiert.

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitels angemerkt, kann die Steifigkeit [k] einer Bergfeste mit den formalen Beziehungen der Steifigkeit eines Druckstabes stark vereinfacht angenähert werden und beinhaltet den Elastizitätsmodul [E] des Gebirges, die Querschnittsfläche der Bergfeste [A] und die Höhe [H] derselben.

$$k = \frac{E * A}{H}$$

Formel 4-8: Formale Beziehung zur Abschätzung der Steifigkeit von Bergfesten. Qualitative Beschreibung.

Diese Beziehung berücksichtigt weder Inhomogenitäten im Gebirge noch Spannungseffekte am Hangend- bzw. Liegendkontakt der Bergfeste. Mit diesem Zusammenhang soll lediglich der Einfluss der Länge der Bergfeste (Höhe) und der Querschnitt der Bergfeste auf das Verformungsverhalten (Steifigkeit) des Systems „Bergfeste“ dargestellt werden.

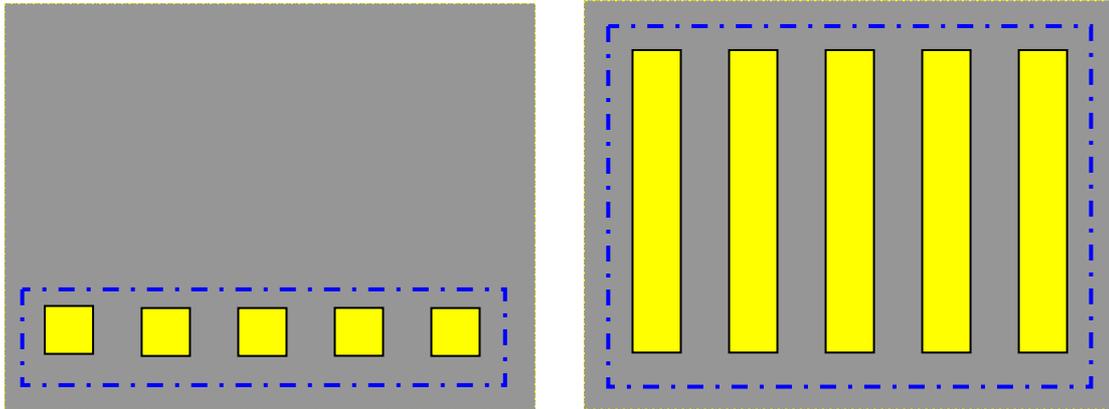


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung eines Abbaufeldes nach dem Abbau einer Scheibe (linke Seite) und dem Abbau mehrerer Scheiben (rechte Seite). Die gelben Felder sollen die gebauten und wieder versetzten Örtersymbolisieren.

Nach Abbau der ersten Scheiben im „Post Pillar“ Abbaufahren ergeben sich, bei gegebenem Festenquerschnitt, gedrungene Festen mit geringer Höhe und einer daraus resultierenden hohen Steifigkeit. Je weiter der scheibenweise Abbau voranschreitet, desto höher werden die Festen und damit auch weicher.

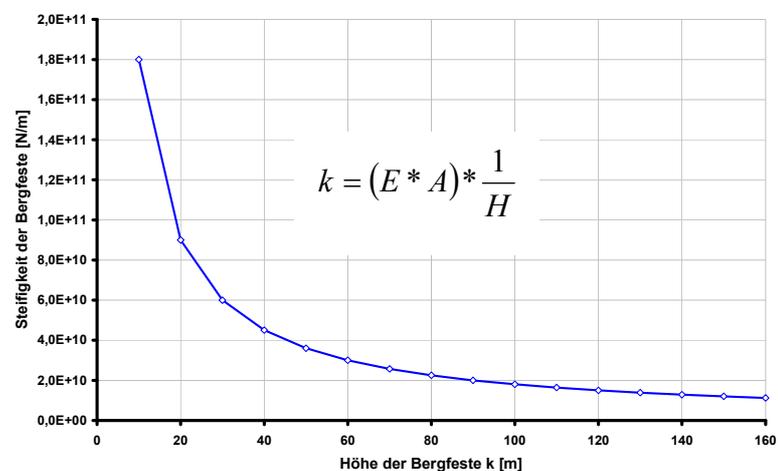


Abbildung 4-18: Abhängigkeit der Steifigkeit einer Bergfeste von der Höhe derselben nach dem Zusammenhang von Formel 4-8 S.4-26. $E_{mod} = 18 \text{ GPa}$. $A = 100 \text{ m}^2$

Da die Belastung der Bergfesten hauptsächlich verformungskontrolliert in das System eingebracht wird, hat die Steifigkeit der Bergfesten einen sehr großen Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems⁸.

⁸ Siehe auch Abbildung 4-10 auf S.4-20 inklusive Analyse.

Als belastungskontrollierter Anteil wird der Anteil der Last angenommen der, über dem Abbau als Bruchmaterial liegt und von den Bergfesten als „Totlast“ getragen werden muss.

Als kleiner Vorgriff auf die Ergebnisse der numerischen Simulation sollen hier an dieser Stelle Abbildungen von Versagensbereichen spezieller Abbausituationen besprochen werden. Im Zuge des Abbaus von unten nach oben und unter der Annahme spezieller Randbedingungen, dh unter der Berücksichtigung eines Seitendruckbeiwertes k von $k=2$ und „weicher“ Bergfesten, sind ausgedehnte Versagensbereiche unmittelbar über der Abbaubteilung ersichtlich. Auf Grund der ausgeprägten und sehr dominanten Horizontalspannungsauflager unmittelbar über dem Abbaubereich bilden sich diese Versagensbereiche, ab einem Höhen- zu Breitenverhältnis der Abbaubteilung von >1 , aus⁹.

Ab einer, durch äußere Einflüsse wie dem Seitendruckbeiwert k und dem Elastizitätsmodul der Bergfesten beeinflussten, Höhe des Abbaubereiches bilden sich unmittelbar darüber ausgedehnte Versagenszonen aus. Mit jedem Abbauschritt wandert der Abbau nun durch diese Zerrüttungszone und erhöht, durch die Geometrieänderung des Abbaufeldes, seine Ausdehnung. Dieses zerrüttete Material liegt nun als sog. Totlast auf den Bergfesten auf und bildet den spannungskontrollierten Anteil der Belastung.

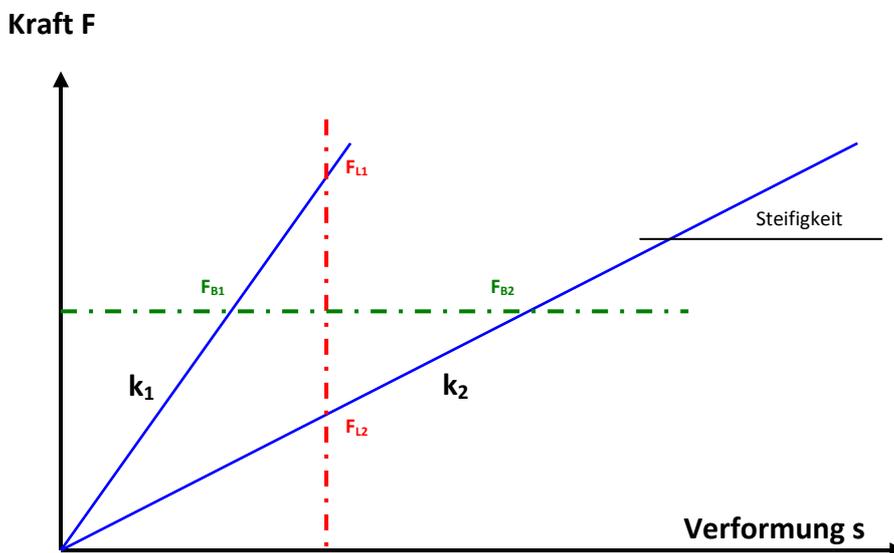


Abbildung 4-19: Darstellung der Auswirkung unterschiedlicher Systemsteifigkeiten am Beispiel einer lastkontrollierten und einer verformungskontrollierten Belastungsannahme.

⁹ Siehe auch Abbildung 5-39 auf S.5-31 inklusive Beschreibung.

Die rote strichpunktierte Linie zeigt den Zustand einer verformungskontrollierten Lastannahme. Bei einer gegebenen Verformung des Systems ergeben sich durch die unterschiedlichen Steifigkeiten, unterschiedliche Belastungen innerhalb des Systems (FL1 & FL2). Der Abbau entwickelt sich in die Höhe, die Bergfesten innerhalb des Abbaubereiches werden schlanker und somit weicher und die Belastung in den Bergfesten reduziert sich von F_{L1} auf F_{L2} . Die dem System aufgezwungenen Konvergenzen verändern sich kontinuierlich mit dem Abbau in die Höhe.

Die verformungsabhängige Komponente soll in diesem Kapitel durch ein einfaches Gedankenexperiment veranschaulicht werden:

Durch den scheibenweisen Abbau von unten nach oben ändert sich die Geometrie des Abbaufeldes von einem liegenden Rechteck, oder einer liegenden Ellipse, zu einem stehenden Rechteck bzw. einer stehenden Ellipse. Siehe auch Abbildung 4-20 auf der Seite 4-29.

Nach dem Abbau weniger Scheiben zeigt sich das „Post Pillar“ Abbaufeld als liegendes Rechteck, in welchem die Kräfte vertikal über die Bergfesten vom Hangenden zum Liegenden abgeleitet werden.

Die Bergfesten verhalten sich auf Grund ihrer gedrungenen Geometrie relativ steif, übertragen dadurch große Kräfte bei geringen Konvergenzen. Bedingt durch die große Steifigkeit ist auch die Zusammendrückbarkeit der Bergfesten im Abbaubereich und somit die Konvergenz begrenzt.

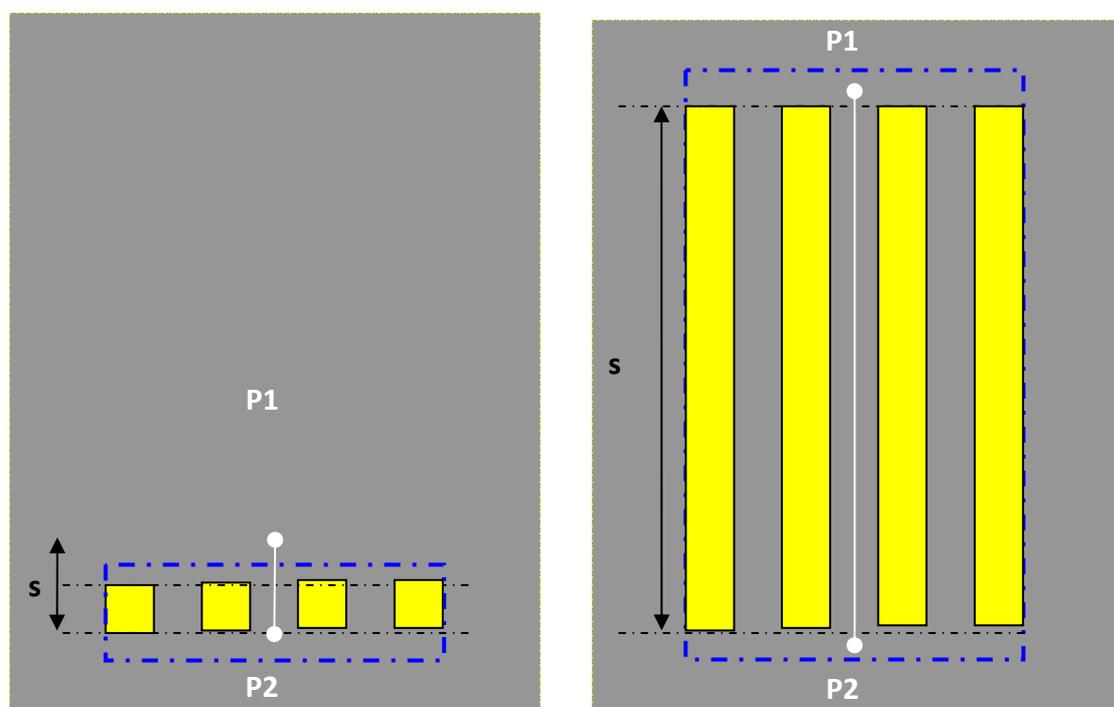


Abbildung 4-20: Gedankenmodell zur Veranschaulichung der Verformungsänderungen im Zuge des Abbaus.

Abbildung 4-20 zeigt die idealisierten Stationen eines „Post Pillar“ Abbaus. Der Abbau bewegt sich von unten nach oben, Versatz wird dem Abbau begleitend nachgeführt und für das Gedankenmodell werden zwei virtuelle Messpunkte, jeweils am unteren und am oberen Rand des Abbaufeldes, gesetzt. Punkt P1 bewegt sich dabei mit dem Abbau nach oben. Im Zuge des Abbaus verändert sich nun der relative Abstand s zwischen den zwei Messpunkten und liefert einen möglichen Hinweis auf den Einfluss der verformungsabhängigen Belastung des Festensystems am Beispiel des Festensystems B (Abbau in die Höhe).

Nach dem Abbau der ersten Abbauscheiben stellt sich der Abbau als liegendes Rechteck dar. In einem gegebenem Spannungsregime wird sich der Abstand zwischen den Punkten P1 und P2 verkleinern. Diese Veränderung bezieht sich auf den primären Zustand, d.h. auf den unverritzten Zustand vor dem Abbau der ersten Scheibe.

Durch den Abbau werden die Vertikalspannungen in den Bergfesten erhöht, die Bergfesten werden über den primären Spannungszustand hinaus weiter gestaucht und der Abstand zwischen den Punkten verringert sich gegenüber dem Abstand der Punkte im primären Zustand. Schreitet nun der Abbau voran und die Geometrie des Abbaufeldes nähert sich einem stehenden Rechteck, wird das horizontal sehr weiche Abbaufeld zusammengedrückt und vertikal „ausgepresst“.

Je höher das Verhältnis der Horizontalspannungen zu den Vertikalspannungen im Gebirge ist (Seitendruckfaktor k), desto ausgeprägter fällt diese horizontale Stauchung und die damit verbundene vertikale Längung aus.

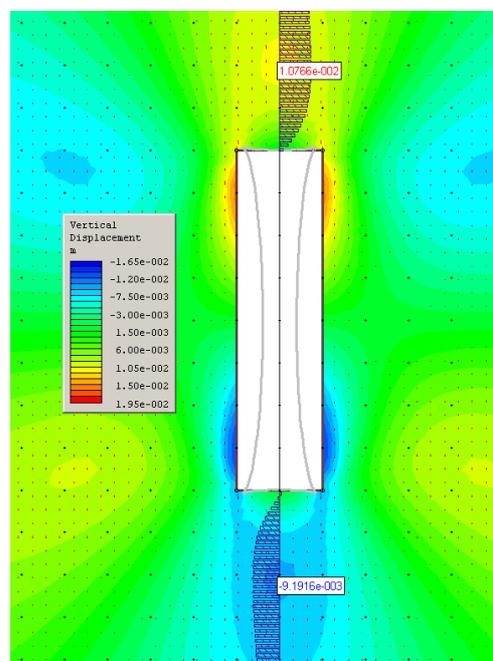


Abbildung 4-21: Vertikalbewegung in unmittelbarer Nähe einer langgestreckten Abbaukammer. Die graue Linie zeigt den überhöhten Verlauf der Totalkonvergenzen am Rand der Kammer an.

Auch diese sehr einfache Simulation zeigt, dass bei einem fortgeschrittenem „Post Pillar Abbaufeld“ keine durch den Abbau verursachten Vertikalkonvergenzen unmittelbar (direkt) über und unter dem Abbaufeld festzustellen sind. Ab einer Höhe von ca. 80m über bzw. auch unter dem Abbaufeld, diese entspricht etwa der Breite des Abbaus, ist das „Ausquetschen“ des Abbaubereiches feststellbar.

Umgekehrt kann in diesem Gedankenmodell auch der Rückschluss gezogen werden, dass bei keiner Veränderung der Vertikalkonvergenzen auch mit keiner Spannungserhöhung in den Bergfesten innerhalb des Abbaubereiches zu rechnen ist. Und falls in den Ergebnissen der Numerischen Simulation eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Punkten P1 und P2 (Abbildung 4-20 Seite 4-29) gegenüber dem primären Zustand zu beobachten ist, ist sogar von einer Festenspannung unter dem Niveau der Primärspannung im Gebirge auszugehen.

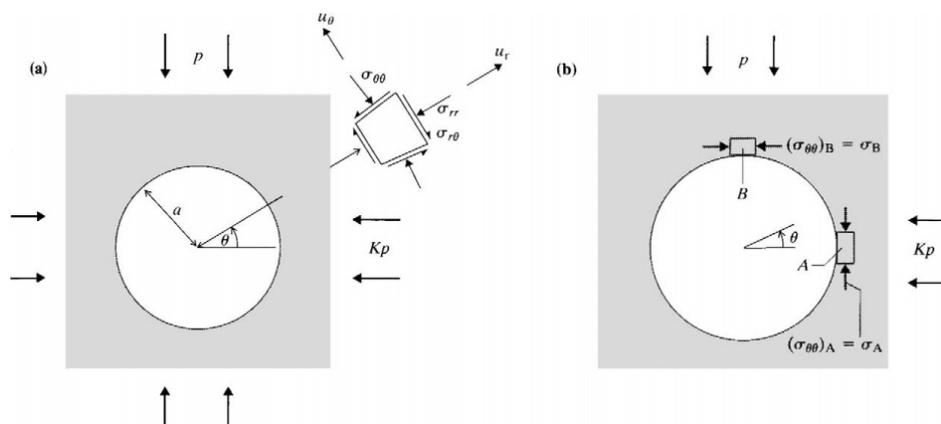


Abbildung 4-22: Bezeichnung der geometrischen Parameter und Richtungskonventionen für die Beschreibung der Konvergenzen um einen kreisrunden Hohlraum nach Brady & Brown (2006).

Die radialen Konvergenzen u_r können nach folgendem Zusammenhang abgeschätzt werden:

$$u_r = -\frac{pa^2}{4Gr} \left[(1 + K) - (1 - K) \left\{ 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right]$$

Formel 4-9: Radialkonvergenzen um einen kreisförmigen Hohlraum nach Brady & Brown (2006).

Setzt man die Konvergenzen am Firstpunkt des kreisförmigen Hohlraumes (Winkel $\theta = 90^\circ$) Null, erhält man einen Seitendruckbeiwert ($k=2,67$), bei welchem gerade der Übergang zur Expansion zu beobachten ist, dh. unabhängig von der Tiefe ergibt sich diese vertikale Expansion für einen kreisförmigen Hohlraum im elastischen Raum ab einem Seitendruckbeiwert von $K=2,43$ bei einer Querdehnungszahl $\nu=0,15$ [1].

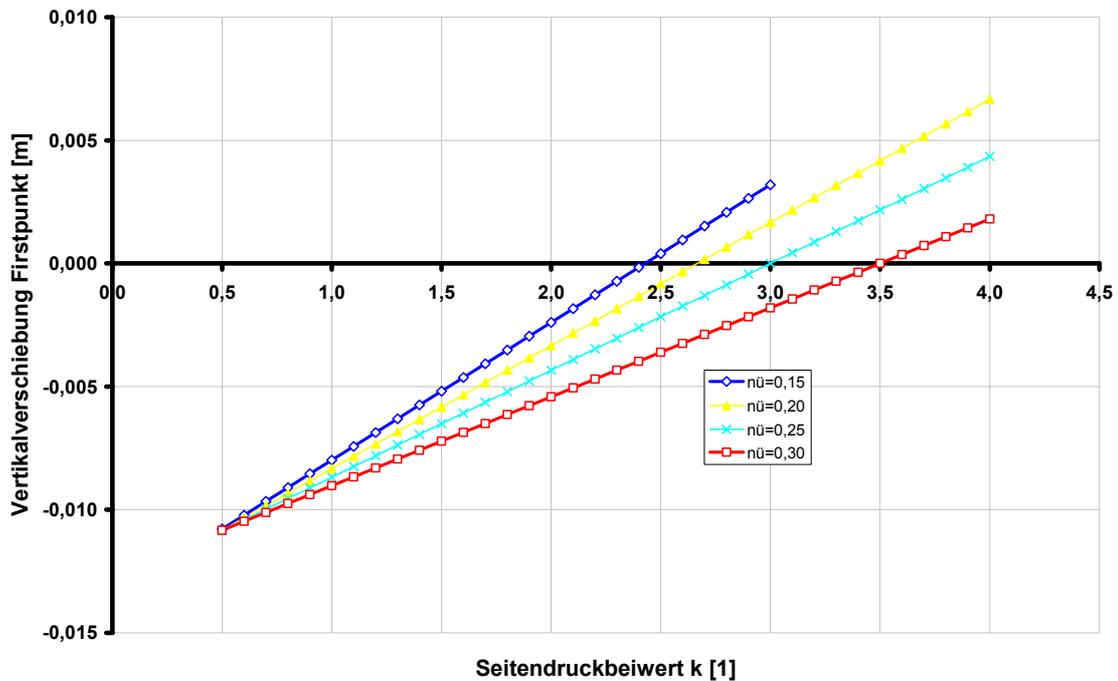


Abbildung 4-23: Vertikalverschiebung im Firstpunkt eines kreisrunden Hohlraumes in Abhängigkeit der Querdehnungszahl ν und dem Seitendruckbeiwert k .

4.4.3 Festensystem C

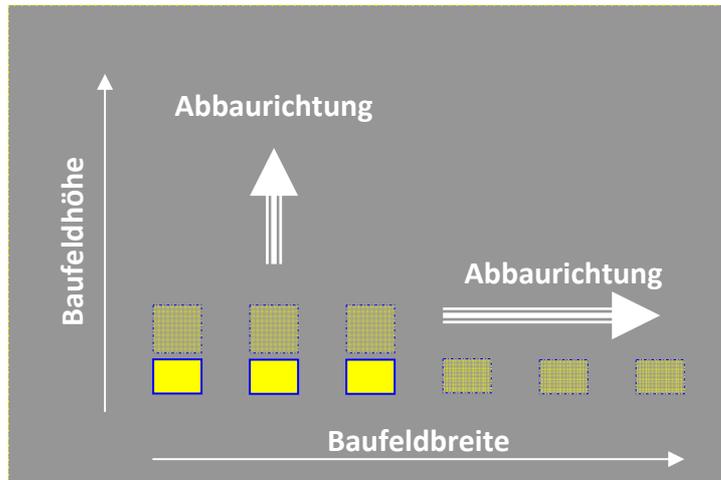


Abbildung 4-24: Schematische Darstellung des Festensystems C.

Im Falle eines einfallenden Lagerstättenkörpers (siehe Abbildung 4-25) entsteht, bei systematischer Anwendung des „Post Pillar“ Abbauverfahrens, ein Hybridsystem zwischen den Festensystemen A und B.

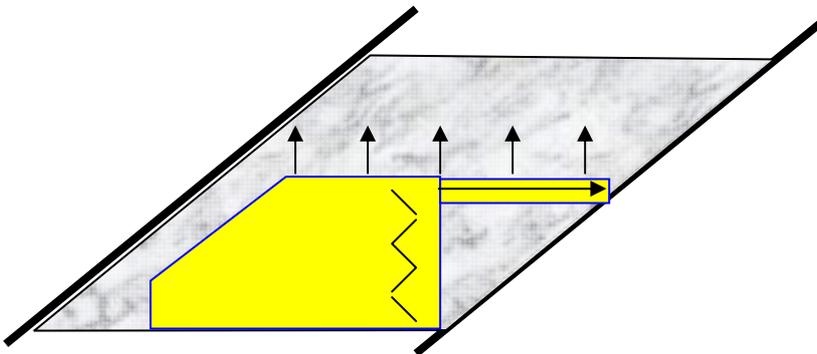


Abbildung 4-25: Erweiterung eines bestehenden „Post Pillar“ Abbaufeldes in die Breite und nach oben.

Durch die Verbreiterung ändert sich die Breite des Baufeldes und somit die Belastung der Bergfesten in einem entscheidendem Maße. Infolge der unterschiedlichen Festenhöhen im Abbaubereich, kommt es zu sehr unterschiedlichen Festenbelastungen da im links davon liegenden Baufeld die Festen hoch, d.h. weich, und im rechts davon liegenden Bereich die Höhe der Festen gering ist, d.h. die Festen steif sind. Dieses Phänomen ist bei der Durchführung des „Post Pillar“ Verfahrens zu berücksichtigen.

Liegen, wie z.B. in der Breitenau (siehe Kap. 3.1.4 S.3-13), die Ausrichtungsbaue mit ihren belasteten Schutzfesten in der Lagerstätte, kann eine Verbreiterung des Abbaufeldes eine zusätzliche Belastung dieser Ausrichtungsbaue bedeuten.

4.4.4 Abschätzung der Festenbelastung über den Ansatz der Hypothese nach Winkler

Mit den derzeitigen Rechenkapazitäten und numerischen Programmen wird es schwierig bzw. sehr aufwändig die beschriebenen Variationen, vor allem die Veränderung der Abbaugeometrie, mit einer zufriedenstellenden Auflösung numerisch zu simulieren. Es müsste dabei nicht nur eine Bergfeste in ausreichender Auflösung, sondern ein gesamtes Abbaufeld inklusive der Interaktion zwischen der Bergfeste und dem Versatz simuliert werden. Vor allem müssten für Variationen der Eingangsparameter umfangreiche Programmier- und Simulierarbeit geleistet werden.

Unter Zuhilfenahme der Hypothese nach Winkler (Winkler, 1867) ist man in der Lage die Auswirkungen einer Vergrößerung des Abbaufeldes sowohl in die Breite als auch in die Höhe an Hand eines einfachen Modells abzubilden. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, hängt die Belastung der Bergfesten sowohl von der Breite des Abbaufeldes, als auch von der Höhe des Abbaubereiches ab. Mit der Hypothese nach Winkler kann man den Einfluss der Eingangsgrößen vereinfacht darstellen.

Die grundlegende Annahme ist, dass der eigentliche Abbaubereich durch eine Reihe von Federn mit einer bestimmten Steifigkeit angenommen wird. Im Zuge des Abbaus biegt sich nun das unmittelbare Hangende durch und induziert Konvergenzen in dem durch die Federn symbolisierten Abbaubereich. Das Verhalten des Abbaubereiches hängt von den induzierten Vertikalkonvergenzen und von den Eigenschaften der Feder, sprich des Abbaubereiches, ab. Ein hoher Abbaubereich mit schlanken Festen wird im Modell nach Winkler durch das Verhalten weicher Federn symbolisiert.

Salamon und Oravec (Salamon, 1976) wendeten das Modell von Winkler erfolgreich bei der Ermittlung der Belastung von Kohlefesten an:

Das unmittelbare Hangende des Abbaufeldes wird als Träger auf zwei Stützen angenommen. Dieser Träger hat ein Widerstandsmoment und weist unter der Beanspruchung einer „schlaffen Last“ [p] eine Durchbiegung δ_b auf. Diese Last ergibt sich aus dem vertikalen Anteil der primären Vertikalspannungen in der entsprechenden Teufenlage des Abbaubereiches.

Dieser Durchbiegung wirkt der Widerstand der Bergfesten [P] im Abbaubereich entgegen. Da die Durchbiegung des Biegebalkens δ_b die Kompression der Bergfeste δ_s darstellt, können die Beträge gleich gesetzt werden:

$$\delta_b = \delta_s$$

Formel 4-10

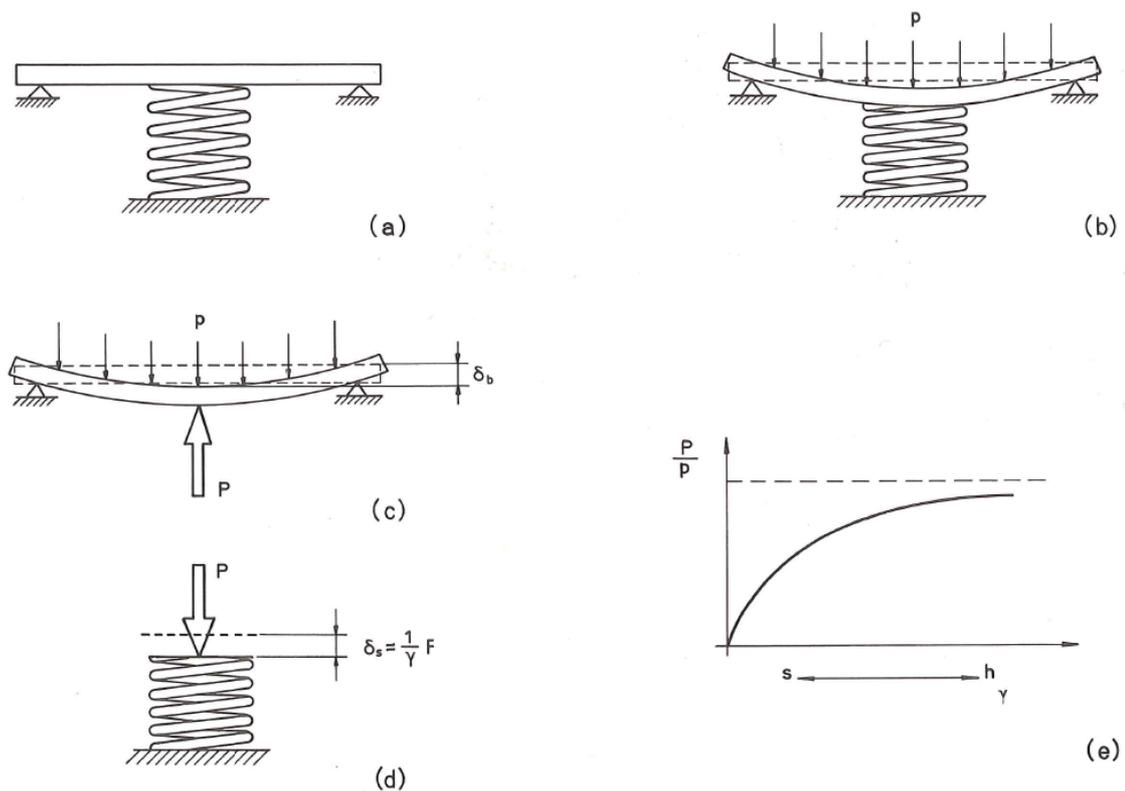


Abbildung 4-26: Vereinfachte Darstellung der Winkler Hypothese mittels eines Biegebalkens und einer Feder für die Anwendung beim Örtterbau (Salamon, 1976).

Die Durchbiegung des Biegebalkens ergibt sich aus:

$$\delta_b = \alpha_p - \beta_p$$

Formel 4-11

α & β sind Konstanten, welche das Verformungsverhalten des Biegeträgers beschreiben

Die Zusammendrückung der Feder beträgt:

$$\delta_s = \frac{1}{\gamma} * P$$

Formel 4-12

Setzt man nun die beiden Verformungen gleich erhält man folgenden Zusammenhang:

$$\alpha_p - \beta_p = \frac{1}{\gamma} * P$$

Formel 4-13

Löst man diesen Zusammenhang nun nach der Widerstandskraft P auf, erhält man die Kraft P welche der Durchbiegung des Balkens, d.h. des Gebirges entgegenwirkt.

$$P = \frac{\gamma * \alpha * p}{1 + \beta * \gamma}$$

Formel 4-14

α & β sind Konstanten und repräsentieren das Verformungsverhalten des Biegeträgers, d.h. des Gebirges. γ steht als Konstante für die Steifigkeit der Bergfeste, die der Durchbiegung des Biegeträgers entgegenwirkt.

Im vorliegenden Fall werden spezielle Annahmen getroffen, welche direkt zu den beschriebenen Konstanten führen und die Grundvoraussetzung für die vereinfachte Darstellung des „Post Pillar Abbaufahrens“ nach dem Ansatz der „Winkler Hypothese“ liefern.

Ein sehr wichtiger Parameter bei der Bestimmung der Belastung der Bergfesten nach dem Modell von Salamon ist die Art und Weise und das Maß der Durchbiegung des unmittelbaren Hangenden über dem Abbau. Diese Durchbiegung ist die Basis für die Reaktion des Abbaufeldes und damit für die Belastung der Festen selbst.

In der Literatur sind mehrere Ansätze für die Bestimmung dieser Durchbiegung des Hangendbereiches gegeben:

- Biegebalken mit zwei eingespannten Enden
- Biegeträger mit zwei losen Enden
- Durchbiegung der Firste eines Hohlraumes im elastischen Vollraum

Um die Ergebnisse der einzelnen Ansätze vergleichen zu können, sind sie an einem Hohlraum mit einer Breite von 100m angewendet worden.

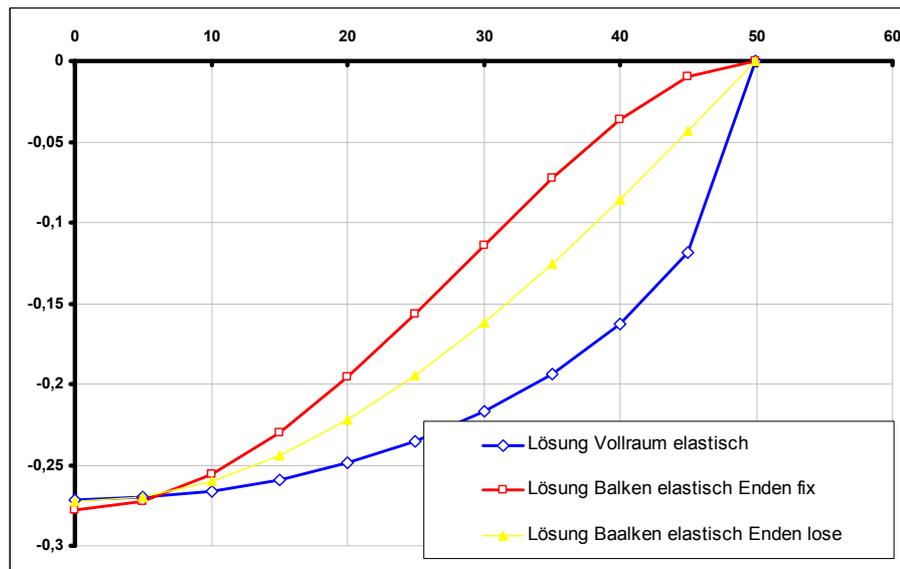


Abbildung 4-27: Verlauf der Durchbiegung für die Hälfte eines 100m breiten Abbaufeldes und für die drei beschriebenen Lagerungsarten des Biegeträgers.

Auf der Abszisse ist die halbe Firstlänge in Meter von 0 [m] bis 50 [m] aufgetragen. Der Nullpunkt auf der Abszisse entspricht der Mitte der 100m breiten Firste (obere Begrenzung des Abbaufeldes). Die drei eingetragenen Kurven entsprechen den Biegelinien der drei diskutierten Lagerungsfälle.

Die Ordinate zeigt die Vertikalkonvergenzen in Meter.

Die Balkenlösungen sind derart variiert worden, dass sich in der Mitte des Hohlraumes die selben Vertikalkonvergenzen ergeben, wie nach dem Ansatz der Firstdurchbiegung im elastischen Vollraum. Die Höhe des Balkens h ist für die verschiedenen Balken als zu variierender Parameter herangezogen worden. Um diese Vertikalkonvergenz in der Mitte des Hohlraumes zu erlangen, sind folgende Parameter verwendet worden:

Alle Fälle in Abbildung 4-27 sind mit den folgenden Materialparametern berechnet worden:

Länge des Hohlraumes	l	100	[m]
Belastung des Trägers	q	25	[MPa]
Elastizitätsmodul	E	18	[GPa]
Querdehnungszahl	ν	0,15	[1]
Breite des Balkens	b	1	[m]
Höhe des fixen Balkens	h	25	[m]
Höhe des losen Balkens	h	43	[m]

Tabelle 4-4: Materialparameter für die Anwendung der Hypothese nach Winkler.

Als Referenz diente die Durchbiegung in der Mitte der Firste welche sich aus der Lösung im elastischen Vollraum mit 27mm ergibt. Alle anderen Biegelinien sind an diesem Wert in der Mitte der Firste, über die Höhe des Balkens h , angepasst worden um Aussagen über die Natur des Verlaufes treffen zu können¹⁰.

Die Biegelinie eines Balkens mit zwei eingespannten Balkenenden:

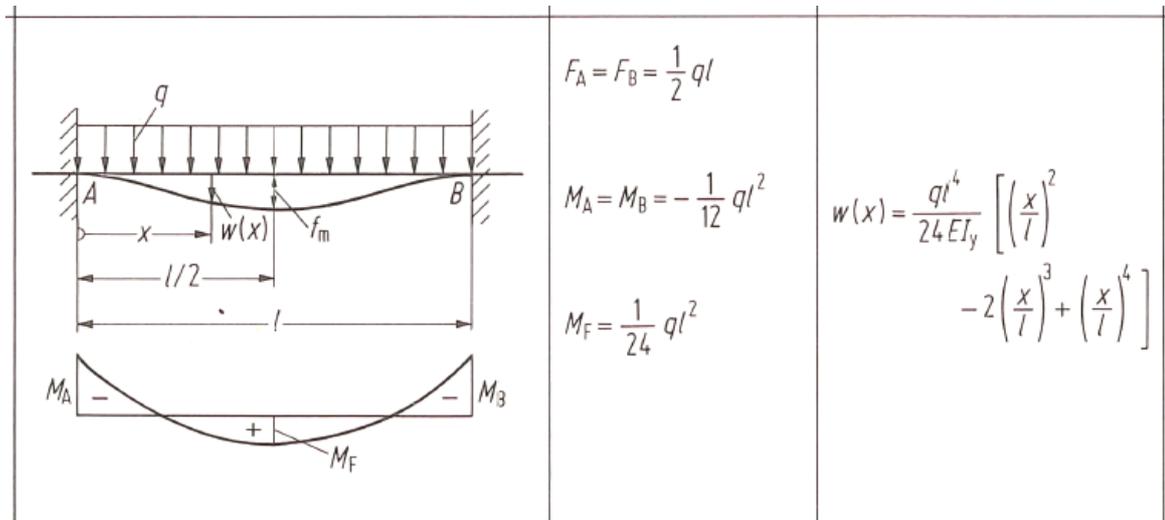


Abbildung 4-28: Biegelinie eines Balkens mit zwei eingespannten Balkenenden

Biegelinie eines Balkens mit einem Los- und einem Festlager:

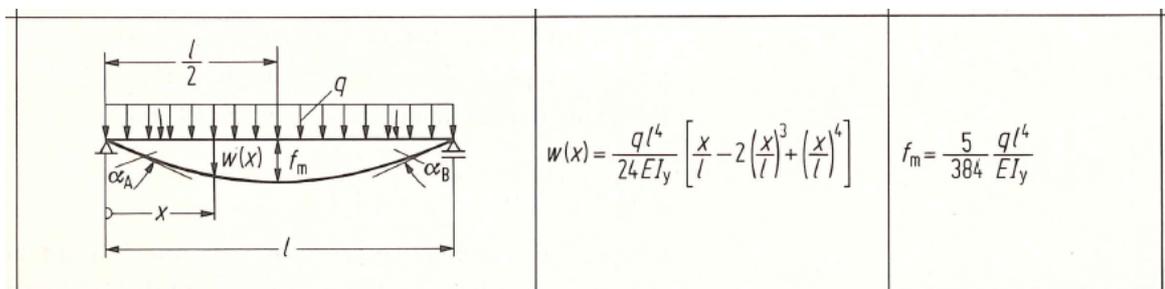


Abbildung 4-29: Biegelinie eines Balkens mit einem Los- und einem Festlager.

¹⁰ Auf Grund dieser Tatsache ergeben sich für die unterschiedlichen Lagerungsverhältnisse auch unterschiedliche Balkenhöhen, um die Referenzdurchbiegung von 27mm in der Mitte des Abbaubereiches zu erreichen. $H=25\text{m}$ für den Fall mit zwei eingespannten Balkenenden. $H=44\text{m}$ für den Biegebalken mit zwei Lagern.

Lösung der Durchbiegung an der Firste eines Hohlräumtes im elastischen Vollraum nach Budavari (Budavari, 1983):

$$s_z = \frac{2(1-\nu)q}{G} \sqrt{l^2 - x^2}$$

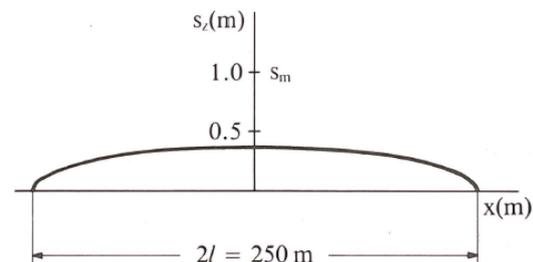


Abbildung 4-30: Durchbiegung der Firste eines Abbaubereiches im elastischen Vollraum (Budavari, 1983).

Schermodul	G	[GPa]
Querdehnungszahl	ν	[1]
Breite des Balkens	b	[m]
Vertikale Primärspannung	q	[MPa]

Mit l wird die Halbspannweite der Firstlänge bezeichnet. Die variable x startet von der Mitte der Firstlänge und bei $x=l$ befindet man sich an der äußeren Begrenzung der untersuchten Firstfläche, dh. die Firstabsenkung in diesem Bereich ist Null.

Für die weiteren Untersuchungen wird ein Balken mit losen Enden für die Hypothese nach Winkler herangezogen.

Da die Lösung nach dem elastischen Vollraum den Widerstand der Bergfesten nicht berücksichtigt und daher zu hohe Konvergenzen ergibt und die Lösung mit den beiden eingespannten Lagern einen zu flachen Konvergenzverlauf vor allem am Rand des Abbaubereiches ergibt, wird auf das Modell von Salamon (1976) mit den lose gelagerten Balkenenden zurückgegriffen¹¹. In diesem Modell wird der Biegebalken im unmittelbaren Hangenden des Abbaubereiches mit einer losen Lagerung berücksichtigt.

¹¹ Siehe auch Abbildung 4-26 auf der Seite 4-35.

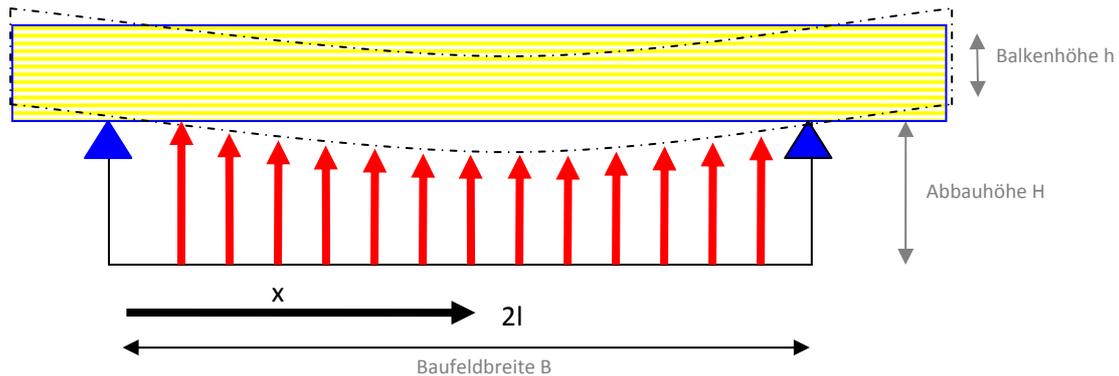


Abbildung 4-31: Schematische Darstellung des verwendeten „Winkler Modells“

Der Biegebalken, der das Gebirge über dem Abbaubereich darstellt, biegt sich unter der angenommenen Last nach unten durch. Diese Durchbiegung wirkt nun in weiterer Folge dem Abbaubereich mit seinem System aus Bergfesten und Versatz entgegen. Im Modell von Salamon wird diese Reaktion P genannt und als Kraft in den Berechnungen berücksichtigt.

In diesem Modell reagiert jetzt nicht nur eine Bergfeste mit einer Kraft P dieser Durchbiegung entgegen, sondern alle Bergfesten der Abteilung. Anstelle diese einzeln zu untersuchen werden die Bergfesten im Abbaufeld durch eine weichere Schicht ersetzt, welche als Folge der Durchbiegung des Balkens zusammengedrückt wird und einen Widerstand aufbaut, der, der Durchbiegung des Balkens entgegenwirkt.

Zur Abschätzung der Steifigkeit des Abbaufeldes wird ein Ansatz von Napier herangezogen (Napier 2011):

$$k_s = \frac{(1 - \nu_s) * E_s}{(1 + \nu_s) * (1 - 2\nu_s) * H}$$

Formel 4-15: Ansatz von Napier zur Abschätzung der Steifigkeit des Abbaubereiches (Napier 2011).

Steifigkeit des Abbaubereiches	k_s		[GPa/m]
E_{mod} Abbaubereich	E_s	4,5	[GPa]
Querdehnungszahl Abbaubereich	ν_s	0,15	[1]
Höhe des Abbaubereiches	H	10	[m]

Mit Hilfe des Ansatzes von Napier ist man in der Lage, die Materialeigenschaft „Elastizitätsmodul“ und die Geometrieigenschaft „Abbauhöhe“ in eine Systemeigenschaft „Steifigkeit des Abbaubereiches k_s “ überzuführen. Mit dieser Steifigkeit reagiert der Abbaubereich auf die Durchbiegung des unmittelbaren Hangendbereiches. Der Elastizitätsmodul des Abbaubereiches ist über ein angenommenes Ausbringen $e=0,75$ vom Modul des Gebirges, 18 [GPa], rückgerechnet worden.

$$E_s = E_{Geb} * (1 - e)$$

Emod Abbaubereich E_s 4,5 [GPa]

Emod Gebirge E_{Geb} 18 [GPa]

Ausbringen e 0,75 [1]

Formel 4-16: Rückrechnung des Elastizitätsmoduls des Abbaubereiches in Abhängigkeit des Ausbringens und des Elastizitätsmoduls des Gebirges.

Beim Übergang zwischen Abbaubereich und dem umgebenden Gebirge bestehen noch Unstetigkeiten, welche nicht den wahren Spannungsverlauf repräsentieren. Die Festenspannung im Randbereich kann nicht auf Null zurückgehen sondern muss sich in diesen Bereichen ($B=0m$ & $B=100m$) den vertikalen Primärspannungen angleichen.

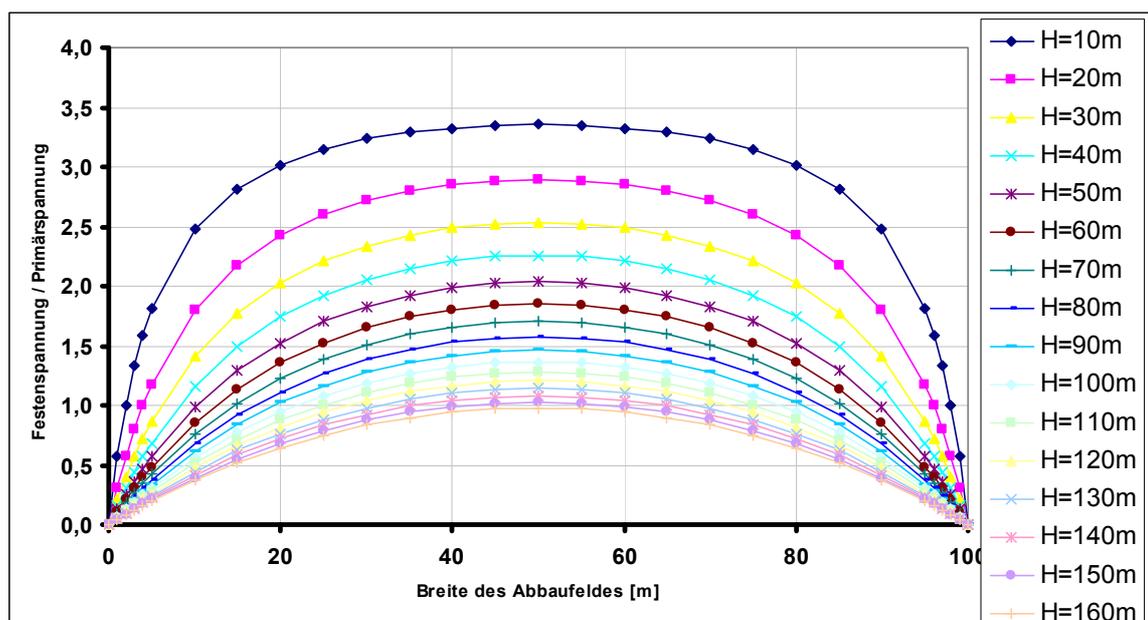


Abbildung 4-32: Belastung der Bergfesten normiert auf die vertikalen Primärspannungen ($q=25$ [MPa]) in Abhängigkeit der gebauten Höhe, bei einer Breite des Abbaubereiches von 100m.

Der Einfluss der Höhe des Abbaubereiches (Abbaufortschritt) auf die Belastung der Bergfesten innerhalb des Feldes ist klar ersichtlich. Bei einer Abbauhöhe von 10m, dies entspricht in etwa dem Abbau zweier Scheiben, ergeben sich nach dem Modell Spannungen in den Bergfesten in der Mitte des Abbaubereiches im Ausmaß von ca. dem 3,4-fachen der primären Vertikalspannungen.

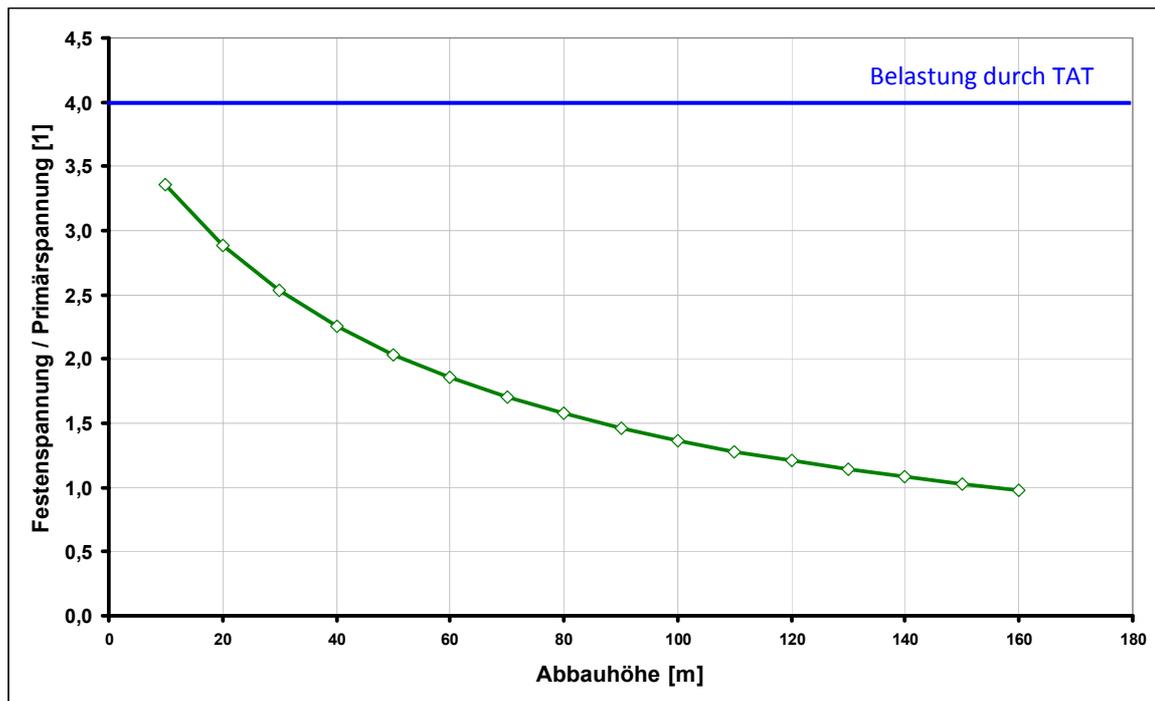


Abbildung 4-33: Abhängigkeit der Festenbelastung von der Abbauhöhe bestimmt nach dem Ansatz von Winkler. Die Darstellung bezieht sich auf die Mitte des Abbaufeldes – Breite des Abbaufeldes = 50m in Abbildung 4-32 S.4-41.

Schreitet der Abbau voran und der Abbaubereich wird höher, verringert sich die Belastung der Bergfesten auf den Wert der vertikalen Primärspannung.

Dh. die postulierte Verringerung der Belastung der Bergfesten beim „Post Pillar“ Abbauverfahren kann über den Ansatz der Winkler Hypothese qualitativ sehr gut dargestellt werden.

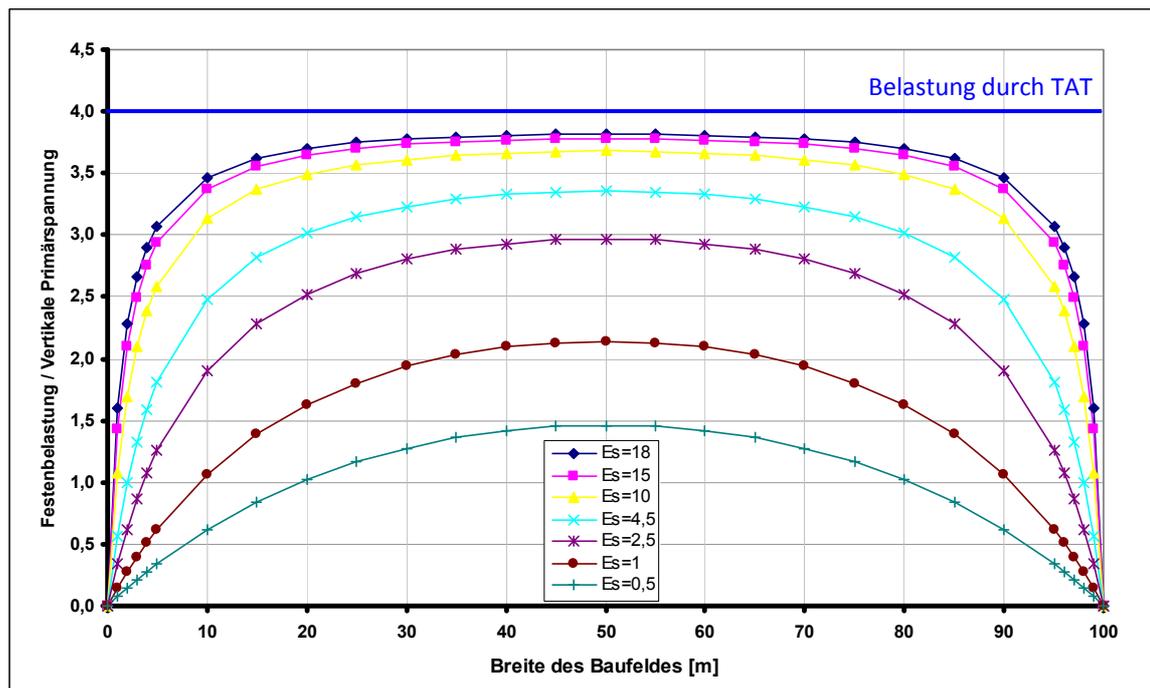


Abbildung 4-34: Belastung der Bergfesten normiert auf die vertikalen Primärspannungen ($q=25$ [MPa]) in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Abbaubereiches, bei einer Breite des Abbaubereiches von 100m und einer Abbauhöhe von 10m.

Bei konstanter Breite des Baufeldes hat das Verformungsverhalten des Abbaubereiches den größten Einfluss auf die Belastung der Bergfesten.

Wird der Elastizitätsmodul des Abbaubereiches auf einen Wert von z.B. 0,5 [GPa] reduziert, verringert sich die Festenbelastung, bei einem Ausbringen von 75%, auf das 1,5-fache der vertikalen Primärspannungen.

Setzt man den Modul des Abbaubereiches (E_s) gleich dem Modul des umgebenden Gebirges von 18 [GPa], erhält man Vertikalspannungen im Abbaubereich in Höhe der primären Vertikalspannungen und damit eine Festenbelastung die ca. dem 4-fachen der Primärspannung entspricht. Die Annahme des selben Moduls für das umgebende Gebirge und den eigentlichen Abbaubereich stellt die Situation dar, dass noch kein Abbau im eigentlichen Abbaubereich stattgefunden hat. Der Abbaubereich weist dieselben Verformungseigenschaften, wie das ihn umgebende Gebirge, auf. Die Schicht unterhalb unseres Biegeträgers ist gleich „hart“ oder „weich“ wie das Gebirge und setzt dem Biegeträger die Primärspannungen als Reaktion auf das Durchbiegen entgegen. Der angenommene Biegeträger biegt sich nicht durch.

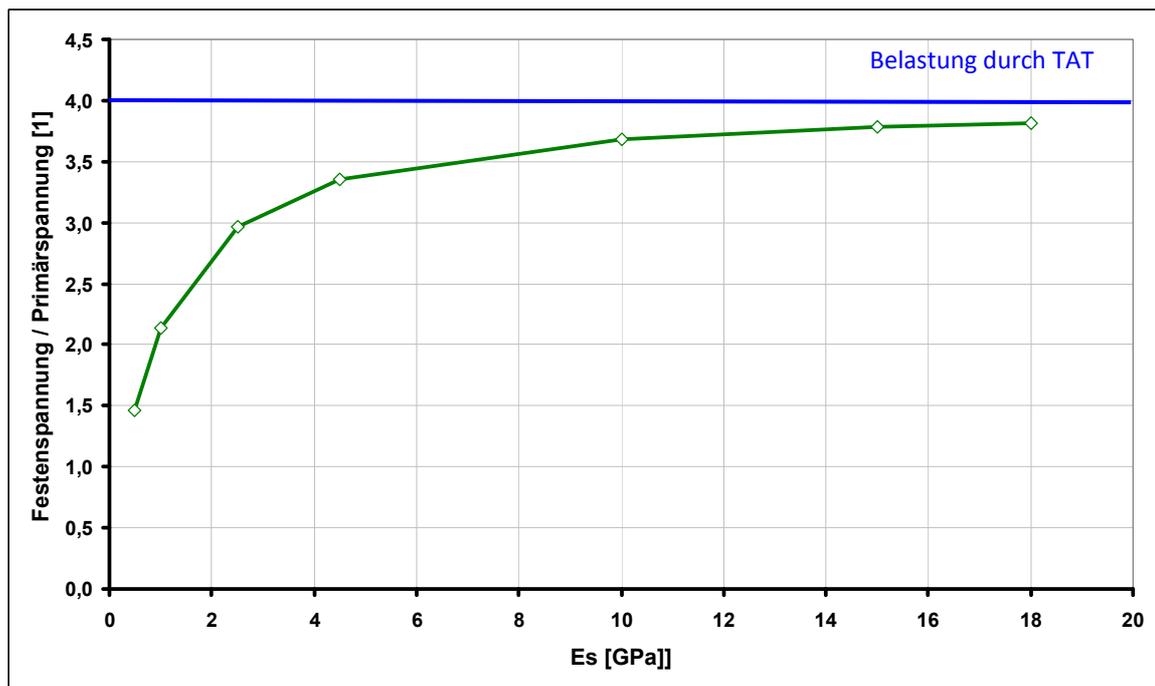


Abbildung 4-35: Abhängigkeit der Festenbelastung vom Verformungsverhalten des Abbaubereiches E_s (Elastizitätsmodul der „weichen“ Schicht welche den Abbau repräsentiert) bestimmt nach dem Ansatz von Winkler. Die Darstellung bezieht sich auf die Mitte des Abbaufeldes – Breite des Abbaufeldes = 50m in Abbildung 4-34 S.4-43 und eine Abbauhöhe von 10m .

Das Abbaufeld verhält sich wie das umgebende, nicht abgebaute Gebirge. Dies sollte auch so sein, da für das Abbaufeld das selbe Verformungsverhalten wie für das umgebende Gebirge $E=18$ [GPa] angenommen worden ist.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass versucht worden ist eine kontinuierliche Beschriftung der Ordinate innerhalb des Kapitels, für eine bessere Übersichtlichkeit zu etablieren. Die unter Umständen missverständliche Aussage, dass sich der unverritzte Abbaubereich wie das umgebende Gebirge verhält, und man aber gleichzeitig in Abbildung 4-35 bei einem Emod E_s von 18 GPa eine vierfache Festenspannung bezogen auf den Primärspannungszustand ablesen kann, liegt in Zusammenhang mit der Ordinatebeschriftung. Würde man nur die Spannungen im Abbaubereich, der Abbauscheibe für einen Elastizitätsmodul von $E_s = 18$ GPa auftragen, würden die primären Vertikalspannungen ausgegeben werden.

In einem nächsten Schritt ist der Einfluss des Verformungsverhaltens des umgebenden Gebirges auf die Belastung der Bergfesten untersucht worden. Zum Einen ist dies direkt über den Elastizitätsmodul des Gebirges und zum Anderen über die Höhe des Biegebalkens berücksichtigt worden.

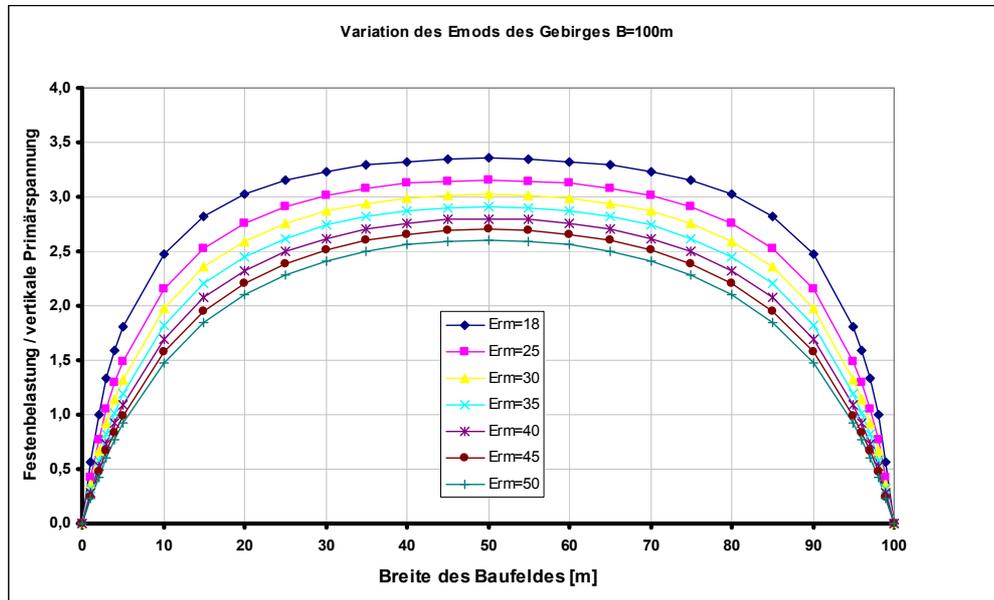


Abbildung 4-36: Auswirkung der Variation des Elastizitätsmoduls des Gebirges auf die Belastung der Bergfesten nach dem Ansatz von Winkler bei konstanter Balkenhöhe von $h=43\text{m}$.

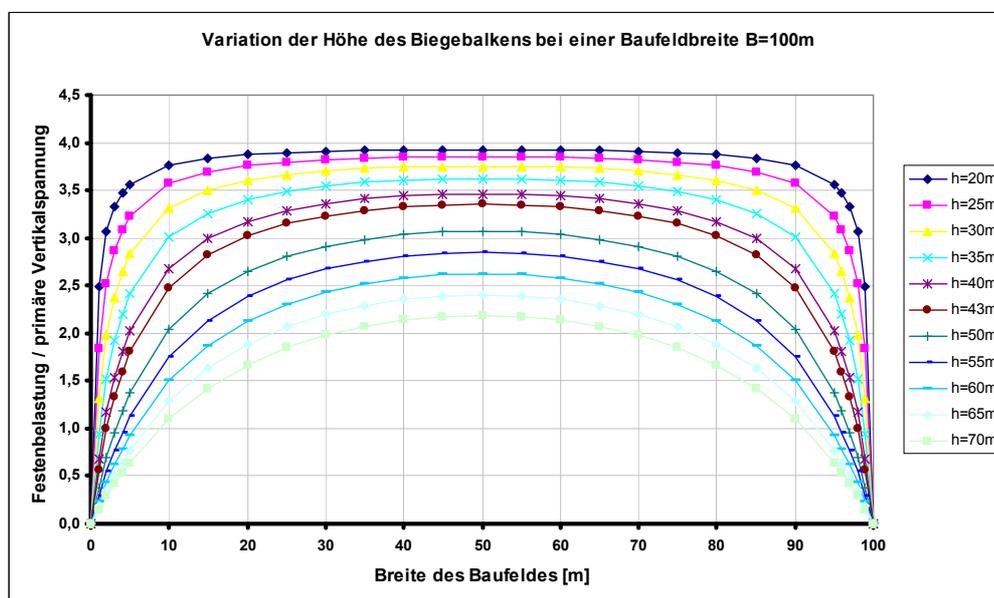


Abbildung 4-37: Auswirkung der Variation der Höhe h des Biegebalkens auf die Belastung der Bergfesten nach dem Ansatz von Winkler bei konstantem Elastizitätsmodul des Gebirges von $E_{\text{Geb}}=18\text{GPa}$.

Wie zu erwarten, hat die Veränderung des Elastizitätsmoduls des umgebenden Gebirges (Biegebalken) einen ähnlichen Effekt wie die Vergrößerung der Balkenhöhe des Biegeträgers. Das System wird insgesamt steifer, der Biegebalken biegt sich weniger stark durch und somit reduziert sich auch die Reaktionskraft aus dem Abbaufeld und somit die Belastung der Bergfesten.

Wie bereits in Kap 4.4.1 auf S.4-22 besprochen hat die Breite des Baufeldes einen fundamentalen Einfluss auf die Belastung der Bergfesten innerhalb einer Abbaubteilung. Bei gleichbleibender Geometrie und konstanten Verformungseigenschaften innerhalb des Abbaubereiches, steigt die Belastung der Bergfesten mit der Breite des Abbaubereiches. Diese Tatsache ist vor allem bei der Erweiterung bestehender Abbaubereiche und bei der Abschätzung der Belastung einer Bergfeste für Standfestigkeitsuntersuchungen sehr wichtig.

Mit Hilfe des Ansatzes nach Winkler ist man in der Lage, ohne sehr aufwändige numerische Simulationen durchführen zu müssen, den Einfluss der Baufeldbreite auf die Belastung der Bergfesten in der Abbaubteilung abzuschätzen. Im Ansatz nach Winkler wird die Breite des Abbaubereiches mit der Länge des gelagerten Biegeträgers berücksichtigt, dh. je länger dieser Träger ist desto größer ist seine Durchbiegung und desto größer ist die Reaktionsspannung in der Schicht darunter, dem Abbaubereich, und damit die Belastung der Bergfesten.

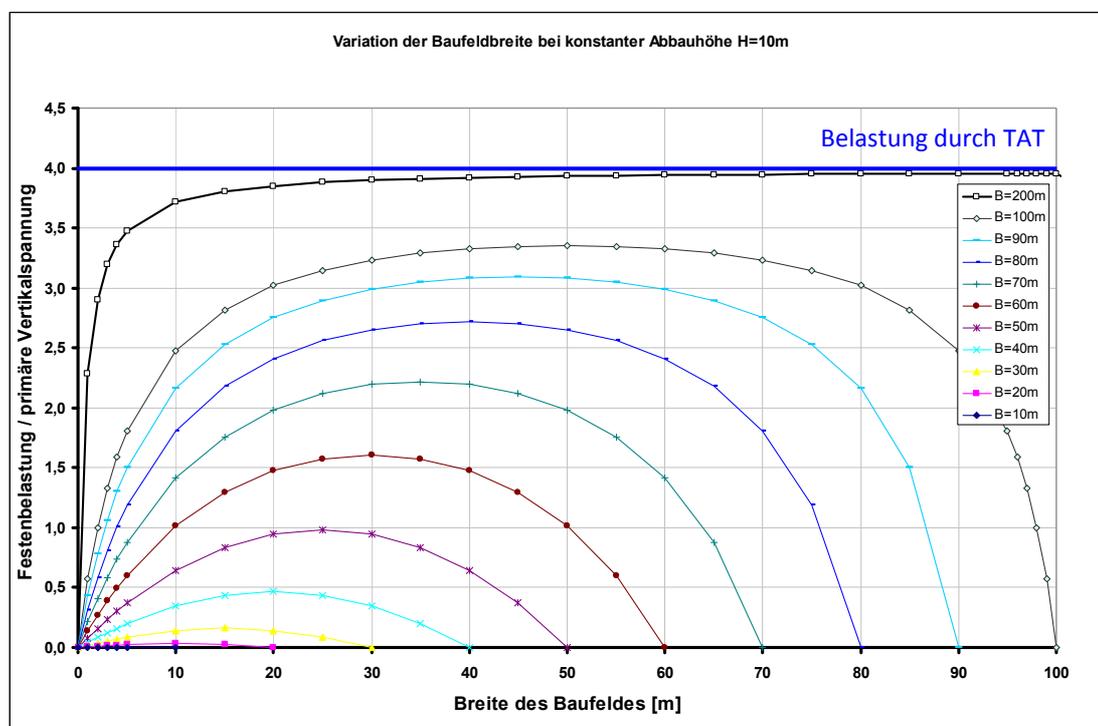


Abbildung 4-38: Verhältnis der Festbelastung zur primären Vertikalspannung bei einer Abbauhöhe von H=10m in Abhängigkeit der Breite des Baufeldes.

Ist die Baufeldbreite, in Relation zur Höhe des Feldes sehr gering bildet sich ein ausgeprägtes Gewölbe aus und der Großteil der Kräfte wird außerhalb des Abbaubereiches in die Auflager abgeleitet. Wird nun die Breite des Baufeldes schrittweise auf z.B. 200m erhöht, nähert man sich mit dem Abbau den Voraussetzungen der Theorie der zugeordneten Flächen und somit einer Festenbelastung, die in etwa dem 4-fachen der primären Vertikalspannungen entspricht.

Aber auch im letzten Beispiel, die Variation der Baufeldbreite, zeigen sich Unstetigkeiten am Übergang zwischen dem Abbaufeld und dem Gebirge. Hier muss davon ausgegangen werden, dass sich das Verhältnis Festenbelastung zu den primären Vertikalspannungen zwischen 2 und 2,5 bewegen wird. Zu einem ähnlichem Ergebnis kommt auch Salamon (Budavari 1983)¹².

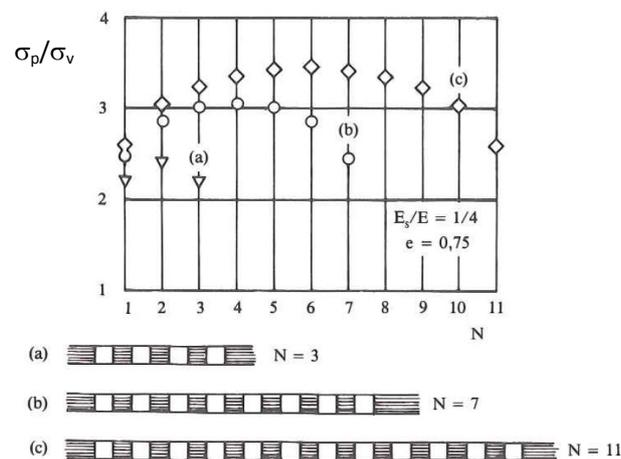


Abbildung 4-39: Festenbelastung in Abhängigkeit der Anzahl der gebauten Örter, normiert auf den primären vertikalen Spannungszustand nach Salamon.

Abgesehen von diesen Unstetigkeiten kann aber angemerkt werden, dass der vorgestellte Ansatz von Winkler ein probater und aussagekräftiger Weg ist, die Auswirkungen einer Geometrieänderung im Zuge des „Post Pillar“ Abbaus auf die Belastung von Bergfesten zu beschreiben.

Sowohl die Breite des Abbaubereiches, als auch seine Höhe und seine Verformungsparameter können mit dem Ansatz berücksichtigt werden, um mit einfachen, aber sehr aussagekräftigen Mitteln, die Belastung der Bergfesten im Zuge des „Post Pillar“ Abbaus darzustellen und zu analysieren.

¹² Siehe auch Kap. 4.4.1 auf der Seite 4-22.

4.5 Einfluss des Versatzes auf die Standfestigkeit von Bergfesten

Der festigkeitssteigernde Einfluss des Versatzes auf die Standfestigkeit von Bergfesten fand noch keinen quantitativen Eingang in eine Festigkeitsformel für Bergfesten, kann aber qualitativ sehr wohl aus verschiedenen Literaturquellen erarbeitet und dargestellt werden.

Der Versatz bildet einen integralen Bestandteil vieler Abbauverfahren (Wagner, 1996). Zum Einen können Lagerstätten unter Zuhilfenahme von Versatz vollständiger, dh. nachhaltiger, abgebaut werden und zum Anderen können Bergschäden verhindert oder minimiert werden. Der Einsatz von Versatz wirkt sich auch positiv auf die Standfestigkeit von Hohlräumen und die Standfestigkeit von Bergfesten aus.

Neben den technischen, wirtschaftlichen, sicherheitsrelevanten und ökologischen Anforderungen an den Versatz, spielen die gebirgsmechanischen die größte Rolle.

Der Versatz kann prinzipiell auf zweierlei Arten auf die Bergfeste wirken und somit ihre Standfestigkeit erhöhen:

- Wirkung des Versatzruhedruckes
- Widerstand gegen die Querverformung der Bergfeste

Wie Wagner (1996) ausführte, ist eine der wichtigsten gebirgsmechanischen Anforderungen an den Versatz sein Verhalten unter Kompression. Das nichtlineare Verhalten von Versatz unter Kompression wird am zweckdienlichsten mit folgender zweiparametrischen Hyperbel der Form

$$\sigma_v = \frac{a * \varepsilon}{b - \varepsilon}$$

Formel 4-17: Formale Beschreibung des nichtlinearen Verhaltens von Versatz nach Wagner & Ryder (Wagner & Ryder, 1978).

beschrieben, wobei σ_v die Reaktionsspannung im Versatz ist, a und b Materialparameter darstellen (a=10 MPa, b=0,3) und ε die Zusammendrückung eines kohäsionslosen Versatzes beschreibt.

Durch Zugabe von Bindemittel kann das Anfangsverhalten des Versatzes, durch die Höhe der einachsialen Druckfestigkeit, und in indirekter Weise die Anfangssteifigkeit, gesteuert werden. Dies ist vor allem in oberflächennahen Bereichen mit geringen Konvergenzraten sehr wichtig. In großen Teufen ist das Verhalten bei größerer Zusammendrückung von Bedeutung. Dieser Faktor wird durch den Parameter b bestimmt.

4.5.1 Wirkung des Versatzruhedruckes

Wagner (1996) bringt in seinen Ausführungen ein Beispiel, um die Auswirkungen dieses Versatzruhedruckes zu beschreiben. Dieser Druck entspricht im Falle eines bindemittellosen Versatzes dem Erdruchdruck. Die horizontale Komponente des Versatzdruckes hängt von der Versatzhöhe, der Versatzdichte und dem Winkel der Inneren Reibung des Versatzmaterials ab. Bei einer realistischen Versatzdichte von 2000 kg/m^3 und einem Winkel der Inneren Reibung zwischen 15° und 35° , ergeben sich Versatzdrücke pro Meter Versatzhöhe zwischen 9 und 15 kPa. Dieser Druck verhindert zum Einen das Herausgleiten von möglichen Felskeilen aus der Bergfeste und zum Anderen stellt der Versatzdruck, ähnlich wie es beim dreiaxialen Druckversuch an Gesteinsproben zu beobachten ist, eine Umschlingung und damit ein festigkeitssteigerndes Element dar.

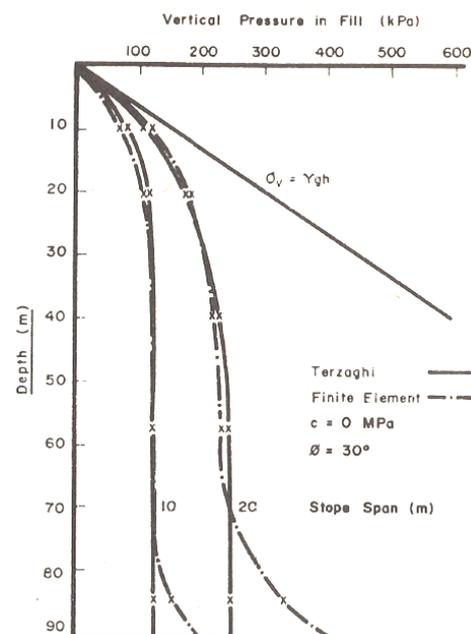


Abbildung 4-40: Verlauf der Vertikalspannungen in der Mitte einer ca. 90m hohen versetzten Kammer nach Askew (Askew 1978).

Diese lineare Zunahme des horizontalen Versatzdruckes ist aber nur bis zu einer gewissen Versatzhöhe beobachtbar. Askew (1978) vergleicht in seiner Arbeit (siehe Abbildung 4-40) den Verlauf der Vertikalspannungen für:

- Einen linearen Fall (z.B. primäre Vertikalspannungen)
- Die Silodrucktheorie nach Terzaghi für kohäsionsloses Material
- Die Ergebnisse Finiter Elemente Berechnungen

Ab einer Versatzhöhe von 20m bis 30m ist bei zunehmender Teufe (Versatzhöhe) keine Erhöhung der Vertikalspannungen zu beobachten. Durch den Siloeffekt werden die Vertikalspannungen seitlich in die Bergfesten abgeleitet.

Das bedeutet aber für den Fall des „Post Pillar“ Abbauverfahrens, dass nicht die gesamte Versatzhöhe von z.B. 80m (wie in der Breitenau) als Umschlingung, und somit als festigkeitsteigernd, in den Überlegungen und Berechnungen berücksichtigt werden darf.

Betrachtet man eine Versatzhöhe von 20m und einen Winkel der Inneren Reibung von sehr hohen 35° so ergibt sich ein horizontaler Versatzdruck von ca. 0,3 MPa, welcher im Gegensatz zum Widerstand gegen die Querverformung der Bergfeste als eher gering einzustufen ist.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass im Falle des Siloeffektes, dh. dem Verlauf der Vertikal- und der Horizontalspannungen, die Absolutwerte nur von den Schüttguteigenschaften (Versatzeigenschaften) selbst und dem Verhältnis zwischen der Silofläche A (Grundfläche des Versatzkörpers) und deren Umfang abhängt, und nicht von der Höhe des Schüttgutes oder etwaigen Auflasten.

Zieht man einen Zusammenhang zwischen einem zuvor beschriebenen zylindrischen Silo und einem Versatzkörper unter Tage, so sieht man den proportionalen Zusammenhang zwischen den Spannungen im Versatzkörper und dem Durchmesser desselben.

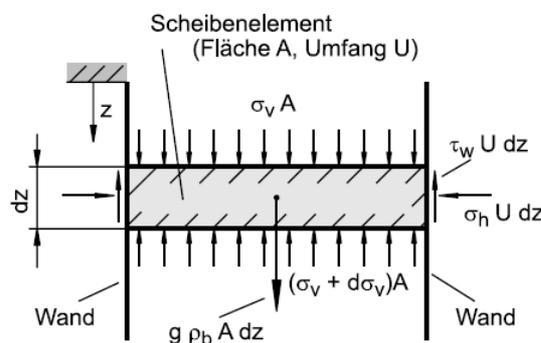


Abbildung 4-41: Scheibenelement (Schüttgut) im Siloschaft (Schulze 2006).

Aus dem Kräftegleichgewicht nach Abbildung 4-41 ergibt sich die vertikale Grenzspannung wie folgt:

$$\sigma_{v\infty} = \sigma_v(z \rightarrow \infty) = \frac{g \rho_b A}{\lambda \tan \varphi_x U}$$

Formel 4-18: Obere vertikale Grenzspannung nach dem Ansatz nach Janssen (Schulze 2006). λ ist das Horizontallastverhältnis σ_h / σ_v .

4.5.2 Widerstand des Versatzes gegen die Querverformung der Bergfeste

Einen größeren festigkeitssteigernden Effekt bewirkt der eingebrachte Versatz, wenn er passiven Verformungen ausgesetzt ist, dh. er reagiert auf Verformungen indem er ihnen einen Widerstand entgegensetzt. Im Fall von Bergfesten wird die Querverformung der Bergfesten in den Versatz induziert und der Versatz baut einen Widerstand gegen diese aufgezwungene Verformung auf. Dieser Widerstand hängt zum Einen von der Verformung und zum Anderen von den Festigkeits- und Verformungsparameter des Versatzes ab.

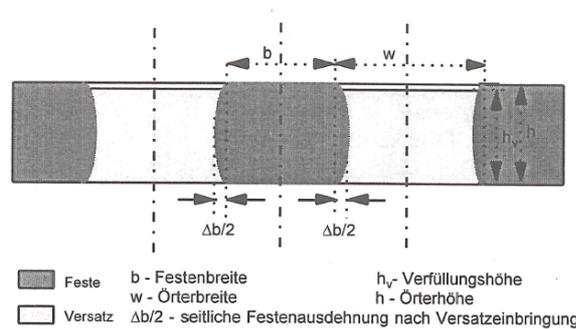


Abbildung 4-42: Schematischer Schnitt eines Örters mit Ascheversatz (Wagner 1996).

Unter einer gegebenen Belastung dehnt sich die Bergfeste mit der ursprünglichen Breite b um den Wert $\Delta b/2$ in beide Richtungen aus. Um diesen Wert wird der eingebrachte Versatz gestaucht, dh. es werden Konvergenzen in den Versatz induziert und der Versatz ist in der Lage eine Reaktionsspannung aufzubauen.

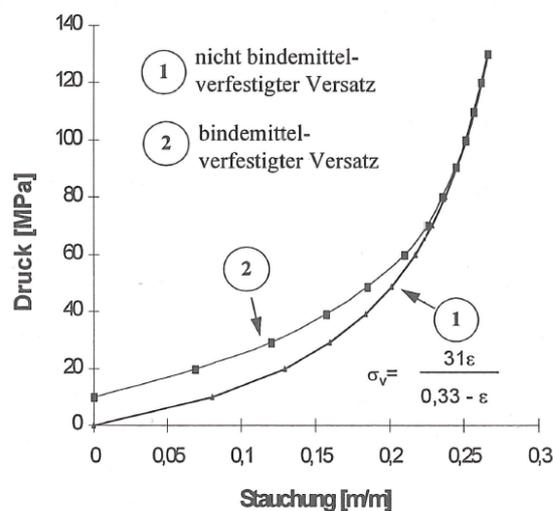


Abbildung 4-43: Verformungsverhalten des Versatzes bei Belastung.

Abbildung 4-43 zeigt das nichtlineare Verformungsverhalten eines sehr festen bindemittelverfestigten Versatzes und eines bindemittellosen Versatzes. Wird der bindemittellose Versatz nicht gestaucht, kann er auch keinen Widerstand gegen die Verformung und damit eine Umschlingung der Bergfeste aufbauen. Der bindemittelverfestigte Versatz ist in der Lage eine sog. Anfangsfestigkeit der Verformung entgegenzustellen. Diese Anfangsfestigkeit ergibt sich auf Grund der größeren Steifigkeit am Beginn des Last- Verformungszusammenhanges.

In diesem Beispiel hat der bindemittelverfestigte Versatz eine sehr hohe „Anfangsfestigkeit“ von ca. 10 MPa. Bei zunehmender Belastung des bindemittelhaltigen Versatzes werden seine Kohäsionsbrücken aufgebrochen und das weitere Verformungsverhalten nähert sich jenem eines bindemittellosen Versatzes an.

Aber auch schon geringe einachsiale Druckfestigkeiten des Versatzes bringen eine sofortige Reaktionsspannung mit sich, welche die Bergfesten unterstützt. Ein kleines Rechenbeispiel¹³ soll dies untermauern.

Wird eine Festenseite, oder der Ulm eines Hohlraumes mittels einer Systemankerung, Endanker mit einer Ankerdichte von 0,5 Anker / m² und einer Festigkeit der Anker von ca. 180 kN, gesichert, ergibt sich ein umgerechneter flächiger Ausbaudruck 90 kN/m². Diese 90 kN/m² entsprechen ungefähr dem Luftdruck an der Tagesoberfläche von einer „Technischen Atmosphäre“ oder in etwa einem Bar mit ca. 100 kPa.

Erreicht nun ein bindemittelverfestigter Versatz eine einachsiale Druckfestigkeit (Anfangsfestigkeit) von 2 MPa entspricht dies einem Ausbaudruck von 2 MPa. Das bedeutet, dass ein Regelausbau mit einer relativ hohen Ankerdichte von 0,5 Anker / m² (1 Anker pro 2m²) nur 1/20 des Ausbaudruckes eines relativ schwachen bindemittelverfestigten Versatzes erreicht. Es ist klar, dass der Versatz nicht überall als Ausbauunterstützung eingesetzt werden kann, aber das Beispiel soll den Wert eines bindemittelverfestigten Versatzes mit einer einachsialen Druckfestigkeit von „nur“ 2 MPa darstellen.

¹³ Das Beispiel ist von Prof. Wagner im Zuge einer Gebirgsmechanik Vorlesung vorgetragen worden.

Diese flächenhafte Wirkung des Versatzes kann auch sehr anschaulich anhand eines Beispiels dargestellt werden. In diesem Beispiel wird das Ausgleiten eines Keiles gegen einen Versatzkörper untersucht. Dabei wird die Höhe des Keilausbruches für alle Fälle konstant bei $H=4\text{m}$ belassen und der Reibungswinkel der Diskontinuitäten einmal mit 30° und einmal mit 45° berücksichtigt. Der Einfallswinkel der Diskontinuitäten wird von der Horizontalen aus angegeben und die Kohäsion ist für alle Fälle gleich Null. Der Widerstand, den der Versatz dem Herausgleiten des Keiles entgegensetzt, wird in drei unterschiedlichen Größenordnungen nämlich $0,5\text{ MPa}$, 1 MPa und 2 MPa in den Berechnungen berücksichtigt.

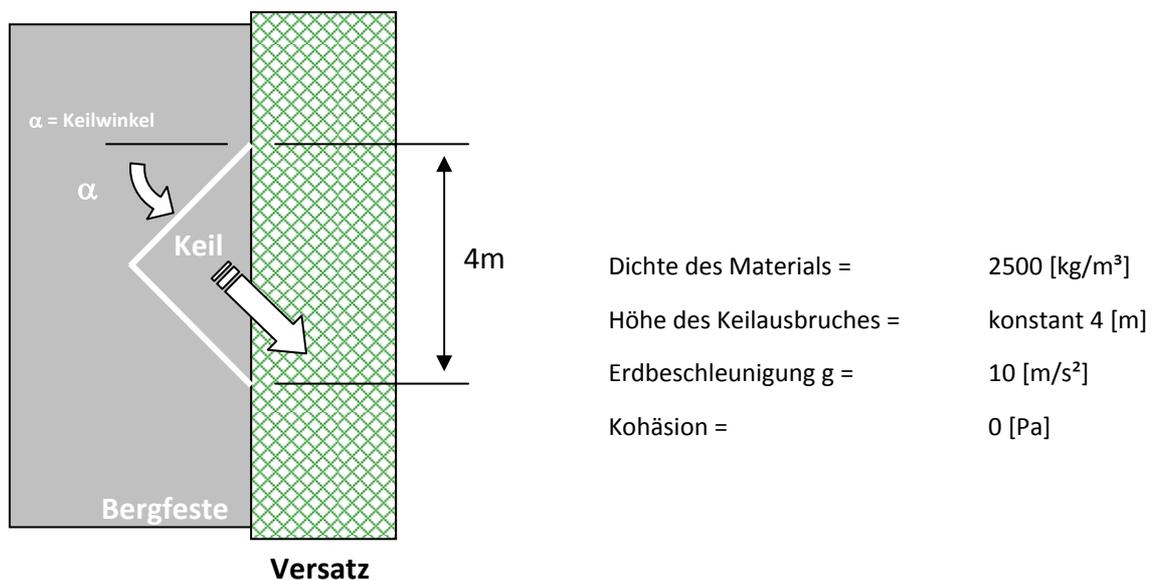


Abbildung 4-44: Modell zur Beschreibung der flächenhaften Wirkung des Versatzes gegen das Herausgleiten eines Felskeiles aus einer Ulmseite einer Bergfeste gegen einen Versatzkörper.

Der Widerstand des Versatzkörpers reduziert die treibenden Kräfte des Felskeiles und erhöht somit die Sicherheit gegen das Ausgleiten des Felskeiles. Diese Sicherheit wird als Verhältnis zwischen den rückhaltenden Scherkräften (inklusive der Versatzwirkung) und den treibenden Kräften angegeben und als sog. „Sicherheitszahl“ bezeichnet.

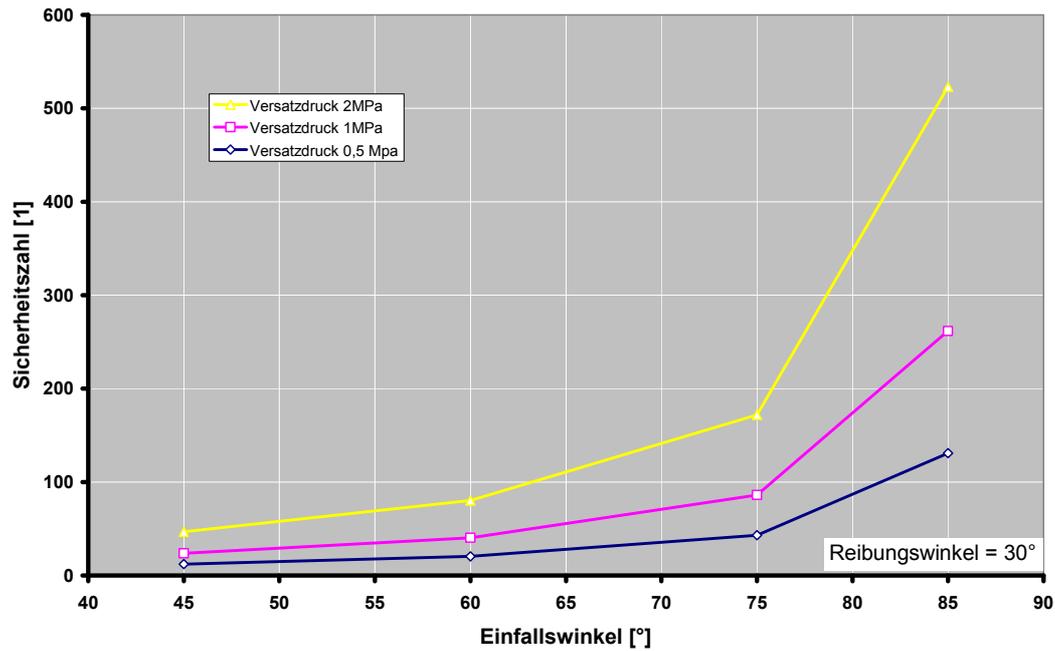


Abbildung 4-45: Sicherheitszahl in Abhängigkeit des Einfallswinkels des Keiles und des Versatzdruckes für einen Klutfreiwinkel von 30° .

Für einen Klutfreiwinkel von 30° ergeben sich Sicherheitszahlen, in Abhängigkeit des Versatzdruckes, zwischen $SZ = 130$ und $SZ = 520$. Wie zu erwarten ist der Einfluss des Versatzdruckes proportional zur Größe seines Widerstandes.

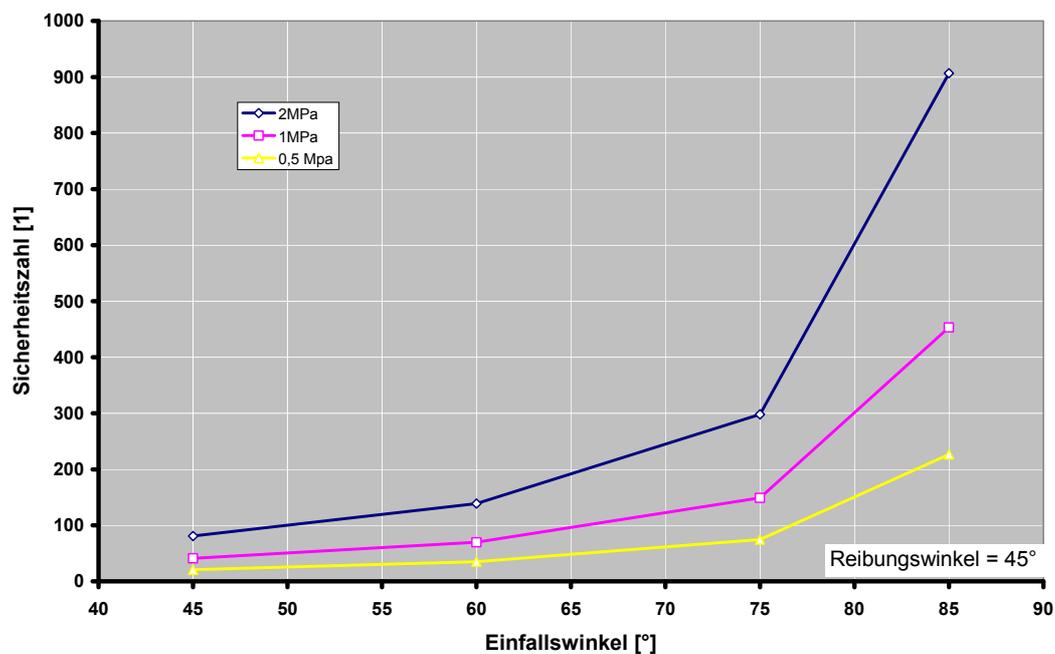


Abbildung 4-46: Sicherheitszahl in Abhängigkeit des Einfallswinkels des Keiles und des Versatzdruckes für einen Klutfreiwinkel von 45° .

Deutlich zeigt sich der proportionale Zusammenhang zwischen dem Versatzdruck, dh. dem Widerstand des Versatzes und der Sicherheitszahl. Je höher der Versatzdruck ist, desto größer gestaltet sich die Sicherheitszahl.

Wie zu erwarten, zeigt auch eine Erhöhung des Reibungswinkels der Diskontinuität eine Erhöhung der Sicherheitszahl.

Die größte und ausgeprägteste Auswirkung des Versatzdruckes ergibt sich bei den relativ flachen Keilen mit einem sehr hohen Keilwinkel. Zwischen einem Kluftwinkel von 60° bis 85° steigen die Sicherheitszahlen progressiv an. Dieser Effekt liegt zum Einen an der reduzierten Gewichtskraft der herausgleitenden Keile bei hohen Kluftwinkeln und den damit verbundenen kleineren treibenden Kräften und zum Andern an der Tatsache, dass sich die Angriffsfläche des Keiles bei einer konstanten Keilausbruchshöhe von 4m nicht verändert und somit der Versatzdruck unvermindert wirken kann. Aus diesen Punkten heraus können die höheren Sicherheitszahlen erklärt werden.

Der Umstand, dass der Versatzkörper das Herausgleiten der Felskeile und somit die Auflockerung der Bergfeste in einem so großen Maß verhindert, bildet eine sehr wichtige Erkenntnis für das Gesamtsystem des „Post Pillar“ Abbauverfahrens.

Allem Anschein nach ist die Wirkung des Versatzes noch größer als bisher angenommen. Auf Grund der flächenhaften Wirkung ist der Versatz, trotz relativ geringer Druckfestigkeiten, in der Lage große Kräfte der Auflockerung der Bergfeste entgegenzusetzen und somit ihre Standfestigkeit und ihre Stabilität zu erhöhen.

Ein weiterer sehr wichtiger Punkt sind die Verformungseigenschaften des Versatzmaterials.

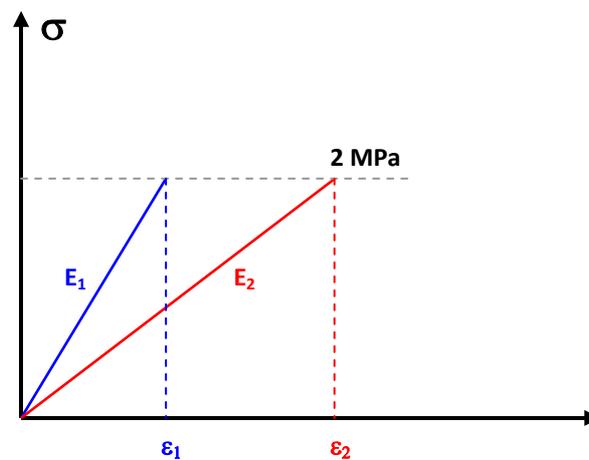


Abbildung 4-47: Vereinfachtes Spannungs- Stauchungsverhalten von Versatz mit unterschiedlichen Verformungseigenschaften.

Um den Einfluss des Verformungsverhaltens anschaulich darstellen zu können wird ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung angenommen.

Die zuvor angesprochene Druckfestigkeit eines bindemittelverfestigten Versatzes von 2 MPa wird, ausgehend vom unbelastenden Zustand entlang eines „Pfades“ erreicht. In betrachteten Fall (Abbildung 4-47) sind es zwei unterschiedliche Verformungsmodule (E_1 & E_2)

Im Falle eines weichen Versatzmaterials (E_2), kann unter Umständen die Querverformung der Bergfeste nicht ausreichen um den gewünschten Umschlingungsdruck von 2 MPa zu erreichen.

Das optimale oder wünschenswerte Verhalten eines Versatzes, welcher Bergfesten in einer Abbausituation unterstützt, liegt zum Einen in einer hohen Anfangsfestigkeit und zum Anderen im raschen Aufbau einer Reaktionsspannung, bedingt durch die Querverformung der Bergfesten. Um diese Reaktion möglichst rasch zu erzielen, ist ein steifer Versatz erforderlich.

Die im Versatz, als Folge der Querverformung der Bergfeste, induzierte Horizontalspannung ist durch die Formel 4-19 gegeben. Von Bedeutung ist in diesem Fall der Einfluss der Kammerbreite B.

$$\sigma_{vers} = \frac{\Delta B}{B} * E_{vers}$$

Formel 4-19: Proportionaler Zusammenhang zwischen der Reaktionsspannung im Versatz und der Kammerbreite B, bedingt durch die Querverformung der Bergfeste ΔB , in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Versatzes E_{vers} .

4.5.3 Qualitative Auswirkungen

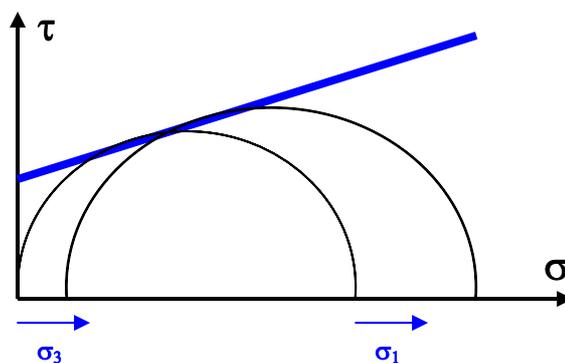


Abbildung 4-48: Schematische Darstellung der Auswirkung eines Umschlingungsdruckes auf das Festigkeitsverhalten einer Bergfeste in Anlehnung an das Verhalten einer Probe bei einem dreiachsialen Druckversuch.

An dieser Stelle kann angemerkt werden, dass der Versatzruhedruck (zu einem geringen Teil) und die Reaktionsspannung auf die Querverformung der Bergfeste eine Umschlingung der Bergfeste darstellt. Analog zum Unterschied zwischen dem Verhalten einer Gesteinsprobe beim einachsialen Druckversuch zum dreiachsialen Druckversuch bewirkt die Umschlingung der Bergfeste eine Erhöhung der Festigkeit.

In Festigkeitsformeln für Bergfesten ist dieser Aspekt jedoch noch nicht berücksichtigt worden.

In Laborversuchen kann der festigkeitssteigernde Einfluss des Versatzes nachgewiesen werden.

Galvin (1981) führte umfangreiche Druckfestigkeitsversuche an Kohlefesten im bindemittelverfestigten Versatz durch. Unter Zuhilfenahme von Flugasche als Bindemittel war er in der Lage sehr druckfeste Versatzgemische herzustellen und die Auswirkungen dieses Versatzes auf unterschiedliche Proben- bzw. Festengeometrien zu untersuchen. Wagner (1996) fasste die Ergebnisse von Galvin zusammen und analysierte vor allem die Auswirkungen des Versatzes auf die erzielten Druckfestigkeiten und die Auswirkungen auf das Last- Verformungsverhalten der unterschiedlichen Festengeometrien.

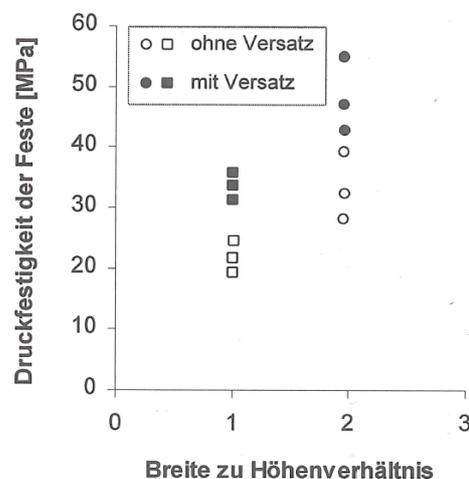


Abbildung 4-49: Einfluss des mit Flugasche versetzten Versatzes auf die Festigkeit von Bergfesten mit unterschiedlichen Breiten zu Höhenverhältnissen nach Wagner (Wagner, 1996)¹⁴.

Galvin verwendete für seine Versuche einen relativ druckfesten Flugasche-Versatz und erreichte für seine Kohlefesten mit einem Breiten zu Höhenverhältnis von 1:1 und 2:1 eine Steigerung der Druckfestigkeit zwischen 40% und 50%.

Einen noch größeren Einfluss übt der Versatz auf das Last- Verformungsverhalten der Bergfesten aus.

¹⁴ Wagner fasste in dieser Veröffentlichung Teile der gemeinsam mit Galvin durchgeführten Arbeiten (Galvin, 1981) zusammen.

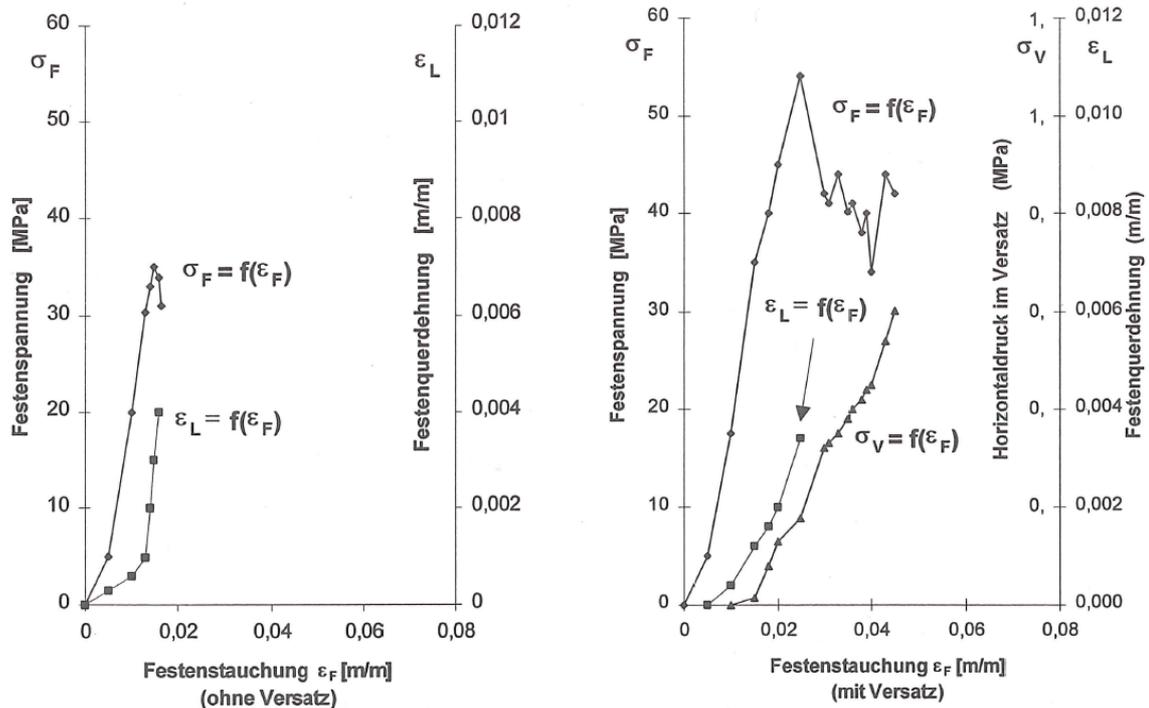


Abbildung 4-50: Einfluss des bindemittelhaltigen Versatzes auf das Last-Verformungsverhalten der Bergfesten nach (Wagner, 1996).

Abbildung 4-50 zeigt das Last-Verformungsverhalten einer von Galvin untersuchten Bergfeste ohne Versatz (linke Seite der Abbildung) und das Verhalten einer versetzten Bergfeste (rechte Seite der Abbildung).

Die Erhöhung der Druckfestigkeit (von 35 MPa auf 55 MPa) und das geänderte Verformungsverhalten sind klar ersichtlich. Mit Hilfe des Versatzes kann eine deutlich höhere Bruchstauchung der Bergfeste erreicht werden (von 0,018 m/m auf 0,025 m/m). Die Querdehnung der Bergfeste (ϵ_L) bewirkt im Versatz eine horizontale Reaktionsspannung (σ_V) von bis zu 0,6 MPa und die damit verbundene höhere Druckfestigkeit der Bergfeste. Durch die Umschlingung der Bergfeste wird vor allem der „Post Failure“ Bereich des Last-Verformungsverhaltens der Feste bedeutend verbessert und dadurch dem raschen Lastabfall der Feste entgegengewirkt.

4.5.4 Zusätzliche Auswirkungen des Versatz beim „Post Pillar“ Abbauverfahren

Gegenüber einem klassischen Örterbau mit oder ohne Versatz treten beim „Post Pillar“ Abbauverfahren einige Besonderheiten auf, welche bis jetzt noch nicht besprochen worden sind.

Der Abbau und das Einbringen des Versatzes erfolgt scheibenweise, dh. es kommt durch die Abbautätigkeit, z.B. Radlader oder SLKW, zu einer gewissen Verdichtung nach dem Einbringen einer jeden Versatzscheibe. Die Verdichtung ist auf jeden Fall ausgeprägter als für den Fall einer Verfüllung in einem Arbeitsschritt.

Wie bereits beim Versatzruhedruck angemerkt, bauen sich die Vertikal- und, damit verbunden, auch die Horizontalspannungen nicht linear mit der Versatzhöhe auf, sondern folgen der Silodrucktheorie für Schüttgüter.

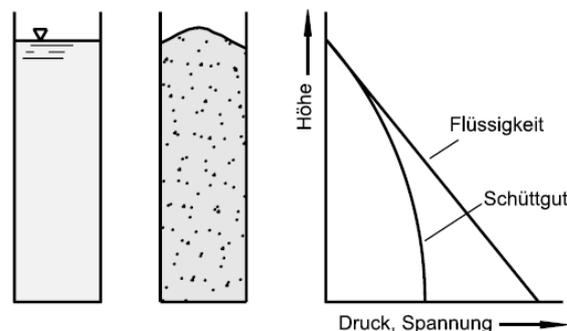


Abbildung 4-51: Qualitativer Verlauf von Vertikalspannungen in Behältern nach (Schulze, 2006).

Schulze hat in seiner Monografie den Spannungsverlauf innerhalb von Behältern sowohl qualitativ, als auch quantitativ beschrieben. Wird die Situation auf den Bergbau umgelegt, kann der Behälter als Ort und die Wände des Behälters als die Ulmen der Bergfesten gesehen werden.

Auf Grund der Tatsache, dass, im Gegensatz zu Flüssigkeiten, Schüttgüter Scherfestigkeiten aufweisen, können Teile der Spannungen im Versatzkörper über die Bergfesten abgeleitet werden.

Die auf die Bergfesten einwirkenden Horizontalspannungen induzieren Vertikalspannungskomponenten. Aus dem unterschiedlichem Kompaktionsverhalten zwischen dem Versatz und der Bergfeste und dem Zusammenspiel mit den Horizontalspannungen ergeben sich Scherspannungen zwischen dem Versatzkörper und den Bergfesten. Diese wiederum führen zu einer Belastung der Bergfeste in axialer Richtung.

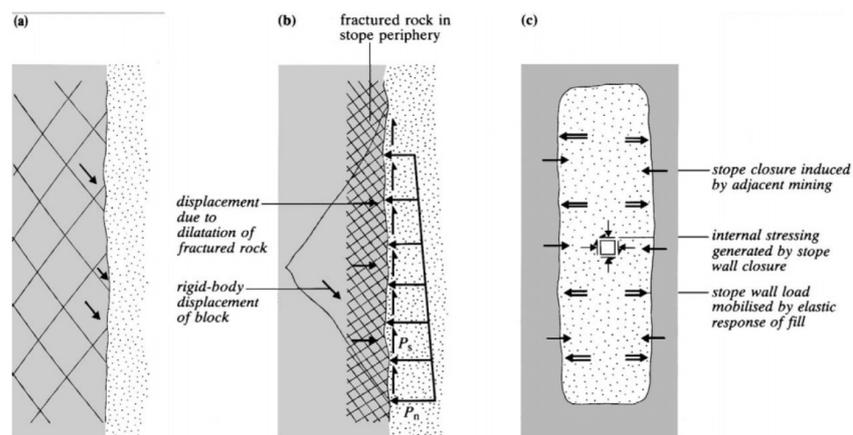


Abbildung 4-52: Festigkeitssteigernde Wirkung des Versatzes auf Bergfesten nach (Brady 2006).

Askew (1978) hat die Parameter des in Broken Hill eingesetzte Versatzmaterials untersucht. Die massive Blei-Zink-Silber Vererzung wird unter anderem in Form eines Kammerbaus mit Versatz gewonnen.

Er hat die Spannungsverteilung innerhalb der versetzten, bis zu 90m hohen Kammern einerseits, nach dem Ansatz von Terzaghi, mit Hilfe von Messungen und andererseits mit einfachen numerischen Simulationen abgeschätzt und berechnet.

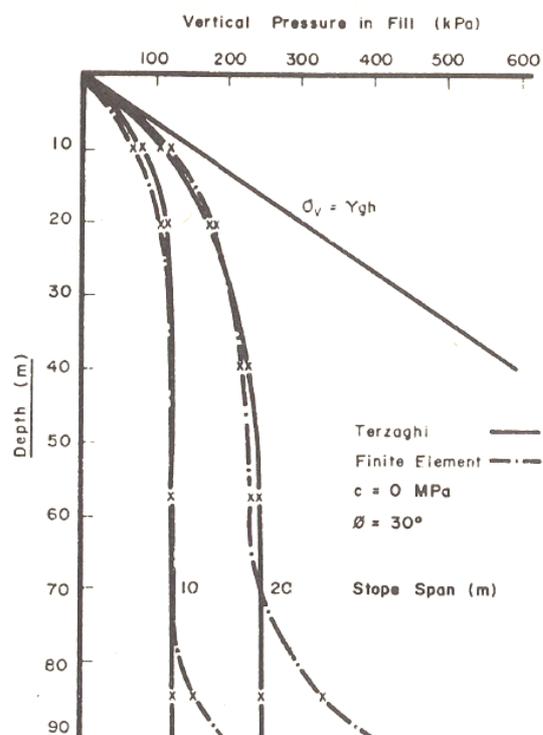


Abbildung 4-53: Verlauf der Vertikalspannungen in der Mitte einer ca. 90m hohen versetzten Kammer nach Askew (Askew 1978).

Deutlich zeigt sich der Siloeffekt innerhalb der versetzten Kammer. Ab einer gewissen Tiefe steigen die Vertikalspannungen nicht mehr an und erreichen ein Maximum. Die

Ergebnisse der numerischen Betrachtung zeigen eine Zunahme der Vertikalspannungen am Fuße der Kammer. Diese Spannungskonzentrationen sind auch in den Simulationen dieser Arbeit beobachtet worden und lassen sich auf die Einspannungssituation am unteren Ende der Kammer zurückführen.

Durch eine gerade Linie ist in der Abbildung auch der „statische“ primäre Spannungsverlauf σ_v eingetragen. Die Differenz zwischen dem statischen Verlauf (σ_v) und dem tatsächlichen Verlauf der Vertikalspannungen wird über die induzierten Horizontalspannungen in die Bergfesten abgeleitet.

In den Ausführungen von Askew zeigt sich auch der Einfluss der Örterbreite auf die Größe der Vertikalspannungen in einer definierten Teufe. Kleinere Örterbreiten ergeben einen ausgeprägteren Siloeffekt und somit geringere Vertikalspannungen im Versatz, dh. es werden größere Anteile der Versatzspannungen über die Festen abgeleitet. In Abbildung 4-53 S.4-61 werden, abhängig von der Breite der versetzten Kammer, die unterschiedlichen Vertikalspannungsverläufe gezeigt. Der 10m breite Versatzkörper hat eine um ca. 50% geringere Grenzvertikalspannung im Versatz als der 20m breite Versatzkörper. Dies deckt sich auch mit den Zusammenhängen von Janssen, der den proportionalen Zusammenhang zwischen der Vertikalspannung im Versatzkörper und dem Durchmesser desselben herausstreicht¹⁵.

Bindemittel im Versatz zeigen einen ähnlichen Effekt. Der durch das Bindemittel hervorgerufene Kohäsionsanteil bewirkt auch eine stärkere Dombildung und die damit verbundene geringere Vertikalspannung innerhalb der versetzten Kammer.

An dieser Stelle muss auf den Unterschied zwischen der Spannungssituation in einer versetzten Kammer und einem versetzten „Post Pillar“ Baufeld hingewiesen werden. In der Kammersituation ist der Versatzkörper vom Gebirge eingeschlossen, wogegen im Fall des „Post Pillar“ Abbaus der Versatz das Gebirge (die Bergfesten) umhüllt. Der Unterschied ist zwar derzeit nicht quantifizierbar, muss aber in Erinnerung gehalten werden

Barret (1978) hat den Vertikal- und Horizontalspannungsverlauf innerhalb einer versetzten, bis zu 200m hohen Abbaukammern in Mt. Isa untersucht. Der Spannungsverlauf innerhalb der Kammern ist mittels des Ansatzes von Terzaghi und mit Hilfe numerischer Simulationen abgeschätzt worden. Unter Zuhilfenahme des Ansatzes von Terzaghi sind sowohl zweidimensionale Streifenfesten, als auch dreidimensionale, quadratische Festen untersucht worden. Im Gegensatz zu den zweidimensionalen Festen, bei denen nur zwei Festenseiten in Interaktion mit dem Versatz stehen, stehen im dreidimensionalen Ansatz alle Festenseiten in Kontakt mit dem eingebrachten Versatz.

¹⁵ Siehe auch Formel 4-18 S. 4-50 inklusive Erläuterungen.

Durch die größere Anzahl der Interaktionsflächen (Ulmseiten) beim dreidimensionalen Ansatz zeigen sich hier natürlich deutlich ausgeprägter die Auswirkungen des Versatzes auf den Spannungsverlauf im Versatzkörper und in der umschlossenen Bergfeste.

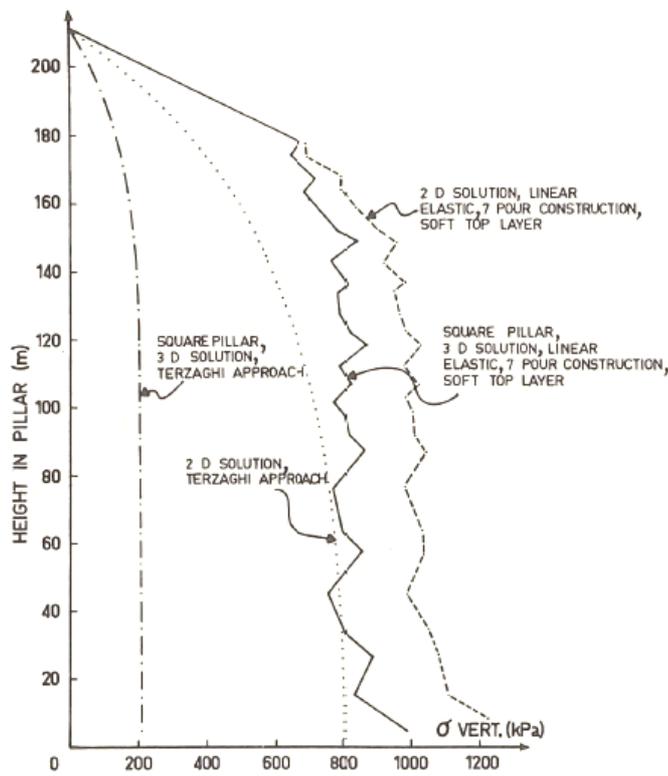


Abbildung 4-54: Verlauf der Vertikalspannungen in der Mitte einer ca. 200m hohen versetzten Kammer nach Barret (1978).

Wie in Abbildung 4-54 ersichtlich ist, herrschen nach dem dreidimensionalen Ansatz von Terzaghi an der Sohle einer versetzten Kammer nur mehr $\frac{1}{4}$ der vertikalen Spannungen (0,2 MPa), welche nach dem zweidimensionalen Ansatz zu erwarten wären (0,8 MPa).

Aus diesen Beobachtungen lässt sich schließen, dass beim dreidimensionalen Ansatz, dh. alle Festenseiten sind von Versatz umgeben, ein größerer Anteil der auftretenden Spannungen in die Festen abgeleitet werden. Bei einer einfachen Verdoppelung der Festenseiten, welcher der Übergang vom 2d zum 3d Ansatz entspricht, würde man von einer Halbierung der Vertikalspannungen ausgehen. Im dargestellten Fall reduzieren sich die Vertikalspannungen nicht auf die Hälfte, sondern auf ein Viertel, nämlich von 0,8 MPa im zweidimensionalen Ansatz auf 0,2 MPa für den dreidimensionalen Fall.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen decken sich zwar nicht vollständig mit den Ansätzen von Terzaghi, zeigen aber qualitative Ähnlichkeiten.

Wie ausgeprägt sich diese vom Versatz auf die Festen induzierten Kräfte ausbilden können, zeigt ein Beispiel aus der Näsliden Mine (Nilson 1981).

Steilstehende Lagerstättenbereiche in der Mine werden in der Form eines Firstenstoßbaus mit Versatz abgebaut. In der Mitte des Abbaus wird ein Stahlrohr mit

einem Durchmesser von 0,95 m und einer Wanddicke von 6 mm im Versatz mitgezogen. Dieses Rohr dient hauptsächlich zur Drainage der mit Spülversatz versetzten Bereiche.

Aufgrund der bereits zuvor beschriebenen Interaktion zwischen dem Versatz und der Festen, in diesem Fall befindet sich das Drainagerohr in der Mitte der Lagerstätte zwischen dem Liegenden und dem Hangenden, werden derart große Spannungen in das Rohr induziert, dass es zu einer Stauchung bzw. zu einem Verbeulen des Rohres kommt. Ab einer Versatzhöhe zwischen 25m und 35m kann in diesem Fall das Stauchen der Rohre beobachtet werden.

In diesem speziellen Fall haben nicht nur die Vertikalspannungen im Rohr eine dominierende Rolle gespielt, sondern auch die auf das Rohr wirkenden Horizontalspannungen.

4.5.5 Bemerkungen

Abschließend kann angemerkt werden, dass der Versatz, außer der Tatsache, dass er einen integralen Bestandteil des Abbaufahrens darstellt, sehr große Auswirkungen auf die gebirgsmechanischen Vorgänge hat. Alle in der Literatur beschriebenen Messungen und Beobachtungen zeigen einen an den Verlauf von Terzaghi angenäherte Verteilung der Spannungen innerhalb des Versatzkörpers. Ohne mögliche kohäsive Eigenschaften des Versatzmaterials zu berücksichtigen, bildet sich nach der „Silotheorie“, basierend auf dem Reibungswinkels des Versatzgutes, ein Spannungsgewölbe aus. Wobei, nach den Erfahrungen des Autors, der Ansatz der Silotheorie ein konservativer ist.

Im Zuge des „Post Pillar“ Abbaufahrens wird das Versatzmaterial scheibenweise eingebracht und durch die Befahrung mit Maschinen verdichtet. Es ist somit davon auszugehen, dass durch diese Vorgehensweise zusätzliche kohäsive Festigkeitsanteile in den Versatz induziert werden und sich die Spannungsverteilung etwas abgeändert darstellt, als es in der Silotheorie beschrieben wird. Das Spannungsgewölbe stellt sich ausgeprägter dar und die vertikalen Spannungen werden in einem größeren Anteil in die, den Hohlraum umgebenden Bergfesten, abgeleitet.

Dieser horizontale Versatzdruck lässt Reibungskräfte zwischen den Ulmen und dem Versatzkörper entstehen. Diese werden mobilisiert, wenn der Versatz unter der Wirkung seines Eigengewichts zusammengedrückt wird. Durch die höhere Zusammendrückbarkeit des Versatzes entsteht eine Scherbewegung, die dazu führt, dass der untere Teil der Feste durch den Versatz nach unten gezogen, dh. gestaucht wird. Dadurch entstehen Zugspannungen im oberen Teil der Festen, dh., dass diese Teile entlastet werden.

- Für die Abschätzung des Horizontaldruckes im Versatzkörper kann nicht die gesamte Versatzhöhe in den Rechnungen berücksichtigt werden.
- Eine geringfügige Steigerung der lateralen Stützung der Bergfesten im Versatz, verursacht durch die seitliche Ableitung der Vertikalspannungen, bewirkt eine Erhöhung der Festigkeit der Festen.
- Die induzierten Horizontalspannungen bilden das eigentliche festigkeitssteigernde Element. Diese Festigkeitssteigerung kann zwar nicht direkt in eine Festigkeitsformel integriert werden, kann aber als solche in der numerischen Simulation identifiziert werden.
- Der tatsächliche Einfluss des Versatzes kann nur mit dem Hilfsmittel der numerischen Simulation abgeschätzt werden. In einem nachfolgenden Kapitel wird die Situation numerisch beleuchtet.

Abschließend kann angemerkt werden, dass:

Der Versatz auf die Festigkeit und das Verhalten der Bergfesten nach Überschreiten der maximalen Festigkeit einen positiven Einfluss ausübt.

Quantitative Aussagen über die festigkeitssteigernde Wirkung des Versatzes weitgehend fehlen.

Modellversuche an Festen, die von Versatz umgeben sind, nur begrenzte Aussagekraft (quantitativ) besitzen.

Weitere Arbeiten bezüglich der Auswirkungen von Versatz auf das Verhalten von Bergfesten sind erforderlich.

4.6 Gebirgsspannungen

Für die Analyse der gebirgsmechanischen Aspekte von Abbauverfahren ist es unabdinglich den primären Spannungszustand des unverritzten Gebirges, in dem sich der Abbau bewegen soll, zu beurteilen. Im Fall der Gebirgsspannungen müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- Einfluss oberflächennaher Effekte auf die primären Gebirgsspannungen
- Einfluss der Geologie auf die primären Gebirgsspannungen

Liegt der Abbau relativ oberflächennahe muss nicht nur der Einfluss der Topografie auf das primäre Spannungsregime abgeschätzt werden, sondern auch andere mögliche Einflüsse wie tektonische Verschiebungen oder „eingefrorene“ Spannungen ehemaliger Landvereisungen (Brady & Brown, 2006).

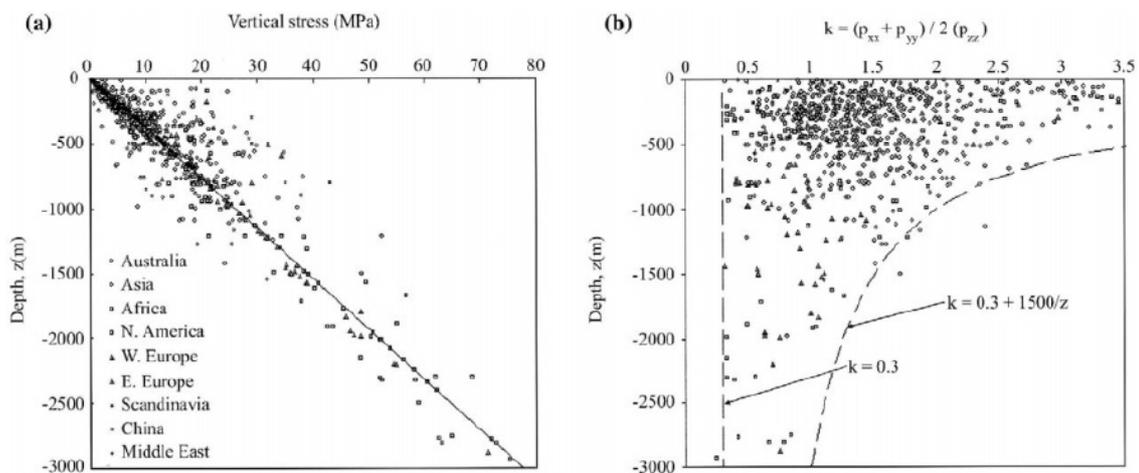


Abbildung 4-55: Darstellung des Verlaufes der Vertikalspannungen (linke Abbildung) als auch der Horizontalspannungen im Gebirge (rechte Abbildung). Dargestellt sind Messergebnisse von In-Situ Spannungsmessungen nach Brady & Brown (2006).

Die primären Vertikalspannungen im Gebirge nehmen direkt proportional mit der Teufe zu. Auf der linken Seite der Abbildung ist der Zusammenhang klar ersichtlich. Auf der rechten Abbildung ist der Seitendruckbeiwert k über die Teufe aufgetragen. Der Seitendruckbeiwert beschreibt das Verhältnis zwischen den primären Horizontal- zu den primären Vertikalspannungen. Ein Wert $k=2$ bedeutet somit, dass im untersuchten Gebiet die Horizontalspannungen doppelt so hoch wie die Vertikalspannungen sind. In größeren Teufen liegt dieses Verhältnis zwischen 0,5 und 1. In Bereichen die relativ oberflächennahe liegen kann der Seitendruckbeiwert jedoch Werte bis zu $k=3,5$ annehmen. Dh. unter bestimmten Voraussetzungen, wie z.B. ausgeprägte tektonische

Aktivitäten oder ehemalige Landvereisungen im großen Stil, können die Horizontalspannungen den dreifachen Wert der Vertikalspannungen aufweisen.

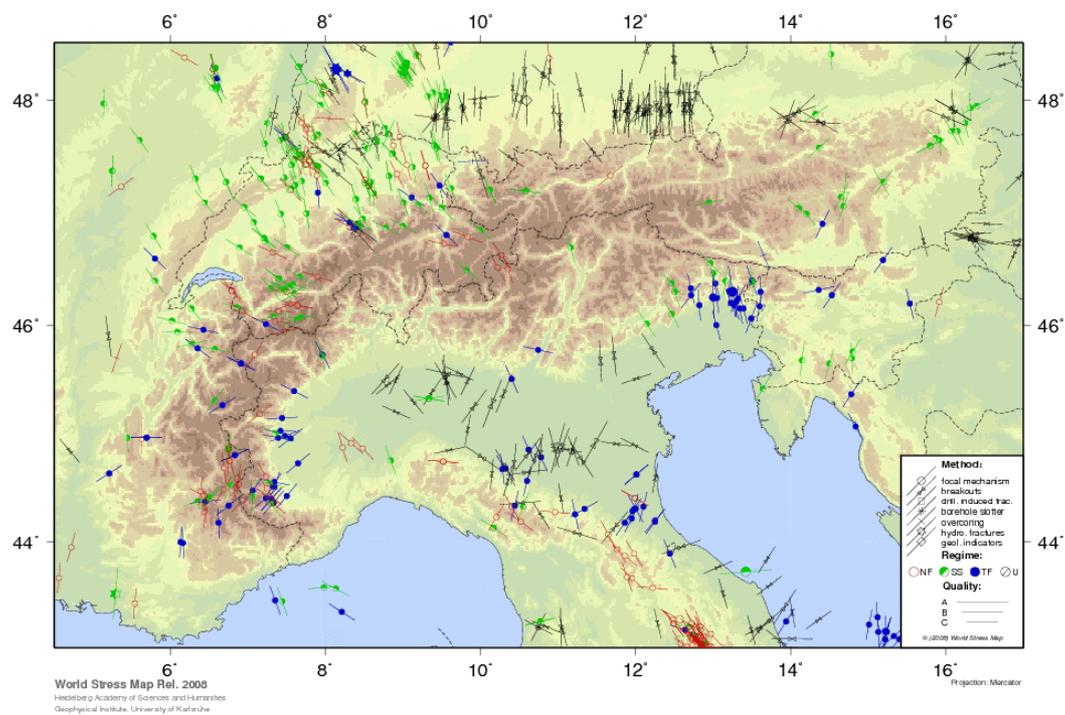


Abbildung 4-56: Darstellung des Spannungsregimes in Form einer Karte. Die Datengrundlage bildet das Projekt „World Stress Map“ des Helmholtz Zentrums in Potsdam¹⁶.

Für eine erste Abschätzung des Spannungszustandes können auch die Ergebnisse des Projektes „World Stress Map“ herangezogen werden. Über dieses Projekt können Ergebnisse von In-Situ Spannungsmessungen für eigene Vorhaben bezogen werden.

¹⁶ Siehe auch: Internetauftritt des Projektes www.world-stress-map.org/ (Juni 2012).

Goodman (1989) zeigt sehr anschaulich den Einfluss der Topografie und den Einfluss des geologischen Aufbaus auf den Verlauf der Primärspannungen und damit auch den Einfluss auf das Abbauverfahren.

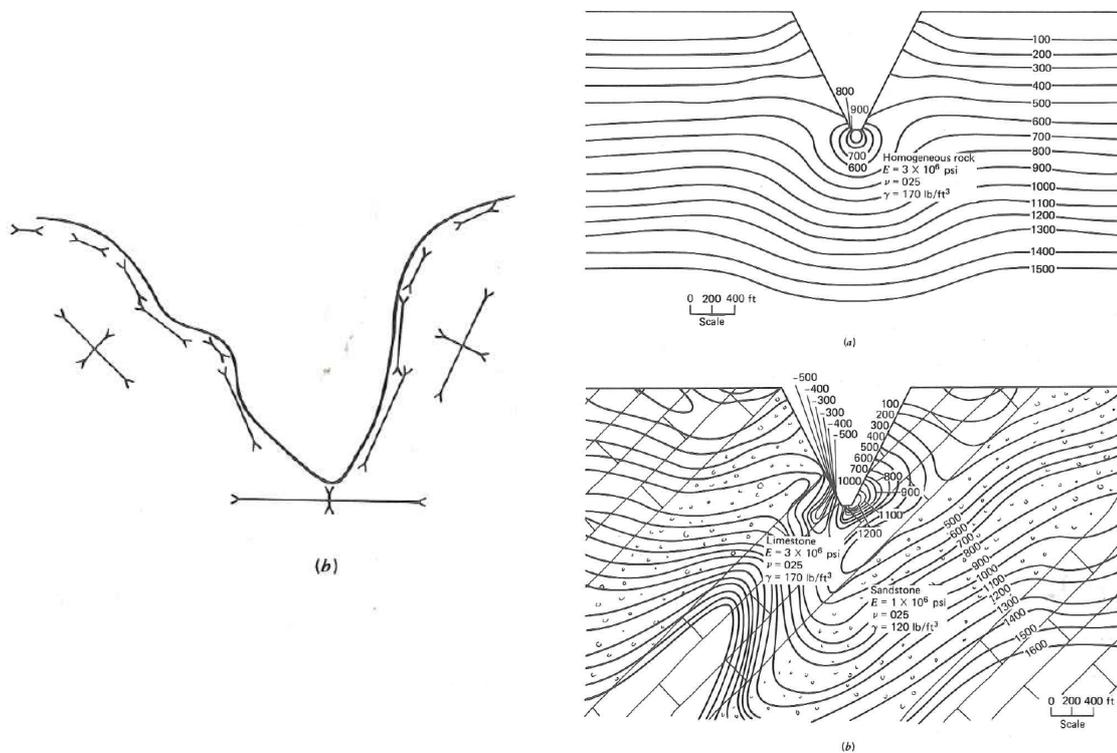


Abbildung 4-57: Linke Abb.: Einfluss der Topografie auf den Verlauf der primären Hauptnormalspannungen. Rechte Abb.: Einfluss des geologischen Aufbaus, insbesondere der unterschiedlichen Verformungsparameter, auf den Verlauf der Scherspannungen im homogenen (oben) und heterogenen (unten) Gebirge. Diagramme nach Goodman (Goodman 1989).

Ein Beispiel für den Einfluss des geologischen Aufbaus auf die Belastung der Bergfesten ist der Abbau in der Breitenau¹⁷. Bei dieser Lagerstätte handelt es sich um einen Karbonatkörper, welcher in sehr gebräunen und weichen Schiefen eingebettet ist. Der Karbonatkörper stellt also eine harte Inklusion innerhalb eines weichen Grundgebirges dar. Zusätzlich ist der Lagerstättenkörper sowohl in Richtung des Einfallens, als auch in Richtung des Streichens von sehr prominenten geologischen Diskontinuitäten zerschert und weist ein generelles Einfallen von 20° bis 25° in Richtung Süden auf.

In diesem Beispiel muss also nicht nur der „harte Einschluss“ Lagerstätte behandelt werden, sondern es muss bei der Abschätzung des Spannungsregimes auch das Einfallen der Lagerstätte berücksichtigt werden.

Die zweidimensionale Simulation führt in diesem Falle rasch an die Realitätsgrenzen, da sie die Effekte durch den zweidimensionalen Ansatz überzeichnet.

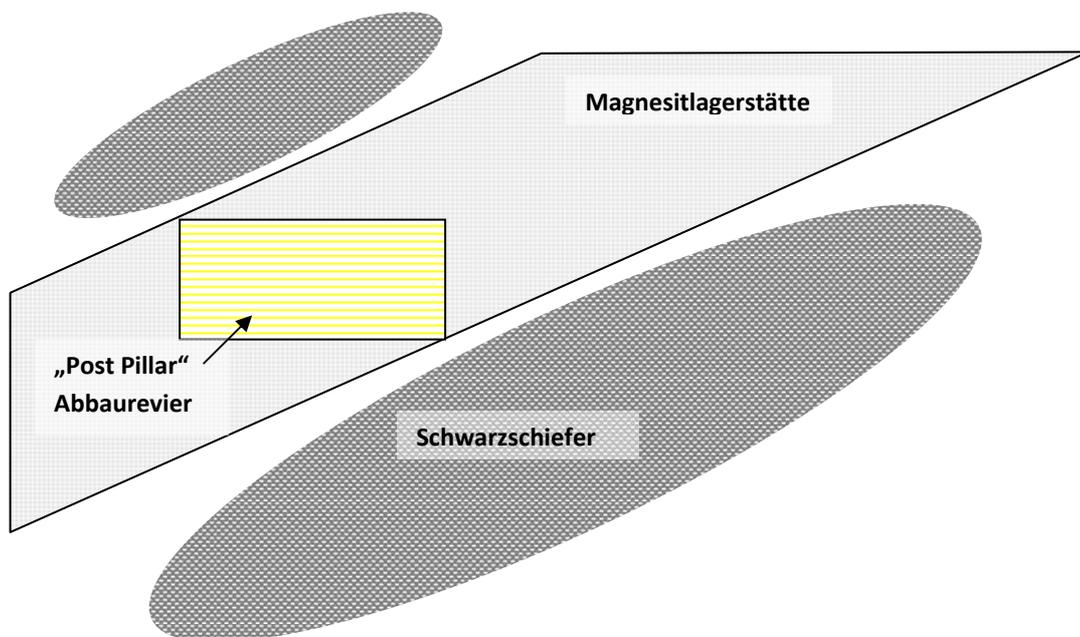


Abbildung 4-58: Schematische Darstellung des Einflusses des geologischen Aufbaus auf den Verlauf der Primärspannungen in einer Lagerstätte.

¹⁷ Siehe auch Kap. 3.1.4 S.3-13.

4.7 Konzept des Sicherheitsfaktors - Dimensionierung von Bergfesten beim „Post Pillar“ Abbauverfahren

Bei der Bemessung von Festen im Kammerfestenbau hat sich das, aus dem Maschinenbau stammende, Konzept eines Sicherheitsfaktors im klassischen Sinn gut bewährt.

Der Sicherheitsfaktor ist dabei als das Verhältnis zwischen der Festigkeit und den zu erwartenden Spannungen definiert. Die Höhe des Sicherheitsfaktors, der in der Praxis zur Anwendung kommt, wird durch die Genauigkeit, mit der die Festigkeit und die Belastbarkeit einer Struktur bestimmt werden kann, festgelegt. Ein wesentlicher Faktor ist die Variabilität der Festigkeit. Entscheidend für die Festlegung des Sicherheitsfaktors ist der Zusammenhang zwischen Sicherheitsfaktor und Versagenswahrscheinlichkeit. Im Falle von Kohlefesten liegen dazu umfangreiche Untersuchungen von Salamon (1967) vor.

Wirken mehrere Bergfesten in einem Abbaufeld zusammen müssen weitere Mechanismen und Begriffe unterschieden werden. Im Zuge eines Abbaus kann es durchaus der Fall sein, dass Bergfesten gezielt zu Bruch gehen, dh. das die Bergfesten kontrolliert, stabil an das Ende ihrer Tragfähigkeit geführt werden. Dazu ist es notwendig die Begriffe Stabilität / Instabilität und den Mechanismus des kontrollierten bzw. unkontrollierten Versagens einer Bergfeste zu diskutieren.

4.8 Stabiles - Instabiles Verhalten von Bergfesten

Da das Verhalten von Bergfesten nicht isoliert betrachtet werden kann, muss bei den Stabilitätsuntersuchung von Bergfesten auch das umgebende Gebirge im Liegenden und Hangenden und die Größe der Abbauabteilung selbst in den Überlegungen berücksichtigt werden.

Budavari (1983) bringt ein Beispiel um die Begriffe Stabilität und Instabilität, im Bezug zur Gebirgsmechanik, vereinfacht darzustellen:

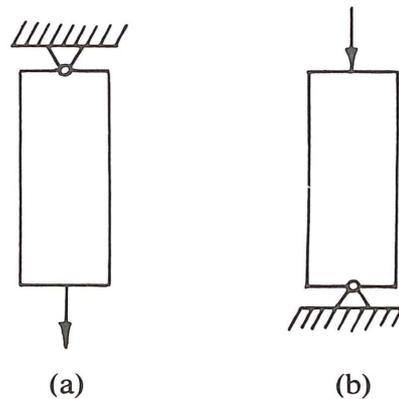


Abbildung 4-59: Darstellung einer stabilen (a) und instabilen (b) Situation anhand eines einfachen Beispiels nach Budavari (1983).

Unter einem instabilen Verhalten wird der Fall des Beispiels (b) verstanden. Sehr kleine Veränderungen können unter Umständen große, dramatische Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben. Dieses Verhalten kann man vor allem bei den großen Unglücken in Örterbauen¹⁸ beobachten, wo in kurzer Zeit großflächige Örterbauabteilungen unkontrolliert zu Bruch gehen.

Die Begriffe Stabilität / Instabilität dürfen nicht mit den Begriffen der Standfestigkeit verwechselt werden. Stabile Verhältnisse können z.B. auch herrschen, wenn Bergfesten kontrolliert zu Bruch gehen. Und auf der anderen Seite können instabile Verhältnisse augenscheinlich standfest erscheinen. Ein Bsp. für diesen Fall wäre ein großflächiger Örterbau ohne Barrierefesten, wobei jede Bergfeste für sich standfest erscheint, aber bei einem zu knapp bemessenen Sicherheitsfaktor innerhalb des Abbaufeldes, das Versagen einer Bergfeste eine unkontrollierte Kettenreaktion auslösen kann.

Für die Abschätzung welche Situation (stabil oder instabil) vorliegt, kann ein einfaches Gedankenmodell herangezogen werden. Wie bereits eingangs erwähnt, hängt es zum Einen vom Verhalten der Bergfeste selbst und zum Anderen vom Verhalten des umgebenden Gebirges ab ob eine stabile oder instabile Situation vorliegt.

Die Bergfeste wird in diesem Modell durch den Block R in Abbildung 4-60 S.4-72 in einer Belastungsanlage dargestellt. Der Block M stellt die Belastung dar und die Feder S soll die „Steifigkeit des Systems“ veranschaulichen.

¹⁸ Siehe z.B. Grubenunglück von Coalbrook (Bryan, 1964).

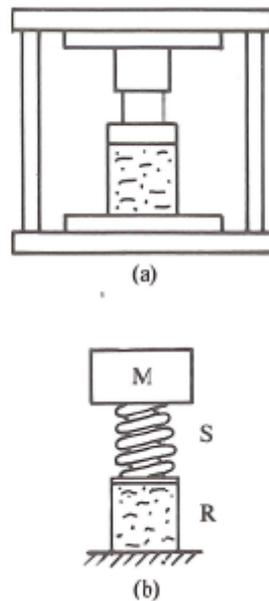


Abbildung 4-60: Einfaches Gedankenmodell zur Veranschaulichung des Verhaltens von Bergfesten unter Belastung zur Abschätzung der Stabilität des Gesamtsystems nach Salamon (1976).

Die Probe R wird über die Last M belastet und das Verhalten des Belastungssystems wird mittels der zwischengeschalteten Feder S dargestellt. D.h. zwei Systeme oder Mechanismen greifen ineinander und bilden ein Verhalten ab.

Das erste System beschreibt das Verhalten der Bergfeste unter Belastung und das zweite System das Verhalten des umgebenden Gebirges, welches wiederum von der Größe des Abbaubereiches abhängt.

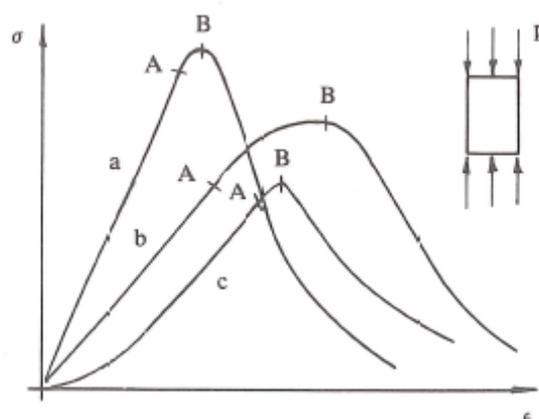


Abbildung 4-61: Last- Verformungsverhalten von verschiedenen Gesteinen (linke Abbildung) und Last- Verformungsverhalten von einem Gesteinstyp in Abhängigkeit der Geometrie des Probenkörpers nach Budavari (1983).

In Abbildung 4-61 S.4-72 ist das typische Last- Verformungsverhalten dreier Gesteine dargestellt. Im Allgemeinen finden wir einen elastischen Bereich (bis zum Punkt A), einen Punkt der das Versagen der Probe beschreibt (Punkt B) und bei den meisten Gesteinen einen sog. „Post Failure“ Bereich, in dem nach dem Erreichen der maximalen Druckfestigkeit (ab dem Punkt B) der Widerstand gegen die Verformung mit weiterer Verformung abnimmt.

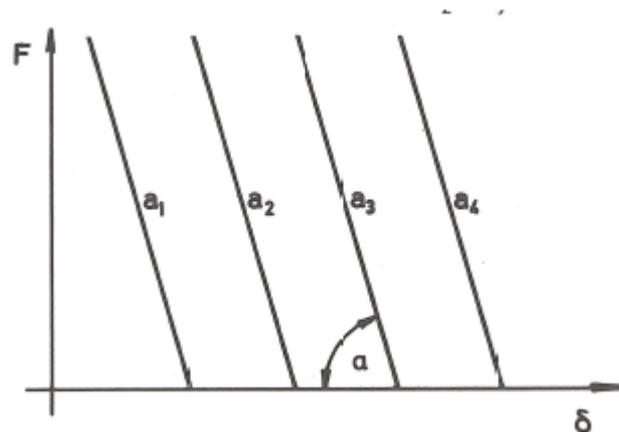


Abbildung 4-62: Darstellung des Last- Verformungsverhaltens des Systems.

Die Steifigkeit des Systems wird im Last- Verformungsdiagramm dargestellt. Diese Steifigkeit wird in Abbildung 4-60 S.4-72 durch die Feder S symbolisiert. Je steifer sich das System darstellt, desto steiler sind die Kennlinien im Last- Verformungsdiagramm und desto größer ist die Steifigkeit des Systems (der Feder S).

Vereint man nun in Anlehnung an das vorgestellte Gedankenmodell, die zwei Einzelmechanismen, kann man eine Aussage über die Stabilität des Gesamtsystems tätigen.

Zeigt sich der Abfall der Festigkeit im „Post Failure“ Bereich flacher im Vergleich zur Steifigkeit des Belastungssystems, ist von einem stabilen Verhalten des Gesamtsystems auszugehen. Beobachtet man, im Gegensatz dazu, einen sehr raschen Festigkeitsabfall, d.h. die Probenfestigkeit nimmt rascher ab als die des Belastungssystems, dann erhält man den Punkt Q als Übergang zwischen einem stabilen und einem instabilen Verhalten.

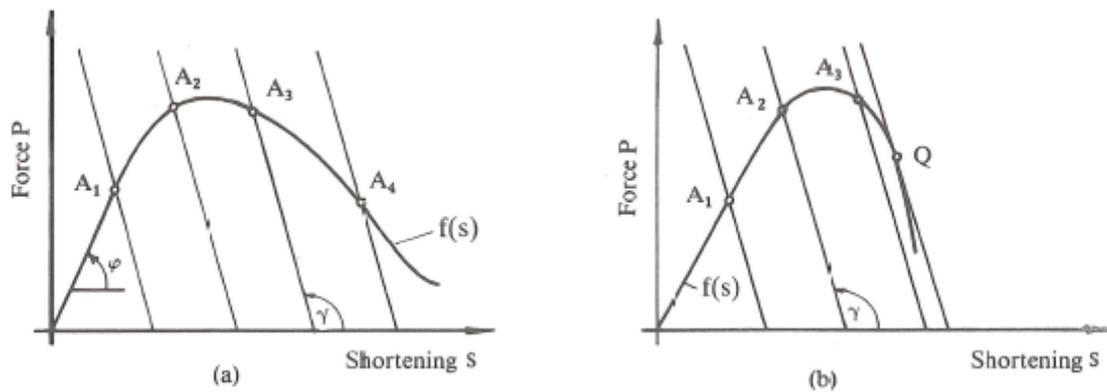


Abbildung 4-63: Darstellung des Zusammenspiels zwischen dem Last-Verformungsverhalten von der untersuchten Probe und der Steifigkeit des Systems für eine stabile Situation (linke Abbildung) und einer instabilen Situation (rechte Abbildung) nach Budavari (1983).

Die geschilderten Vorgänge, welche in einem Last-Verformungsdiagramm dargestellt wurden, beschreiben Energieveränderungen im System (siehe Abbildung 4-64).

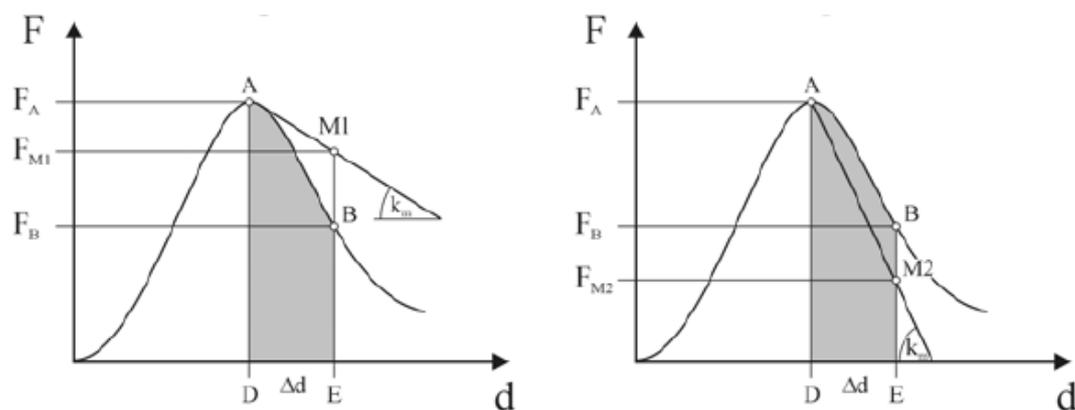


Abbildung 4-64: Last-Verformungsverhalten einer stabilen Situation (rechte Abbildung) und einer instabilen Situation (linke Abbildung) nach Vorlesungsunterlagen von Wagner (2005).

Die schraffierte Fläche im Last-Verformungsdiagramm der Probe (Bergfeste) stellt den Energieaufwand dar, der benötigt wird um die Feste von Punkt A nach Punkt B zu verformen. Die durch die Punkte A, D, M1 und E dargestellte Fläche entspricht der Energie die vom Belastungssystem abgegeben wird, wenn sich das System von Punkt D nach Punkt E um den Betrag Δd entspannt.

Ist dieser Betrag größer als der für die weitere Verformung der Feste benötigte Energiebetrag, dann kommt es zu einem plötzlichen, unkontrollierten Versagen der Feste. Ist der vom Belastungssystem freigesetzte Energiebetrag kleiner als der zur weiteren Verformung der Feste benötigte Energiebetrag, dann ist das Festensystemverhalten stabil.

Im Fall untertägiger Abbausysteme, wie z.B. dem Örterbau oder auch dem „Post Pillar“ Abbauverfahren, ist man in der Lage, sowohl auf das Last- Verformungsverhalten der Bergfesten als auch auf die Steifigkeit des Belastungssystems Einfluss zu nehmen um unter Umständen kritische instabile Situationen zu vermeiden. D.h. man ist in der Lage aktiv in die Stabilitätsfrage eines Systems eingreifen.

Das Last- Verformungsverhalten der Bergfesten kann über die Geometrie und durch den Einsatz von Versatz positiv beeinflusst werden.

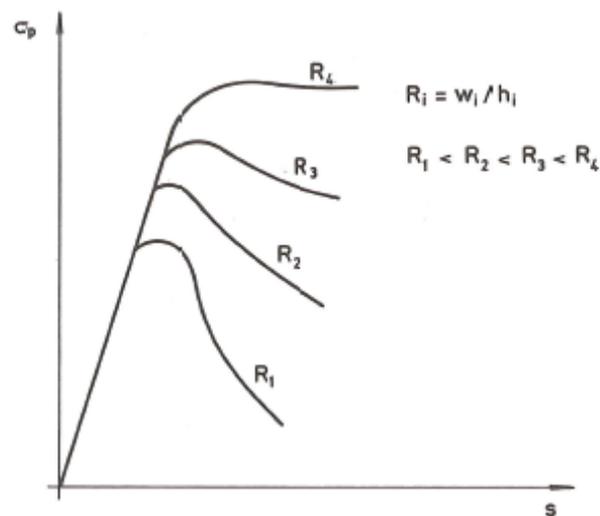


Abbildung 4-65: Last- Verformungsverhalten einer Gesteinsprobe bei unterschiedlichen Breiten- zu Höhenverhältnissen nach Salomon (1976).

Untersucht man das Last- Verformungsverhalten eines Gesteins bei unterschiedlichen Geometrien, verwirklicht durch unterschiedliche Breiten- zu Höhenverhältnisse der Proben, kann man folgendes feststellen:

Vergrößert man das Breiten- zu Höhenverhältnis, vergrößert man den elastischen Bereich der Last- Verformungskurve und damit die Höhe der Druckfestigkeit und im Bezug zur Frage des Stabilitätsverhaltens ein noch viel wichtigerer Punkt, das „Post Failure“ Verhalten der Probe. Nach dem Erreichen der maximalen Druckfestigkeit verflacht sich die Kennlinie (das Verhalten wird „weicher“).

Dieses Verflachen wirkt sich positiv auf das Stabilitätsverhalten aus. Abbildung 4-63 S.4-74 zeigt die positiven Auswirkungen dieses „Weicherwerdens“ des „Post Failure“ Last-Verformungsverhaltens. Durch die flache Kennlinie kann der instabile Bereich Q vermieden werden und man bewegt sich in Richtung eines kontrollierten Systemverhaltens.

Die Arbeiten von Galvin (1981) zeigen deutlich die Verflachung, das Weicherwerden, des „Post Failure“ Bereiches der Bergfeste durch das Einbringen von Versatz. Das Einbringen von Versatz bewirkt eine deutliche Stabilisierung der Gesamtsituation.

Auf den positiven Einfluss des Versatzes auf das „Post Failure“ Verhalten hat auch Salamon (1983) hingewiesen.

Im Fall des „Post Pillar“ Abbaufahrens sind die Bergfesten jedoch außerordentlich schlank, d.h. die Festengeometrie kommt nicht einem stabilen Verhalten entgegen. Andererseits ist die Festigkeit der sehr schlanken Festen infolge der Geometrie und den unvermeidbaren geologischen Diskontinuitäten sehr gering. Das bedeutet, dass die Festenspannungen gering sind. Dieser Umstand, zusammen mit dem Versatz, bedeutet dass der Festigkeitsabfall gegen die Verformung der im Versatz stehenden Bergfesten gering sein wird. Dies bedeutet wiederum, dass die „Post Failure“ Kurve flach sein wird.

Der zweite Parameter welcher die Stabilität bestimmt ist die Steifigkeit des Belastungssystems. Diese wird neben dem eigentlichen geologischen Aufbau des Abbaubereiches vor allem durch die Breite der Abbaubteilung bestimmt.

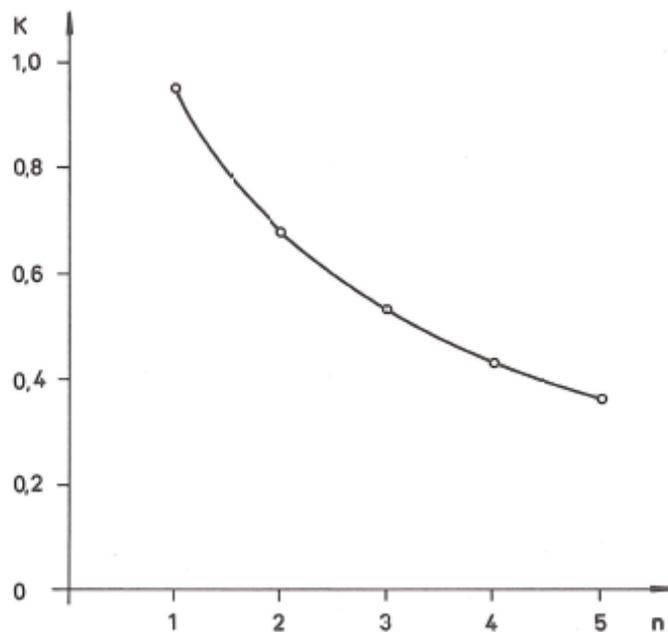


Abbildung 4-66: Relative Steifigkeit des Belastungssystems in Abhängigkeit der Anzahl der Bergfesten innerhalb der Abbaubteilung nach Salamon (1976).

Salamon zeigt den Zusammenhang zwischen der relativen Steifigkeit des Belastungssystems und der Breite der Abbaubteilung, ausgedrückt in der Zahl der Bergfesten innerhalb der Abbaubteilung. Sehr breite Abteilungen verhalten sich tendenziell weicher als Abbaubteilungen mit einer eher geringen Baufeldbreite, welche sich eher steifer (härter) verhalten. D.h. breite Abbaubteilungen sind eher anfällig für

instabiles Verhalten, d.h. ihre Last- Verformungskennlinie ist flach (siehe Abbildung 4-66).

Erhöht man die Breite des Abbaufeldes, und damit die Anzahl der Bergfesten in der Abbauabteilung, bewegt man sich immer mehr in Richtung einer spannungskontrollierten Situation. Im Fall einer unendlich großen Anzahl an Bergfesten innerhalb einer Abteilung erhält man eine perfekt weiche (waagrechte) Last-Verformungskennlinie des Belastungssystems. Dies stellt in Bezug zu den Stabilitätsfragen den ungünstigsten Fall dar, da im Falle eines Versagens die gesamte im System gespeicherte Energie zur Verfügung steht um den Bruchvorgang zu beschleunigen.

Schlussfolgerungen:

Neben dem etablierten und auch in der Gebirgsmechanik verwendeten Verfahren des Sicherheitsfaktors sind Stabilitätsüberlegungen in der Auslegung von untertägigen Abbauen von besonderer Bedeutung.

Standfeste Situationen, wie z.B. eine große Anzahl von Bergfesten innerhalb einer Abteilung mit jeweils einem geringen Sicherheitsfaktor $SF=1,3$, können instabil und unkontrolliert versagen, wenn z.B. eine Bergfeste versagt und die Belastung wird auf die Nachbarfesten übertragen und somit steigt die Belastung der benachbarten Bergfesten steigt und somit wird folglich deren Sicherheitsfaktor verringert.

Andererseits können aber nicht standfeste Situationen sehr wohl kontrolliert zu Bruch gehen.

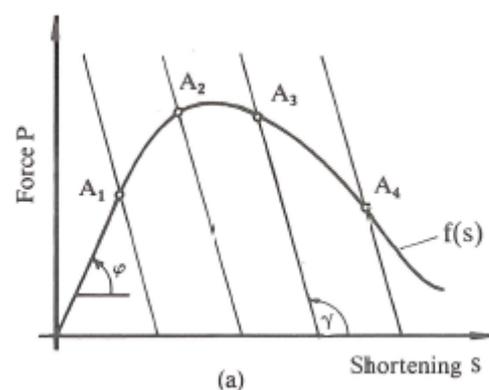


Abbildung 4-67: Darstellung des Zusammenspiels zwischen dem Last- Verformungsverhalten einer Bergfeste und der Steifigkeit des Belastungssystems für eine stabile nach Budavari (1983).

Ruft man sich den stabilen Zustand nach Budavari (1983) in Erinnerung (siehe Abbildung oben), ist es möglich, dass bei steifen Belastungssystemen, steifer als der „Post Failure“ Bereich der Bergfeste, eine Bergfeste stabil verbricht.

Aus diesen Zusammenhängen kann für das „Post Pillar“ Abbauverfahren angemerkt werden, dass das Breiten- zu Höhenverhältnis der schlanken Bergfesten eher für ein instabiles Gesamtverhalten spricht. Auf Grund der Tatsache, dass die Bergfesten über ihre gesamte Höhe im Versatz stehen und damit ihr Last- Verformungsverhalten im „Post Pillar“ Bereich sich überhaupt ausbilden kann und wirksam wird, spricht wiederum für ein eher stabiles Verhalten. Der wichtigste Punkt, welcher für ein stabiles Verhalten des Gesamtsystems „Post Pillar“ Abbauverfahren spricht, sind die eher kleinen Spannweiten der in der Literatur beschriebenen Abbaue (siehe Kap. 3.1 S.3-3).

Die Auswirkungen einer Vergrößerung der Baufeldbreite kann bei Bharti (1983) nachgelesen werden. Zu Beginn des Abbaus in der Strathcona Mine (siehe Kap. 3.1.1 S.3-4) sind die relativ schmalen „Post Pillar“ Abbaufelder durch Streifenfesten getrennt worden. Im Laufe des Abbaus (siehe Abbildung 4-68 S.4-78) sind die Streifenfesten aufgegeben worden und somit die Baufeldbreite dramatisch erweitert worden.

Im weiteren Abbauverlauf ergaben sich eine ausgeprägte Steinfallproblematik, welche zu einer Abänderung des Abbauverfahrens führte (siehe Abbildung 3-4 S.3-5 & Erläuterungen).

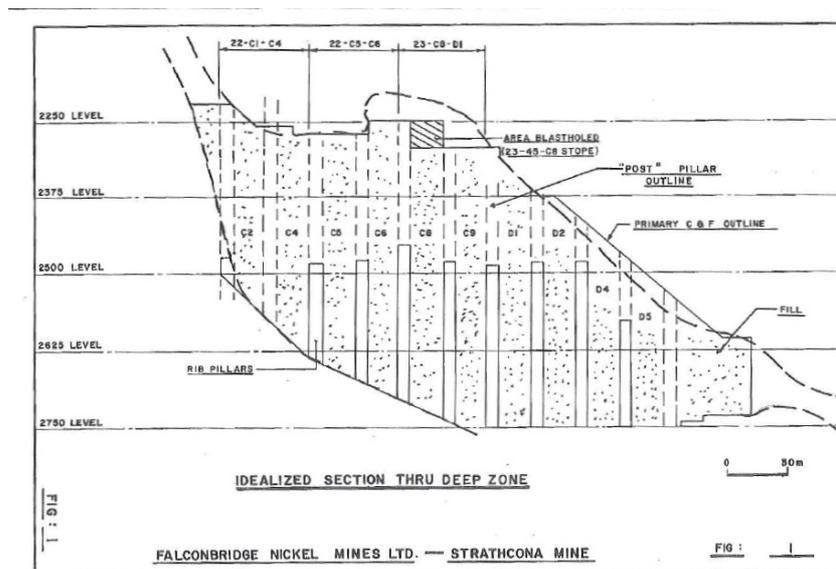


Abbildung 4-68: Schnitt durch ein „Post Pillar“ Abbauevier der Strathcona Mine.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Festenbelastung nach Winkler (Kap. 4.4.4 S.4-34) zeigen auch die dramatischen Auswirkungen der Verbreiterung des Baufeldes.

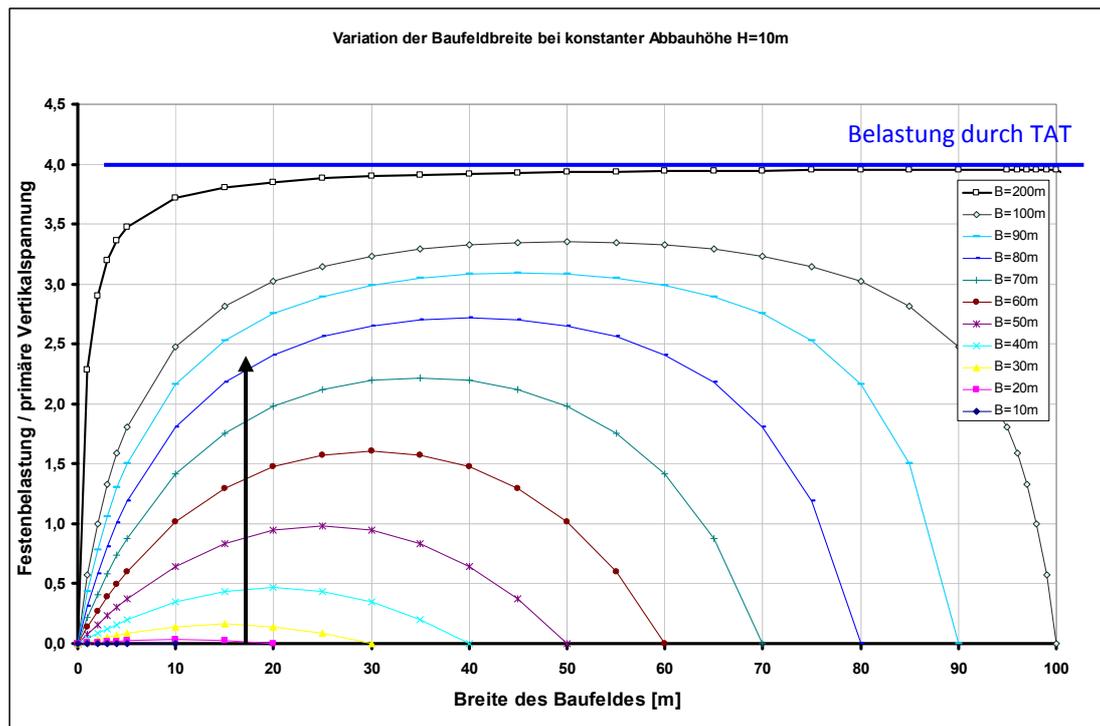


Abbildung 4-69: Verhältnis der Festbelastung zur primären Vertikalspannung bei einer Abbauhöhe von H=10m in Abhängigkeit der Breite des Baufeldes.

Wird ein Abbaufeld mit einer Breite von 30m auf eine Breite von z.B. 90m erweitert, erhöht sich die Festenbelastung von 0,2 auf 2,5 * der primären Vertikalspannungen in der mittleren Feste des ursprünglich 30m breiten Baufeldes. In der Mitte des entstandenen 90m breiten Abbaufeldes entwickeln sich Festenspannungen die ca. dem Dreifachen der primären Vertikalspannungen entsprechen.

Die Breite der Abbaubteilung stellt den wichtigsten Einflussparameter für das stabile Gesamtverhalten des „Post Pillar“ Abbauverfahrens dar. Die in der Literatur beschriebenen „Post Pillar“ Abbauverfahren haben im Schnitt wirksame Baufeldbreiten zwischen 30 und 150m. Der untertägige Magnesitbergbau in der Breitenau¹⁹ hat die Abbaufelder mit den größten wirksamen Baufeldbreiten. Für den Fall der Breitenau muss aber angemerkt werden, dass die meisten Baufelder durch die zum Schutze der Hauptausrichtungsbaue zurückgelassenen Sicherheitsfesten (Wendelfesten) unterteilt werden und somit die für die Frage der Stabilität sehr wichtige Baufeldbreite gering und somit unterkritisch gehalten wird.

¹⁹ Siehe auch Kap. 3.1.4 S.3-13.

4.9 Entwicklung des Abbauverfahrens

An dieser Stelle scheint es bemerkenswert, dass Cleland & Sing (Cleland, 1973) erste Ansätze über die Thematik Stabilität – Instabilität in ihre Planungen berücksichtigten.

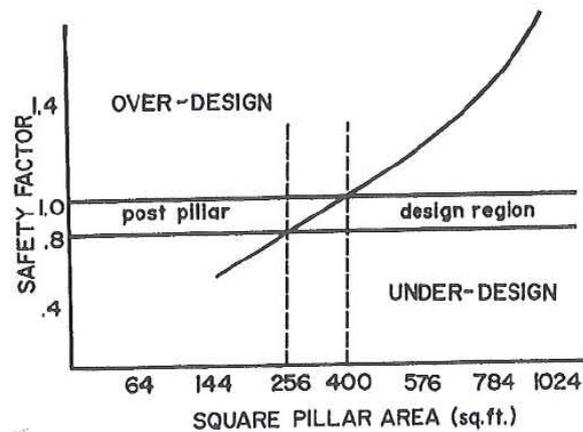


Abbildung 4-70: Design Chart von Cleland & Sing für die Dimensionierung von Bergfesten in der Strathcona Mine.

Cleland & Singh berücksichtigten einige sehr wichtige Gesichtspunkte der Gebirgsmechanik für die Dimensionierung des Abbaus in der Strathcona Mine²⁰:

Bei der Dimensionierung der Bergfesten, vor allem bei der Abschätzung der Festigkeit, ist von einem benötigten Sicherheitsfaktor zwischen $SF=0,8$ und $SF=1$ ausgegangen worden.

Die beiden Autoren sind von einem kontrollierten Versagen der Bergfesten im Versatz ausgegangen. Dieses kontrollierte Versagen, so es überhaupt stattgefunden hat - man kann nicht mehr eruieren in welchem Bereich des Last- Verformungsdiagramms sich die Bergfesten befunden haben - ist durch das kleine, und somit steife, Abbaufeld, bedingt durch das Zurücklassen von Streifenfesten, begünstigt worden.

²⁰ Die Strathcona Mine ist bereits im Kapitel 3.1.1 auf Seite 3-4 beschrieben worden.

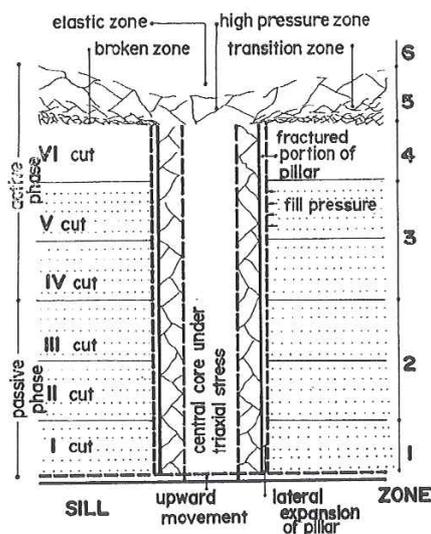


Abbildung 4-71: Modell der Festenverformung im Zuge des Abbaus beim „Post Pillar Abbauverfahren“ nach Cleland & Sing (Cleland 1973).

Erste Abbaubersuche deuteten darauf hin, dass mit einer bis 1m tiefen Auflockerungszone an den Ulmen der Bergfesten zu rechnen ist. Auf Grund der Umschlingung des Versatzes, bedingt durch den lateralen Versatzdruck, ist von einem dreiaxialen Zustand in der Mitte der Bergfeste ausgegangen worden.

Sowohl die Tatsache, dass ein kontrolliertes Versagen von Bergfesten unter bestimmten Rahmenbedingungen innerhalb eines Abbauverfahrens beherrschbar ist, als auch die Annahme der dreiaxialen Spannungssituation im Inneren einer Bergfeste im Versatz, zeugen von einer innovativen Sichtweise der Herren Cleland & Sing in Bezug auf die Planungen des „Post Pillar“ Abbauverfahrens in der Strathcona Mine.

4.10 Schlussfolgerungen

Generell wird im Bergbau die Standfestigkeit von Bergfesten nach dem Konzept des Sicherheitsfaktors dimensioniert. Die Festigkeit der Bergfeste wird der Belastung der Feste gegenübergestellt.

$$SF = \frac{\text{Festigkeit}}{\text{Belastung}}$$

Formel 4-20: Formale Darstellung des Konzepts des Sicherheitsfaktors

In Kapitel 4.2 auf S. 4-2 sind die gängigen Formeln für die Berechnung der Standfestigkeit der Bergfesten im Hartgesteinsbergbau beschrieben.

Die Sicherheitsfaktoren für Bergfesten liegen je nach Einsatzbereich zwischen 1,4 und 1,9 (siehe auch (Brady, 2006)) und im Bereich sehr langlebiger Grubenbaue bis zu 2,2.

Im Falle des „Post Pillar“ Abbaufahrens ist das klassische Konzept des Sicherheitsfaktors, auf der Basis des gegenwärtigen Stands des Wissens betreffend die Festigkeit der sehr schlanken im Versatz stehenden Bergfesten und die Belastung dieser Festen, nur begrenzt anwendbar. Alle Hinweise deuten darauf hin, dass die Festen zumindest teilweise überbelastet sein können und sich im „Post Failure“ Bereich befinden. Die kleinen Baufeldbreiten und die damit verbundene hohe Steifigkeit des Grubengebäudes, zusammen mit dem Versatz, führen jedoch dazu, dass etwaiges Festenversagen stabil erfolgt.

Es zeigt sich auch sehr deutlich die Komplexität der einzelnen Mechanismen und die Problematiken der Verifikation und Analyse durch das gruppierte Auftreten der Einzelmechanismen.

Auch naheliegende Lösungsansätze, wie die etablierte Standfestigkeitsberechnungen nach dem Konzept des Sicherheitsfaktors, können auf Grund der außergewöhnlichen Geometrie der Bergfesten, sehr großes H/B Verhältnis, nicht angewendet werden. Realitätsnahe Annahmen zur Abschätzung der Belastung der Bergfesten sind ohne numerischer Simulationen und sehr aufwendiger In Situ Spannungsmessungen schwer abzugeben. Die Theorie der zugeordneten Festen kann nicht angewendet werden.

Es kann festgestellt werden, dass der Versatz ein festigkeitssteigerndes Element ist, diese Erhöhung der Festigkeit lässt sich aber quantitativ nicht ausdrücken.

Die Auswirkungen geometrische Veränderungen des Abbaufeldes können getrennt voneinander qualitativ beschrieben werden (Festensysteme A-C), aber nicht im Zusammenhang unter der Berücksichtigung der Auswirkungen des Versatzes und der Inhomogenitäten des Gebirges.

Qualitativ kann eine Abschätzung über jeden einzelnen Mechanismus oder Eingangsparameter abgegeben werden, wie es in diesem Kapitel versucht worden ist. Das Zusammenspiel mehrerer Mechanismen unter der Berücksichtigung einer sich verändernden Geometrie, plastischen Materialverhaltens, den Einfluss des Versatzes und der Festigkeit des Gebirges kann nur mit dem Hilfsmittel der numerischen Simulation untersucht und dargestellt werden.

Positiv auf das Stabilitätsverhalten des „Post Pillar“ Abbausystems wirken sich kleine Spannweiten und das Zurücklassen der Bergfesten im Versatz aus. Ungünstig wirkt sich das niedrige Breiten- zu Höhenverhältnis aus.

Um all diese Einzelmechanismen zu verknüpfen ist ein „Post Pillar Abbaufeld“, unter Berücksichtigung des scheibenweisen Abbaus und der Interaktion mit dem eingebrachten bindemittellosen Versatzes numerisch simuliert worden. Mit Hilfe der numerischen

Simulation ist man weitestgehend in der Lage die zuvor beschriebenen Einzelmechanismen miteinander zu einem schlüssigen Modell zu verknüpfen.

4.11 Literaturverzeichnis Kapitel 4

- Askew, J. E.; McCarthy, P. L.; Fitzgerald, D. J. (1978): Backfill Research for Pillar Extraction at ZC/NBHC: Mining with backfill. 12. Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, Ontario, May 23 - 25, 1978. Montreal: The Canadian Inst. of Mining and Metallurgy. Special volume, S. 100–110.
- Barret, J. R.; Coulthard, M. A. (1978): Determination of Fill Stability: Mining with backfill. 12. Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, Ontario, May 23 - 25, 1978. Montreal: The Canadian Inst. of Mining and Metallurgy. Special volume, S. 85–91.
- BlaHa, H (2008): Studie über die Stabilität des Grubengebäudes "ex. Saceba" in Morbio Inferiore. Herausgegeben von Lehrstuhl für Bergbaukunde. Montanuniversität Leoben. Leoben.
- BlaHa, H. (2002): Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Festen mit und ohne Versatz. Diplomarbeit. Betreut von Horst Wagner. Leoben. Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde.
- Brady B. H. G.; Brown E. T. (2006): Rock Mechanics. For underground mining. Third Edition. Dordrecht: Springer Science + Business Media Inc.
- Bryan A.; Bryan J. G.; Fouche J. (1964): Some problems of strata control and support in pillar workings. *Min. Eng.*, 123, 238-254.
- Budavari, S. (1983): Rock mechanics in mining practice. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy (South African Institute of Mining and Metallurgy monograph series, 5).
- Cleland, R. S.; Sing, K. H. (1973): Development of Post Pillar Mining at Falconbridge Nickel Mines Limited. In: *CIM Bulletin*, Jg. 1973, H. April, S. 57–64.
- Esterhuizen, G. S. (2008): Assessment of stable and failed pillars in underground limestone mines. In: *Mining engineering*, Jg. 60, H. 11, S. 42–48.
- Esterhuizen, G. S. (2011): Pillar strength in underground stone mines in the United States. In: *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Jg. 35, H. 1, S. 42–50.
- Galvin, J. M. (1981): The Mining of South African thick coal seams - Rock Mechanics and Mining considerations. Dissertation. Johannesburg. Witwatersrand, Faculty of Engineering.
- Gonzalez-Nicieza, C.: A Comparative Analysis of Pillar Design Methods and its Application to Marble Mines. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, S. 2006; VOL 39; NUMBER 5, 421-444.
- Goodman, Richard E. (1989): Introduction to rock mechanics. 2. ed. New York NY u.a.: Wiley.

- Hardy, P.; Agapito, J. F. T. (1982): Induced horizontal stress method of pillar design in oil shale: XV Oil Shale Symp. Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Hartman, Howard L. (1992): SME mining engineering handbook. 2. ed. Littleton, Colo: Society for Mining Metallurgy and Exploration.
- Hasewend, Hannes (2004): Laborversuche zum Tragverhalten von Festen mit und ohne Versatz. Diplomarbeit. Betreut von Horst Wagner. Leoben. Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde.
- Hedley D. G. F.; Grant, F. (1972): Stope and Pillar design for the Elliot Lake uranium Mines. In: CIM Bulletin, Jg. 65, H. 65, S. 37–44.
- Janssen, H. A. (1895): Getreidedruck in Silozellen. Z. Ver. Dt. Ing. 39: 1045 - 1049
- Krauland, N.; Soder, P. E. (1987): Determining pillar strength from pillar failure observations. In: Eng Min J, H. 8, S. 34–40.
- Lunder, P. J.; Pakalnis, R. (1997): Determination of the strength of hardrock mine pillars. In: Bull Can Inst Min Metall, Jg. 90, H. 51-55.
- Mark, C. (1990): Pillar design methods for longwall mining. USBM Information Circular 9247, S. 1–53, zuletzt geprüft am 11.08.2011.
- Martin, C. D. (2000): The strength of hard-rock pillars. In: International journal of rock mechanics and mining sciences : RMMS, Jg. 37, H. 8, S. 1239–1246.
- Maybee, W. G. (2000): Pillar Design in Hard Brittle Rocks. Masterthesis. Sudbury. Laurentian University, Mineral Resources Engineering.
- Miller D. R.; Barret J. R. (1979): Jointed Rock Mass Characteristics and their Influence on slender Pillars. In: Proc. 20th Symposium on Rock Mechanics, Jg. 1979.
- Napier, J. A. L. (2011): Numerical computation of average pillar stress and implications for pillar design. In: South African Institute of Mining and Metallurgy, S. 2011; VOL 111; NUMB 12, 837-846.
- Nilson, G.; Krauland, N. (1981): Rock mechanics observations and measurements in Näsliden mine. In: Stephansson, Ove.; Jones, Michael J. (Hg.): Application of rock mechanics to cut and fill mining. Proceedings of the Conference on the Application of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining ... held at the University of Luleå, Sweden, from 1 to 3 June, 1980. London: Inst. of Mining and Metallurgy, S. 233–249.
- Oravec, K. (1977): Analogue Modeling of Stresses and Displacements in Bord and Pillar Workings in Coal Mines. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Jg. 14, S. 7–23.
- Potvin, Y.; Hudyma, M. R.; Miller, H.D.S. (1989): Design guidelines for open stope support. In: Bull Can Min Metall, Jg. 82, S. 53–62.
- Salamon MDG, Munro A. H. (1967): A study of the strength of coal pillars. In: Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Jg. 68, S. 55–67.
- Salamon, M.D.G. (1983): The role of Pillars in Mining. In: South African Institute of Mining and Metallurgy, H. 5, S. 173–200.
- Salamon, M.D.G.; Oravec, K. I. (1976): Rock Mechanics in Coal Mining. Johannesburg: Coal Mining Research Controlling Council.

- Schulze, Dietmar (2006): *Pulver und Schüttgüter. Fließeigenschaften und Handhabung.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-11777 /Dig. Serial]).
- Sheorey, P. R.; Loui, J. P.; Singh, K. B.; Singh, S. K. (2000): Ground subsidence observations and a modified influence function method for complete subsidence prediction. In: *International journal of rock mechanics and mining sciences*, Jg. 37, S. 801–818.
- Sjöberg, J. (1992): Failure modes and pillar behaviour in the Zinkgruvan mine. In: *Proceedings of 33rd U.S. Rock Mechanics Symposium, Sante Fe*, S. 491–500.
- von Kimmelman; Hyde, B.; Madgwick, R. J. (1984): The use of computer applications at BCL Limited in planning pillar extraction and design of mining layouts. In: *Proceedings of ISRM Symposium: Design and Performance of Underground Excavations.*, S. 53–63.
- Wagner, H.; Sanak-Oberdorfer A. (1996): Grenzen und Möglichkeiten des Einsatzes von betriebsfremden Stoffen im österreichischen Bergbau. In: *Abfallbehandlung Deponietechnik und Altlastenproblematik*, H. ISBN 9054108304, S. 191–200.
- Wagner, H.; Ryder, J. A. (1978). 2d analysis of backfills as a means of reducing energy release rates at depth. *Chamber of Mines Res. Report: Nr 47/78*
- Wagner, H. (2005): *Mining Rock Mechanics I. Vorlesungsskriptum.*
- Winkler, E. (1867): *Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit mit besonderer Ruecksicht auf ihre Anwendungen in der Technik, 1. Theil.* H. Dominicus, Prag.

5 Numerische Simulationen

Die in der Literatur beschriebenen Betriebe sind im Kapitel drei vorgestellt und beschrieben worden. In Kapitel 4 sind die maßgebenden Einzelmechanismen des „Post Pillar“ Abbauverfahrens analysiert worden.

Es sind die Festigkeit- und die Belastung der Bergfesten, die verformungs- bzw. spannungskontrollierte Situation der Belastung, die geometrischen Veränderungen des Abbaufeldes, der Einfluss des Versatzes auf die Standfestigkeit von Bergfesten, die Gebirgsspannungen und die Frage der Stabilität und Instabilität einzeln betrachtet worden.

Mit Hilfe der numerischen Simulation sollen nunmehr die komplexen Wechselwirkungen realitätsnahe miteinander verknüpft und abgebildet werden. Dazu ist es notwendig den Abbau so realitätsnahe wie möglich in der numerischen Simulation zu berücksichtigen. Vor allem der scheibenweise Abbau und das scheibenweise Einbringen des Versatzes ist sehr wichtig für die Plausibilität der Ergebnisse der Simulation. Gleichzeitig mit dem scheibenweisen Abbau wird in der numerischen Simulation die Veränderung der Geometrie des Abbaufeldes (Veränderung der Höhe des Abbaufeldes – bei konstanter Breite des Abbaufeldes) berücksichtigt. Zur selben Zeit können die Auswirkungen dieser Veränderungen durch die numerische Simulation berücksichtigt werden.

Zusätzlich zur Verknüpfung der in Kapitel 4 aufgestellten Mechanismen können mit Hilfe der numerischen Simulation zusätzliche Effekte dokumentiert und beschrieben werden. Man ist in der Lage Spannungen und Verformungen für jeden Abbauschritt und somit, z.B. Veränderungen in der Verteilung der Vertikalspannung innerhalb der Festen im Zuge des Abbaus, darzustellen. Nur mit der numerischen Simulation ist man in der Lage die Randbedingungen des Modells (z.B. der Seitendruckbeiwert k oder die Teufenlage) zu variieren um deren Auswirkungen zu untersuchen.

Die numerischen Simulationen sind mit dem Computerprogramm Flac 2D²¹ Vers. 4.0 der Firma Itasca durchgeführt worden.

Da die Simulationen in dieser Arbeit eher komplex aufgebaut sind und die einzelnen Teilmodelle nicht zu 100 % überprüfbar waren, sollen sie in dieser Arbeit als sog. „Hilfsmittel“ gesehen werden. Vor allem die Verformungseigenschaften des Versatzes und die Interaktion zwischen dem eingebrachten Versatz und den Bergfesten konnte nicht quantitativ abgeschätzt werden. In diesem Fall ist auf Parameter aus der Literatur

²¹ (Flac 2D)

zurückgegriffen worden. Im Kapitel 5.6 auf Seite 5-36 wird noch einmal auf die Unsicherheiten bzw. Schwächen der Simulation eingegangen und die möglichen Auswirkungen auf die Ergebnisse diskutiert.

In einem ersten Schritt wird das numerische Simulationsmodell erklärt, die Eingangsparameter besprochen und anhand kleinerer Rechnungen die Plausibilitätsprüfung dargestellt. Im Anschluss daran werden die im Kapitel 4 vorgestellten gebirgsmechanischen Mechanismen mit den Ergebnissen der Simulation in Zusammenhang gebracht und mit Messergebnissen aus der Literatur in Konnex gebracht.

5.1 Das Simulationsmodell

Für die Berechnungen ist ein zweidimensionaler Ansatz gewählt worden. Derzeit ist es mit keinem dreidimensionalen Programm möglich, die mit dem zweidimensionalen Ansatz erzielbaren Netzgenauigkeiten oder Interfaces zwischen dem Gebirge und dem Versatz zu realisieren. Es ist bereits bei der Programmierung versucht worden die Unzulänglichkeiten des zweidimensionalen Ansatzes auszugleichen, die Unterschiede müssen aber auch in der Analyse der Ergebnisse berücksichtigt werden. Vor allem bei der Interaktion zwischen der Bergfeste und dem Versatz fehlen im zweidimensionalen Ansatz zwei Seiten der Bergfesten. Das Abbaufeld wird unendlich lange und mit Streifenfesten angesehen. Das „weichere“ Verhalten von quadratischen Bergfesten gegenüber unendlich langen Streifenfesten wird über eine Abminderung des Elastizitätsmoduls berücksichtigt.

Da in der Realität keine unendlich langen Abbaufelder vorliegen, muss das fehlende Spannungsgewölbe normal zur Betrachtungsebene in der Analyse zusätzlich berücksichtigt werden.

5.1.1 Aufbau

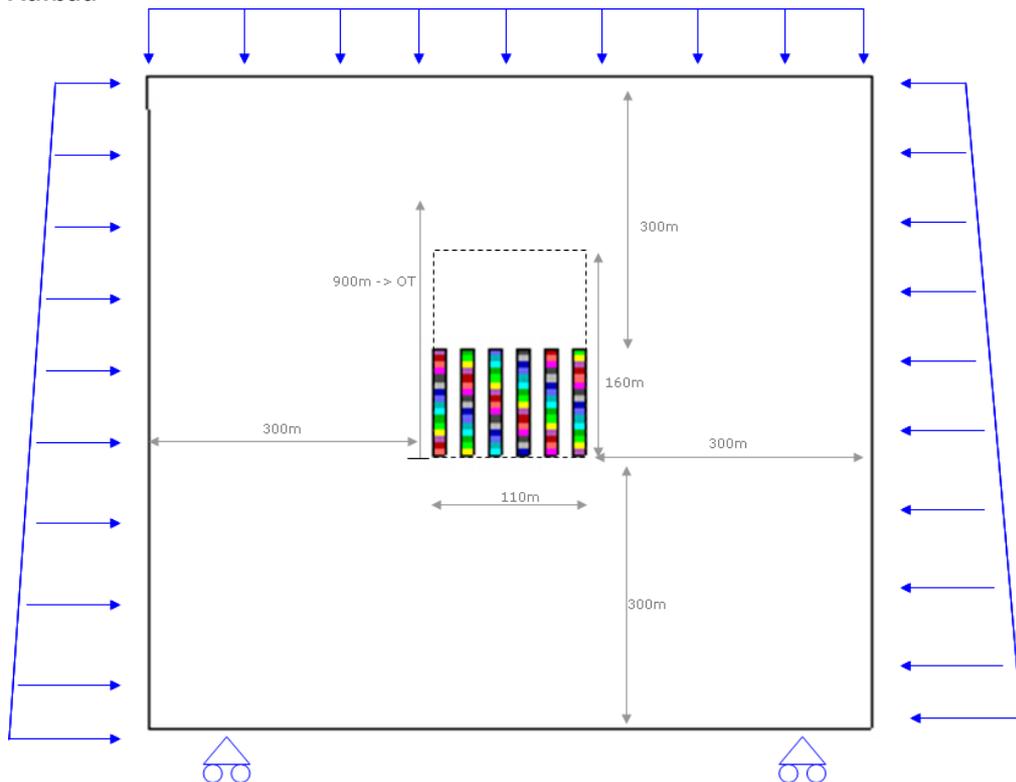


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des Modells der numerischen Simulation in Flac 2D.

Insgesamt sind sechs Örter in der numerischen Simulation berücksichtigt worden. Diese Anzahl stellt einen Kompromiss zwischen einer möglichst großen Anzahl an Örtern und der benötigten Netzfeinheit dar. Der Abstand zum Rand des Modells beträgt links, rechts und unten 300m und nach oben 240m. Das Modell ist unten losgelagert, dh. Vertikalbewegungen sind nicht erlaubt, Horizontalbewegungen dagegen schon. Der primäre Spannungszustand wird über Kräfte von außen in das System induziert. Am oberen Rand des Modells wird eine Überlagerung von 500 m in Form einer Gleichlast aufgebracht. Um einen geforderten Seitendruckbeiwert $k = 1$ zu erhalten, dh. die primären Horizontalspannungen sind gleich den primären Vertikalspannungen, sind an den seitlichen Rändern des Modells zusätzlich Trapezlasten aufgebracht worden. Auf diese Weise kann ein Seitendruckbeiwert von $k=1$ über das gesamte Modell realisiert werden.

Die Örter und die Bergfesten besitzen jeweils eine Breite von 10m. In der Endphase des numerischen Simulationsprozesses sind insgesamt 32 Abbauscheiben mit einer Einzelmächtigkeit von 5m und einer Gesamtabbauhöhe von 160m berücksichtigt worden.

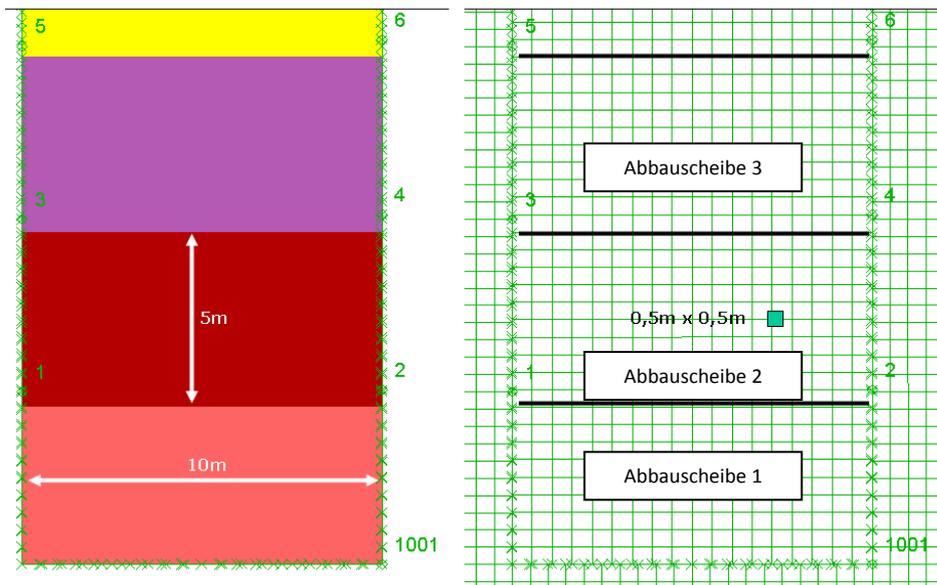


Abbildung 5-2: Detailaufbau mehrerer Abbau- bzw. Versatzscheiben in der Simulation.

In der Endphase des numerischen Simulationsprozesses ist die Kantenlänge der Netze von 0,5m auf 1m erhöht worden. Die einzelnen Versatzscheiben besitzen mit der Breite von 10m und einer Höhe von 5m dieselbe Geometrie wie die Abbauscheiben. Der Unterschied liegt in den Materialparametern und dem seitlichen Kontakt mit der Bergfeste. Während bei der Abbauscheibe, dh. noch nicht abgebautes Material, ein fixer Verbund mit dem umgebenden Gebirge vorherrscht, wird bei den Versatzscheiben ein definierter Verbund, ein sog. Interface, programmiert. Die Eigenschaften des Interfaces sind in Abbildung 5-4 S.5-5 ersichtlich. Der Kontakt ist ohne Kohäsion und mit einem Reibungswinkel von 20° berücksichtigt worden.

5.1.2 Simulationssequenz

Nach dem Herstellen des primären Spannungszustandes werden die Konvergenzen auf Null gesetzt und der Abbau der ersten Scheibe beginnt über die gesamte Breite des Abbaufeldes, dh. bei allen sechs Örtern wird die erste Scheibe mit einer Breite von 10m und einer Höhe von 5m „null gesetzt“ (abgebaut) und anschließend sofort als Versatz markiert noch vor dem ersten Rechenschritt. Ein leerer Hohlraum wird zwar in der gesamten Abbausequenz nicht berücksichtigt, dafür können die Interfaces für die gesamte Abbausequenz benutzt werden. Vor allem im Bereich des Abbaus treten geringe Konvergenzen und damit ein geringer Widerstand des Versatzes gegen diese Verformungen auf, daher wird diese Unzulänglichkeit innerhalb der Simulation als gering

angesehen und in Kauf genommen. Mit dem kurzzeitigen „Nullsetzen“ des Abbaus werden die Spannungen aus dem Modellbereich genommen und der Versatz kann unbelastet eingebracht werden.

Insgesamt werden auf diese Weise 32 Abbauscheiben mit einer Mächtigkeit von 5m bei 6 Örtern in einer zeitlichen Abfolge numerisch simuliert.

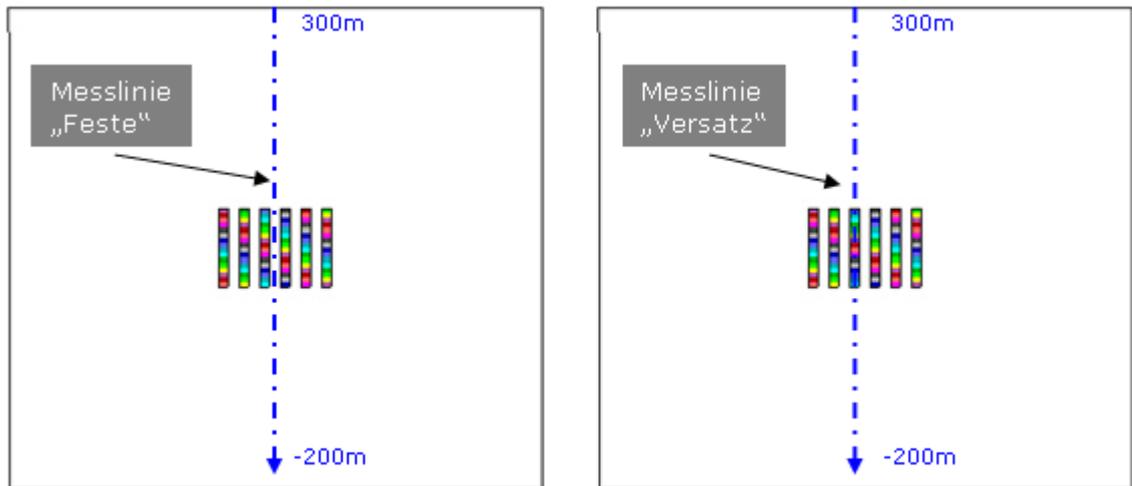


Abbildung 5-3: Lage der Messlinien innerhalb des numerischen Modells.

Um die Veränderungen über Abbaufortschritt festzuhalten und zu dokumentieren, sind sog. Messlinien im Modell installiert worden. Entlang dieser Linien werden verschiedene Daten wie z.B. Konvergenzen und Spannungen abhängig vom Abbaufortschritt (Anzahl der gebauten Scheiben) aufgezeichnet. Eine Messlinie läuft durch die zentrale Bergfeste des Abbaufeldes und eine zweite durch das erste angrenzende Ort auf der linken Seite. Wenn es in den nachfolgenden Ausführungen nicht anders vermerkt ist, beziehen sich die Spannungsverläufe immer auf eine der beiden Messlinien. Dies bietet eine gewisse Kontinuität in der Analyse der Ergebnisse der numerischen Simulation.

5.1.3 Materialparameter

		Magnesit	Magnesit (Feste)	Versatz	Interface
Dichte	[kg/m ³]	3000	3000	1800	
Emod	[GPa]	18	3	0,5	
Querdehnungszahl	[1]	0,15	0,15	0,3	
Kohäsion	[MPa]	8,4	8,4	0	
Innerer Reibungswinkel	[°]	38	38	30	
Zugfestigkeit	[MPa]	0,3	0	0	
Shear Stiffness Ks	[N/m]				3,6E+12
Normal Stiffness Kn	[N/m]				3,6E+12
Reibungswinkel	[°]				20
Kohäsion	[MPa]				0

Abbildung 5-4: Auszug aus den Materialparametern der numerischen Simulation. Diese Parameter stellen die Ausgangsbasis der Simulationen dar.

Diese Parameter stellen den Grundparametersatz der Simulationen dar. Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Magnesits sind der Dissertation Siefert (Siefert, 2004) entnommen worden. Die Verformungseigenschaften des Versatzes sind zusätzlich noch mit einer spannungsabhängigen Verformungskomponente versehen worden.

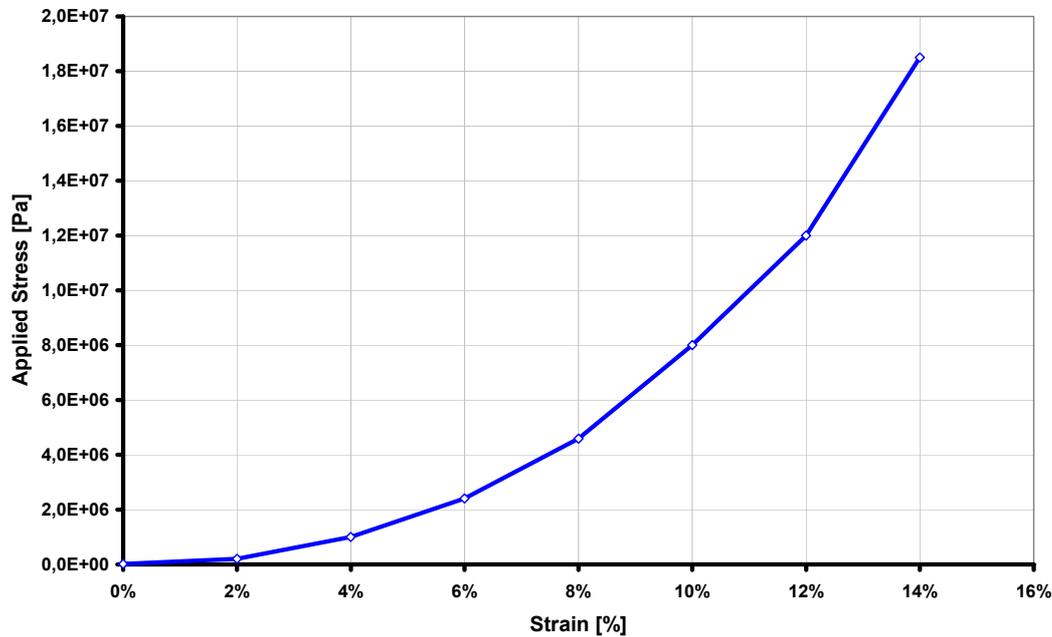


Abbildung 5-5: Darstellung der spannungsabhängigen Verformungseigenschaften des Versatzes.

Die verwendeten spannungsabhängigen Verformungseigenschaften des Versatzes stammen von Clark (1991) und sind auf Grund des Fehlens von In Situ Parametern für die numerischen Simulationen herangezogen worden.

Auch Hustrulid (1982) verwendet in seiner Arbeit ähnliche Verformungs- und Festigkeitsparameter für einen bindemittellosen Versatz.

5.1.4 Überprüfung der Plausibilität

Um die Eingangsparameter, vor allem die Parameter des Versatzes und die Parameter der Interfaces, auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen, sind einfache Simulationen mit nur einem Ort und zwei Hälften von Bergfesten durchgeführt worden.

In dieser Anfangsphase der numerischen Simulation sind nicht nur die Festigkeits- und Verformungsparameter kritisch hinterfragt worden, sondern auch die Abbausequenz. Es zeigte sich deutlich die Notwendigkeit der scheibenweisen Simulation des Abbaus.

Diese Untersuchungen beschränken sich auf den Abbau und das anschließende Versetzen von insgesamt 16 Abbauscheiben.

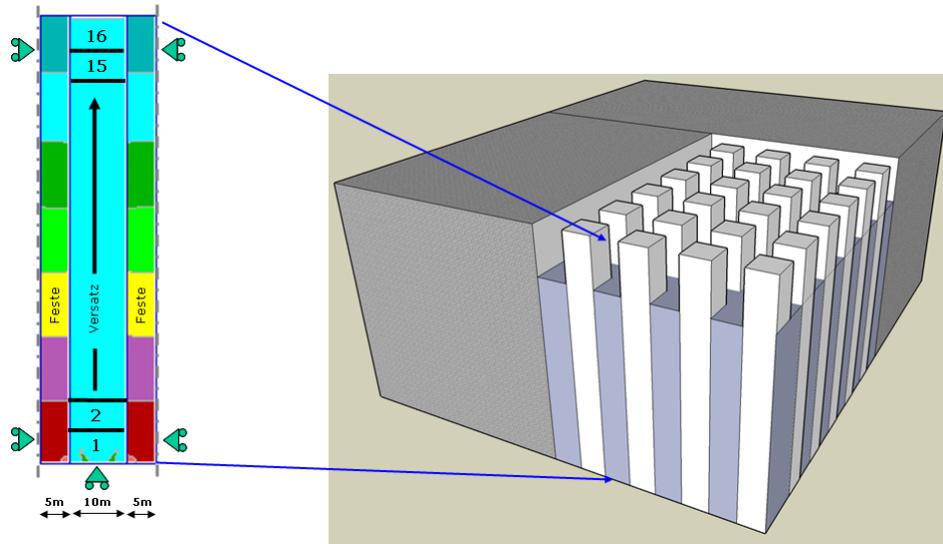


Abbildung 5-6: Numerisches Modell zur Überprüfung der Grundparameter der Simulation.

Das Modell besteht aus einem zentralen Ort und zwei halben Bergfesten. An den Seiten ist das Modell jeweils mit einem Loslager versehen.

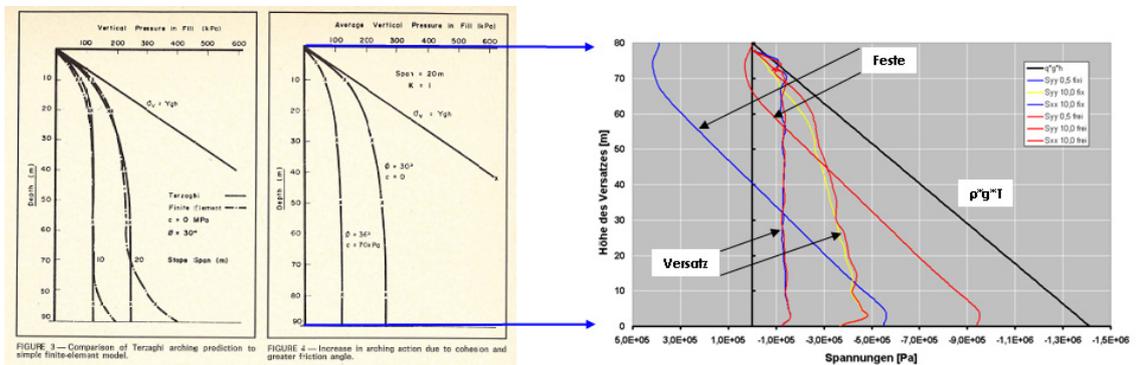


Abbildung 5-7: Verlauf der Vertikalspannungen innerhalb des zentralen Ortes und der halben Bergfeste am Rand des numerischen Modells. Die blaue Bergfeste ist in der Simulation oben und unten eingespannt, die obere Begrenzung der blauen Bergfeste kann sich vertikal bewegen.

Der blaue Verlauf der Vertikalspannung innerhalb einer Bergfeste kann bei einer oben und unten eingespannten (gelagerten $Y_{dis}=0$) Bergfeste beobachtet werden. Die Feste wird im oberen Bereich gezogen und im unteren Bereich zusammengedrückt.

Die Verteilung der Vertikalspannungen im Versatz entspricht qualitativ den Ausführungen von Askew (1978). Je höher der Wert der Kohäsion im Versatz, desto eher bildet sich ein ausgeprägtes Spannungsgewölbe aus und die Vertikalspannungen werden

lateral in die Bergfesten abgeleitet (siehe auch Abbildung 5-7 rechte Abbildung linker Spannungsverlauf des Versatzes).

Wird die Kohäsion des Versatzes verringert so verlagert sich der Verlauf der Vertikalspannungen im Versatz in Richtung des „hydrostatischen Verlaufs“, das Spannungsgewölbe wird in diesem Fall nur mehr vom Winkel der Inneren Reibung des Materials bestimmt.

Diese Beobachtungen decken sich mit den Untersuchungen von Askew (1978) der die Silotheorie von Terzaghi mit seinen eigenen numerischen Simulationsergebnissen gegenüberstellte und analysierte.

Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass in diesen einfachen Simulationen innerhalb der Plausibilitätsprüfung auch nur der zweidimensionale Ansatz gewählt wurde und der Einfluss des Versatzes, auf Grund der zwei fehlenden Festenseiten, größer ist als die Simulationen anzeigen.

5.2 Vergleich mit dem gebirgsmechanischen Modell

Wie bereits im Kapitel 4 angemerkt, dient die numerische Simulation eines „Post Pillar“ Abbaufeldes vor allem der Erforschung und Analyse der komplexen Zusammenhänge welche im Einzelnen qualitativ schon beschrieben worden sind, aber nicht miteinander verknüpft werden konnten. Mit dem Hilfsmittel der numerischen Simulation ist möglich, die schon komplexen Einzelmechanismen in ein sich gegeneinander beeinflussendes System zu integrieren. Man ist in der Lage Verformungs- Festigkeitsparameter innerhalb der Simulationen zu variieren, um deren Auswirkungen zu analysieren. Man ist weiterhin in der Lage den scheibenweisen Abbau und das scheibenweise Einbringen des Versatzes zu berücksichtigen. Die primären Gebirgsspannungen können verändert und deren Auswirkungen auf den Abbau dargestellt werden.

Auch der Einfluss des Versatzes kann qualitativ gezeigt werden. Man ist zwar nicht in der Lage den festigkeitssteigernden Einfluss zu quantifizieren, aber der Einfluss auf die Bergfesten kann gezeigt werden.

Mit Hilfe der Simulation ist es möglich das Bruchmaterial über dem Abbaufeld, welches als „Totlast“ über dem Abbaufeld liegt, quantitativ abzuschätzen und somit den spannungskontrollierten Anteil der Belastung der Bergfesten darzustellen.

Den wichtigsten Punkt stellt aber die Verknüpfung der komplexen Einzelmechanismen dar. Mit Hilfe der Simulation kann man, z.B. die Effekte des scheibenweisen Abbaus mit den Auswirkungen des scheibenweise eingebrachten Versatzes verknüpfen. Spannungen und Verformungen können gezielt aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Die Auswirkungen einzelner Eingangsparameter können auf diese Art und Weise anschaulich dargestellt und beschrieben werden.

5.2.1 Veränderung der Abbaugeometrie – Festensystem B

Das Festensystem B ist bereits im Kapitel 4.4.2 S. 4-26 beschrieben worden. Es stellt den Fall des Abbaus dar, bei welchem sich der Abbau bei gegebener Abbaufeldbreite in die Höhe entwickelt. Dh. bei konstanter Breite des Abbaufeldes entwickelt sich der scheibenweise Abbau von unten nach oben.

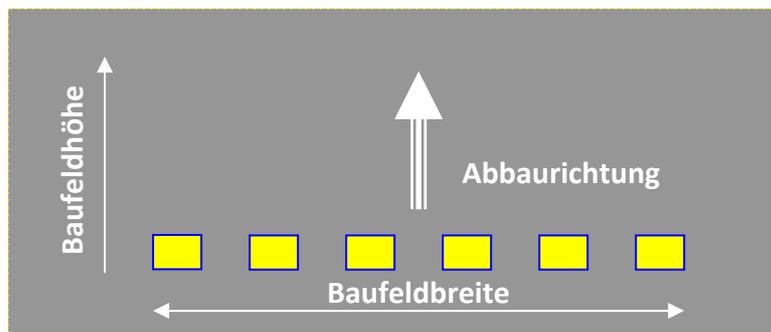


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Festensystems B.

Bezüglich des Aufbaus des Simulationsmodells und der Lage der Messlinien wird noch einmal auf Kap. 5.1 S.5-2 verwiesen.

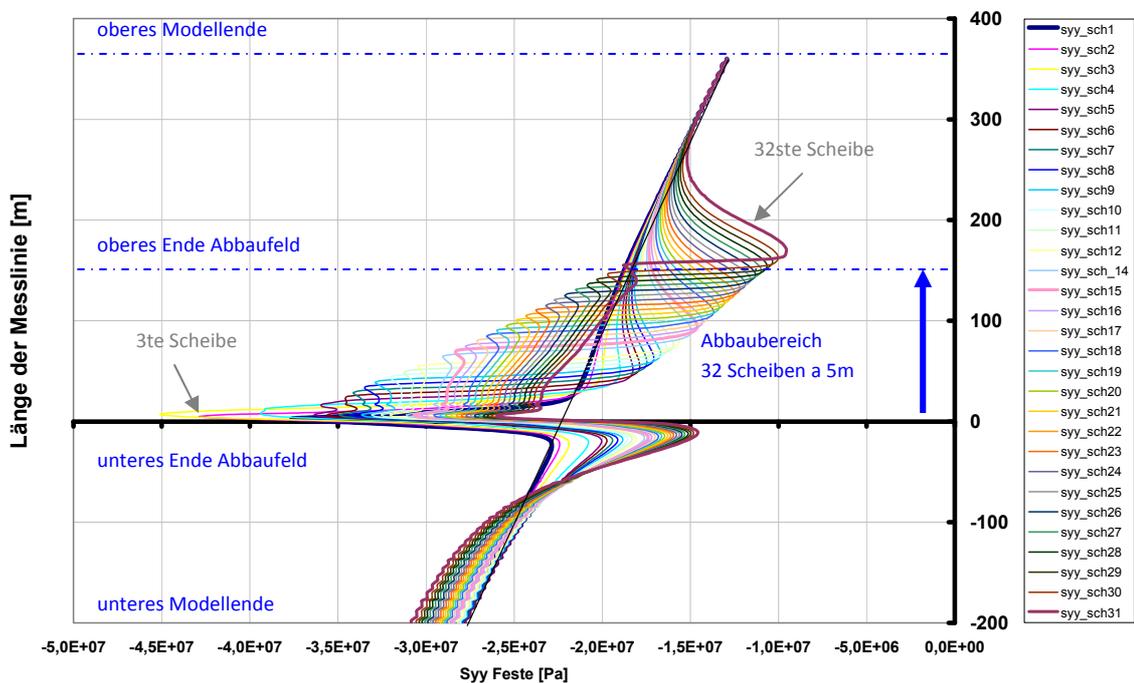


Abbildung 5-9: Darstellung des Verlaufes der Vertikalspannungen in der mittleren Bergfeste des Modells. Breite des Abbau ca. 110m
 Emod Gebirge: 18 GPa
 Emod Feste: 18 GPa
 Zugfestigkeit Gebirge: 0,3 MPa
 Querdehnungszahl Gebirge: 0,15
 Seitendruckbeiwert k: 1

Abbildung 5-9 zeigt den Verlauf der Vertikalspannungen entlang einer Messlinie in der Mitte des Modells, dh. in der Mitte der mittleren Bergfeste. Auf der Abszisse ist die Vertikalspannung (S_{yy}) in Pa aufgetragen. Im vorliegenden Fall weisen negative Spannungen, wie im Diagramm dargestellt, auf Druckspannungen hin. Die Ordinate zeigt die Länge der Messlinie in Meter an. Der Nullpunkt der Ordinate beschreibt die Sohle der ersten Abbauscheibe und damit den Beginn des Abbaufeldes. Der Abschnitt -200 m auf der Ordinate beschreibt die untere Begrenzung des Simulationsmodells. Im Gegensatz dazu beschreibt der Punkt +400 m das obere Ende des Modells. Der eigentliche Abbaubereich liegt zwischen den Marken 0 m und 160 m und entspricht dem Abbau nach 32 Scheiben (32 Scheiben x 5 m = 160 m).

Die gerade schwarze Linie beschreibt den von der Teufe abhängigen Verlauf der primären Vertikalspannungen, dh. der Vertikalspannungen im unverritzten Gebirge. Da die Teufe der untersten Abbauscheibe mit 800m festgelegt worden ist, ergeben sich am unteren Rand des Modells, 200m darunter, primäre Vertikalspannungen im Gebirge von ca. 29 MPa. Dies entspricht bei einer angenommenen Dichte von 3000 kg/m^3 einer Teufenlage von richtigerweise 1000m. Bei einem Seitendruckbeiwert von $k=1$ ($\sigma_H = \sigma_V$) ergibt sich ein identer, linearer, teufenabhängiger Verlauf der Horizontalspannungen.

Jede Linie im Diagramm entspricht einem Abbauzustand zwischen der ersten und der letzten Abbauscheibe der Simulation für die gegebenen Parameter.

Deutlich sind die Entlastungsbereiche über und unterhalb des Abbaugeschehens zu sehen. Nach dem Abbau der letzten Abbauscheibe (Scheibe 32) ist eine Reduktion der Vertikalspannungen über dem Abbaubereich um nahezu 50% ersichtlich. Sowohl die Ausdehnung als auch die Höhe der Spannungsreduktion hängt direkt mit der Zahl der gebauten Scheiben und damit dem Abbaufortschritt zusammen.

Gleichzeitig ist auch die im Kapitel 4.4.2 S.4-26 prognostizierte Verringerung der Festenbelastung im Zuge des Abbaus ersichtlich. Nach dem Abbau der ersten drei Abbauscheiben werden in den Bergfesten die höchsten Spannungen beobachtet. Die Vertikalspannungen von 45 MPa in den Bergfesten entsprechen einer Teufenlage von 800 MPa und einem Ausbringen von 50%²². Nach dem Abbau der 32 Abbauscheiben reduziert sich die Belastung in der Bergfeste, im oberen Bereich, auf das Niveau der primären Vertikalspannungen von ca. 18 MPa bis 19 MPa; d h. die Vertikalspannungen reduzieren sich um mehr als die Hälfte von 45 MPa auf ca. 18 MPa. Auf Grund der Tatsache, dass es sich hierbei um die Ergebnisse einer numerischen Simulation handelt, vermischen sich in diesem Fall bereits mehrerer Effekte.

²² Das 50%ige Ausbringen ergibt sich aus der Tatsache, dass ein zweidimensionaler Rechenansatz gewählt worden ist und die Örtbreite gleich der Festenbreite gesetzt worden ist.

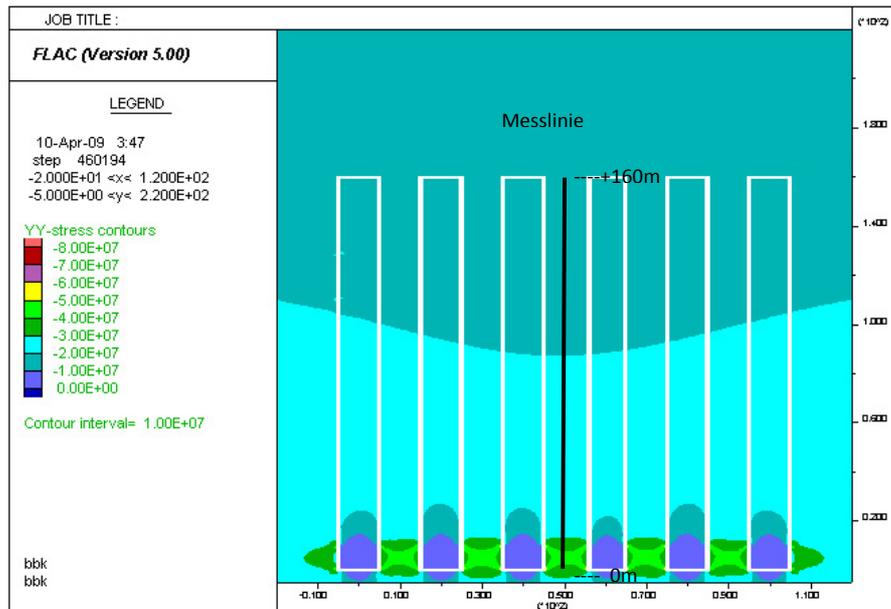


Abbildung 5-10: Vertikalspannungen nach Abbau der ersten Abbauscheibe

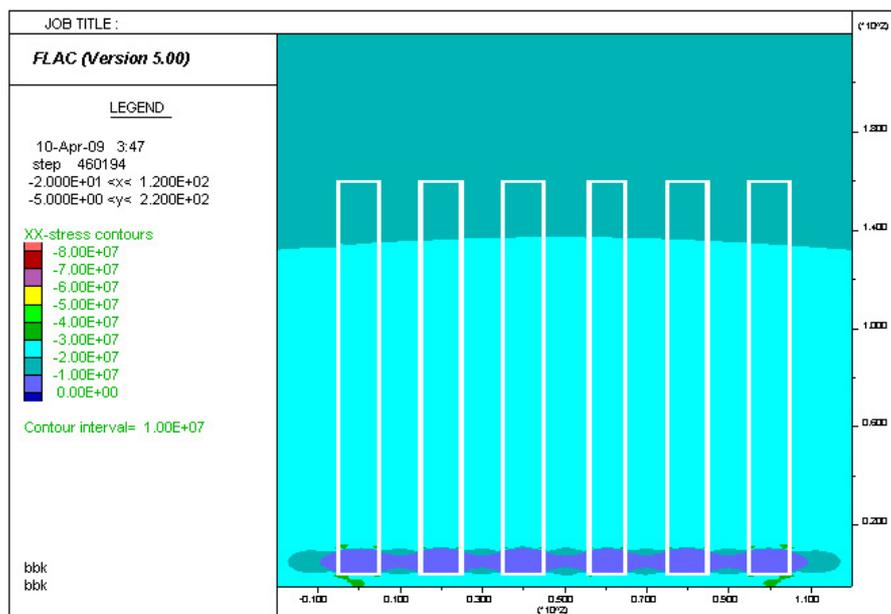


Abbildung 5-11: Horizontalspannungen nach Abbau der ersten Abbauscheibe

Nach dem Abbau der ersten Abbauscheiben zeigt sich die hohe Vertikalspannung in den Bergfesten. Die Messlinie geht, zur besseren Vergleichbarkeit, bei allen Modellen durch die zentrale Bergfeste. Für die Horizontalspannungen ergeben sich für diesem Abbaufortschritt noch keine großen Auswirkungen. Der Abbau zeigt sich als flaches Rechteck, der horizontale Kraftfluss wird noch nicht gestört.

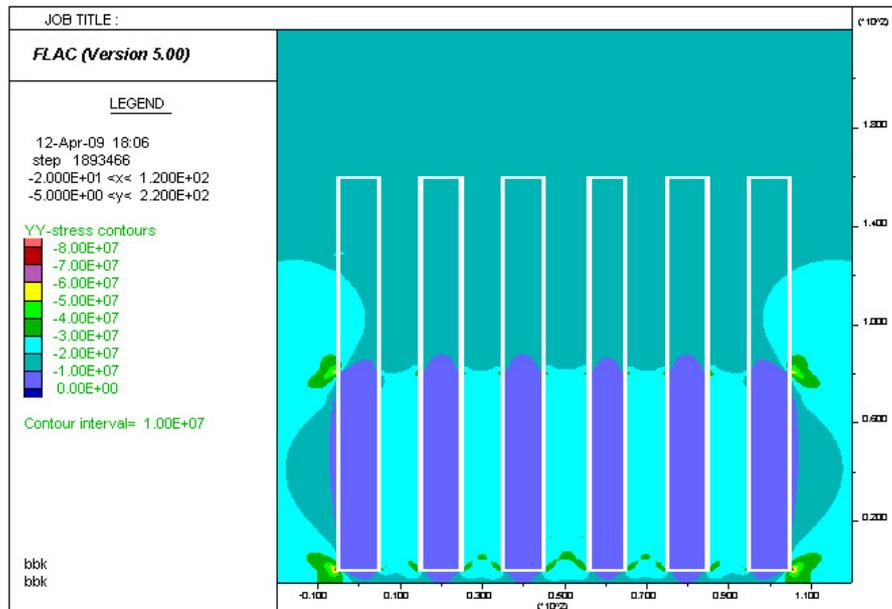


Abbildung 5-12: Vertikalspannungen nach Abbau der 16. Abbauscheibe

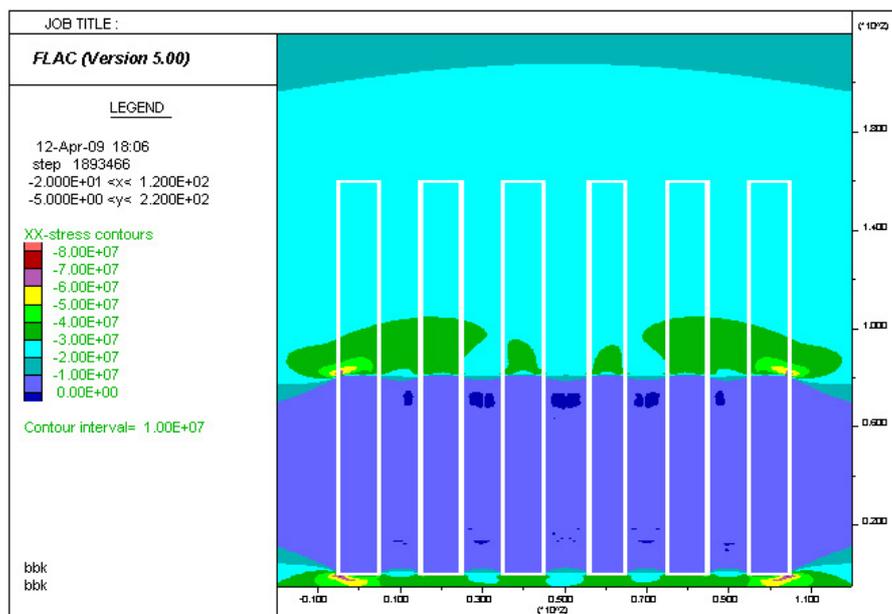


Abbildung 5-13: Horizontalspannungen nach Abbau der 16. Abbauscheibe.

Zur Hälfte der simulierten Abbaureihe zeigen sich bereits reduzierte Vertikalspannungen in den Bergfesten. Die errechnete Vertikalspannung beträgt gegenüber dem Zustand nach Abbau der ersten Abbauscheiben nur mehr ca. 28 MPa. Es zeigen sich bereits ausgeprägte Spannungsspitzen an den Ecken des Abbaufeldes und die seitlichen Vertikalspannungsauflager können bereits beobachtet werden.

Im Bereich der Horizontalspannungen können bereits ausgeprägte Horizontalspannungsauflager identifiziert werden.

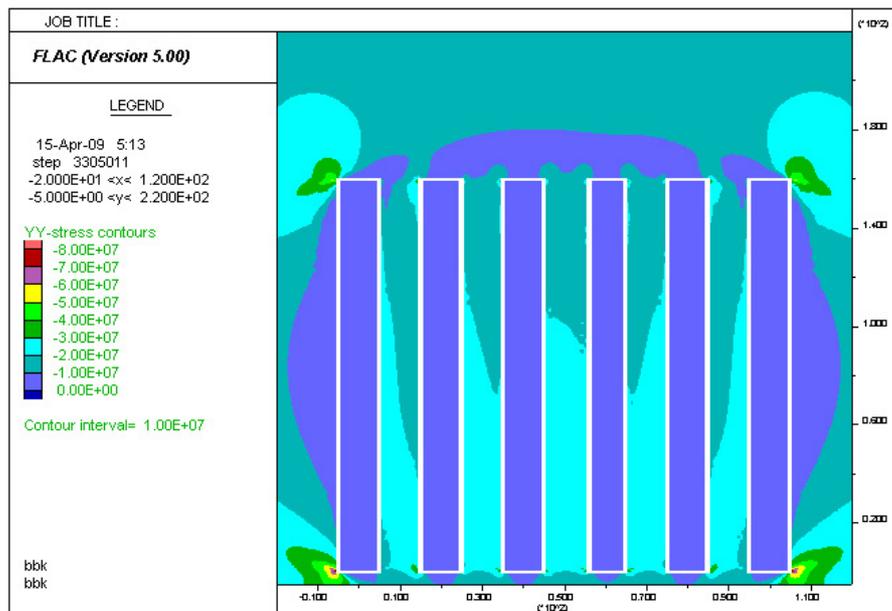


Abbildung 5-14: Vertikalspannungen nach Abbau der 32. Abbauscheibe

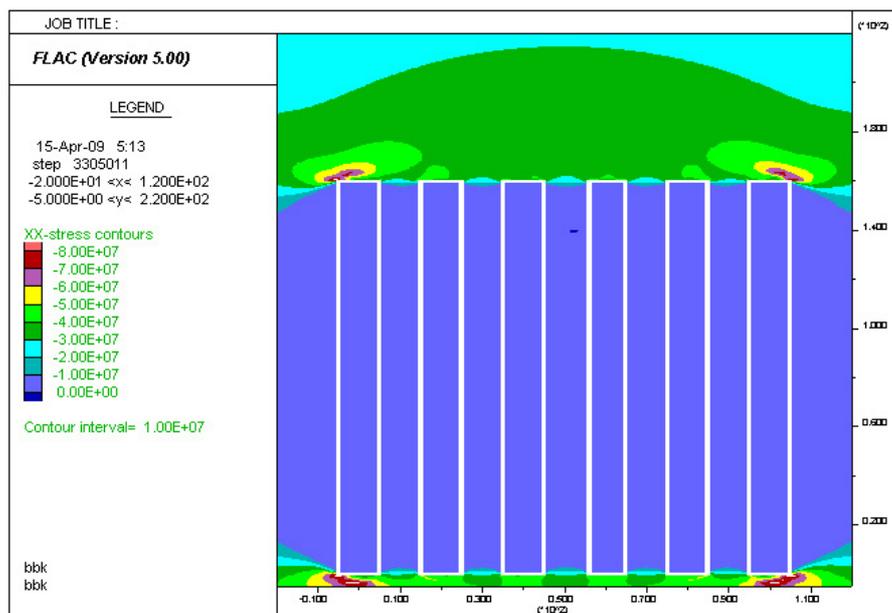


Abbildung 5-15: Horizontalspannungen nach Abbau der 32. Abbauscheibe

Am Ende des Abbaus reduzieren sich die Vertikalspannungen in den Bergfesten auf den Wert der primären Vertikalspannungen. Im Bereich der Horizontalspannungen bilden sich starke Auflager ober- und unterhalb des Abbaubereiches.

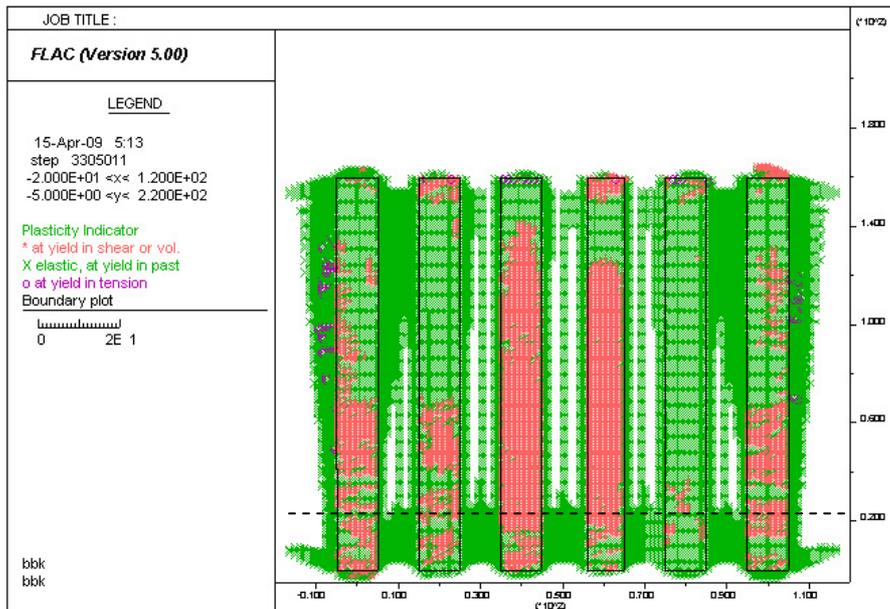


Abbildung 5-16: Versagensbereiche nach dem Abbau der 32. Abbauscheibe.

Auch in der Darstellung der Versagensbereiche (Abbildung 5-16) zeigt sich die hohe Belastung der Bergfesten nach dem Abbau der ersten Scheiben in ausgedehnten plastischen Bereichen innerhalb der Festen.

In weiterer Folge reduziert sich die Spannung in den Bergfesten und im Versatz baut sich eine Reaktionsspannung als Umschlingung für die Bergfesten auf. Am Rand des Abbaufeldes zeigen die Bergfesten im oberen Drittel auch deutliche Zeichen einer Überbelastung.

5.2.2 Verhalten bzw. Einfluss des Versatzes auf das Verhalten des Modells

Der bindemittellose Versatz ist mit einer Dichte von 1800 kg/m^3 , einer Querdehnungszahl von 0,3 und einem Winkel der Inneren Reibung von 30° in den Simulationen berücksichtigt worden. Der seitliche Kontakt zwischen der Bergfeste und dem Versatz ist über ein Interface hergestellt worden. Das Interface weist einen Reibungswinkel von 20° auf und lässt Bewegung zwischen der Bergfeste und dem Versatz zu.

		Magnesit	Magnesit (Feste)	Versatz	Interface
Dichte	[kg/m ³]	3000	3000	1800	
Emod	[GPa]	18	3	0,5	
Querdehnungszahl	[1]	0,15	0,15	0,3	
Kohäsion	[MPa]	8,4	8,4	0	
Innerer Reibungswinkel	[°]	38	38	30	
Zugfestigkeit	[MPa]	0,3	0	0	
Shear Stiffness Ks	[N/m]				3,6E+12
Normal Stiffness Kn	[N/m]				3,6E+12
Reibungswinkel	[°]				20
Kohäsion	[MPa]				0

Abbildung 5-17: Auszug aus den Materialparametern der numerischen Simulation. Diese Parameter stellen die Ausgangsbasis der Simulationen dar.

Die Reaktionsspannung des Versatzes ist verformungsabhängig in den Rechnungen berücksichtigt. Siehe auch Kap. 5.1.3 S.5-5. Bei einer Zusammendrückung des Versatzes von 10% ergibt sich eine Reaktionsspannung von 8 MPa.

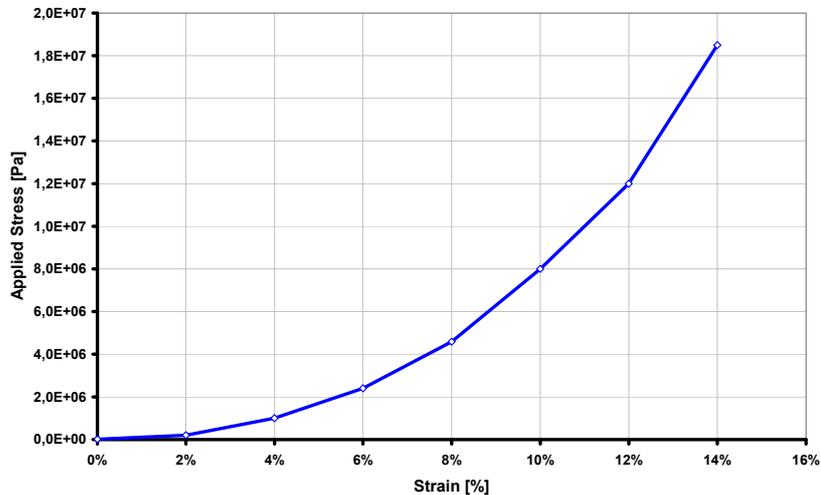


Abbildung 5-18: Darstellung der spannungsabhängigen Verformungseigenschaften des Versatzes.

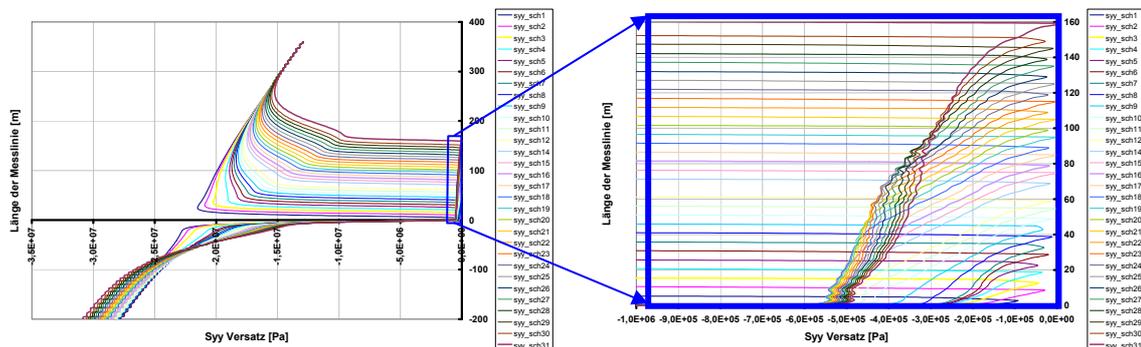


Abbildung 5-19: Verlauf der Vertikalspannungen im Versatz (S_{yy}). Die rechte Abbildung stellt einen vergrößerten Ausschnitt der linken dar.

Der Ort der Messung, die Lage der Messlinie, befindet sich im ersten Ort neben der zentralen Bergfeste im simulierten Modell; dh. die Messlinie des Versatzes liegt 10m neben der Messlinie der Bergfesten (siehe auch Abbildung 5-3 S.5-5)

Nach dem Abbau der ersten 16 Abbauscheiben erreichen die Vertikalspannungen im Versatz das Maximum von ca. 5,5 MPa im unteren Bereich des versetzten Ortes. Schreitet der Abbau voran, reduziert sich wieder die Vertikalspannung im Versatz.

Zum Einen verhindert der Siloeffekt einen „nicht enden wollenden“ linearen Anstieg der Vertikalspannungen bei ansteigender Versatzhöhe (siehe auch Abbildung 4-51 S.4-60 & Erläuterungen) und zum Anderen wirken sich die entlastenden Bergfesten auf den Versatzkörper selbst aus.

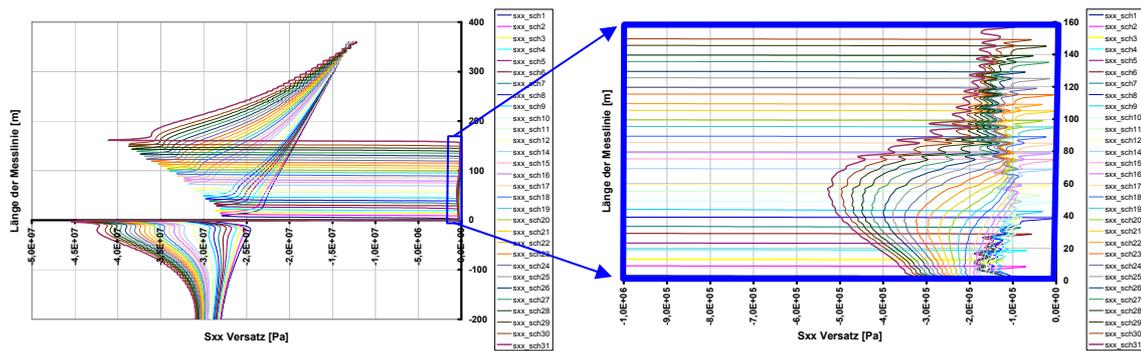


Abbildung 5-20: Verlauf der Horizontalspannungen im Versatz (Sxx). Die rechte Abbildung stellt einen vergrößerten Ausschnitt der linken dar.

Die Horizontalspannungen im Versatzkörper, entlang der Messlinie, erhöhen sich drastisch nach dem Abbau der 16. Abbauscheibe. Dieser Abbaufortschritt stellt in etwa den Übergang zwischen dem eher langgestreckten Abbaufeld (liegendes Rechteck) und dem quadratischen dar. Ab dieser Abbauscheibe weist das Abbaufeld ein Höhen- zu Breitenverhältnis von >1 auf, dh. die Geometrie des Abbaufeldes hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Horizontalspannungen innerhalb des Versatzkörpers.

Außerdem ist eine gewisse Unruhe im numerischen Modell und damit auch im Spannungsverlauf zu beobachten.

Die Horizontalspannungsverläufe außerhalb des Abbaubereiches, dh. über 160m und unter 0m, beschreiben wieder den Horizontalspannungsverlauf des Gebirges über- bzw. unterhalb des Abbaubereiches.

Die Interaktion zwischen dem Versatzkörper und den Bergfesten kann auch im Verlauf der Horizontalspannungen, im Versatz und in der Bergfeste dargestellt werden.

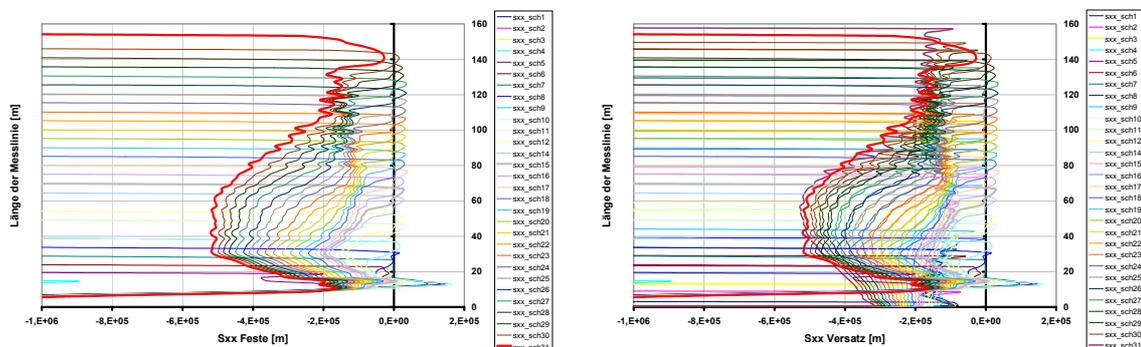


Abbildung 5-21: Verlauf der Horizontalspannungen in der zentralen Bergfeste (linke Abbildung) und im benachbarten versetzten Ort (rechte Abbildung).

Die beiden Messlinien liegen in der Simulation nur 10m auseinander und zeigen sowohl qualitativ als auch quantitativ einen sehr ähnlichen Verlauf der Horizontalspannungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Horizontalkräfte übertragen werden und damit eine einigermaßen realitätsnahe Interaktion zwischen dem Versatzkörper und den Bergfesten gegeben ist.

5.2.3 Schlussfolgerungen

Diese ersten numerischen Simulationen zeigen, dass die in Kap. 1 S. 4-1 aufgestellten Modellüberlegungen auch in den Ergebnissen der numerischen Simulation beobachtet werden können. An dieser Stelle muss aber angemerkt werden, dass diese Ergebnisse nur für die Materialparameter in Abbildung 5-4 S.5-5 gelten. Die Variation der Eingangsparameter wird in einem nachfolgendem Kapitel behandelt.

Schlussfolgerung 1

Entwickelt sich der Abbau, bei konstanter Breite des Abbaufeldes, scheibenweise von unten nach oben, reduziert sich die Belastung innerhalb der Bergfesten bis auf den Wert der primären Vertikalspannungen in dieser Teufenlage. Die Belastung reduziert sich von dem durch die „Theorie der zugeordneten Flächen“ und einem Ausbringen von 50%, bedingt durch den zweidimensionalen numerischen Ansatz, prognostizierbaren Wert von dem doppelten Wert der primären Vertikalspannungen von $2 \times 27 \text{ MPa} = 54 \text{ MPa}$ auf einen Wert von 27 MPa . Das numerische Modell ist in der Lage, die Auswirkungen der geometrischen Veränderung des Abbaufeldes mit den Auswirkungen der damit verbundenen Vergrößerung des Höhen- zu Breitenverhältnisses der Bergfesten und des damit verbundenen „Weicherwerden“ des Abbaubereiches zu verknüpfen.

Schlussfolgerung 2

Die Interaktion zwischen dem Versatzkörper und den Bergfesten kann beobachtet und dargestellt werden. Die Summe der horizontal übertragenen Kräfte scheint konstant zu sein, dh. der in der Simulation verwendete Versatz ist in der Lage eine Reaktionsspannung und damit eine Umschlingung für die Bergfeste im Versatz aufzubauen. Es kann von einer festigkeitssteigernden Wirkung dieser Umschlingung ausgegangen werden. Diese Umschlingung stellt sich aber nicht nur statisch dar, sondern ist vom Fortschritt des Abbaus abhängig.

Schlussfolgerung 3

Selbst bei der Verwendung der sehr konservativen Materialparameter und einer konservativen Beschreibung der Randparameter des Rechenmodells sind die prognostizierten Erscheinungen bereits zu beobachten.

Unter konservativen Materialparametern wird verstanden, dass sie derart gewählt worden sind, nicht unmittelbar die erhofften Erscheinungen zu fördern. Dh. es ist abzusehen, dass ein Seitendruckbeiwert $k > 1$ die Entlastung der Bergfesten bei einem hochgestellten Abbaufeld eher begünstigen wird. Des Weiteren kann angenommen werden, dass eine „weich modellierte“ Bergfeste eine deutlichere Entlastung als eine „härter modellierte“ zeigen wird.

Schlussfolgerung 4

Die Ergebnisse dieser ersten numerischen Simulationen scheinen plausibel und sollen in weiterer Folge mit den in der Literatur beschriebenen Messergebnissen qualitativ verglichen werden um die Aussagekraft der gewonnenen Erkenntnisse zu erhöhen.

Schlussfolgerung 5

Nach dem Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur sollen der Seitendruckbeiwert k und der Elastizitätsmodul der Bergfesten reduziert werden um die Auswirkungen auf das Modell zu untersuchen.

5.3 Vergleich mit Messergebnissen aus der Literatur

Barrett und Chester hatten die Möglichkeit die Ergebnisse des an der Dolphin Mine²³ auf King Island durchgeführten Untersuchungsprogramms zusammenzuführen und zu analysieren (Barrett 1981). Für den Vergleich mit den Ergebnissen der numerischen Simulation sind vor allem die Konvergenzmessungen in den Bergfesten und in den Bereichen über und unter dem Abbaufeld als auch die durchgeführten Spannungsmessungen innerhalb der Bergfesten von Bedeutung.

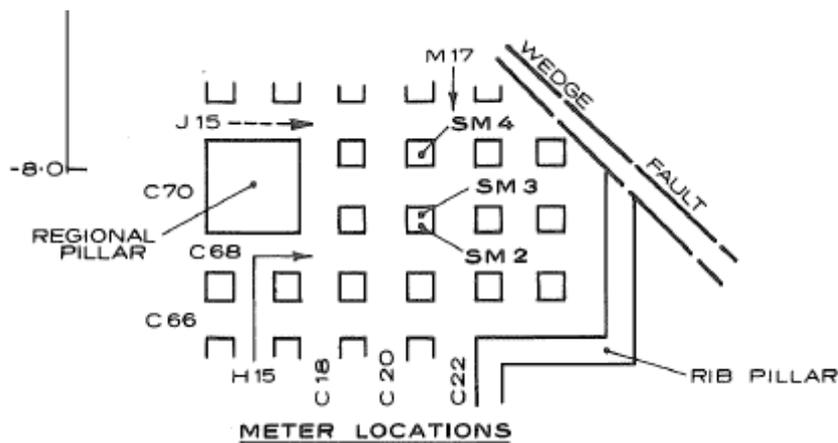


Abbildung 5-22: Darstellung der In-Situ Spannungsmesspunkte innerhalb der Bergfesten innerhalb eines typischen Abbaureviers in der Dolphin Mine.

Ein direkter, quantitativer Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der Dolphin Mine und den numerischen Simulationen kann auf Grund folgender Punkte nicht angestellt werden:

Das Abbaufeld in der Dolphin Mine stellt an sich kein klassisches Abbaufeld, wie in der Simulation geschaffen, dar. Das Abbaufeld ist eher kleinräumig und weist keine besonders große Überlagerung auf. Es ist daher mit den in der Simulation getroffenen Annahmen (Überlagerung ca. 800m, ...) nicht direkt vergleichbar.

Die Ergebnisse aus der Literatur können aber qualitativ mit den Simulationen verglichen werden um deren Plausibilität zu unterstreichen.

²³ Siehe auch Kap. 3.1.2 S.3-6 zur Beschreibung des Scheelitbergbaus auf King Island.

5.3.1 Konvergenzmessungen

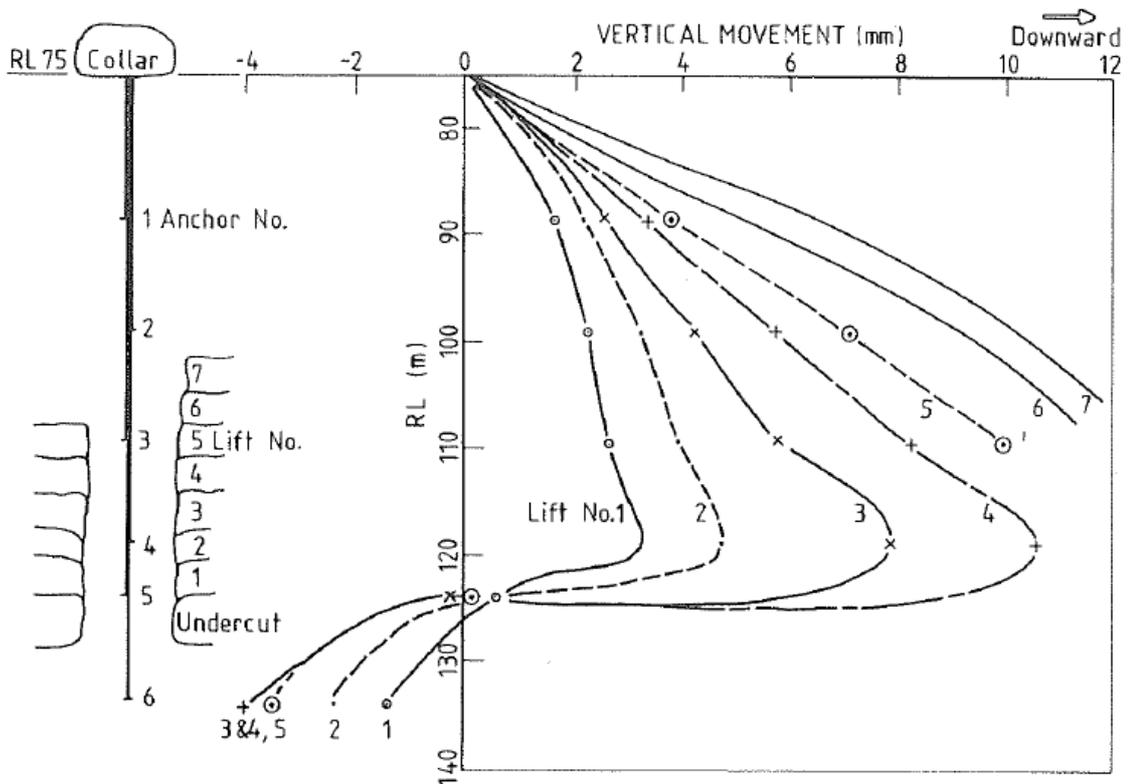
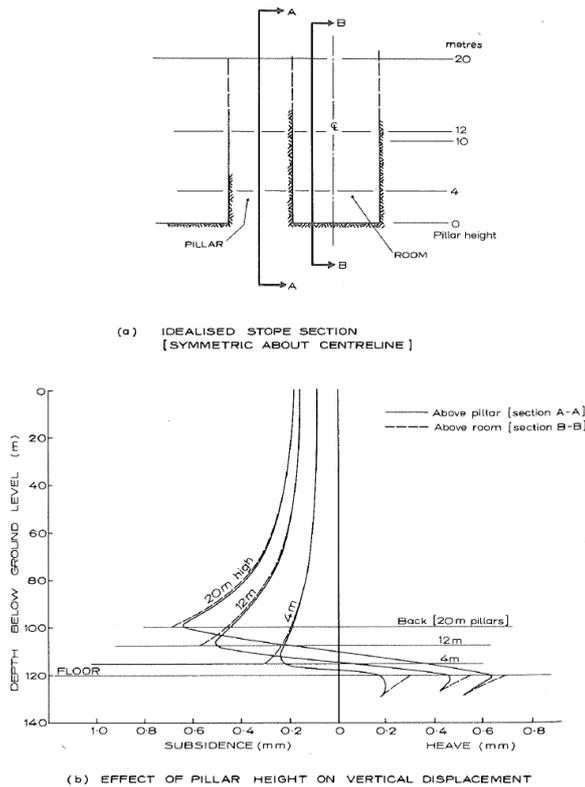


Abbildung 5-23: Typisches Ergebnis der Konvergenzmessungen innerhalb und außerhalb einer instrumentierten Bergfeste (Barrett 1981).

Auf der linken Seite der Abbildung ist die Anordnung der Konvergenzmessung dargestellt. Ausgehend von einem Zugang auf der Höhe RL 75 ist ein sechsfach Extensometer genau in eine sich im Zuge des Abbaus bildende Bergfeste gesetzt worden. Auf Grund der Tatsache, dass der Extensometer noch vor dem Abbau der ersten Abbauscheibe gesetzt worden ist, kann man sämtliche Veränderungen, die Vertikalkonvergenzen betreffend, ausgehend vom Primärzustand aus beobachten und aufzeichnen. In diesem Fall sind die Auswirkungen von insgesamt sieben Abbauscheiben und einer als „undercut“ bezeichneten Abbauscheibe aufgezeichnet worden.

Die rechte Seite der Abbildung zeigt die Ergebnisse der Konvergenzmessung in Form eines Diagramms. Vertikal ist die Teufenlage, und somit die Lage der Messpunkte, dargestellt. Alle Messergebnisse rechts der Ordinate zeigen Bewegungen nach unten in Richtung der negativen Y-Achse an. Liegen Messwerte links der Ordinate deutet dies auf eine Hebung der Messpunkte hin. Alle Ergebnisse beziehen sich auf ihren relativen Nullpunkt, dem primären Zustand vor Abbau der ersten „undercut“ Scheibe.

Die Messergebnisse zeigen zum Einen deutlich die Hebungstendenzen unterhalb des Abbaubereichs und zum Anderen die Senkungen darüber. Bis zum Abbau der Scheiben 4 und 5 hebt sich Messpunkt 6 um ca. 4mm und die Messpunkt über oder im Abbaufeld senken sich um bis zu 10mm.



Barrett (Barrett, 1981) erkannte aus den Ergebnissen erster numerischer Simulationsversuche und den Ergebnissen der Konvergenzmessungen in den Bergfesten, dass das Ausmaß und der Verlauf der Konvergenzen sehr ausgeprägt von der Zahl der gebauten Abbauscheiben und somit von der Höhe der Bergfeste abhängt.

Barrett fasste seine Erkenntnisse im linken Diagramm zusammen. Die Senkungen oberhalb des Abbaubereiches und die Hebungen unterhalb, sind in Abhängigkeit der Höhe der Bergfeste dargestellt. Die Verläufe sind entlang zweier Messlinien (Zentrale Bergfeste & versetzter Ort unmittelbar daneben) dargestellt.

Abbildung 5-24: Darstellung des Verlaufes der Vertikalbewegungen eines idealisierten „Post Pillar“ Abbaus.

Cleland and Sing (Cleland, 1973) hatten 1973 ebenfalls die Möglichkeit auf Ergebnisse von Konvergenzmessungen innerhalb einer Streifenfeste in einem „Post Pillar“ Abbaurevier zurückzugreifen.

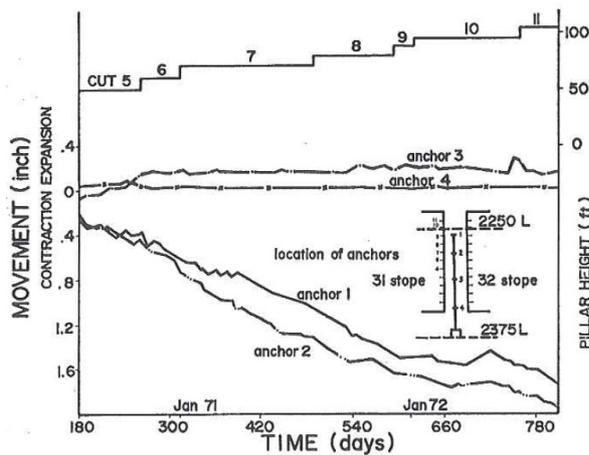


Abbildung 5-25: Ergebnis der Konvergenzmessungen von Cleland and Sing.

Ihre Daten sind zwar nicht so aussagekräftig wie die Ergebnisse von Barrett, zeugen jedoch von einem engagierten Messprogramm um die Vorgänge während des Abbaus zu dokumentieren.

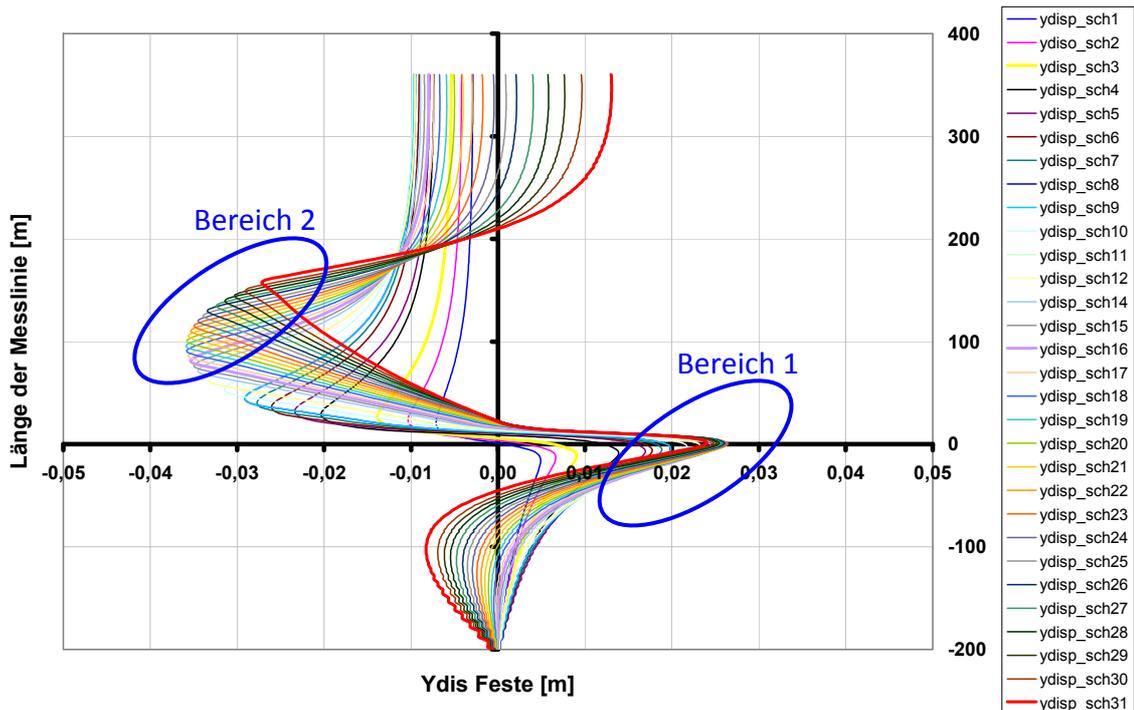


Abbildung 5-26: Vertikalkonvergenzen entlang der Messlinie durch die zentrale Bergfeste der numerischen Simulation.

Auch die numerischen Simulationen zeigen qualitativ ähnliche Ergebnisse. Wir können Hebungen in der Höhe von ca. 25mm am unteren Ende des Abbaubereiches, und Senkungen darüber in der Höhe von ca. 35mm beobachten.

Die Stagnation der Hebungen im unteren Randbereich des Abbaufeldes kann sowohl in der Simulation als auch in den In Situ Messungen festgestellt werden. Da der Abbaufortschritt in der Simulation deutlich weiter vorangeschritten ist als im tatsächlichen Abbaufeld, können diese Effekte auch leichter beobachtet werden.

Ein weiterer Effekt, welcher im Kap. 1 S. 4-1 zwar dargestellt aber auf Grund des begrenzten Abbaufortschritts in den In-Situ Messungen nicht feststellbar ist, ist das Zurückgehen der absoluten Vertikalkonvergenz am jeweiligen oberen Rand des Abbaubereiches (Bereich 2). Mit zunehmenden Abbau ändert sich die Geometrie des Abbaufeldes von einem liegendem Rechteck zu einem quadratischen (ca. 16. Abbauscheibe) und weiter zu einem stehenden Rechteck. Ab der 16. Abbauscheibe, dh. bei der Annäherung zu einem quadratischen Abbaufeld und darüber hinaus, hebt sich die Oberkante des Abbaubereiches relativ zur vorigen Abbauscheibe. Siehe auch Abbildung 4-20 S.4-29 und Erläuterungen.

Als ein erster Nachteil oder Unzulänglichkeit des numerischen Modells müssen die Ergebnisse am oberen Rand der Simulation angesprochen werden. Der Abstand zwischen dem oberen Rand des Abbaufeldes und dem oberen Rand des Rechenmodells scheint zu gering. Der Einfluss des Randbereiches der Simulation konnte nicht verifiziert werden.

5.3.2 Spannungsmessungen

In der Dolphin Mine sind auch In Situ Spannungsmessungen an insgesamt zwei Bergfesten mit drei Messpunkten durchgeführt worden. Eine Bergfeste ist mit zwei Messstellen versehen worden. Die Punkte SM 2 bis SM 4 stellen die drei Spannungsmesspunkte dar.

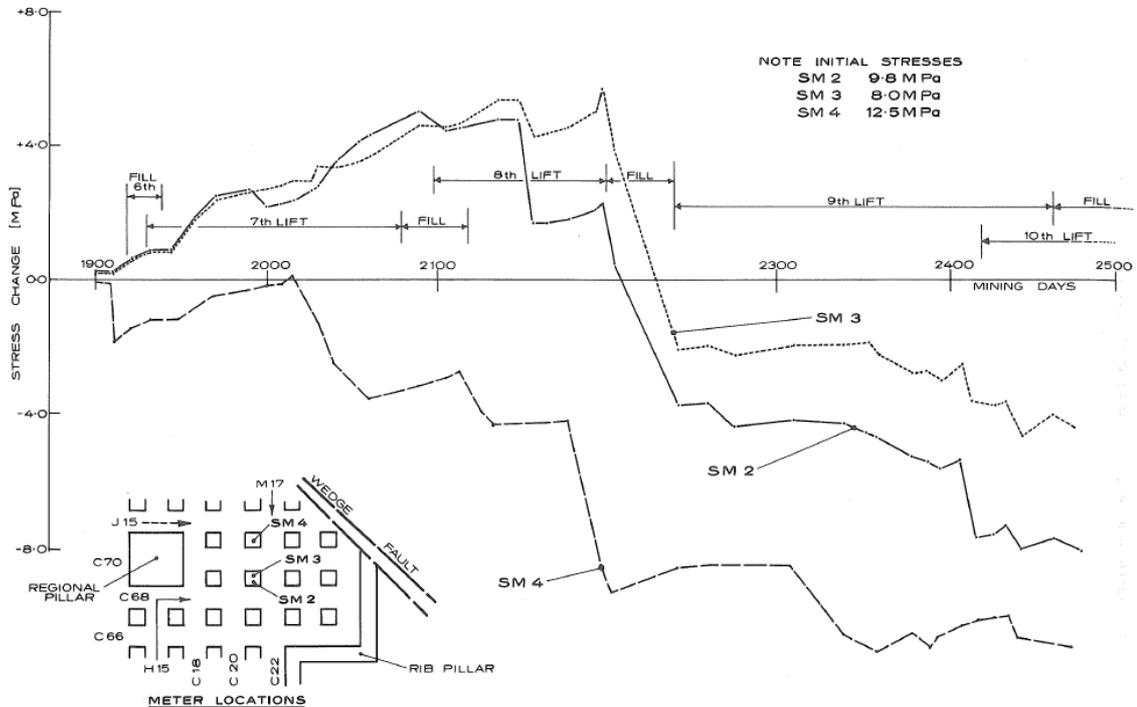


Abbildung 5-27: Verlauf der gemessenen Vertikalspannungen an den Messstellen SM 2 bis SM 4 zwischen der 7. und 10. Abbauscheibe (Barrett 1981).

Die Absolutwerte der drei Messzellen sind zu Beginn der Messserie (Abbau der 7. Abbauscheibe) rechnerisch Null gesetzt worden. Die dargestellten Graphen stellen den Spannungsverlauf ab diesem Zeitpunkt dar. Es ist anzumerken, dass der aufgezeichnete Spannungsverlauf recht plausibel erscheint. Vor allem die Tatsache, dass die Spannungsmessungen SM 2 & SM 3 in einer Feste durchgeführt worden sind und einen ähnlichen Verlauf zeigen bestärkt die Aussagekraft der Messungen.

Deutlich ist die Reduktion der Vertikalspannung in den Bergfesten ersichtlich. Warum diese Reduktion gerade zwischen der 9. und der 8. Abbauscheibe stattgefunden hat könnte, nach den bisherigen Ergebnissen der numerischen Simulation zu schließen, am Verhältnis zwischen der Breite und der Höhe des Abbaufeldes liegen.

Die tatsächlich gemessenen Spannungsänderungen in den Bergfesten nehmen große Bandbreiten von bis zu $\pm 100\%$ an.

5.4 Variation der Eingangsparameter der Simulation

Wie bereits erwähnt ist der für die ersten numerischen Simulationen gewählte Satz an Parametern eher als konservativ anzusehen, dh. die postulierten Erscheinungen und Effekte sollten bis zu diesem Zeitpunkt nicht durch die eingesetzten Parameter hervorgerufen werden.

		Magnesit	Magnesit (Feste)	Versatz	Interface
Dichte	[kg/m ³]	3000	3000	1800	
Emod	[GPa]	18	3	0,5	
Querdehnungszahl	[1]	0,15	0,15	0,3	
Kohäsion	[MPa]	8,4	8,4	0	
Innerer Reibungswinkel	[°]	38	38	30	
Zugfestigkeit	[MPa]	0,3	0	0	
Shear Stiffness Ks	[N/m]				3,6E+12
Normal Stiffness Kn	[N/m]				3,6E+12
Reibungswinkel	[°]				20
Kohäsion	[MPa]				0

Abbildung 5-28: Auszug aus den Materialparametern der numerischen Simulation. Diese Parameter stellen die Ausgangsbasis der Simulationen dar.

In diesem Kapitel sollen nun zwei Eingangsparameter

- Der Seitendruckbeiwert
- Der Elastizitätsmodul der Bergfesten

variiert werden um deren Einfluss auf die postulierten Effekte zu beschreiben und abzuschätzen.

5.4.1 Einfluss des Seitendruckbeiwertes

Der Seitendruckbeiwert k hat einen sehr großen Einfluss auf das Verhalten des Systems „Post Pillar“ Abbauverfahren. Der Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen den primären Horizontalspannungen zu den primären Vertikalspannungen und hat somit große Auswirkungen auf die Spannungen und Konvergenzen im System.

Die Variation des Seitendruckbeiwertes sieht so aus, dass ein „Extremwert“ von $k=2$ dem „Standardset“ von $k=1$ gegenübergestellt worden ist, dh. die primären Horizontalspannungen erhöhen sich in dieser Variationsreihe um 100% von 23 MPa in einer Teufe von 800m auf ca. 46 MPa.

Wie bereits erwähnt stellt diese Erhöhung kein realistisches Szenario dar, soll aber die Tendenz des Einflusses des Seitendruckbeiwertes darstellen.

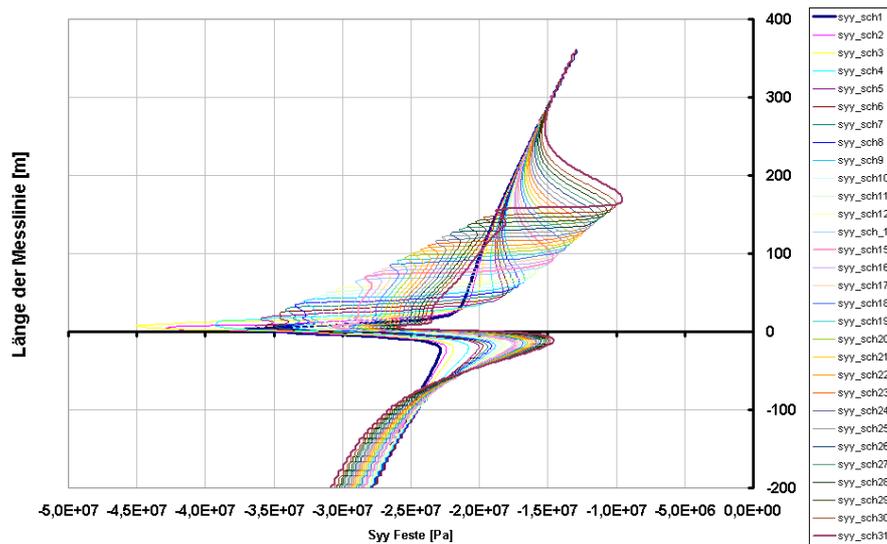


Abbildung 5-29: Verlauf der Vertikalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste. Seitendruckbeiwert $k=1$.

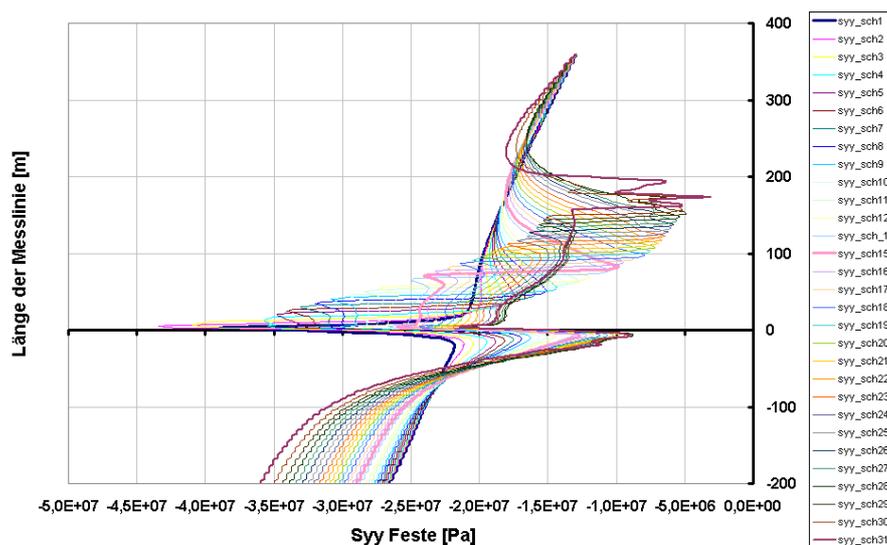


Abbildung 5-30: Verlauf der Vertikalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste. Seitendruckbeiwert $k=2$.

Die Erhöhung des Seitendruckbeiwertes von $k=1$ auf $k=2$ verringert die Vertikalspannung in den Bergfesten um ca. 30% von 20 MPa auf ca. 14 MPa nach dem Abbau der 32. Abbauscheibe und gemessen bei einer Festenhöhe von 100m.

Auf Grund des großen Horizontalspannungsauftrags oberhalb des Abbaubereiches und den damit verbundenen Versagensbereichen, ergibt sich ein unruhiger Verlauf der Vertikalspannungen über dem simulierten Abbau.

Nicht nur die maximalen Horizontalspannungen in den Auflagern ober- und unterhalb des Abbaubereiches, sondern auch die resultierende Horizontalspannung in den Bergfesten verdoppeln sich durch die Erhöhung des Seitendruckbeiwertes.

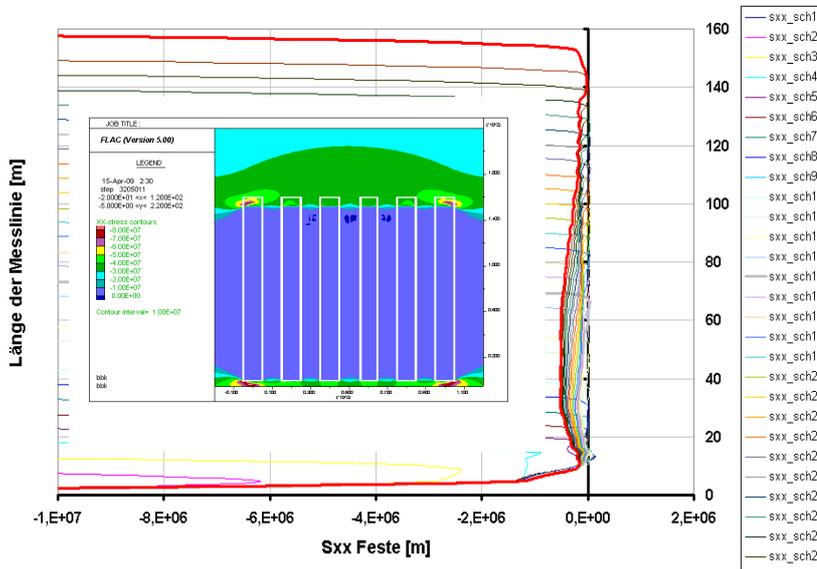


Abbildung 5-31: Verlauf der Horizontalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste im Bereich des „Post Pillar“ Abbaus Y-Achse = 0m bis Y-Achse = 160m. Seitendruckbeiwert $k=1$.

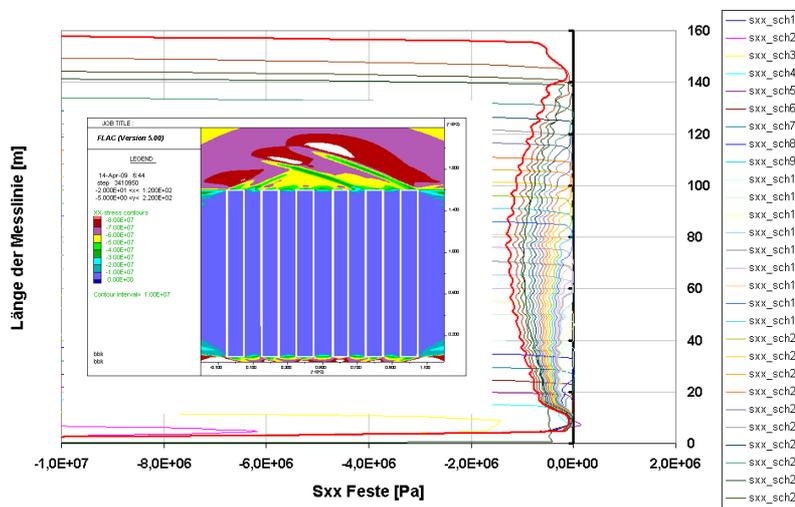


Abbildung 5-32: Verlauf der Horizontalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste im Bereich des „Post Pillar“ Abbaus Y-Achse = 0m bis Y-Achse = 160m. Seitendruckbeiwert $k=2$.

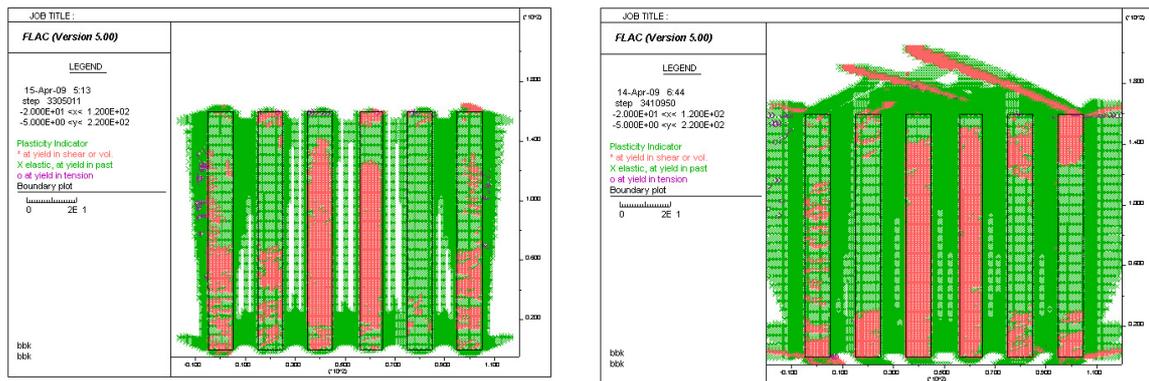


Abbildung 5-33: Darstellung der plastischen Bereiche nach Abbau der 32. Abbauscheibe. Abbauhöhe $H=160\text{m}$.
Linkes Diagramm Seitendruckbeiwert $k=1$. Rechtes Diagramm $k=2$.

Auf Grund der hohen Konzentration an Horizontalspannungen bilden sich bereits ab dem Abbau der 16. Abbauscheibe plastische Bereiche (Versagensbereiche) über dem Abbau. Abbildung 5-33 S.5-27zeigt die Verteilung der Versagensbereiche nach dem Abbau der 32. Abbauscheibe, welche einer Höhe des Abbaubereiches von 160m entspricht.

5.4.2 Einfluss des Elastizitätsmoduls der Bergfesten

Die Reduktion des Elastizitätsmoduls der Bergfesten soll vor allem zwei Umstände berücksichtigen, welche in der numerischen Simulation bis jetzt nur unzureichend Eingang gefunden haben. Zum Einen soll mit diesem Schritt die Unzulänglichkeit des zweidimensionalen Ansatzes bezüglich des Verformungsverhaltens der Bergfesten ausgeglichen werden und zum Anderen sollen auf diesem Wege die Auswirkungen der Zerrüttung der Bergfesten in Form eines „Weicherwerdens“ der Bergfesten berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise wird im nachfolgendem Kapitel behandelt.

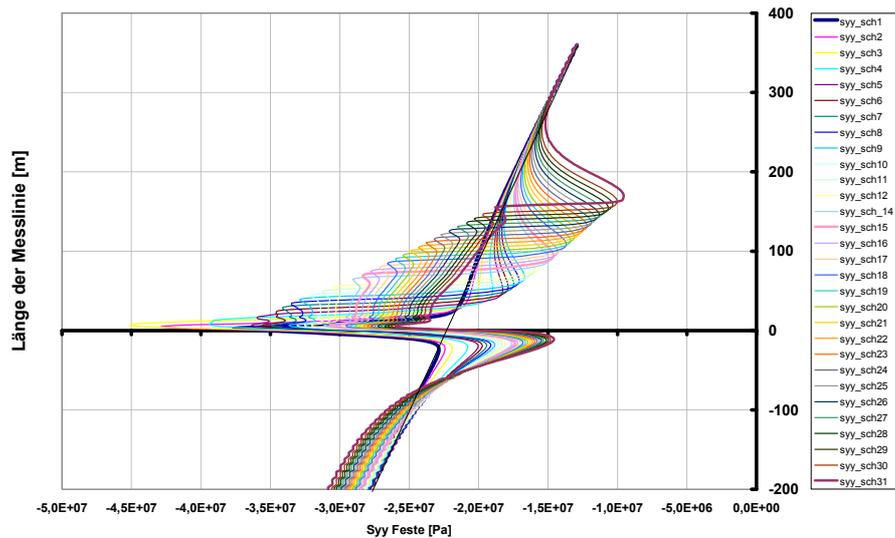


Abbildung 5-34: Verlauf der Vertikalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste. Seitendruckbeiwert $k=1$ (harte Feste $E=18\text{GPa}$).

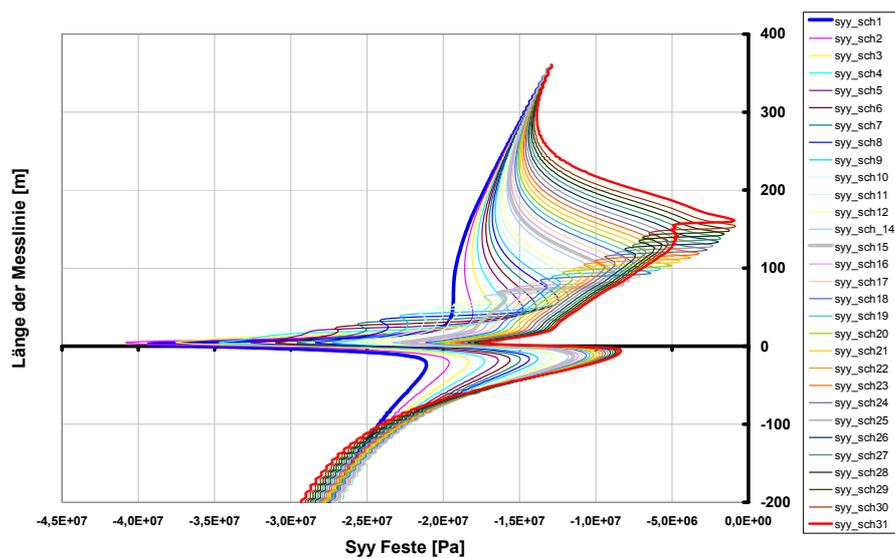


Abbildung 5-35: Verlauf der Vertikalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste. Seitendruckbeiwert $k=1$ (weiche Feste $E=3\text{GPa}$).

Die Vertikalspannung in den Bergfesten reduziert sich nach dem Abbau der 32. Abbauscheibe bei der Höhe des Abbaufeldes $H=100\text{m}$ (Y-Achse=100m) um 70% von 20 MPa auf ca. 7 MPa.

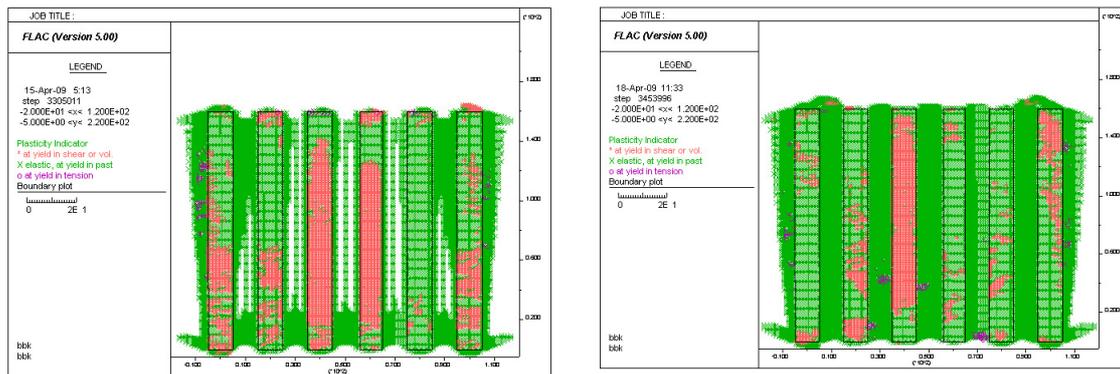


Abbildung 5-36: Darstellung der plastischen Bereiche nach Abbau der 32. Abbauscheibe. Abbauhöhe $H=160\text{m}$.
 Linkes Diagramm Seitendruckbeiwert $k=1$ (harte Feste $E=18\text{GPa}$). Rechtes Diagramm $k=1$ (weiche Feste $E=3\text{GPa}$).

Außerhalb des Abbaubereiches sind minimale Unterschiede in der Ausdehnung der Versagensbereiche zu erkennen. Die Bergfesten scheinen, bei der Variante mit dem geringeren Elastizitätsmodul von $E=3\text{GPa}$, zerrütteter zu sein.

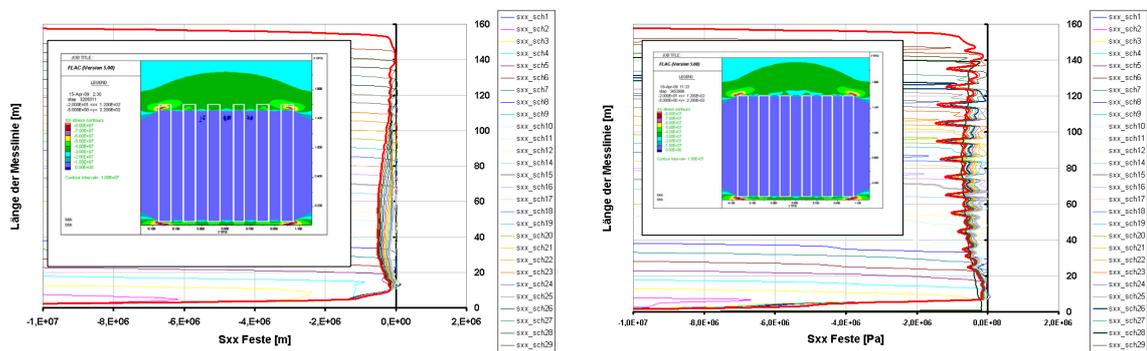


Abbildung 5-37: Verlauf der Horizontalspannungen entlang der Messlinie in der zentralen Bergfeste im Bereich des „Post Pillar“ Abbaus Y-Achse = 0m bis Y-Achse = 160m.
 Linkes Diagramm Seitendruckbeiwert $k=1$ (harte Feste $E=18\text{GPa}$). Rechtes Diagramm $k=1$ (weiche Feste $E=3\text{GPa}$).

Wie zu erwarten, hat die Verringerung des Moduls der Bergfesten keinen großen Einfluss auf den Verlauf der Horizontalspannungen. Durch den niedrigen Modul kommt eine gewisse Unruhe in das numerische Simulationsmodell.

5.4.3 Erhöhung des Seitendruckbeiwertes & Verringerung des Elastizitätsmoduls – Schlussfolgerungen.

Berücksichtigt man beide Parametervariationen in einem Rechendurchgang, dh. man setzt den Seitendruckbeiwert $k=2$ und man reduziert den Elastizitätsmodul in den Bergfesten von 18 GPa auf 3 GPa erhält man die kumulierten Effekte beider Variationen.

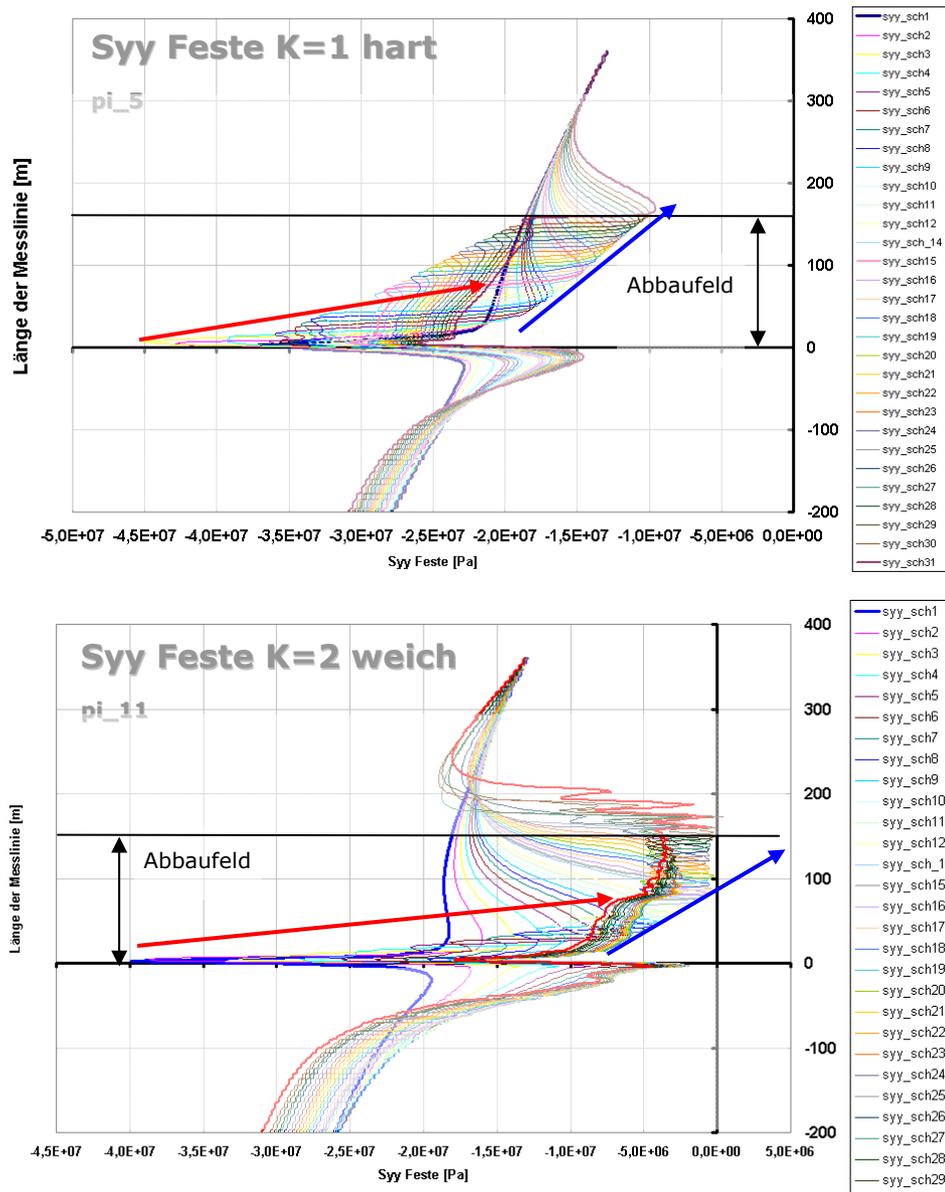


Abbildung 5-38: Vertikalspannungsverlauf in der zentralen Bergfeste für einen Seitendruckbeiwert $k=1$ & harte Bergfeste ($E_{mod}=18$ GPa) – obere Abbildung - und Seitendruckbeiwert $k=2$ & weiche Bergfeste ($E_{mod}=3$ GPa) – untere Abbildung.

Setzt man den Seitendruckbeiwert $k=2$, dh. wir haben zwischen den primären Horizontalspannungen und den primären Vertikalspannungen einen Faktor 2 und wir modellieren die Bergfesten als „weiches“ Material und berücksichtigen auf diese Weise die Unzulänglichkeiten des zweidimensionalen Ansatzes und die Zerrüttung der Bergfesten, erhalten wir deutlich reduzierte Vertikalspannungen in den Bergfesten und ausgeprägte plastische Zonen über und seitlich des Abbaufeldes.

Die reduzierten Vertikalspannungen zeigen sich erst dann, wenn der Abbau in die Höhe voranschreitet. Nach dem Abbau der ersten Abbauscheiben sind ähnliche Vertikalspannungen, in der Höhe zwischen 40 MPa und 45 MPa, in den Bergfesten für beiden Modelle zu beobachten.

Die Ergebnisse der Simulation für das Modell 1 (Abbildung 5-38 S.5-30 oben) mit $k=1$ und einem $E_{mod} = 18 \text{ GPa}$ zeigen eine reduzierte Vertikalspannung in den Bergfesten von ca. 18 MPa im oberen Bereich der Bergfeste nach dem Abbau der 32. Scheibe an. Für das zweite Modell (Abbildung 5-38 S.5-30 unten), mit einem Seitendruckbeiwert von $k=2$ und einem E_{mod} in den Bergfesten von 3 GPa, kann eine ausgeprägtere Reduktion der Vertikalspannungen beobachtet werden.

Nach dem Abbau der ersten Scheiben (1. & 2. Abbauscheibe) sind noch Vertikalspannungen von 40 MPa in den kurzen Bergfesten zu beobachten. Wird mit der 15. Abbauscheibe die Hälfte der Höhe des simulierten Abbaufeldes erreicht, reduziert sich die Vertikalspannung in der zentralen Bergfeste auf einen Wert von 5-6 MPa.

Ab diesem Zeitpunkt bildet sich über dem Abbaufeld eine immer größer werdende Zerrüttungszone aus.

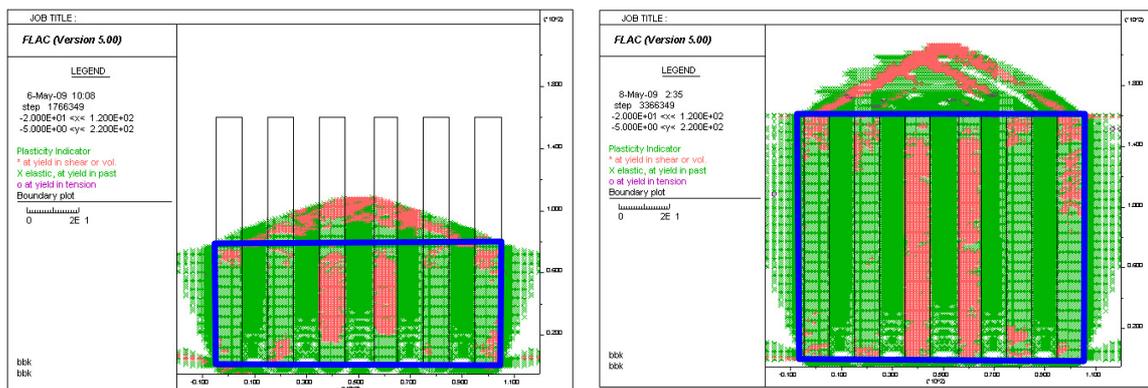


Abbildung 5-39: Darstellung der plastischen Bereiche nach Abbau der 15. Abbauscheibe (linke Abbildung) - Abbauhöhe $H=80\text{m}$ und nach Abbau der 32. Abbauscheibe (rechte Abbildung) - Abbauhöhe $H=160\text{m}$.

Zum Einen wird mit jeder neuen Abbauscheibe die Zerrüttungszone über dem Abbau ausgeprägter und zum Anderen bewegt sich jede aktuelle Abbauscheibe gerade in dieser Zerrüttungszone. Dies erklärt die Unruhe im numerischen Modell (Abbildung 5-38 S.5-30 unten) ab der Abbauhöhe 80m und bildet auch eine mögliche Erklärung für die

beschriebene Steinfallproblematik in der Strathcona Mine in Canada (siehe Kap. 3.1.1 S.3-4) bedingt durch die hohe Spannungskonzentration unmittelbar über dem Abbaubereich.

Schlussfolgerungen:

Aus den Ergebnissen der numerischen Simulation kann gefolgt werden, dass ein Erscheinungsbild des Abbaufahrens darin liegt, dass sich die Vertikalspannungen in den Bergfesten reduzieren und sich ausgeprägte Horizontalspannungsauflager ober- und unterhalb des Abbaus ausbilden. Die Vertikalspannungen werden wiederum links und rechts des Modells in die seitlichen Vertikalspannungsauflager abgeleitet.

Eine besondere Rolle in diesem Ablauf scheinen die primären Horizontalspannungen und die Verformungseigenschaften der Bergfesten auszuüben. Je höher die primären Horizontalspannungen in der Simulation angenommen werden, desto ausgeprägter ist der Rückgang der Vertikalspannungen in den Bergfesten und desto massivere Horizontalspannungsauflager, mit den damit verbundenen Zerrüttungszonen, bilden sich unter aber vor allem über dem Abbaufeld aus. Die Bergfesten bestehen nun selbst aus diesem zerrüttetem Material und tragen nur mehr die Last dieser Zerrüttungszone.

Es zeigt sich aber, dass das Hilfsmittel der numerischen Simulation ein geeignetes Werkzeug ist, komplexe Einzelmechanismen zu einem Modell zu verknüpfen. Man ist in der Lage die Auswirkungen des primären Spannungszustandes, Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Gebirges und des Versatzes mit den Geometrieänderung des Abbaufeldes zu verknüpfen und zu analysieren.

Dies ist auch eine wichtige Erkenntnis bezüglich der Schlussfolgerungen und der Nutzung der Ergebnisse der numerischen Simulation für z.B. neu zu planende „Post Pillar“ Abbaue.

Die numerische Simulation scheint ein geeignetes Mittel zu sein gebirgsmechanische Planungsvorgaben wie z.B. Baufeldbreiten, Baufeldhöhen oder Abbaugeometrien abzuschätzen. Auch der Einfluss auf Nachbarreviere, welche in unmittelbarer Nähe zum Baufeld liegen, oder die Auswirkungen größerer Geologischer Inhomogenitäten, kann mit Hilfe der numerischen Simulation abgeschätzt werden.

5.5 Höhe der Auflockerungszone über dem Abbaufeld

Die numerischen Simulationen haben gezeigt, dass sich im Firstbereich des Abbaublockes Versagenszonen ausbilden können. Diese bewirken einerseits, dass mit fortschreitendem Abbau die Bergfesten im überbelasteten Gebirge zu liegen kommen und dass sich oberhalb des Abbaus eine Zone aufgelockerten Materials ausbilden kann, welches von den Abbaufesten unterstützt werden muss. Das bedeutet, dass die Bergfesten zusätzlich zur aufgezwungenen Verformung durch die Spannungumlagerungen auch noch mit der Totlast der Auflockerungszone belastet werden.

Im Zuge des „Post Pillar“ Abbaus kann es zu Situationen kommen wo ein Teil der Belastung auf die Bergfesten spannungskontrolliert (lastkontrolliert) erfolgt. Ergeben die äußeren Randbedingungen eine zerrüttete Auflockerungszone über dem Abbau, bildet diese Zone die Basis für den spannungskontrollierten Lastanteil.

Gerade dieser spannungskontrollierte Lastanteil ist ein sehr wichtiger Parameter für die in Kap. 4.8 S.4-70 angestellten Überlegungen über das stabile – instabile Verhalten von Festensystemen.

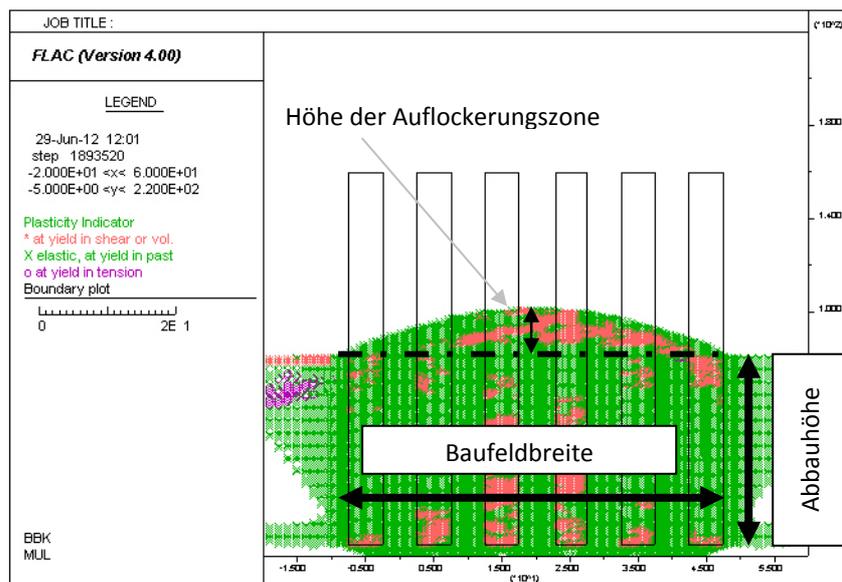


Abbildung 5-40: Plastische Bereiche innerhalb und über dem Abbaubereich.

Im Zuge der Auswertung ist die Höhe der Auflockerungszone, der Abbaufeldgeometrie und den Randbedingungen (Höhe des Seitendruckbeiwertes) gegenübergestellt.

Für die Berechnung der Festenbelastung ist ein Ausbringen von 50% angenommen worden (2d Ansatz des numerischen Simulationsprogramms).

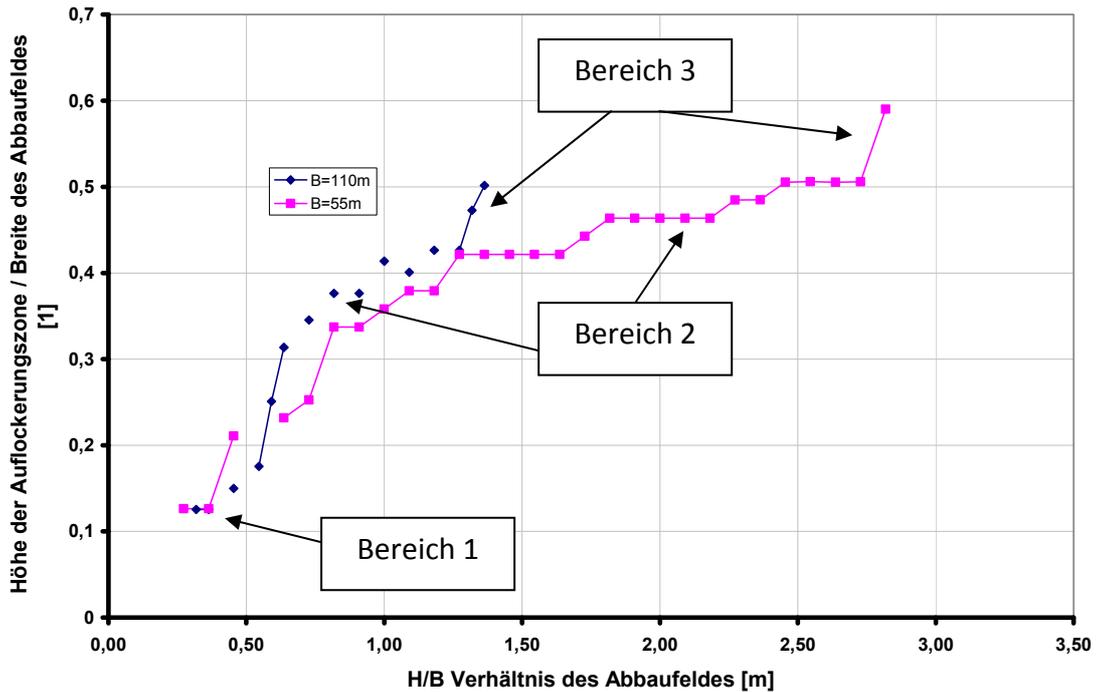


Abbildung 5-41: Höhe der Auflockerungszone in Abhängigkeit der Breite und dem Breiten- zu Höhen Verhältnis des Abbaufeldes.

Die Untersuchungen sind mit den originalen Materialparametern Kap. 5.1.3 S.5-5 durchgeführt worden. Der Seitendruckbeiwert ist auf $k=2$ gesetzt worden und die Festen sind mit den weichen Verformungseigenschaften berücksichtigt worden. Die Höhe der Auflockerungszone ist händisch ausgelesen worden.

Der gesamte Verlauf kann in drei Bereiche unterteilt werden:

Im ersten Bereich kann noch keine Auflockerungszone erkannt werden.

Im zweiten Bereich der Kurve bildet sich eine typische Auflockerungszone über dem Abbau aus (siehe Abbildung 5-40 S.5-33). Diese Auflockerungszone bildet sich bis zu einer Höhe von etwa der Hälfte der Breite des Abbaufeldes aus und zeigt sich „homogen“ bis zum Übergang zwischen den Bereichen 2 und 3.

Zu Beginn des dritten Bereiches bilden sich Scherbänder über dem Abbaubereich aus und die Höhe der Auflockerungszone nimmt sprunghaft zu, welches im Falle von geringtragfähigen Festen zu einem plötzlichen Versagen führen kann

Im letzten Stadium des Verlaufes (Bereich 3) bilden sich Scherbänder aus und die Höhe der Auflockerungszone erhöht sich noch einmal deutlich.

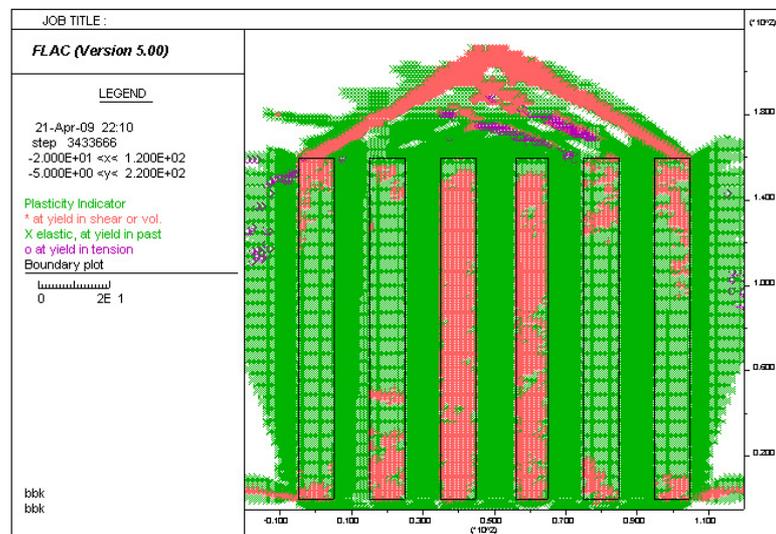


Abbildung 5-42: Plastische Bereiche innerhalb und über dem Abbaubereich.

Für den dritten Bereich ergeben sich nach dem Auftreten der Scherbänder, und unter Berücksichtigung eines Ausbringens von 50%, eine Festenbelastung von bis zu 3 MPa.

Es ist klar ersichtlich, dass die absolute Höhe der Auflockerungszone von Breite des Abbaufeldes abhängt und, dass das Auftreten der Scherbänder zusätzlich von der Abbauhöhe abhängt.

Aus dem weitgehend linearen Zusammenhang zwischen der Höhe der Auflockerungszone und der Breite des Baufeldes folgt, dass die auf den Festen wirkende Totlast mit dem Quadrat der Baufeldbreite zunimmt. Weiters nimmt auch die Höhe der Auflockerungszone mit der Höhe des Abbaubereiches zu.

Dieser Umstand ist bei der Planung von „Post Pillar“ Abbausystemen, insbesondere bei sehr hohen „Post Pillar“ Abbaubereichen zu berücksichtigen.

5.6 Offene Fragen – Diskussion bezüglich der numerischen Simulation

Im Zuge der Programmierung und vor allem während der Analyse der Ergebnisse haben sich drei Diskussionspunkte bzw. Fragestellungen ergeben:

Versagenskriterium nach Mohr Coulomb

Randbedingungen der Simulation

Geometrie des Simulationsmodells

5.6.1 Versagenskriterium nach Mohr Coulomb

Auf Grund fehlender Parameter konnte in den Simulationen kein „Post Failure“ Verhalten des Gebirges, vor allem der Bergfesten, simuliert werden. Dieser Umstand muss bei der Analyse der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Nach dem Versagen bietet das Material nach Mohr Coulomb einen gleichbleibenden Widerstand gegen steigenden Belastung an. Die zusätzlicher Belastung wird in Form steigender Konvergenzen abgebaut. In der Realität würde aber ein „Post Failure“ Verhalten eher dem Verhalten von überbeanspruchten Bergfesten entsprechen siehe auch Wagner (Wagner, 1974).

Im Zusammenhang mit dem Versagenskriterium nach Mohr Coulomb muss noch auf einen weiteren Umstand aufmerksam gemacht werden. Vor allem der Entspannungsvorgang des Gebirges wird vom verwendeten Versagenskriterium nach Mohr Coulomb nicht realitätsnah abgebildet.

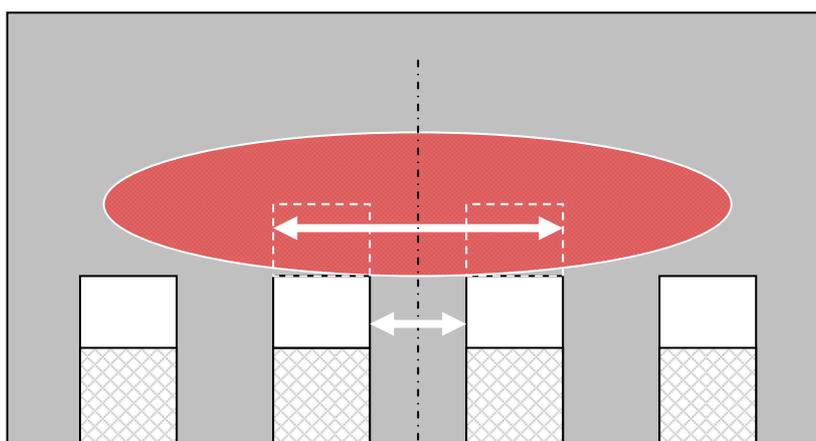


Abbildung 5-43: Schematische Darstellung der Horizontalspannungen vor dem Abbau einer neuen Abbauscheibe.

Vor dem Abbau einer neuen Abbauscheibe befindet sich ein ausgeprägter Auflagerbereich der Horizontalspannungen. In dieser Zone können sich

Horizontalspannungskonzentrationen von bis zu dem Doppelten der primären Horizontalspannungen ausbilden. Dieser Bereich hoher Horizontalspannungen wird nun mit dem Abbau der Örtler durchfahren und der Spannungsverlauf verändert. Die im Versatz stehenden Bergfesten werden um die Höhe des abgebauten Ortes (Höhe der Abbauscheibe) höher. Gerade dieses neu geschaffenen Stück der Bergfeste durchlebt in diesem Schritt eine wesentliche Veränderung seines Spannungszustandes.

Vor dem Abbau der Abbauscheibe befindet sich der Bereich im Horizontalspannungsaufleger mit hohen Horizontalspannungen und moderaten Vertikalspannungen, welche in etwa den Vertikalspannungen in den Bergfesten entsprechen. Nach dem Abbau entstehen zwei freie Umlenkeiten links und rechts der Bergfeste und die hohen Horizontalspannungen finden kein Widerlager mehr, der oberste Bereich entlastet sich elastisch nach links und rechts bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat.

An dieser Stelle stellt sich die eigentliche Frage, ob dieses elastische Entlasten bis weit unter dem primären Horizontalspannungszustand der Realität entspricht oder ob hier andere Modelle für die Beschreibung des Ablaufes herangezogen werden müssen.

Wie verhält sich geklüftetes Gebirge wenn es unter den primären Spannungszustand entlastet wird? Wahrscheinlich nicht rein elastisch, dh. es müsste, in Anlehnung an die Versagensmodelle der Bodenmechanik, ein höhergradiges Versagensmodell implementiert werden. Dieses höhergradige Materialmodell sollte zum Einen den zuvor angesprochenen „Post Failure“ Bereich und zum Anderen die unterschiedlichen Ent- und Belastungsmoduln berücksichtigen.

Die Entwicklung eines solchen Modells scheint ein wichtiges Forschungsobjekt zu sein.

5.6.2 Randbedingungen der Simulation

Die Horizontalspannungen sind in Form einer seitlichen Trapezlast in das Modell eingetragen worden. Diese Art der Lasteintragung stellt eine nachdrückende Last dar und hat Einfluss auf das Gesamtverhalten des Systems. Der Einfluss auf die Beschriebenen kann quantitativ nicht ausgedrückt werden muss aber in der Analyse der Ergebnisse angemerkt werden.

5.6.3 Geometrie des Simulationsmodells

In manchen Ergebnissen der numerischen Simulation ist ein Einfluss der Entfernung zwischen dem Rand der Simulation und dem eigentlichen Abbaubereich zu beobachten (siehe auch den Aufbau des Modells Abbildung 5-1 S.5-3). Vor allem beim Auftreten ausgedehnter Versagensbereiche in der Simulation und der damit verbundenen Unruhe innerhalb der Spannungsverläufe kann ein nicht quantifizierbarer Einfluss auf die Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden..

In nachfolgenden Untersuchungsreihen sollte der Abstand zwischen dem Rand der Simulation und dem Abbaufeld von derzeit 300m ausgedehnt werden.

5.7 Literaturverzeichnis Kapitel 5

- Askew, J. E.; McCarthy, P. L.; Fitzgerald, D. J. (1978): Backfill Research for Pillar Extraction at ZC/NBHC: Mining with backfill. 12. Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, Ontario, May 23 - 25, 1978. Montreal: The Canadian Inst. of Mining and Metallurgy. Special volume, S. 100–110.
- Barret, J. R.; Chester, G. (1981): Post-pillar cut and fill mining: comparison of theory and practice. In: Stephansson, Ove.; Jones, Michael J. (Hg.): Application of rock mechanics to cut and fill mining. Proceedings of the Conference on the Application of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining ... held at the University of Luleå, Sweden, from 1 to 3 June, 1980. London: Inst. of Mining and Metallurgy, S. 272–283.
- Clark, I. H. (1991): The cap model for stress path analysis of mine backfill compaction processes. In: Computer Methodes and Advances in Geomechanics, S. 1293–1298.
- Cleland, R. S.; Sing, K. H. (1973): Development of Post Pillar Mining at Falconbridge Nickel Mines Limited. In: CIM Bulletin, Jg. 1973, H. April, S. 57–64.
- Hustrulid, W.; Moreno, O. (1982): Support capabilities of fill — a non-linear analysis. Proc. Conference on the Application of Rock Mechanics to Cut and Fill Mining, Lulea, 1–3 June 1980, P107–118. Publ London: IMM, 1981. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Jg. 19, H. 4, S. 81.
- Siefert, M. (2004): Development of a methodology for the evaluation of pillar conditions. Dissertation an der Montanuniversität Leoben.
- Wagner, H. (1974): Determination of the complete load-deformation characteristics of coal pillars. In: Proc. 3rd ISRM Congr., Advances in Rock Mechanics, S. 1076–1081.

6 Offene Fragen & Schlussfolgerungen

Im Zuge der Bearbeitung der Thematik möglich war, bekannte Einzelmechanismen mit formalen Zusammenhängen und Ansätzen, wie z.B. der Hypothese nach Winkler und dem Hilfsmittel der numerischen Simulation zu einem gebirgsmechanischen Modell des „Post Pillar“ Abbausystems zu verknüpfen. Die wesentlichsten Erkenntnisse, verifizierte Problembereiche und zukünftige Forschungsbereiche können wie folgt zusammengefasst werden:

Das „Post Pillar“ Abbauverfahren unterscheidet sich in vielerlei Weise vom klassischen Kammerfestenbau (Örterbau).

Geometrie des Abbaufeldes

Die Geometrie des „Post Pillar“ Abbaufeldes ändert sich kontinuierlich in Folge des Abbaus. Durch diese Veränderungen ändert sich sowohl die Belastung der Festen als auch deren mechanisches Verhalten, dh. die Festigkeit und das Verformungsverhalten.

Konzept des Sicherheitsfaktors

Als Folge der kontinuierlichen Veränderungen sowohl auf Seite der Belastung der Festen als auch auf der Festigkeitsseite, kann das Konzept des Sicherheitsfaktors nicht uneingeschränkt angewendet werden.

Belastung – Belastungsmechanismus der Bergfesten

Nicht nur die Belastung der „Post Pillar“ Festen ändert sich über ihren Lebenszyklus, der Festenhöhe, sondern auch deren Belastungsmechanismus ändert sich von einer rein verformungskontrollierten Anfangssituation zu einer Mischform von verformungskontrollierten und lastkontrollierten Anteilen zu einer lastkontrollierten Endsituation.

Steifigkeit des Gesamtsystems

Die Steifigkeit des Gesamtsystems setzt sich aus der Systemsteifigkeit des Baufeldes und der Festensteifigkeit zusammen.

Die Steifigkeit des Baufeldes nimmt in der Anfangsphase mit der Baufeldbreite ab. Mit fortschreitendem Abbau nach oben nimmt die Steifigkeit des Baufeldes mit der Höhe zu, d.h. die vertikale Gesamtkonvergenz, welche für die Festenbelastung verantwortlich ist, nimmt ab.

Die Festensteifigkeit nimmt mit der Baufeldhöhe ab, d.h. die Festen werden im Zuge des Abbaus weicher.

Auf Grund der Änderung des Belastungssystems und des Belastungsmechanismus, und der sich gleichzeitig sich verändernden Steifigkeit des Gesamtsystems, ändern sich auch die Stabilitätseigenschaften des „Post Pillars“ Systems kontinuierlich.

Als eine der wichtigsten Erkenntnisse der Untersuchungen stellte sich der Einfluss der Breite und der Höhe des Baufeldes heraus.

Im Zuge des Abbaus von unten nach oben verändert sich die Geometrie des Abbaufeldes und somit die Geometrie der einzelnen Festen in einer „Post Pillar“ Abteilung. Bei konstantem Querschnitt verringert sich mit jeder Abbauscheibe das Breiten- zu Höhenverhältnis und damit das Verformungsverhalten der Festen, dh. sie werden weicher und die Vertikalspannung reduzieren sich bis zu einem Wert der deutlich unter dem Wert der primären Vertikalspannungen liegen kann.

Bedingt durch diese Geometrieänderung des Abbaufeldes ergibt sich ein komplexer Lebenszyklus einer Bergfeste innerhalb einer „Post Pillar“ Abteilung. Zu Beginn des Abbaus, nach Abbau der ersten Scheiben, entstehen eher gedrungene Abbaufesten, welche sich steif verhalten und eine hohe Belastung aufweisen. Die Belastung ist in einem hohen Maße verformungskontrolliert. Im Laufe der Zeit nimmt der Anteil der verformungskontrollierten Last ab, die Festen werden weicher und das Belastungssystem insgesamt steifer. Am Ende des Zyklus bietet die Feste keinen Widerstand mehr gegen eine weitere Verformung, da nun die Feste sehr hoch und zerrüttet ist. Sie trägt nur mehr das Gewicht der über ihr liegenden Auflockerungszone als Totlast. Diese Totlast stellt eine hundertprozentig spannungskontrollierte Situation dar, d.h. das das Belastungssystem verhält sich perfekt weich und begünstigt somit instabiles Verhalten.

Wie bereits erwähnt bewirkt ein höheres Baufeld eine Entlastung der Festen. Wird das Baufeld nun in die Breite entwickelt, ergeben sich größere Spannweiten und damit größere Festenbelastungen. Aber nicht nur die Belastung der Festen nimmt zu, auch das Gesamtverhalten des Systems tendiert in Richtung eines instabileren Verhaltens. Diese Zusammenhänge sollen noch einmal an einem exemplarischen Beispiel analysiert werden. Diese Situation kann durchaus in Realität beobachtet und nachgezeichnet werden.

Das Beispiel beschreibt die laterale Erweiterung einer in Verhieb befindlichen „Post Pillar“ Abteilung. Auf Basis der bisher in dieser Arbeit erarbeiteten gebirgsmechanischen Mechanismen und Zusammenhänge sollen die Auswirkungen dieser Erweiterung beschrieben und Empfehlungen für die Beherrschung dieser durchaus komplexen Situation abgegeben werden.

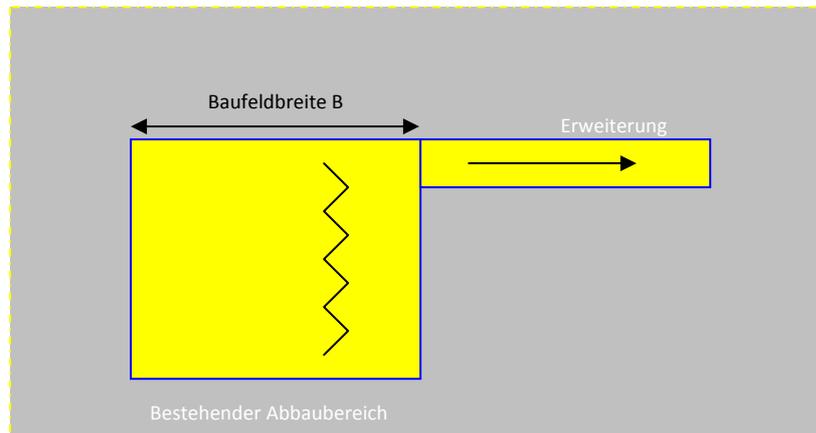


Abbildung 6-1: Erweiterung eines bestehenden „Post Pillar“ Abbaufeldes in die Breite.

Wird der Abbau, wie in Abbildung 6-1 dargestellt, lateral ausgedehnt, um z.B. neuexplorierte Lagerstättenbereiche abzubauen, hat das fundamentale Auswirkungen sowohl auf die bereits bestehende Abbaubteilung als auch auf den neu aufgefahrenen Abbaubereich.

Auswirkung 1:

Auf Grund des bereits vorangeschrittenen Abbaus im bestehenden Abbaubereich und der damit verbundenen Entlastung der Festen, bilden sich links und rechts des Abbaubereiches vertikale Spannungsauflager auf. Genau diese Zonen erhöhter Spannung müssen jedoch mit dem neuen Abbau durchörtert werden. Dies führt zu einem erhöhten Ausbauraufwand im Übergangsbereich, der bereits in den Planungen berücksichtigt werden muss.

Auswirkung 2:

Auch ohne der Durchörterung der seitlichen Spannungsauflagern werden die Festen in der „Post Pillar“ Erweiterung stärker belastet als dies in der bestehenden Abteilung der Fall ist. Im bereits bestehenden Feld sind die Festen bereits sehr schlank bzw. weich und werden auf Grund dieser Umstände entlastet. Im Bereich der Erweiterung weisen die Festen eine geringe Höhe auf und sind somit steifer wie die Festen in der bestehenden Abteilung. Auch wenn im bestehenden Abbaufeld keine Anzeichen einer

Überbeanspruchung der Festen zu beobachten sind, ist mit Druckerscheinungen an den Bergfesten innerhalb der Erweiterung zu rechnen. Diesen Auswirkungen muss mit geeigneten Ausbaumaßnahmen entgegengewirkt werden.

Auswirkung 3:

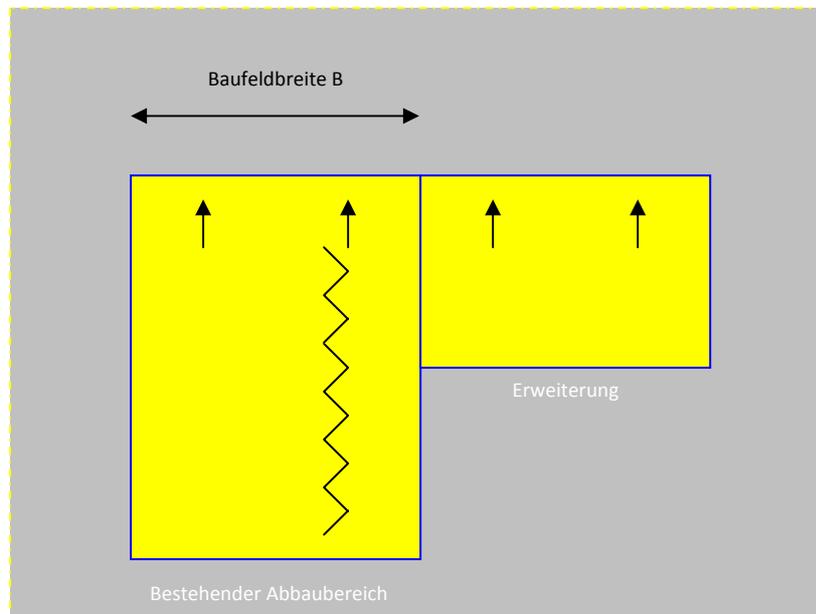


Abbildung 6-2: Erweiterung eines bestehenden „Post Pillar“ Abbaufeldes in die Breite und nach oben.

Wird nun die bestehende „Post Pillar“ Abteilung mit der Erweiterung zu einem Abbaubereich verschmolzen und der Abbau weiter scheibenweise nach oben vorangetrieben, ergeben sich zusätzliche Auswirkungen.

Die verdoppelte Baufeldbreite bewirkt eine massive Erhöhung der Belastung der zentralen Bergfesten innerhalb der Abteilung und ein Weicherwerden des Belastungssystems.

In diesem Zusammenhang ist es besonders wichtig noch einmal auf die auf die Festen wirkende Totlast aufmerksam zu machen. Es ist besonders wichtig festzustellen, dass sich die Erfahrungen des ursprünglich schmalen Baufeldes nicht eins zu eins auf das breitere Baufeld übertragen lassen. Die numerischen Simulationen haben gezeigt, dass die Totlast und somit auch die Ausdehnung der Auflockerungszone etwa mit dem Quadrat der Baufeldbreite zunimmt.

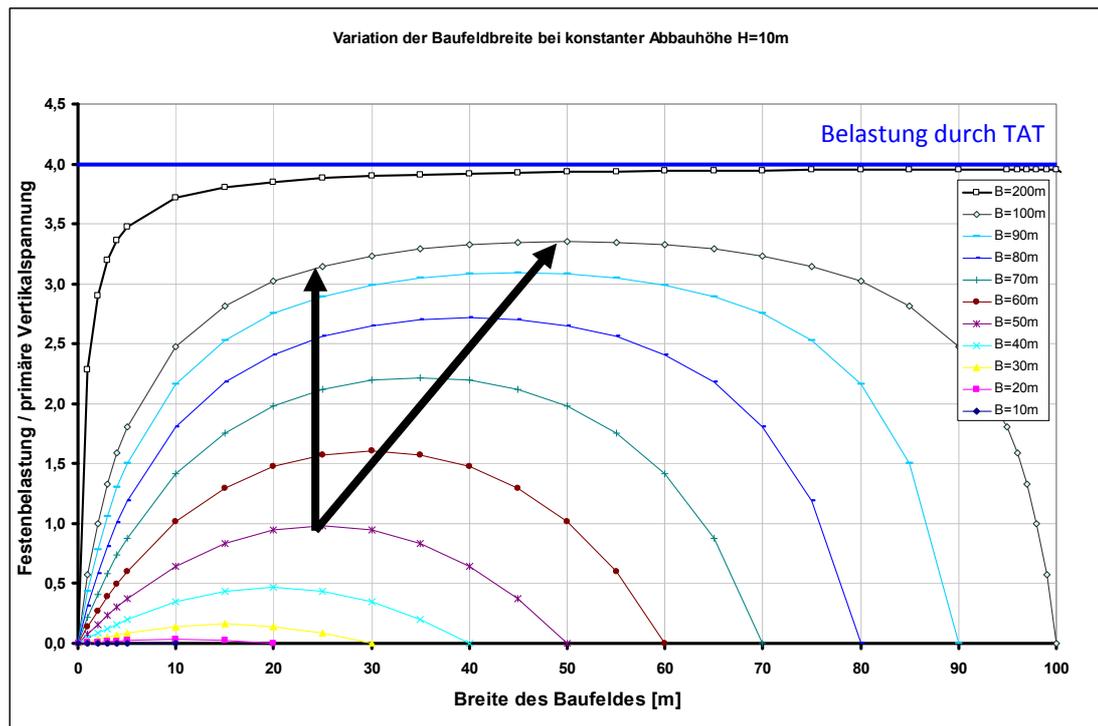


Abbildung 6-3: Verhältnis der Festbelastung zur primären Vertikalspannung bei einer Abbauhöhe von H=10m in Abhängigkeit der Breite des Baufeldes.

Verdoppelt man die Baufeldbreite durch eine laterale Erweiterung von z.B. 50m auf 100m erhöht sich die Belastung der Bergfesten im zentralen Bereich des alten Abbaus um den Faktor 3,2. Vergleicht man die zwei zentralen Bereiche miteinander ergibt sich eine Spannungserhöhung um den Faktor 3,4.

Eine Reaktion auf diese Spannungserhöhung kann z.B. ein zusätzlicher Ausbau der Ulmenseiten der Bergfesten mit einer Systemankerung mit Seilverzug sein. Außerdem kann an eine Verringerung der Örtersbreite, bei konstantem Zentralabstand der Festen, gedacht werden, was zu breiteren, standfesteren Festen führt.

Zeigen bereits bestehende Abbaufelder Anzeichen von Standfestigkeitsproblemen ist eine laterale Erweiterung des „Post Pillar“ Abbaubereiches im Detail zu überdenken.

Aber nicht nur die Belastung der Bergfesten kann durch eine laterale Erweiterung dramatisch erhöht werden, auch das Stabilitätsverhalten des Gesamtsystems wird negativ beeinflusst.

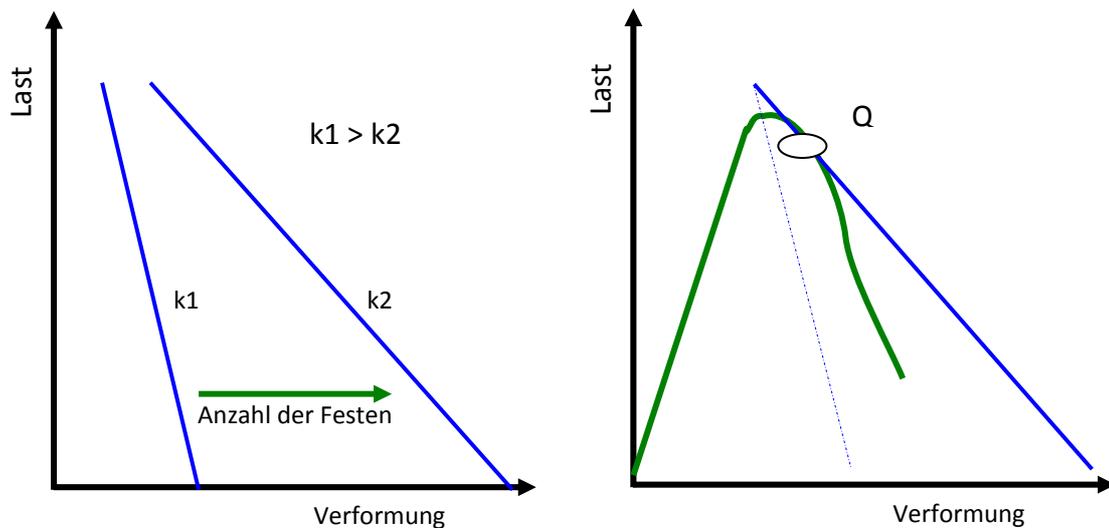


Abbildung 6-4: Abhängigkeit der Steifigkeit des Belastungssystem von der Zahl der Bergfesten innerhalb einer Abbaubteilung (linke Abbildung) und das Verhalten eines instabilen Systems, dargestellt in einem Last- Verformungsdiagramm.

Bei einer Vergrößerung der Breite des Abbaubereiches verhält sich das Belastungssystem tendenziell weicher (linke Seite Abbildung 6-4) und das Gesamtsystem tendiert eher in Richtung eines instabilen Systemverhaltens (rechte Seite Abbildung 6-4).

Dh. die Verbreiterung eines „Post Pillar“ Baufeldes kann den operativen Betrieb zweifach negativ beeinflussen. Auf der einen Seite wird die Spannung in den Bergfesten erhöht und auf der anderen Seite das Systemverhalten in Richtung Instabilität verschoben.

Durch das Stehenlassen von Barrierefesten können die negativen Einflüsse einer Erweiterung reduziert werden. Die Spannweiten der Abteilungen werden klein, das Belastungssystem steif gehalten und das „Gesamtsystem „Post Pillar“ Abbauverfahren kann auch bei einer lateralen Erweiterung sicher betrieben werden.

Bereiche die einer weiteren Klärung bedürfen können wie folgt zusammenfassend angezeigt werden:

Bergfesten

Im Gegensatz zum traditionellen Kammerfestenbau wo das Breiten zu Höhenverhältnis der Festen im Allgemeinen $>0,5$ beträgt liegt beim „Post Pillar“ Abbauverfahren das Breiten zu Höhenverhältnis der Festen, mit Ausnahme der untersten Festen einer Abbaubteilung deutlich $\ll 0,5$. Mit diesen Geometrien der Bergfesten liegen wir außerhalb jeder Erfahrungsbereiche. Die Abschätzung der Festigkeit dieser sehr schlanken, im Versatz eingebetteten Bergfesten muss noch Ziel weiterer Forschungstätigkeit werden.

Auf Grund der kleineren Baufeldbreiten beim „Post Pillar“ Abbausystem kann das üblicherweise beim Kammerfestenabbau angewandte Konzept der Theorie der zugeordneten Flächen nicht herangezogen werden.

Wirkung des Versatzes auf das Festenverhalten

Die vorliegende Arbeit hat zwar gezeigt, dass die Wirkung des Versatzes allem Anschein nach bisher unterschätzt worden ist, quantitativ aber kann die festigkeitssteigernde Wirkung nicht ausgedrückt werden.

Der Einfluss des Versatzes auf das Verhalten (Festigkeit und Verformung) der Bergfesten muss in Zukunft weiter untersucht werden.

Beim „Post Pillar“ Abbauverfahren ist die Breite der Baufelder meist deutlich kleiner als bei den traditionellen Kammerfesten-Abbausystemen. Dies wirkt sich positiv auf die Festenbelastung und die Steifigkeit des Gesamtsystems aus.

In Folge der angesprochenen Problembereiche, sehr schlanke Festen, der Einfluss des Versatzes und die eher kleinen Baufeldbreiten, hat das beim Kammerfestenabbauverfahren traditionellerweise angewandte Konzept des Sicherheitsfaktors beim „Post Pillar“ Abbauverfahren nur begrenzte Anwendung und erfordert radikales Umdenken bei der Anwendung auf Grund der sich während des Abbaus ändernden Festigkeit und Verformungseigenschaften der Feste und der sich gleichzeitig, auf Grund der sich verändernden Baufeldgeometrie ändernden Festenbelastung.

Totlast

Da die Ausdehnung der Auflockerungszone, vor allem am Ende des Abbaus einer „Post Pillar“ Abteilung sehr großen Einfluss auf den Belastungsmechanismus, ausgedrückt durch die „Totlast“, hat müssen an dieser Stelle noch weitere Untersuchungen folgen.

Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung des „Post pillar“ Abbauverfahrens ist eine stabile Abbausituation, d.h. ein steifes Belastungssystem welches sicherstellt, dass die Festen kontrolliert zu Bruch gehen. Wesentlichster Einflussparameter in dieser Hinsicht ist die Baufeldbreite. Jede geplante Vergrößerung der Baufeldbreite erfordert daher detaillierte gebirgsmechanische Untersuchungen, den Einsatz eines umfangreichen Messprogramms bis hin zum Einsatz seismischer Überwachungssysteme.

Werden alle in dieser Arbeit aufgezeigten Randbedingungen für eine erfolgreiche und sichere Anwendung des Verfahrens eingehalten, ist das „Post Pillar“ Abbauverfahren zwar ein sehr komplexes, und noch nicht bis ins Letzte ergründetes, aber für bestimmte Lagerstättenverhältnisse und Randbedingungen ein gut geeignetes und zukunftssträchtiges Abbauverfahren.

7 Anhang 1: Berechnungsdateien – Numerische Simulation

In diesem Kapitel werden die Berechnungsdateien für die numerische Simulation angeführt. Da die Materialparameter und die Randbedingungen der Simulation getrennt von der Hauptdatei erarbeitet worden sind, ergeben sich insgesamt drei Dateien. In der Hauptdatei ist nur der Abbau der ersten zwei Scheiben dargestellt. Die restlichen Scheiben sind, analog den ersten beiden Scheiben, im Programm abgebaut und wieder versetzt worden.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Berechnungen nur mit der Version 4.0 der Software Flac 2d der Firma Itasca durchgeführt werden können!

Werden die Berechnungsdateien mit der Version 6.0 berechnet, wird der Befehl „mod null“ etwas anders verstanden als in der Version 4.0. In der Version 4.0 ist es möglich mit dem Befehl „mod null“ (ohne einen Rechenschritt zu setzen) einen Netzbereich zu entspannen, ohne das Netz zu zerstören. Dies ist wichtig um das Interface zwischen dem Versatzkörper und der Bergfeste zu erhalten. In der Version 6.0 wird das Netz gelöscht und somit das Interface der Abbauscheibe.

Diese Tatsache konnte erst vor der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit beobachtet werden. Ein Grund für diese Verhalten konnte nicht gefunden werden.

7.1 Berechnungsdatei

```

; *****
; Post Pillar Versuch 1
; *****

new
call Mat.txt
call insitu_po_pi_8.txt
set step 200000
grid 220,280
model elastic

gen -210,-205 -210,-5 -10,-5 -10,-205
ratio 0.955,0.955 i=1,51 j=1,51
gen -210,-5 -210,+175 -10,+175 -10,-
5 ratio 0.955,1 i=1,51 j=51,231
gen -210,+175 -210,+375 -10,+375 -
10,+175 ratio 0.955,1.045 i=1,51
j=231,281

gen -10,-205 -10,-5 +50,-5 +50,-205
ratio 1,0.955 i=51,171 j=1,51

gen -10,-5 -10,+175 +50,+175 +50,-5
i=51,171 j=51,231

gen -10,+175 -10,+375 +50,+375
+50,+175 ratio 1,1.045 i=51,171
j=231,281

; *****
;Materialparameter der Festen
; *****
mod e
prop density=den bulk=bu1
shear=sh1 cohesion=coh1
friction=fric1 tension=ten1
set gravity=9.81
set large
his unb
;call his_po_pi_5.txt

; *****

;Randbedingungen
; *****

fix y j=1

; Auflasten für den Primärzustand
apply syy=ob from 1,281 to 221,281
apply sxx=sob var 0.0 ds from
221,281 to 221,1
apply sxx=sob var 0.0 ds from 1,281
to 1,1

; ORT 1
mod n i=56,65 j=56
mod n i=56,65 j=215
mod n i=56 j=56,215
mod n i=65 j=56,215
; ORT 2
mod n i=76,85 j=56
mod n i=76,85 j=215
mod n i=76 j=56,215
mod n i=85 j=56,215
; ORT 3
mod n i=96,105 j=56
mod n i=96,105 j=215
mod n i=96 j=56,215

```

```

mod n i=105 j=56,215
; ORT 4
mod n i=117,125 j=56
mod n i=117,125 j=215
mod n i=117 j=56,215
mod n i=125 j=56,215
; ORT 5
mod n i=136,145 j=56
mod n i=136,145 j=215
mod n i=136 j=56,215
mod n i=145 j=56,215
; ORT 6
mod n i=156,165 j=56
mod n i=156,165 j=215
mod n i=156 j=56,215
mod n i=165 j=56,215

; Ort 1
gen -7.5,0 -7.5,160 -2.5,160 -2.5,0
i=57,65 j=57,215
; Ort 2
gen 2.5,0 2.5,160 7.5,160 7.5,0
i=77,85 j=57,215
; Ort 3
gen 12.5,0 12.5,160 17.5,160 17.5,0
i=97,105 j=57,215
; Ort 4
gen 23,0 23,160 27.5,160 27.5,0
i=118,125 j=57,215
; Ort 5
gen 32.5,0 32.5,160 37.5,160 37.5,0
i=137,145 j=57,215
; Ort 6
gen 42.5,0 42.5,160 47.5,160 47.5,0
i=157,165 j=57,215

; ORT 1
interface 1001 aside from 56,56 to
66,56 bside from 57,57 to 65,57
interface 1001 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 1002 aside from 57,215 to
65,215 bside from 56,216 to 66,216
interface 1002 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 1 aside from 56,56 to 56,61
bside from 57,57 to 57,62
interface 1 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 3 aside from 56,61 to 56,66
bside from 57,62 to 57,67
interface 3 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 5 aside from 56,66 to 56,71
bside from 57,67 to 57,72
interface 5 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 7 aside from 56,71 to 56,76
bside from 57,72 to 57,77
interface 7 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 9 aside from 56,76 to 56,81
bside from 57,77 to 57,82
interface 9 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 11 aside from 56,81 to
56,86 bside from 57,82 to 57,87
interface 11 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

```

```

interface 13 aside from 56,86 to
56,91 bside from 57,87 to 57,92
interface 13 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 15 aside from 56,91 to
56,96 bside from 57,92 to 57,97
interface 15 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 17 aside from 56,96 to
56,102 bside from 57,97 to 57,102
interface 17 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 19 aside from 56,102 to
56,107 bside from 57,102 to 57,107
interface 19 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 21 aside from 56,107 to
56,112 bside from 57,107 to 57,112
interface 21 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 23 aside from 56,112 to
56,117 bside from 57,112 to 57,117
interface 23 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 25 aside from 56,117 to
56,122 bside from 57,117 to 57,122
interface 25 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 27 aside from 56,122 to
56,127 bside from 57,122 to 57,127
interface 27 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 29 aside from 56,127 to
56,132 bside from 57,127 to 57,132
interface 29 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 31 aside from 56,132 to
56,137 bside from 57,132 to 57,137
interface 31 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 33 aside from 56,137 to
56,142 bside from 57,137 to 57,142
interface 33 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 35 aside from 56,142 to
56,147 bside from 57,142 to 57,147
interface 35 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 37 aside from 56,147 to
56,152 bside from 57,147 to 57,152
interface 37 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 39 aside from 56,152 to
56,157 bside from 57,152 to 57,157
interface 39 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 41 aside from 56,157 to
56,162 bside from 57,157 to 57,162

```

```

interface 41 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 43 aside from 56,162 to
56,167 bside from 57,162 to 57,167
interface 43 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 45 aside from 56,167 to
56,172 bside from 57,167 to 57,172
interface 45 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 47 aside from 56,172 to
56,177 bside from 57,172 to 57,177
interface 47 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 49 aside from 56,177 to
56,183 bside from 57,177 to 57,182
interface 49 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 51 aside from 56,183 to
56,188 bside from 57,182 to 57,187
interface 51 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 53 aside from 56,188 to
56,193 bside from 57,187 to 57,192
interface 53 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 55 aside from 56,193 to
56,198 bside from 57,192 to 57,197
interface 55 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 57 aside from 56,198 to
56,203 bside from 57,197 to 57,202
interface 57 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 59 aside from 56,203 to
56,208 bside from 57,202 to 57,207
interface 59 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 61 aside from 56,208 to
56,216 bside from 57,207 to 57,215
interface 61 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

interface 2 aside from 65,57 to 65,62
bside from 66,56 to 66,61
interface 2 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 4 aside from 65,62 to 65,67
bside from 66,61 to 66,66
interface 4 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 6 aside from 65,67 to 65,72
bside from 66,66 to 66,71
interface 6 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 8 aside from 65,72 to 65,77
bside from 66,71 to 66,76
interface 8 glued kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 10 aside from 65,77 to
65,82 bside from 66,76 to 66,81

```

interface 10 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 12 aside from 65,82 to 65,87 bside from 66,81 to 66,86
 interface 12 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 14 aside from 65,87 to 65,92 bside from 66,86 to 66,91
 interface 14 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 16 aside from 65,92 to 65,97 bside from 66,91 to 66,96
 interface 16 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 18 aside from 65,97 to 65,102 bside from 66,96 to 66,102
 interface 18 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 20 aside from 65,102 to 65,107 bside from 66,102 to 66,107
 interface 20 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 22 aside from 65,107 to 65,112 bside from 66,107 to 66,112
 interface 22 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 24 aside from 65,112 to 65,117 bside from 66,112 to 66,117
 interface 24 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 26 aside from 65,117 to 65,122 bside from 66,117 to 66,122
 interface 26 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 28 aside from 65,122 to 65,127 bside from 66,122 to 66,127
 interface 28 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 30 aside from 65,127 to 65,132 bside from 66,127 to 66,132
 interface 30 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 32 aside from 65,132 to 65,137 bside from 66,132 to 66,137
 interface 32 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 34 aside from 65,137 to 65,142 bside from 66,137 to 66,142
 interface 34 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 36 aside from 65,142 to 65,147 bside from 66,142 to 66,147
 interface 36 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 38 aside from 65,147 to 65,152 bside from 66,147 to 66,152
 interface 38 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

interface 40 aside from 65,152 to 65,157 bside from 66,152 to 66,157
 interface 40 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 42 aside from 65,157 to 65,162 bside from 66,157 to 66,162
 interface 42 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 44 aside from 65,162 to 65,167 bside from 66,162 to 66,167
 interface 44 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 46 aside from 65,167 to 65,172 bside from 66,167 to 66,172
 interface 46 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 48 aside from 65,172 to 65,177 bside from 66,172 to 66,177
 interface 48 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 50 aside from 65,177 to 65,182 bside from 66,177 to 66,183
 interface 50 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 52 aside from 65,182 to 65,187 bside from 66,183 to 66,188
 interface 52 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 54 aside from 65,187 to 65,192 bside from 66,188 to 66,193
 interface 54 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 56 aside from 65,192 to 65,197 bside from 66,193 to 66,198
 interface 56 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 58 aside from 65,197 to 65,202 bside from 66,198 to 66,203
 interface 58 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 60 aside from 65,202 to 65,207 bside from 66,203 to 66,208
 interface 60 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 62 aside from 65,207 to 65,215 bside from 66,208 to 66,216
 interface 62 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

 ; ORT 2
 interface 2001 aside from 76,56 to 86,56 bside from 77,57 to 85,57
 interface 2001 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 2002 aside from 77,215 to 85,215 bside from 76,216 to 86,216
 interface 2002 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

interface 101 aside from 76,56 to 76,61 bside from 77,57 to 77,62
 interface 101 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 103 aside from 76,61 to 76,66 bside from 77,62 to 77,67
 interface 103 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 105 aside from 76,66 to 76,71 bside from 77,67 to 77,72
 interface 105 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 107 aside from 76,71 to 76,76 bside from 77,72 to 77,77
 interface 107 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 109 aside from 76,76 to 76,81 bside from 77,77 to 77,82
 interface 109 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 111 aside from 76,81 to 76,86 bside from 77,82 to 77,87
 interface 111 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 113 aside from 76,86 to 76,91 bside from 77,87 to 77,92
 interface 113 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 115 aside from 76,91 to 76,96 bside from 77,92 to 77,97
 interface 115 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 117 aside from 76,96 to 76,102 bside from 77,97 to 77,102
 interface 117 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 119 aside from 76,102 to 76,107 bside from 77,102 to 77,107
 interface 119 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 121 aside from 76,107 to 76,112 bside from 77,107 to 77,112
 interface 121 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 123 aside from 76,112 to 76,117 bside from 77,112 to 77,117
 interface 123 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 125 aside from 76,117 to 76,122 bside from 77,117 to 77,122
 interface 125 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 127 aside from 76,122 to 76,127 bside from 77,122 to 77,127
 interface 127 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 129 aside from 76,127 to 76,132 bside from 77,127 to 77,132

interface 129 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 131 aside from 76,132 to
 76,137 bside from 77,132 to 77,137
 interface 131 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 133 aside from 76,137 to
 76,142 bside from 77,137 to 77,142
 interface 133 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 135 aside from 76,142 to
 76,147 bside from 77,142 to 77,147
 interface 135 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 137 aside from 76,147 to
 76,152 bside from 77,147 to 77,152
 interface 137 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 139 aside from 76,152 to
 76,157 bside from 77,152 to 77,157
 interface 139 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 141 aside from 76,157 to
 76,162 bside from 77,157 to 77,162
 interface 141 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 143 aside from 76,162 to
 76,167 bside from 77,162 to 77,167
 interface 143 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 145 aside from 76,167 to
 76,172 bside from 77,167 to 77,172
 interface 145 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 147 aside from 76,172 to
 76,177 bside from 77,172 to 77,177
 interface 147 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 149 aside from 76,177 to
 76,183 bside from 77,177 to 77,182
 interface 149 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 151 aside from 76,183 to
 76,188 bside from 77,182 to 77,187
 interface 151 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 153 aside from 76,188 to
 76,193 bside from 77,187 to 77,192
 interface 153 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 155 aside from 76,193 to
 76,198 bside from 77,192 to 77,197
 interface 155 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 157 aside from 76,198 to
 76,203 bside from 77,197 to 77,202
 interface 157 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

interface 159 aside from 76,203 to
 76,208 bside from 77,202 to 77,207
 interface 159 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 161 aside from 76,208 to
 76,216 bside from 77,207 to 77,215
 interface 161 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

 interface 102 aside from 85,57 to
 85,62 bside from 86,56 to 86,61
 interface 102 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 104 aside from 85,62 to
 85,67 bside from 86,61 to 86,66
 interface 104 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 106 aside from 85,67 to
 85,72 bside from 86,66 to 86,71
 interface 106 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 108 aside from 85,72 to
 85,77 bside from 86,71 to 86,76
 interface 108 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 110 aside from 85,77 to
 85,82 bside from 86,76 to 86,81
 interface 110 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 112 aside from 85,82 to
 85,87 bside from 86,81 to 86,86
 interface 112 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 114 aside from 85,87 to
 85,92 bside from 86,86 to 86,91
 interface 114 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 116 aside from 85,92 to
 85,97 bside from 86,91 to 86,96
 interface 116 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 118 aside from 85,97 to
 85,102 bside from 86,96 to 86,102
 interface 118 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 120 aside from 85,102 to
 85,107 bside from 86,102 to 86,107
 interface 120 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 122 aside from 85,107 to
 85,112 bside from 86,107 to 86,112
 interface 122 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 124 aside from 85,112 to
 85,117 bside from 86,112 to 86,117
 interface 124 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

interface 126 aside from 85,117 to
 85,122 bside from 86,117 to 86,122
 interface 126 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 128 aside from 85,122 to
 85,127 bside from 86,122 to 86,127
 interface 128 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 130 aside from 85,127 to
 85,132 bside from 86,127 to 86,132
 interface 130 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 132 aside from 85,132 to
 85,137 bside from 86,132 to 86,137
 interface 132 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 134 aside from 85,137 to
 85,142 bside from 86,137 to 86,142
 interface 134 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 136 aside from 85,142 to
 85,147 bside from 86,142 to 86,147
 interface 136 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 138 aside from 85,147 to
 85,152 bside from 86,147 to 86,152
 interface 138 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 140 aside from 85,152 to
 85,157 bside from 86,152 to 86,157
 interface 140 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 142 aside from 85,157 to
 85,162 bside from 86,157 to 86,162
 interface 142 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 144 aside from 85,162 to
 85,167 bside from 86,162 to 86,167
 interface 144 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 146 aside from 85,167 to
 85,172 bside from 86,167 to 86,172
 interface 146 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 148 aside from 85,172 to
 85,177 bside from 86,172 to 86,177
 interface 148 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 150 aside from 85,177 to
 85,182 bside from 86,177 to 86,182
 interface 150 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 152 aside from 85,182 to
 85,187 bside from 86,182 to 86,187
 interface 152 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 154 aside from 85,187 to
 85,192 bside from 86,187 to 86,192

```

interface 154 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 176 aside from 85,192 to
85,197 bside from 86,193 to 86,198
interface 176 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 158 aside from 85,197 to
85,202 bside from 86,198 to 86,203
interface 158 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 160 aside from 85,202 to
85,207 bside from 86,203 to 86,208
interface 160 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 162 aside from 85,207 to
85,215 bside from 86,208 to 86,216
interface 162 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

;ORT 4

;interface 4001 aside from 117,56 to
126,56 bside from 118,57 to 125,57
;interface 4001 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

;interface 301 aside from 117,56 to
117,216 bside from 118,57 to
118,215
;interface 301 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

;interface 302 aside from 125,57 to
125,215 bside from 126,56 to
126,216
;interface 302 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

;interface 4002 aside from 118,215
to 125,215 bside from 117,216 to
126,216
;interface 4002 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

interface 4001 aside from 117,56 to
126,56 bside from 118,57 to 125,57
interface 4001 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 4002 aside from 118,215 to
125,215 bside from 117,216 to
126,216
interface 4002 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

interface 301 aside from 117,56 to
117,61 bside from 118,57 to 118,62
interface 301 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12

```

```

interface 303 aside from 117,61 to
117,66 bside from 118,62 to 118,67
interface 303 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 305 aside from 117,66 to
117,71 bside from 118,67 to 118,72
interface 305 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 307 aside from 117,71 to
117,76 bside from 118,72 to 118,77
interface 307 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 309 aside from 117,76 to
117,81 bside from 118,77 to 118,82
interface 309 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 311 aside from 117,81 to
117,86 bside from 118,82 to 118,87
interface 311 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 313 aside from 117,86 to
117,91 bside from 118,87 to 118,92
interface 313 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 315 aside from 117,91 to
117,96 bside from 118,92 to 118,97
interface 315 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 317 aside from 117,96 to
117,102 bside from 118,97 to
118,102
interface 317 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 319 aside from 117,102 to
117,107 bside from 118,102 to
118,107
interface 319 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 321 aside from 117,107 to
117,112 bside from 118,107 to
118,112
interface 321 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 323 aside from 117,112 to
117,118 bside from 118,112 to
118,118
interface 323 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 325 aside from 117,117 to
117,122 bside from 118,117 to
118,122
interface 325 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 327 aside from 117,122 to
117,127 bside from 118,122 to
118,127
interface 327 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12

```

```

interface 329 aside from 117,127 to
117,132 bside from 118,127 to
118,132
interface 329 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 331 aside from 117,132 to
117,137 bside from 118,132 to
118,137
interface 331 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 333 aside from 117,137 to
117,142 bside from 118,137 to
118,142
interface 333 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 335 aside from 117,142 to
117,147 bside from 118,142 to
118,147
interface 335 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 337 aside from 117,147 to
117,152 bside from 118,147 to
118,152
interface 337 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 339 aside from 117,152 to
117,157 bside from 118,152 to
118,157
interface 339 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 341 aside from 117,157 to
117,162 bside from 118,157 to
118,162
interface 341 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 343 aside from 117,162 to
117,167 bside from 118,162 to
118,167
interface 343 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 345 aside from 117,167 to
117,172 bside from 118,167 to
118,172
interface 345 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 347 aside from 117,172 to
117,177 bside from 118,172 to
118,177
interface 347 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 349 aside from 117,177 to
117,183 bside from 118,177 to
118,182
interface 349 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12
interface 351 aside from 117,183 to
117,188 bside from 118,182 to
118,187
interface 351 glued
kn=3.599999117E12
ks=3.599999117E12

```

interface 353 aside from 117,188 to 117,193 bside from 118,187 to 118,192
 interface 353 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 355 aside from 117,193 to 117,198 bside from 118,192 to 118,197
 interface 355 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 357 aside from 117,198 to 117,203 bside from 118,197 to 118,202
 interface 357 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 359 aside from 117,203 to 117,208 bside from 118,202 to 118,207
 interface 359 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 361 aside from 117,208 to 117,216 bside from 118,207 to 118,215
 interface 361 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12

 interface 302 aside from 125,57 to 125,62 bside from 126,56 to 126,61
 interface 302 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 304 aside from 125,62 to 125,67 bside from 126,61 to 126,66
 interface 304 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 306 aside from 125,67 to 125,72 bside from 126,66 to 126,71
 interface 306 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 308 aside from 125,72 to 125,77 bside from 126,71 to 126,76
 interface 308 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 310 aside from 125,77 to 125,82 bside from 126,76 to 126,81
 interface 310 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 312 aside from 125,82 to 125,87 bside from 126,81 to 126,86
 interface 312 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 314 aside from 125,87 to 125,92 bside from 126,86 to 126,91
 interface 314 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 316 aside from 125,92 to 125,97 bside from 126,91 to 126,96
 interface 316 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12

interface 318 aside from 125,97 to 125,102 bside from 126,96 to 126,102
 interface 318 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 320 aside from 125,102 to 125,107 bside from 126,102 to 126,107
 interface 320 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 322 aside from 125,107 to 125,112 bside from 126,107 to 126,112
 interface 322 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 324 aside from 125,112 to 125,118 bside from 126,112 to 126,118
 interface 324 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 326 aside from 125,117 to 125,122 bside from 126,117 to 126,122
 interface 326 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 328 aside from 125,122 to 125,127 bside from 126,122 to 126,127
 interface 328 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 330 aside from 125,127 to 125,132 bside from 126,127 to 126,132
 interface 330 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 332 aside from 125,132 to 125,137 bside from 126,132 to 126,137
 interface 332 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 334 aside from 125,137 to 125,142 bside from 126,137 to 126,142
 interface 334 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 336 aside from 125,142 to 125,147 bside from 126,142 to 126,147
 interface 336 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 338 aside from 125,147 to 125,152 bside from 126,147 to 126,152
 interface 338 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 340 aside from 125,152 to 125,157 bside from 126,152 to 126,157
 interface 340 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12

interface 342 aside from 125,157 to 125,162 bside from 126,157 to 126,162
 interface 342 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 344 aside from 125,162 to 125,167 bside from 126,162 to 126,167
 interface 344 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 346 aside from 125,167 to 125,172 bside from 126,167 to 126,172
 interface 346 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 348 aside from 125,172 to 125,177 bside from 126,172 to 126,177
 interface 348 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 350 aside from 125,177 to 125,182 bside from 126,177 to 126,183
 interface 350 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 352 aside from 125,182 to 125,187 bside from 126,183 to 126,188
 interface 352 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 354 aside from 125,187 to 125,192 bside from 126,188 to 126,193
 interface 354 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 356 aside from 125,192 to 125,197 bside from 126,193 to 126,198
 interface 356 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 358 aside from 125,197 to 125,202 bside from 126,198 to 126,203
 interface 358 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 360 aside from 125,202 to 125,207 bside from 126,203 to 126,208
 interface 360 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12
 interface 362 aside from 125,207 to 125,215 bside from 126,208 to 126,216
 interface 362 glued
 kn=3.599999117E12
 ks=3.599999117E12

 ; Ort 3

 interface 3001 aside from 96,56 to 106,56 bside from 97,57 to 105,57

interface 3001 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 3002 aside from 97,215 to
105,215 bside from 96,216 to
106,216
interface 3002 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 201 aside from 96,56 to
96,61 bside from 97,57 to 97,62
interface 201 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 203 aside from 96,61 to
96,66 bside from 97,62 to 97,67
interface 203 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 205 aside from 96,66 to
96,71 bside from 97,67 to 97,72
interface 205 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 207 aside from 96,71 to
96,76 bside from 97,72 to 97,77
interface 207 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 209 aside from 96,76 to
96,81 bside from 97,77 to 97,82
interface 209 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 211 aside from 96,81 to
96,86 bside from 97,82 to 97,87
interface 211 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 213 aside from 96,86 to
96,91 bside from 97,87 to 97,92
interface 213 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 215 aside from 96,91 to
96,96 bside from 97,92 to 97,97
interface 215 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 217 aside from 96,96 to
96,102 bside from 97,97 to 97,102
interface 217 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 219 aside from 96,102 to
96,107 bside from 97,102 to 97,107
interface 219 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 221 aside from 96,107 to
96,112 bside from 97,107 to 97,112
interface 221 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 223 aside from 96,112 to
96,117 bside from 97,112 to 97,117
interface 223 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 225 aside from 96,117 to
96,122 bside from 97,117 to 97,122

interface 225 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 227 aside from 96,122 to
96,127 bside from 97,122 to 97,127
interface 227 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 229 aside from 96,127 to
96,132 bside from 97,127 to 97,132
interface 229 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 231 aside from 96,132 to
96,137 bside from 97,132 to 97,137
interface 231 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 233 aside from 96,137 to
96,142 bside from 97,137 to 97,142
interface 233 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 235 aside from 96,142 to
96,147 bside from 97,142 to 97,147
interface 235 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 237 aside from 96,147 to
96,152 bside from 97,147 to 97,152
interface 237 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 239 aside from 96,152 to
96,157 bside from 97,152 to 97,157
interface 239 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 241 aside from 96,157 to
96,162 bside from 97,157 to 97,162
interface 241 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 243 aside from 96,162 to
96,167 bside from 97,162 to 97,167
interface 243 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 245 aside from 96,167 to
96,172 bside from 97,167 to 97,172
interface 245 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 247 aside from 96,172 to
96,177 bside from 97,172 to 97,177
interface 247 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 249 aside from 96,177 to
96,183 bside from 97,177 to 97,182
interface 249 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 251 aside from 96,183 to
96,188 bside from 97,182 to 97,187
interface 251 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 253 aside from 96,188 to
96,193 bside from 97,187 to 97,192
interface 253 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

interface 255 aside from 96,193 to
96,198 bside from 97,192 to 97,197
interface 255 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 257 aside from 96,198 to
96,203 bside from 97,197 to 97,202
interface 257 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 259 aside from 96,203 to
96,208 bside from 97,202 to 97,207
interface 259 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 261 aside from 96,208 to
96,216 bside from 97,207 to 97,215
interface 261 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 202 aside from 105,57 to
105,62 bside from 106,56 to 106,61
interface 202 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 204 aside from 105,62 to
105,67 bside from 106,61 to 106,66
interface 204 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 206 aside from 105,67 to
105,72 bside from 106,66 to 106,71
interface 206 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 208 aside from 105,72 to
105,77 bside from 106,71 to 106,76
interface 208 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 210 aside from 105,77 to
105,82 bside from 106,76 to 106,81
interface 210 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 212 aside from 105,82 to
105,87 bside from 106,81 to 106,86
interface 212 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 214 aside from 105,87 to
105,92 bside from 106,86 to 106,91
interface 214 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 216 aside from 105,92 to
105,97 bside from 106,91 to 106,96
interface 216 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 218 aside from 105,97 to
105,102 bside from 106,96 to
106,102
interface 218 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 220 aside from 105,102 to
105,107 bside from 106,102 to
106,107
interface 220 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12

interface 222 aside from 105,107 to
 105,112 bside from 106,107 to
 106,112
 interface 222 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 224 aside from 105,112 to
 105,117 bside from 106,112 to
 106,117
 interface 224 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 226 aside from 105,117 to
 105,122 bside from 106,117 to
 106,122
 interface 226 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 228 aside from 105,122 to
 105,127 bside from 106,122 to
 106,127
 interface 228 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 230 aside from 105,127 to
 105,132 bside from 106,127 to
 106,132
 interface 230 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 232 aside from 105,132 to
 105,137 bside from 106,132 to
 106,137
 interface 232 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 234 aside from 105,137 to
 105,142 bside from 106,137 to
 106,142
 interface 234 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 236 aside from 105,142 to
 105,147 bside from 106,142 to
 106,147
 interface 236 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 238 aside from 105,147 to
 105,152 bside from 106,147 to
 106,152
 interface 238 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 240 aside from 105,152 to
 105,157 bside from 106,152 to
 106,157
 interface 240 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 242 aside from 105,157 to
 105,162 bside from 106,157 to
 106,162
 interface 242 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 244 aside from 105,162 to
 105,167 bside from 106,162 to
 106,167
 interface 244 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

interface 246 aside from 105,167 to
 105,172 bside from 106,167 to
 106,172
 interface 246 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 248 aside from 105,172 to
 105,177 bside from 106,172 to
 106,177
 interface 248 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 250 aside from 105,177 to
 105,182 bside from 106,177 to
 106,183
 interface 250 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 252 aside from 105,182 to
 105,187 bside from 106,183 to
 106,188
 interface 252 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 254 aside from 105,187 to
 105,192 bside from 106,188 to
 106,193
 interface 254 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 256 aside from 105,192 to
 105,197 bside from 106,193 to
 106,198
 interface 256 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 258 aside from 105,197 to
 105,202 bside from 106,198 to
 106,203
 interface 258 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 260 aside from 105,202 to
 105,207 bside from 106,203 to
 106,208
 interface 260 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 262 aside from 105,207 to
 105,215 bside from 106,208 to
 106,216
 interface 262 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12

 ; Ort5

 interface 5001 aside from 136,56 to
 146,56 bside from 137,57 to 145,57
 interface 5001 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 5002 aside from 137,215 to
 145,215 bside from 136,216 to
 146,216
 interface 5002 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 401 aside from 136,56 to
 136,61 bside from 137,57 to 137,62

interface 401 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 403 aside from 136,61 to
 136,66 bside from 137,62 to 137,67
 interface 403 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 405 aside from 136,66 to
 136,71 bside from 137,67 to 137,72
 interface 405 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 407 aside from 136,71 to
 136,76 bside from 137,72 to 137,77
 interface 407 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 409 aside from 136,76 to
 136,81 bside from 137,77 to 137,82
 interface 409 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 411 aside from 136,81 to
 136,86 bside from 137,82 to 137,87
 interface 411 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 413 aside from 136,86 to
 136,91 bside from 137,87 to 137,92
 interface 413 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 415 aside from 136,91 to
 136,96 bside from 137,92 to 137,97
 interface 415 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 417 aside from 136,96 to
 136,102 bside from 137,97 to
 137,102
 interface 417 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 419 aside from 136,102 to
 136,107 bside from 137,102 to
 137,107
 interface 419 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 421 aside from 136,107 to
 136,112 bside from 137,107 to
 137,112
 interface 421 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 423 aside from 136,112 to
 136,117 bside from 137,112 to
 137,117
 interface 423 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 425 aside from 136,117 to
 136,122 bside from 137,117 to
 137,122
 interface 425 glued
 kn=3.59999996E12
 ks=3.59999996E12
 interface 427 aside from 136,122 to
 136,127 bside from 137,122 to
 137,127

interface 427 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 429 aside from 136,127 to
136,132 bside from 137,127 to
137,132
interface 429 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 431 aside from 136,132 to
136,137 bside from 137,132 to
137,137
interface 431 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 433 aside from 136,137 to
136,142 bside from 137,137 to
137,142
interface 433 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 435 aside from 136,142 to
136,147 bside from 137,142 to
137,147
interface 435 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 437 aside from 136,147 to
136,152 bside from 137,147 to
137,152
interface 437 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 439 aside from 136,152 to
136,157 bside from 137,152 to
137,157
interface 439 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 441 aside from 136,157 to
136,162 bside from 137,157 to
137,162
interface 441 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 443 aside from 136,162 to
136,167 bside from 137,162 to
137,167
interface 443 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 445 aside from 136,167 to
136,172 bside from 137,167 to
137,172
interface 445 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 447 aside from 136,172 to
136,177 bside from 137,172 to
137,177
interface 447 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 449 aside from 136,177 to
136,183 bside from 137,177 to
137,182
interface 449 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 451 aside from 136,183 to
136,188 bside from 137,182 to
137,187

interface 451 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 453 aside from 136,188 to
136,193 bside from 137,187 to
137,192
interface 453 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 455 aside from 136,193 to
136,198 bside from 137,192 to
137,197
interface 455 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 457 aside from 136,198 to
136,203 bside from 137,197 to
137,202
interface 457 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 459 aside from 136,203 to
136,208 bside from 137,202 to
137,207
interface 459 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 461 aside from 136,208 to
136,216 bside from 137,207 to
137,215
interface 461 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12

interface 402 aside from 145,57 to
145,62 bside from 146,56 to 146,61
interface 402 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 404 aside from 145,62 to
145,67 bside from 146,61 to 146,66
interface 404 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 406 aside from 145,67 to
145,72 bside from 146,66 to 146,71
interface 406 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 408 aside from 145,72 to
145,77 bside from 146,71 to 146,76
interface 408 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 410 aside from 145,77 to
145,82 bside from 146,76 to 146,81
interface 410 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 412 aside from 145,82 to
145,87 bside from 146,81 to 146,86
interface 412 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 414 aside from 145,87 to
145,92 bside from 146,86 to 146,91
interface 414 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 416 aside from 145,92 to
145,97 bside from 146,91 to 146,96

interface 416 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 418 aside from 145,97 to
145,102 bside from 146,96 to
146,102
interface 418 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 420 aside from 145,102 to
145,107 bside from 146,102 to
146,107
interface 420 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 422 aside from 145,107 to
145,112 bside from 146,107 to
146,112
interface 422 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 424 aside from 145,112 to
145,117 bside from 146,112 to
146,117
interface 424 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 426 aside from 145,117 to
145,122 bside from 146,117 to
146,122
interface 426 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 428 aside from 145,122 to
145,127 bside from 146,122 to
146,127
interface 428 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 430 aside from 145,127 to
145,132 bside from 146,127 to
146,132
interface 430 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 432 aside from 145,132 to
145,137 bside from 146,132 to
146,137
interface 432 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 434 aside from 145,137 to
145,142 bside from 146,137 to
146,142
interface 434 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 436 aside from 145,142 to
145,147 bside from 146,142 to
146,147
interface 436 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 438 aside from 145,147 to
145,152 bside from 146,147 to
146,152
interface 438 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 440 aside from 145,152 to
145,157 bside from 146,152 to
146,157

interface 440 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 442 aside from 145,157 to
145,162 bside from 146,157 to
146,162
interface 442 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 444 aside from 145,162 to
145,167 bside from 146,162 to
146,167
interface 444 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 446 aside from 145,167 to
145,172 bside from 146,167 to
146,172
interface 446 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 448 aside from 145,172 to
145,177 bside from 146,172 to
146,177
interface 448 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 450 aside from 145,177 to
145,182 bside from 146,177 to
146,183
interface 450 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 452 aside from 145,182 to
145,187 bside from 146,183 to
146,188
interface 452 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 454 aside from 145,187 to
145,192 bside from 146,188 to
146,193
interface 454 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 456 aside from 145,192 to
145,197 bside from 146,193 to
146,198
interface 456 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 458 aside from 145,197 to
145,202 bside from 146,198 to
146,203
interface 458 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 460 aside from 145,202 to
145,207 bside from 146,203 to
146,208
interface 460 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12
interface 462 aside from 145,207 to
145,215 bside from 146,208 to
146,216
interface 462 glued
kn=3.599999136E12
ks=3.599999136E12

; Ort6

interface 6001 aside from 156,56 to
166,56 bside from 157,57 to 165,57
interface 6001 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 6002 aside from 157,215 to
165,215 bside from 156,216 to
166,216
interface 6002 glued
kn=3.59999996E12
ks=3.59999996E12
interface 501 aside from 156,56 to
156,61 bside from 157,57 to 157,62
interface 501 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 503 aside from 156,61 to
156,66 bside from 157,62 to 157,67
interface 503 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 505 aside from 156,66 to
156,71 bside from 157,67 to 157,72
interface 505 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 507 aside from 156,71 to
156,76 bside from 157,72 to 157,77
interface 507 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 509 aside from 156,76 to
156,81 bside from 157,77 to 157,82
interface 509 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 511 aside from 156,81 to
156,86 bside from 157,82 to 157,87
interface 511 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 513 aside from 156,86 to
156,91 bside from 157,87 to 157,92
interface 513 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 515 aside from 156,91 to
156,96 bside from 157,92 to 157,97
interface 515 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 517 aside from 156,96 to
156,102 bside from 157,97 to
157,102
interface 517 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 519 aside from 156,102 to
156,107 bside from 157,102 to
157,107
interface 519 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 521 aside from 156,107 to
156,112 bside from 157,107 to
157,112
interface 521 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 523 aside from 156,112 to
156,117 bside from 157,112 to
157,117

interface 523 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 525 aside from 156,117 to
156,122 bside from 157,117 to
157,122
interface 525 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 527 aside from 156,122 to
156,127 bside from 157,122 to
157,127
interface 527 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 529 aside from 156,127 to
156,132 bside from 157,127 to
157,132
interface 529 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 531 aside from 156,132 to
156,137 bside from 157,132 to
157,137
interface 531 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 533 aside from 156,137 to
156,142 bside from 157,137 to
157,142
interface 533 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 535 aside from 156,142 to
156,147 bside from 157,142 to
157,147
interface 535 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 537 aside from 156,147 to
156,152 bside from 157,147 to
157,152
interface 537 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 539 aside from 156,152 to
156,157 bside from 157,152 to
157,157
interface 539 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 541 aside from 156,157 to
156,162 bside from 157,157 to
157,162
interface 541 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 543 aside from 156,162 to
156,167 bside from 157,162 to
157,167
interface 543 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 545 aside from 156,167 to
156,172 bside from 157,167 to
157,172
interface 545 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 547 aside from 156,172 to
156,177 bside from 157,172 to
157,177

interface 547 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 549 aside from 156,177 to
 156,183 bside from 157,177 to
 157,182
 interface 549 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 551 aside from 156,183 to
 156,188 bside from 157,182 to
 157,187
 interface 551 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 553 aside from 156,188 to
 156,193 bside from 157,187 to
 157,192
 interface 553 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 555 aside from 156,193 to
 156,198 bside from 157,192 to
 157,197
 interface 555 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 557 aside from 156,198 to
 156,203 bside from 157,197 to
 157,202
 interface 557 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 559 aside from 156,203 to
 156,208 bside from 157,202 to
 157,207
 interface 559 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 561 aside from 156,208 to
 156,216 bside from 157,207 to
 157,215
 interface 561 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12

 interface 502 aside from 165,57 to
 165,62 bside from 166,56 to 166,61
 interface 502 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 504 aside from 165,62 to
 165,67 bside from 166,61 to 166,66
 interface 504 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 506 aside from 165,67 to
 165,72 bside from 166,66 to 166,71
 interface 506 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 508 aside from 165,72 to
 165,77 bside from 166,71 to 166,76
 interface 508 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 510 aside from 165,77 to
 165,82 bside from 166,76 to 166,81
 interface 510 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12

interface 512 aside from 165,82 to
 165,87 bside from 166,81 to 166,86
 interface 512 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 514 aside from 165,87 to
 165,92 bside from 166,86 to 166,91
 interface 514 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 516 aside from 165,92 to
 165,97 bside from 166,91 to 166,96
 interface 516 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 518 aside from 165,97 to
 165,102 bside from 166,96 to
 166,102
 interface 518 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 520 aside from 165,102 to
 165,107 bside from 166,102 to
 166,107
 interface 520 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 522 aside from 165,107 to
 165,112 bside from 166,107 to
 166,112
 interface 522 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 524 aside from 165,112 to
 165,117 bside from 166,112 to
 166,117
 interface 524 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 526 aside from 165,117 to
 165,122 bside from 166,117 to
 166,122
 interface 526 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 528 aside from 165,122 to
 165,127 bside from 166,122 to
 166,127
 interface 528 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 530 aside from 165,127 to
 165,132 bside from 166,127 to
 166,132
 interface 530 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 532 aside from 165,132 to
 165,137 bside from 166,132 to
 166,137
 interface 532 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 534 aside from 165,137 to
 165,142 bside from 166,137 to
 166,142
 interface 534 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 536 aside from 165,142 to
 165,147 bside from 166,142 to
 166,147

interface 536 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 538 aside from 165,147 to
 165,152 bside from 166,147 to
 166,152
 interface 538 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 540 aside from 165,152 to
 165,157 bside from 166,152 to
 166,157
 interface 540 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 542 aside from 165,157 to
 165,162 bside from 166,157 to
 166,162
 interface 542 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 544 aside from 165,162 to
 165,167 bside from 166,162 to
 166,167
 interface 544 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 546 aside from 165,167 to
 165,172 bside from 166,167 to
 166,172
 interface 546 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 548 aside from 165,172 to
 165,177 bside from 166,172 to
 166,177
 interface 548 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 550 aside from 165,177 to
 165,182 bside from 166,177 to
 166,183
 interface 550 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 552 aside from 165,182 to
 165,187 bside from 166,183 to
 166,188
 interface 552 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 554 aside from 165,187 to
 165,192 bside from 166,188 to
 166,193
 interface 554 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 556 aside from 165,192 to
 165,197 bside from 166,193 to
 166,198
 interface 556 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 558 aside from 165,197 to
 165,202 bside from 166,198 to
 166,203
 interface 558 glued
 kn=3.599999156E12
 ks=3.599999156E12
 interface 560 aside from 165,202 to
 165,207 bside from 166,203 to
 166,208

```

interface 560 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
interface 562 aside from 165,207 to
165,215 bside from 166,208 to
166,216
interface 562 glued
kn=3.599999156E12
ks=3.599999156E12
;
*****
*****
; Gruppierung der Abbauscheiben
;
*****
*****

;Ort 1
group o1s1 i=57,64 j=57,61
group o1s2 i=57,64 j=62,66
group o1s3 i=57,64 j=67,71
group o1s4 i=57,64 j=72,76
group o1s5 i=57,64 j=77,81
group o1s6 i=57,64 j=82,86
group o1s7 i=57,64 j=87,91
group o1s8 i=57,64 j=92,96
group o1s9 i=57,64 j=97,101
group o1s10 i=57,64 j=102,106
group o1s11 i=57,64 j=107,111
group o1s12 i=57,64 j=112,116
group o1s13 i=57,64 j=117,121
group o1s14 i=57,64 j=122,126
group o1s15 i=57,64 j=127,131
group o1s16 i=57,64 j=132,136
group o1s17 i=57,64 j=137,141
group o1s18 i=57,64 j=142,146
group o1s19 i=57,64 j=147,151
group o1s20 i=57,64 j=152,156
group o1s21 i=57,64 j=157,161
group o1s22 i=57,64 j=162,166
group o1s23 i=57,64 j=167,171
group o1s24 i=57,64 j=172,176
group o1s25 i=57,64 j=177,181
group o1s26 i=57,64 j=182,186
group o1s27 i=57,64 j=187,191
group o1s28 i=57,64 j=192,196
group o1s29 i=57,64 j=197,201
group o1s30 i=57,64 j=202,206
group o1s31 i=57,64 j=207,214

;Feste 1
group f1s1 i=66,75 j=56,61
group f1s2 i=66,75 j=62,66
group f1s3 i=66,75 j=67,71
group f1s4 i=66,75 j=72,76
group f1s5 i=66,75 j=77,81
group f1s6 i=66,75 j=82,86
group f1s7 i=66,75 j=87,91
group f1s8 i=66,75 j=92,96
group f1s9 i=66,75 j=97,101
group f1s10 i=66,75 j=102,106
group f1s11 i=66,75 j=107,111
group f1s12 i=66,75 j=112,116
group f1s13 i=66,75 j=117,121
group f1s14 i=66,75 j=122,126
group f1s15 i=66,75 j=127,131
group f1s16 i=66,75 j=132,136
group f1s17 i=66,75 j=137,141
group f1s18 i=66,75 j=142,146
group f1s19 i=66,75 j=147,151
group f1s20 i=66,75 j=152,156
group f1s21 i=66,75 j=157,161
group f1s22 i=66,75 j=162,166

```

```

group f1s23 i=66,75 j=167,171
group f1s24 i=66,75 j=172,176
group f1s25 i=66,75 j=177,181
group f1s26 i=66,75 j=182,186
group f1s27 i=66,75 j=187,191
group f1s28 i=66,75 j=192,196
group f1s29 i=66,75 j=197,201
group f1s30 i=66,75 j=202,206
group f1s31 i=66,75 j=207,215

;Ort 2
group o2s1 i=77,84 j=57,61
group o2s2 i=77,84 j=62,66
group o2s3 i=77,84 j=67,71
group o2s4 i=77,84 j=72,76
group o2s5 i=77,84 j=77,81
group o2s6 i=77,84 j=82,86
group o2s7 i=77,84 j=87,91
group o2s8 i=77,84 j=92,96
group o2s9 i=77,84 j=97,101
group o2s10 i=77,84 j=102,106
group o2s11 i=77,84 j=107,111
group o2s12 i=77,84 j=112,116
group o2s13 i=77,84 j=117,121
group o2s14 i=77,84 j=122,126
group o2s15 i=77,84 j=127,131
group o2s16 i=77,84 j=132,136
group o2s17 i=77,84 j=137,141
group o2s18 i=77,84 j=142,146
group o2s19 i=77,84 j=147,151
group o2s20 i=77,84 j=152,156
group o2s21 i=77,84 j=157,161
group o2s22 i=77,84 j=162,166
group o2s23 i=77,84 j=167,171
group o2s24 i=77,84 j=172,176
group o2s25 i=77,84 j=177,181
group o2s26 i=77,84 j=182,186
group o2s27 i=77,84 j=187,191
group o2s28 i=77,84 j=192,196
group o2s29 i=77,84 j=197,201
group o2s30 i=77,84 j=202,206
group o2s31 i=77,84 j=207,214

;Feste 2
group f2s1 i=86,95 j=56,61
group f2s2 i=86,95 j=62,66
group f2s3 i=86,95 j=67,71
group f2s4 i=86,95 j=72,76
group f2s5 i=86,95 j=77,81
group f2s6 i=86,95 j=82,86
group f2s7 i=86,95 j=87,91
group f2s8 i=86,95 j=92,96
group f2s9 i=86,95 j=97,101
group f2s10 i=86,95 j=102,106
group f2s11 i=86,95 j=107,111
group f2s12 i=86,95 j=112,116
group f2s13 i=86,95 j=117,121
group f2s14 i=86,95 j=122,126
group f2s15 i=86,95 j=127,131
group f2s16 i=86,95 j=132,136
group f2s17 i=86,95 j=137,141
group f2s18 i=86,95 j=142,146
group f2s19 i=86,95 j=147,151
group f2s20 i=86,95 j=152,156
group f2s21 i=86,95 j=157,161
group f2s22 i=86,95 j=162,166
group f2s23 i=86,95 j=167,171
group f2s24 i=86,95 j=172,176
group f2s25 i=86,95 j=177,181
group f2s26 i=86,95 j=182,186
group f2s27 i=86,95 j=187,191

```

```

group f2s28 i=86,95 j=192,196
group f2s29 i=86,95 j=197,201
group f2s30 i=86,95 j=202,206
group f2s31 i=86,95 j=207,215

;Ort 3
group o3s1 i=97,104 j=57,61
group o3s2 i=97,104 j=62,66
group o3s3 i=97,104 j=67,71
group o3s4 i=97,104 j=72,76
group o3s5 i=97,104 j=77,81
group o3s6 i=97,104 j=82,86
group o3s7 i=97,104 j=87,91
group o3s8 i=97,104 j=92,96
group o3s9 i=97,104 j=97,101
group o3s10 i=97,104 j=102,106
group o3s11 i=97,104 j=107,111
group o3s12 i=97,104 j=112,116
group o3s13 i=97,104 j=117,121
group o3s14 i=97,104 j=122,126
group o3s15 i=97,104 j=127,131
group o3s16 i=97,104 j=132,136
group o3s17 i=97,104 j=137,141
group o3s18 i=97,104 j=142,146
group o3s19 i=97,104 j=147,151
group o3s20 i=97,104 j=152,156
group o3s21 i=97,104 j=157,161
group o3s22 i=97,104 j=162,166
group o3s23 i=97,104 j=167,171
group o3s24 i=97,104 j=172,176
group o3s25 i=97,104 j=177,181
group o3s26 i=97,104 j=182,186
group o3s27 i=97,104 j=187,191
group o3s28 i=97,104 j=192,196
group o3s29 i=97,104 j=197,201
group o3s30 i=97,104 j=202,206
group o3s31 i=97,104 j=207,214

;Feste 3
group f3s1 i=106,116 j=56,61
group f3s2 i=106,116 j=62,66
group f3s3 i=106,116 j=67,71
group f3s4 i=106,116 j=72,76
group f3s5 i=106,116 j=77,81
group f3s6 i=106,116 j=82,86
group f3s7 i=106,116 j=87,91
group f3s8 i=106,116 j=92,96
group f3s9 i=106,116 j=97,101
group f3s10 i=106,116 j=102,106
group f3s11 i=106,116 j=107,111
group f3s12 i=106,116 j=112,116
group f3s13 i=106,116 j=117,121
group f3s14 i=106,116 j=122,126
group f3s15 i=106,116 j=127,131
group f3s16 i=106,116 j=132,136
group f3s17 i=106,116 j=137,141
group f3s18 i=106,116 j=142,146
group f3s19 i=106,116 j=147,151
group f3s20 i=106,116 j=152,156
group f3s21 i=106,116 j=157,161
group f3s22 i=106,116 j=162,166
group f3s23 i=106,116 j=167,171
group f3s24 i=106,116 j=172,176
group f3s25 i=106,116 j=177,181
group f3s26 i=106,116 j=182,186
group f3s27 i=106,116 j=187,191
group f3s28 i=106,116 j=192,196
group f3s29 i=106,116 j=197,201
group f3s30 i=106,116 j=202,206
group f3s31 i=106,116 j=207,215

```

;Ort 4

```

group o4s1 i=118,124 j=57,61
group o4s2 i=118,124 j=62,66
group o4s3 i=118,124 j=67,71
group o4s4 i=118,124 j=72,76
group o4s5 i=118,124 j=77,81
group o4s6 i=118,124 j=82,86
group o4s7 i=118,124 j=87,91
group o4s8 i=118,124 j=92,96
group o4s9 i=118,124 j=97,101
group o4s10 i=118,124 j=102,106
group o4s11 i=118,124 j=107,111
group o4s12 i=118,124 j=112,116
group o4s13 i=118,124 j=117,121
group o4s14 i=118,124 j=122,126
group o4s15 i=118,124 j=127,131
group o4s16 i=118,124 j=132,136
group o4s17 i=118,124 j=137,141
group o4s18 i=118,124 j=142,146
group o4s19 i=118,124 j=147,151
group o4s20 i=118,124 j=152,156
group o4s21 i=118,124 j=157,161
group o4s22 i=118,124 j=162,166
group o4s23 i=118,124 j=167,171
group o4s24 i=118,124 j=172,176
group o4s25 i=118,124 j=177,181
group o4s26 i=118,124 j=182,186
group o4s27 i=118,124 j=187,191
group o4s28 i=118,124 j=192,196
group o4s29 i=118,124 j=197,201
group o4s30 i=118,124 j=202,206
group o4s31 i=118,124 j=207,214

```

;Feste 4

```

group f4s1 i=126,135 j=56,61
group f4s2 i=126,135 j=62,66
group f4s3 i=126,135 j=67,71
group f4s4 i=126,135 j=72,76
group f4s5 i=126,135 j=77,81
group f4s6 i=126,135 j=82,86
group f4s7 i=126,135 j=87,91
group f4s8 i=126,135 j=92,96
group f4s9 i=126,135 j=97,101
group f4s10 i=126,135 j=102,106
group f4s11 i=126,135 j=107,111
group f4s12 i=126,135 j=112,116
group f4s13 i=126,135 j=117,121
group f4s14 i=126,135 j=122,126
group f4s15 i=126,135 j=127,131
group f4s16 i=126,135 j=132,136
group f4s17 i=126,135 j=137,141
group f4s18 i=126,135 j=142,146
group f4s19 i=126,135 j=147,151
group f4s20 i=126,135 j=152,156
group f4s21 i=126,135 j=157,161
group f4s22 i=126,135 j=162,166
group f4s23 i=126,135 j=167,171
group f4s24 i=126,135 j=172,176
group f4s25 i=126,135 j=177,181
group f4s26 i=126,135 j=182,186
group f4s27 i=126,135 j=187,191
group f4s28 i=126,135 j=192,196
group f4s29 i=126,135 j=197,201
group f4s30 i=126,135 j=202,206
group f4s31 i=126,135 j=207,215

```

;Ort 5

```

group o5s1 i=137,144 j=57,61

```

```

group o5s2 i=137,144 j=62,66
group o5s3 i=137,144 j=67,71
group o5s4 i=137,144 j=72,76
group o5s5 i=137,144 j=77,81
group o5s6 i=137,144 j=82,86
group o5s7 i=137,144 j=87,91
group o5s8 i=137,144 j=92,96
group o5s9 i=137,144 j=97,101
group o5s10 i=137,144 j=102,106
group o5s11 i=137,144 j=107,111
group o5s12 i=137,144 j=112,116
group o5s13 i=137,144 j=117,121
group o5s14 i=137,144 j=122,126
group o5s15 i=137,144 j=127,131
group o5s16 i=137,144 j=132,136
group o5s17 i=137,144 j=137,141
group o5s18 i=137,144 j=142,146
group o5s19 i=137,144 j=147,151
group o5s20 i=137,144 j=152,156
group o5s21 i=137,144 j=157,161
group o5s22 i=137,144 j=162,166
group o5s23 i=137,144 j=167,171
group o5s24 i=137,144 j=172,176
group o5s25 i=137,144 j=177,181
group o5s26 i=137,144 j=182,186
group o5s27 i=137,144 j=187,191
group o5s28 i=137,144 j=192,196
group o5s29 i=137,144 j=197,201
group o5s30 i=137,144 j=202,206
group o5s31 i=137,144 j=207,214

```

;Feste 5

```

group f5s1 i=146,155 j=56,61
group f5s2 i=146,155 j=62,66
group f5s3 i=146,155 j=67,71
group f5s4 i=146,155 j=72,76
group f5s5 i=146,155 j=77,81
group f5s6 i=146,155 j=82,86
group f5s7 i=146,155 j=87,91
group f5s8 i=146,155 j=92,96
group f5s9 i=146,155 j=97,101
group f5s10 i=146,155 j=102,106
group f5s11 i=146,155 j=107,111
group f5s12 i=146,155 j=112,116
group f5s13 i=146,155 j=117,121
group f5s14 i=146,155 j=122,126
group f5s15 i=146,155 j=127,131
group f5s16 i=146,155 j=132,136
group f5s17 i=146,155 j=137,141
group f5s18 i=146,155 j=142,146
group f5s19 i=146,155 j=147,151
group f5s20 i=146,155 j=152,156
group f5s21 i=146,155 j=157,161
group f5s22 i=146,155 j=162,166
group f5s23 i=146,155 j=167,171
group f5s24 i=146,155 j=172,176
group f5s25 i=146,155 j=177,181
group f5s26 i=146,155 j=182,186
group f5s27 i=146,155 j=187,191
group f5s28 i=146,155 j=192,196
group f5s29 i=146,155 j=197,201
group f5s30 i=146,155 j=202,206
group f5s31 i=146,155 j=207,215

```

;Ort 6

```

group o6s1 i=157,164 j=57,61
group o6s2 i=157,164 j=62,66
group o6s3 i=157,164 j=67,71
group o6s4 i=157,164 j=72,76
group o6s5 i=157,164 j=77,81
group o6s6 i=157,164 j=82,86

```

```

group o6s7 i=157,164 j=87,91
group o6s8 i=157,164 j=92,96
group o6s9 i=157,164 j=97,101
group o6s10 i=157,164 j=102,106
group o6s11 i=157,164 j=107,111
group o6s12 i=157,164 j=112,116
group o6s13 i=157,164 j=117,121
group o6s14 i=157,164 j=122,126
group o6s15 i=157,164 j=127,131
group o6s16 i=157,164 j=132,136
group o6s17 i=157,164 j=137,141
group o6s18 i=157,164 j=142,146
group o6s19 i=157,164 j=147,151
group o6s20 i=157,164 j=152,156
group o6s21 i=157,164 j=157,161
group o6s22 i=157,164 j=162,166
group o6s23 i=157,164 j=167,171
group o6s24 i=157,164 j=172,176
group o6s25 i=157,164 j=177,181
group o6s26 i=157,164 j=182,186
group o6s27 i=157,164 j=187,191
group o6s28 i=157,164 j=192,196
group o6s29 i=157,164 j=197,201
group o6s30 i=157,164 j=202,206
group o6s31 i=157,164 j=207,214

```

solve

save po_pi_8_el.sav

;Materialparameter der Festen

```

mod m notnull
prop density=den bulk=bu1
shear=sh1 cohesion=coh1 &
friction=fric1 tension=ten1 notnull

```

;solve

```

ini xdis=0
ini ydis=0
save po_pi_8_mo.sav

```

```

set small
set update 1
set ncw 1
set step 100000

```

;

```

#####
#####
#

```

;

;Scheibe 1

;

```

m n group o1s1 notnull
m n group o2s1 notnull
m n group o3s1 notnull

```

```
m n group o4s1 notnull
m n group o5s1 notnull
m n group o6s1 notnull
```

```
m dy group o1s1
m dy group o2s1
m dy group o3s1
m dy group o4s1
m dy group o5s1
m dy group o6s1
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o1s1
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o2s1
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o3s1
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o4s1
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o5s1
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o6s1
```

```
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f1s1
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f2s1
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f3s1
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f4s1
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f5s1
```

```
interface 1 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 2 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 101 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 102 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 201 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
```

```
interface 202 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 301 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 302 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 401 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 402 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 501 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 502 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
solve
save 8_sch_1.sav
```

```
;
*****
*****
*
```

```
; Scheibe 2
```

```
m n group o1s2 notnull
m n group o2s2 notnull
m n group o3s2 notnull
m n group o4s2 notnull
m n group o5s2 notnull
m n group o6s2 notnull
```

```
m dy group o1s2
m dy group o2s2
m dy group o3s2
m dy group o4s2
m dy group o5s2
m dy group o6s2
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o1s2
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o2s2
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o3s2
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o4s2
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o5s2
pro den=den2 she=sh2 bul=bu2
fric=fric2 cptable 3 group o6s2
```

```
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f1s2
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f2s2
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f3s2
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f4s2
prop den=den4 bul=bu4 she=sh4
coh=coh4 &
friction=fric4 tension=ten4 notnull
group f5s2
```

```
interface 3 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 4 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 103 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 104 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 203 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 204 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 303 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 304 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 403 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 404 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 503 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
interface 504 ungl kn=kn_1 ks=ks_1
coh=co_1 fric=fri_1
solve
save 8_sch_2.sav
```

```
;
```

7.2 Materialparameter

```

;
#####
#####
; Fish Routine fuer Bulk and Shear
Modul
;   Magnesit & Versatz
;
#####
#####
;
; Magnesit
; #####
def calculation1
  sh1 = (e_1)/(2*(1+p_1))
  bu1 = (e_1)/(3*(1-2*p_1))
  coh1=8.4e6
  ten1=0.3e6
  fric1=38
  den=3000
end
; Magnesit: E-Modul und
Poissionkoeffizient
;
set e_1=18e9 p_1=0.15
calculation1
;
; Magnesit - Feste (weich)
; #####
def calculation4
  sh4 = (e_4)/(2*(1+p_4))
  bu4 = (e_4)/(3*(1-2*p_4))
  coh4=8.4e6
  ten4=0.3e6
  fric4=38
  den4=3000
end
; Magnesit: E-Modul und
Poissionkoeffizient
;
set e_4=3e9 p_4=0.3
calculation4
;
;
; Versatz
; #####
def calculation2
  sh2 = (e_2)/(2*(1+p_2))
  bu2 = (e_2)/(3*(1-2*p_2))
  coh2=0
  ten2=0
  fric2=30
  den2=1800
  kn_1=3.6e12
  ks_1=3.6e12
  fri_1=20
  co_1=0
end
;
; Versatz: E-Modul und
Poissionkoeffizient
set e_3=1e5 p_3=0.3
calculation3
;
; Kompaktionsverhalten - Versatz
tab 3 0 1e4 0.02 2e5 .04 1e6 .06
2.4e6 .08 4.6e6
tab 3 .1 8e6 .12 12e6 .14 18.5e6
#####
#####
;

```

7.3 Randbedingungen

```

;
; Berechnungen für den In Situ
Spannungszustand
;
; Magnesit
def calculation10
  ob = -1*dichte*erdb*(teufe-ho)
  sob = -1*dichte*erdb*(teufe-
ho)*2
;
sub = -
1*dichte*erdb*(teufe+hu)*2
ds = 1*(sub-sob)
end
;
; Dimensionen, E-Modul und
Poissionkoeffizient
;
; Magnesit
set teufe=800
set dichte=3000
set erdb=9.81
set ho=375
set hu=205
calculation10
;

```