

Dimensionierung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich

Von der

**Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover**

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Dirk Zapf

geboren am 12.01.1976, in Hannover

2014

Die vorliegende Arbeit wurde als Dissertation im Rahmen des Promotionsverfahrens an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover eingereicht und angenommen.

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad

Referent:

Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

Korreferenten:

Prof. Dr.-Ing. Reinhard B. Rokahr

Prof. Dr.-Ing. Stefan Heusermann

Tag der Promotion:

30.07.2014

Kurzfassung

In den letzten Jahren hat sich Zahl der neu gesolten und geplanten Kavernen erheblich vergrößert, so dass eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Salzlagerstätten angestrebt wird. In diesem Zusammenhang bekommt die Frage nach dem mindestens einzuhaltenden Abstand einer Gasspeicherkaverne von den Salzstockgrenzen eine zentrale Bedeutung. Zwar wurden auch in den vergangenen Jahren vereinzelt Kavernen im Bereich der Salzstockgrenzen angelegt, weltweit wurde bisher jedoch kein Konzept veröffentlicht, auf dessen Basis eine Dimensionierung einer Kaverne im Salzstockrandbereich erfolgen kann.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erstellung eines Dimensionierungskonzeptes für Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich. Bei dieser Dimensionierung muss nachgewiesen werden, dass Kavernen in dieser Lokation standsicher und gasdicht betrieben werden können. Die Analyse der Entstehung von Salzlagerstätten und die Erkundungsmöglichkeiten eines Salzstockes stellt eine wichtige Grundlage für die Erstellung eines Modells und Bewertung einer Kaverne im Randbereich dar.

Es wird ein numerisches Berechnungsmodell erstellt, welches die wesentlichen und nicht zu vernachlässigenden Einflüsse im Salzstockrandbereich berücksichtigt. Des Weiteren werden verschiedene zeitabhängige, thermomechanisch gekoppelte Berechnungen durchgeführt und die Beeinflussung des Spannungszustandes in der Umgebung der betrachteten Gasspeicherkaverne in Abhängigkeit verschiedener Modellvariationen analysiert.

Für eine Bewertung der Standsicherheit der Kaverne im Randbereich des Salzstockes spielt die Annahme des primären Spannungszustandes eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund werden die durchgeführten numerischen Untersuchungen für den Ausgangsspannungszustand als Grundlage für die weiteren Simulationsberechnungen herangezogen.

Anhand der Berechnungsergebnisse werden die Auswirkungen der Variationsberechnungen auf den die Kaverne umgebenden Spannungszustand diskutiert und bewertet. Hierbei werden die Dimensionierungsparameter des maximalen und des minimalen Kaverneninnendruckes sowie die Betriebsraten der Kaverne untersucht. Eine wichtige Rolle für die Bewertung des Spannungszustandes der Kaverne im Salzstockrandbereich spielt der Ausnutzungsgrad des Steinsalzes.

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist ein Dimensionierungskonzept, welches neben der Empfehlung für die Wahl eines geeigneten Berechnungsmodells der Randkaverne den Dimensionierungsparameter b_R als mindestens zu berücksichtigenden Abstand zwischen der Kaverne und dem Salzstockrand beinhaltet. Mit Hilfe dieses Dimensionierungskonzeptes ist gewährleistet, dass eine Gasspeicherkaverne im Salzstockrandbereich über die gesamte Lebensdauer gasdicht und standsicher betrieben werden kann.

Schlagworte: Gaskavernen, Salzstockrand, Dimensionierungskonzept

Abstract

In recent years, the number of new and planned caverns has greatly increased, so that utilization of the existing salt deposits is sought. In this context, the question of the minimum allowable distance between the gas storage cavern and the salt dome boundaries gets a central role. Although a few number of caverns were built in the salt dome boundaries in recent years, however, no concept was previously published worldwide, based on which can be a dimensioning of a cavern in the salt dome edge area.

The present thesis deals with creating a concept for rock mechanical dimensioning of gas storage caverns in the salt dome edge area. With this dimensioning must be demonstrated that caverns can be operated gas tight and stable in such a location. The analysis of the formation of salt deposits and possibilities of exploration of a salt dome represents an important basis for the model buildup and evaluation of a cavern in the salt dome edge region.

It is a numerical model created that takes into account the essential and non-negligible influences in the salt dome edge area. Furthermore are going to be carried out time-dependent, thermo-mechanical coupled numerical calculations. The influences of these different model variations are going to be analyzed regarding the cavern surrounding stress state.

For an evaluation of the stability of a gas cavern in the edge region of the salt dome, the assumption of the primary stress state in the underground plays a crucial role. For this reason, the numerical investigations carried out for the initial stress state as a basis for further simulations are used.

Based on the calculation results, the effects of varying the parameters on the cavern surrounding stress state are going to be discussed and assessed. Here, the dimensioning parameter maximum internal pressure, minimum internal pressure as well as the operating rates of the cavern is going to be examined. An important role for the evaluation of the stress state of the cavern in the salt dome edge region plays the stress intensity index of the rock salt.

The result of the present thesis is a dimensioning concept, which includes beneath the recommendation for the selection of a suitable calculation model of a cavern in the border region of a salt dome the dimensioning parameter b_R as a minimum to be considered distance between the cavern wall and the salt dome boundary. This dimensioning concept ensures that a gas storage cavern in the salt dome edge region can be operated gas tight and stable over the entire life.

Keywords: Gas Caverns, Salt Dome Edge, Dimensioning Concept

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	SALZSTOCKENTSTEHUNG	5
2.1	ENTSTEHUNG EINER SALZLAGERSTÄTTE / BARRENTHEORIE	5
2.2	HALOKINESE.....	7
2.3	BEISPIEL FÜR EINEN SALZSTOCKAUFBAU.....	10
3	SALZSTOCKERKUNDUNG UND STAND DER EMPFEHLUNGEN ZUM ABSTAND ZWISCHEN SALZSTOCKRAND UND KAVERNENWAND	14
3.1	EINFÜHRUNG.....	14
3.2	ERKUNDUNGSMÖGLICHKEITEN.....	14
3.3	BEWERTUNG UND VERGLEICH DER ERKUNDUNGSMÖGLICHKEITEN IN HINBLICK AUF DIE LAGE DES SALZSTOCKRANDES	21
3.4	STAND DER EMPFEHLUNGEN FÜR DEN ABSTAND ZWISCHEN KAVERNENWAND UND SALZSTOCKRAND.....	25
4	KRITERIEN ZUR DIMENSIONIERUNG VON KAVERNEN FÜR DIE SPEICHERUNG VON ERDGAS.....	26
4.1	STOFFGESETZE	26
4.2	ZULÄSSIGER MAXIMALER KAVERNENINNENDRUCK	31
4.3	ZULÄSSIGER MINIMALER KAVERNENINNENDRUCK	35
4.4	MAXIMALE VOLUMEN- BZW. DRUCKÄNDERUNGSRATEN	37
5	GEBIRGSMECHANISCHE BERECHNUNG EINER GASKAVERNE.....	38
5.1	EINFÜHRUNG.....	38
5.2	THEORETISCHES GEBIRGSMODELL	38
5.3	STOFFGESETZPARAMETER UND THERMISCHE PARAMETER.....	42
5.4	BEMESSUNGSLASTFÄLLE UND BERECHNUNGSERGEBNISSE	45
6	GEBIRGSMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN FÜR GASSPEICHERKAVERNEN IM SALZSTOCKRANDBEREICH	57
6.1	EINFÜHRUNG.....	57
6.2	AUFBAU DES BERECHNUNGSMODELLS	57
6.3	BERECHNUNGEN ZU MODELL A	59
6.4	BERECHNUNGEN ZU MODELL B	70
6.5	BERECHNUNGEN ZU MODELL C	79
6.6	BERECHNUNGEN ZU MODELL D	90
6.7	BERECHNUNGEN ZU MODELL E	91

6.8	BERECHNUNGEN ZU MODELL F.....	104
6.9	BERECHNUNGEN ZU DEN MODELLEN G UND H.....	113
6.10	SONDERLASTFALL $P_1 = 0$ MPA.....	124
7	BEWERTUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE.....	127
7.1	MAXIMALDRUCK.....	127
7.2	BETRIEBSRATEN.....	127
7.3	MINIMALDRUCK.....	128
8	ZUSAMMENFASSUNG.....	131
	LITERATURVERZEICHNIS.....	134
	BEZEICHNUNGEN.....	140

1 Einleitung

In Deutschland werden seit über 40 Jahren Salzkavernen zur Speicherung von flüssigen und gasförmigen Energieträgern wie Erdgas und Rohöl genutzt. Im Zuge des gestiegenen Bedarfs an fossilen Brennstoffen, der beginnenden Liberalisierung des Gasmarktes im Jahre 1998 und der sich ändernden Nutzungsart bezüglich des Betriebs der Kavernenspeicheranlagen wurden in den letzten Jahren umfangreich neue Kavernen an verschiedenen Standorten in Deutschland geplant und gesolt.

Allein in Etzel bei Wilhelmshaven, in Jemgum bei Leer oder in Empelde bei Hannover werden zurzeit über 100 neue Kavernen fertig gestellt. Sie dienen überwiegend der Speicherung von Erdgas, welches beispielsweise über Pipelines aus Norwegen, die Ostseepipeline aus Russland und das geplante Erdgasterminal in Wilhelmshaven nach Deutschland importiert wird.

Die ingenieurtechnische Dimensionierung einer Salzkaverne zum Gasspeicherbetrieb beinhaltet seit Jahrzehnten die gebirgsmechanische Festlegung des maximalen und minimalen Kaverneninnendruckes sowie den Nachweis der Standfestigkeit der Kaverne unter atmosphärischem Innendruck. Dieser ist als Sonderlastfall anzusehen, da während des normalen Betriebes eine Innendruckabsenkung auf $p_i = 0$ bar nicht vorgesehen ist.

Innerhalb der letzten Jahre haben sich die Anforderungen an den Betrieb einer Gasspeicherkaverne geändert. Der bisher saisonal geprägte Operationszyklus der Kavernen war charakterisiert durch eine jahreszeitlich bedingte Auslagerung des gespeicherten Erdgases in den Wintermonaten und eine Befüllung mit Gas in den Sommermonaten, in denen weniger Gas benötigt wurde. Die neue Nutzungsart der Gasspeicherkavernen beinhaltet seit einigen Jahren die Anforderung, zu jedem Zeitpunkt im Jahr eine möglichst hohe Ausspeicher- bzw. Einfüllrate für das Speichergut zu erzielen, um flexibel auf die jeweilige Gasmarktsituation reagieren zu können.

Aus gebirgsmechanischer Sicht bedeutet dies, dass für jedes Kavernenbauwerk individuell eine zulässige Druck- oder Volumenrate in den Empfehlungen zu erarbeiten ist. Da beispielsweise hohe Druckentnahmeraten zu einer Abkühlung des Erdgases führen, müssen die Temperaturänderungen in den numerischen Berechnungen berücksichtigt und deren Auswirkungen auf die Spannungszustände im Kavernenwandbereich untersucht werden.

Es ist bekannt, dass zu starke Temperaturänderungen an der Salzwandung zu thermisch induzierten Spannungen führen, die bis in Zugspannungsbereiche reichen und bedingt durch eine geringe Zugfestigkeit des Steinsalzes zu thermisch induzierten makroskopischen Rissen führen können, in die letztendlich Erdgas mit einem hohen Druck hineinschießt. Aus die-

sem Grund sind nach heutigem Stand der Technik mögliche Druckänderungsraten bzw. Volumenströme vor allem während der Entnahmephase so zu begrenzen, dass diese nicht zu Zugspannungen in der Kavernenwand führen /1/ /2/.

Für den Sonderlastfall des Ausblasens der Kaverne auf atmosphärischen Innendruck gilt es, den Nachweis zu erbringen, dass sich die auftretenden Abschalungen bis zur Aufbringung eines Stützdruckes auf einen begrenzten Teil hinter der Kavernenwandung beschränken. Des Weiteren ist nachzuweisen, dass die auftretenden Abkühlungsprozesse während der Abkühlungsphase auf einen bestimmten Teil der Kaverne beschränkt bleiben und sich nach dem Erreichen des atmosphärischen Druckes schnell aufgrund des Energieflusses aus dem die Kaverne umgebenden Salzgestein erwärmen. Insgesamt muss bei diesem Nachweis gewährleistet sein, dass eine ausreichende Schwebenmächtigkeit vorhanden ist, um eine Schädigung im Kavernendach zu verhindern, und dass eine ausreichende rechnerische Pfeilermächtigkeit vorliegt, um eine Konnektivität zu einer Nachbarkaverne zu verhindern.

Das Ziel dieses seit Jahren erfolgreich angewendeten Dimensionierungskonzeptes ist die Errichtung und der Betrieb einer gebirgsmechanisch standsicheren und gasdichten Speicherkaverne.

Bezüglich der Lokation der anzulegenden Kaverne war man bisher bestrebt, diese möglichst im Zentrum eines Salzstockes anzulegen, um zu gewährleisten, dass genügend Salz in alle Richtungen um den Hohlraum herum vorhanden ist. Da die Anzahl der Kavernen jedoch in den letzten Jahren stark angestiegen ist, bekommt die Optimierung des noch vorhandenen Platzes in den Salzstöcken zur Errichtung neuer Speicherbauwerke insbesondere im Salzstockrandbereich eine zunehmende Bedeutung.

Im Dimensionierungskonzept zur standsicheren Errichtung von Salzkavernen wird empfohlen, einen Sicherheitsabstand zwischen den Kavernen einzuhalten. Beispielsweise sollte der sogenannte Pfeilerkernbereich für eine Feldkaverne, das heißt der Bereich, in dem die Beanspruchung des Salzgesteins während der gesamten Betriebsgeschichte unterhalb der Dauerfestigkeit des Materials liegt, mindestens eine horizontale Ausdehnung des 1,8- bis 2,2-fachen durchschnittlichen Durchmessers der zu betrachtenden Kavernen aufweisen.

In der bisherigen Praxis der Kavernendimensionierung wurde bislang kein Konzept veröffentlicht, wie eine Gasspeicherkaverne im Salzstockrandbereich zu dimensionieren ist und welchen Abstand ein solches Bauwerk von der Salzstockbegrenzung aufweisen sollte.

Aus geophysikalischer Sicht besteht die Herausforderung bei der Erstellung geologischer Modelle des Salzstockes darin, dessen Begrenzung messtechnisch hinreichend genau zu erfassen. Die Möglichkeiten zur Erkundung eines Salzstockes haben sich zwar in den letzten

Jahren erheblich verbessert /3/, jedoch verbleibt ohne direkten Aufschluss der Salzstockflanke, etwa durch Bohrungen in diesem Gebirgsbereich, eine große Unsicherheit in der Interpretation der Untersuchungsergebnisse und damit in der Einschätzung des tatsächlichen Salzstockaufbaus. Während beispielsweise aus den seismischen Reflexionen und besonders in Kombination mit den Aufschlussbohrungen die Lage des Salztops relativ gut eingeschätzt werden kann, vergrößert sich die Abweichung zwischen seismischer Messung und den realen Gegebenheiten, je steiler die Salzstockflanke ist.

Zur Frage, wie groß der Abstand zwischen einer Speicherkaverne und dem Salzstockrand mindestens sein sollte, existiert bisher auch in den Bergverordnungen keine Empfehlung. In der allgemeinen Bergverordnung ABVO aus dem Jahre 1966 /4/ wird lediglich ein empirischer Wert für den Abstand zwischen Salzbergwerken und Salzstockbegrenzungen angegeben. In dieser Verordnung wird beschrieben, dass mindestens 150 m gegen den Salzspiegel, die Salzstockflanke oder die Salzbasis eingehalten werden sollte, wenn deren Verläufe aus geologischer Sicht eindeutig bestimmbar sind. Sollten diese eine Unschärfe aufweisen, so wird empfohlen, diesen Wert auf mindestens 200 m zu erhöhen. Der Ursprung dieser Werte ist nach heutigem Stand nicht mehr nachzuvollziehen. In den Verordnungen aus den Jahren 1911 /5/ und 1945 /6/ sind diese Empfehlungen nicht aufgeführt. Sie entstanden vermutlich aus der Absicht, mögliche Wassereintritte in die Salzbergwerke zu vermeiden.

Während für die Erstellung von Bergwerken die oben erwähnte ABVO gültig ist, enthält die Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen (BVOT) /7/ Regelungen zur Errichtung von Speicherkavernen. §40 der BVOT fordert allerdings lediglich, dass „Kavernen standsicher anzulegen sind“ und dass „gegen die das Salzgebirge begrenzenden Schichten und zwischen den einzelnen Kavernen ausreichende Salzfesten stehen bleiben müssen“. Die in der ABVO angegebenen Werte zum Abstand zwischen Bergwerk und Salzstockgrenze werden in der BVOT nicht aufgeführt. Die BVOT hat damit nur einen qualitativen Empfehlungscharakter.

Allgemeine gebirgsmechanische Untersuchungen zu Kavernen im Salzstockrandbereich sind beispielsweise in den Veröffentlichungen von Gehle et al. 1983 /8/ und Vining et al. 2013 /9/ durchgeführt worden. In den Berechnungen wurden Kavernen zur Solegewinnung im Randbereich modelliert und unter Berücksichtigung verschiedener gebirgsmechanischer Aspekte wie zum Beispiel einer Abstandsvariation des Salzstockrandes und verschiedener Berechnungsparameter für das Salz und das Nebengebirge analysiert. In diesen Arbeiten wurde jedoch auf umfassende Untersuchungen zur Gasspeicherung in Kavernen verzichtet. Die in den numerischen Berechnungen nicht mehr zu vernachlässigenden thermodynamischen

Prozesse wurden ebenfalls nicht in Untersuchungen berücksichtigt. Des Weiteren wurde keine abschließende Bewertung der Berechnungsergebnisse bezüglich der Entfernung zwischen Kaverne und Salzstockrand gegeben.

Um eine gebirgsmechanische Untersuchung zur Errichtung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich durchzuführen, muss ein neues numerisches Berechnungsmodell erstellt werden, welches aufbauend auf den bisher verwendeten Modellen wesentliche nicht zu vernachlässigende Einflüsse berücksichtigt, die in dieser Arbeit dargestellt werden.

Zentraler Bestandteil der Arbeit ist es, verschiedene zeitabhängige, thermomechanische Modellberechnungen durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, wie der Spannungszustand in der Umgebung der Kaverne im Salzstockrandbereich von verschiedenen Parametern beeinflusst wird. Die beschriebenen Dimensionierungsparameter Maximaldruck, Minimaldruck und Volumenströme werden anhand von Modellvarianten überprüft und hinsichtlich des Abstandes zwischen der Kavernenwand und dem Salzstockrand diskutiert.

Auf der Grundlage der Ergebnisse unter Berücksichtigung thermomechanisch gekoppelter Modellberechnungen wird ein Konzept zur Dimensionierung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich erstellt.

2 Salzstockentstehung

2.1 Entstehung einer Salzlagerstätte / Barrentheorie

Salzlagerstätten haben sich bei der Verdunstung von Meerwasser gebildet. Da jedoch sehr viel Meerwasser zur Ablagerung von heute vorzufindenden mehrere 100 m dicken Salzschiechten nötig war, ist der Prozess der Bildung von Salzlagerstätten kompliziert und bedurfte einer besonderen geologischen Konstellation.

Nach der sogenannten Barren- oder Schwellentheorie nach dem Geologen Carl Christian Ochsenius 1877 /10/ entstanden die heutigen Salzlagerstätten durch große Binnenmeere. Bild 2.1 stellt die verschiedenen Entstehungsphasen der Salzlagerstätten dar.

Die Binnenmeere waren mit den Ozeanen nur über schmale Meerengen verbunden, in denen sich wiederum durch tektonische Vorgänge Schwellen oder Barren ausbildeten (Bild 2.1a). Damit salzhaltiges Wasser aus dem offenen Meer nachfließen konnte, aber nicht wieder aus dem Binnenmeer zurück, musste der Barren als Begrenzung der beiden Meere eine entsprechende Höhe aufweisen. Somit konnte dann von den offenen Ozeanen im Laufe der Zeit zwar nur in einem begrenzten Umfang frisches und salzhaltiges Meerwasser zufließen, aber keines mehr abfließen. Das hatte zur Folge, dass sich die Mineralstoffkonzentration in den Binnenmeeren erhöhte.

Die Mineralien lösten sich, kristallisierten aus und lagerten sich letztendlich auf dem Meeresboden zunächst als Kalziumcarbonat CaCO_3 und Kalziumsulfat CaSO_4 ab (Bild 2.1b). Dieser Vorgang wiederholte sich nach der Barrentheorie über mehrere Millionen Jahre, so dass schließlich auch Natriumchlorid NaCl als Steinsalzschiecht mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern bis Kilometern entstand (Bild 2.1c).

In der weiteren geologischen Geschichte wurden die Salzschiechten nach der Verdunstung des Meerwassers mit Gesteinspartikeln überdeckt. Durch weitere tektonische Vorgänge konnte sich der Wasserzufluss aus den Ozeanen schließen, so dass keine weitere Salzablagerung mehr möglich war. Infolgedessen wurden die aus dem Meerwasser abgelagerten Schichten windbedingt durch Staubpartikel bedeckt (Bild 2.1d).

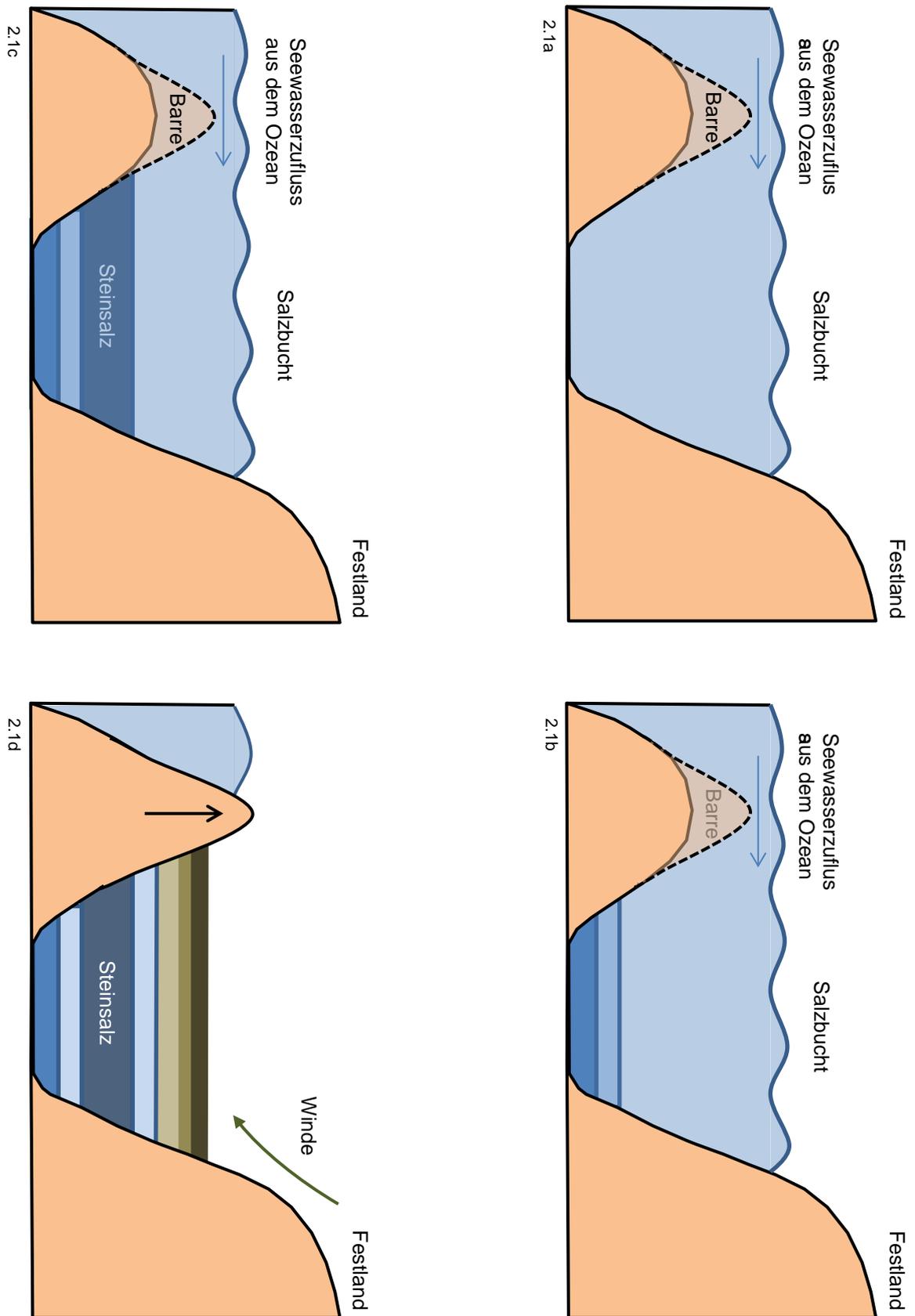


Bild 2.1 Barrentheorie nach Ochsenius /10/

2.2 Halokinese

Ist die Ablagerung der Deckschichten nach der Entstehung der Salzlagerstätten weitestgehend abgeschlossen, kann aufgrund der Dichteinversion des Steinsalzes gegenüber den überlagernden Deckgebirgsschichten ein halokinetischer Prozess in Gang gesetzt werden. Eine weitere Voraussetzung wird bei Reuther /11/ mit einer geringen Fließfestigkeit der Ausgangslage beschrieben, von der aus das Salzgestein nach oben gerichtet fließen kann. Dieser Vorgang der Bildung von Salzstöcken wird auch Diapirismus genannt.

Halbouty /12/ beschreibt, dass historisch betrachtet die ersten Beobachtungen von Diapirismus von Steinsalz 1871 von Posebny /13/ in Rumänien getätigt wurden. Jahrelang wurden des Weiteren Erklärungsversuche zum Salzstockaufstieg insbesondere in den USA geliefert. Diese reichten von der Theorie von Thomassy /14/, dass Salzstöcke vulkanischen Ursprungs seien, bis hin zu dem Erklärungsversuch von Norton /15/, der die Entstehung von Salzstöcken auf die Ablagerung von geschmolzenem Gestein zurückführt. Europäische Wissenschaftler haben schließlich zwei prinzipielle Gedanken zu den Gründen, die zum Salzstockaufstieg führen, formuliert. Zum einen führen tektonische Gründe zur aktiven Salzstrukturausbildung, bedingt beispielsweise durch Seitendrücke oder tangentielle Beanspruchung des Gesteins und zum anderen die bereits erwähnten Dichteunterschiede bei der Bildung der passiven Salzstrukturen. In Bild 2.2 ist die Entwicklung aktiver, passiver und reaktiver Salzstrukturen dargestellt. Letztere stellen Salzschichten dar, die in ihrer Umgebung nicht die Bedingungen für einen aktiven oder passiven Salzstockaufstieg vorfinden.

Die passiven halokinetischen Salzbewegungen benötigen nach Trusheim /16/ /17/ keine von außen zugeführte Energie. In einer frühen Phase beginnt sich ein sogenanntes Salzkissen auszubilden, aus dem dann im weiteren Verlauf der Halokinese ein Diapir entstehen kann. Die Salzstöcke Gorleben und Asse in Norddeutschland sowie die Salzdome entlang der Golfküste der USA in Texas und Louisiana sind typische Beispiele für passive Salzstrukturen, deren Aufstieg durch den Dichteunterschied des Steinsalzes zu den Deckgebirgsschichten bedingt ist.

Als halotektonische Strukturen bezeichnet man diejenigen Strukturen, die sowohl durch Halokinese als auch durch Tektonik beeinflusst wurden. In der Praxis zeigt sich, dass bezogen auf Norddeutschland einige Salzstrukturen nicht eindeutig der Halokinese oder der Tektonik als Ursache zugeordnet werden können, da die typischen Formen von halokinetischen Abläufen auch bei tektonisch verursachten Salzaufstiegen beobachtet werden können.

Entwicklungsgeschichtlich gesehen hat die Abwanderung des Salzes Absenkungen der Deckschichten zur Folge. Trusheim bezeichnet diese Gebiete als primäre und sekundäre

Randsenken. Hierbei entsteht die primäre Randsenke durch Bildung eines Salzkissens, während die Ausbildung eines Diapirs eine sekundäre Randsenke, welche in ihrer Ausprägung in der Regel stärker ist als eine primäre, zur Folge hat.

Bild 2.3 zeigt das Entwicklungsschema des Aufstiegs eines norddeutschen Salzstocks und seiner Randsenken.

Des Weiteren bleibt festzuhalten, dass die Zeiträume der verschiedenen Entwicklungsstadien des Salzstockaufstiegs unterschiedlich lang andauern. So schätzt man die Zeitdauer des Salzkissenstadiums auf bis zu 200 Mio. Jahre, hingegen wird das Diapistadium eher mit bis 50 Mio. Jahren angenommen, stärker tektonisch beansprucht sogar eher noch weniger. Die Salzstockaufstiegsgeschwindigkeit wird dabei mit etwa 0,1-0,5 mm/Jahr angenommen. Sind die Salzstockbewegungen abgeschlossen, sinkt diese auf Werte von einigen Hundertstel Millimetern oder weniger ab. Im Spätstadium der Salzstockentwicklung ist die Dichteanomalie zwischen dem Steinsalz und dem überlagernden Gebirge weitestgehend abgebaut.

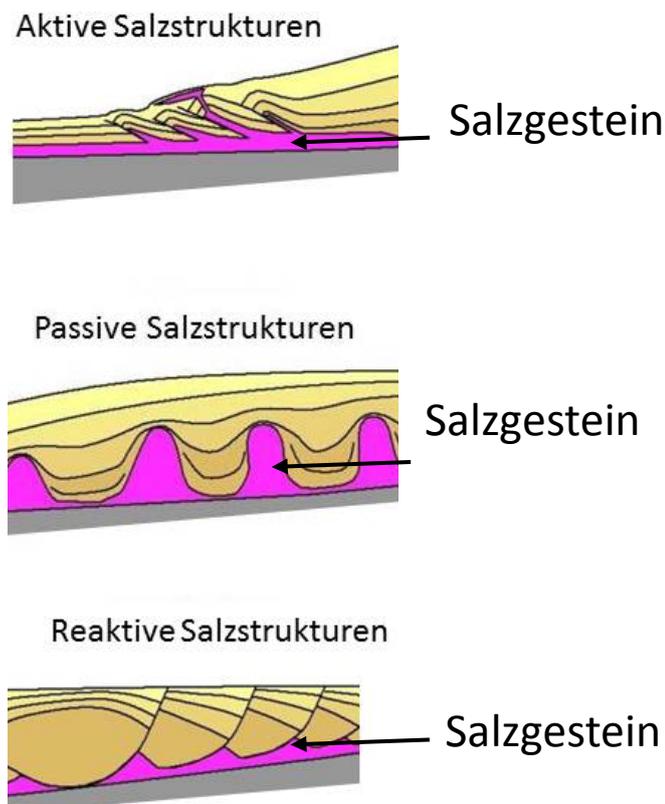


Bild 2.2 Darstellungen aktiver, passiver und reaktiver Salzstrukturen

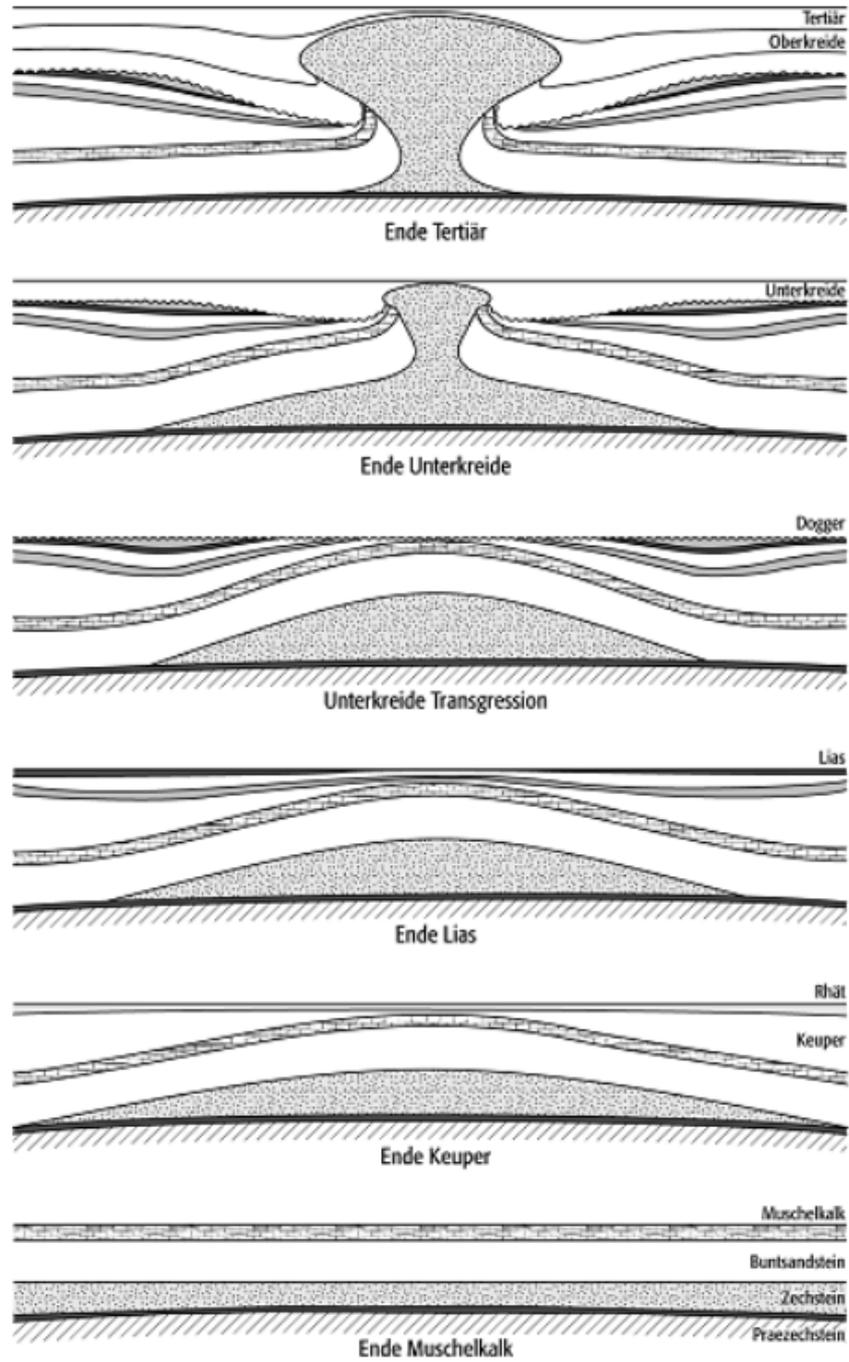


Bild 2.3 Entwicklungsschema eines halokinetischen Vorgangs

2.3 Beispiel für einen Salzstockaufbau

In Kapitel 2.2 wurde aufgezeigt, dass die Bildung von Salzstöcken ein langer und komplexer Prozess ist. Vergleicht man Salzstöcke beispielsweise allein in Deutschland, kann festgestellt werden, dass jeder Salzstock ein Unikat darstellt, obwohl die im vorherigen Kapitel beschriebenen Mechanismen zum Aufstieg eines Salzstockes weitestgehend identisch sind.

Nicht jeder Salzstock ist gleichzeitig auch für die Anlage eines Kavernenfeldes geeignet. So spielt neben dem internen Aufbau des Salzstockes, welcher beispielsweise wichtig ist zur Solfähigkeit und Gasdichtheit, auch die geografische Lage, die Infrastruktur sowie die generelle Lage im Untergrund (z.B. Teufenlage) eine wichtige Rolle.

In einer Studie der KBB-UT /18/ ist eine Zusammenstellung der weltweit verbreiteten Salzlagstätten und von Kavernenfeldern in Salzstöcken angeführt.

Bild 2.4 zeigt aus dieser Veröffentlichung einen schematischen Vergleich verschiedener Salzstrukturen.

Hieraus wird ersichtlich, dass beispielsweise typische Salzstöcke für Kavernenbauwerke sehr unterschiedlich strukturiert sein können. So sind die Salzstöcke in Carrico, Portugal und z.B. Brockstedt in Deutschland relativ stark verformt, wohingegen die Diapire in Etzel, Deutschland und Torup, Dänemark eine sehr homogene Form aufweisen. Auch Diapire, die sich bereits vollständig vom Salzstamm in größeren Tiefen gelöst haben, sind beispielsweise in der Golfküstenregion der USA vorhanden.

Sogenannte Salzkissenstrukturen sind zum Beispiel in Rüdersdorf, Deutschland und Harlingen, Niederlande zu beobachten. Diese sind dadurch charakterisiert, dass ein Salzstockaufstieg bisher nicht in der Form eines Diapirs stattgefunden hat.

Die untere Reihe der Abbildungen in Bild 2.4 zeigt Schichtensalzstrukturen, die vor allem dadurch gekennzeichnet sind, dass sie nach unten in größeren Teufen begrenzt sind. In Deutschland befindet sich am Standort Epe eines der größten Kavernenfelder im Schichtensalz. Im Mittelpunkt der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Salzlagerstätten stehen die Salzstöcke.

Einer der wichtigsten Kavernenstandorte in Deutschland ist der Salzstock Etzel. Bild 2.5 zeigt die Darstellung des Salzstockes in einem Schnitt /19/.

Die Kavernenspeicheranlage am Standort Etzel besteht seit den 70er Jahren und eignet sich aufgrund der Größe besonders gut für den Kavernenbau. Über den Sonderbetriebsplan „Bohren“ ist momentan die Errichtung von 99 Standorten zum Kavernenbau genehmigt. Im Endausbau sind insgesamt 144 Kavernen geplant.

Der Salzstock Etzel, ca. 18 km südwestlich von Wilhelmshaven gelegen, ist in seinen horizontalen Ausdehnungen ca. 12 km lang und 5 km breit. Das Zentrum des bogenförmig ausgebildeten Daches des Salzstocks liegt in einer Tiefe von etwa 650 bis 900 m, die Flanke taucht bis in eine Tiefe von etwa 2.000 m ab. Erste Aufzeichnungen der Umriss des Salzstockes wurden durch die Exploration von Ölfeldern gesammelt.

Auf der Grundlage der großen Anzahl an Bohrungen und geophysikalischen Logs konnte im Standort Etzel ein komplexes dreidimensionales Modell des Salzstockes aufgebaut werden /19/.

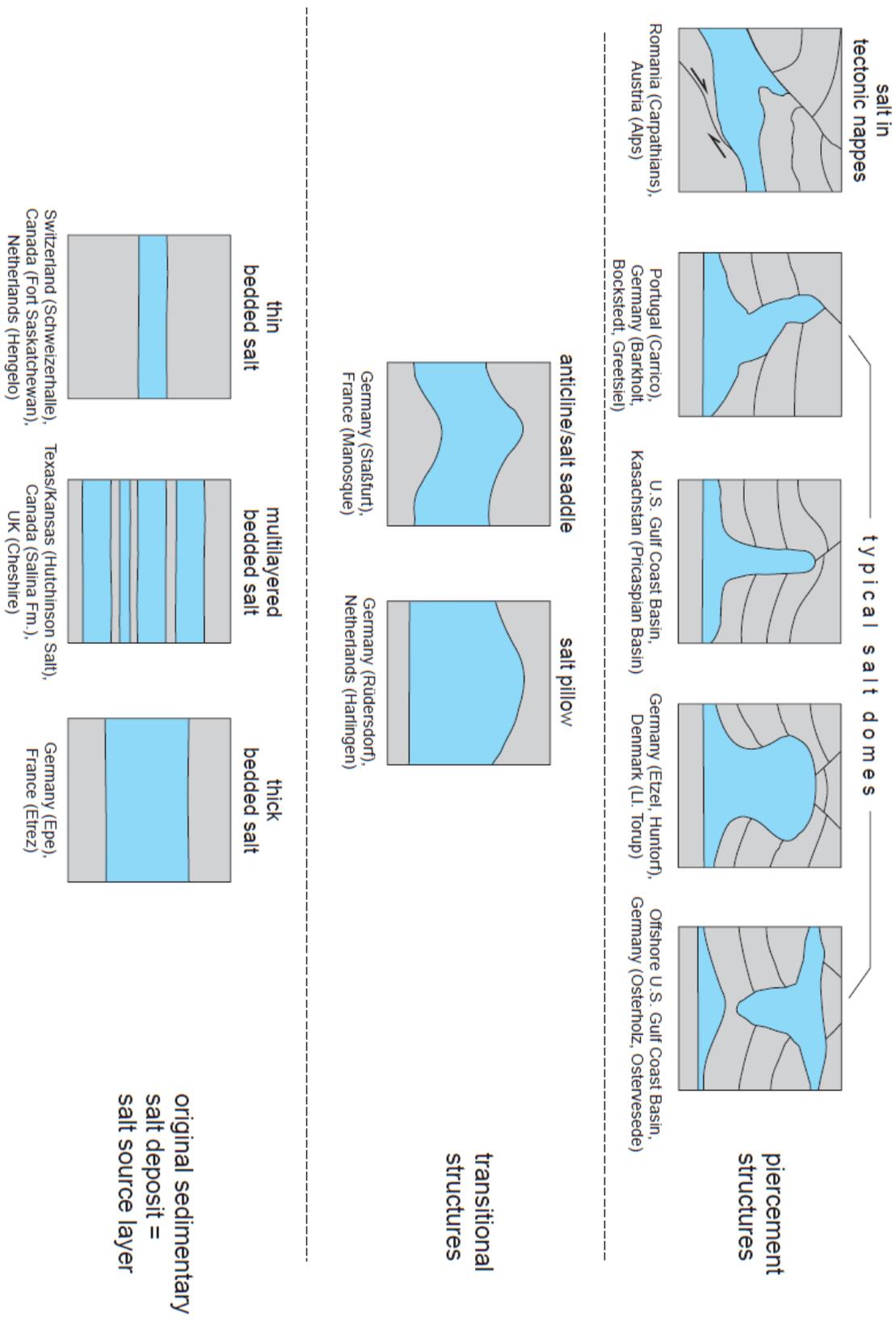


Bild 2.4 Klassifikationen von Salzlagerstätten /18/

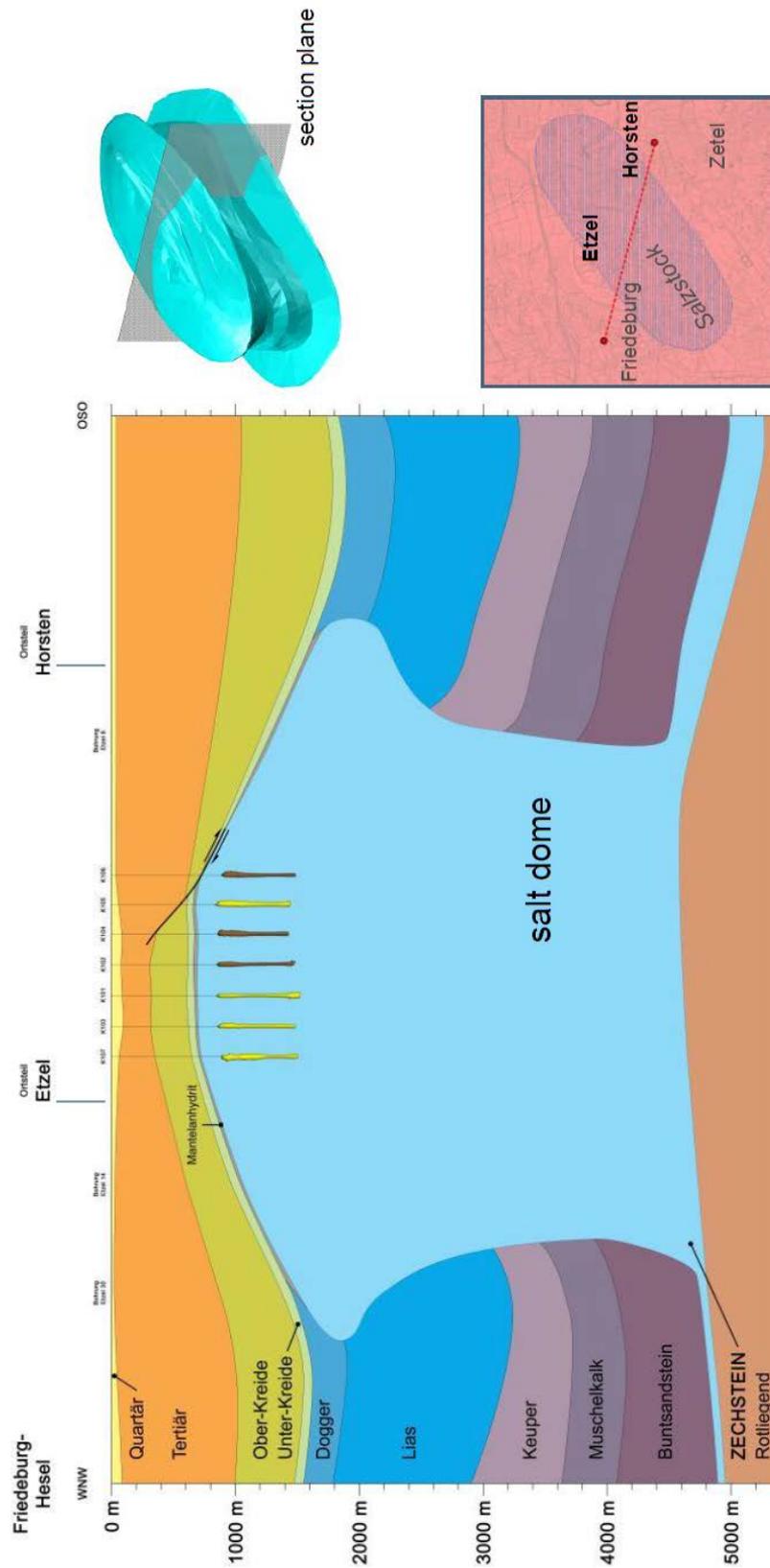


Bild 2.5 Salzstock Etzel /19/

3 Salzstockerkundung und Stand der Empfehlungen zum Abstand zwischen Salzstockrand und Kavernenwand

3.1 Einführung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Dimensionierung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel auf die Erkundungsmöglichkeiten eines Salzstockes eingegangen. Die Art und Genauigkeit dieser Vorabuntersuchungen sind eine wichtige Grundlage für einen Ingenieur, ein entsprechendes Modell des Untergrundes aufbauen zu können.

Die Erkundung von Salzstöcken für die Speicherung von fossilen Brennstoffen in Kavernen ist mit verschiedenen Untersuchungsmethoden möglich. Für den Bau von Speicherkavernen im Salzstockrandbereich ist es unerlässlich, eine genaue Beschreibung über die Lage und den Aufbau des Salzstockrandbereiches zu bekommen.

Die wichtigsten Erkundungsmöglichkeiten werden in diesem Kapitel kurz vorgestellt und bezüglich der Erfassungsmöglichkeiten des Salzstockes bzw. der Salzstockflanke bewertet.

3.2 Erkundungsmöglichkeiten

Bevor überhaupt in den Untergrund eine Bohrung abgeteuft wird, ist ein Modell des Untergrundes zu erstellen, mit dem es möglich ist, einen Einblick und somit eine voraussichtlich geeignete Lokation einer Kaverne im Salz zu finden. Dies gilt ebenso für den Fall eines Kavernenbauwerks im Salzstockrandbereich. Da der Untergrund nicht direkt zugänglich ist, muss mit Hilfe der Geophysik eine Beschreibung des Untergrundes erstellt werden.

Eine der geophysikalischen Möglichkeiten stellt die Gravimetriemessung dar. Hierbei ist die Quelle das Schwerfeld der Erde, das heißt die Anziehungskraft der Erde, welche abhängig ist von der Masse bzw. der Dichte des Gesteins. In dieser Methode werden die räumlichen Variationen der Anziehungskraft ermittelt und damit eine Massenverteilung und Gesteinsdichtenverteilung im Untergrund bestimmt. Die Lösung ist hierbei jedoch nur relativ grob und nicht immer eindeutig bestimmbar. Die beobachteten Anomalien sind vieldeutig interpretierbar, so führen beispielsweise verschiedene Kombinationen aus Dichte und Geometrie zu gleichen Werten der Anomalien. Liegen zusätzliche Informationen zum Untergrund vor, beispielsweise aus Bohrlochdaten, könnten dadurch die Variationsmöglichkeiten eingeschränkt werden.

3.2.1 2D-Seismik

Das wichtigste Verfahren stellt die Seismik dar, welche häufig für die Rohstoffexploration wie beispielsweise Öl und Gas angewendet wird. Für die Erschließung eines Salzstockes zur Speicherung fossiler Brennstoffe hat sich dieses Verfahren ebenfalls bewährt. Bild 3.1 zeigt eine schematische Darstellung der Durchführung einer 2D-Seismik und einer 3D-Seismik /20/. Diese Untersuchungsmöglichkeiten werden häufig in einem Anfangsstadium der Exploration eingesetzt /21/.

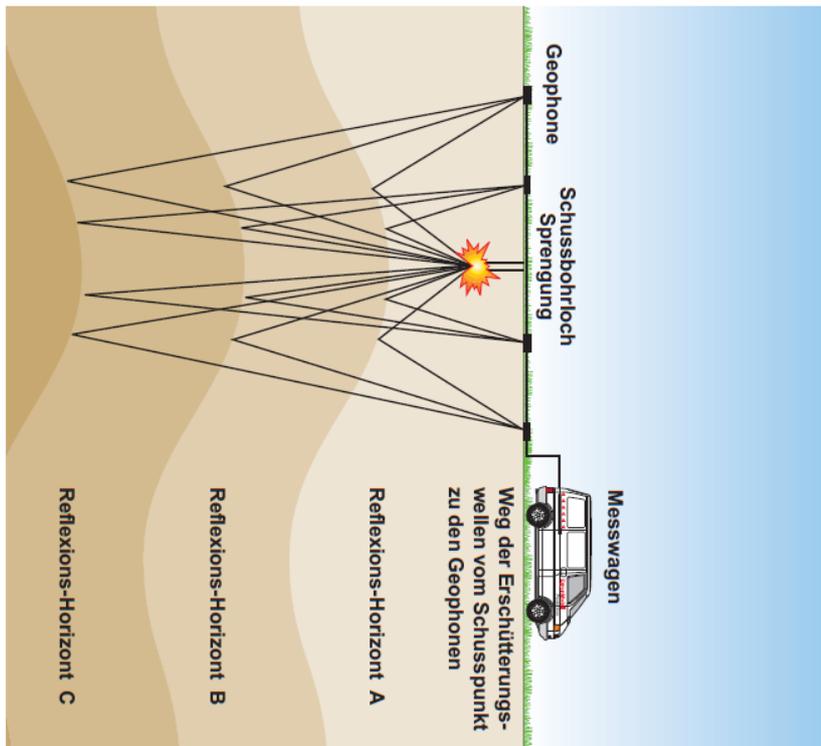
In dieser Methode werden auf der Geländeoberkante auf einer Linie Geophone verteilt. Mit Hilfe einer künstlich angeregten Schallwellenauslösung, beispielsweise mittels eines sogenannten Vibro-Trucks oder durch kontrolliertes Sprengen in einem oberflächennahen Bohrloch, breiten sich seismische Wellen im Untergrund aus. Durch verschiedene Gesteinsarten geschieht dies unterschiedlich schnell. Wenn diese Wellen auf ein Hindernis wie beispielsweise eine Schichtgrenze stoßen, werden sie reflektiert. An der Geländeoberfläche werden die reflektierten Schallwellen aufgezeichnet, in elektrische Impulse umgewandelt und liefern somit Erkenntnisse über den Aufbau des Untergrundes entlang einer zweidimensionalen Linie bis in mehrere Kilometer Tiefe. Der Nachteil besteht darin, dass viele Linien notwendig sind, um den komplexen dreidimensionalen Aufbau des Untergrundes hinreichend genau zu erfassen.

3.2.2 3D-Seismik

Für eine genauere dreidimensionale Interpretation des Untergrundes kann eine 3D-Seismik durchgeführt werden, bei der gegenüber der 2D-Seismik mehrere Linien von Schallquellen und Geophonen rasterförmig auf einer Fläche an der Geländeoberkante angeordnet werden.

Mit dieser Methode überdecken sich die Messpunkte und in der Interpretation der Messergebnisse kann ein dreidimensionales Bild des Untergrundes erstellt werden. Gegenüber der 2D-Seismik wird eine höhere Auflösung eines komplexen Volumenkörpers aufgrund der erhöhten Informationsdichte erzielt /3/. Es ist damit möglich, die einzelnen Gesteinsschichten großräumig zu erkunden.

2D-Seismik



3D-Seismik

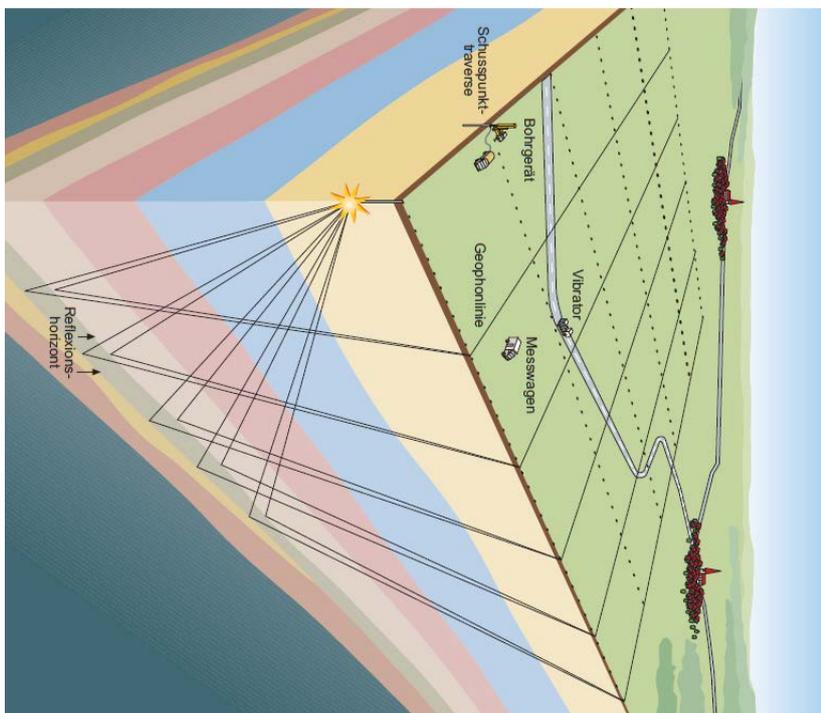


Bild 3.1 Schematische Darstellungen der Durchführung von 2D- und 3D-Seismiken /20/

3.2.3 Bohrungen und Bohrloch-Radar-Technik

Zur Ergänzung der methodischen Untersuchungen an der Tagesoberfläche stellen direkte Aufschlüsse des Untergrundes mittels Bohrungen die genauesten Untersuchungen dar.

Eine Vielzahl von Untersuchungsbohrungen oder auch Bohrungen zur späteren Herstellung von Kavernenbauwerken kann als Grundlage in Kombination mit den 2D- und 3D-Seismikdaten dazu dienen, ein komplexes geologisches Modell des Untergrundes zu entwerfen. Der Salzstock Etzel ist ein Beispiel, wie Informationen aus verschiedenen Methoden in ein komplexes geologisches Modell überführt werden (Bild 3.2) /19/ /22/ /23/. In dieser Abbildung sind neben dem in blau gekennzeichneten Salzstock mit der typischen Ausbildung eines Diapirs in der oberen Abbildung die abgeteufte Bohrung für die Kavernenspeicher und in der unteren Abbildung beispielhaft die Verteilungen interner Strukturen wie beispielsweise Kaliflöze dargestellt.

Zur weiteren Ergänzung für eine zusätzliche Erkundung steht die sogenannte gerichtete Bohrloch-Radar-Technik /24/ /25/ zur Verfügung, mit der eine 3D-Erkundung der Lagerstätte im Umfeld des Bohrlochs bzw. einer Kaverne durchgeführt werden kann.

Bild 3.3 zeigt das Ergebnis einer solchen Untersuchung, die im Falle einer Durchführung in einem Bohrloch im Salzstockrandbereich zusätzlichen Aufschluss über die Lage der Salzstockflanke gibt.

In der Abbildung reicht die in gelb-roten Farben dargestellte Salzstockflanke im oberen Teil der Vermessung relativ nah an das Bohrloch, in dem die Radarmessung stattfindet, heran und entfernt sich mit zunehmender Teufe. Auf der rechten Seite der Abbildung ist ein dreidimensionales Modell der Interpretationen aus den Bohrlochmessungen dargestellt. Die beiden Bohrlöcher sind in pink und blau als vertikal verlaufende Linie gekennzeichnet.

Der Nachteil der Methode liegt darin, dass bis zum Salzstockrand keine anderen Reflexionen, beispielsweise aufgrund von Anhydritbänken, auftreten dürfen und dass die Reichweite der Untersuchung auf ca. 250 m Entfernung begrenzt ist.

Eine weitere Möglichkeit bezüglich Bohrungen ist die Methode, nicht nur vertikal durch den Salztop die Lage des Salzstockes festzustellen, sondern zusätzliche Informationen über die Lage des Salzstockrandes durch eine abgelenkte Bohrung zu erlangen.

Blair et al. haben 1998 auf der Konferenz des Solution Mining Research Institute (SMRI) Konferenz /26/ eine entsprechende Anwendung für den Pierce Junction Salzstock in der Nähe von Houston, Texas vorgestellt. Für die stillgelegte Kaverne No.2 in diesem Salzstock wurde auf der Grundlage der alten Untersuchungen festgestellt, dass diese sich in der Nähe

des Salzstockrandes befindet. Im Dachbereich betrug die prognostizierte Entfernung zwischen Kavernenwand und dem erwarteten Salzstockrand nur rund 200 Fuß (ca. 61 m).

Aus der existierenden Bohrung No. 2 wurde eine direkte horizontale Bohrung durchgeführt. Ziel war es, in einer Teufe von 1.250 Fuß (ca. 381 m) den Salzstockrand horizontal zu durchbohren, da dies in etwa der Teufenlage des Daches der zu untersuchenden Kaverne No. 2 entsprach.

Das Ergebnis der direkten Bohrung in den Salzstockrandbereich war, dass die Salzstockflanke ca. 200 Fuß (ca. 61 m) weiter entfernt lag, als aus den umfangreichen Untersuchungsergebnissen angenommen werden konnte. Auf der einen Seite erzielt man mit dieser Erkundungsmöglichkeit sehr genaue Informationen über die Lage des Salzstockrandes, auf der anderen Seite ist diese Information allerdings lokal sehr begrenzt, so dass für ein komplexes dreidimensionales Bild der Flanke mehrere Bohrungen notwendig wären, um den Aufbau der Salzstockflanke genügend genau interpretieren zu können.

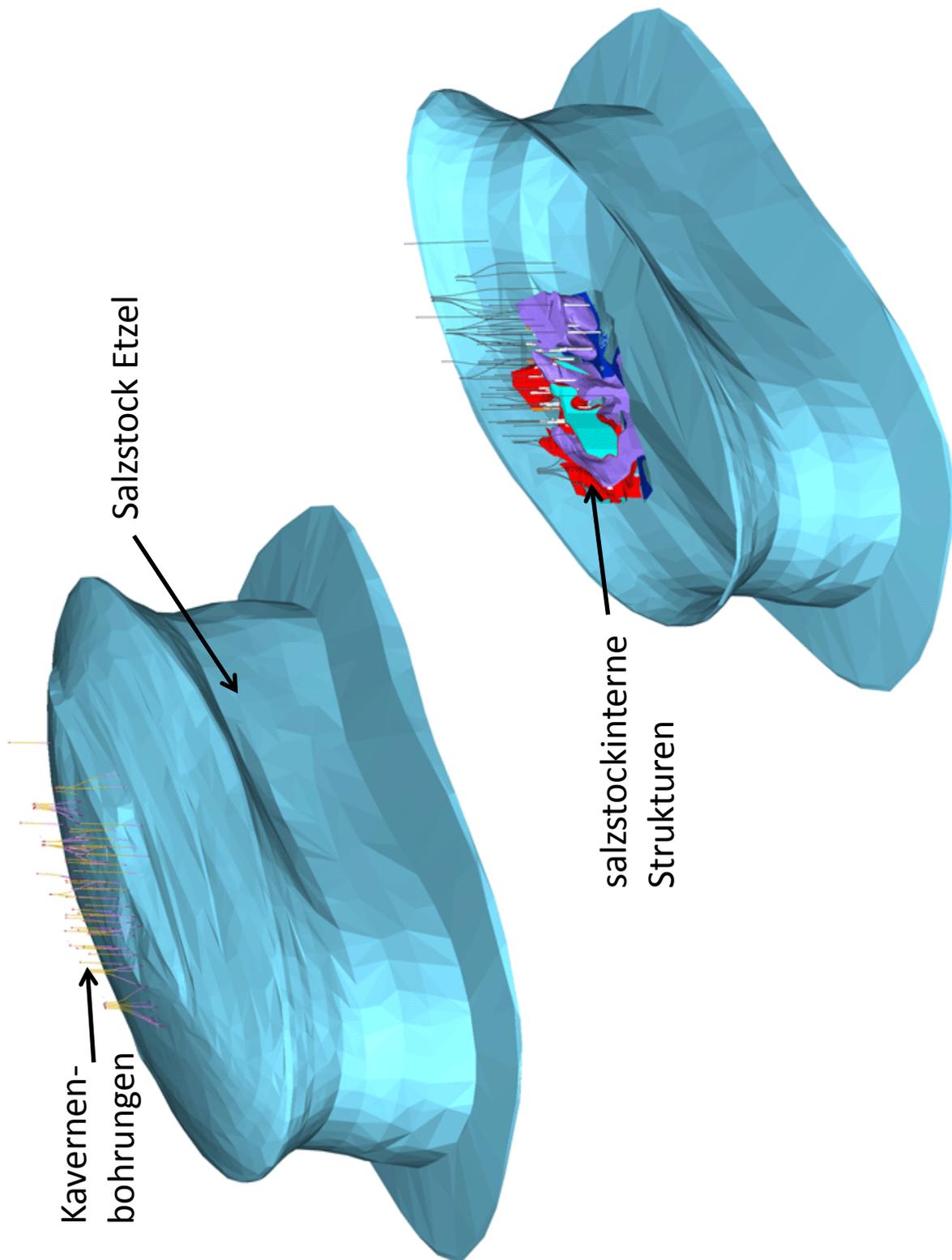
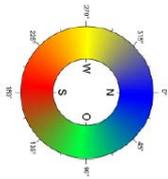
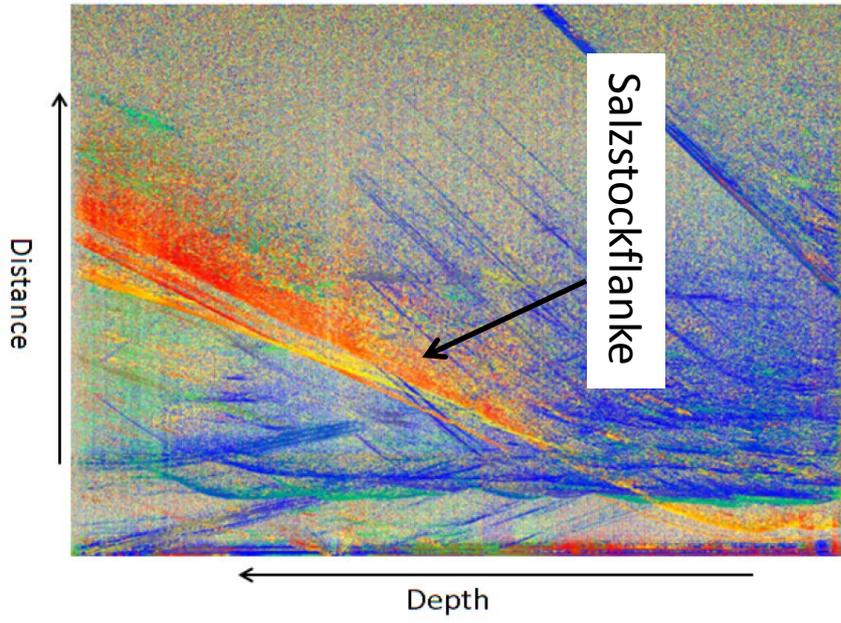


Bild 3.2 Dreidimensionales geologisches Modell des Salzstocks Etzel /19/ /22/ /23/

Auswertung einer Bohrloch-Radar-Messung



3D-Darstellung der Messungen aus 2 Bohrungen

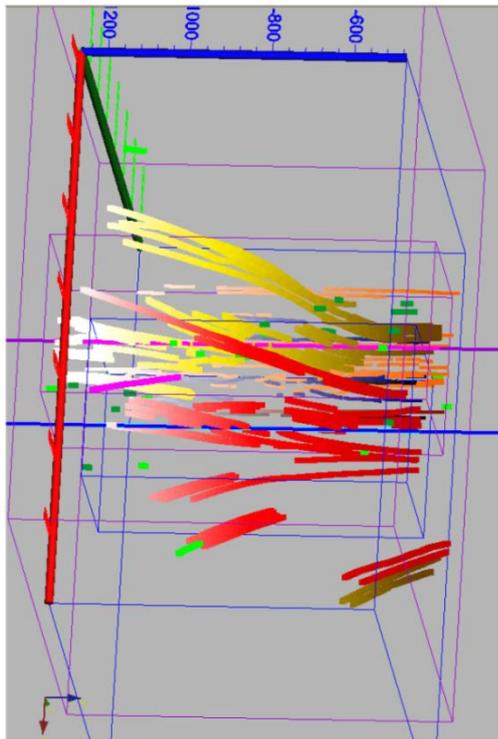


Bild 3.3 Ergebnisse von Bohrloch-Radar-Messungen /24/

3.3 Bewertung und Vergleich der Erkundungsmöglichkeiten in Hinblick auf die Lage des Salzstockrandes

Die seismischen Untersuchungsmethoden zur Erstellung eines Modells für den Aufbau des Untergrundes sind die gängigen Methoden zur Vorerkundung des Salzstockes /27/. Da die bevorzugten Lokationen für eine Kavernenherstellung in den letzten Jahren im Zentrum eines Salzstockes lagen, konnten die Untersuchungsergebnisse als Grundlage für die Entscheidung, wo eine Bohrung bzw. eine Kaverne abgeteuft wird, dienen. Für die Errichtung einer Kavernenanlage in einem möglichen Salzstockrandbereich ist die Interpretation der Messergebnisse aus den seismischen Untersuchungen schwieriger.

Die Fragestellung nach der Lage des Salzstockrandes wurde jedoch bereits in früheren Jahren hinsichtlich der Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle diskutiert /28/. In diesen durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe durchgeführten Untersuchungen wird darauf hingewiesen, dass die Steinsalzstrukturen selbst zwar einen guten seismischen Reflektor darstellen, dieser aber unmittelbar unterhalb der Strukturen nicht sichtbar ist, was bezüglich der Sockeltektonik dazu führt, dass ohne reflexionsseismische Spezialuntersuchungen eine genaue Konstruktion des Sockels bzw. steiler Salzstockflanken nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist.

In einer Untersuchung bezüglich des Standortes Gorleben kommt die GRS /29/ ebenfalls zu dem Ergebnis, dass insbesondere die 2D-Seismik ungeeignet ist, um ein hochauflösendes Bild vor allem der Salzstockflanke zu liefern. Hierin wird empfohlen, eine 3D-Seismik in Kombination mit Elektromagnetischen-Reflexions-Messungen (EMR) durchzuführen, um eine genaue Interpretation des Salzstockes bzw. der Flanke zu erhalten.

Auch Untersuchungsergebnisse verschiedener Wissenschaftler in den USA weisen darauf hin, dass seismische Untersuchungen an der Oberfläche zu Ergebnissen führen, die Ungenauigkeiten bezüglich der Salzbasis und auch der Salzstockflanke aufweisen /30/.

Hill stellte auf der SMRI Konferenz im Herbst 2013 eine Untersuchung alter und neuer Erkundungsmethoden bezüglich verschiedener Salzstöcke dar /31/. Bild 3.4 zeigt aus dieser Veröffentlichung die Gegenüberstellung alter und neuer Vermessungsdaten in verschiedenen horizontalen Untersuchungshorizonten für die Salzstöcke „Spindletop Dome“, „Napoleonville Dome“ und „White Castle Dome“.

Die Abbildung zeigt, dass in allen drei Untersuchungen lokal mindestens eine größere Abweichung zwischen der alten Interpretation, dargestellt als gestrichelte Linie in verschiedenen Teufen, und der neuen Interpretation, dargestellt als durchgezogene Linie, der Abmessungen des Salzstockes besteht. Im Falle des Napoleonville Dome in der Nähe der Stadt

Bayou Corne wird beispielsweise die Abweichung in einer Tiefe von etwa 1.600 m mit ca. 335 m (1.100 Fuß) beziffert.

Hill weist darauf hin, dass nur unter Einbeziehung sämtlicher zur Verfügung stehender Daten ein genaues Abbild des Untergrundes geschaffen werden kann. Allerdings beinhaltet dieses immer noch Ungenauigkeiten mit Werten von bis zu 75 m in vertikaler als auch in horizontaler Richtung.

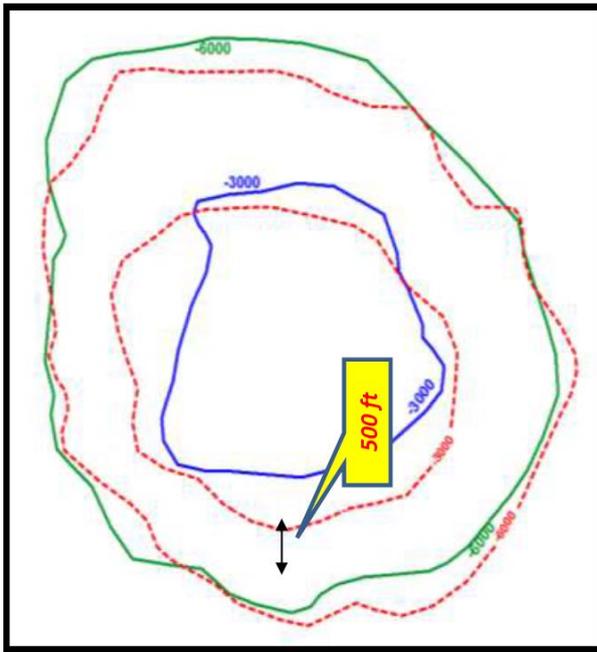
Die Verantwortung, wie weit die Kavernen von einem aus der Interpretation gewonnenen Salzstockrand entfernt bleiben sollen, obliegt seiner Meinung nach dem Sicherheitsgefühl der Betreiber der Kavernen. In seiner Zusammenfassung gibt er als Empfehlung an, mindestens rd. 152 m (500 Fuß) als Puffer zwischen dem Übergang Salz-Nebengebirge und der Kaverne zu gewährleisten. Dieser Wert wird allerdings ohne ausführliche gebirgsmechanische Begründung oder detaillierte Berechnungen angegeben.

Im Fall des Napoleonville Dome in Bayou Corne, Louisiana trat 2012 der bislang jüngste, größere Schadensfall im Kavernenbau auf. Am 3. August wurde ein „Sinkhole“ entdeckt /32/, welches sich bis Mai 2013 in eine Tiefe von ca. 230 m ausbreitete. Das an der Tagesoberfläche betroffene Gebiet wies eine Größe von etwa 6,1 ha auf.

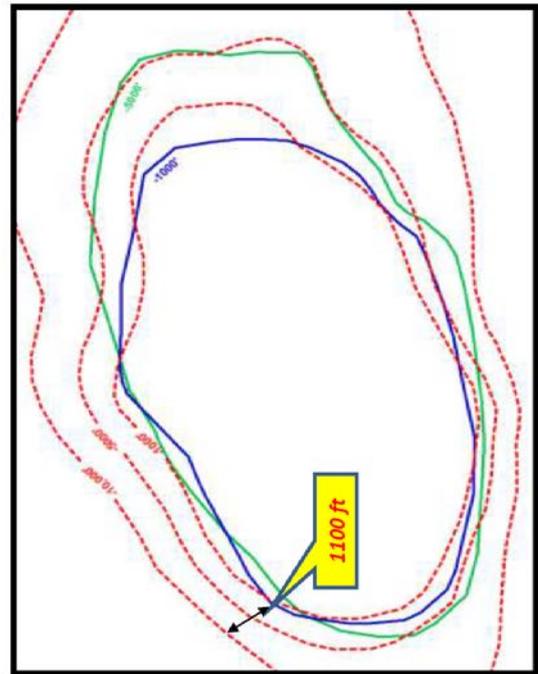
Die Ursache des Sinkholes lag in einem Kollaps der verschlossenen und solgefüllten Kaverne. Vermutlich führte eine Fehlinterpretation der Lage des Salzstockrandes dazu. Die Untersuchungen des Vorfalls dauern jedoch zurzeit noch an /33/.

Bild 3.5 zeigt den Unterschied zwischen der veralteten Interpretation des Salzstockrandes und dem neuen mutmaßlichen Verlauf im Salzstock Napoleonville /34/. Die neuere 3D-Seismik zeigt, dass insbesondere im unteren Teil der Kaverne je nach Interpretation der seismischen Daten unter Umständen kein Salz mehr zwischen dem Rand und der Kaverne wand vorhanden ist.

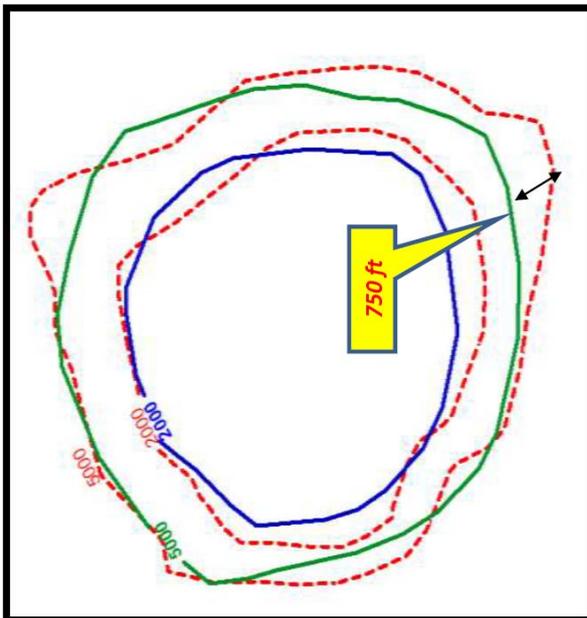
In der alten Strukturkarte, dargestellt als blaue Linie in der Abbildung, erkennt man dagegen einen Mindestabstand vom Dach der Kaverne zum Salzstockrand von etwa 375 Fuß, d.h. ca. 125 m mit einer permanenten Vergrößerung des Abstandes mit anwachsender Tiefe.



White Castle



Napoleonville Dome



Spindletop Dome

Alte Untersuchungen

Neue Untersuchungen



Bild 3.4

Vergleich alter und neuer seismischer Untersuchungsergebnisse verschiedener Salzstöcke in den USA /31/

RSI-1808-09-001

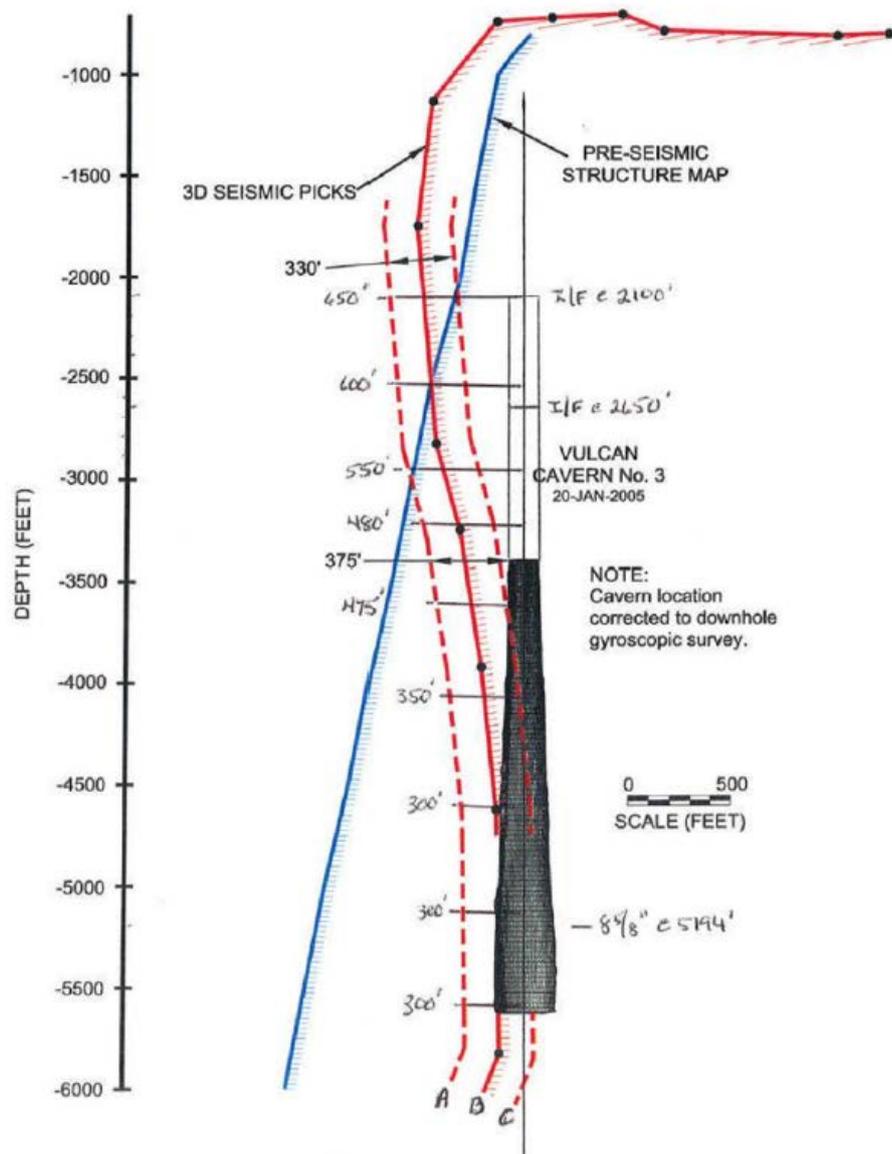


Bild 3.5

Vergleich alter und neuer Untersuchungsergebnisse zur Salzstockflankenermittlung im Salzstock Napoleonville, Louisiana, USA /34/

3.4 Stand der Empfehlungen für den Abstand zwischen Kavernenwand und Salzstockrand

Die Frage, wie groß der Abstand zwischen der Salzstockflanke und einem Kavernenbauwerk zur Speicherung von fossilen Brennstoffen oder zur Solegewinnung aus gebirgsmechanischer Sicht sein muss, wurde bisher weltweit nicht hinreichend behandelt und beantwortet. Ein Dimensionierungskonzept wurde ebenfalls nicht veröffentlicht.

In einigen europäischen Ländern, in denen intensiv auf gebirgsmechanischen Gebieten in der Kavernentechnologie geforscht wird, stellt sich die Abstandsfrage aufgrund der dortigen geologischen Situationen nicht. So verfügt beispielsweise Frankreich über Expertenwissen auf dem Gebiet der Speichertechnik in Salzkavernen, allerdings werden dort die meisten Kavernen in Schichtensalz wie beispielsweise in Etrez, Tersanne oder Grand Serre erstellt. In diesen Lokationen stellte sich bisher nicht die Frage eines horizontalen Abstandes zu möglichen geologischen Grenzen. Die Standorte Carresse und Manosque beispielsweise sind diapirische Strukturen, allerdings keine Salzstöcke mit steilen Flankenbereichen.

In Schichtensalzformationen in Großbritannien wurden Kavernen aufgrund des geringen Platzes in der Nähe von Strukturgrenzen geplant /35/. Ein generelles Konzept zur Auslegung von Gasspeicherkavernen im Randbereich wurde jedoch bisher nicht veröffentlicht.

In den USA wird, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, die Verantwortung für die Sicherheit den jeweiligen Betreibern der Kavernen auferlegt. Allenfalls wird aufgrund der Unsicherheiten aus den Interpretationen der Vermessungen eine Empfehlung für einen Abstand gegeben. Diese beinhaltet jedoch keine fundierten gebirgsmechanischen Untersuchungen bzw. Modellberechnungen.

In Deutschland existiert für den Bau und Betrieb einer Speicherkaverne für Kohlenwasserstoffe ebenfalls kein direkt in Verordnungen verankerter Wert. Zunächst gilt für die Aussolung einer Kaverne im Salinar die BVOT – Tiefbohrverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen vom 20.9.2006 /7/. Dort sind gemäß §40 BVOT keine festen Abstände für benachbarte Kavernen vorgeschrieben. Es wird darin lediglich gefordert, dass die Kavernen standsicher und mit ausreichend dimensionierten Salzfesten angelegt werden, wobei es bei jeder Kaverne einer Einzelfallbetrachtung bedarf. Entscheidend dabei sind für die Festlegung von Abständen bzw. Salzfesten zu Nachbarkavernen, zur Salzstockflanke oder als Salzscheibe die Dimensionierung der Kaverne (Größe, Durchmesser), der Zweck (Salzgewinnung oder Speicherbetrieb), die Teufenlage und die Salzzusammensetzung.

4 Kriterien zur Dimensionierung von Kavernen für die Speicherung von Erdgas

Die Dimensionierungskriterien, die zum Betrieb einer Gasspeicherkaverne aus gebirgsmechanischer Sicht festgelegt werden, sollten auch für eine Kaverne im Salzstockrandbereich Anwendung finden. In diesem Kapitel werden die Kriterien vorgestellt, die in den nachfolgenden Abschnitten bezüglich der Modellvariationen zur Gasspeicherkaverne in Salzstockrandlage untersucht und diskutiert.

4.1 Stoffgesetze

Zur Dimensionierung von Salzkavernen zur Speicherung von Erdgas gehört zunächst die Bestimmung des maximal möglichen und des minimal notwendigen Kaverneninnendruckes. Diese sind lokationsspezifisch zu bestimmen und dabei abhängig von verschiedenen Parametern wie beispielsweise der Teufenlage der Kaverne, den geometrischen und geologischen Randbedingungen und des Materialverhaltens des die Kaverne umgebenden Salzgesteins.

Die Berechnungen für den elastischen Primärspannungszustand werden mit dem Stoffgesetz nach Hooke und dem am Institut für Unterirdisches Bauen (heute: Institut für Geotechnik) entwickelten Stoffgesetz Lubby² für das zeit- und spannungsabhängige Materialverhalten des Steinsalzes durchgeführt.

In seiner dreidimensionalen Form wird das Stoffgesetz nach Hooke durch die Gleichung 4.1 beschrieben.

$$\underline{\varepsilon} = \underline{D}^{-1} \cdot \underline{\sigma}$$

Gleichung 4.1

mit dem Verzerrungsvektor,

$$\underline{\varepsilon}^T = \left\{ \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz} \right\}$$

Gleichung 4.2

dem Spannungsvektor,

$$\underline{\sigma}^T = \left\{ \sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz} \right\}$$

Gleichung 4.3

der Elastizitätsmatrix nach Zienkiewicz et al. /36/ für den dreidimensionalen Verzerrungszustand,

$$\underline{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix}$$

Gleichung 4.4

sowie dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν .

Das Stoffgesetz Lubby2 /37/ zur Beschreibung des zeit- und spannungsabhängigen Materialverhaltens von Steinsalz basiert auf der Formulierung des modellrheologischen Stoffgesetzes nach Burgers, beinhaltet aber wie erwähnt eine Spannungsabhängigkeit der Stoffgesetzparameter.

Für dreidimensionale Spannungszustände ergibt sich für die transiente und stationäre Verzerrungsrate mit dem Zeitverfestigungsansatz nachfolgend aufgeführte Formulierung.

$$\underline{\dot{\epsilon}}^v(t) = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\bar{\eta}_k(\sigma)} \exp\left(-\frac{\bar{G}_k(\sigma)}{\bar{\eta}_k(\sigma)} \cdot t\right) + \frac{1}{\bar{\eta}_m(\sigma)} \right) \cdot \underline{M}_2 \cdot \underline{\sigma}$$

Gleichung 4.5

mit dem Verzerrungsgeschwindigkeitsvektor,

$$\underline{\dot{\epsilon}}^{vT} = \left\{ \dot{\epsilon}_x^v \quad \dot{\epsilon}_y^v \quad \dot{\epsilon}_z^v \quad \dot{\gamma}_{xy}^v \quad \dot{\gamma}_{yz}^v \quad \dot{\gamma}_{xz}^v \right\}$$

Gleichung 4.6

dem Spannungsvektor $\underline{\sigma}^T$ nach Gleichung 4.3, der Filtermatrix,

$$\underline{M}_2 = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Gleichung 4.7

sowie den Stoffgesetzparametern $\bar{\eta}_m$ als Maxwell-Viskositätsmodul, $\bar{\eta}_k$ als Kelvin-Viskositätsmodul und \bar{G}_k als Kelvin-Schubmodul.

Für die Viskositätsfunktionen in Gleichung 4.5 werden die nachfolgenden Formulierungen angesetzt.

Spannungs- und temperaturabhängiger Maxwell-Viskositätsmodul:

$$\bar{\eta}_M(\sigma) = \bar{\eta}_M^* \cdot \exp(m \cdot \sigma_{eff}) \cdot \exp(l \cdot T)$$

Gleichung 4.8

Spannungsabhängiger Kelvin-Viskositätsmodul

$$\bar{\eta}_k(\sigma) = \bar{\eta}_k^* \cdot \exp(k_2 \cdot \sigma_{eff})$$

Gleichung 4.9

Spannungsabhängiger Kelvin-Schubmodul

$$\bar{G}_k(\sigma) = \bar{G}_k^* \cdot \exp(k_1 \cdot \sigma_{eff})$$

Gleichung 4.10

Die effektive Spannung wird definiert mit

$$\sigma_{eff} = \sqrt{3 \cdot J_2^D} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

Gleichung 4.11

und beinhaltet dabei die 2. Invariante des Deviators des Spannungstensors

$$\sqrt{J_2^D} = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

Gleichung 4.12

σ_1 , σ_2 und σ_3 stellen die drei Komponenten des Hauptspannungstensors dar.

Bild 4.1 zeigt beispielhaft die Spannungs- und Temperaturabhängigkeit des stationären Anteils aus dem Forschungsvorhaben /38/, welches sich mit dem Vergleich verschiedener

Stoffgesetzansätze für Steinsalz beschäftigt. Neben den durchgezogenen farbigen Linien des in der Abbildung dargestellten Composite-Damage-Models (CDM) ist auch die stationäre Kriechrate über der effektiven Spannung des in dieser Arbeit verwendeten Stoffmodells Lubby2 aufgetragen.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass das Steinsalz bei geringerer deviatorischer Beanspruchung eine geringere Kriechrate aufweist als bei einer hohen Deviatorspannung. Ebenso ersichtlich ist, dass aus höheren Labortemperaturen auch eine höhere Kriechfähigkeit des Steinsalzes resultiert. Letztere Beobachtung kann für die hier behandelte Fragestellung von Bedeutung sein, da zum einen die Temperaturentwicklungen im Gas unmittelbare Auswirkungen auf das Kriechverhalten an der Kavernenwand haben und zum anderen das Temperaturfeld im Salzstockrandbereich von den umgebenden Gesteinsschichten mit anderen Temperaturgradienten beeinflusst sein kann.

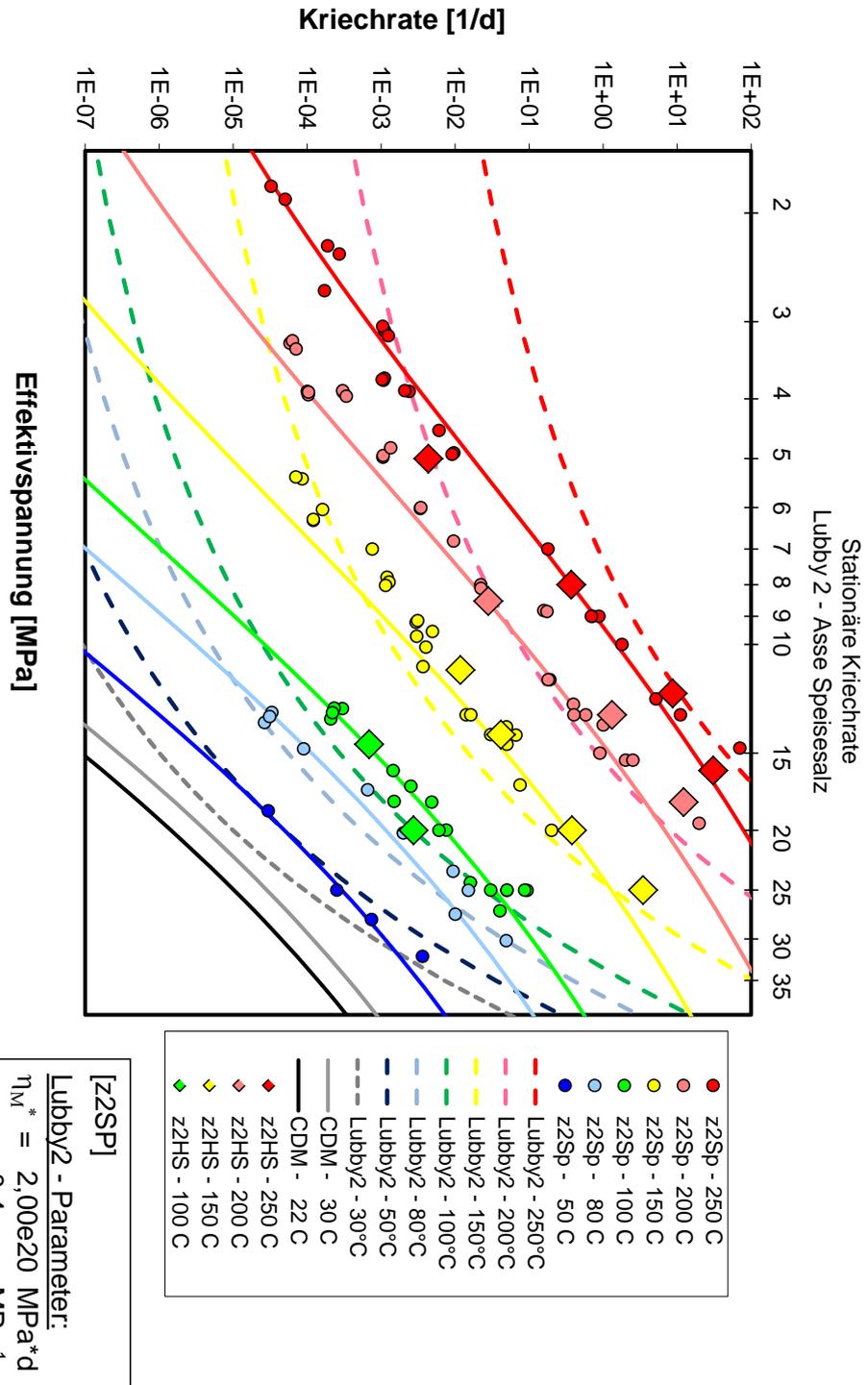


Bild 4.1

Temperatur- und Spannungsabhängigkeit der stationären Kriechrate im Stoffgesetz Lubby2 / BeispiellokationASSE /38/

Seit einigen Jahren werden die Temperaturänderungen des Gases bei Ein- und Ausspeichervorgängen mit berücksichtigt. Diese mit einem Thermosimulator berechneten Werte fließen als Randbedingung in den numerischen Berechnungen mit ein. Das Steinsalz reagiert spannungsmäßig relativ sensitiv auf Temperaturänderungen, so dass thermisch induzierte Dehnungen superponiert mit den spannungsinduzierten Dehnungen einen Einfluss auf die Gesamtdehnung nach Gleichung 4.13 haben.

$$\underline{\varepsilon} = \underline{D}^{-1} \cdot \underline{\sigma} + \underline{\varepsilon}_{th}^T$$

Gleichung 4.13

mit

$$\underline{\varepsilon}_{th}^T = \{\alpha_t \cdot \Delta_T \quad \alpha_t \cdot \Delta_T \quad \alpha_t \cdot \Delta_T \quad 0 \quad 0 \quad 0\}$$

Gleichung 4.14

und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T sowie der Temperaturänderung ΔT .

4.2 Zulässiger maximaler Kaverneninnendruck

Die Arbeiten von Rokahr und Staudtmeister /39/ /40/ beinhalten Untersuchungen und Kriterien zur Begrenzung des maximalen Kaverneninnendruckes.

Der zentrale Aspekt bei der Dimensionierung des maximalen Kaverneninnendruckes ist, zu gewährleisten, dass der Gasdruck in der Kaverne kleiner sein muss als der die Kaverne umgebende Gebirgsdruck. Hierbei ist der Innendruck bezogen auf die Teufe des letzten zementierten Rohrschuhs gemeint. Mit diesem Kriterium wird verhindert, dass ein plötzliches Aufreißen des Steinsalzes im Dachbereich und damit ein mögliches Austreten des Speicherguts auftritt.

Als Kriterium für die Sicherheit gegen Gasundichtigkeit infolge Infiltration des Speicherguts in das die Kaverne umgebende Salzgestein gilt, dass zum Zeitpunkt des Erreichens des berechneten Maximaldruckniveaus bezogen auf Rohrschuhteufe eine geschlossene und ausreichend große Sicherheitszone um die Kaverne herum zur Verfügung stehen muss. Die Differenz zwischen den tangential gerichteten Hauptspannungskomponenten σ_2 und σ_3 und dem vorhandenen Kaverneninnendruck p_i muss dabei beispielsweise unterhalb eines lokationsspezifisch festgelegten Grenzwertes verbleiben.

In Bild 4.2 sind die Kriterien zur Festlegung des maximalen Kaverneninnendruckes dargestellt. Angegeben ist hier die geforderte Sicherheitszone mit der Ausdehnung $a_{\text{vorhanden}}$. Es gilt

dabei, dass die berechnete Ausdehnungszone größer ist als die für ein individuelles Kavernenbauwerk festgelegte Mindestausdehnung a^* _{erforderlich}.

$$a_{\text{vorhanden}} > a^*_{\text{erforderlich}}$$

Gleichung 4.15

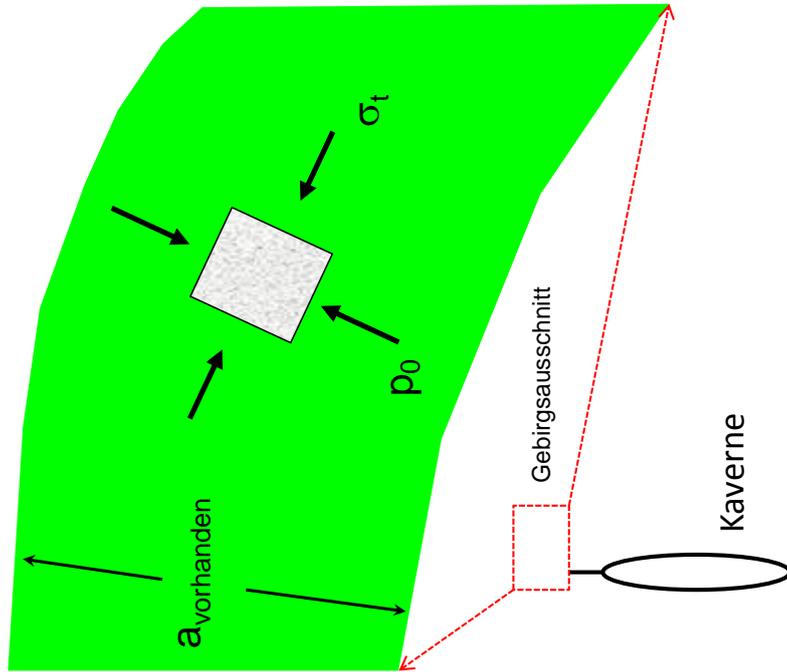
Dabei muss die Ausdehnung der Sicherheitszone einen Wert der effektiven tangentialen Spannungen σ_{t_eff} aufweisen, der kleiner ist als eine ebenfalls individuelle lokationsspezifische Schwellengröße $\sigma^*_{t_eff}$ (Druckspannungen negativ).

$$\sigma_{t_eff} < \sigma^*_{t_eff}$$

Gleichung 4.16

Bild 4.3 zeigt die vereinfachte Darstellung der Beziehung der Permeabilität des die Kaverne umgebenden Steinsalzes zur Effektivspannung /41/. Es ist dargestellt, dass die Permeabilität signifikant ansteigt, wenn sich der Wert der effektiven Tangentialspannungen σ_{t_eff} dem Wert null annähert. Für effektive Tangentialspannungen, die im Zugbereich liegen, steigt der Wert der Permeabilität um mehrere Größenordnungen an. Um die Dichtheit der Kaverne zu gewährleisten, ist also eine Sicherheitszone um die Kaverne herum nachzuweisen. In dieser Sicherheitszone sollte eine Permeabilität gewährleistet sein, die sich nah an der Primärpermeabilität eines ungestörten Salzgesteins mit einer Größenordnung von etwa $k=10^{-20}$ m² bis $k=10^{-22}$ m² orientiert. Übersteigt die Effektivspannung einen gewissen Wert, der von der Fahrweise und der Konfiguration der Kaverne abhängt, so steigt auch die Permeabilität. Zwischen der Primär- und Sekundärpermeabilität existiert nach dem IUB-Kriterium ein Übergangsbereich.

Entwurfskriterien für die Maximaldruckauslegung



Effektive Tangentialspannung

$$\sigma_{t \text{ eff}} = \sigma_t - p_0$$

$$|\sigma_{t \text{ eff}}| > \sigma_{t \text{ eff}}^*$$

$$a_{\text{vorhanden}} > a^* \text{ erforderlich}$$

Bild 4.2

Dimensionierungskriterien zur Maximaldruckauslegung /39/ /40/

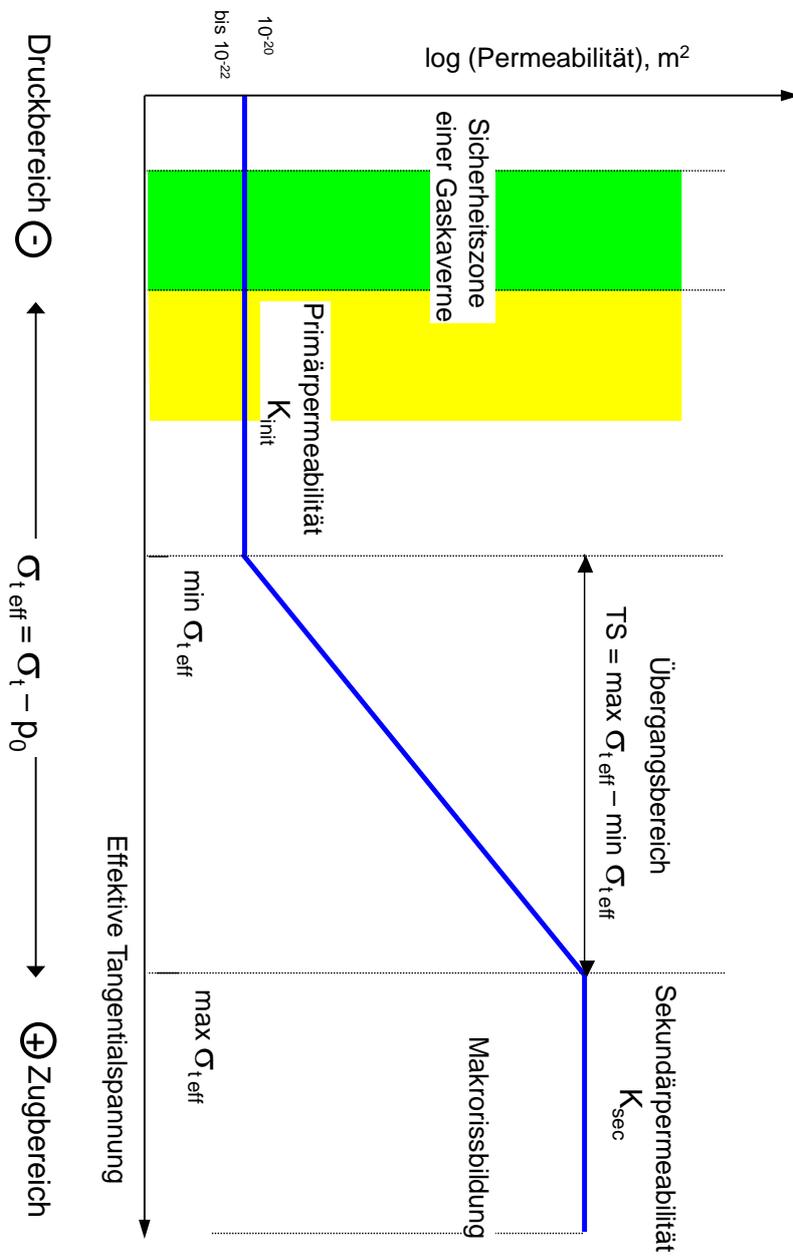


Bild 4.3

IUB-Kriterium zur Dimensionierung einer Sicherheitszone unter Maximaldruckbedingungen /41/

4.3 Zulässiger minimaler Kaverneninnendruck

In Laborversuchen werden Bruchfestigkeiten des Steinsalzes lokationsspezifisch ermittelt. Dabei führen die in ein- und triaxialen Kompressionsversuchen sowie in triaxialen Extensionsversuchen auftretenden Beanspruchungsbedingungen zu verschiedenen Bruchgrenzkurven. Um eine Verallgemeinerung für komplexe dreidimensionale Spannungszustände wie im Steinsalz um eine Kaverne herum vornehmen zu können, werden die Bruchfestigkeitskurven in Invariantenebenen aufgetragen.

Der Betrag $\sqrt{2J_2^D}$ wird für den Bruchzustand als Kurzzeitbruchfestigkeit β^D bezeichnet. Die erste Invariante des Spannungstensors J_1 ist beschrieben nach folgender Gleichung:

$$J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

Gleichung 4.17

Die zweite Invariante des Spannungsdeviators J_2^D nach Gleichung 4-12 ist eine Kenngröße für die Beanspruchung des Steinsalzes.

Mit den für die lokalen Kavernenbohrungen im Labor ermittelten Bruchfestigkeiten kann der Ausnutzungsgrad η_{IUB} ermittelt werden, der den Prozentsatz beschreibt, mit dem die Festigkeit des die Kaverne umgebenden Steinsalzes gegenüber der im Labor ermittelten Kurzzeitfestigkeit ausgenutzt ist /42/.

Der Ausnutzungsgrad η_{IUB} ist also definiert als das Verhältnis der vorhandenen zu der kurzzeitig aufnehmbaren deviatorischen Beanspruchung des Steinsalzes, wie in Gleichung 4.18 beschrieben /43/.

$$\eta_{IUB} = \frac{\sqrt{2J_2^D}_{vorh}}{\beta^D(\sigma)}$$

Gleichung 4.18

mit J_2^D als zweite Invariante des Spannungstensors und β^D als Kurzzeitfestigkeit des Steinsalzes ermittelt aus Laborversuchen.

Aus der Erfahrung kann festgestellt werden, dass sich die Bruchfestigkeit von Steinsalz mit der Dauer der Beanspruchung verringert. Für lange Zeiträume ist daher eine Abminderung der Kurzzeitfestigkeit erforderlich.

Die Dilatanzgrenze für Steinsalz liegt in etwa je nach Steinsalztyp zwischen 30 % und 40 % der Kurzzeitfestigkeit. Beanspruchungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze können dauerhaft zu Schädigungsprozessen der Salzstruktur führen. Im Labor kann die Dilatanzgrenze

durch zusätzliche Versuche mit konstanter mittlerer Spannung ermittelt werden. Hierbei wird die deviatorische Beanspruchung erhöht, während die isotrope Spannung konstant gehalten wird. Aus der Entwicklung der Volumendehnung kann die Dilatanzgrenze dann ermittelt werden, indem die Volumenzunahme ab einem bestimmten deviatorischen Spannungslevel beobachtet werden kann.

Zur Bestimmung des zulässigen minimalen Kaverneninnendruckes werden zum einen das Kriterium der Konturtreue der Kavernenform und zum anderen die Standsicherheit des Pfeilerkernbereiches betrachtet.

Beim Nachweis der Konturtreue der Kavernenform gilt es, einen maximalen Ausnutzungsgrad an der Kavernenwand nach dem Anfahren des minimalen Kaverneninnendruckes zu unterschreiten.

$$\eta_{IUB} \leq \max \eta$$

Gleichung 4.19

Der Nachweis der Standsicherheit des Pfeilerkernbereichs für ein hexagonal angeordnetes Kavernenfeld, durch den die erhöhte Beanspruchung des Pfeilers zwischen benachbarten Kavernen in Abhängigkeit der Betriebsgeschichte begrenzt werden soll, wird durch die Limitierung des Ausnutzungsgrades η_{IUB} auf den Wert $\max \eta_{PK}$ nach Gleichung 4.20 innerhalb des Pfeilerkernbereichs geführt.

$$\eta_{IUB} \leq \max \eta_{PK} = \eta_{\infty}^D$$

Gleichung 4.20

mit η_{∞}^D als Dauerfestigkeit von Steinsalz, die erfahrungsgemäß lokationsspezifisch mit 30-40 % des Wertes der Kurzzeitfestigkeit angenommen werden kann.

Der zwischen zwei Gasspeicherkavernen nachzuweisende Pfeilerkernbereich $\min b_{PK}$ kann allgemein nach Gleichung 4.21 berechnet werden.

$$\min b_{PK} = \alpha \cdot (d_{Ka} + d_{Kb})$$

Gleichung 4.21

mit d_{Ka} als geplantem maximalen Durchmesser der zu untersuchenden Kaverne und d_{Kb} als geplantem oder bereits existierendem maximalen Durchmesser der betrachteten Nachbarkaverne. Faktor α gibt an, wie groß ein lokationsspezifisch nachzuweisender Pfeilerkernbereich ist.

4.4 Maximale Volumen- bzw. Druckänderungsraten

Im Rahmen der Spannungsbewertung hat insbesondere das Auftreten von Zugspannungen im hohlraumnahen Bereich eine große Bedeutung. Die Zugfestigkeit von Salzgestein ist gegenüber der Druckfestigkeit vergleichsweise gering und liegt in etwa in einem Bereich von 0,5 MPa bis 1,5 MPa.

Bei Überschreiten der Zugfestigkeit muss damit gerechnet werden, dass diskrete Risse senkrecht zur Zugspannungsrichtung auftreten. Zwar können Kavernen aufgrund der Herstellung und des Speicherbetriebes nicht betreten und so mit nicht bezüglich einer möglichen horizontalen Rissbildung direkt überwacht werden, jedoch gibt es Beispiele, wo unter vergleichbaren in situ Bedingungen eine diskrete Rissbildung durch thermisch induzierte Zugspannungen beobachtet werden konnte.

Im Schacht 1 des Erkundungsbergwerkes Gorleben trat bedingt durch den Bau einer Wetterstrecke zwischen zwei Schächten eine Temperaturabkühlung von etwa 20°C über einen Zeitraum von 80 Tagen auf /44/. Zu beobachten war in verschiedenen Teufenhorizonten die Ausbildung von horizontalen makroskopischen Rissen, unabhängig von der lokalen Salzschichtung. Diese Risse wurden kartiert und aufgebohrt und anschließend numerisch nachgerechnet /44/ und /45/. Die Nachrechnungen ergaben eindeutig, dass aufgrund der Temperaturabnahme Zugspannungen aufgetreten sind, die auch rechnerisch zu makroskopischen Rissen führen würden.

Nach Auftreten derartiger Risse, ob vertikal oder horizontal, würde in einer Speicherkaverne Gas mit dem entsprechenden Druck in den Rissraum eindringen und die Risslänge vergrößern. Zum heutigen Stand der Technik ist zu erwähnen, dass es bisher nur sehr vereinfacht möglich ist, eine komplexe Rissstruktur in Verbindung mit dem Eindringen von Gas bei einer Speicherkaverne numerisch zu berechnen. Zurzeit gibt es keine theoretischen Beispiele, inwiefern sich die Sekundärspannungen ändern und sich bei wiederholtem Druckspiel die Rissfortpflanzung in das ungestörte Salzgebirge erstreckt.

Um den Wandbereich einer Gasspeicherkaverne nicht durch diskrete Rissbildung zu schädigen, ist es daher erforderlich, die entsprechenden Sekundärspannungen so zu begrenzen, dass diese Spannungen einen Wert in der Nähe der Zugfestigkeit des Salzgesteins nicht überschreiten.

Es gilt daher in einer Dimensionierung einer Gaskaverne für den gesamten Gebirgsbereich

$$\sigma_{1,2,3} < \sigma_{Zug^*}$$

Gleichung 4.22

5 Gebirgsmechanische Berechnung einer Gaskaverne

5.1 Einführung

Die in Kapitel 4 beschriebenen Dimensionierungskriterien werden als Grundlage für die weiteren Untersuchungen auf ein Berechnungsbeispiel eines rotationssymmetrischen Feldkavernenmodells angewendet. Die Ergebnisse der in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen werden als Basis zur Erstellung des Dimensionierungskriteriums für die Standsicherheit von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich herangezogen.

5.2 Theoretisches Gebirgsmodell

5.2.1 Gebirgsausschnitt

In Bild 5.1 ist das gesamte Berechnungsmodell dargestellt, welches für die Bewertung der Sicherheitskriterien einer Gaskaverne im Salzstockrandbereich herangezogen wurde. Die Berechnungen erfolgen mit dem Programm Flac3D /46/.

Zur Festlegung der in Kapitel 4 beschriebenen Parameter wird dieses Modell entsprechend dem Ausschnitt A aus Bild 5.1 vereinfacht. Das verwendete geologische Profil ist in Tabelle 5.1 angegeben und stellt typische Werte für einen Gebirgsaufbau in der Umgebung eines Salzstockes in Norddeutschland dar.

Teufe, m	Mächtigkeit, m	Schicht
70,0	70,0	Quartär
250,0	180,0	Tertiär
780,0	530,0	Kreide
800,0	20,0	Mantelanhydrit
3.020,0	2.220,0	Steinsalz

Tabelle 5.1: Geologisches Profil

Die aus gebirgsmechanischer Sicht berücksichtigte vertikale Ausdehnung des Gebirges erstreckt sich über eine Teufe von 580,0 m bis 1.992,0 m und beinhaltet damit die Hangendschichten der Kreide und des Mantelanhydrits.

Die Form der Kaverne selbst stellt einen idealen Zylinder dar, der Sumpf der Kaverne sowie der Dachbereich sind ellipsoid ausgerundet. Aus Gründen der Rechenperformance und der einfachen Übertragung und Veränderung des Modells bezüglich der Abstandsproblematik zum Salzstockrand wurde auf die Modellierung eines Halsbereichs verzichtet. Dies kann aus

ingenieurmäßiger Sicht vertreten werden, da der Halsbereich in Bezug auf die Dimensionierung des minimalen Kaverneninnendruckes und der Betriebsrate eine untergeordnete Rolle spielt. Die Bewertung des maximalen Kaverneninnendruckes wird auf den höchsten Punkt des Dachbereiches bezogen und beinhaltet eine genügend große Sicherheitszone, in die der Halsbereich mit dem letzten zementierten Rohrschuh genügend weit eingebettet ist.

Bild 5.2 zeigt das rotationssymmetrische Viertelmodell. Das gewählte theoretische Berechnungsmodell erfasst in seinen horizontalen Abmessungen das Steinsalzgebirge jeweils mit 140 m von der Modellachse bis zum Modellrand. Damit wird der halbe Abstand zu den in diesem Berechnungsmodell angenommenen Feldkavernen bezogen auf die Kavernenachse berücksichtigt.

Der Radius der Kaverne beträgt 35 m, die Gesamthöhe vom höchsten Punkt des Dachbereiches bis zur angenommenen Ansolteufe 470 m. Da die Teufe des letzten zementierten Rohrschuhs in diesem Berechnungsmodell mit 1.000,0 m angenommen wurde, ergibt sich eine theoretische Gesamthöhe der Kaverne unter Einbeziehung eines Halsbereichs von 500 m.

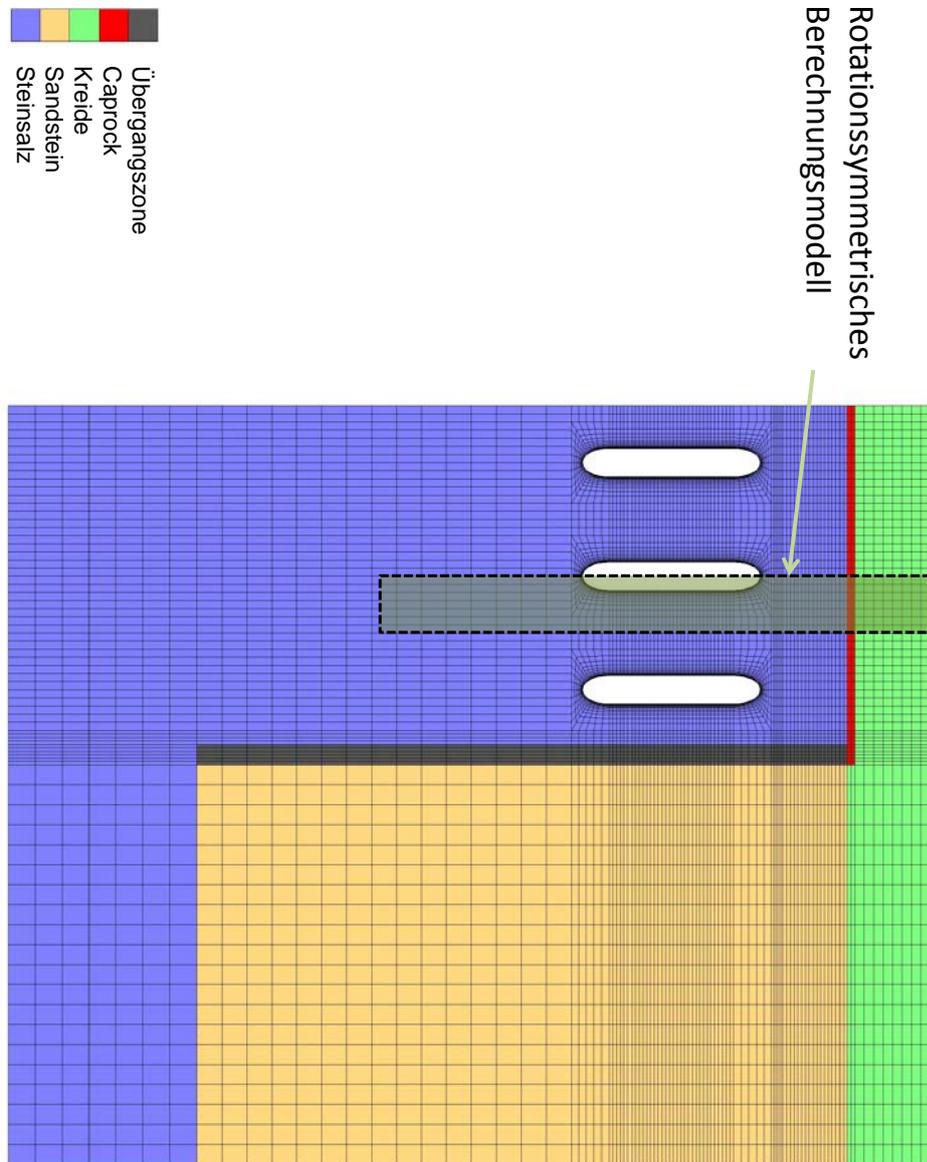


Bild 5.1 Berechnungsmodell zur Untersuchung der Dimensionierungskriterien einer Gasspeicherkaverne im Salzstockrandbereich

5.2.2 Gebirgsaufbau

Das Steinsalzgebirge in der Umgebung der erstellten Kaverne wird als homogenes und isotropes Kontinuum idealisiert. Für die Basismodellberechnung wird beispielhaft ein Dichteprofil gemäß Tabelle 5.2 angesetzt. Dabei berechnen sich die Deckgebirgsichten beziehungsweise die Wichten des Salzgesteins unter Berücksichtigung einer Erdbeschleunigung von $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Stratigraphie	Teufe, m	Gebirgsdruckansatz	
		Dichte ρ [t/m ³]	Wichte γ [bar/m]
Quartär	70,0	2,064	0,2024
Tertiär	250,0	2,064	0,2024
Kreide	780,0	2,064	0,2024
Mantelanhydrit	800,0	2,7	0,2648
Steinsalz	3.020,0	2,2	0,2157

Tabelle 5.2: Idealisierter Schichtaufbau, Gebirgsdichten und –wichten

5.2.3 Primärspannungszustand

Es wird angenommen, dass die primären Gebirgsspannungen vertikal und horizontal gerichtet sind. Die vertikalen Primärspannungen entsprechen dem Überlagerungsdruck, während die horizontalen Primärspannungen ein K_0 -faches der vertikalen Primärspannungen betragen.

$$\sigma_V^P = -g \cdot \sum_{i=1}^n (\rho_i \cdot h_i)$$

Gleichung 5.1

- mit g : Erdbeschleunigung (= 9,80665 m/sec²),
 ρ_i : spezifische Dichte der signifikanten Gebirgsschichten,
 h_i : Mächtigkeit der signifikanten Gebirgsschichten.

$$\sigma_h^P = K_0 \cdot \sigma_V^P$$

Gleichung 5.2

mit σ_V^P : vertikale primäre Gebirgsspannung nach Gleichung 5.1

K_0 : Seitendruckbeiwert, Verhältniszahl σ_h^P / σ_v^P

Für die weitgehend homogenen und isotropen Schichten des Steinsalzes wird ein Seitendruckbeiwert von $K_0 = 1,0$ angenommen. Diese Annahme berücksichtigt die außerordentliche Verformbarkeit des Steinsalzes, das für die hier vorliegenden Gebirgsdrücke bei Betrachtung größerer Zeiträume ein Verhalten zeigt, das eher dem Verhalten einer hoch viskosen Flüssigkeit entspricht (keine Schubfestigkeit) als dem eines Festkörpers (vorhandene Schubfestigkeit). Für das Deckgebirge wird ein Seitendruckbeiwert von $K_0 = 0,5$ angenommen.

5.2.4 Primäre Gebirgstemperatur

Auf der Basis verschiedener Temperaturprofile für die Kavernenbohrungen Norddeutschlands und dem öffentlichen geothermischen Informationssystem für Deutschland „GeotIS“ /47/ kann für die primäre Gebirgstemperatur im Berechnungsbeispiel der Basiskaverne angenommen werden, dass diese ausgehend von einer mittleren Oberflächentemperatur von 285 K (12° C) mit einem Gradienten von 0,02 K/m im Salzgestein ansteigt. Für das Deckgebirge wird ein thermischer Gradient von 0,04 K/m angesetzt.

5.3 Stoffgesetzparameter und thermische Parameter

In Kapitel 4.1 wurden die Grundlagen der verwendeten Stoffgesetze erläutert. Die nachfolgende Tabelle 5.3 enthält die Bandbreite der Kennwerte für die Parameter der verwendeten Stoffgesetze nach Hooke und Lubby2.

Die Parameter wurden so gewählt, dass diese die untere Bandbreite des durchschnittlichen Kriechverhaltens von verschiedenen Steinsalzlokalationen in Norddeutschland abdecken. Es ist selbstverständlich, dass im Falle einer realen Dimensionierung das Kriechverhalten des Steinsalzes lokationsspezifisch im gesteinsmechanischen Labor ermittelt werden sollte.

Schicht	Stoffgesetz	Parameter	
		Elastische Parameter	Viskose Parameter
Kreide	Hooke	E = 5.000 MPa ν = 0,25 - 0,35	-
Mantelanhydrit	Hooke	E = 5.000 MPa ν = 0,25 - 0,35	-
Steinsalz	Lubby2	E = 18.000 – 21.000 MPa ν = 0,2 - 0,3	$\eta_K^* = 2,04e^5 \text{ d} \cdot \text{MPa}$ $G_K^* = 3,382e^5 \text{ MPa}$ $k_1 = -0,2379 \text{ MPa}^{-1}$ $k_2 = 0,2244 \text{ MPa}^{-1}$ $\eta_M^* = 2,04e^{14} \text{ d} \cdot \text{MPa}$ $m = 0,36 \text{ MPa}^{-1}$ $l = -0,05 \text{ K}^{-1}$

Tabelle 5.3: Elastische und viskose Stoffgesetzparameter

Für das thermodynamische Verhalten der modellierten Gebirgsbereiche werden die in Tabelle 5.4 aufgeführten Kennwerte verwendet, die ebenfalls auf Grundlage der Bandbreite der in Norddeutschland berechneten Kavernenfelder verwendet wurden. Nipp /48/ hat zudem Untersuchungen durchgeführt, die ebenfalls als Grundlage für diese Datenbasis herangezogen werden können.

Schicht	Parameter		
	Wärmeausdehnungs-	Wärmeleitfähigkeit	Spezifische
	koeffizient		Wärmekapazität
	$\alpha_T [1/K]$	$\lambda [W/m/K]$	$c [J/kg/K]$
Kreide	-	2,5	700
Mantelanhydrit	-	2,5	700
Steinsalz	$4 \cdot 10^{-5}$	5,2	875

Tabelle 5.4: Thermische Parameter /48/

Die in dem thermodynamischen Programmsystem KavPool zu berücksichtigende Gaszusammensetzung besteht aus verschiedenen Gasanteilen und hat einen Einfluss auf das

thermodynamische Verhalten des Gases während der Berechnung eines Bemessungslastfalles. Den Berechnungen werden die Werte der Tabelle 5.5 zugrunde gelegt.

Gasart	Vol. %
Methan (CH ₄)	83,58
Stickstoff (N ₂)	0,6
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	1,92
Ethan (C ₂ H ₆)	9,41
Propan (C ₃ H ₈)	3,44
i-Butan (i-C ₄ H ₁₀)	0,32
n-Butan (n-C ₄ H ₁₀)	0,57
Pentan (C ₅ H ₁₂ +)	0,16

Tabelle 5.5: Gaszusammensetzung für thermodynamische Berechnungen

Die in Tabelle 5.5 dargestellte Gaszusammensetzung wurde repräsentativ für die thermodynamischen Berechnungen in dieser Arbeit angesetzt. Lokationsspezifisch muss für eine Berechnung das real in den Kavernen gespeicherte Gas entsprechend der Zusammensetzung in den numerischen Berechnungen berücksichtigt werden.

5.4 Bemessungslastfälle und Berechnungsergebnisse

Bevor ein Bemessungslastfall mit mehreren Entnahme-, Befüllungs- und Stillstandsphasen berechnet werden kann, müssen zunächst der Maximal- und der Minimaldruck mit einem vereinfachten Bemessungslastfall unter Verwendung der in Kapitel 4 aufgeführten Bemessungskriterien ermittelt werden. Seit einigen Jahren werden Temperaturänderungen im Gas durch Ein- und Ausspeichervorgänge in den numerischen Simulationen berücksichtigt /49/. Aus diesem Grund werden sämtliche Berechnungen thermomechanisch gekoppelt durchgeführt.

5.4.1 Minimaldruck

Zur Ermittlung des minimalen Kaverneninnendruckes wird zunächst eine ausreichend lange Vorlaufzeit numerisch berechnet, um von einem stationären Zustand mit der Gasausspeicherung zu starten. Das Druckniveau wird dabei auf 85 % des berechneten Primärspannungszustands bezogen auf die Rohrschuhteufe gesetzt. Der endgültige Maximaldruck wird erst nach der Bemessung des Minimaldrucks ermittelt. Das Temperaturniveau in der Kaverne während der Vorlaufzeit wird bezogen auf die mittlere Kavernenhöhe konstant angesetzt. Im Fall der Basiskaverne liegt dieses Temperaturniveau bei $T = 53 \text{ °C}$.

Bild 5.3 zeigt die angesetzte Druckabsenkung vom vorläufigen Maximaldruck von 175 bar auf minimale Innendrucke von 20 bis 50 bar in 10-bar-Abstufungen. Im Anschluss an das Erreichen des Minimaldrucks schließt sich eine entsprechend lange Standzeit an.

Das Diagramm in Bild 5.3 enthält außerdem die Temperaturverläufe der jeweiligen Berechnungen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperatur in der Kaverne während der Entnahmephase absinkt. Zu Beginn der Druckabsenkung geschieht dies schneller als am Ende der Entnahmephase, da dann der Wärmestrom aus dem Gebirge stärker auf die Temperaturentwicklung in der Kaverne einwirkt. Diese Temperaturentwicklung ist davon abhängig, welchen Wert beispielsweise das V/O-Verhältnis, d.h. das Verhältnis des Volumens zur thermisch wirksamen Oberfläche der Kaverne aufweist, in welcher Teufe sich die Kaverne befindet und mit welchen primären Gebirgstemperaturen gerechnet werden kann.

Am Ende des Erreichens des jeweiligen Minimaldruckniveaus ist zu erkennen, dass sich die Temperaturen kaum voneinander unterscheiden.

Bei einem Innendruck von 50 bar herrscht in der Kaverne eine rechnerische Gastemperatur von $33,95 \text{ °C}$, während bei 20 bar Innendruck eine Temperatur von $33,53 \text{ °C}$ berechnet wird, d.h. nur $0,42 \text{ °C}$ weniger, obwohl die Druckdifferenz 30 bar beträgt. Dies begründet sich darin, dass bei der angesetzten Druckentnahmerate von 2 bar/d der Wärmestrom aus dem Ge-

birge in die Kaverne hinein bei einem niedrigen Druckniveau in der Kaverne wesentlich stärker ist als die thermodynamische Abkühlung, die aus der Entnahme des Gases resultiert.

Des Weiteren ist dem Temperaturverlauf zu entnehmen, dass bei einer anschließenden Stillstandsphase, in der kein Gas aus der Kaverne entnommen oder in die Kaverne eingefüllt wird, ein Temperaturanstieg von etwa 13 °C in allen vier betrachteten Fällen verzeichnet werden kann. Der Kaverneninnendruck steigt in dieser Zeit aufgrund der Erwärmung des Gases leicht an.

Die Ergebnisse aus der thermodynamischen Berechnung werden anschließend als thermische Randbedingung auf die Kavernenwand in den thermomechanisch gekoppelten Berechnungen aufgebracht.

Für die untersuchten Zeitpunkte ergibt sich die Zuordnung der nachfolgenden Bilder gemäß Tabelle 5.6. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nur die Ergebnisse für den Fall eines Innendruckes von $p_{i-min} = 45$ bar dargestellt werden.

Darstellungsart	Bildnummer
Spannungskomponenten σ_1 , σ_2 und σ_3 über den Zeitraum des Bemessungslastfalles am Referenzpunkt ($p_{i-min} = 45$ bar)	5.4
Ausnutzungsgrad η_{IUB} über den Zeitraum des Bemessungslastfalles am Referenzpunkt ($p_{i-min} = 45$ bar)	
η_{IUB} zum Zeitpunkt des Erreichens des minimalen Kaverneninnendruckes $p_{i-min} = 45$ bar als Isoliniendarstellung	5.5

Tabelle 5.6: Berechnungsergebnisse zur Dimensionierung des minimalen Kaverneninnendruckes

Zur Untersuchung eines minimalen Kaverneninnendruckes gehört die gebirgsmechanische Untersuchung des Pfeilerkernbereiches.

Für die in diesem Kapitel berechnete Basiskaverne und deren Nachbarkaverne im Feld wird von einem maximalen Durchmesser von 70 m ausgegangen. Der erforderliche Pfeilerkernbereich berechnet sich damit zu $\alpha \cdot (70 \text{ m} + 70 \text{ m}) = \alpha \cdot 140 \text{ m}$.

Zur Bestimmung der Pfeilmächtigkeit werden die Ausdehnungen der Gebirgsbereiche mit einem Ausnutzungsgrad η_{IUB} oberhalb der Dauerfestigkeit addiert, die je nach Innendruckniveau unterschiedlich weit in das Gebirge ausgedehnt sein können. Für einen Innendruck von $p_{i-min} = 45$ bar ergibt sich beispielsweise eine Spannungsumlagerungszone von 37 m, die oberhalb der Dauerfestigkeit liegt.

Für die betrachtete Beispielkaverne ist der Pfeilerkernbereich ausreichend groß und somit kann in den nachfolgenden Berechnungsvariationen mit dem hier untersuchten Minimaldruck gerechnet werden.

Das zweite Kriterium ist der maximale Ausnutzungsgrad η_{IUB} an der Kavernenwand. Hierzu wird zum einen der Zeitpunkt nach Erreichen des Innendruckes p_{i-min} bewertet und zum anderen der Wert an der Kavernenwand nach 90 Tagen Stillstandszeit auf Minimaldruckniveau.

In Bild 5.4 ist als Beispiel der zeitliche Verlauf des Ausnutzungsgrades η_{IUB} (blaue Linie) am Referenzpunkt angegeben. Die Hauptspannungen sind im selben Diagramm in grün, rot und schwarz dargestellt.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen der Basiskaverne wird ein minimaler Kaverneninnendruck von 45 bar festgelegt. Die Nachweise der oben genannten Grenzwerte für die Kriterien zur Konturtreue der Kavernenform und der Standsicherheit des Pfeilerkernbereiches müssen projektspezifisch erbracht werden.

5.4.2 Maximaldruck

Für die Ermittlung des maximalen Kaverneninnendruckes wurde wiederum eine Lastgeschichte mit dem thermodynamischen Programmsystem Kavpool berechnet, da nach dem neuesten Stand der Technik auch in der Maximaldruckdimensionierung von Gasspeicherkavernen nicht mehr auf die Berücksichtigung der Temperaturentwicklung des Gases verzichtet werden kann.

Die Lastgeschichte ist weitestgehend identisch mit dem Lastfall zur Bestimmung des minimalen Kaverneninnendruckes in Kapitel 5.4.1. Der Minimaldruck der Kaverne ist in diesem Kapitel mit 45 bar festgelegt worden. Dies bedeutet, dass für den Fall des unteren Druckniveaus keine Variation mehr berechnet werden muss. Hinzugekommen zur Druckabsenkung und Stillstandphase auf Minimaldruckniveau ist die Druckerhöhung auf verschiedene Maximaldruckwerte.

Die untersuchten Fälle beschränken sich im Fall der Dimensionierung des maximalen Kaverneninnendruckes auf die Befüllphase. Hierbei werden die Innendruckniveaus von 160 bis 190 bar untersucht.

Die ausgewählten Berechnungsergebnisse zur Ermittlung des zulässigen maximalen Kaverneninnendruckes zeigen die Darstellungen der Differenzen der maßgebenden Hauptspannungskomponente σ_2 zum aktuellen Kaverneninnendruck in Form von Isolinienbildern.

Gemäß der gewählten Vorzeichenkonvention (Druckspannungen sind negativ) lassen sich in den angesprochenen Isolinienbildern alle Bereiche mit negativen Differenzwerten als Zonen identifizieren, in denen die betrachtete Spannungskomponente des Gebirges lokal vom Niveau her höher liegt als der zu diesem Zeitpunkt vorhandene Kaverneninnendruck.

Als Kriterium für die Sicherheit gegen Gasundichtigkeit infolge Infiltration wird abhängig von der Teufenlage und dem Durchmesser der Basiskaverne gefordert, dass zum berechneten Zeitpunkt der Druckbeaufschlagung auf das Maximaldruckniveau eine geschlossene und ausreichend große Sicherheitszone um die Kaverne herum im Steinsalz zur Verfügung steht, in der die Differenzen zwischen der Hauptspannungskomponente σ_2 und dem vorhandenen aktuellen Kaverneninnendruck $p_{i-\max}$ unterhalb eines bestimmten Grenzwertes verbleiben.

Für den Fall eines maximalen Kaverneninnendruckes von 160, 170, 180 und 190 bar sind mögliche Sicherheitszonen gegen Infiltration des Speichergutes als Differenz zwischen der Hauptspannungskomponente σ_2 und dem Kaverneninnendruck in Bild 5.6 dargestellt.

Bei einem maximalen Kaverneninnendruck von 170 bar ergibt sich beispielsweise bei einem Schwellenwert der Sicherheitszone von $-2,5$ MPa für die dargestellte effektive Tangentialspannung eine Ausdehnung von ca. 77 m.

Bei einem maximalen Kaverneninnendruck von 180 bar ergibt sich zum Beispiel bei dem Schwellenwert von $-2,5$ MPa für die dargestellte effektive Tangentialspannung eine Ausdehnung von ca. 39 m.

Für die Basiskaverne und für die weiteren Berechnungen wird ein maximaler Kaverneninnendruck von 175 bar bezogen auf die Rohrschuhteufe von 1.000 m angenommen.

5.4.3 Maximale Betriebsrate

Nach der Festlegung des maximalen und minimalen Kaverneninnendruckes sind die gebirgsmechanisch zulässigen Betriebsraten zu ermitteln. Bezüglich dieses Dimensionierungsparameters sind verschiedene Betriebsszenarien möglich und für ein konkretes Kavernenprojekt jeweils in einem engen Austausch mit den Zielvorstellungen der Kavernenbetreiber abzustimmen.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wird eine konstante Volumenrate berechnet.

Ein Bemessungslastfall zur Dimensionierung der Betriebsrate besteht aus den Elementen der Entnahme- und Befüllphasen, zusätzlich aber auch noch aus Stillstandsphasen, in denen kein Gas aus der Kaverne entnommen oder in die Kaverne eingespeist wird. Diese Still-

standsphasen dienen dazu, einen auf der konservativen Seite liegenden und höchstmögliche Flexibilität bietenden Betrieb der Kaverne gewährleisten zu können /1/ /2/ /50/.

Die blaue Kurve in Bild 5.7 kennzeichnet den angenommenen Innendruckverlauf für die thermodynamischen Berechnungen. Die rote Kurve stellt das Berechnungsergebnis der mit dem Thermosimulator Kavpool berechneten Temperaturen für die Basiskaverne dar.

Es ist zu erkennen, dass während der Innendruckabsenkung von 175 bar auf 45 bar mit einer Entnahmerate von 90.000 m³/h (V_n) die Temperatur in der Kaverne von einem angesetzten konstanten Temperaturwert mit 53 °C auf 30,7 °C absinkt.

In einer anschließenden Stillstandsphase über 60 Tage ohne Ein- und Ausspeichervorgänge in der Kaverne steigt die Temperatur aufgrund des Wärmestroms aus dem umgebenden Steinsalzgebirge auf einen Wert von 45,5 °C und einen Innendruck von 48 bar an. Nach der Stillstandsphase wird die Kaverne wieder mit Gas bis zum Maximaldruck von 175 bar mit einer Rate von 90.000 m³/h (V_n) befüllt. Mit einer Gaseinspeisetemperatur von beispielsweise 40 °C erwärmt sich das Gas während des Befüllvorgangs bis auf 64,8 °C.

Die anschließende Stillstandsphase von 90 Tagen auf maximalem Innendruckniveau führt zu einem ähnlichen Effekt wie bei der Stillstandsphase auf Minimaldruckniveau. Aufgrund des Energiestroms aus dem Gebirge findet ein Abkühlungsprozess statt, da die primäre Gebirgstemperatur mit 53 °C ca. 11 °C unterhalb des Wertes liegt, den die Kaverne nach der Befüllphase aufweist. Innerhalb der 90 Tage kühlt sich das Gas in der Kaverne auf 55,3 °C ab. Der Innendruck fällt dabei auf einen Wert von 166 bar.

Im Anschluss an diesen ersten Betriebszyklus wird die Entnahme- und Befüllphase innerhalb eines Bemessungslastfalles wiederholt. In der Temperaturentwicklung ist dabei zu erkennen, dass sich das gesamte System in einem bestimmten Temperaturbereich einpendelt.

Die in den thermodynamischen Berechnungen ermittelten Temperaturen werden im Programmsystem Flac3D auf der Kavernenwand als Randbedingung angesetzt.

Die ausgewählten Ergebnisdarstellungen der Berechnungen zur Ermittlung der maximalen Betriebsraten zeigen den Verlauf der Hauptspannungskomponenten $\sigma_{1,2,3}$ über die Zeit in einem Punkt im Dachbereich der Kaverne und als Isolinien darstellungen in einem den Hohlraum umgebenden Gebirgsbereich zu den relevanten Zeitpunkten des Erreichens des minimalen Kaverneninnendruckes p_{i-min} . Tabelle 5.7 stellt eine Übersicht über die Abbildungen dar.

Darstellungsart	Bildnummer
Spannungskomponenten σ_1 , σ_2 und σ_3 über den Zeitraum des Bemessungslastfalles am Dachpunkt	5.8
Minimale Hauptspannungskomponente σ_1 für einen Innendruck $p_{i-\min} = 45$ bar	5.9
Minimale Hauptspannungskomponente σ_1 für eine 60-tägige Stillstandszeit auf den Innendruck $p_{i-\min} = 45$ bar	

Tabelle 5.7: Berechnungsergebnisse für die Ermittlung der Betriebsraten

Am Ende der dritten Druckabsenkung auf $p_{i-\min} = 45$ bar beträgt nach Bild 5.9 die kleinste vertikale Spannung σ_1 im Dachbereich ca. -2,4 MPa. Der kleinste Wert der minimalen Hauptspannungskomponente beträgt ca. -1,9 MPa (dargestellt als σ_z in gelb) (Bild 5.8).

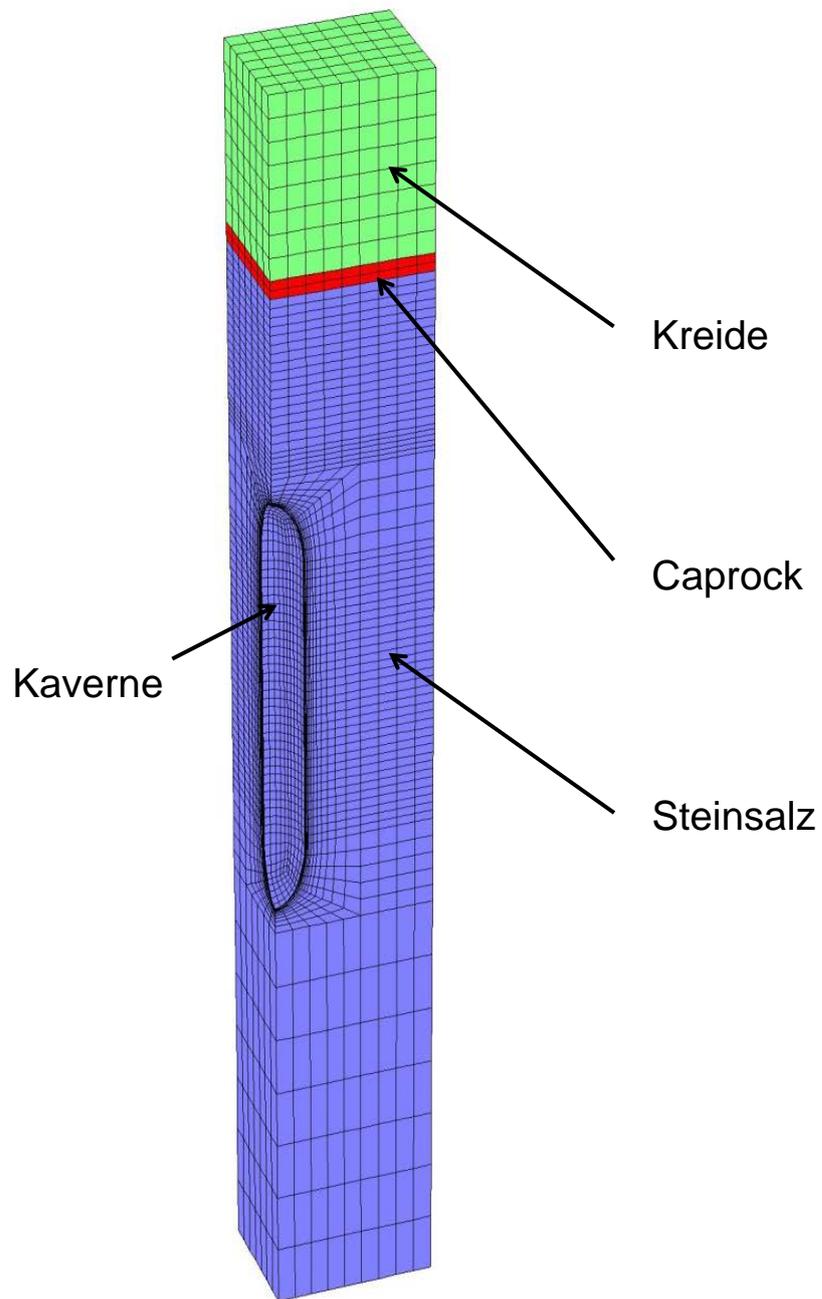


Bild 5.2 *Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell*

Dimensionierung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich

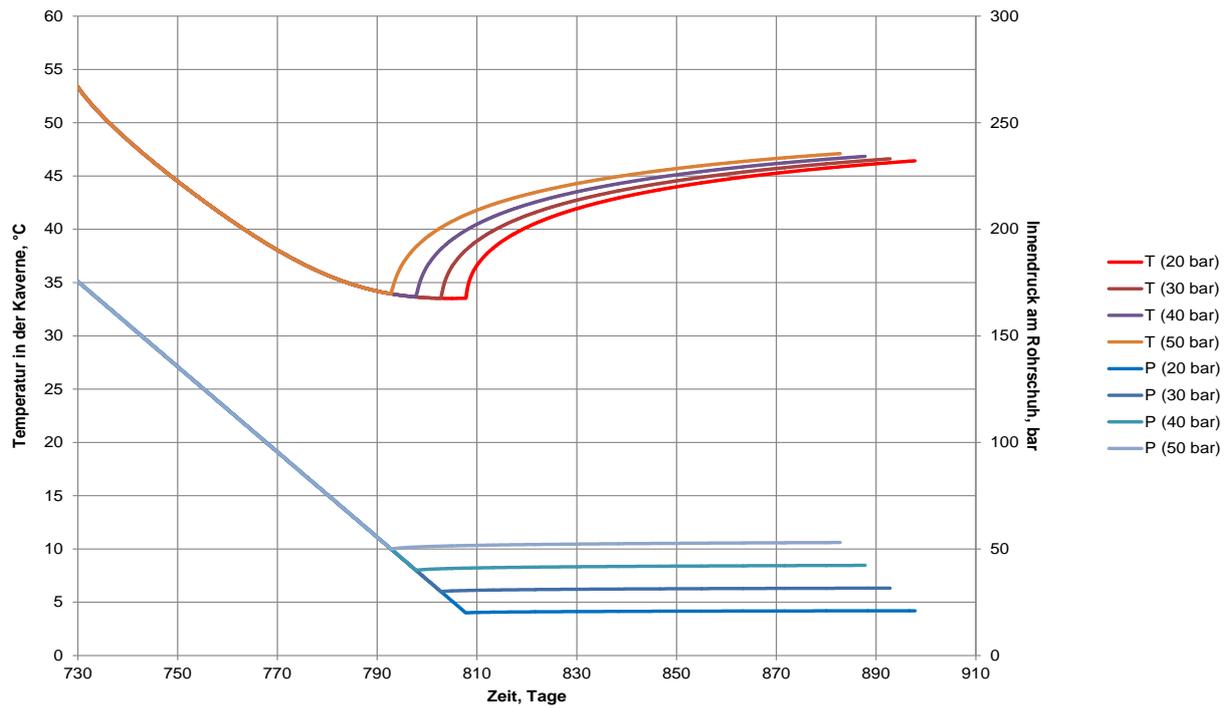


Bild 5.3 Bemessungslastfall zur Minimaldruckermittlung / Temperatur- und Innendruckverläufe

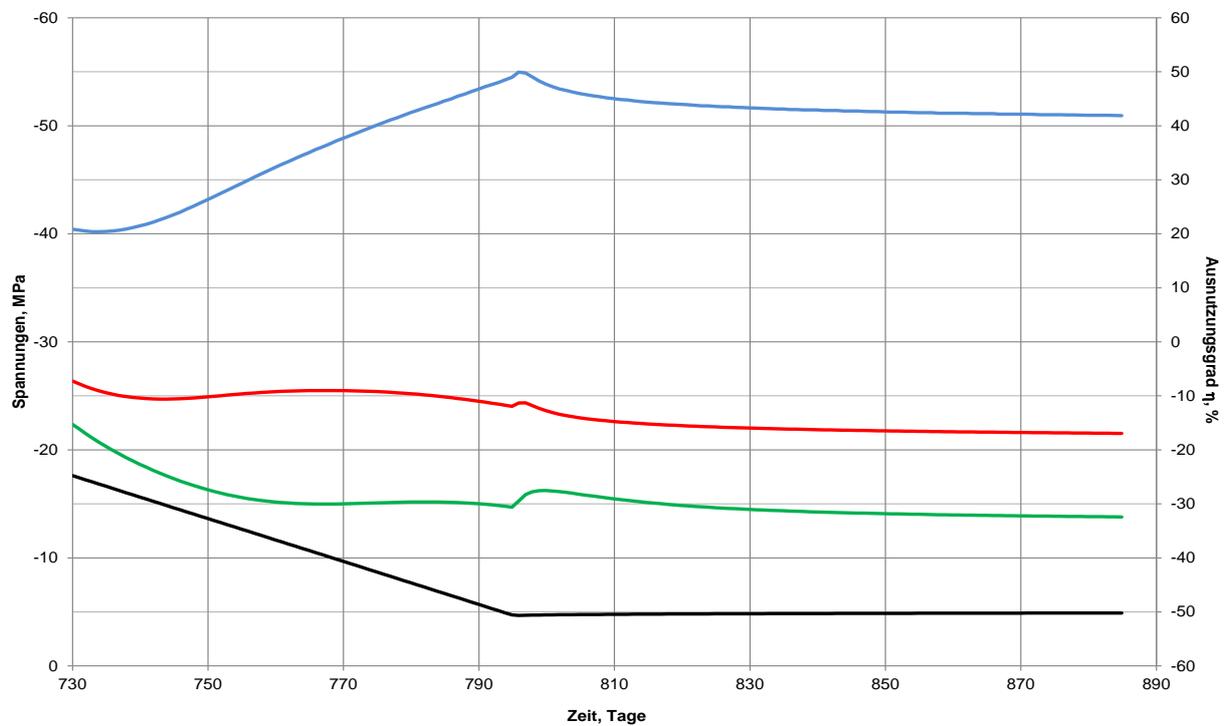


Bild 5.4 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Hauptspannungen und Ausnutzungsgrad über der Zeit

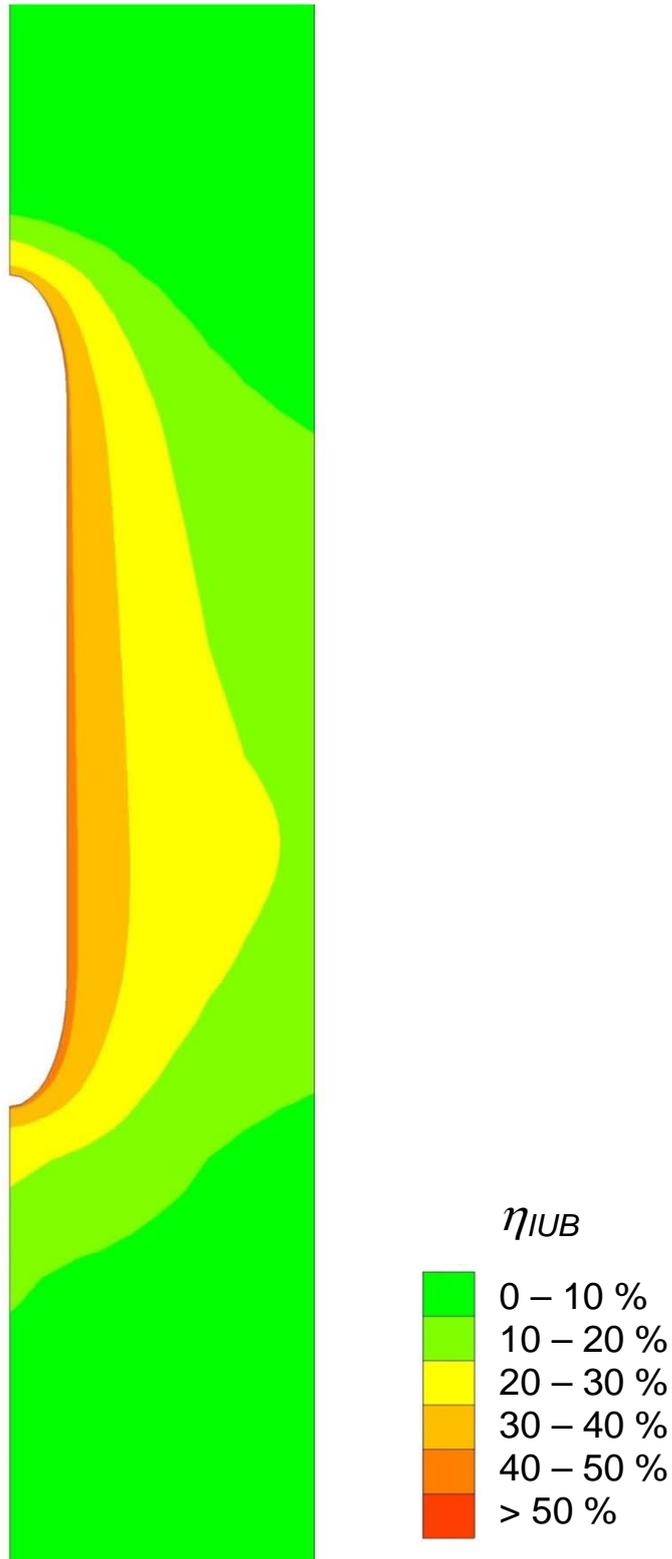


Bild 5.5 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes

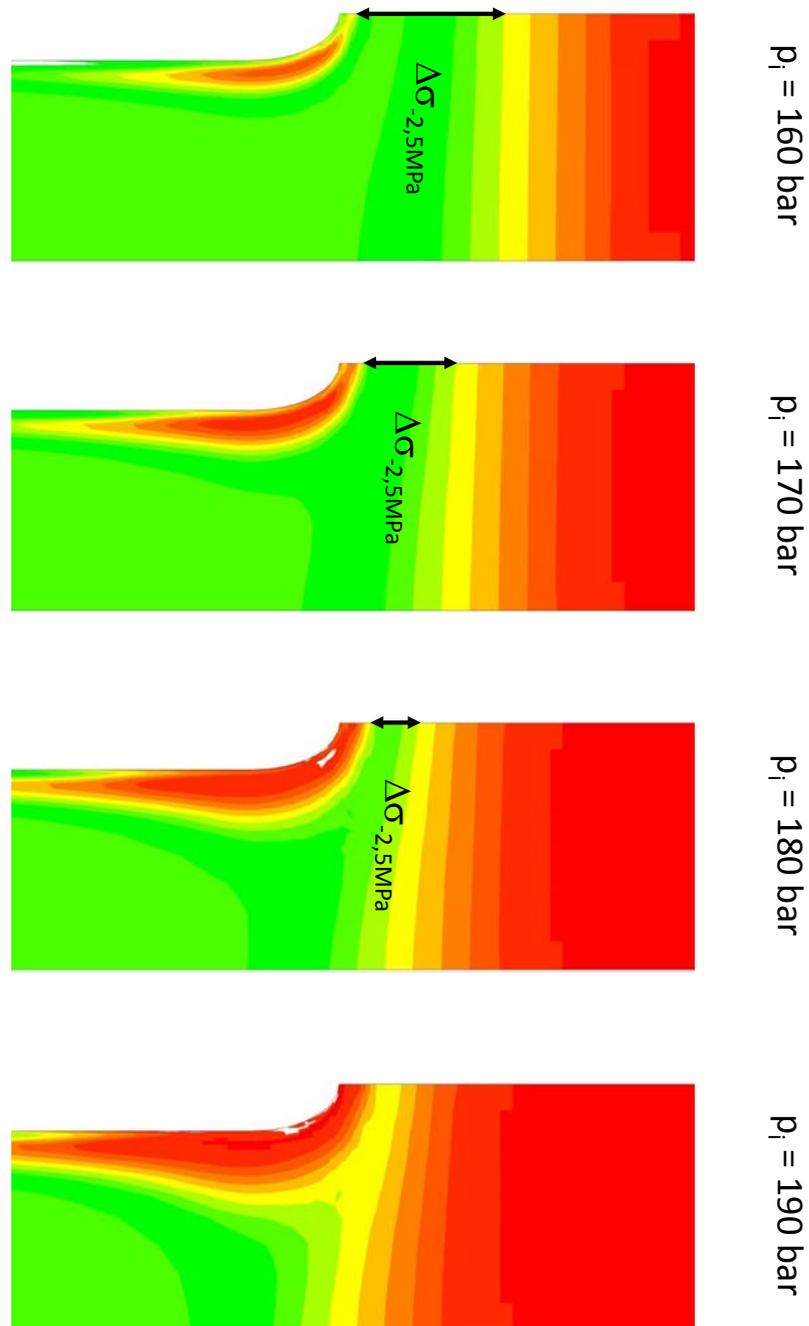


Bild 5.6 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren der Maximaldrücke

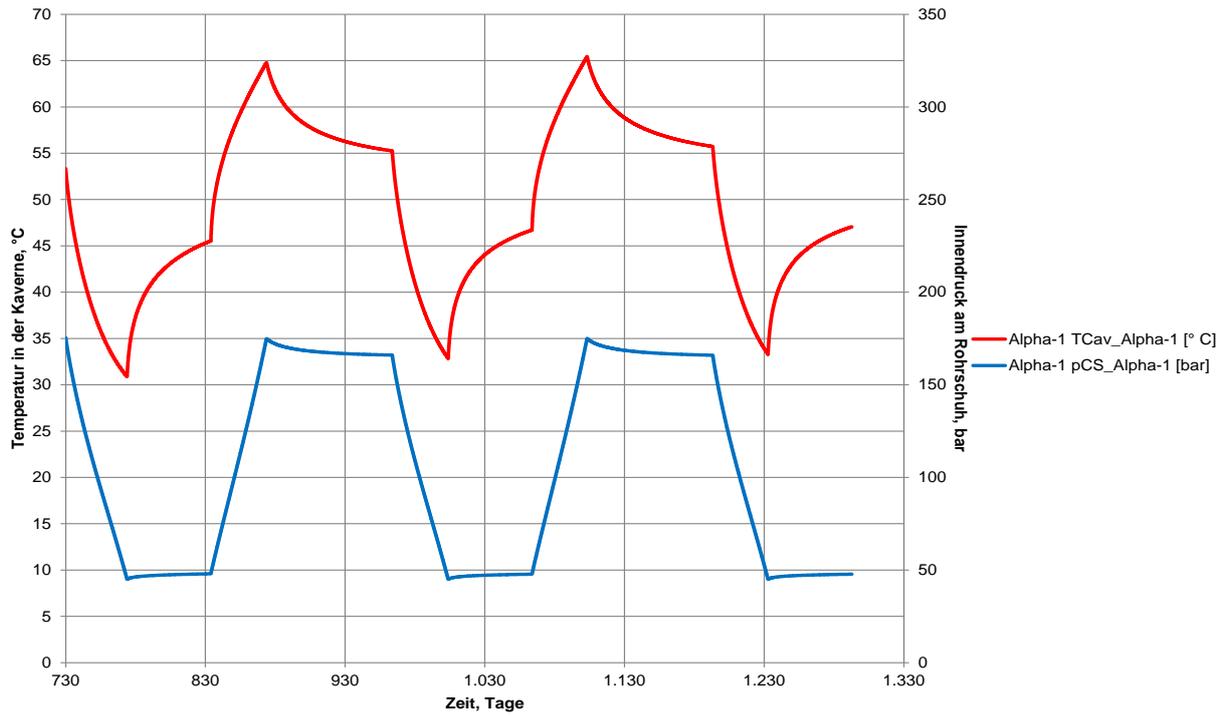


Bild 5.7 Bemessungslastfall zur Ermittlung der Volumenströme / Temperatur- und Innendruckverlauf

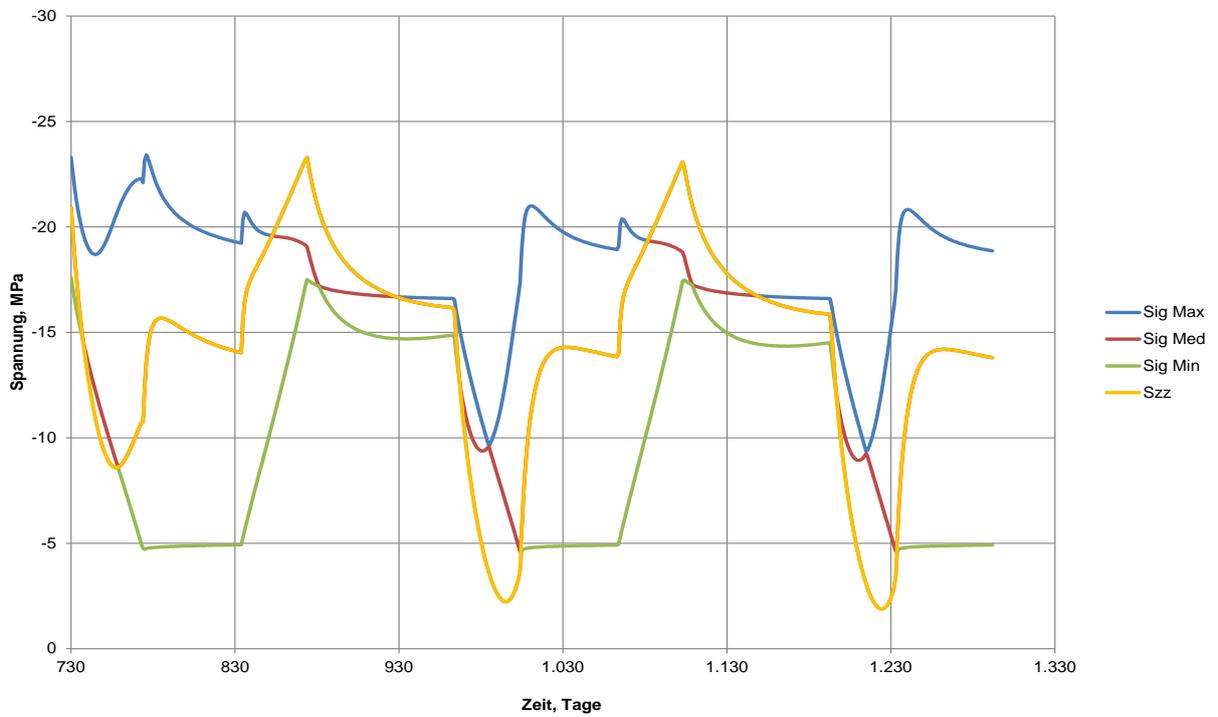


Bild 5.8 Ergebnis der Berechnung des Bemessungslastfalles / Hauptspannungen und Vertikalspannung über der Zeit

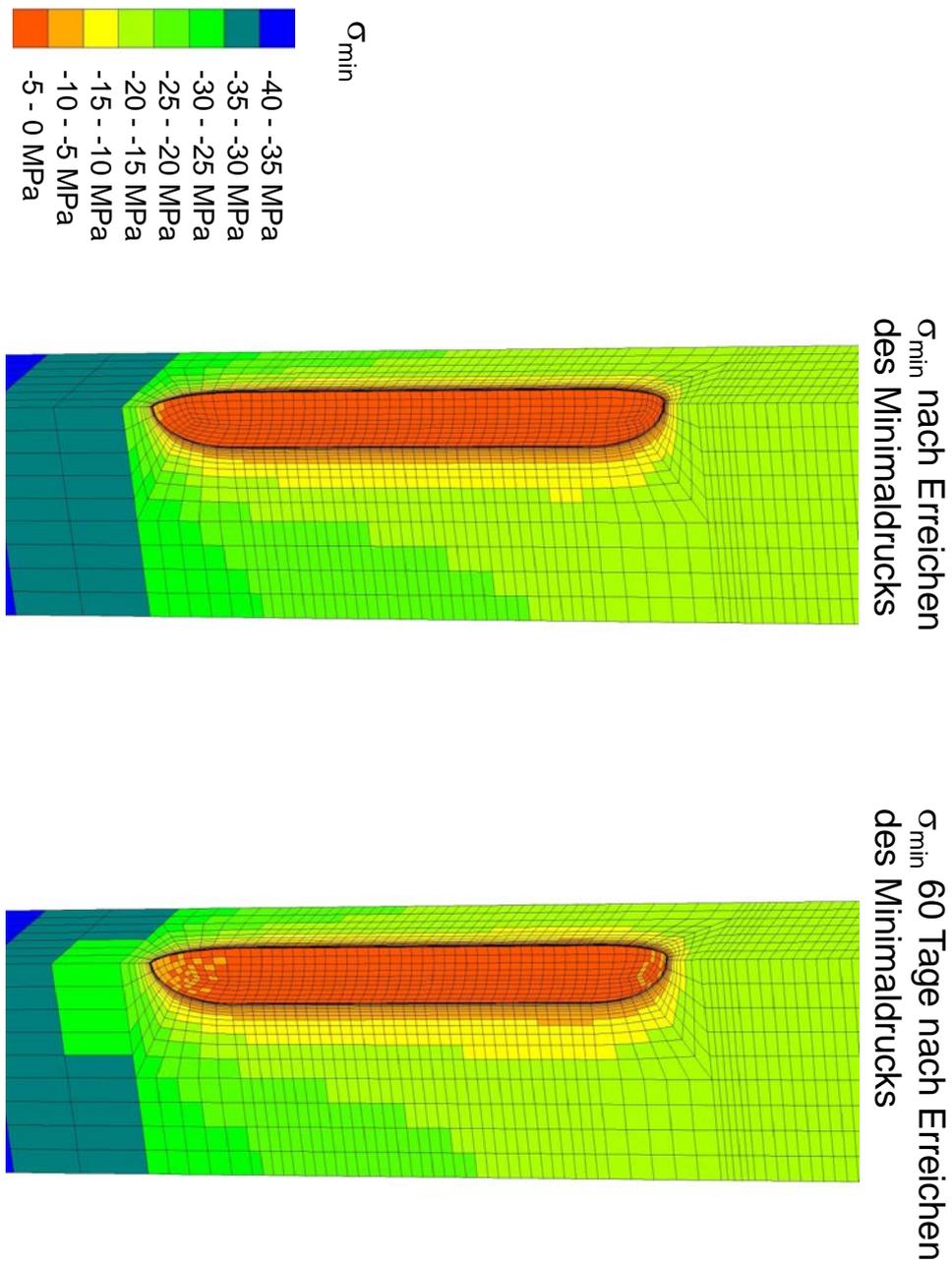


Bild 5.9

Darstellungen der minimalen Hauptspannungskomponente zur Ermittlung der Volumenraten

6 Gebirgsmechanische Untersuchungen für Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich

6.1 Einführung

Die in Kapitel 5 dargestellten Berechnungsergebnisse können als Basis für die Überprüfung eines zulässigen Maximal- bzw. Minimaldruckes herangezogen werden. In diesem Kapitel wird die Frage beantwortet, inwieweit die Dimensionierungskriterien ebenfalls auf eine Speicherkaverne angewendet werden können bzw. erweitert werden müssen, die sich in der Nähe eines Salzstockrandes befindet.

6.2 Aufbau des Berechnungsmodells

Das grundsätzliche Berechnungsmodell ist in Bild 5.1 dargestellt. Für den Aufbau theoretischer Berechnungsmodelle müssen einige Idealisierungen vorgenommen werden, die die vorhandenen Feldbedingungen so vereinfachen, dass eine theoretische Analyse mit vertretbarem Aufwand möglich wird. Diese Vereinfachungen dürfen jedoch nicht so weit gehen, dass dabei wesentliche, das zu analysierende Problem charakterisierende Phänomene verloren gehen.

Aus diesem Grund wurde das Berechnungsmodell in horizontaler x-Richtung mit 1.870 m modelliert, wovon die Hälfte, also 935 m im Modell B als Steinsalz abgebildet wurde. Im Umkehrschluss bedeutet dies für die horizontalen Ausmaße des Salzstocks aufgrund der Symmetrieachse wiederum eine Breite von 1.870 m, welches ein realistisches Maß für einen Salzstock darstellt, in dem Kavernen angelegt werden können. Die andere modellierte Hälfte beinhaltet das Nebengebirge, das als Sandstein angenommen wird.

Insgesamt werden in diesem Modell drei Kavernen in Reihe abgebildet, für die jeweils die gleiche Last- und Temperaturgeschichte auf der Basis der Dimensionierungsparameter aus Kapitel vier angesetzt wird. In horizontaler y-Richtung wird das Modell mit 140 m Abmessung modelliert, was dem halben Abstand von 280 m zwischen den hier angenommenen Kavernenbohrungen entspricht.

Die Abmessung in vertikaler Richtung beträgt insgesamt 2.440 m und umfasst damit einen Teil der Salzstockbasis und im oberen Teil wie auch schon beim Basismodell aus Kapitel 5 die Schichten der Kreide und des Mantelanhydrits.

In Tabelle 6.1 sind die Berechnungsvarianten aufgeführt, die zur Bewertung der Standsicherheit und der Dichtheit der Kaverne im Salzstockrandbereich herangezogen werden und als Grundlage für die Erstellung des Dimensionierungskonzeptes dienen.

Modellversion	Randbedingung
Modell A	Berechnung Kaverne A als Einzelkaverne im kompletten Salzmodell ohne Berücksichtigung des Salzstockrandes
Modell B	Berechnung Kaverne A als Randkaverne in einem Feld mit einer Nachbarkaverne im kompletten Salzmodell ohne Berücksichtigung des Salzstockrandes
Modell C	Berechnung Kaverne A als Randkaverne mit Berücksichtigung des Salzstockrandes (Entfernung 200 m von der Kavernenwand)
Modell D	Berechnung Kaverne A als Randkaverne mit Berücksichtigung des Salzstockrandes (Entfernung 150 m von der Kavernenwand)
Modell E	Berechnung Kaverne A als Randkaverne mit Berücksichtigung des Salzstockrandes (Entfernung 150 m von der Kavernenwand) mit Übergangsschicht (vermindertes Kriechvermögen)
Modell F	Berechnung Kaverne A als Randkaverne mit Berücksichtigung des Salzstockrandes (Entfernung 200 m von der Kavernenwand) mit Übergangsschicht (vermindertes Kriechvermögen)
Modell G	Berechnung Kaverne A als Randkaverne mit Berücksichtigung des Salzstockrandes (Entfernung 130 m von der Kavernenwand) ohne Übergang / $E_{\text{Sandstein}} = 5.000 \text{ MPa}$
Modell H	Berechnung Kaverne A als Randkaverne mit Berücksichtigung des Salzstockrandes (Entfernung 130 m von der Kavernenwand) ohne Übergang / $E_{\text{Sandstein}} = 500 \text{ MPa}$
Modell SO - Sonderfälle	Modell E mit Sonderlastfall Blowout

Tabelle 6.1: Übersicht über die durchgeführten Berechnungen

Die Abfolge der Modelle wurde so gewählt, dass die Einflüsse von einem Salzstockrand auf die Spannungsergebnisse in der Umgebung der Kaverne herausgefiltert werden können. Als Grundlage der Bewertung dienen die Ergebnisse der Berechnungen am rotationssymmetrischen Feldkavernenmodell aus dem vorherigen Kapitel.

6.3 Berechnungen zu Modell A

Das Modell A ist Bild 6.1 dargestellt. Für dieses Berechnungsmodell werden die in Kapitel 5 festgelegten gebirgsmechanischen Parameter erneut berechnet und analysiert.

Das Berechnungsmodell A unterscheidet sich vom Grundmodell aus Kapitel 5 dahingehend, dass die horizontalen Abmessungen vergrößert wurden. In diesem Schritt wird analysiert, wie sich ein größeres Modell auf die Spannungszustände im Kavernenwandbereich und den weiter von der Kaverne entfernten Gebirgsbereichen auswirkt.

Die Belastungsgeschichte wurde bereits mit dem Druck- und Temperaturverlauf in Kapitel 5 gezeigt und wird beibehalten, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Entwicklungsschritten zu gewährleisten.

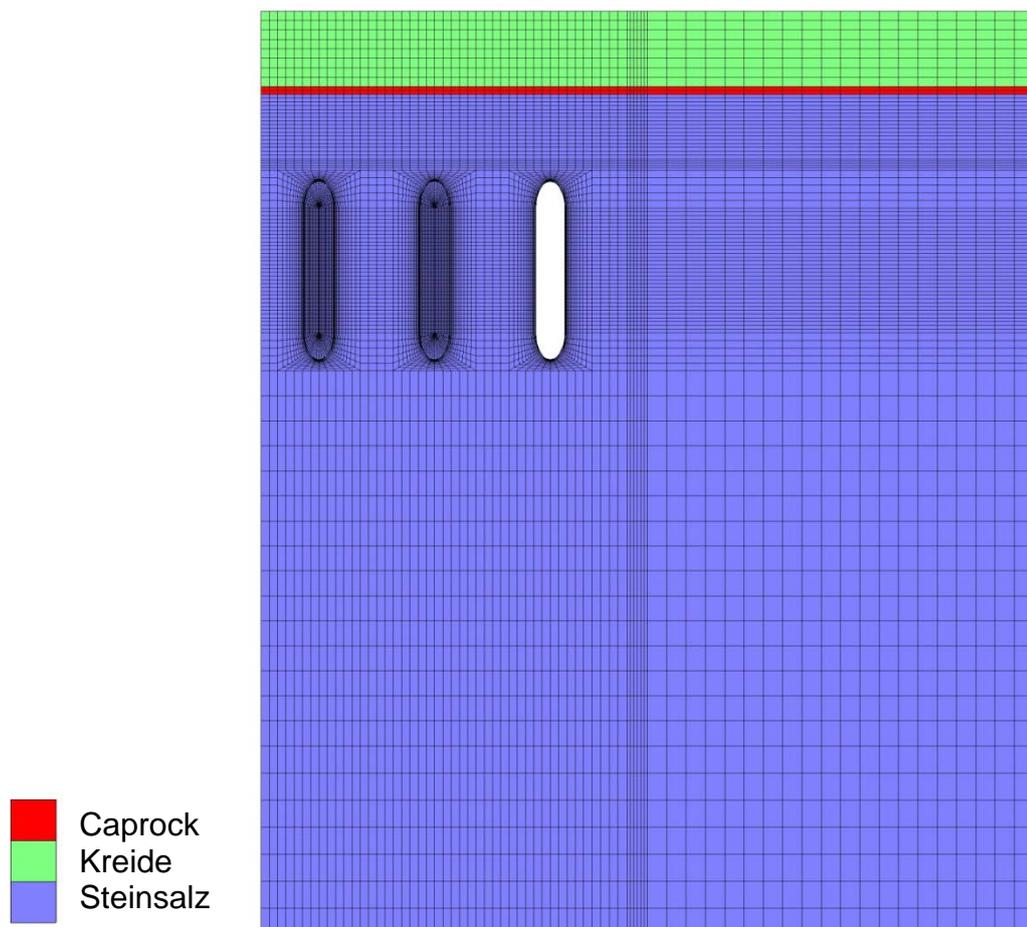


Bild 6.1 Darstellung Berechnungsmodell A

6.3.1 Maximaldruck

Der maximale Kaverneninnendruck wird zum Zeitpunkt des zweiten Anfahrens von $p_{i\text{-max}} = 175$ bar untersucht. Bild 6.2 zeigt die Ausbildung der Sicherheitszonen im Dachbereich der Kaverne. Hieraus ist zu erkennen, dass die Sicherheitszone $\sigma_2 - p_i = -2,5$ MPa einen Wert von ca. 82 m aufweist. Trotz der unterschiedlichen Lastgeschichte, in der die Untersuchung des Maximaldruckes durchgeführt wurde, liegt dieser Wert in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Berechnung der Basiskaverne.

Die Ausbildung der Sicherheitszone wird nachfolgend bei veränderten Randbedingungen in den weiteren Modellen dahingehend untersucht, ob die Nähe der Kaverne zu einem Salzstockrand zu signifikant anderen Ergebnissen führt.

6.3.2 Betriebsraten

Bild 6.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Hauptspannungskomponenten σ_1 , σ_2 und σ_3 über die Zeit. Hierbei zeigt sich, dass der Minimalwert an der Kavernenwand mit ca. $-1,6$ MPa im Druckbereich und in einer ähnlichen Größenordnung wie im Basismodell liegt.

6.3.3 Minimaldruck

Die Bewertung des minimalen Kaverneninnendruckes spielt im Rahmen der Untersuchungen eine große Rolle, da die Spannungsumlagerungsprozesse auf einen relativ großen Gebirgsbereich verteilt sind.

Für das Modell A sind die Berechnungsergebnisse in den Bildern 6.4 bis 6.9 dargestellt. Hierbei zeigt Bild 6.4 die Verteilung des Ausnutzungsgrades η_{IUB} im hohlraumrandnahen Gebirgsbereich zum Zeitpunkt des unmittelbaren Erreichens des minimalen Kaverneninnendruckes von 45 bar. Am Rand wird über die Höhe der Kaverne beispielsweise ein Ausnutzungsgrad von ca. 45% - 50% erreicht, der mit zunehmender Entfernung vom Hohlraumrand abnimmt. Bild 6.5 zeigt die Verteilung von η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Anfahren des Minimaldruckes. Infolge des Kriechvermögens des Steinsalzes werden die Spannungsspitzen am Rand und damit auch die Ausnutzung des Materials abgebaut auf Werte um 40%. Weiter vom Hohlraum entfernte Gebirgsbereiche erfahren hingegen eine moderat erhöhte Ausnutzung.

Bild 6.6 zeigt einen horizontalen Schnitt in einer Teufe von 1.412 m, also in einem unteren Bereich der Kaverne. Erfahrungsgemäß sind hier aufgrund des höheren Gebirgsdruckes höhere Ausnutzungsgrade zu erwarten.

Zu erkennen ist der unterschiedliche Einfluss auf den Ausnutzungsgrad in verschiedenen Richtungen. Während zu den freien Rändern hin der Ausnutzungsgrad schnell absinkt, verbleibt er im Bereich der Symmetrieachse zu einer möglichen Nachbarkaverne im Wertebereich oberhalb von 20%. 60 Tage nach Erreichen des Minimaldrucks wird diese Tendenz weiter verstärkt. In Bild 6.7 weisen weitere Gebirgsbereiche Werte von $\eta_{IUB} > 20\%$ auf.

In einem Schnitt (Bild 6.8) in horizontaler x-Richtung, d.h. entlang der längsten Seite sind die Ausnutzungsgrade als Linienplot zu den beiden bereits erläuterten Zeitpunkten aufgetragen. Dieser Schnitt befindet sich in einer Teufe von 1.425 m. Zusätzlich sind in dem Diagramm die Hohlraumränder mit gestrichelten schwarzen Linien dargestellt. Die Ergebnisse aus den Isolinenbildern werden hierin wiedergegeben. Am Hohlraumrand wird ein maximaler Wert von ca. 47 % erreicht.

Nach 60 Tagen ist ein Wert von ca. 43 % für den Ausnutzungsgrad dem Diagramm zu entnehmen. Untersuchungen zum Pfeilerkernbereich werden im Modell A nicht durchgeführt, da in horizontaler x-Richtung keine Nachbarkaverne und kein Salzstockrand modelliert wurden.

Bild 6.9 zeigt den Verlauf der Hauptspannungen und des Ausnutzungsgrades η_{IUB} in einem Randpunkt in der Teufe von 1.405 m an. Bezüglich möglicher Zugspannungen in diesem Gebirgsbereich kann festgestellt werden, dass diese aufgrund des höheren Gebirgsdruckes in der Teufe gegenüber dem Kavernendachpunkt als maßgebendem Auswertungsbereich nicht registriert werden.

Das Hauptaugenmerk gilt hierbei dem zeitlichen Verlauf des Ausnutzungsgrades, da der maximale Wert im Rahmen des angesetzten Bemessungslastfalles nicht zwingend beim Erreichen des minimalen Kaverneninnendruckes gegeben sein muss.

Der in blau dargestellte η_{IUB} -Verlauf zeigt, dass in diesem Auswertungspunkt an der Kaverne wand ein maximaler Wert von ca. 49 % etwa einen Tag nach der dritten Absenkung des Innendruckes auf einen Minimaldruck von 45 bar berechnet wird. Hieraus wird deutlich, dass die Auswertung nicht nur eine dreidimensionale Betrachtungsweise um die Kaverne herum erfordert, sondern zusätzlich auch die zeitliche Entwicklung der Spannungsverhältnisse in die Analyse einbezogen werden muss.

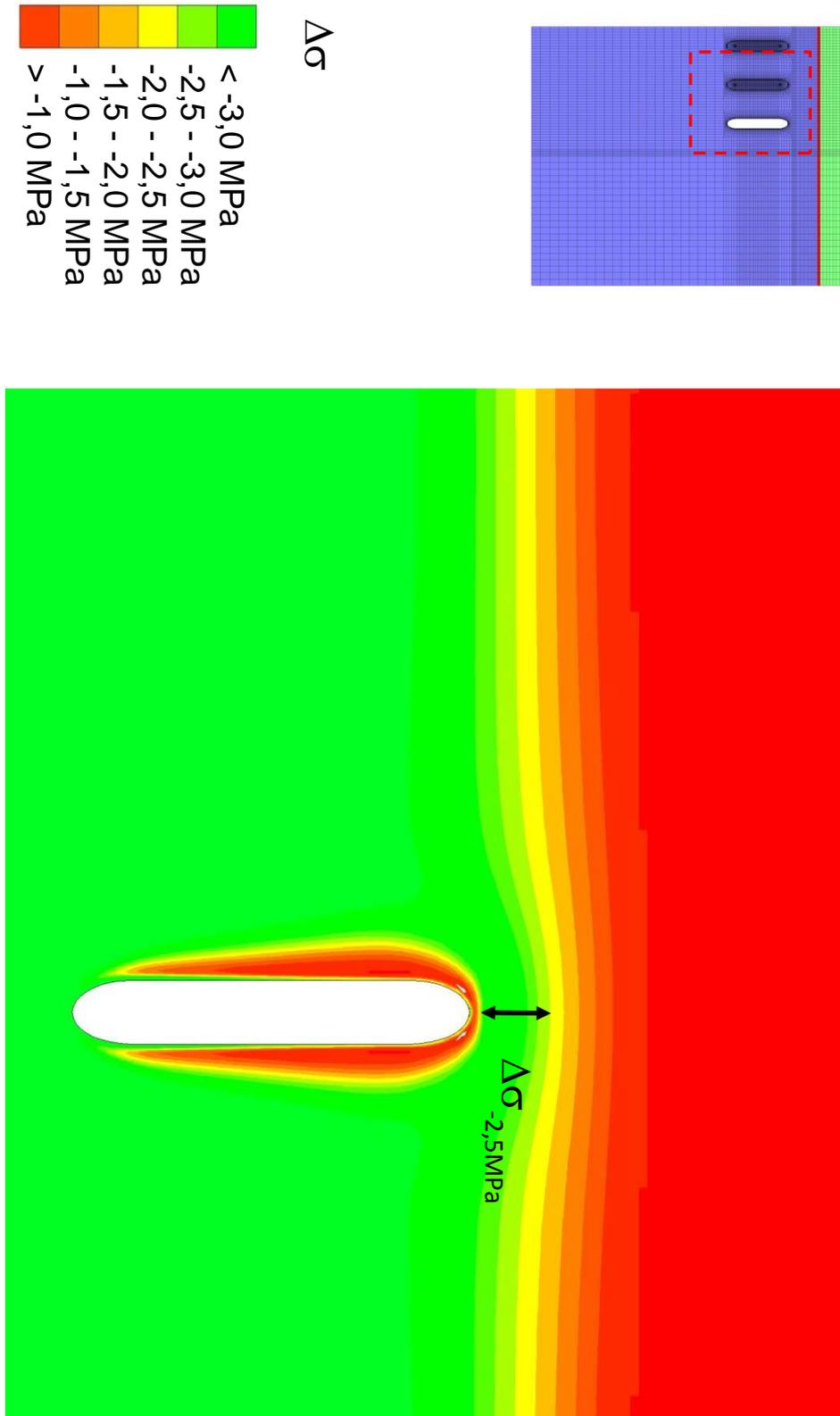


Bild 6.2 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren des Maximaldruckes

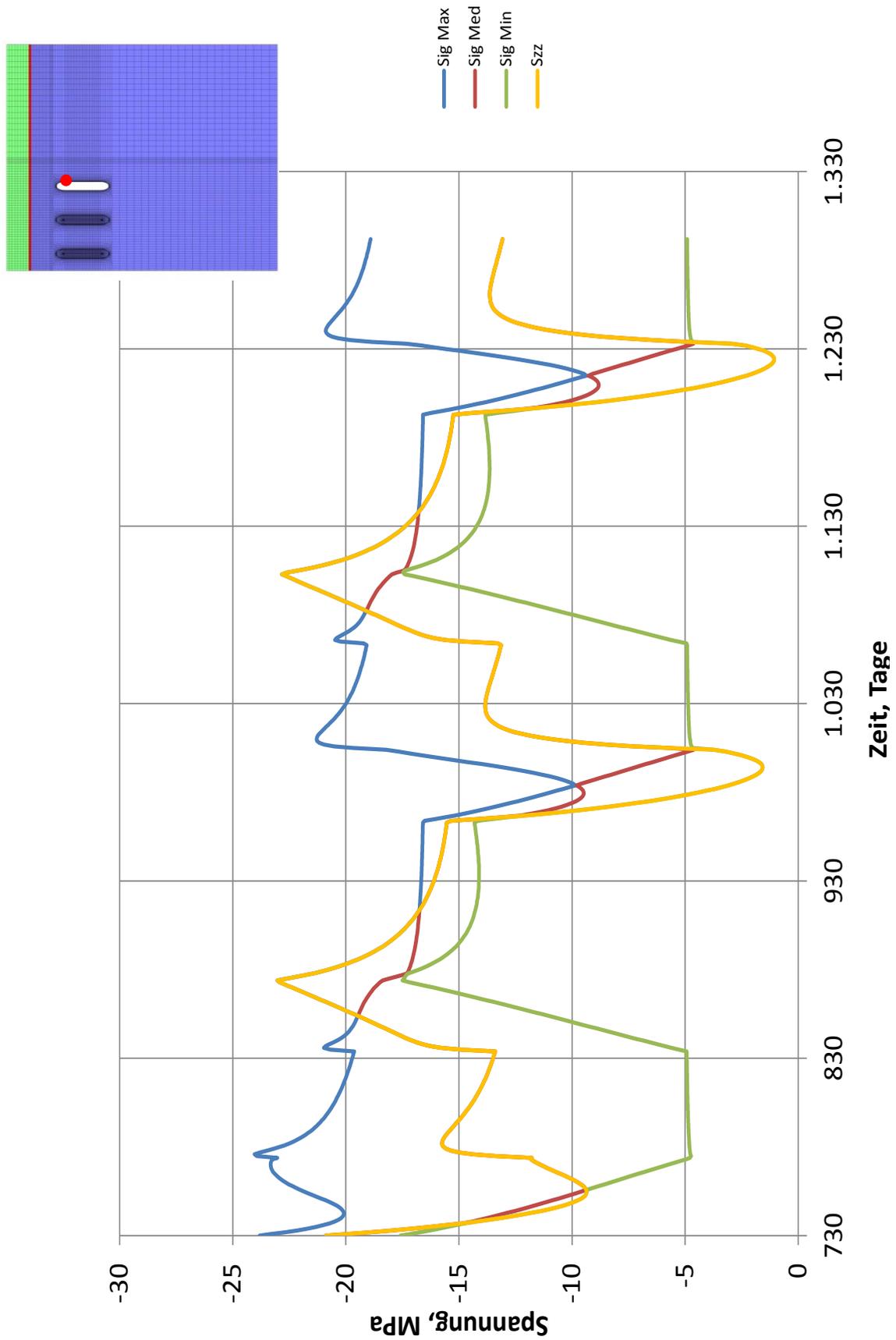


Bild 6.3

Ergebnis der Berechnung des Bemessungslastfalles / Hauptspannungen und Vertikalspannung über die Zeit

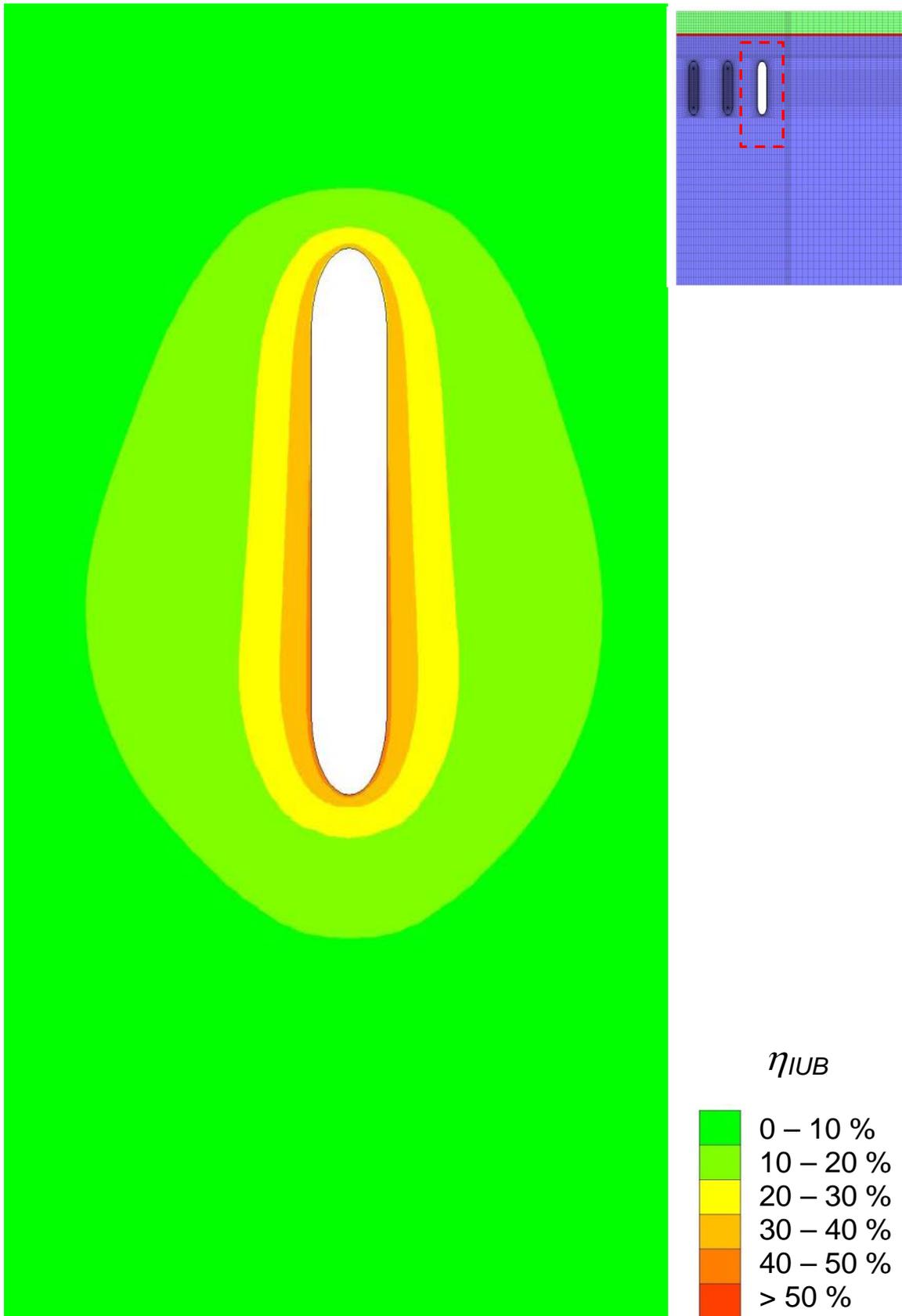


Bild 6.4

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt

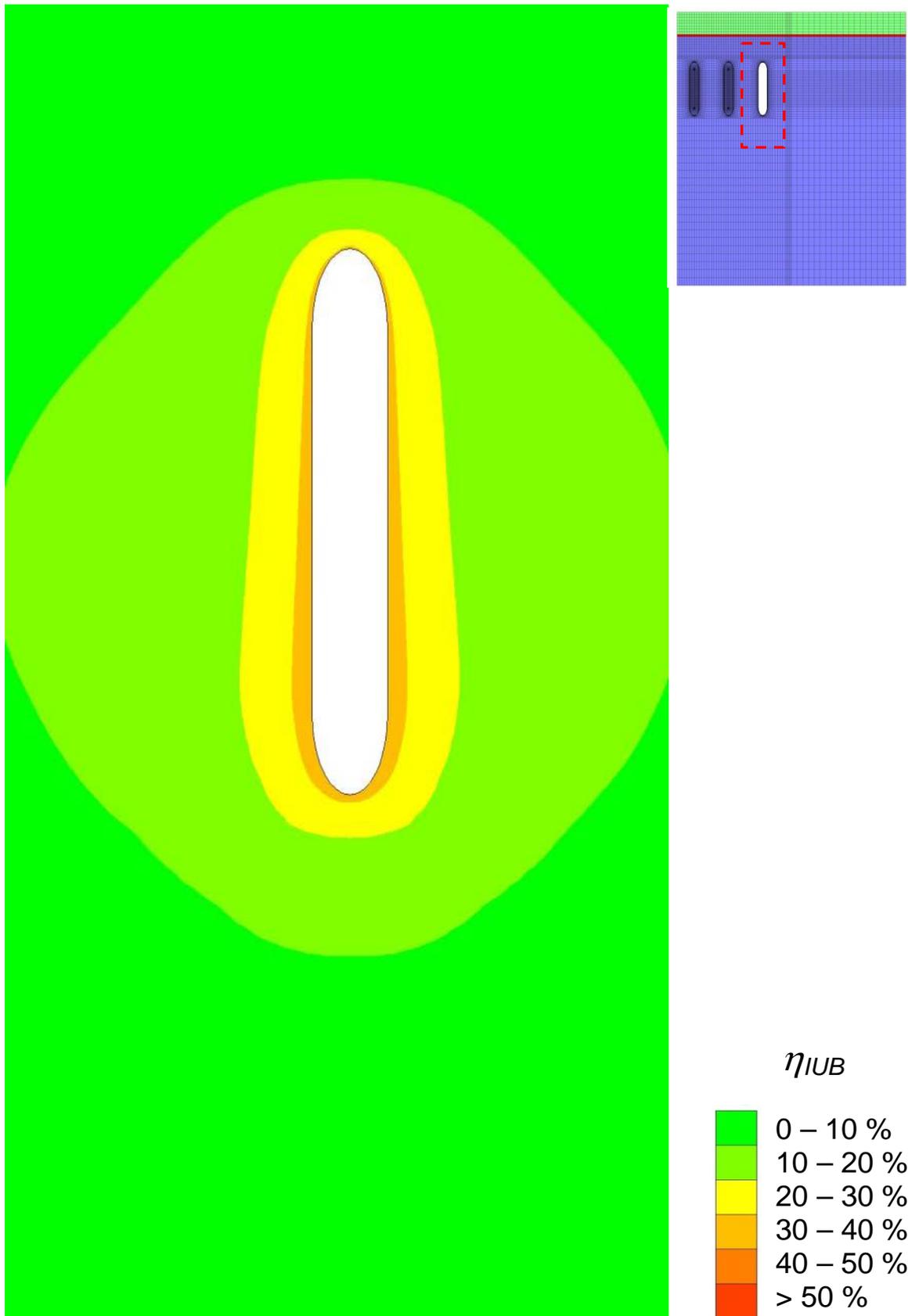


Bild 6.5

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt

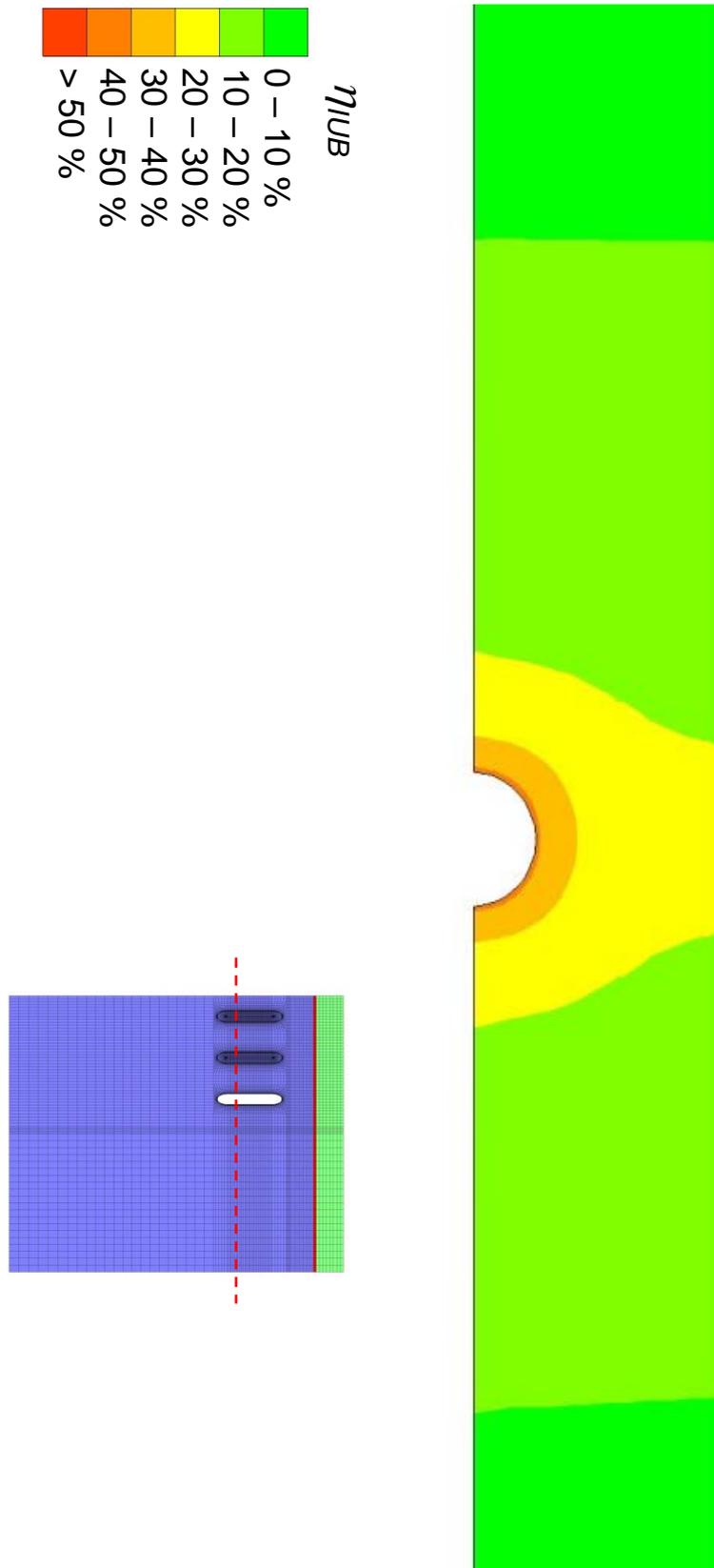


Bild 6.6

$p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Horizontalschnitt

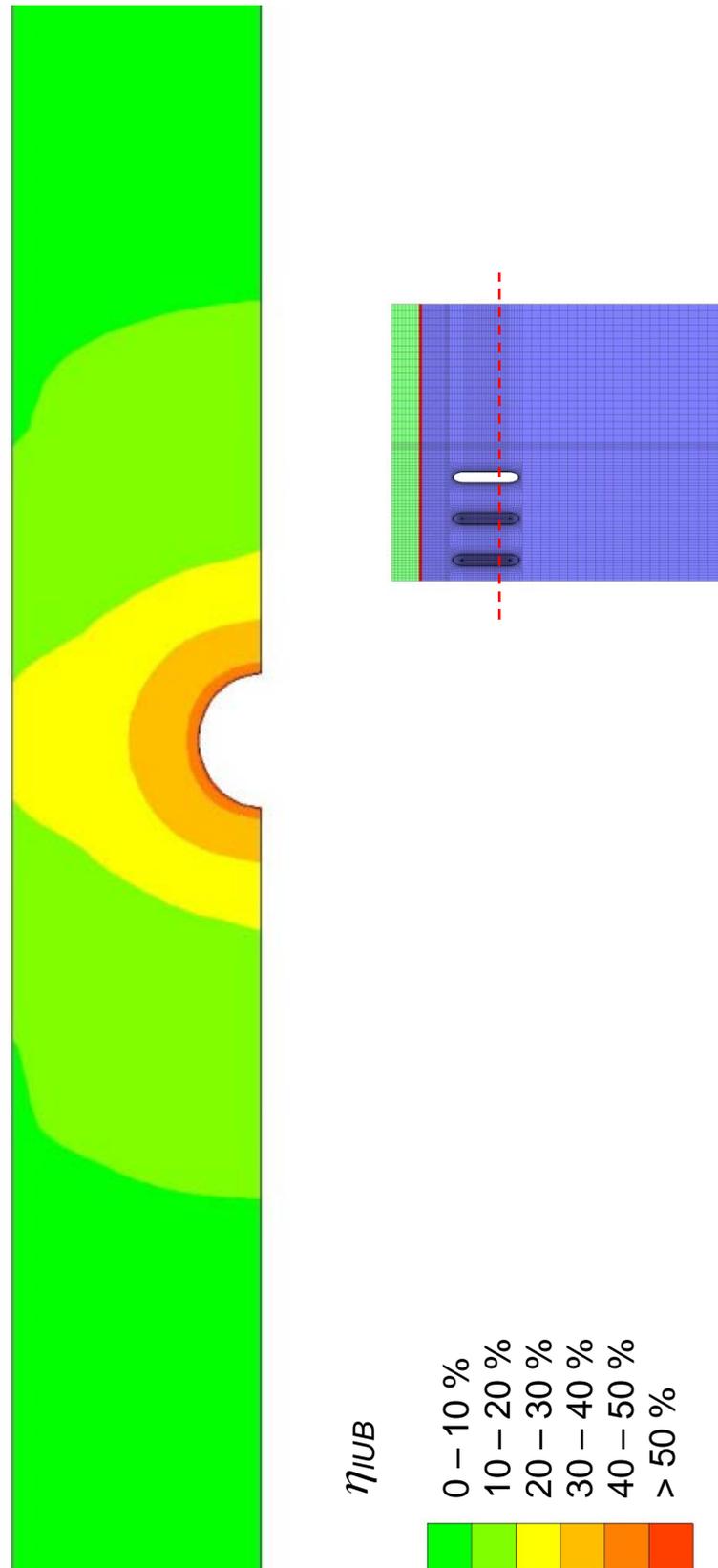


Bild 6.7

$p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Horizontalschnitt

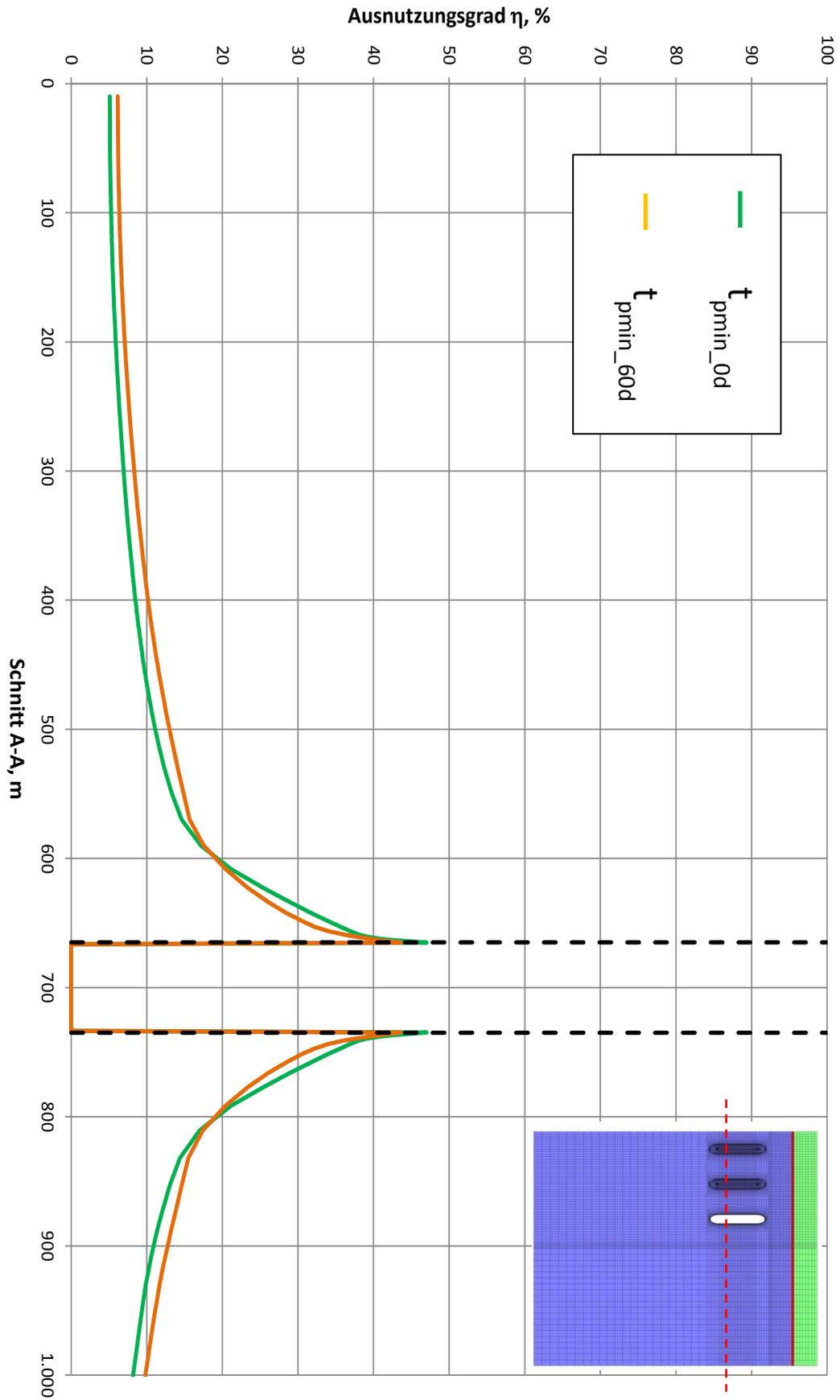


Bild 6.8

Ausnutzungsgrad im Horizontalschnitt zu den Zeitpunkt t_{pmin_0d} und t_{pmin_60d}

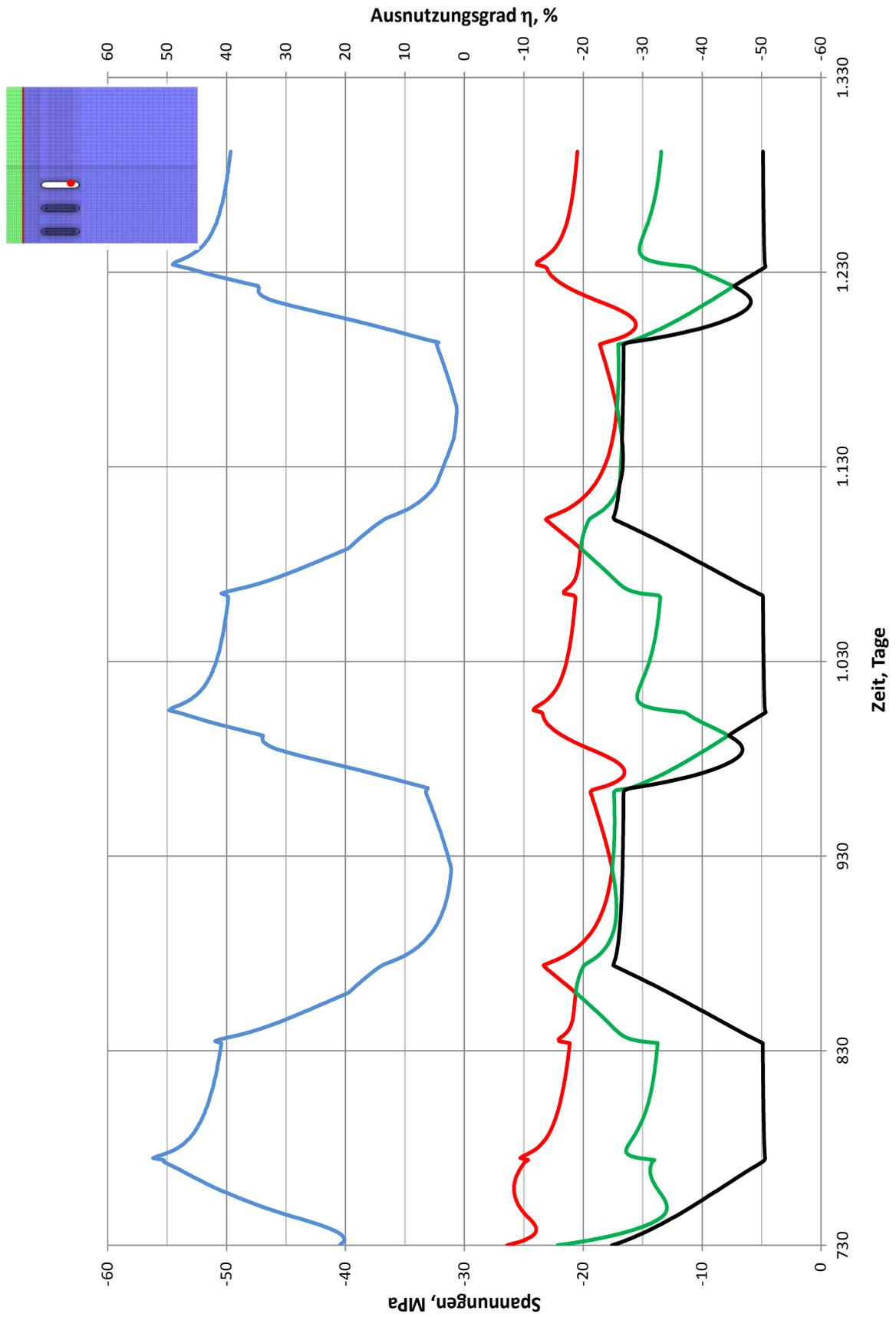


Bild 6.9 Hauptspannungen und Ausnutzungsgrad über die Zeit

6.4 Berechnungen zu Modell B

Modell B baut auf den Annahmen von Modell A auf. Der Unterschied zwischen diesen beiden Modellen besteht darin, dass zusätzlich zu der bereits im vorherigen Modell berechneten Kaverne nun zwei weitere Kavernen berücksichtigt werden, um die Beeinflussung einer Nachbarkaverne zu der betrachteten Randkaverne zu untersuchen.

Die Lastgeschichte bezüglich Druck- und Temperaturverlauf im Bemessungslastfall wird für alle drei Kavernen analog zur Basiskaverne aus Kapitel 5 wie auch zur Modellvariante A angenommen.

Mit dieser Annahme soll im Rahmen der Untersuchungen analysiert werden, welchen Einfluss die Randlage im Feld auf die Dimensionierungskriterien Maximal- und Minimaldruck sowie Betriebsraten hat. Hierbei spielt ein möglicher Salzstockrand zunächst keine Rolle.

Bild 6.10 zeigt das Berechnungsmodell B mit der Berücksichtigung von drei Kavernen.

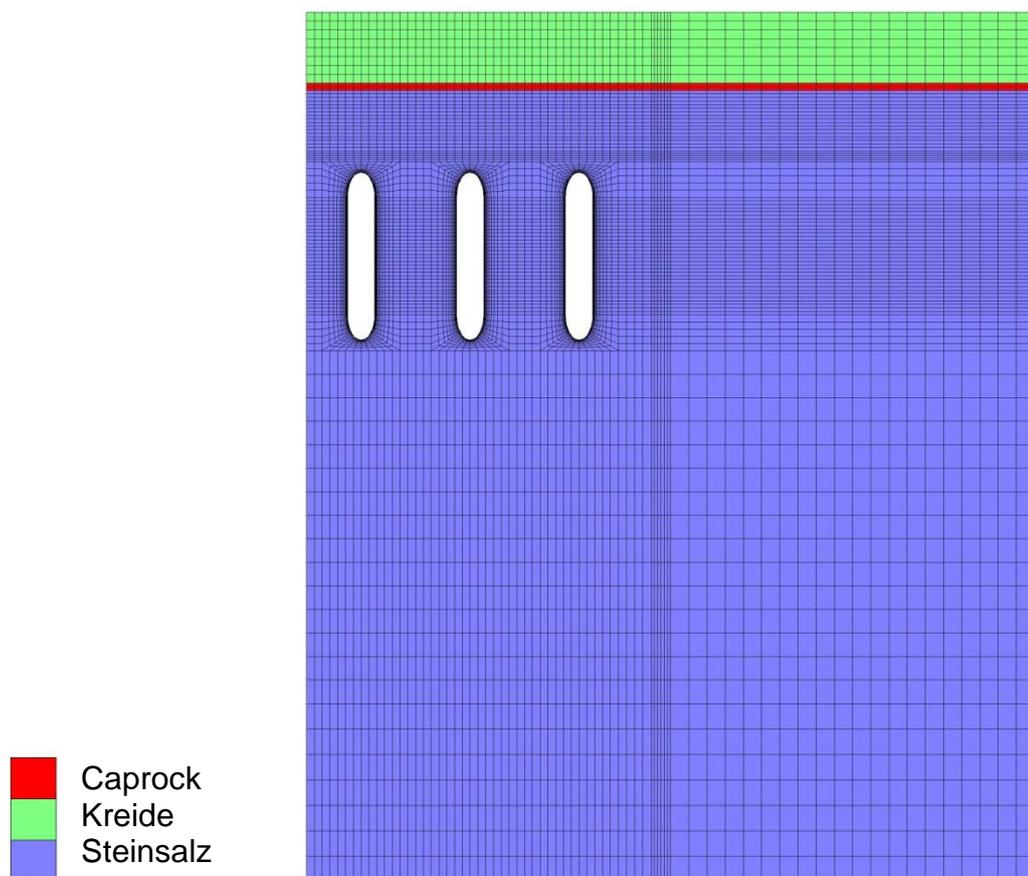


Bild 6.10 Darstellung des Berechnungsmodells B

6.4.1 Maximaldruck

Der maximale Kaverneninnendruck wird wiederum zum Zeitpunkt des zweiten Anfahrens von $p_{i-max} = 175$ bar untersucht. Bild 6.11 zeigt die Ausbildung der Sicherheitszonen im Dachbereich der Kaverne. Zunächst ist ein deutlicher Einfluss der Randlage der Kaverne auf die Ausbildung der Sicherheitszonen zu erkennen. Diese sind nicht mehr wie in den vorherigen Modellberechnungen symmetrisch ausgebildet, sondern es zeigt sich eine Abminderung der Zonen in Richtung der Nachbarkavernen. Bild 6.12 zeigt die Ausrichtung der lokalen Hauptspannungen in der Betrachtungsebene. Insbesondere in dieser Darstellung wird deutlich, dass sich die Hauptspannungen nicht mehr symmetrisch um die Kaverne herum ausbilden, sondern eine leichte Asymmetrie in Richtung der Nachbarkaverne von der zu betrachtenden Randkaverne zeigen. Dieses Ergebnis kann auch aus den Untersuchungen von Achmus et al. /51/ bezüglich der Interaktion zweier benachbarten Kavernen mit unterschiedlichen Teufenlagen und Innendruckverläufen entnommen werden.

Die berechnete Sicherheitszone $\sigma_2 - p_i = -2,5$ MPa weist in der geringsten Ausdehnung einen Wert von 70 m auf und ist damit kleiner als im Vergleich zu den vorherigen Modelluntersuchungen.

6.4.2 Betriebsraten

In Bezug auf die zu bewertenden Spannungsverläufe am Hohlraumrandpunkt im Dachbereich ist keine signifikante Beeinflussung aus der Randlage der Kaverne bzw. der Annahme einer Nachbarkaverne zu erkennen. Der minimale Wert der Druckspannung, der sich aus der Annahme des Bemessungslastfalles ergibt, beträgt ca. -1,9 MPa Druckspannung.

Bild 6.13 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen am Modell B.

6.4.3 Minimaldruck

Im Isolinenbild nach Erreichen des Minimaldrucks in allen drei Kavernen von 45 bar ist ein deutlicher Unterschied zu den Ergebnissen aus Modellberechnung A zu erkennen. Durch die Berechnung zweier weiterer Kavernen wird der Pfeilerkernbereich zwischen den Kavernen stärker belastet und weist im Ausnutzungsgrad η_{IUB} zu beiden betrachteten Zeitpunkten (Bild 6.14 zum Zeitpunkt des Erreichens des Minimaldruckes und Bild 6.15 60 Tage nach dem Erreichen von p_{i-min}) Werte von >20 % auf. Zum freien Salzstockrand hin sinkt der Wert von η_{IUB} schnell ab, was auch in der Betrachtung der Horizontalschnitte in Bild 6.16 und 6.17 deutlich wird.

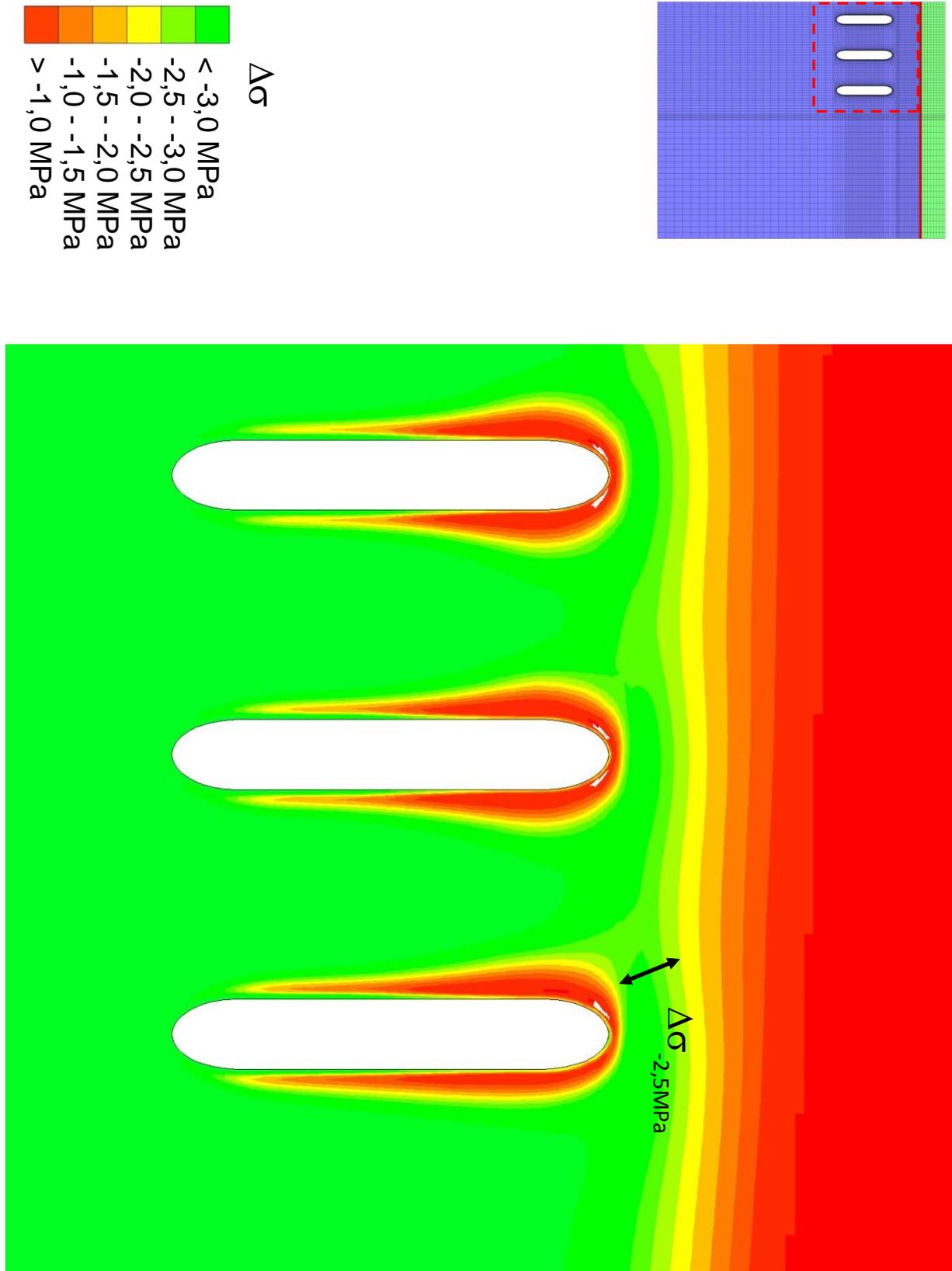


Bild 6.11 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren des Maximaldruckes

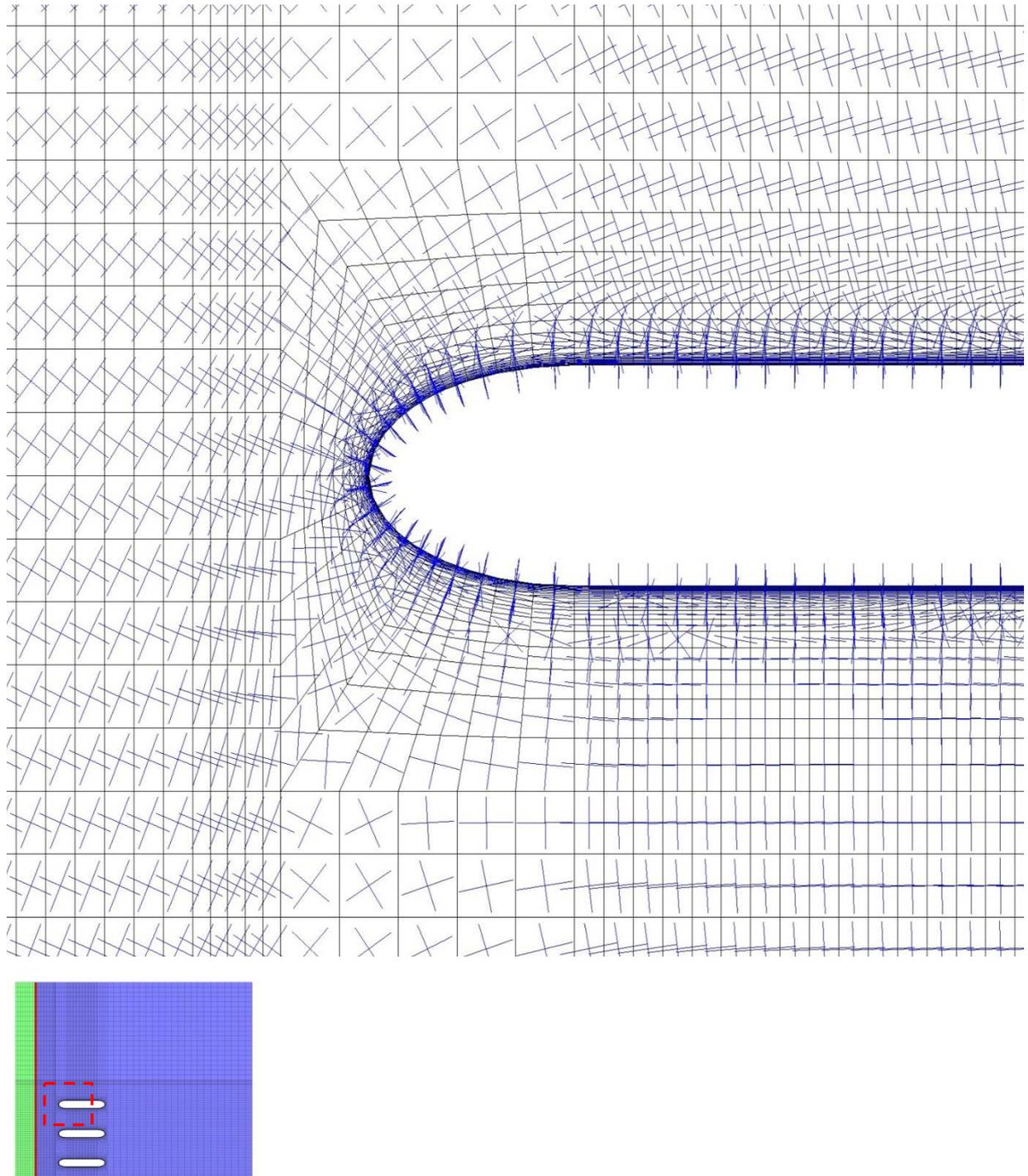


Bild 6.12 Darstellung der Hauptspannungstensoren zum Zeitpunkt des Anfahrens des Maximaldruckes

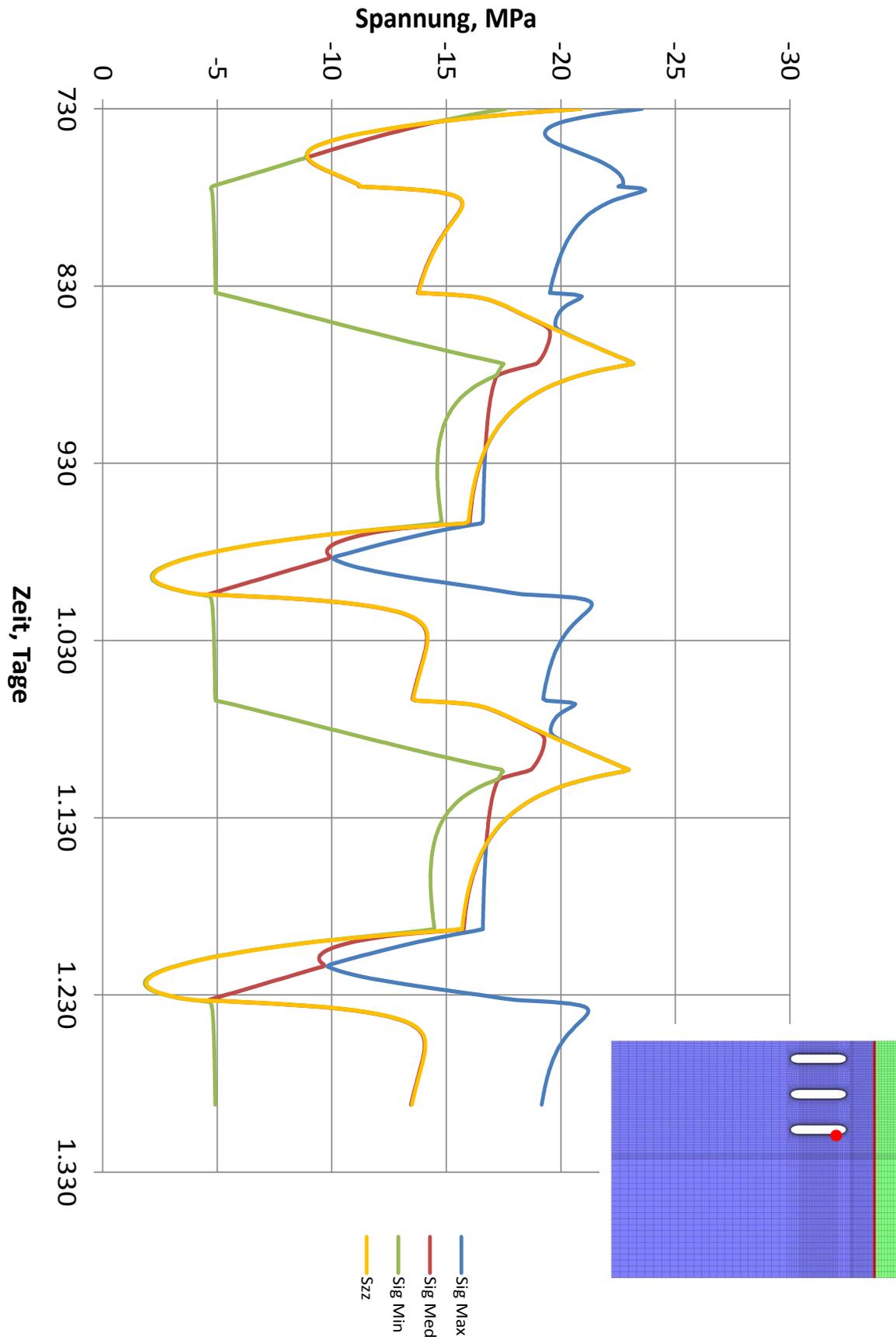


Bild 6.13 Ergebnis der Berechnung des Bemessungslastfalles / Hauptspannungen und Vertikalspannung über der Zeit

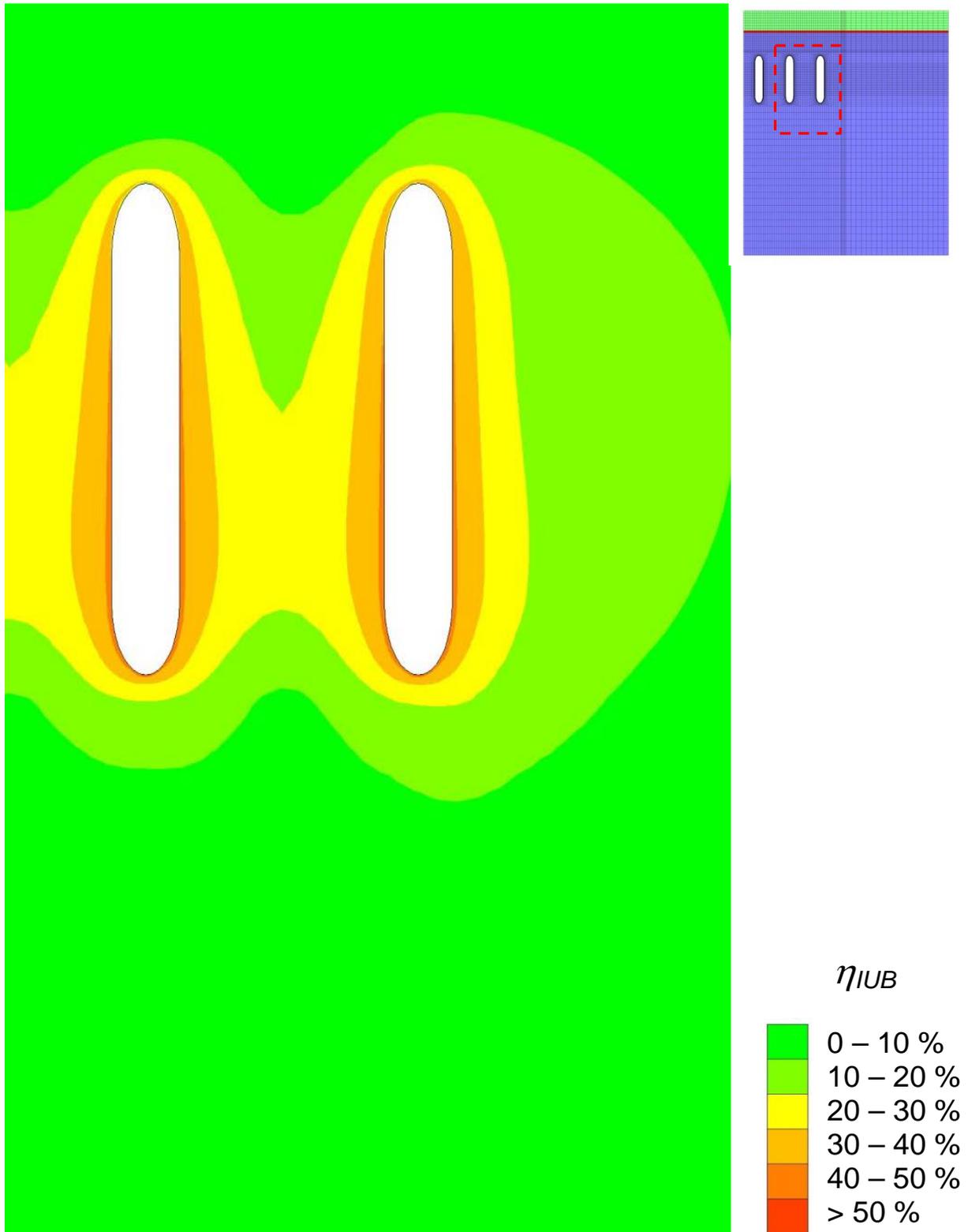


Bild 6.14 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt

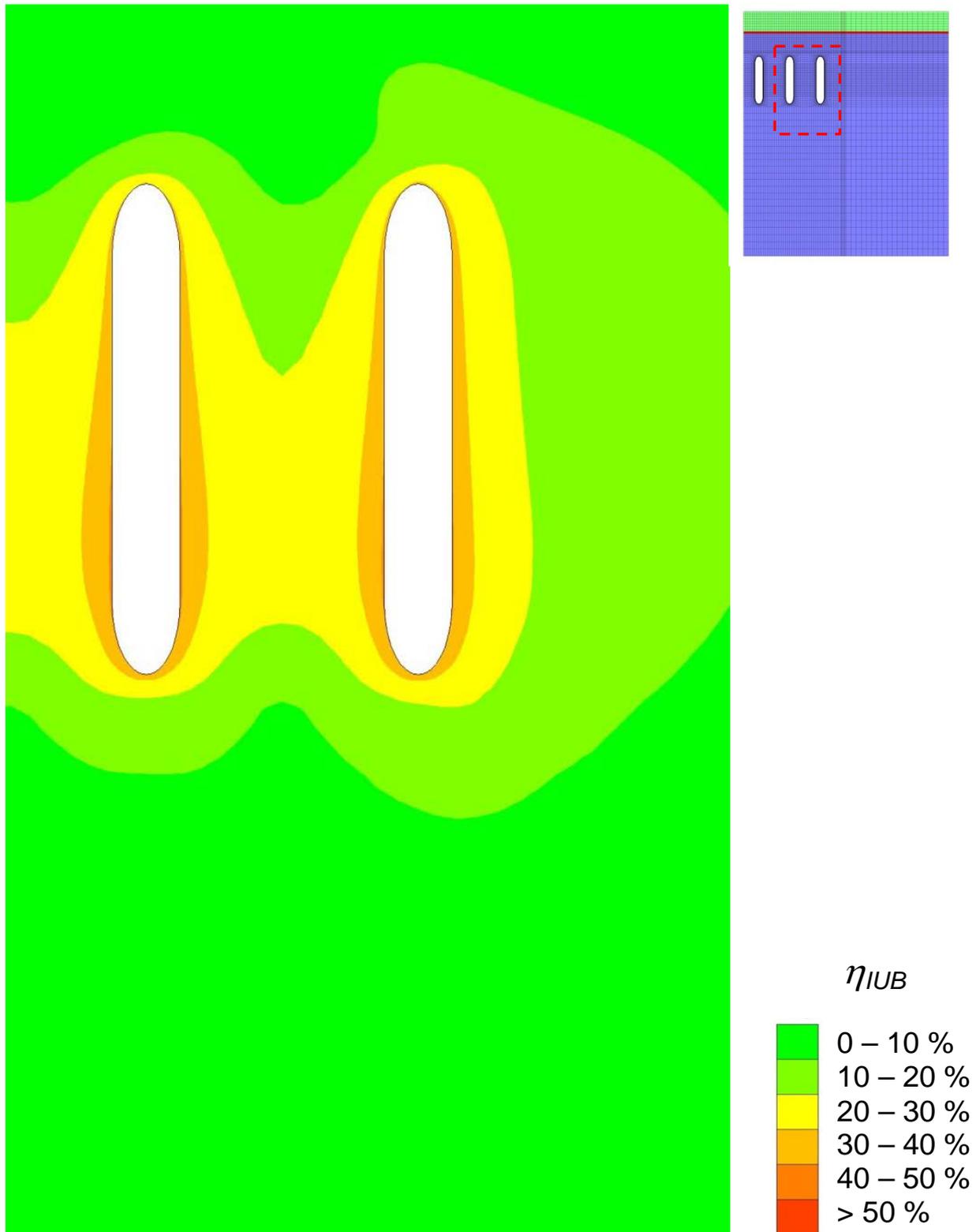


Bild 6.15 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt

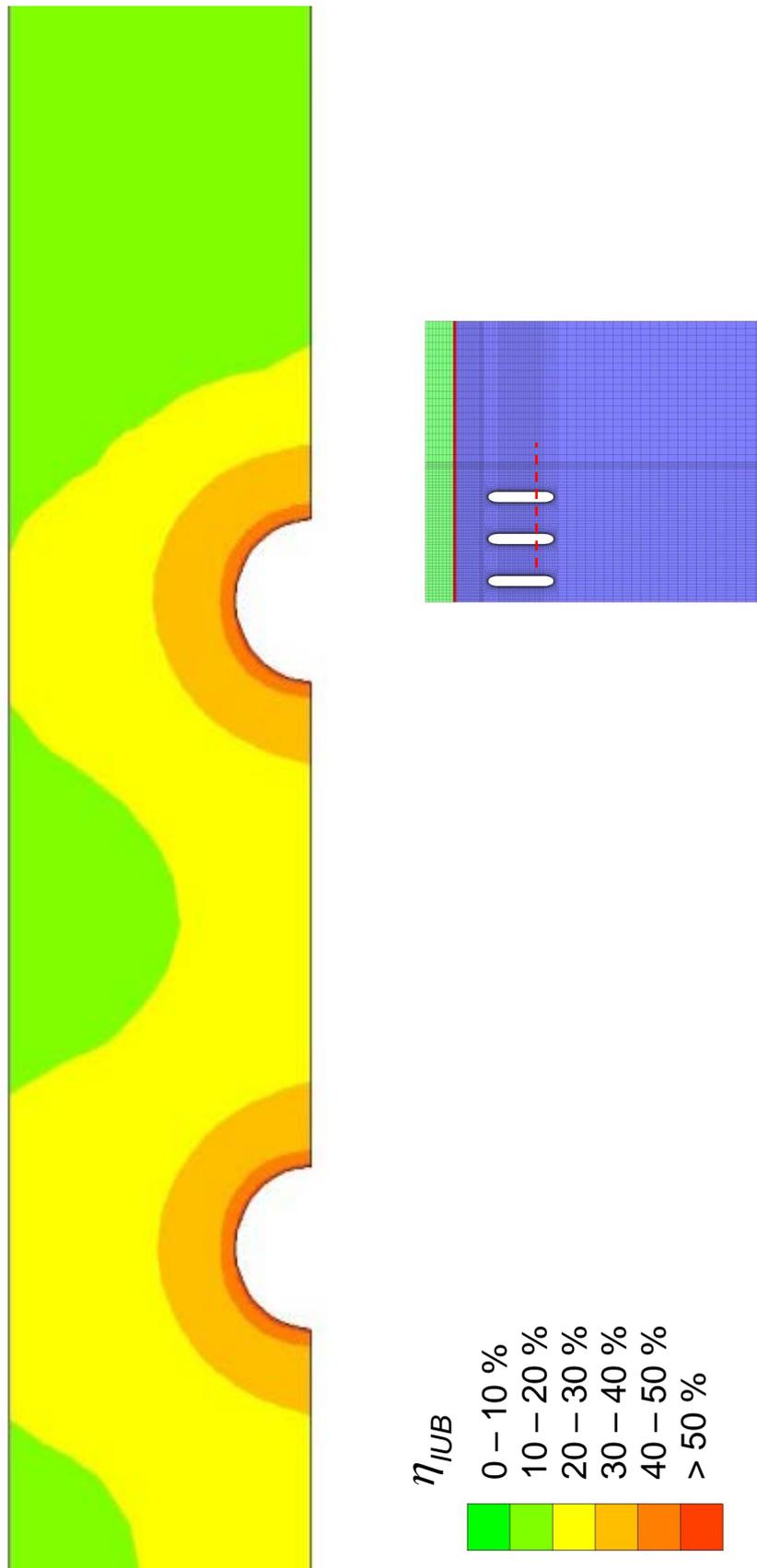


Bild 6.16 $p_{F-min} = 45 \text{ bar} / \eta_{IUB}$ zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Horizontalschnitt

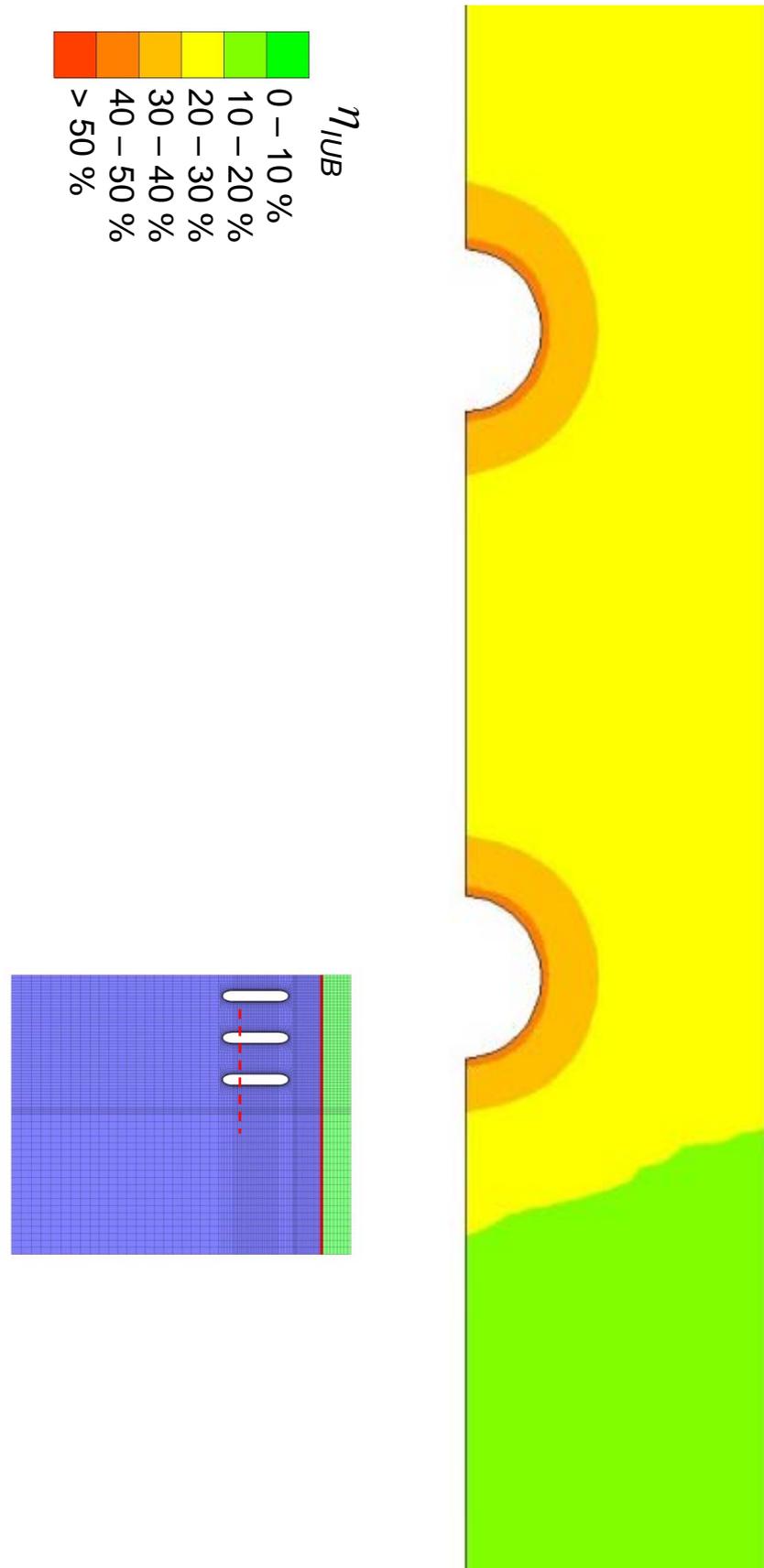


Bild 6.17 $p_{i-min} = 45 \text{ bar} / \eta_{IUB}$ zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Horizontalschnitt

6.5 Berechnungen zu Modell C

Die Modellvariante C beinhaltet gegenüber den vorherigen Modellen einen vertikal verlaufenden Salzstockrandbereich. Wie in Bild 6.18 dargestellt, beträgt der Abstand von der Wand der zu betrachtenden Kaverne zur angenommenen Salzstockflanke 200 m.

Gegenüber den Modellen A und B ändert sich somit der Gebirgsaufbau. Für diese Variante muss untersucht werden, welche zusätzlichen Annahmen bezüglich der Eingangsparameter getroffen werden müssen.

Zunächst werden im Rahmen der Untersuchungen zu Modellvariante C zwei Aspekte beleuchtet, die als Grundlage für die weiteren Berechnungen dienen.

Der erste Aspekt betrifft die Frage, wie der Primärspannungszustand im Randbereich und im hier angenommenen Sandstein neben dem Salzstock ausgebildet ist?

Der zweite Aspekt zu Modellvariante C beinhaltet die Frage: Welche Parameter können für den Sandstein angenommen werden und welchen Einfluss haben mögliche Variationen auf den Spannungszustand in der Umgebung der Salzkaverne? Die Beantwortung dieser Fragen ist essenziell für die Bewertung der Berechnungsergebnisse aus einem angenommenen Bemessungslastfall und wird in Kapitel 6.5.1 diskutiert.

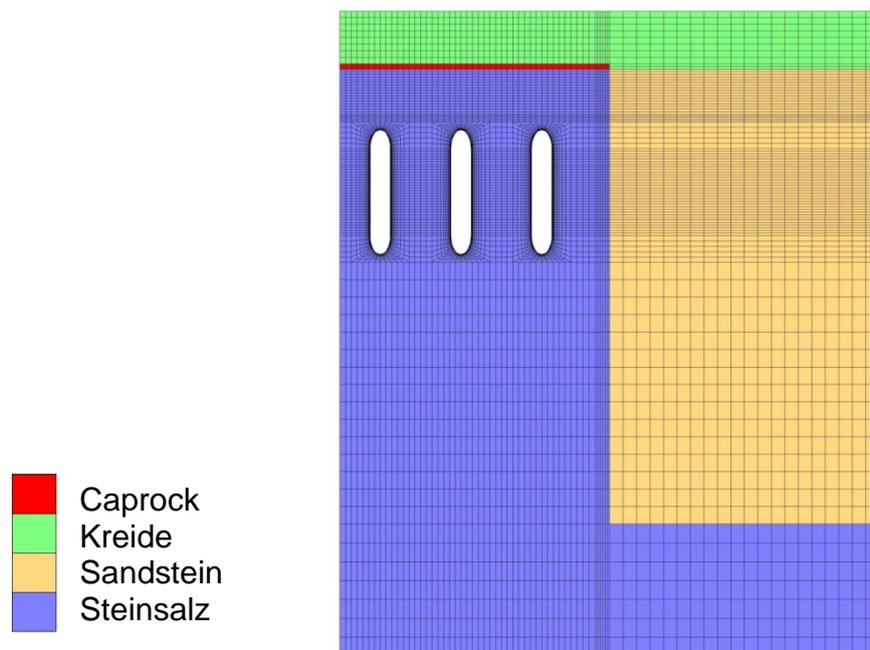


Bild 6.18 Darstellung des Berechnungsmodells C

6.5.1 Primärspannungszustand und Stoffmodell für Sandstein

Es wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Untersuchungen zum Primärspannungszustand in einem aufgestiegenen Salzstock durchgeführt /52/ /53/. In diesen Betrachtungen geht es um die Frage, welcher Spannungszustand sich nach mehreren tausend Jahren Berechnungszeit einstellt, wenn als Initialbedingung im Salzgestein ein Seitendruckbeiwert von $K_0 = 1,0$ und im umgebenden Gebirge ein Wert von $K_0 = 0,5$ angesetzt wird. Zu untersuchen war dabei, ob die Übergangszone von einem isotropen Spannungszustand zu einem anisotropen Zustand im Salzgestein oder im Nebengebirge liegt. Das Resultat der Untersuchungen hat einen entscheidenden Einfluss auf den Primärspannungszustand, der den durchgeführten Simulationen zugrunde liegt.

Bild 6.19 zeigt aus einer Veröffentlichung auf der SMRI Konferenz im Frühjahr 2009 /52/ exemplarisch den Verlauf der Hauptspannungen über einen horizontalen Schnitt durch das Berechnungsmodell, aus dem deutlich wird, dass sich nach 100.000 Jahren Berechnungszeit ein isotroper Spannungszustand einstellt, das heißt, alle Hauptspannungskomponenten zeigen im gesamten Steinsalzbereich annähernd den gleichen Wert. Dieses Ergebnis wird durch die Analyse weiterer Berechnungsergebnisse in verschiedenen Schnitten durch unterschiedliche Teufenbereiche gestützt.

Eine sehr kleine deviatorische Beanspruchung sorgt dabei für einen steten rechnerischen Salzstockaufstieg von ca. 0,1 mm/Jahr. Dieser Wert entspricht bereits gemessenen Werten /59/.

Das Ergebnis zeigt, dass sich im Steinsalz ein quasi isotroper Spannungszustand mit einem Seitendruckbeiwert von $K_0 \approx 1,0$ einstellt und dass die Übergangszone zu anisotropen Spannungszuständen außerhalb des Salzstocks liegt.

Die Betrachtung von Hauptspannungen im Salzstock und in den Gebirgsbereichen um einen Salzstock herum von Dusseault et al. /54/ /55/ bestätigt die oben genannten Untersuchungsergebnisse. Bild 6.20 zeigt, dass ab dem Eintritt der dargestellten Untersuchungsbohrung in den in grau dargestellten Salzstock (Spannungsverlauf der rechten Bohrung (B)) mit einem isotropen Spannungszustand gerechnet werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein isotroper Spannungszustand angesetzt, da hier nur die Ergebnisse im Steinsalz als Grundlage für eine Bewertung des Abstandes zwischen der Gasspeicherkaverne und dem Salzstockrand zugrunde gelegt werden.

Die zweite zu beantwortende Frage ist, welche Parameter für den Sandstein angesetzt werden. Nach Adam /56/ kann bei geringen deviatorischen Beanspruchungen des Sandsteins

von einem linear-elastischen Materialverhalten ausgegangen werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Berechnungen ist aufgrund des Abstandes der Kaverne zum Sandstein nicht mit großen deviatorischen Beanspruchungen zu rechnen.

Daher wird in den Berechnungen für den Sandstein das Hooke'sche Stoffgesetz angesetzt. Nach einer persönlichen Mitteilung von Rokahr kann aus dem Tunnelbau erfahrungsgemäß für einen geklüfteten Sandstein ein Elastizitätsmodul mit einer Bandbreite von $E = 500$ bis 5.000 MPa angesetzt werden. Zunächst werden die Berechnungen an den Modellen mit dem oberen Bandbreitenwert durchgeführt.

6.5.2 Maximaldruck

Der maximale Kaverneninnendruck wird wie in den Betrachtungen zuvor zum Zeitpunkt des zweiten Anfahrens von $p_{i-max} = 175$ bar bewertet. Bild 6.21 zeigt die Ausbildung der Sicherheitszonen im Dachbereich der Kaverne. Zunächst ist ein deutlicher Einfluss der Randlage der Kaverne auf die Ausbildung der Sicherheitszonen zu erkennen.

Die berechnete Sicherheitszone $\sigma_2 - p_i = -2,5$ MPa weist in der schwächsten Ausdehnung einen Wert von 72 m auf. Die Ausbildung der Sicherheitszonen, auch die leichte Asymmetrie und Verringerung in Richtung Nachbarkaverne, hat sich nicht signifikant verändert, so dass festgestellt werden kann, dass der angenommene Salzstockrandbereich keinen nennenswerten Einfluss auf die Maximaldruckbewertung der betrachteten Kaverne hat.

6.5.3 Betriebsraten

In Bezug auf die zu bewertenden Spannungsverläufe am Randpunkt im Kavernendachbereich ist keine signifikante Beeinflussung aus der Randlage der Kaverne bzw. der Annahme einer Nachbarkaverne zu erkennen. Der minimale Wert der Druckspannung, der sich aus der Annahme des Bemessungslastfalles ergibt, beträgt ca. $-1,6$ MPa. Bild 6.22 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen am Modell C.

Wie bei der Bewertung des Maximaldrucks zuvor kann bei der Bewertung der Betriebsraten ebenfalls festgestellt werden, dass ein Abstand von 200 m zwischen der Kavernenwand und dem Salzstockrand einen vernachlässigbaren Einfluss auf diesen Dimensionierungsparameter hat.

6.5.4 Minimaldruck

In den Isolinienbildern 6.23 und 6.24 nach Erreichen des Minimaldrucks von 45 bar in allen drei Kavernen bzw. 60 Tage später ist kein nennenswerter Unterschied zu den Ergebnissen aus Modellberechnung B zu erkennen. Zum freien Salzstockrand hin sinkt der Wert von η_{IUB}

schnell ab, was auch in der Darstellung des Ausnutzungsgrades über den Horizontalschnitt in Bild 6.25 deutlich wird.

Aus den gesamten Ergebnissen zur Bewertung des Minimaldrucks wird deutlich, dass bei einer Entfernung von 200 m zum Salzstockrandbereich annähernd die gleichen Ergebnisse erzielt werden wie bei der Betrachtung in Modellvariante B mit einer Kaverne, die in einem Feldrandbereich liegt und für die genügend Salzgestein am freien Rand zur Verfügung steht.

Im Folgenden muss die Frage untersucht werden, welche Annahmen oder Variationen zu abweichenden Ergebnissen führen können und unter welchen Umständen möglicherweise der Abstand zum Salzstockrand einen anderen Einfluss auf die Standsicherheit und Dichtheit der Kaverne haben kann.

Das Modell wird in Variante D zunächst hinsichtlich des Abstandes zwischen Kavernenwand und Salzstockrand um 50 m auf 150 m reduziert und bezüglich der drei Auslegungskriterien (Maximaldruck, Minimaldruck, zulässige Betriebsrate) bewertet.

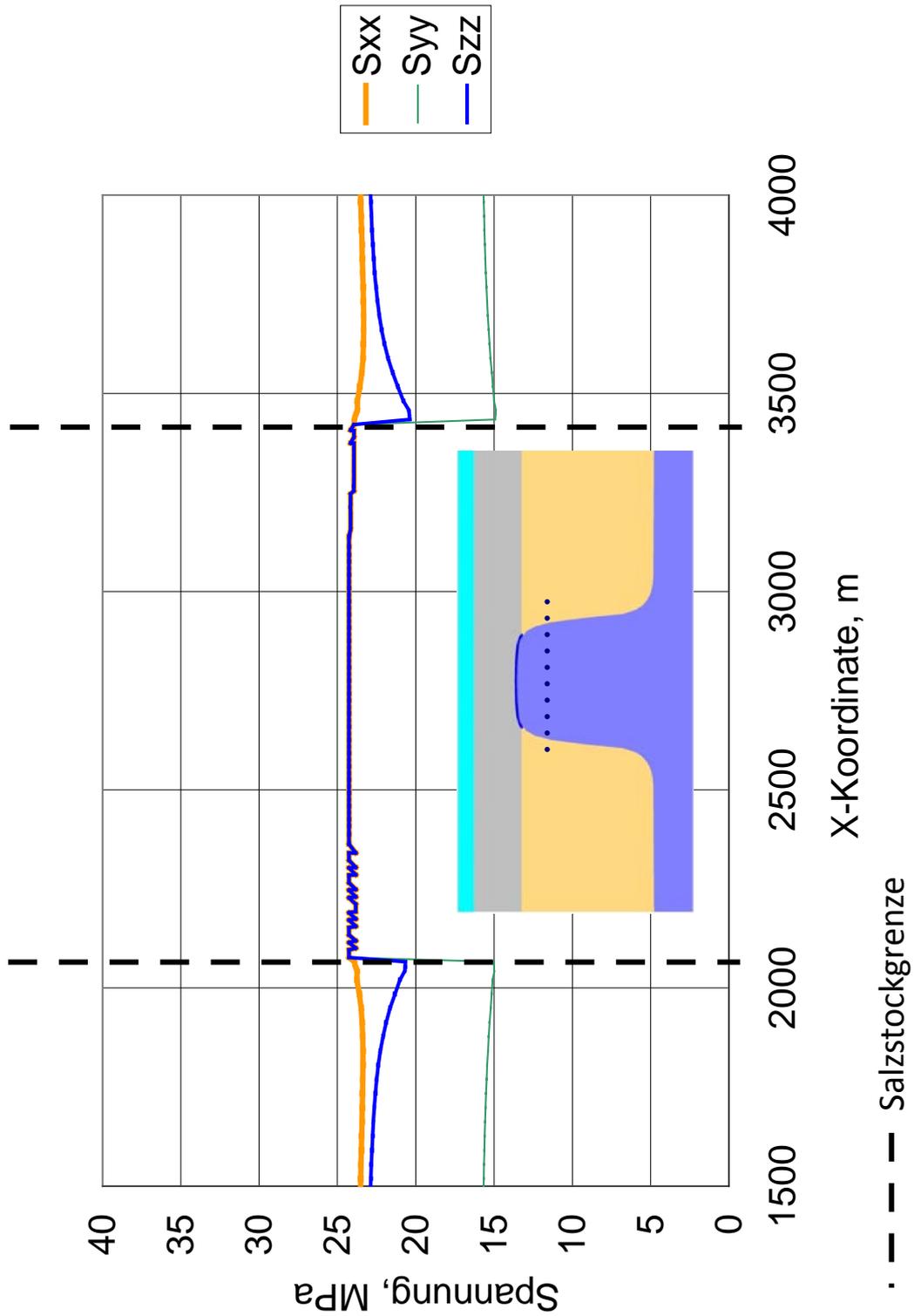


Bild 6.19

Spannungszustand in einem Salzstock nach einer Simulationszeit von 100.000 Jahren nach /52/

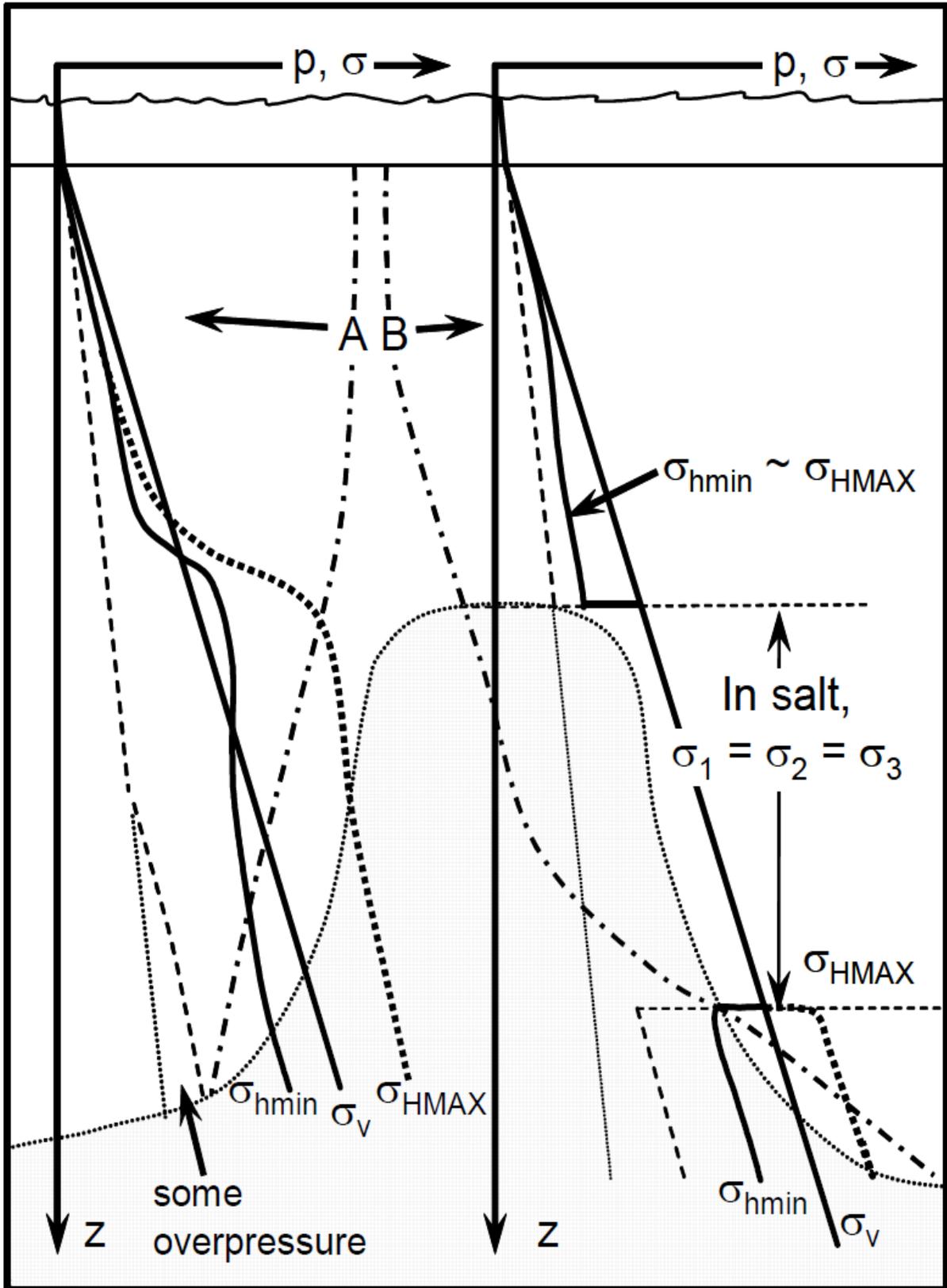


Bild 6.20 *Abgeschätzte Hauptspannungsverläufe entlang verschiedener Bohrungen /54/ /55/*

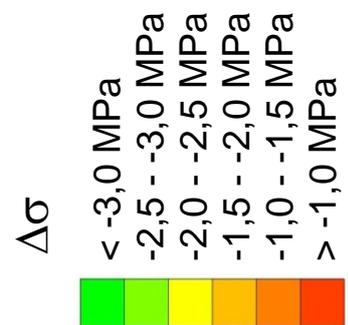
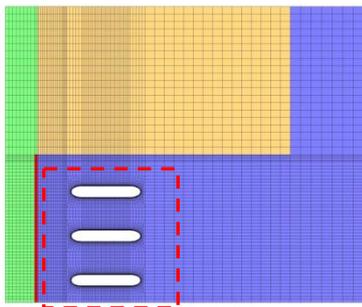
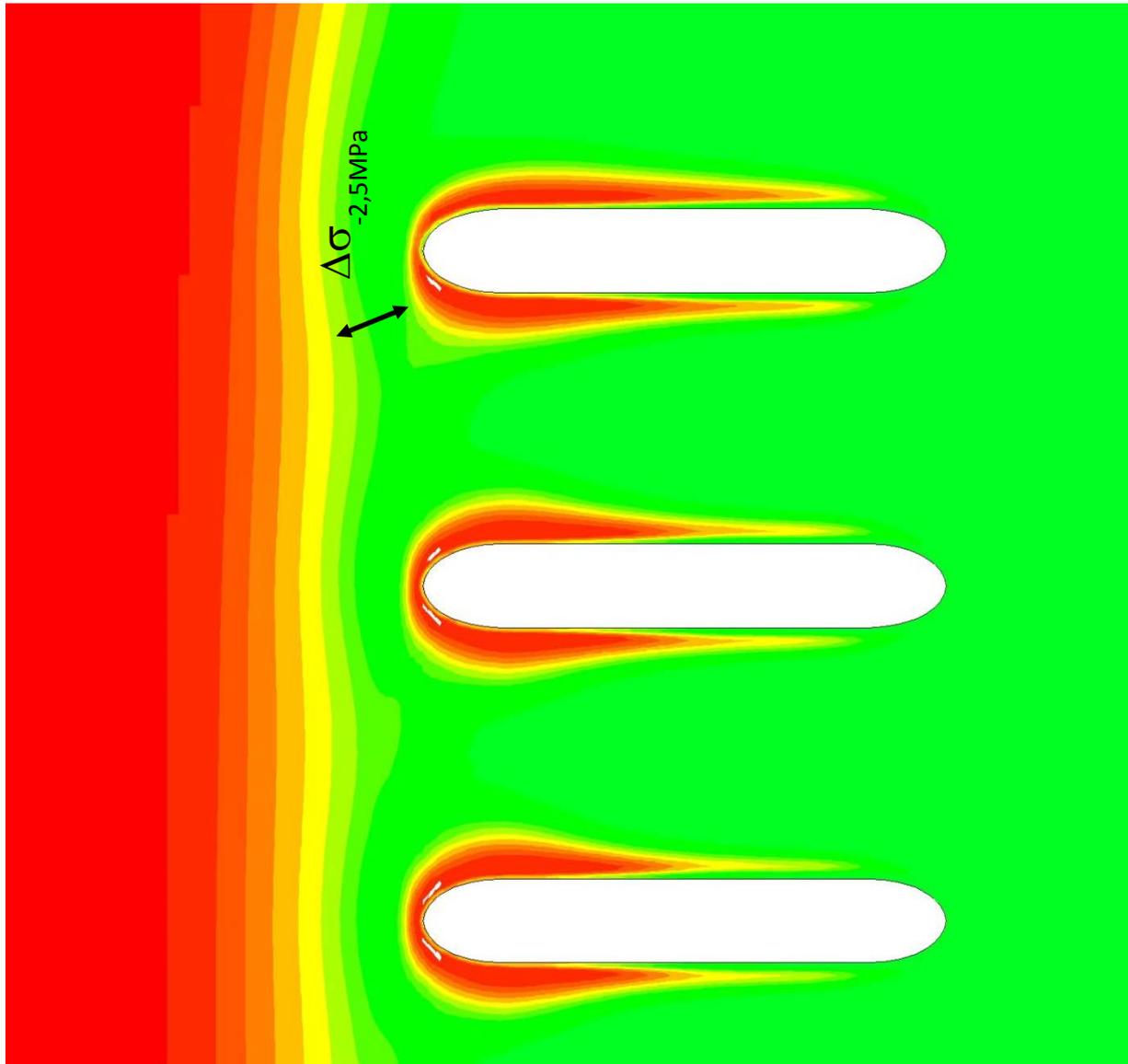


Bild 6.21 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren des Maximaldruckes

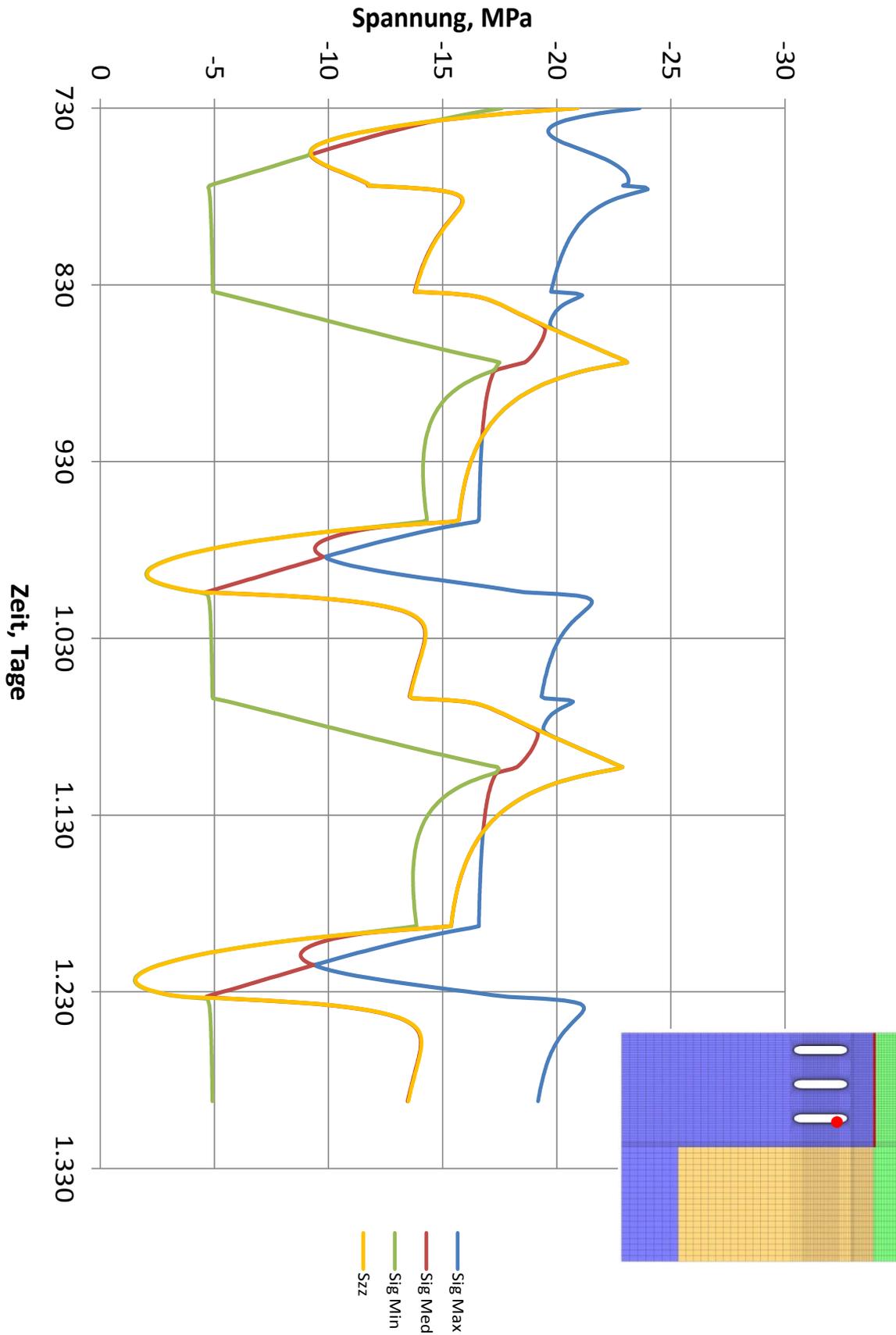


Bild 6.22 Ergebnis der Berechnung des Bemessungslastfalles / Hauptspannungen und Vertikalspannung über der Zeit

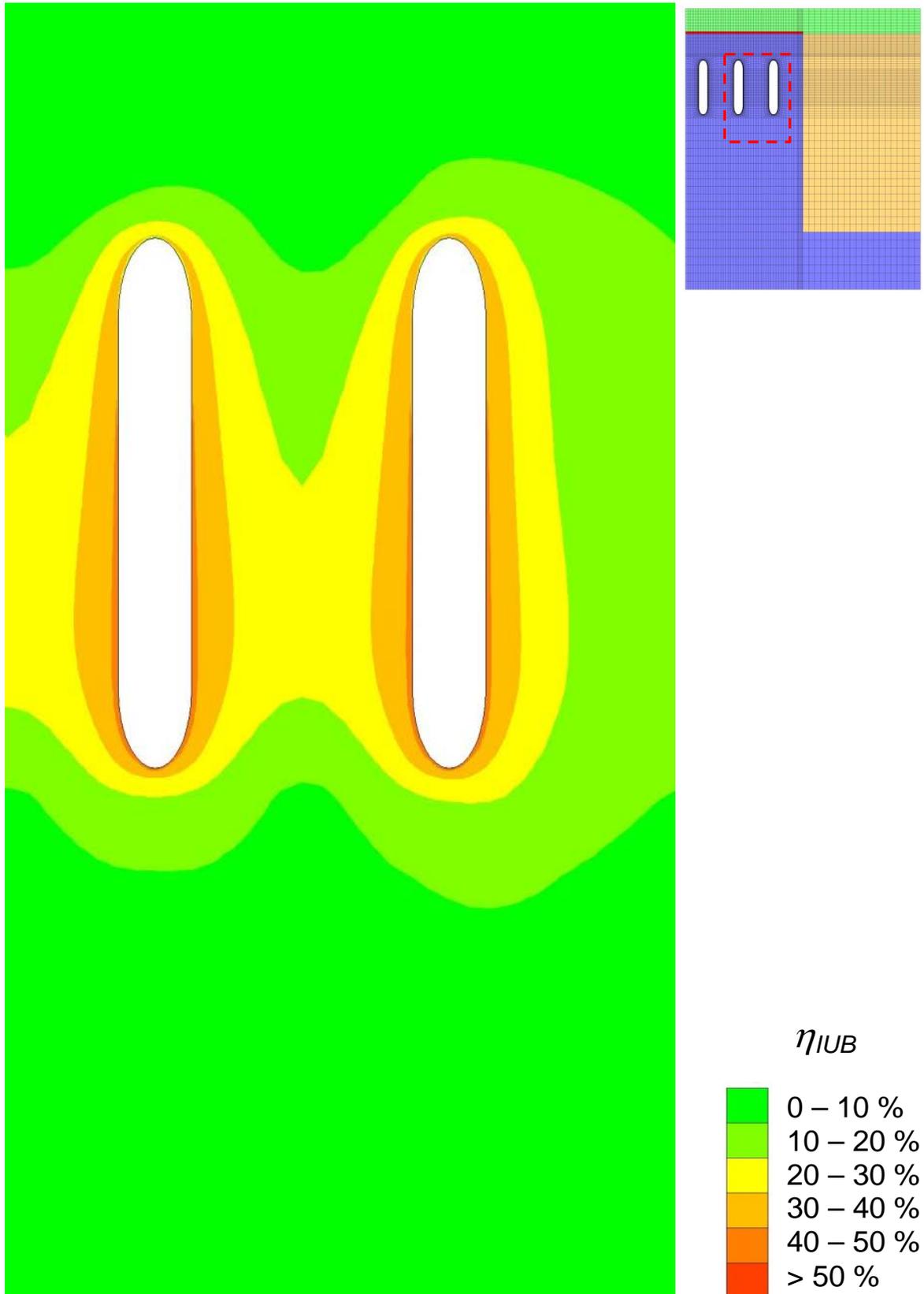


Bild 6.23

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt

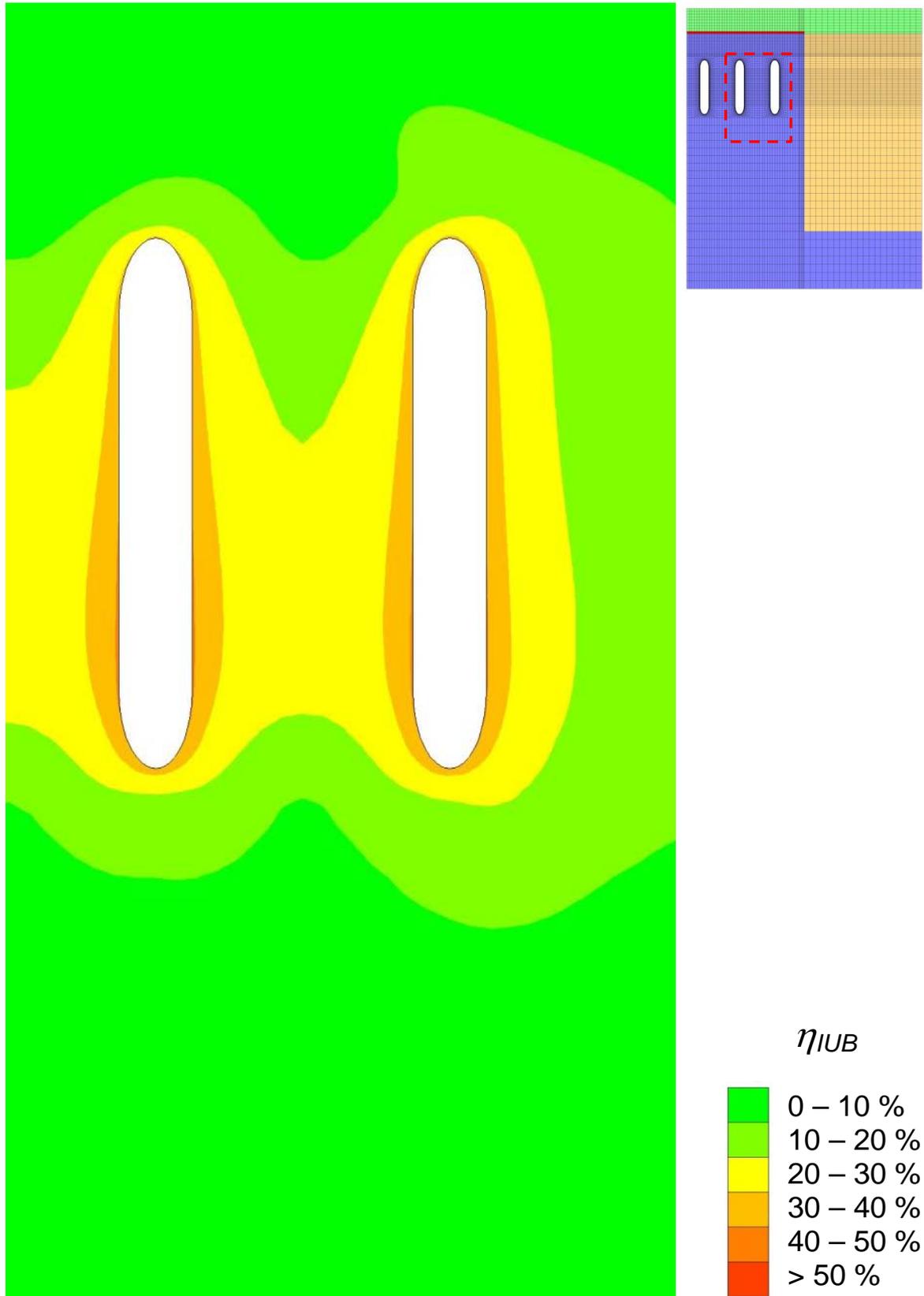


Bild 6.24 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt

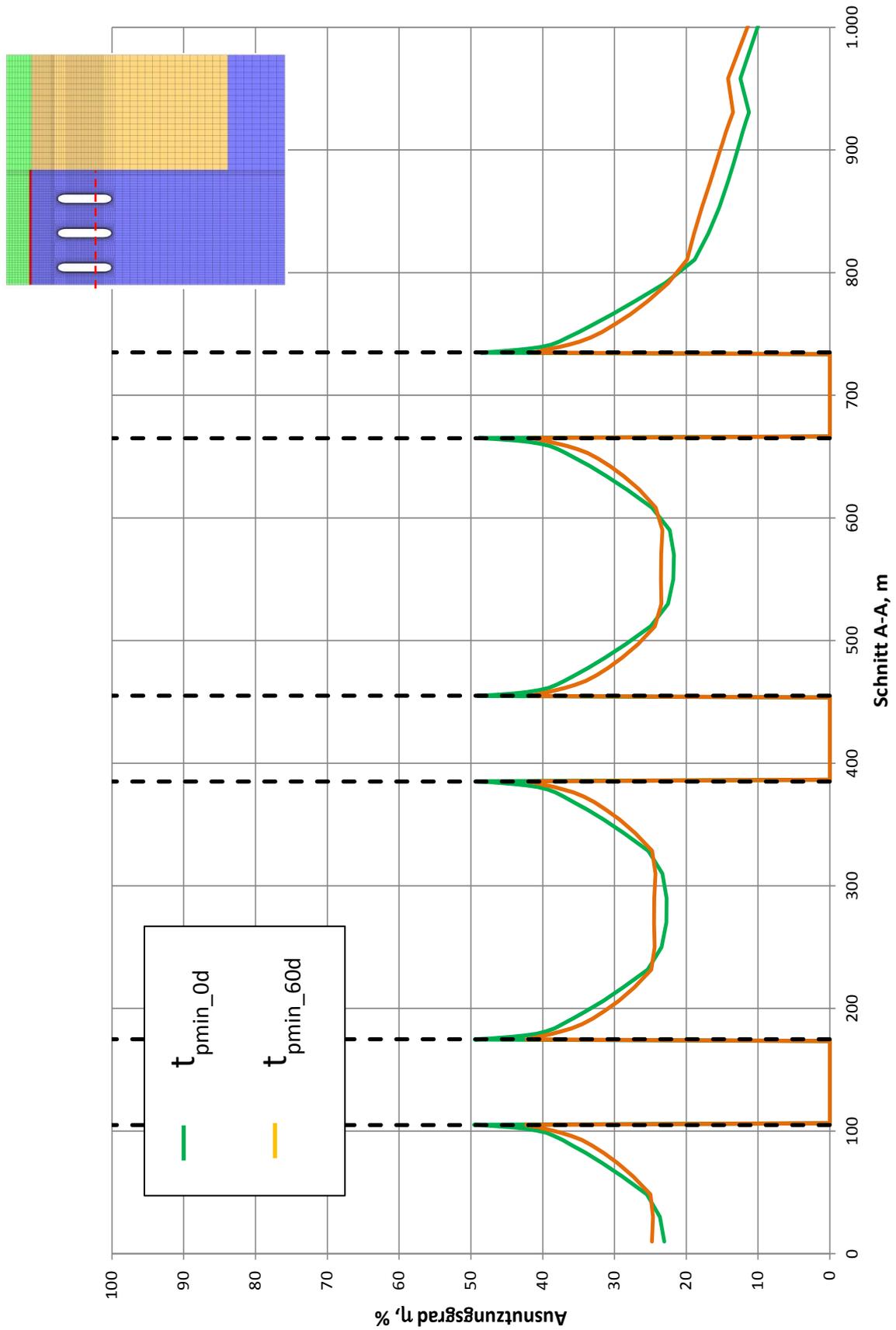


Bild 6.25 Ausnutzungsgrad η_{UB} im Horizontalschnitt zu den Zeitpunkten t_{pmin_0d} und t_{pmin_60d}

6.6 Berechnungen zu Modell D

Modell D, dargestellt in Bild 6.26, baut prinzipiell auf den Annahmen von Modell C auf. Der Unterschied zwischen diesen beiden Modellen besteht darin, dass der Salzstockrand statt in einer Entfernung von 200 m nur in einer Entfernung von 150 m angenommen wird.

Die anderen Parameter sowie die angenommenen Temperatur- und Druckverläufe werden beibehalten.

Auf die Ergebnisdarstellung dieser Variante kann hier verzichtet werden, da sich für die Bewertung aller drei Auslegungskriterien (Maximaldruck, Minimaldruck, zulässige Betriebsrate) ein nahezu identisches Bild zu Variante C ergibt. Die Ausdehnung der Sicherheitszone unter Maximaldruckbedingungen ergibt sich wie im Modell C ebenfalls zu 72 m, die Auswertung der Hauptspannungskomponenten über die Zeit im Dachbereich zur Bewertung der maximal möglichen Volumenentnahmeraten ergibt eine Abweichung des minimalen Druckspannungswertes im relevanten Auswertungspunkt im Kavernendach in der Zeit von $-0,1$ MPa und ist somit vernachlässigbar klein.

Auch die Bewertung des minimalen Kavernendruckes zeigt in den Berechnungsergebnissen, dass annähernd die gleichen Werte für den Ausnutzungsgrad in den relevanten Schnitten und Isolinienbildern erzielt werden.

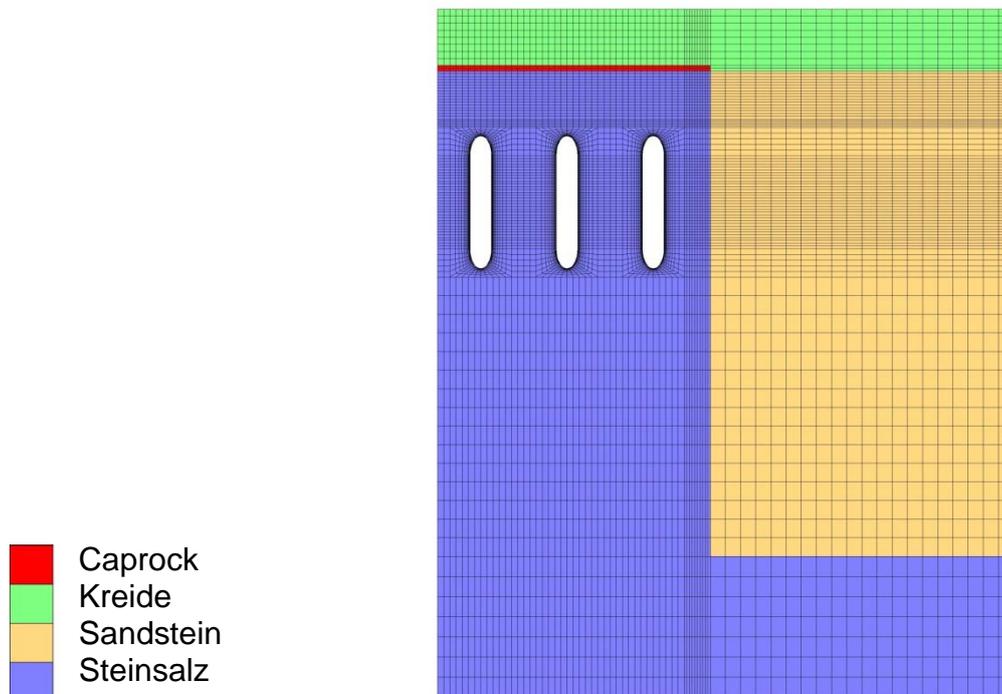


Bild 6.26 Darstellung des Berechnungsmodells D

6.7 Berechnungen zu Modell E

Modell E ist in Bild 6.27 dargestellt und stellt eine Modifikation von Modellvariante D dar. Der Salzstockrand wird ebenfalls mit einem Abstand von 150 m zur Kavernenwand modelliert. Zusätzlich ist am Salzstockrand eine Übergangsschicht im Modell berücksichtigt, die eine Ausdehnung in horizontaler Richtung von 50 m besitzt.

Diese Übergangszone beschreibt einen Bereich am Salzstockrand, der unter Umständen gestört sein und nicht mehr als homogenes Salzgestein (gemessen an den Werten für Kriechvermögen und Festigkeit) angesehen werden kann.

Kupfer et al. /57/ und Loeff et al. /58/ beispielsweise beschreiben eine solche Zone als einen Bereich, der je nach Messmethode mehrere hundert Fuß, also auch mehr als 100 m in den Salzstockbereich hineinreichen kann.

Generell kann das Gestein um einen Salzstock herum als verfaltet und spröde charakterisiert werden. Möglicherweise kann Salz im Randbereich aufgrund tektonischer Vorgänge als unreinigt angesehen werden. Die Salzqualität weist dann beispielsweise nicht das Niveau von Salz aus dem Zentrum des Salzstockes auf. Das Kriechvermögen und die Festigkeit in einer derartigen Übergangszone können daher gegenüber den Werten von Steinsalzproben aus dem Bereich der anzulegenden Kaverne vermindert sein.

Bild 6.28 zeigt aus /58/ die Ausbildung einer möglicherweise gestörten Randzone in einem Salzstock.

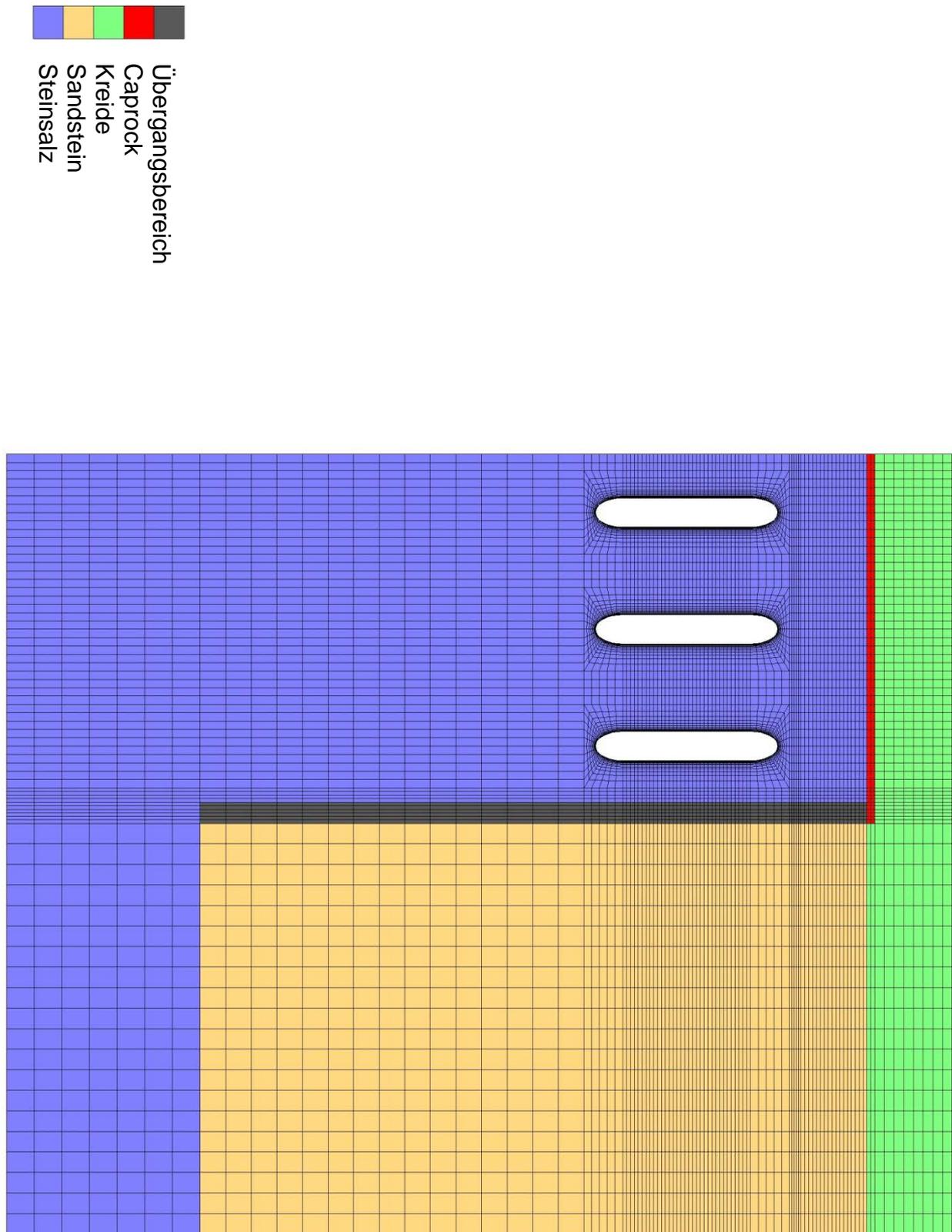


Bild 6.27 Darstellung des Berechnungsmodells E

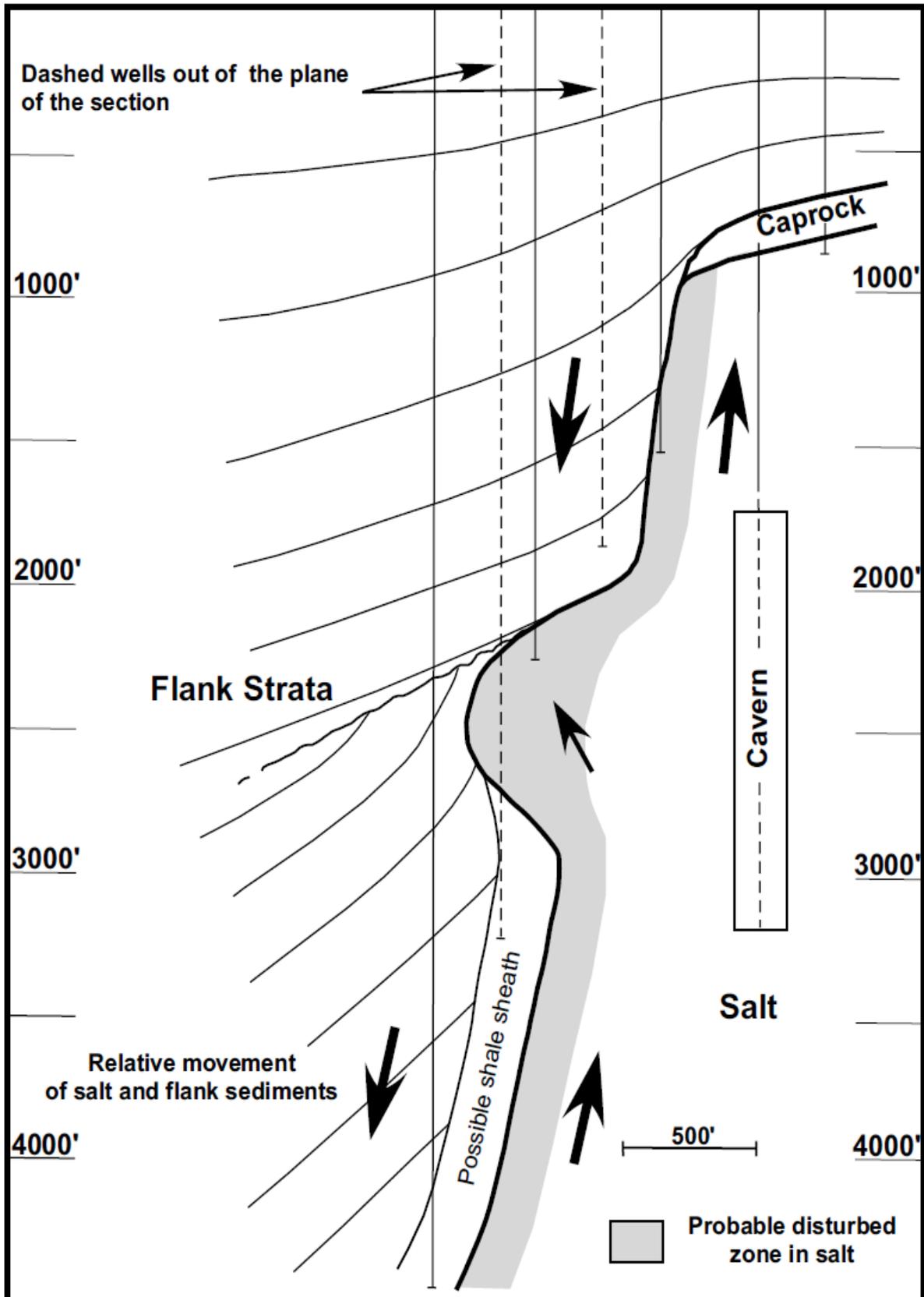


Bild 6.28 Darstellung einer Salzstockflanke mit der Ausdehnung einer möglicherweise in Kriechfähigkeit und Festigkeit gestörte Übergangszone /58/

Für die Stabilität der Kaverne ist es demnach nicht nur eine Frage der Entfernung zu einem möglichen Salzstockrand, sondern vor allem auch, wie die Beschaffenheit des Salzes im Randbereich hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften beschrieben werden kann.

Aus diesem Grunde wird das Kriechvermögen in der Übergangszone und zu dieser Zone hin vermindert. Die Werte der im Rahmen der Modellvariante E verwendeten Abminderungen sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

Um das Kriechverhalten aufgrund möglicher Verunreinigungen erfassen zu können, müssten Laborversuche mit Material aus einer entsprechenden Bohrung durchgeführt werden. Da solche Materialproben in einem konkreten Kavernenprojekt jedoch in der Regel nicht gewonnen werden können, weil eine zusätzlich Bohrung nötig wäre, müssen die Materialeigenschaften in diesem Bereich geschätzt werden.

Entfernung von der Kavernenwand	Maxwell-Kriechparameter η_m^*
0 m – 65 m	$2,04e^{14} \text{ d} \cdot \text{MPa}$
65 m – 73,75 m	$4,08e^{14} \text{ d} \cdot \text{MPa}$
73,75 m – 82,5 m	$8,16e^{14} \text{ d} \cdot \text{MPa}$
82,5 m – 91,25 m	$1,22e^{15} \text{ d} \cdot \text{MPa}$
91,25 m – 100 m	$1,63e^{15} \text{ d} \cdot \text{MPa}$
100 m – 150 m	$2,04e^{15} \text{ d} \cdot \text{MPa}$

Tabelle 6.2: Kriechparameter η_m^* im Salzstockrandbereich

6.7.1 Maximaldruck

Der maximale Kaverneninnendruck wird zum Zeitpunkt des zweiten Anfahrens von $p_{i-\max} = 175 \text{ bar}$ bewertet. Bild 6.29 zeigt die Ausbildung der Sicherheitszonen im Dachbereich der Kaverne. In dieser Darstellung ist wieder ein deutlicher Einfluss der Randlage der Kaverne auf die Ausbildung der Sicherheitszonen zu erkennen.

Durch die verminderte Kriechfähigkeit des Salzgesteins im Salzstockrandbereich ist die asymmetrische Ausbildung der Sicherheitszone stärker ausgeprägt als in den Modellberechnungen zuvor. Die berechnete Sicherheitszone $\sigma_2 - p_i = -2,5 \text{ MPa}$ weist in der kleinsten Ausdehnung einen Wert von 72 m auf.

6.7.2 Betriebsraten

In Bezug auf die zu bewertenden Spannungsverläufe am Randpunkt im Kavernendachbereich ist eine leichte Beeinflussung aus der Randlage der Kaverne bzw. der Annahme eines verringerten Kriechvermögens in der Übergangszone in Richtung des Salzstockrandes zu erkennen. Der minimale Wert der Druckspannung, der sich aus den Berechnungen mit Modell D ergab, betrug ca. -1,5 MPa.

Unter der Annahme des geringeren Kriechvermögens im Salzstockrandbereich verringert sich der Wert am Rand nach Bild 6.30 auf -1,1 MPa.

6.7.3 Minimaldruck

Bild 6.31 zeigt in der Auswertung des Ausnutzungsgrades η_{IUB} über die Zeit am Referenzpunkt keine signifikante Erhöhung gegenüber den Ergebnissen aus den anderen Modellberechnungen.

Im Horizontalschnitt (Bild 6.32) durch das Berechnungsmodell wird die Auswirkung des verminderten Kriechverhaltens in der Übergangszone auf den Ausnutzungsgrad deutlich.

Beispielsweise sinkt der Ausnutzungsgrad in den Berechnungen selbst unter der Annahme eines Salzstockrandes mit einer Entfernung von 200 m bzw. 150 m auf Werte von < 20 % ab. Im Fall der Berechnungen am Modell E zeigt sich, dass der gesamte Gebirgsbereich zwischen der Kavernenwand und dem Salzstockrand Werte für η_{IUB} von >20 % aufweist.

Den Ergebnissen im Bild 6.33 sind zwei wesentliche Erkenntnisse zu entnehmen: Zum einen steigt der Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Übergangsbereich unmittelbar nach der Druckabsenkung auf Werte von 30 – 35 % an, diese liegen damit oberhalb der Dauerfestigkeit von Steinsalz. Zum anderen ist zu erkennen, dass dieser Gebirgsbereich im weiteren Verlauf der Berechnungen noch stärker durch Spannungsumlagerungsprozesse belastet wird.

Die Werte von η_{IUB} steigen nach einer Standzeit von 60 Tagen auf minimalem Innendruckniveau nochmal um ca. 5 % an und erreichen in der Spitze ca. 40 %. Des Weiteren ist eine größere Ausdehnung der berechneten Zone von $\eta_{IUB} > 30 \%$ im Übergangsbereich zu erkennen.

Im Isolinenbild 6.34 nach Erreichen des Minimaldrucks in allen drei Kavernen von 45 bar ist ein deutlicher Unterschied zu den Ergebnissen aus den anderen Modellberechnungen zu erkennen. Durch die Berücksichtigung der Nachbarkavernen sowie des verminderten Kriechvermögens zwischen der Kavernenwand und dem Salzstockrand weist der Ausnutzungsgrad η_{IUB} zu beiden betrachteten Zeitpunkten (Bild 6.34 zum Zeitpunkt des Erreichens

des Minimaldruckes und Bild 6.35 60 Tage nach dem Erreichen von $p_{i-min.}$) Werte von >20 % auf.

Insgesamt zeigt sich eine Tendenz hin zu einer größeren Beanspruchung des Materials zum Salzstockrandbereich. Selbst zuvor nicht so stark beanspruchte Gebirgsbereiche wie beispielsweise im Dachbereich der Kaverne zeigen nun erhöhte Ausnutzungsgrade im Bereich zwischen 10 - 20 %.

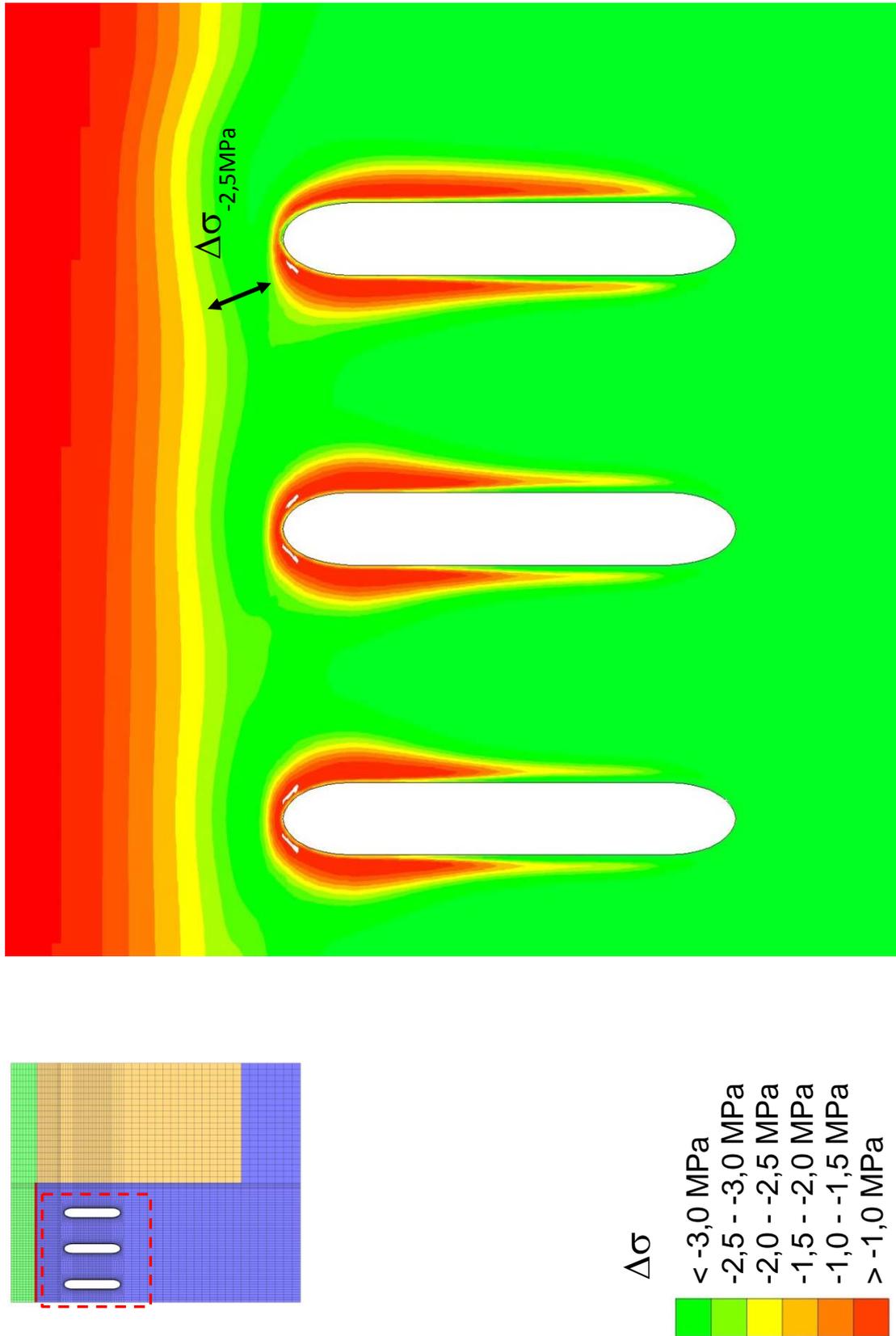


Bild 6.29 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren des Maximaldruckes

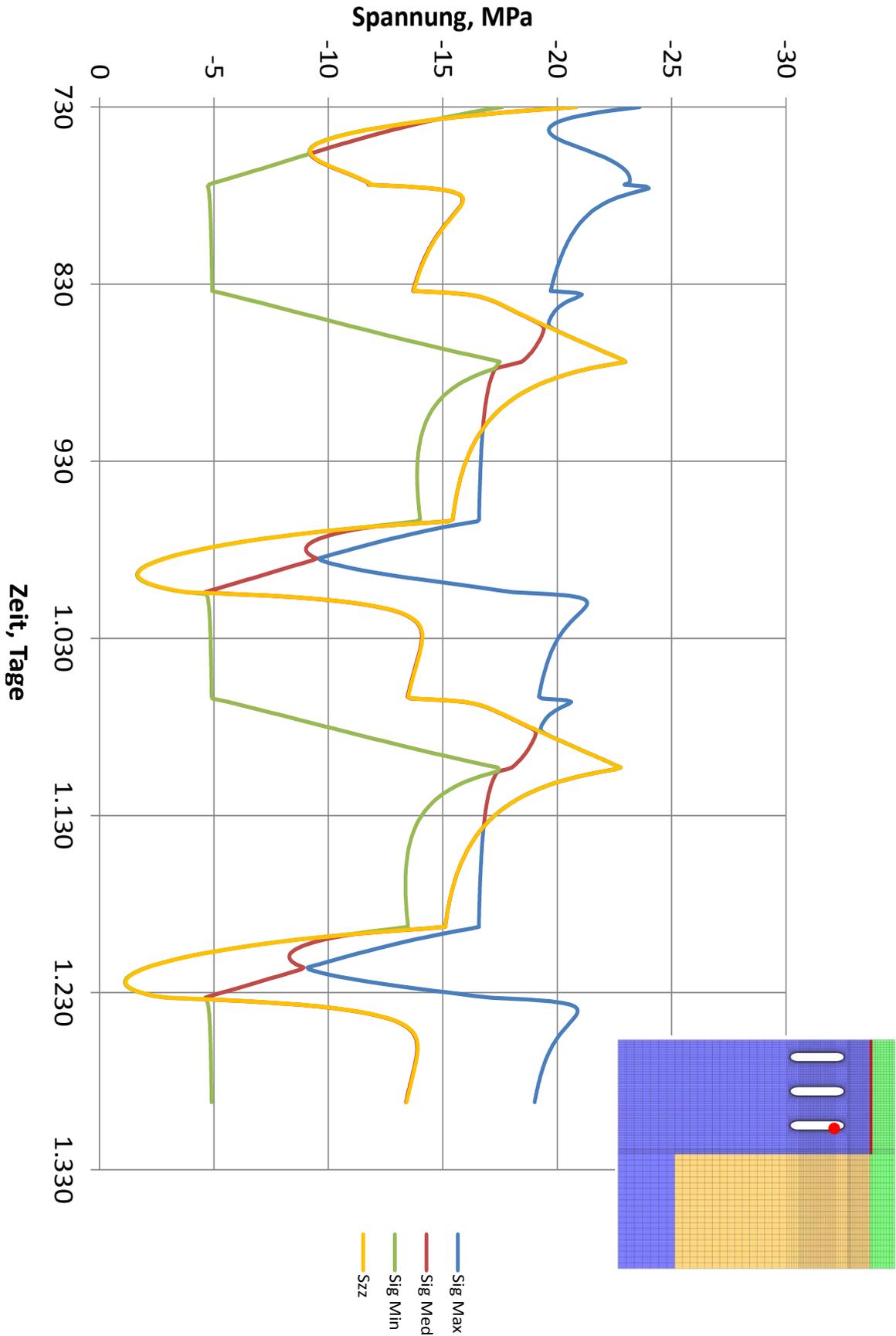


Bild 6.30

Ergebnis der Berechnung des Bemessungslastfalles / Hauptspannungen und Vertikalspannung über der Zeit

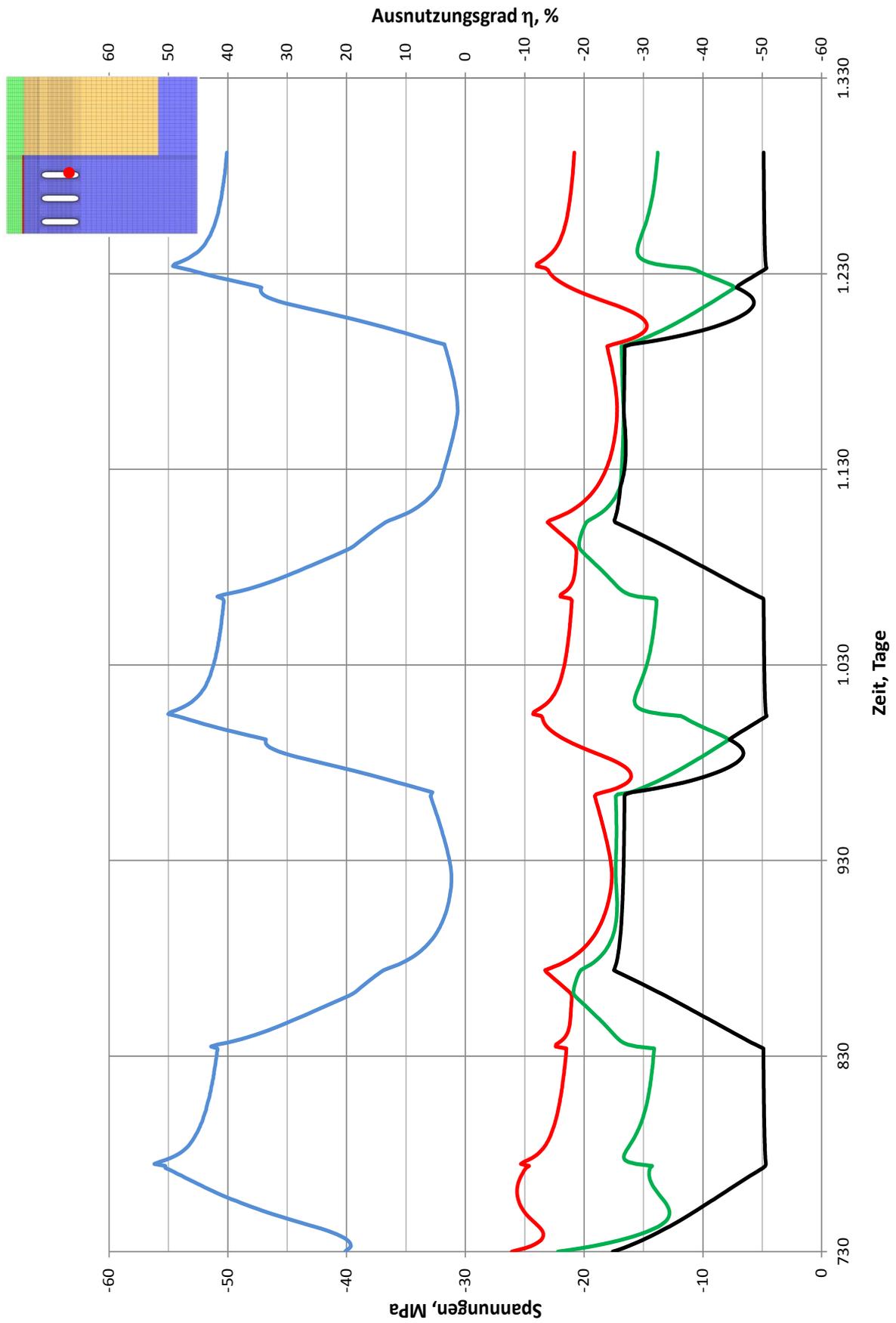


Bild 6.31 Hauptspannungen und Ausnutzungsgrad η_{IUB} über der Zeit

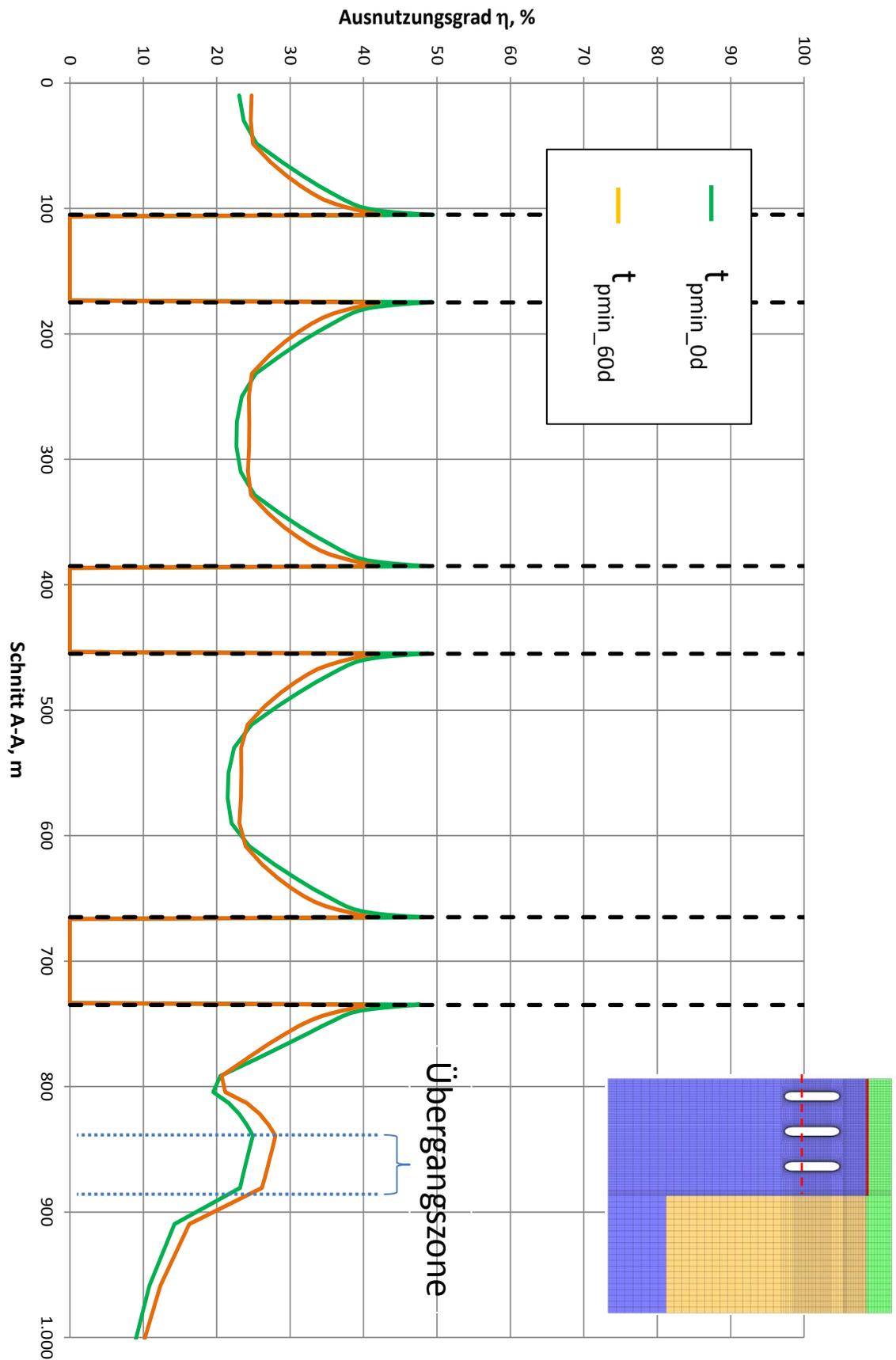


Bild 6.32 Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Horizontalschnitt zu den Zeitpunkten t_{pmin_0d} und t_{pmin_60d}

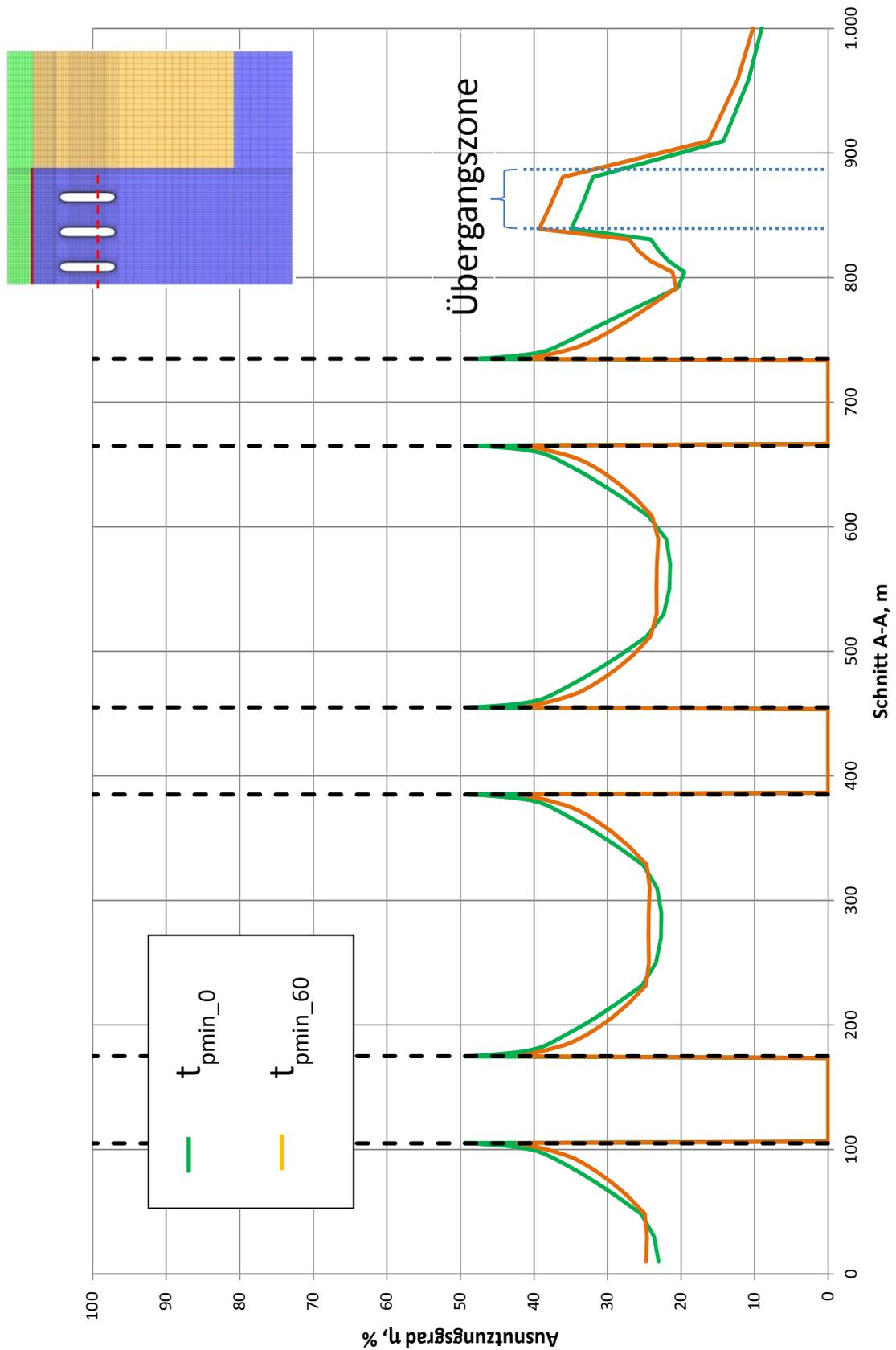


Bild 6.33 Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Horizontalschnitt zu den Zeitpunkten t_{pmin_0d} und t_{pmin_60d} / verminderte Festigkeit Übergangszone

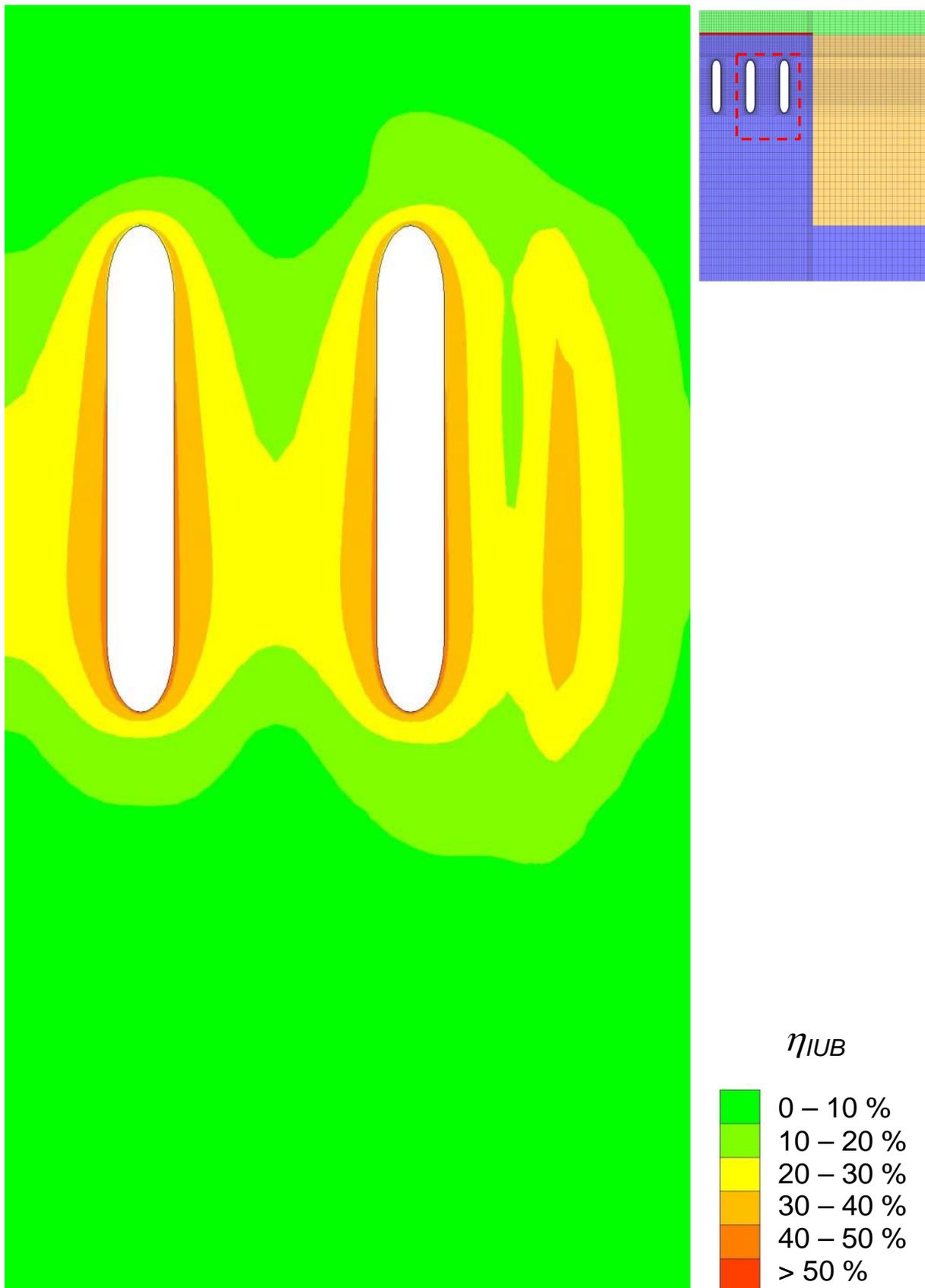


Bild 6.34

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verminderte Festigkeit ÜZ

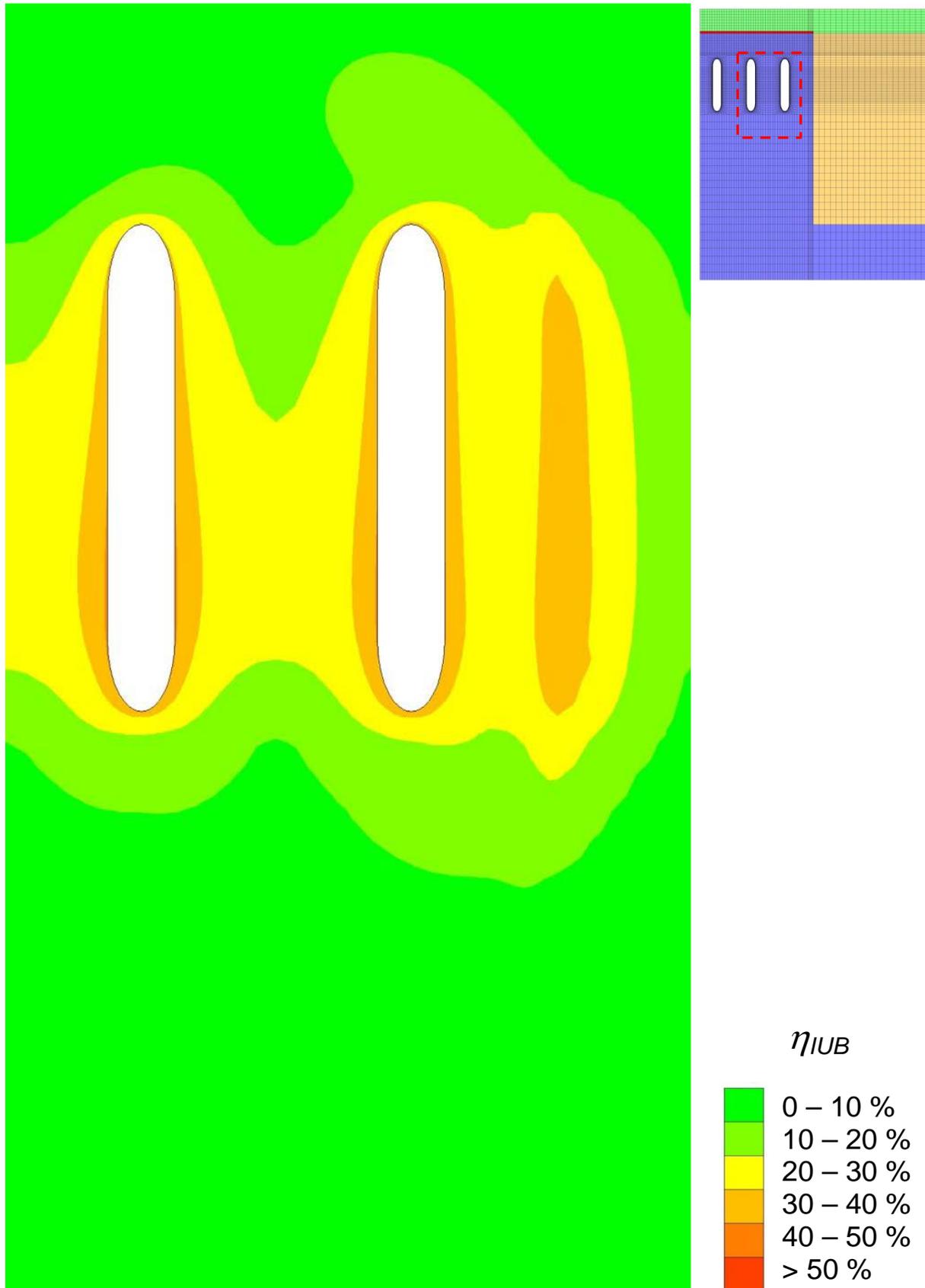


Bild 6.35

Berechnungsergebnisse für $p_{i,min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verm. Festigk. ÜZ

6.8 Berechnungen zu Modell F

Die Ergebnisse der Berechnungen an Modell E unter Berücksichtigung einer Entfernung des Salzstockrandes von 150 m, einer abgeminderten Kriechfähigkeit des Steinsalzes in einer Übergangszone sowie einer verminderten Festigkeit in einem solchen Bereich haben gezeigt, dass die Modellierung eines Gaskavernenbetriebs unter den angenommenen Voraussetzungen aus gebirgsmechanischer Sicht zu signifikant beeinflussten Berechnungsergebnissen führt.

Zu untersuchen ist, inwiefern sich die Berechnungsergebnisse ändern, wenn die ursprünglich angenommene Entfernung von 200 m als Grundlage für die Untersuchungen bezüglich des Salzstockrandes herangezogen wird, zusätzlich mit den Annahmen geringerer Kriechfähigkeit und abgeminderter Festigkeit aus Modellvariante E. Bild 6.36 zeigt das Berechnungsmodell F.

Im Zuge dieser Analyse wird auf die Bewertung des maximalen Kaverneninnendrucks verzichtet, da die Berechnungsergebnisse aus Modellvariation E zuvor bereits gezeigt haben, dass bezüglich der Dichtheit der Kavernen keine signifikante Änderung der Ausdehnung eines Sicherheitsbereiches um die Kaverne herum besteht.

6.8.1 Betriebsraten

Im Rahmen der Überprüfung der angesetzten Betriebsraten zeigt Bild 6.37, dass mit dem größeren Abstand zum Salzstockrand bzw. zur Übergangszone der minimale Wert im zeitlichen Verlauf der Hauptspannungen mit ca. -1,4 MPa berechnet wird.

Dieser stellt eine Veränderung des Minimalwertes gegenüber dem Wert aus den Berechnungsergebnissen für Modell E von -0,3 MPa dar.

6.8.2 Minimaldruck

In den Bildern 6.38 bis 6.41 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Der Übergangsbereich mit dem verringerten Kriechvermögen und der abgeminderten Festigkeit zeigt wiederum einen höheren Ausnutzungsgrad an.

Im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen am Modell E zeigt sich jedoch, dass die Belastung des Gebirges insgesamt nicht mehr so hoch ist. Aus den Isoliniendarstellungen in den Bildern 6.39 und 6.40 wird deutlich, dass die Werte für η_{IUB} in einem relativ großen Bereich des Steinsalzes ohne Annahme einer verminderten Festigkeit unterhalb von 20 % liegen.

Auch in der Übergangszone mit verminderter Kriechfähigkeit zeigt sich mit einem maximalen Wert von $\eta_{IUB} = 25 \%$ eine geringere Ausnutzung als bei den Ergebnissen aus Modell E.

Mit der Annahme abgeminderter Festigkeit ergibt sich für Modell F in der Übergangszone ein Maximalwert von η_{IUB} mit 34,4 % und ist damit im Maximalwert etwa fünf Prozent geringer als im Berechnungsmodell E.

Für den Zeitpunkt von 60 Tagen Stillstand im Anschluss an die Druckabsenkung sind die beiden Verläufe des Ausnutzungsgradverläufe im Horizontalschnitt A-A aus den Modellberechnungen E und F in Bild 6.42 zusammen dargestellt.

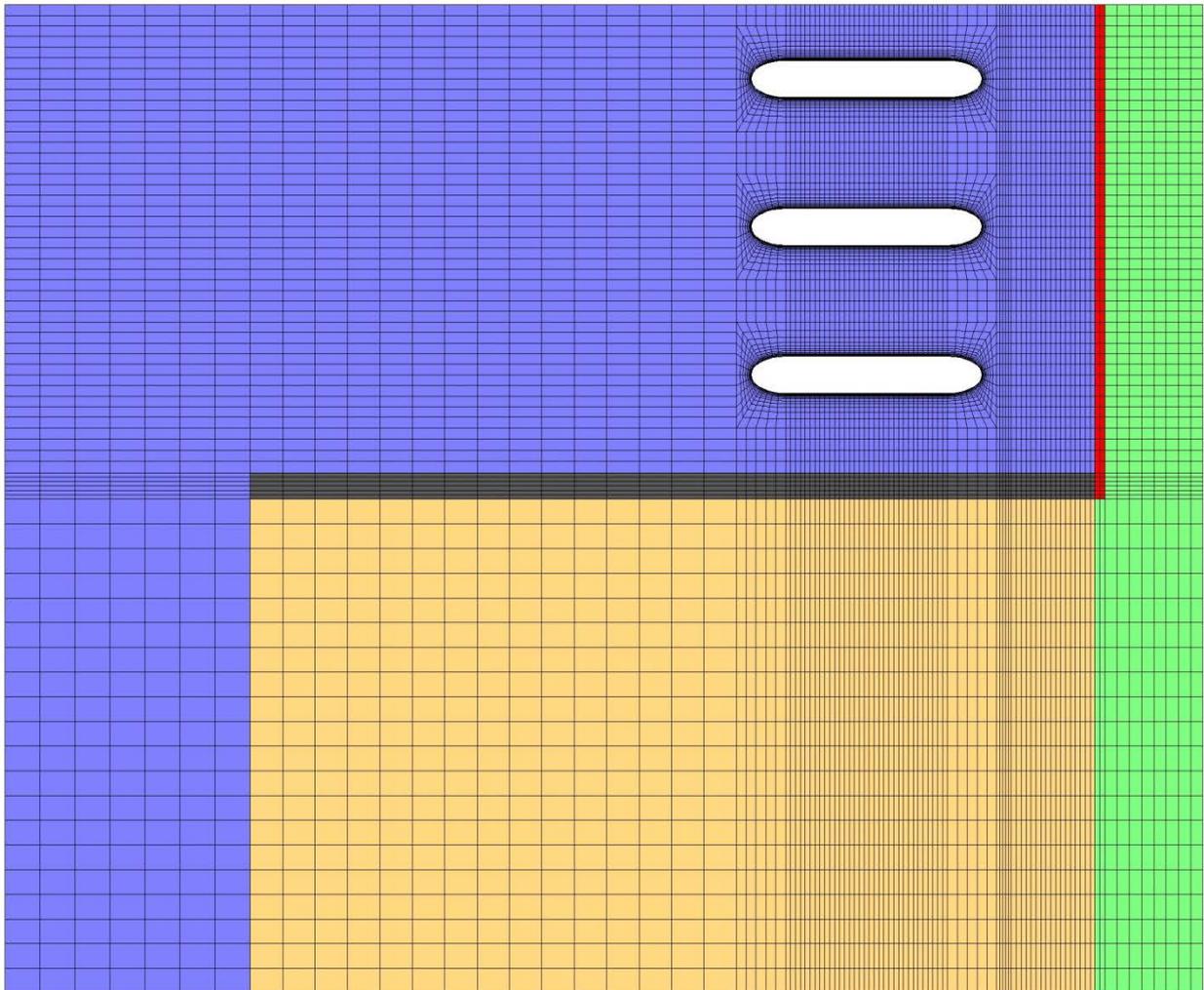


Bild 6.36 Darstellung des Berechnungsmodells F

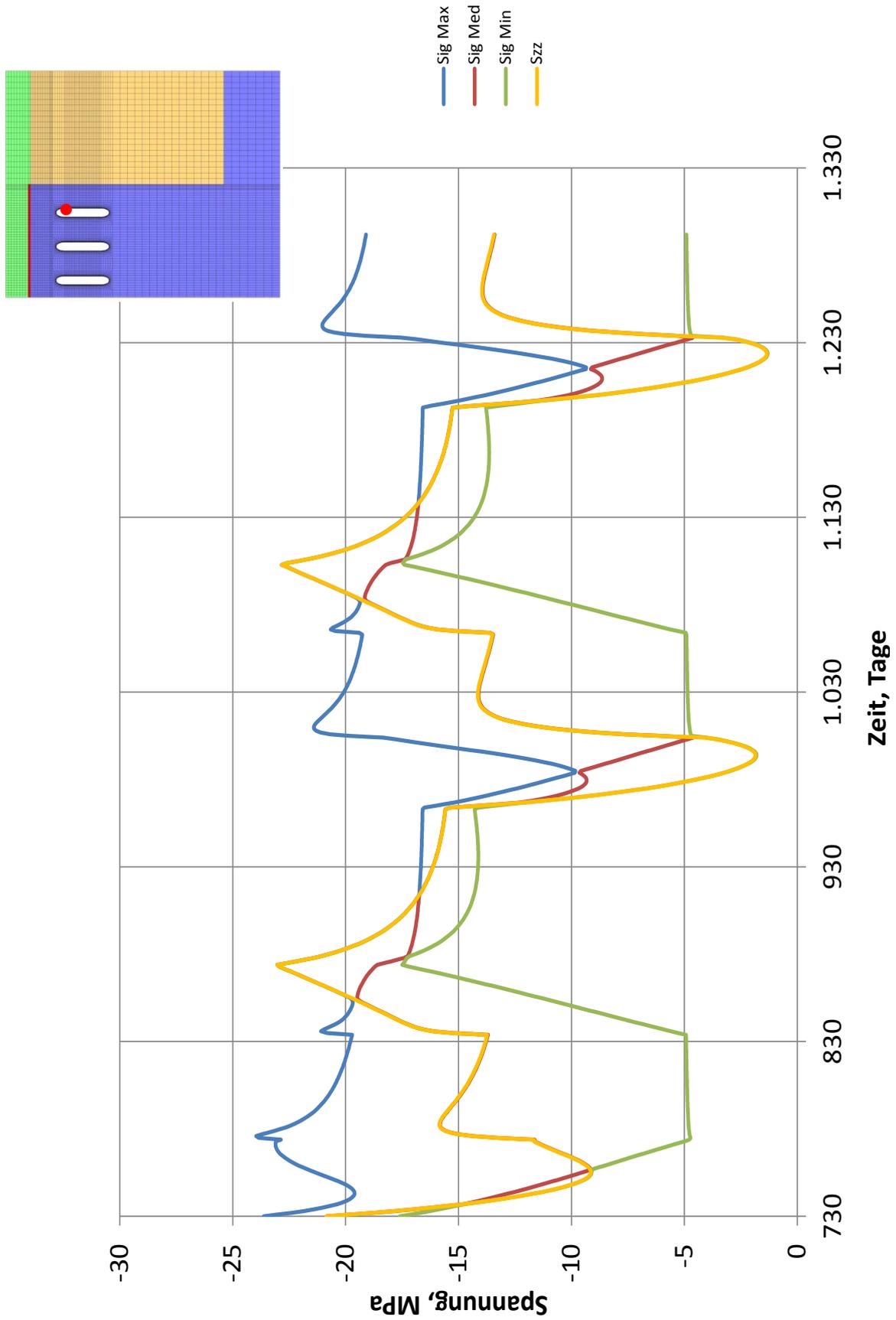


Bild 6.37 Ergebnis der Berechnung des Bemessungslastfalles / Hauptspannungen und Vertikalspannung über der Zeit

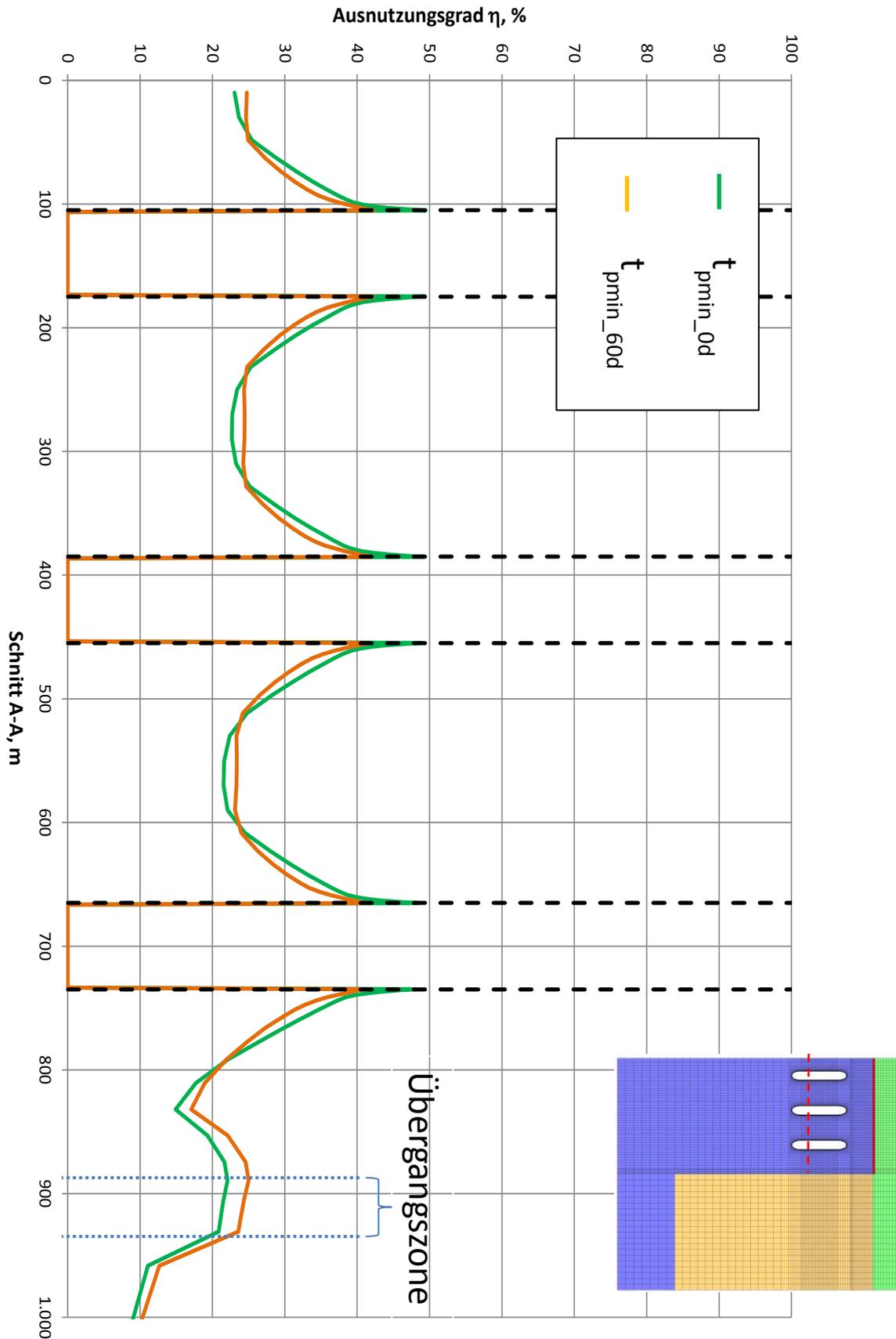


Bild 6.38 Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Horizontalschnitt zu den Zeitpunkten t_{pmin_0d} und t_{pmin_60d}

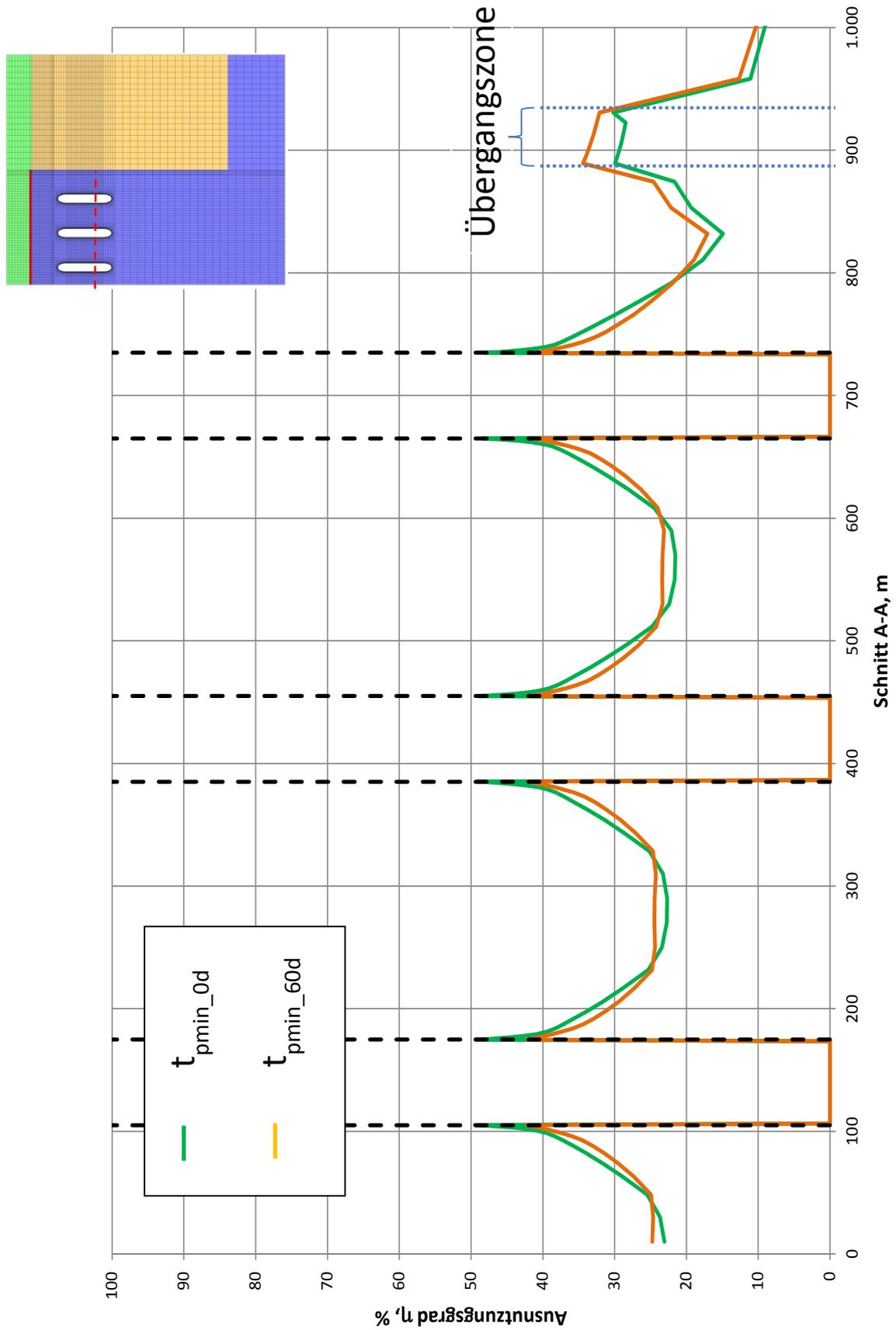


Bild 6.39 Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Horizontalschnitt zu den Zeitpunkten t_{pmin_0d} und t_{pmin_60d} / verminderte Festigkeit Übergangszone

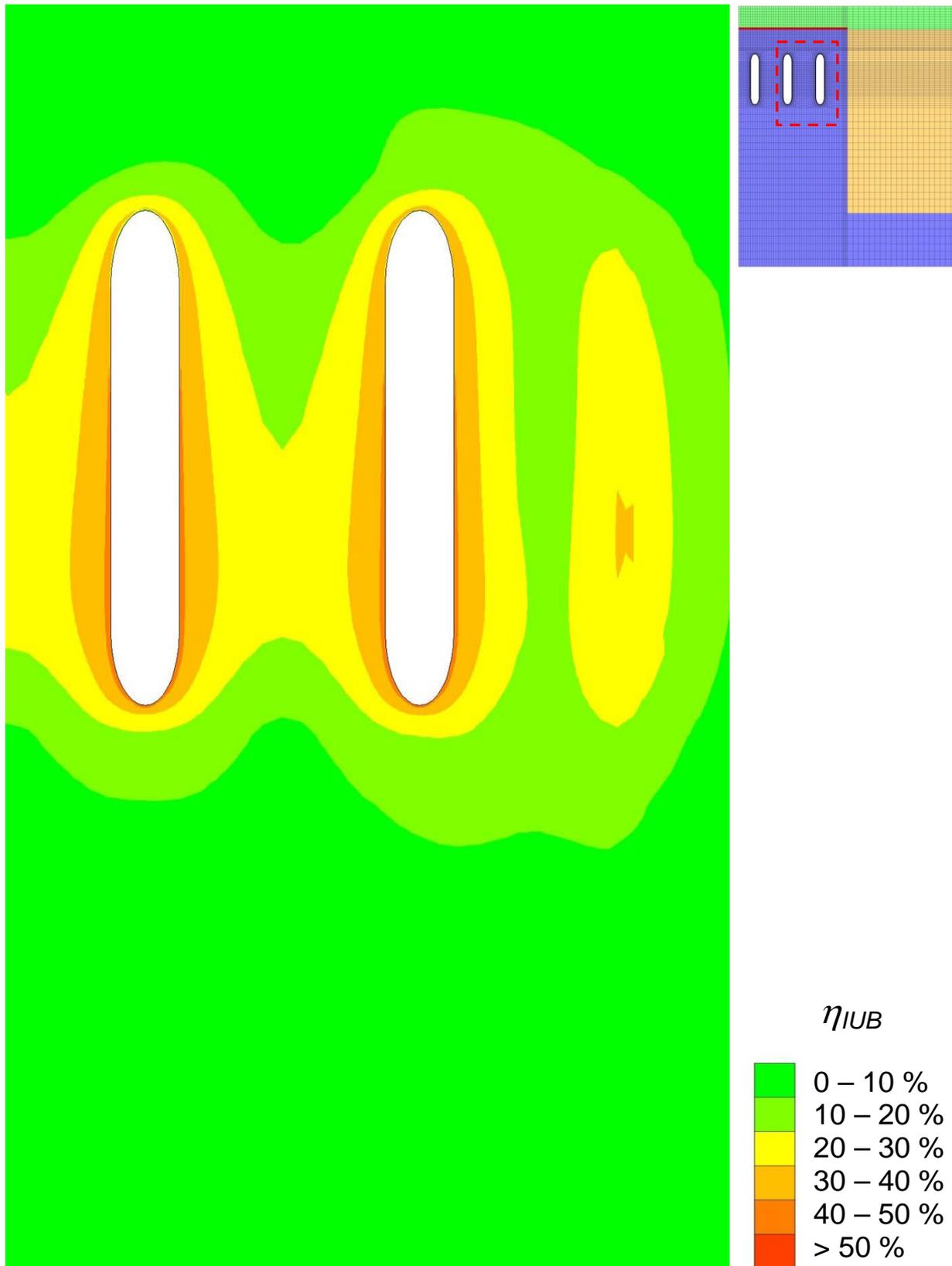


Bild 6.40

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verminderte Festigkeit ÜZ

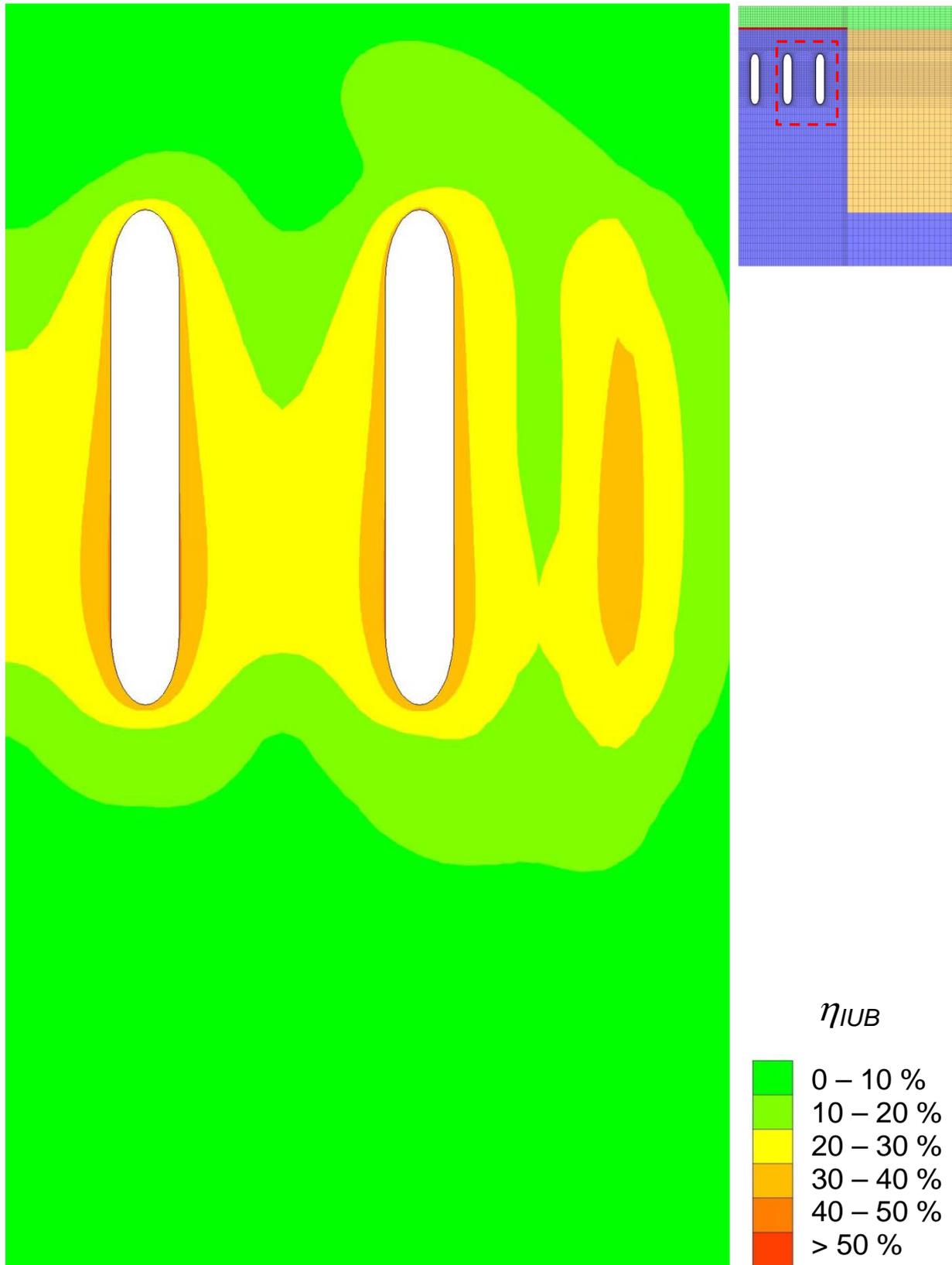


Bild 6.41

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verm. Festigk. ÜZ

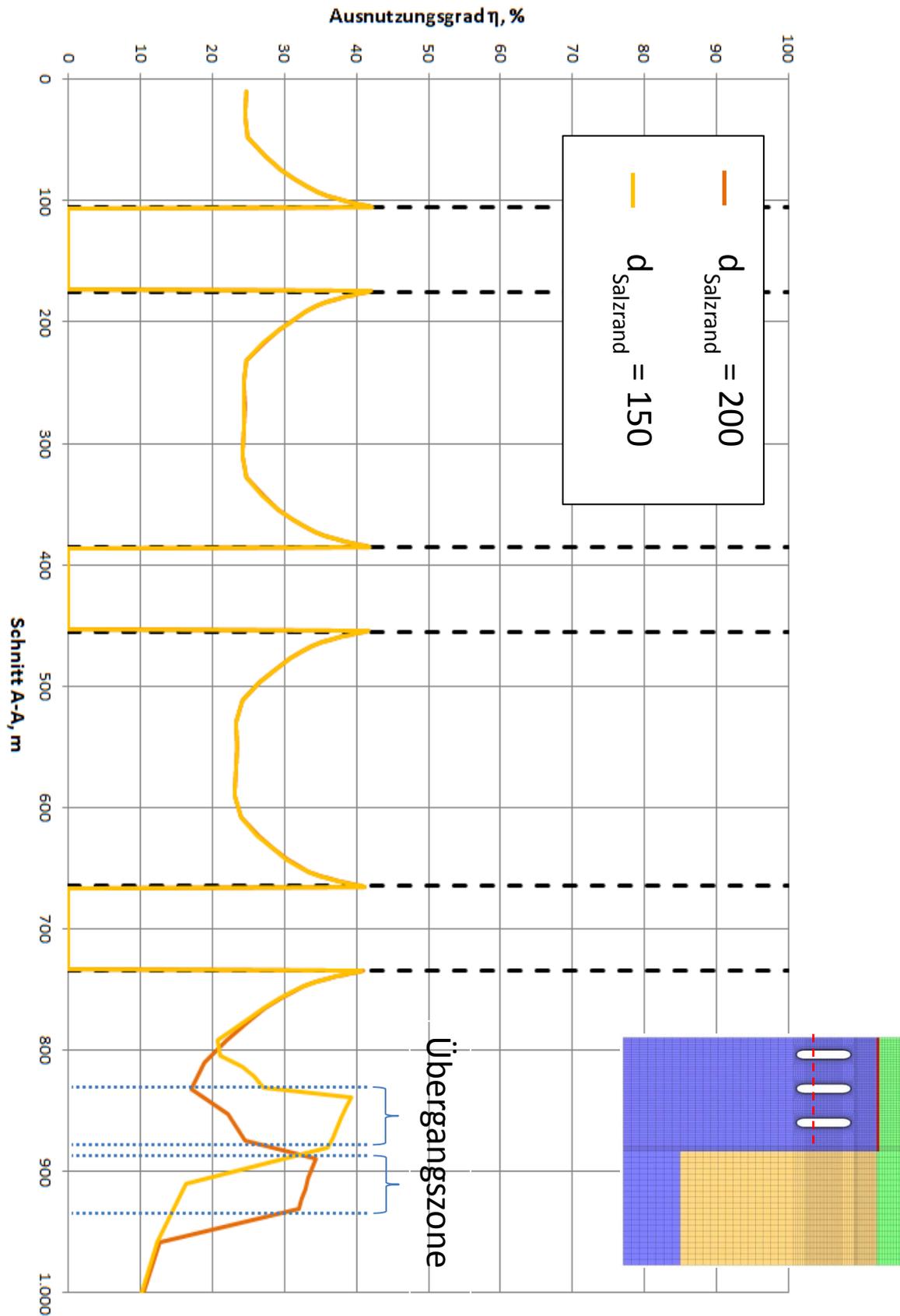


Bild 6.42

Vergleich des Ausnutzungsgradverlaufs bei zwei unterschiedlichen Salzstockrandabständen

6.9 Berechnungen zu den Modellen G und H

Die Ergebnisse der Modellberechnungen unter Berücksichtigung einer Übergangsschicht mit verminderter Kriechfähigkeit und abgeminderten Festigkeiten haben gezeigt, dass diese Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsverteilung im Bereich der betrachteten Kaverne haben.

Aus ingenieurtechnischer Sicht ist ein solcher Bereich jedoch schwer in einem Modell zu erfassen, da normalerweise die Datenbasis in diesem Bereich des Salzstockes aufgrund der fehlenden Bohrungen und damit fehlender Laboruntersuchungen nicht ausreichend ist. Die Festigkeit, die Kriechfähigkeit und das Ausmaß einer solchen Übergangszone müssten fiktiv abgeschätzt werden.

Aus diesem Grund werden zwei Modelle untersucht, die keine Übergangszonen aufweisen. In Anlehnung an Modellvariante D, in der bereits ein Abstand zwischen Kavernenwand und Salzstockrand mit 150 m analysiert wurde, beinhalten die Modelle G und H jeweils einen Abstand von 130 m zwischen der Kavernenwand und der Flanke des Salzstocks.

Modell D hat gezeigt, dass keine signifikante Beeinflussung der Dimensionierungsparameter zu erkennen ist. Der Elastizitätsmodul in diesem Modell wurde mit 5.000 MPa angesetzt. Dieser Parameter wird ebenfalls für Modellvariante G berücksichtigt, in Modell H wird dieser ausgehend von der genannten Bandbreite in Kapitel 6.5.1 auf 500 MPa (grauer Bereich in Bild 6.43) reduziert.

Aus ingenieurtechnischer Sicht wird untersucht, inwieweit der Elastizitätsmodul unter den gegebenen Modellabständen einen Einfluss auf die Spannungsverteilung in der Umgebung der betrachteten Randkavernen hat.

6.9.1 Maximaldruck

Die Bilder 6.44 und 6.45 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen auf Maximaldruckniveau mit den dazugehörigen Sicherheitszonen. Während in Modell G die Ausbildung der Zonen eine ähnliche Verteilung wie in den zuvor untersuchten Modellberechnungen aufweist, beeinflusst der geringere Elastizitätsmodul des Nebengebirges in Modellvariante H die Sicherheitszonen dahingehend, dass beispielsweise die kleinste Ausdehnung einer Sicherheitszone von $\Delta\sigma = -2,5$ MPa in der gegenüber Modell G entgegen gesetzten Richtung im Dachbereich liegt. Die Dimension der Sicherheitszone ist hingegen nicht signifikant beeinflusst.

6.9.2 *Minimaldruck*

In den Bildern 6.46 bis 6.49 sind die Ergebnisse der Berechnungen für den Ausnutzungsgrad unter Minimaldruckbedingungen zu den zwei betrachteten Zeitpunkten t_0 unmittelbar nach Erreichen von p_{\min} und $t_1 = 60$ Tage nach Erreichen des Minimaldruckes als Isolinienbild dargestellt. Es wird deutlich, dass im Modell H der Bereich zwischen der betrachteten Randkaverne und dem Sandstein stärker beansprucht wird als im Modell G mit der Annahme eines steiferen Nebengebirges.

Die orangefarbene Linie in Bild 6.50 stellt den Verlauf von η_{IUB} im Modell G (Abstand Wand/Flanke 130 m) dar. Es zeigt sich ein vergleichbares Ergebnis wie in Modellvariante D mit einem Abstand von 150 m zwischen der Kavernenwand und dem Salzstockrand. Die grüne Linie zeigt den Verlauf des Ausnutzungsgrades unter der Annahme eines abgeminderten Elastizitätsmoduls für den Sandstein neben dem modellierten Salzstock. Es wird deutlich, dass der Salzbereich hierbei höher beansprucht wird, sowohl im Maximalwert direkt an der Kavernenkontur als auch im Bereich zwischen der Flanke und der Kavernenwand. Die Größenordnung der Werte bewegt sich in der Höhe in etwa im Bereich des Beanspruchungszustandes beispielsweise zwischen der betrachteten Kaverne und der linksseitig angeordneten Nachbarkaverne.

Zum Zeitpunkt $t_1 = 60$ Tage (Bild 6.51) nach Erreichen des Minimaldruckes bleibt der zu bewertende Salzbereich in Modell H höher beansprucht als in Variante G. In beiden Modellvarianten zu den beiden betrachteten Zeitpunkten ist die Beanspruchung in einem großen Teil des Salzes unterhalb der Dauerfestigkeit des Steinsalzes. Die Ausdehnung der Spannungsumlagerungszone mit einer Beanspruchung oberhalb von beispielsweise 30 % ist im Fall der Annahme eines Elastizitätsmoduls von 500 MPa (Modell H) etwas größer als für das steifer angesetzte Nebengebirge.

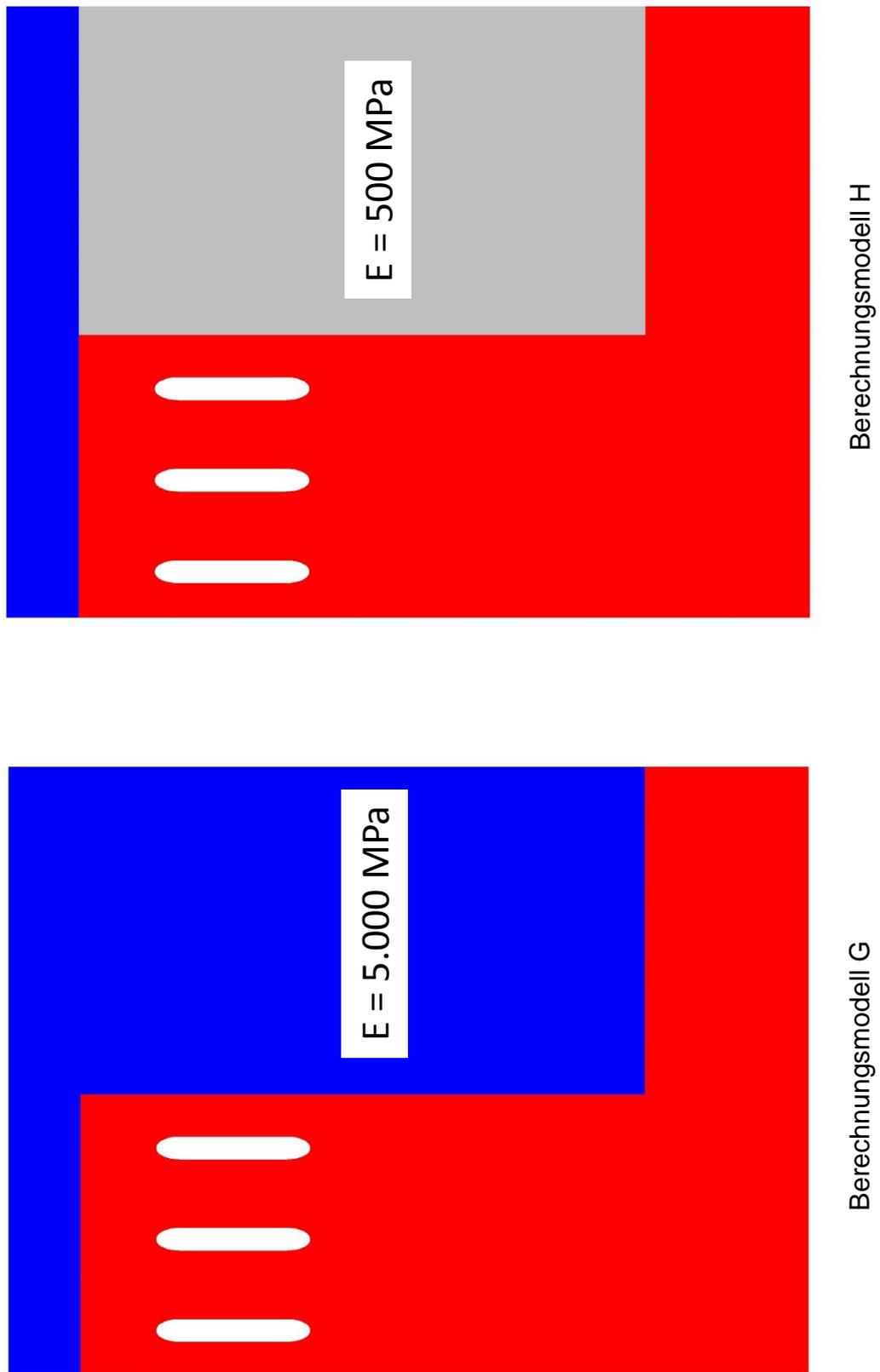


Bild 6.43 Darstellungen der Berechnungsmodelle G und H

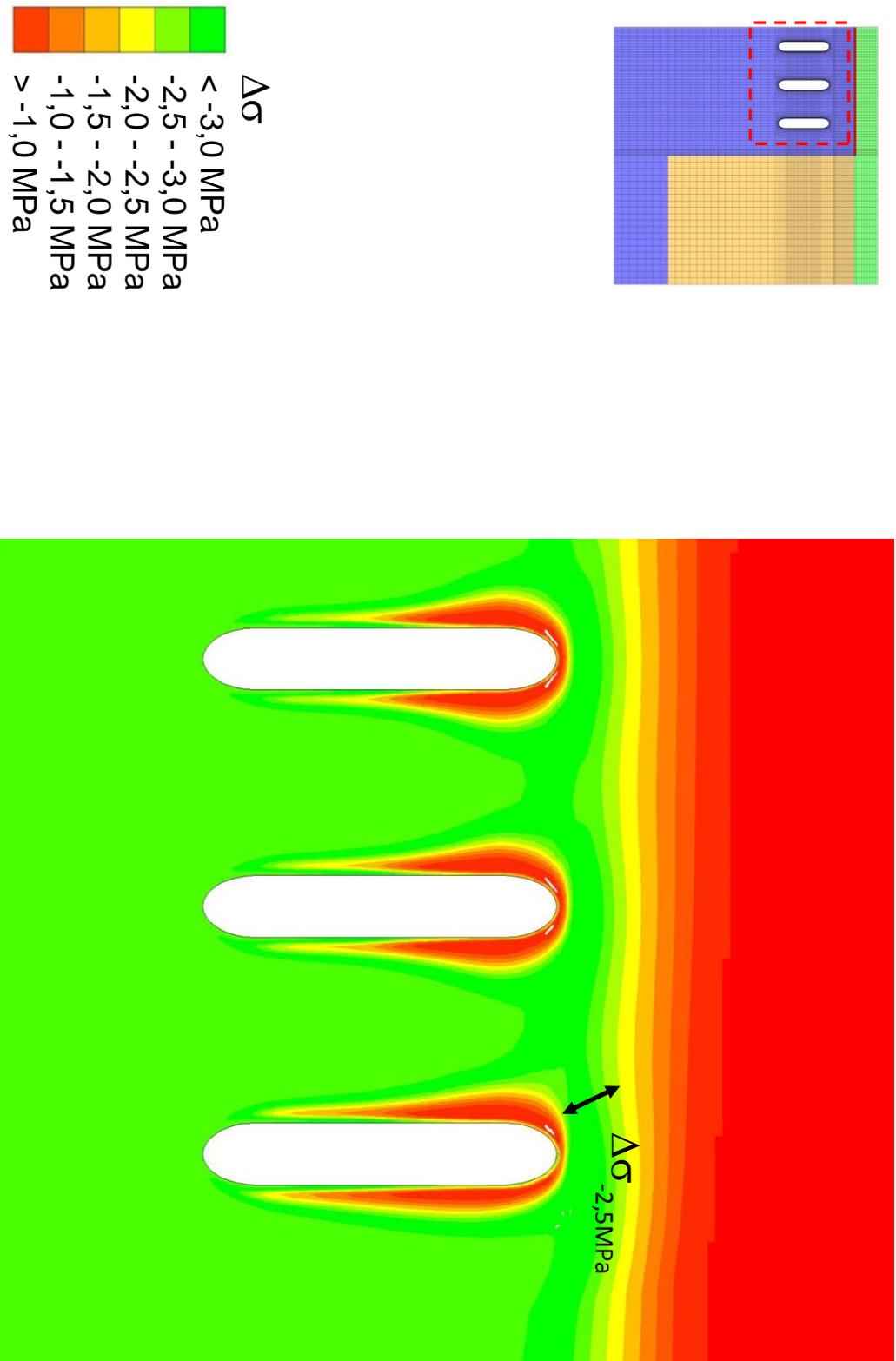


Bild 6.44 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren des Maximaldruckes Modell G

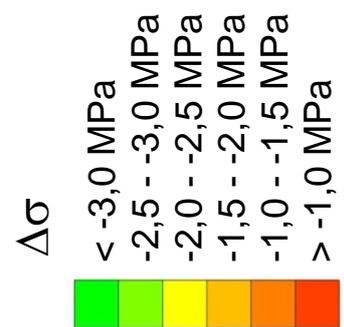
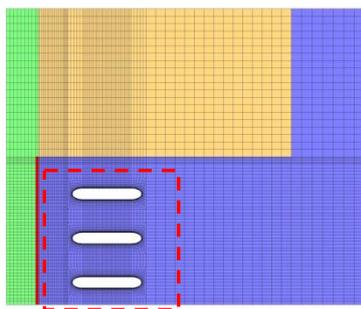
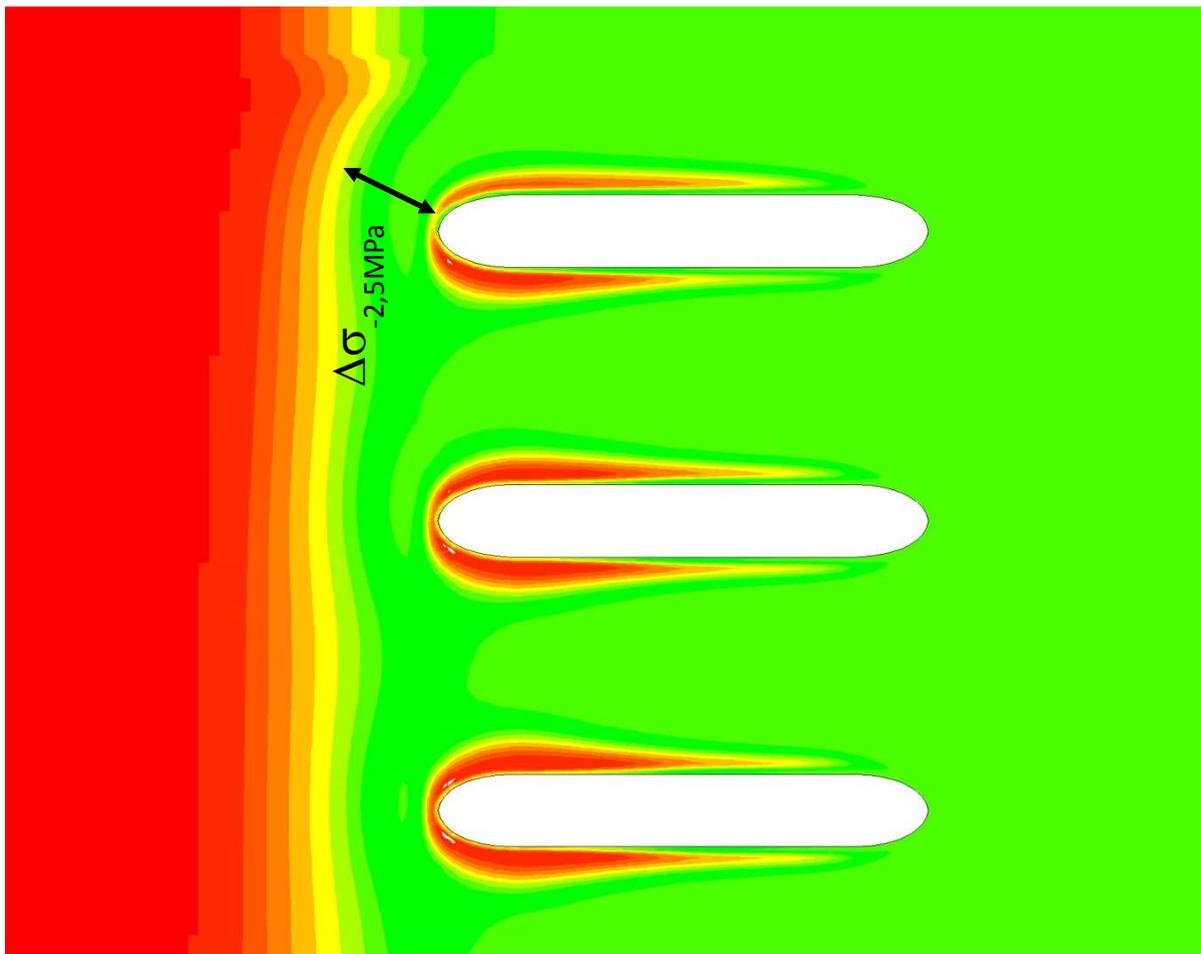


Bild 6.45 Darstellung der Sicherheitszonen $\Delta\sigma$ beim Anfahren des Maximaldruckes Modell H



Bild 6.46 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verminderte Festigkeit ÜZ Modell G

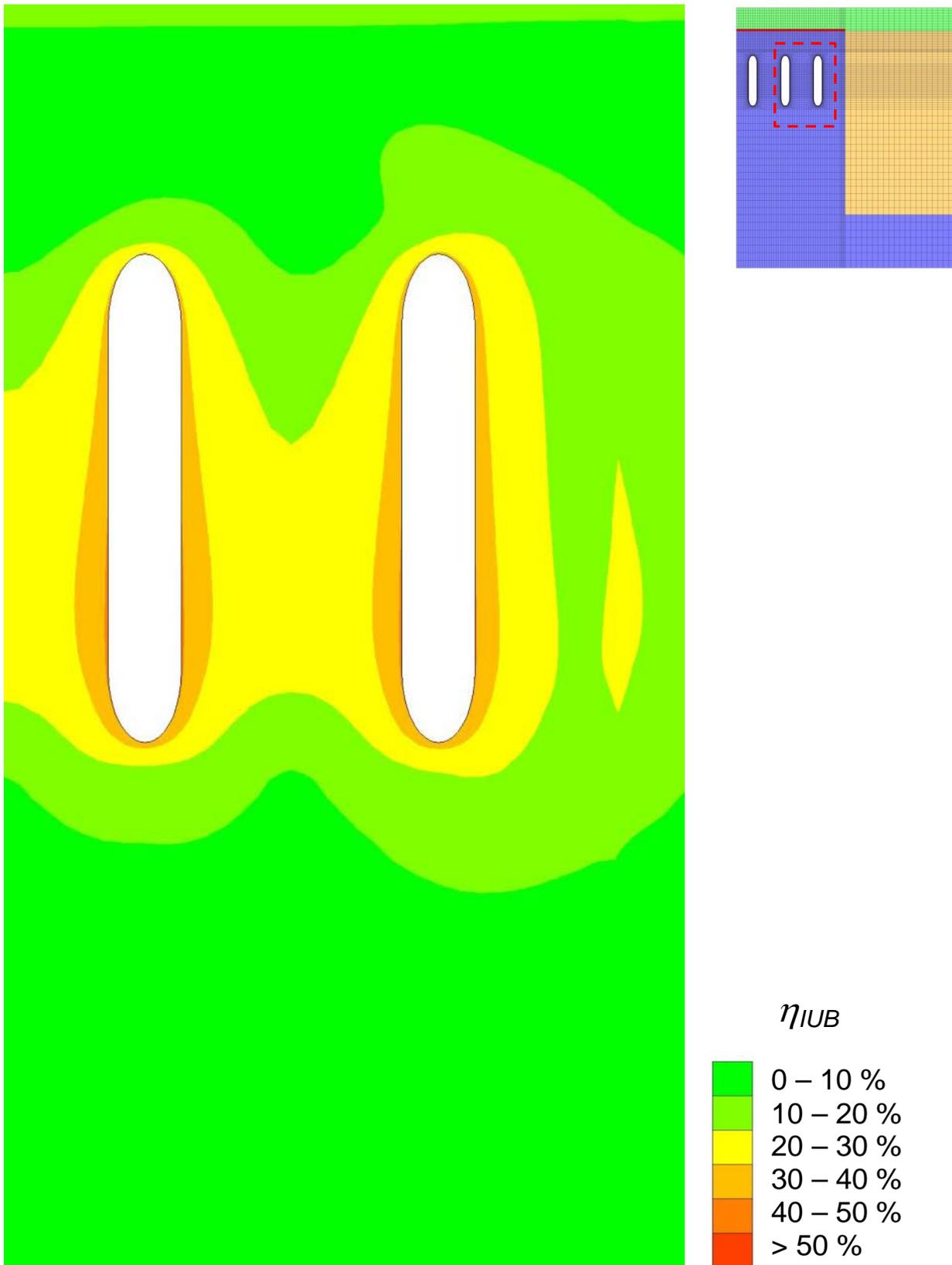


Bild 6.47 Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verm. Festigkeit ÜZ Modell G

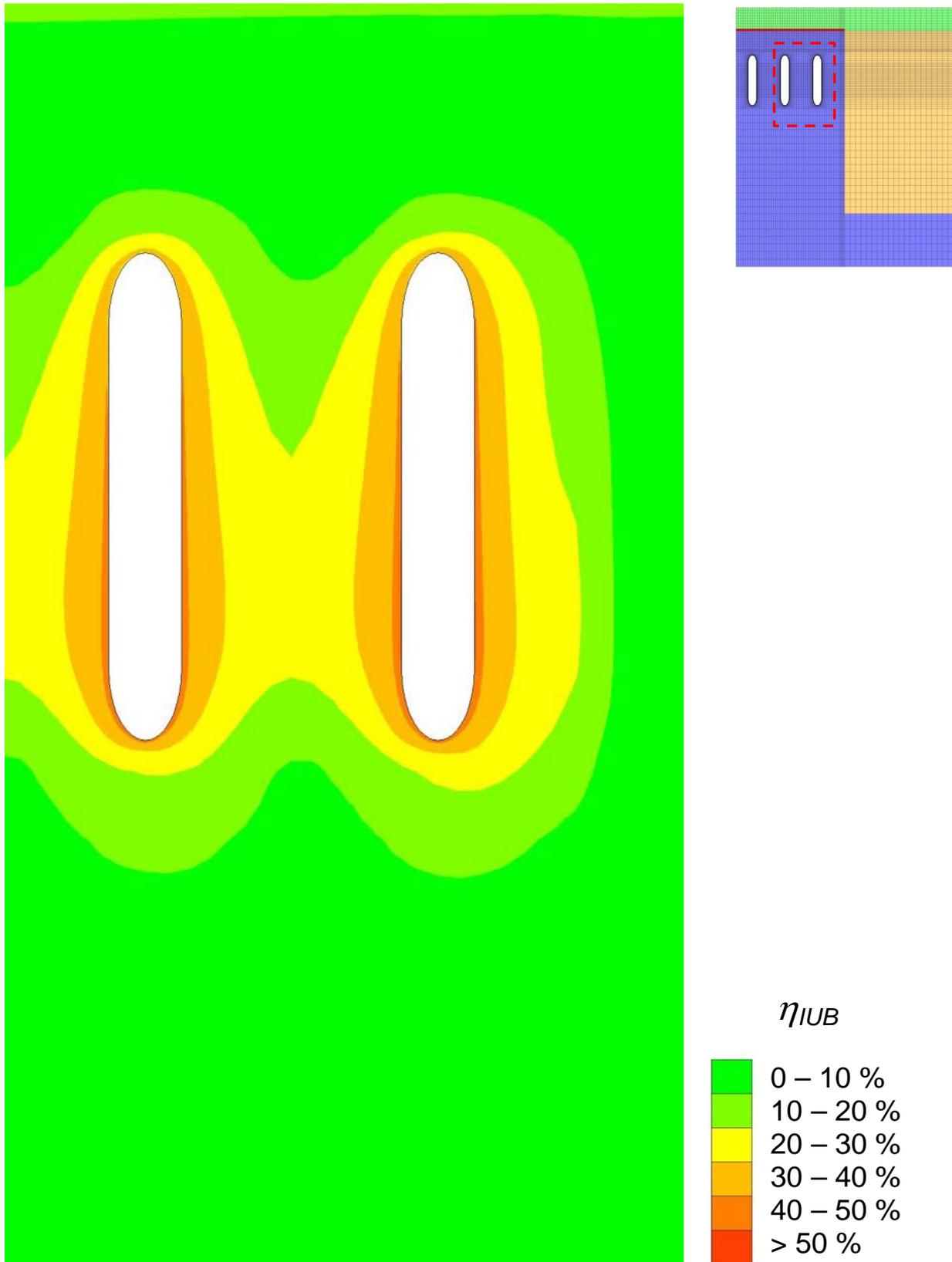


Bild 6.48

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45$ bar / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verminderte Festigkeit ÜZ Modell H

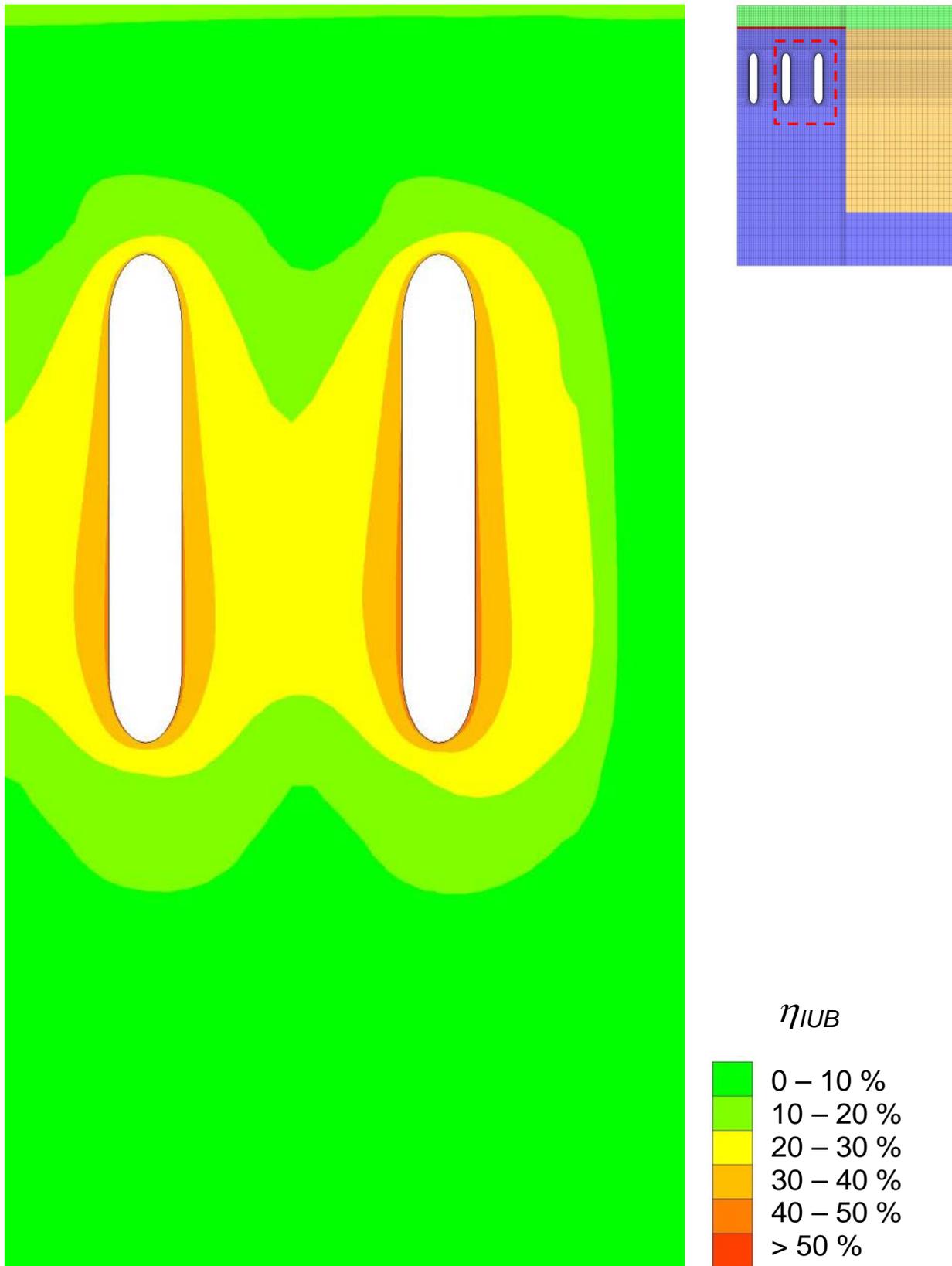


Bild 6.49

Berechnungsergebnisse für $p_{i-min} = 45 \text{ bar}$ / Ausnutzungsgrad η_{IUB} zum Zeitpunkt 60 Tage nach Erreichen des Minimaldruckes im Vertikalschnitt / verm. Festigk. ÜZ Modell H

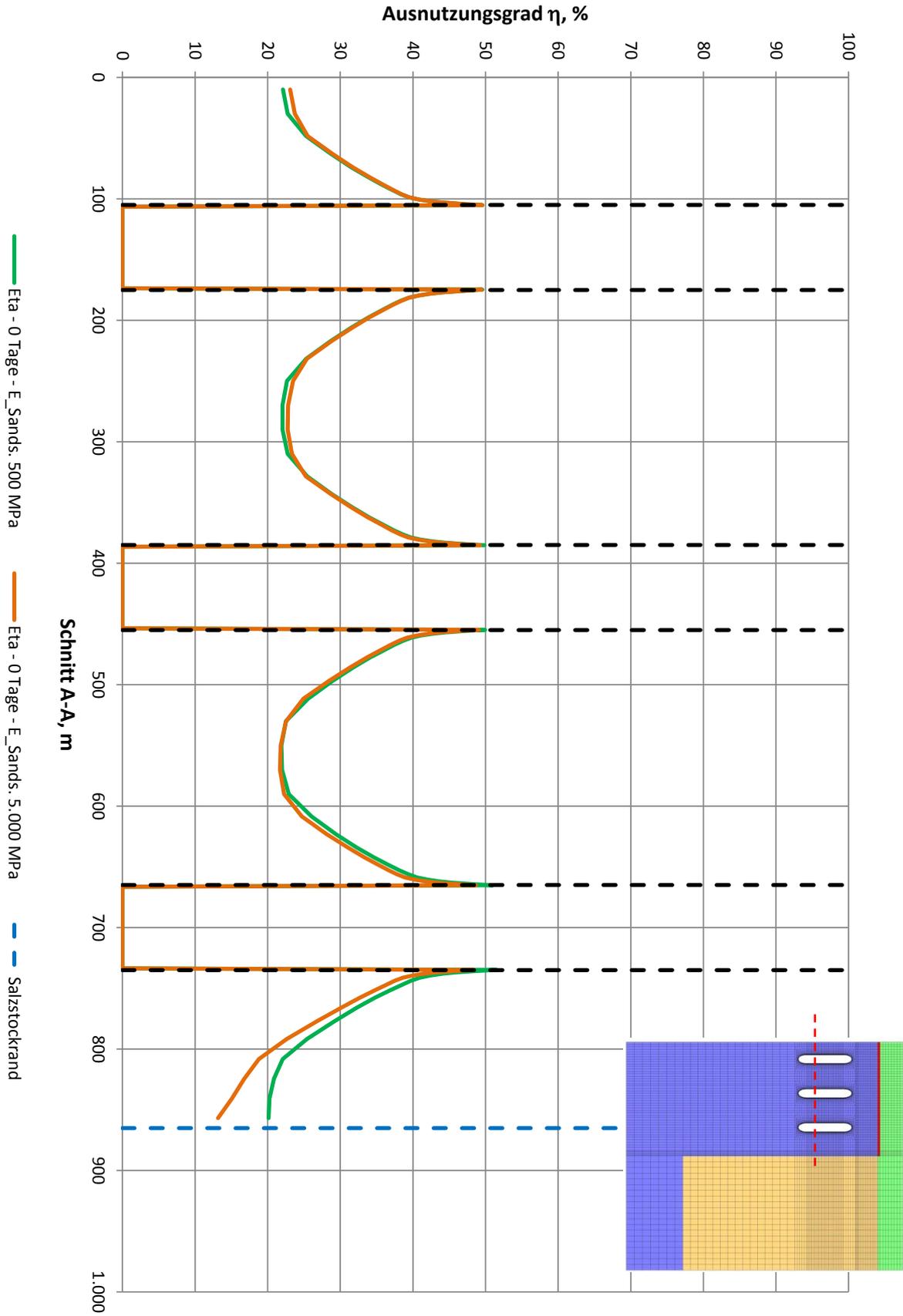


Bild 6.50

Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Horizontalschnitt zum Zeitpunkt $t_{pmin,0d}$

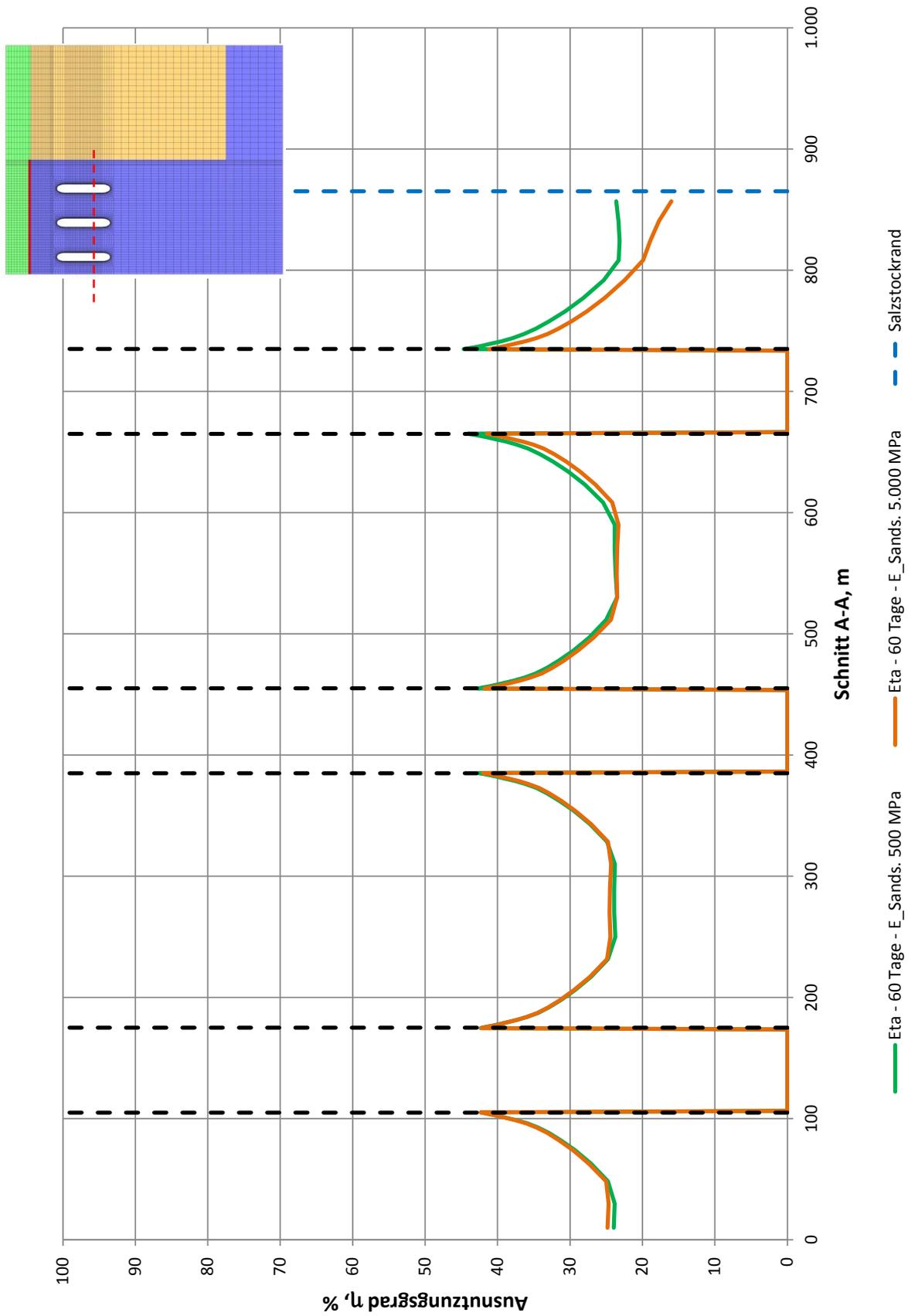


Bild 6.51 Ausnutzungsgrad η_{IUB} im Horizontalschnitt zum Zeitpunkt t_{pmin_60d}

6.10 Sonderlastfall $p_i = 0$ MPa

Für das Berechnungsmodell E wurde eine Simulation des Sonderlastfalles des Ausblasens („Blowout“) der Kaverne auf $p_i = 0$ bar durchgeführt. Eine entsprechende Lastgeschichte ist Bild 6.52 zu entnehmen. Beim Ausblasen einer Gasspeicherkaverne ausgehend vom Maximaldruck ergibt sich aufgrund der thermodynamischen Prozesse während der Entspannung des Speicherguts eine Abkühlung des Gases und des die Kaverne umgebenden Salzgesteins. Die instationäre Abkühlungsphase, die im Rahmen dieser Berechnungen angesetzt wurde, ist ebenfalls Bild 6.52 zu entnehmen.

Der Lastfall ist dadurch gekennzeichnet, dass zwar ab einem bestimmten Innendruck mit makroskopischen Rissen im Wandbereich der Kaverne zu rechnen ist und Gas mit diesem Druck in die Risse gepresst wird, mit zunehmender Risslänge der Innendruck bedingt durch den Prozess des Ausblasens jedoch rasch abnimmt. Die theoretische Rissausbreitungsgeschwindigkeit sollte dadurch erheblich reduziert werden. Außerdem nimmt mit zunehmender Ristiefe der Widerstand der Rissverlängerung zu, da an der Rissspitze die zu überwindende Spannung mit zunehmender Entfernung von Rand der Kaverne anwächst. Diese theoretische Annahme unterscheidet sich damit grundlegend von der Dimensionierung von Betriebsraten, da in dem Fall der Innendruck nicht weiter absinkt, sondern bei Wiederbefüllung einer Kaverne sogar wieder ansteigt und eine Rissausbreitung möglicherweise begünstigt.

Im Rahmen der hier durchgeführten Berechnungen ist eine Ausbildung einer Zugspannungszone von etwa 70 cm zu erwarten. Da allerdings die Berechnungen an einem Kontinuumsmodell ohne die Modellierung von makroskopischen Rissen durchgeführt worden sind, muss eine tatsächliche Rissausbreitung im Salzgestein wahrscheinlich etwas größer angenommen werden. Die Ergebnisse von Untersuchungen im Schacht 1 des Erkundungsbergwerks Gornleben haben gezeigt, dass die tatsächliche Ausbreitung von Rissen in horizontaler Richtung etwa doppelt so lang ist wie die zuvor berechnete Zugspannungszone an einem ungestörten Modell /44/ /45/.

Die Untersuchung des Ausnutzungsgrades η_{IUB} für das Modell zeigt, dass am Rand der Kaverne bei einer Berechnung ohne Temperaturänderung Ausnutzungsgrade von ca. 70 % erreicht werden, wenn das Ausblasen der Kaverne abgeschlossen ist. Bild 6.53 zeigt dabei, dass für ein Modell mit 150 m Entfernung zum Salzstockrand die Ausnutzung des Steinsalzes relativ rasch mit zunehmender Distanz von der Kaverne abnimmt.

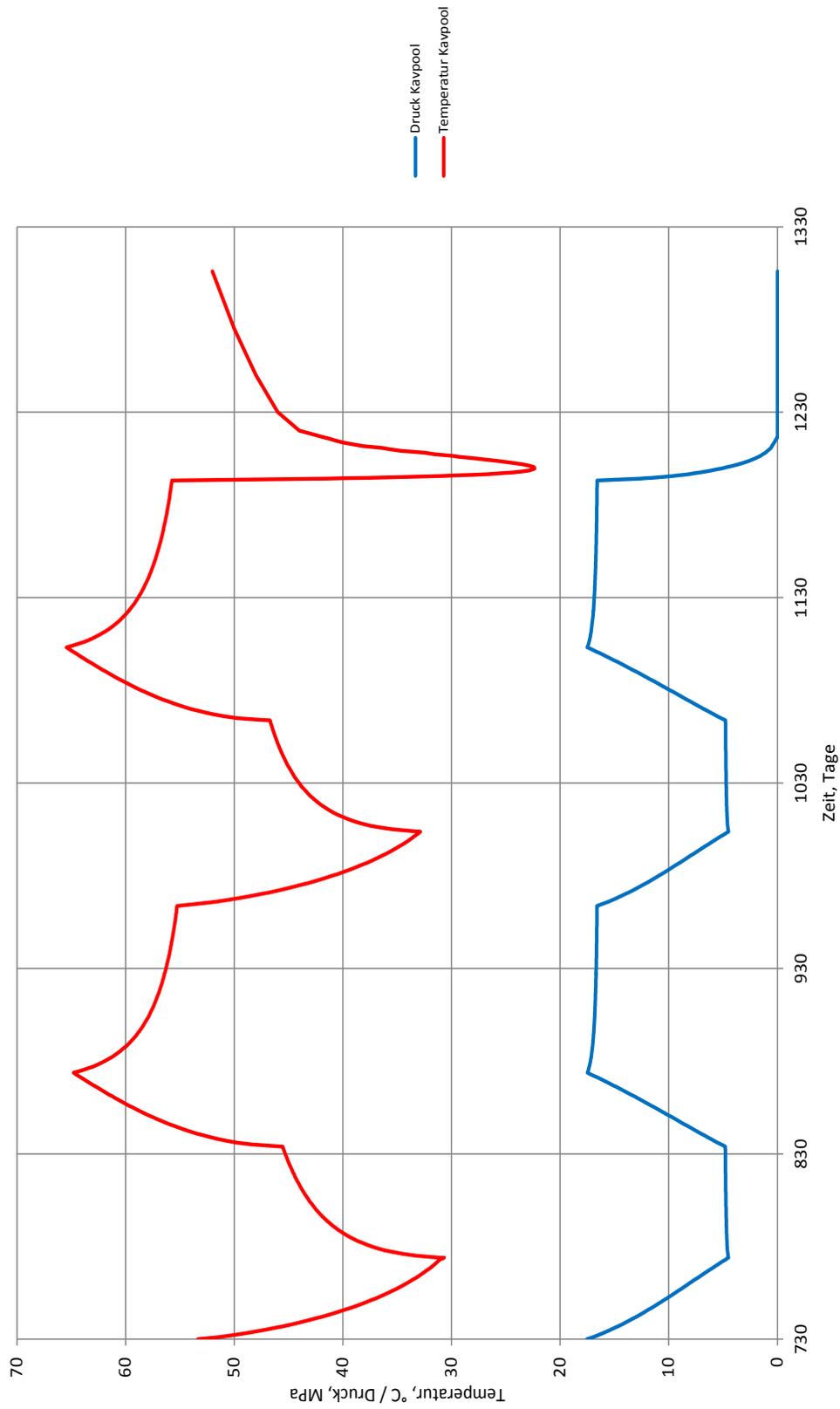


Bild 6.52 Bemessungslastfall Blowout / Temperatur- und Innendruckverlauf

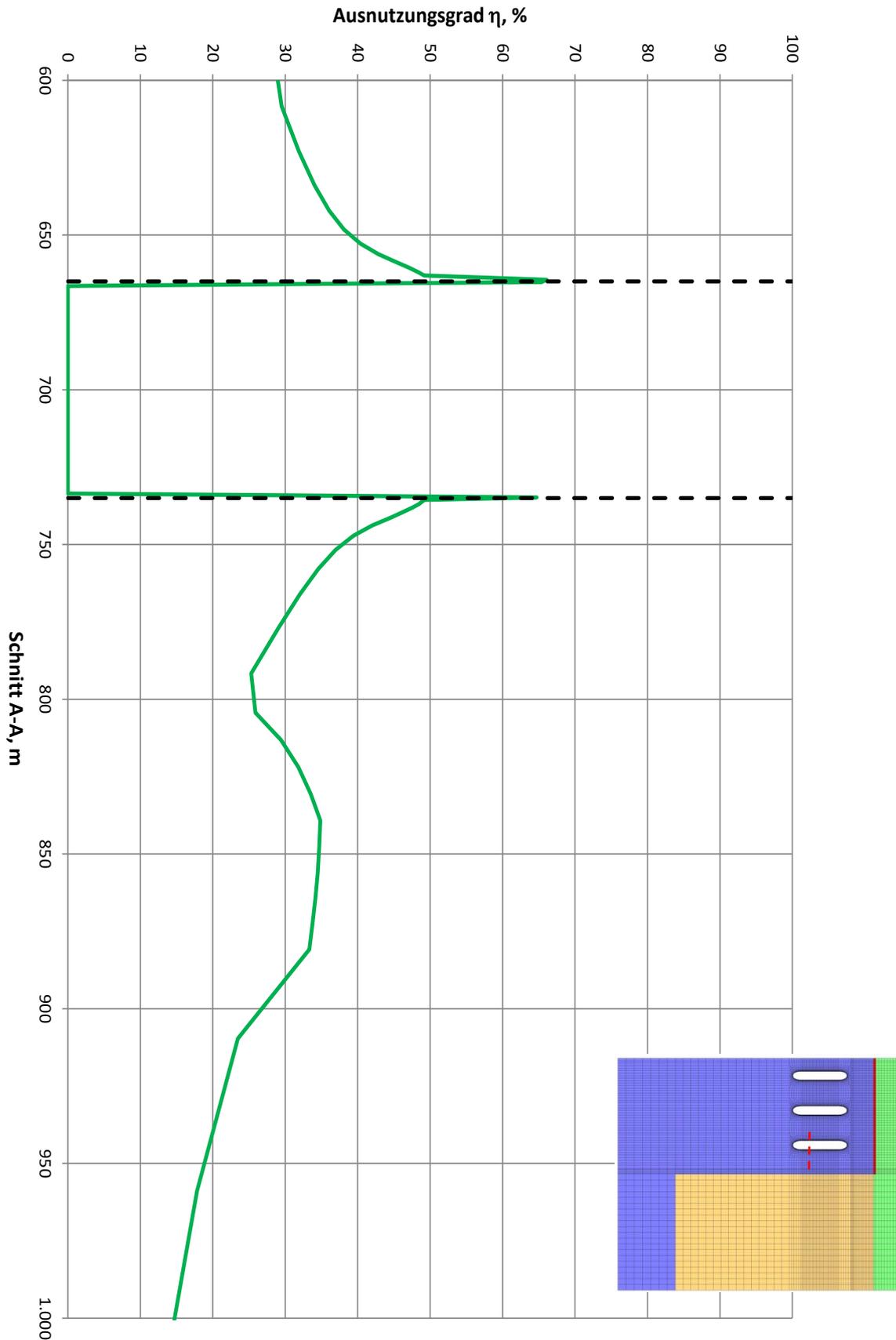


Bild 6.53 Lastfall Blowout / Ausnutzungsgrad η_{IUB} nach Erreichen von $p_i = 0$ MPa

7 Bewertung der Berechnungsergebnisse

Die Berechnungsergebnisse der Modellvariationen zeigen, dass die Entfernung des Salzstockrandes einerseits in Kombination mit einer Übergangszone im Steinsalz mit abgeminderten Kriech- und Festigkeitseigenschaften und andererseits mit unterschiedlichen Modellen für das Nebengebirge einen signifikanten Einfluss auf die gebirgsmechanische Dimensionierung der Kaverne hat.

Die Bewertung der Berechnungsergebnisse erfolgt zunächst getrennt vom jeweiligen Dimensionierungsparameter. Anschließend werden die Berechnungsergebnisse bezüglich der Entfernung zwischen dem Kavernenbauwerk und dem Salzstockrand diskutiert.

7.1 Maximaldruck

Bezüglich des maximalen Kaverneninnendruckes wurde gezeigt, dass der Einfluss auf diesen Dimensionierungsparameter relativ gering ist. Eine Asymmetrie in der Ausbildung der Sicherheitszonen zeigt sich bereits unter der Annahme einer Randkaverne, bei der noch kein Salzstockrand mit einem Nebengebirge berücksichtigt wurde.

Allerdings zeigt eine Modellvariante mit einem veränderten Elastizitätsmodul im Sandstein in Kombination mit einem Abstand des Salzstockrandes von 130 m von der Kavernenwand, dass dieser Parameter einen Einfluss auf die Ausrichtung der Sicherheitszone um die Kaverne herum haben kann. Aus diesem Grund muss der Maximaldruck einer Gaskaverne im Salzstockrandbereich abhängig von den lokationsspezifischen geologischen Gegebenheiten im konkreten Dimensionierungsfall im Rahmen des angesetzten Bemessungslastfalles überprüft werden.

7.2 Betriebsraten

Die Ergebnisse der Berechnungen der Gasspeicherkaverne bezüglich der Betriebsraten zeigen, dass der Einfluss der Entfernung des Salzstockrandes auf diesen Dimensionierungsparameter eine untergeordnete Rolle spielt.

Der Wert für die Druckspannung, der aus der Berechnung am rotationssymmetrischen Modell in Kapitel 5 ermittelt wurde, beträgt beispielsweise -2,0 MPa. Die Resultate der Simulationen in den Modellvariationen zeigten keine signifikante Abweichung von diesem Berechnungsergebnis.

Aus der Analyse der Berechnungsergebnisse kann geschlossen werden, dass die Entfernung des Salzstockrandes mit den angenommenen Berechnungsparametern lediglich einen geringen Einfluss auf den thermisch induzierten Spannungszustand des die Kaverne umge-

benden Salzgesteins hat. Dies erklärt sich damit, dass die thermodynamischen Prozesse, die sich in der Umgebung der Kaverne abspielen, auf einen Bereich von wenigen Metern um die Kaverne herum begrenzt sind. Allerdings ist im Rahmen einer Dimensionierung einer Gaskaverne im Salzstockrandbereich nicht nur das lokale Temperaturfeld zu beachten, sondern es ist gegebenenfalls lokationsspezifisch zu untersuchen, inwieweit sich die primäre Gebirgstemperatur zum Salzstockrand hin verändert und somit wiederum einen Einfluss auf das thermomechanische Verhalten in der Umgebung einer Randkaverne hat.

7.3 Minimaldruck

Im Mittelpunkt des Vergleichs in der Auswertung der durchgeführten Modellberechnungen steht die Bewertung des minimalen Kaverneninnendruckes. Die Berechnungen an allen Modellen zeigen, dass die maximale Beanspruchung der Kavernenwand im Rahmen einer Bandbreite eine vergleichbare Größenordnung aufweist, unabhängig davon, ob ein rotationssymmetrisches Feldkavernenmodell oder ein komplexes dreidimensionales Randkavernenmodell mit der Annahme eines Salzstockrandes, einer Übergangszone und mit variierten Parametern für das Nebengebirge berechnet wird.

Der Ausnutzungsgrad η_{IUB} wird an dem betrachteten Auswertungspunkt an der Kavernenwand mit maximal ca. 50 % und im Laufe der Standzeit auf Minimaldruckniveau mit einem Abklingen unter 45 % berechnet.

Auch in den Modellen C und D, in denen ein Salzstockrand mit einer Entfernung von 200 m und 150 m von der Kavernenwand angenommen wurde, liegen die Werte des Ausnutzungsgrades bei Erreichen des angesetzten minimalen Kaverneninnendruckes auf einem ähnlichen Niveau.

Mit der Annahme einer Übergangszone im Steinsalz kann in den Berechnungsergebnissen festgestellt werden, dass diese Zone einen signifikanten Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat.

Modell E wurde mit einer Ausdehnung einer solchen Übergangszone von 50 m modelliert und mit Stoffgesetzparametern belegt, die sowohl das stationäre Kriechverhalten aufgrund möglicher Verunreinigungen als auch die Festigkeit des Materials in diesem Bereich reduzieren. Die Auswirkungen, die durch diese Veränderungen auftraten, waren vor allem eine höhere Ausnutzung des Steinsalzes oberhalb einer Dauerfestigkeit.

Bei dauerhaftem Betrieb der Kaverne bedeutet dies, dass das Steinsalz über mehrere Betriebsjahre geschädigt werden und eine Konnektivität zwischen der gasgefüllten Kaverne und

einem Nebengebirge mit einer größeren Permeabilität gegenüber dem Steinsalz entstehen könnte.

Beide Modelle E und F mit den Salzstockrandabständen von 150 m bzw. 200 m von der Kavernenwand zeigen die erhöhte Beanspruchung in den Übergangszonen. Signifikant in der Untersuchung der Modellvariante F ist, dass dieses in der angenommenen Übergangszone geringere η_{IUB} -Werte aufwies.

Aus ingenieurtechnischer Sicht kann die Annahme einer gestörten Übergangszone im Steinsalz nicht eindeutig berücksichtigt werden, wenn nicht gesicherte Daten zu den Dimensionen und den Materialeigenschaften in dieser Zone vorliegen. Diese können nur durch Bohrungen in diesem Gebirgsbereich gewonnen werden, aus denen Bohrkernmaterial zur Beprobung im Labor für die gebirgsmechanischen Eigenschaften gewonnen wird. Liegen solche Erkenntnisse nicht vor, müssen für eine Dimensionierung Annahmen basierend auf Interpretationen beispielsweise von geologischer Seite getroffen werden.

Aus diesem Grund wurden für die Dimensionierung einer Gasspeicherkaverne im Salzstockrandbereich die Modelle G und H untersucht, in denen der Abstand zwischen der Kavernenwand und dem umgebenden Sandstein mit 130 m angesetzt wurde. Wie oben erwähnt, wurde auf die Diskretisierung einer Übergangszone im Steinsalz verzichtet, die Bewertung der Berechnungsergebnisse bezieht sich daher nur auf den Steinsalzbereich. Die Berechnungen an diesen Modellen zeigen, dass bei einem Elastizitätsmodul von $E = 500 \text{ MPa}$ (Modell H) im Nebengebirge, die Beanspruchung im betrachteten Salzstockrandbereich höher ist gegenüber Modell G mit einem zehnfach höheren E-Modul. Die Ergebnisse zeigen ferner, dass ein ausreichend großer Bereich zwischen der Kaverne und der Salzstockflanke gegeben sein sollte. Mit einem kleineren E-Modul im Nebengebirge steigt die Beanspruchung im Salz. Auch unmittelbar an der Kavernenkontur werden größere Ausnutzungsgrade berechnet. Sollte sich der Salzstockrand näher an der Kaverne befinden, bedeutet dies ein weiteres Anwachsen der Beanspruchung im Steinsalz.

Bild 7.1 zeigt das Dimensionierungskonzept auf der Grundlage der beschriebenen Untersuchungsergebnisse. Aus den Berechnungsergebnissen der Modellvariationen resultiert, dass die Kavernenwand von einer Salzstockflanke im Modell mindestens einen Abstand b_R in der Größenordnung des eineinhalbfachen Durchmesser der betrachteten Randkaverne in Addition mit der Dimension der Zone, die oberhalb der Dauerfestigkeit des Steinsalzes beansprucht ist, aufweisen sollte. Zusätzlich ist eine Übergangszone mit mindestens 50 m zu berücksichtigen, die möglicherweise abweichende mechanische Eigenschaften wie eine verminderte Kriechfähigkeit oder eine geringere Festigkeit zeigt.

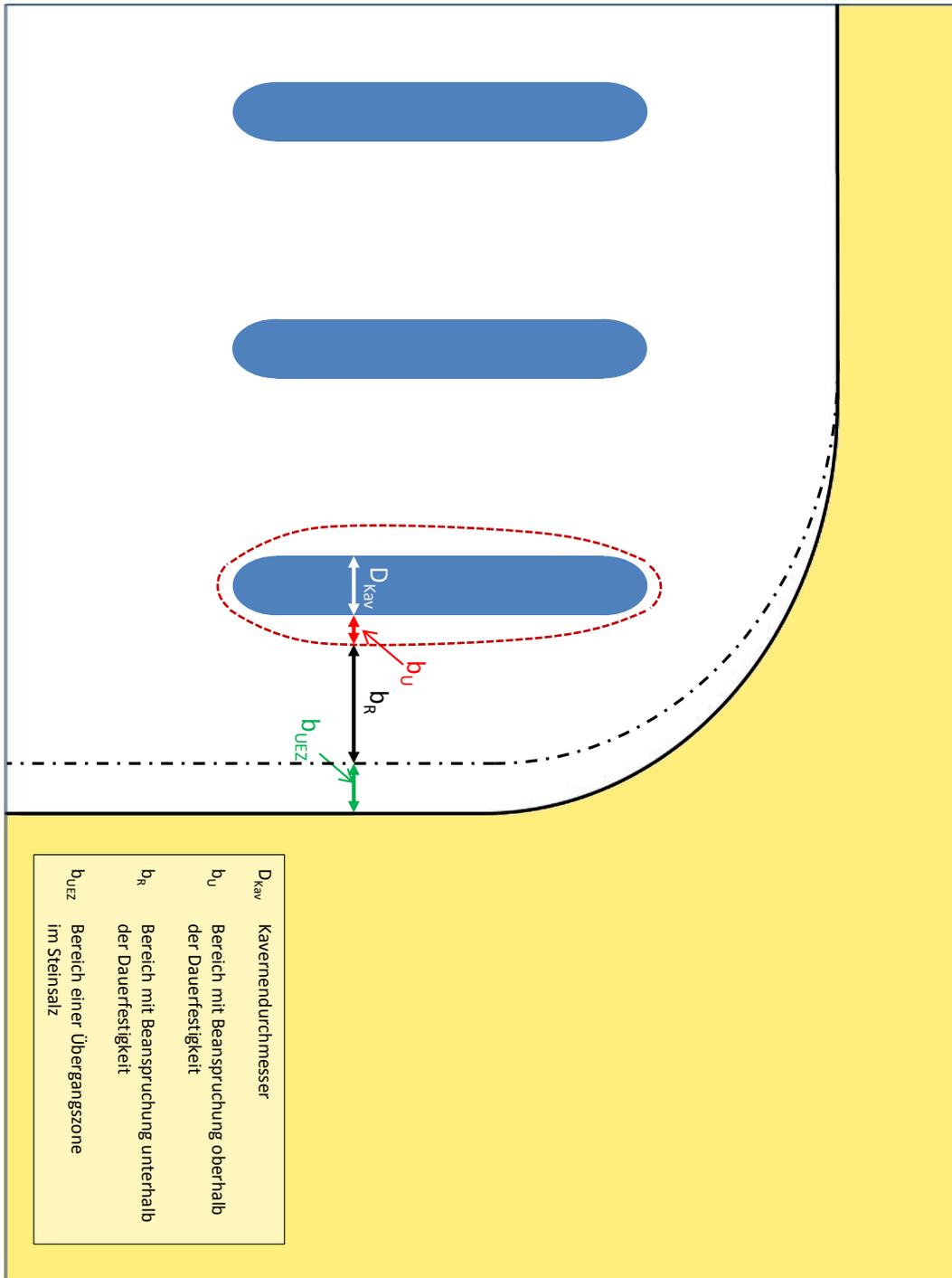


Bild 7.1 Dimensionierung des Abstandes zwischen Kavernenwand und Salzstockrand

8 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein Dimensionierungskonzept zur Erstellung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich zu erarbeiten. Die Grundlage zur Bewertung der Standsicherheit dieser Kavernen stellten die Dimensionierungsparameter Maximaldruck, Minimaldruck sowie die mögliche Betriebsrate dar. Der Sonderlastfall $p_i = 0$ bar wurde in einer zusätzlichen Betrachtung bewertet.

Aus den seismischen Untersuchungen an Salzstöcken ist ersichtlich, dass es trotz moderner Messmethoden nicht möglich ist, insbesondere die Lage der Salzstockflanke hinreichend genau zu erfassen. Je nach Messmethode werden die Abweichungen zwischen der Interpretation und dem realen Flankenverlauf mit einer unterschiedlichen Genauigkeit angegeben, sie betragen jedoch nach übereinstimmenden Aussagen mindestens 50 m. Die Größenordnung dieser Ungenauigkeit ist aus ingenieurtechnischer Sicht ebenso schwer in einem Modell zu erfassen wie eine möglicherweise vorhandene Übergangszone zwischen dem Salzgestein, in dem die Kaverne angelegt werden kann und dem nicht-salinaren Gebirge, welches den Salzstock umgibt. Die Beanspruchung in solchen Übergangszonen kann nur fiktiv angesetzt werden, so lange keine Untersuchungen des Materials beispielsweise bezüglich der Kriechfähigkeit und der Festigkeit durchgeführt werden. Hierzu müssten Bohrungen in Richtung des Salzstockrandes erfolgen, um entsprechende Bohrkerne für eine detaillierte Beprobung im Labor entnehmen zu können.

Zur Dimensionierung einer Gasspeicherkaverne im Salzstockrandbereich war es notwendig, ein neues dreidimensionales Berechnungsmodell zu erstellen. Dieses musste neben der zu betrachtenden Kaverne weitere Nachbarkavernen enthalten, um die Charakteristik eines Salzstockes und eines Kavernenfeldes in seinen horizontalen Ausmaßen der Realität entsprechend wiedergeben zu können. Es reicht nicht aus, nur die zu betrachtende Kaverne in diesem Modell zu berücksichtigen, da die Nachbarkavernen mit ihren jeweiligen Abmessungen und ihrer Belastungsgeschichte einen großräumigen Einfluss auf die Spannungsumlagerungen der Gasspeicherkaverne im Randbereich des Salzstockes haben.

Die Betriebsgeschichte der Kaverne wurde auf der Grundlage thermodynamischer Simulationsberechnungen erstellt. Unter Verwendung der Ergebnisse dieser Berechnungen erfolgte anschließend die thermomechanisch gekoppelte numerische Simulation mit dem Stoffgesetz Lubby2.

Es wurde dargestellt, dass im Salzstock mit einem isotropen Primärspannungszustand gerechnet werden kann. Die Ergebnisse von Simulationsberechnungen über einen genügend

langen Zeitraum zeigen, dass eine mögliche Übergangszone zu anisotropen Spannungszuständen außerhalb des gebirgsmechanisch zu bewertenden Salzstockes liegt.

Die Ergebnisse der Modellberechnungen G und H mit Berücksichtigung eines Salzstockrandes mit einer Entfernung von 130 m von der Kavernenwand zeigen, dass die Spannungszustände zwischen der Gaskaverne und dem Salzstockrandbereich von der Annahme der Steifigkeit im Nebengebirge beeinflusst werden. Die Verringerung des Elastizitätsmoduls im Nebengebirge führt zu einer größeren Beanspruchung des Salzgesteins zwischen Kavernenwand und dem Salzstockrand. Beide Berechnungsvariationen zeigen auch, dass ein großer Bereich des Salzgesteins unterhalb der Dauerfestigkeit des Materials beansprucht wird.

Für die Erstellung des Dimensionierungskonzeptes stellt der Ausnutzungsgrad η_{IUB} unter Minimaldruckbedingungen einen maßgeblichen Parameter für die Bewertung der Standsicherheit in dem betrachteten Gebirgsbereich dar. Das Konzept zur Erstellung von Gasspeicherkavernen im Salzstockrandbereich enthält neben dem Aufbau eines geeigneten Berechnungsmodells für die gebirgsmechanische Bewertung den Dimensionierungsparameter b_R als zu berücksichtigenden Mindestabstand zwischen der Kaverne und dem Salzstockrand.

Der Gesamtbetrag des Abstandes zwischen Kavernenwand und Salzstock beinhaltet zum einen den Bereich um die Kaverne herum, dessen Beanspruchung oberhalb der Dauerfestigkeit des Salzgesteins liegt (b_U) und zum anderen additiv den Bereich, der mindestens den 1,5-fachen Durchmesser der Randkaverne beträgt (b_R). In diesem Bereich liegt die Beanspruchung des Salzes während der gesamten Lastgeschichte unterhalb der Dauerfestigkeit. Dieser Gesamtabstand ist das Mindestmaß, welches in der Dimensionierung einer Gasspeicherkaverne gegenüber dem Salzstockrand berücksichtigt werden sollte, um den sicheren Betrieb über die gesamte Lebensdauer gewährleisten zu können.

Liegen des Weiteren Unklarheiten über das mechanische Verhalten, die Festigkeit, den internen Aufbau und die Ausdehnung einer Übergangszone im Steinsalz vor, ist diese Zone (b_{UEZ}) zusätzlich mit mindestens 50 m in der Dimensionierung des Abstandes zwischen Kavernenwand und Salzstockrand zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Erarbeitung eines ingenieurmäßigen Konzeptes zur Empfehlung des minimalen Abstandes zwischen der Wand einer Gasspeicherkaverne im Steinsalz und dem Salzstockrand vorgestellt. Diese Fragestellung rückte in den letzten Jahren in den Fokus der Kavernenherstellung, da bisher in den vorhandenen Salzstöcken in Deutschland genügend Platz im Zentrum der Diapire vorhanden war, um das erforderliche Speichervolumen zu realisieren.

Insbesondere beim SMRI werden Forschungsvorhaben mit verschiedenen Fragestellungen zur Anlage von Kavernenbauwerken in Salzstockrandbereichen in den nächsten Jahren initiiert. Der Zwischenfall in Napoleonville hat gezeigt, dass es zu beträchtlichen Schäden an der Umwelt kommen kann, wenn eine Kaverne aufgrund einer vermutlichen Fehlinterpretation des Salzstockflankenverlaufs beschädigt wird.

Die numerischen Möglichkeiten sind durch immer leistungsfähigere Hardware mittlerweile so weit fortgeschritten, dass es mit einem vertretbarem Rechenaufwand möglich ist, komplexe geologische Strukturen unter Einbeziehung eines thermomechanisch gekoppelten Betriebs-szenarios der Speicherkaverne zu berechnen. In diesem Bereich ist in den kommenden Jahren mit einer weiteren Verbesserung der Möglichkeiten zu rechnen, so dass auch in Zukunft die Diskretisierung der erforderlichen Berechnungsmodelle detaillierter und komplexer erfolgen kann.

Literaturverzeichnis

- /1/ Zapf, D., Staudtmeister, K., Leuger, B., 2011. The Influence of Different Loading Scenarios on the Thermo-Mechanical Behavior of a Gas Storage Cavern. SMRI Spring 2011 Technical Conference, 18-19 April, Galveston, Texas, USA.
- /2/ Staudtmeister, K., Zapf, D., 2010. Rock Mechanical Design of Gas Storage Caverns for Seasonal Storage and Cyclic Operations, SMRI Spring 2010 Technical Conference, 26-27 April, Grand Junction, Colorado , USA.
- /3/ Hill, K., 2013. The Value of 2D, 3D and 4D Reflection Seismic Data in Solution Mining Work. SMRI Spring 2013 Technical Conference, 22-23 April, Lafayette, Louisiana, USA.
- /4/ Allgemeine Bergverordnung für Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen (ABVO), 2.Februar 1966 (Nds. MBl. Nr. 15/1966 S.337).
- /5/ Allgemeine Bergpolizei-Verordnung des königlichen Oberbergamts zu Clausthal, 7. April 1911.
- /6/ Allgemeine Bergpolizei-Verordnung für den Oberbergamtsbezirk Clausthal-Zellerfeld, 8. Januar 1945.
- /7/ Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Niedersachsen (Tiefbohrverordnung –BVOT-), 20.9.2006.
- /8/ Gehle, R.M., Thoms, R.L., 1983. Analysis of a Cavern Near the Flank of a Salt Dome. Sixth International Symposium on Salt, 1983 – Vol. I.
- /9/ Vining, C.A., Buchholz, S.A., 2013. Capabilities of Numerical Modeling of Storage Caverns Located in Close Proximity to Domal Boundaries. SMRI Spring 2013 Technical Conference, 22-23 April, Lafayette, Louisiana, USA.
- /10/ Ochsenius, C., 1877. Die Bildung der Steinsalzlager und ihrer Mutterlaugensalze unter specieller Berücksichtigung der Flötze von Douglasshall in der Egelin'schen Mulde. Halle, C.E.M. Pfeffer.
- /11/ Reuther, C.-D., 2012. Grundlagen der Tektonik. Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur. Springer-Verlga Berlin Heidelberg.
- /12/ Halbouty, M. T., 1979. Salt Domes. Gulf Region, United States and Mexico.

- /13/ Posebny, F., 1871. Studien aus dem Salinargebiete Siebenbürgens, zweite Abteilung. K.K. Geol. Reichsanstalt Jahrb., Bd. 21, Heft 1, S. 123-188.
- /14/ Thomassy, R., 1860. Geologie Pratique des la Louisiana. Paris.
- /15/ Norton, E. G., 1915. The Origin of the Louisiana and East Texas Salines. Bull., AIME, no. 97, pp. 93-102; no. 101, pp. 1120-1122.
- /16/ Trusheim, F., 1957. Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. Zeitschrift Deutsche Geologie, v. 98, S. 7-29.
- /17/ Trusheim, F., 1960. On the Mechanism of Salt Migration in Northern Germany. Bull., AAPG, v. 44, no. 9, pp. 1519-1540.
- /18/ Gillhaus, A., Horvath, P.-L., April 2008. Compilation of geological and geotechnical data of worldwide domal salt deposits and domal salt cavern fields. KBB-Project-No. 7007-02, for Solution Mining Research Institute, Clarks Summit, PA, USA.
- /19/ Schweinsberg, H.-J., 2012. Etzel Cavern Facility – An Energy Hub for Crude Oil and Gas Storage in Europe. SMRI Fall 2012 Technical Conference, 1-2 October, Bremen, Germany.
- /20/ ExxonMobil Production. Seismische Untersuchungen – Erkundung des Untergrundes nach neuen Lagerstätten.
http://www.exxonmobil.com/Germany-German/PA/Files/about_what_upstream_technology_Seismik.pdf
- /21/ Zhao, X., Green, W., Hayden, D., Doherty, F., Jackson, J., Knapo, G., 2007. Salt Flank Imaging Using Offset VSP as an Aid to Cavern Construction. Petroleum Africa, May 2007, pp. 56-58.
- /22/ Wilke, F., Behlau, J., Bornemann, O., Schweinsberg, H.-J., 2004. Geological 3D-Model for predicting new cavern locations. SMRI Spring 2004 Conference, 18-21 April, Wichita, Kansas, USA.
- /23/ Kleinfeld, B., Behlau, J., Schweinsberg, H.-J., 2008. Safe and economic cavern construction in the Etzel Cavern Field based on geological 3D-Modelling. SMRI Spring 2008 Technical Conference, 28-29 April, Porto, Portugal.
- /24/ Elsen, R., Siever, K., Uchtmann, S., 2013. Why Leaching in the Dark? Have a Look inside your Salt Dome by 3D Borehole Radar. SMRI Spring 2013 Technical Conference, 22-23 April, Lafayette, Louisiana, USA.

- /25/ Halliburton Wireline & Perforating, 2012. 3D Reserve Salt Proximity – High-Resolution 3D Reserve Salt Flank Proximity.
http://www.halliburton.com/public/lp/contents/Data_Sheets/web/H/H09726L.pdf
- /26/ Blair, R., Keeter, J., 1998. Case History – Using Horizontal Drilling to Determine the Edge of a Gulf Coast Dome. SMRI Fall 1998 Meeting, 4-7 October, Rome, Italy.
- /27/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zirner, R., 2007. Standortbestimmung Gorleben, Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Geologisches Jahrbuch, Reihe C.
- /28/ Kockel, F., Krull, P., 1995. Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Auftraggeber Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- /29/ Kukla, R., Peching, R., Urai, J., 2011. Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 2. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Oktober 2011.
- /30/ Rios, A. M., Aciel, O., Aguilera, L., Gaitan, R., Cristian, A., Rodriguez, S., 2011. Using seismic-while-drilling technology to reduce uncertainty. Offshore Magazine, January 2011.
- /31/ Hill, K., 2013. Using 3D Seismic Reflection Data, Vertical Seismic Profiles and Sub-Surface Well Control to Get the Real Picture of US Gulf Coast Salt Domes. SMRI Fall 2013 Technical Conference, 30 September – 1 October, Avignon, France.
- /32/ Department of Natural Resources, State of Louisiana.
<http://dnr.louisiana.gov/index.cfm?md=pagebuilder&tmp=home&pid=939>
- /33/ Mitchell, D.-J., 2013. Scientists say cavern created too close to edge of Napoleonville Dome, The Advocate – New Orleans Edition.
- /34/ Voigt, J., 2012. Napoleonville salt dome, Louisiana, USA 2012 sinkhole. SMRI Conference 2012, 1 October, Bremen, Germany.
- /35/ Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zapf, D., 2011. Rock Mechanical Design for a Planned Gas Cavern Field in the Preesall Project Area, Lancashire, UK. SMRI Fall 2011 Technical Conference, 3-4 October, York, UK.

- /36/ Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., 1989. The Finite Element Method. McGraw Hill, 4th Edition, Vol. 1, London.
- /37/ Heusermann S., Lux K.H., Rokahr R.B., 1982. Entwicklung mathematisch - mechanischer Modelle zur Beschreibung des Stoffverhaltens von Salzgestein in Abhängigkeit von der Zeit und von der Temperatur auf der Grundlage von Laborversuchen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ET 2011 A, Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover.
- /38/ Hampel, A. et al., 2010-2016. Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellrechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verteilung von Steinsalz. Projektträger : Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Förderkennzeichen 02E10820.
- /39/ Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., 1997. Development of a New Criterion for the Determination of the Maximum Permissible Internal Pressure for Gas Storage Caverns in Rock Salt. SMRI Research Project Report No. 97-001A-SMRI.
- /40/ Rokahr, R., Staudtmeister K., 1997. Rock Mechanical Design of Storage Caverns For Natural Gas in Rock Salt Mass. ISRM International Symposium, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, NY, Vol.34, No.3-4.
- /41/ Rokahr, R., Hauck, R., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Crotagino, F., Rolfs, O., 2002. High Pressure Cavern Analysis. Final Report of SMRI Research Project No. 2002-2-SMRI.
- /42/ Staudtmeister, K., Rokahr, R., 1994. Laboratory Tests within the Scope of Rock Mechanical Investigations for the Design of Solution Mined Caverns in Rock Salt Mass. SMRI Fall Meeting 1994, Hannover, Germany.
- /43/ Staudtmeister, K., Struck, D., 1990. Design Criteria for Prevention of Creep Rupture for Gas Storage Caverns in Rock Salt Mass. SMRI Fall Meeting 1990, Paris, France.
- /44/ Heusermann, S., Eickemeier, R., 2008. Einfluss der Bewetterungstemperatur auf das mechanische Verhalten des Schachtes 1 im Erkundungsbergwerk Gorleben. Messen in der Geotechnik 2008, Fachseminar 23./24. Oktober, Braunschweig.
- /45/ Zapf, D., Staudtmeister, K., Rokahr, R.B., 2012. Analysis of Thermal Induced Fractures in Rock Salt, SMRI Spring 2012 Technical Conference, 23-24 April, Regina, Saskatchewan, Canada.

- /46/ Itasca Consultants: Benutzerhandbuch zu Flac3D, Version 3.1, Volume I-VI, 2006.
- /47/ <http://www.geotis.de>
- /48/ Nipp, H.-K., 1982. Temperatureinflüsse auf rheologische Spannungszustände im Salzgebirge. Bericht-Nr. 82-36 aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig.
- /49/ Leuger, B., Beutel, T., 2012. Bewertung der Betriebserfahrungen mit der Gasspeicherkaverne Huntorf K6. 20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau, 6.-7.März 2012, Stuttgart.
- /50/ Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zapf, D., 2008. Influence of Different Loading Histories on the Rock Mechanical Behavior of a Gas Cavern at Shallow Depth. SMRI Spring 2008 Technical Conference, 28-29 April, Porto, Portugal.
- /51/ Achmus, M., Rokahr, R., Staudtmeister, K., Zapf, D., 2008. Rock Mechanical Aspects of Gas Cavern Interaction for non-axisymmetric Conditions. SMRI Fall 2008 Technical Conference, 13-14 October, Marble Falls, Texas, USA.
- /52/ Zapf, D., Staudtmeister, K., 2009. Aspects for the Design of Gas Caverns in the Border Region of Salt Domes – Initial Conditions and Assumptions. SMRI Spring 2009 Technical Conference, 26-29 April, Krakow, Poland.
- /53/ Zapf, D., Staudtmeister, K., 2009. Aspects for the Design of Gas Storage Caverns in the Border Region of Salt Domes – Rock Mechanical Calculations. 9th International Symposium on Salt, 4-7 September, Beijing, China.
- /54/ Dusseault, M.B., Maury, V., Sanfilippo, F., Santarelli, F.J. 2004. Drilling around salt: Stresses, Risks, Uncertainties. University of Waterloo, Ontario, Canada.
- /55/ Dusseault, M.B., Maury, V., Sanfilippo, F., Santarelli, F.J. 2004. Drilling through salt: Constitutive Behavior and Drilling Strategies. University of Waterloo, Ontario, Canada.
- /56/ Adam, E., 2001. Untersuchungen zum temperaturabhängigen Materialverhalten kristalliner und sedimentärer Gesteine. Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der Universität Kaiserslautern.
- /57/ Kupfer, D.H., Lock, B.E., Schank, P.R., 1998. Anomalous Zones Within the Salt at Weeks Island, Louisiana. Gulf Coast Assoc. of Geol. Soc. Trans., vol XLVIII, p. 181-192.
- /58/ Loeff, Ku., Duffield, J., Loeff, Ka., 2003. Edge of Salt Definition for Salt Domes and Other Deformed Salt Structures – Geologic and Geophysical Considerations. SMRI Spring 2003 Meeting, Houston, Texas, USA.

/59/ Jaritz, W., 1980. Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Band 131 (1980), p. 387 – 408. Schweizerbart Science Publishers.

Bezeichnungen

σ	Spannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Spannungen in x-, y- und z-Richtung
J_1	erste Invariante des Spannungstensors
J_2^D	zweite Invariante des Spannungsdeviators
J_3^D	dritte Invariante des Spannungsdeviators
η_{IUB}	Ausnutzungsgrad
G	Schubmodul
E	Elastizitätsmodul
μ	Querkontraktionszahl
$\beta^D(\sigma)$	Kurzzeitfestigkeit
\underline{D}^*	Tangentiale Elastizitätsmatrix
p_i	Innendruck
$\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}$	Dehnungskomponenten
$\dot{\underline{\varepsilon}}^v(t)$	Verzerrungsrate
$\bar{\eta}_k(\sigma)$	Kelvin-Viskositätsmodul
$\bar{G}_k(\sigma)$	Kelvin-Schubmodul
$\bar{\eta}_m(\sigma)$	Maxwell-Viskositätsmodul
\underline{M}_2	Filtermatrix
m	Stoffgesetzparameter Lubby2
l	Stoffgesetzparameter Lubby2
k_1	Stoffgesetzparameter Lubby2
k_2	Stoffgesetzparameter Lubby2
T	Temperatur
σ_{eff}	Effektive Spannung
$\underline{\varepsilon}_{th}^T$	Thermische induzierte Dehnungsrate
α_t	Wärmeausdehnungskoeffizient
Δ_T	Temperaturdifferenz

λ	Wärmeleitfähigkeit
c	Spezifische Wärmekapazität
$a_{\text{vorhanden}}$	Berechnete Ausdehnung Sicherheitszone p_{max}
$a^*_{\text{erforderlich}}$	Erforderliche Ausdehnung Sicherheitszone p_{max}
$\sigma_{t_{\text{eff}}}$	Berechnete effektive Spannung p_{max}
$\sigma^*_{t_{\text{eff}}}$	Erforderliche effektive Spannung p_{max}
$_{\text{max}}\eta_{PK}$	Maximaler Ausnutzungsgrad Pfeilerkernbereich
η^D_{∞}	Dauerfestigkeit Steinsalz
$_{\text{min}}b_{PK}$	Mindestausdehnung Pfeilerkernbereich
σ_{Zug}	Zugfestigkeit Steinsalz
σ^P_{h}	Horizontale Primärspannung
σ^P_{v}	Vertikale Primärspannung
K_0	Seitendruckbeiwert
$p_{i-\text{min}}$	Minimaldruck in der Kaverne
$p_{i-\text{max}}$	Maximaldruck in der Kaverne
b_R	Ausdehnung Sicherheitszone gegenüber Salzstockrand
b_U	Ausdehnung der Spannungsumlagerungszone oberhalb der Dauerfestigkeit von Steinsalz
b_{UEZ}	Ausdehnung einer Übergangszone im Steinsalz

LEBENS LAUF

Name, Vorname: Zapf, Dirk

Nationalität: deutsch

Familienstand: verheiratet, 1 Kind

Geboren: 12.01.1976 in Hannover

Eltern: Hans Herbert Zapf
Ingrid Bergmann Geb. Burose

Schulbildung: 1982 – 1986 Brüder-Grimm-Grundschule, Hannover
1986 – 1988 Orientierungsstufe Gottfried-Keller-Straße, Hannover
1988 – 1995 Gymnasium Käthe-Kollwitz-Schule, Hannover

Studium: 1996 - 2002 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Hannover
September 1998 Vordiplom
September 2002 Diplom

Berufstätigkeit: 1997 – 2002 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover
seit Jahr 2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geotechnik (ehem. Institut für Unterirdisches Bauen), Leibniz Universität Hannover

Hannover, Januar 2015