



Kavernenfeld Hengelo

Auftrags-Nr.:
5145013106 vom 19.06.2003

Geomechanische
Modellberechnungen zu
Geländeoberflächensenkungen im
Kavernenfeld Hengelo

Abschlussbericht

Hannover, November 2003

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN
UND ROHSTOFFE
HANNOVER**

**Geomechanische Modellberechnungen
zu Geländeoberflächensenkungen
im Kavernenfeld Hengelo**

Abschlussbericht

- | | |
|------------------|--|
| 1. Autoren: | 5.1.2.e
5.1.2.e |
| 2. Auftrags-Nr.: | 5145013106 vom 19.06.2003 |
| 3. Auftraggeber: | Akzo Nobel Salt bv Hengelo, Boortorenweg 27,
7554 RS Hengelo, Niederlande |
| 4. Datum: | 28. November 2003 |
| 5. Tagebuch-Nr.: | 11899/03 |

INHALTSVERZEICHNIS

1	Verkürzte Zusammenfassung	4
2	Einführung	5
3	Auftrag und Arbeitsumfang	6
4	Voraussetzungen (V), Annahmen (A) und Idealisierungen (I)	8
5	Stoffgesetze	9
6	Randbedingungen und Berechnungsannahmen	10
7	Bewertungskriterien	11
7.1	Dilatanzgrenze für Steinsalz	11
7.2	Effektivverzerrungen im Steinsalz	13
7.3	Festigkeit und Nachbruchfestigkeit im Deckgebirge	13
7.4	Bewertung der Beanspruchung durch Auswertung des Lodeparameters	15
8	Arbeitspaket 1: Derzeitiges Design	15
8.1	Materialparameter	15
8.2	Berechnungsmodelle	17
8.3	Berechnungsfälle	24
8.4	Ergebnisse	25
8.4.1	Senkungen und Senkungsraten	25
8.4.2	Exemplarische Darstellung der Effektivverzerrungen	33
8.4.3	Exemplarische Darstellung des Lodeparameters	33
8.4.4	Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Rötsalz	36
8.4.5	Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Deckgebirge	41
8.5	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Arbeitspaket 1	42
9	Arbeitspaket 2: Zukünftiges Design	44
9.1	Materialparameter	44
9.2	Berechnungsmodelle	45
9.3	Berechnungsfälle	52
9.4	Ergebnisse	53
9.4.1	Senkungen und Senkungsraten	53

9.4.2	Exemplarische Darstellung der Verformung der Kavernenkontur	58
9.4.3	Exemplarische Darstellung der Effektivverzerrungen	60
9.4.4	Exemplarische Darstellung des Lodeparameters	63
9.4.5	Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Rötsalz	66
9.4.6	Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Deckgebirge	68
9.5	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Arbeitspaket 2	70
10	Zusammenfassender Vergleich AP1 und AP2	71
11	Gebirgsmechanische Bewertung der Standfestigkeit der Klasse 0-Kavernen im Kavernenfeld Hengelo	72
11.1	Ergebnisse der FE-Berechnungen	73
11.1.1	Derzeitiges Design	73
11.1.2	Zukünftiges Design	74
11.2	Gesamtbewertung	74
11.3	Empfehlungen	75
12	Literaturverzeichnis	76

1 Verkürzte Zusammenfassung

Die durchgeführten FE-Berechnungen belegen, dass Klasse 0-Kavernen nach altem und zukünftigem Design standfest ausgebildet sind. Das Sicherheitsdach von mindestens 5 m Mächtigkeit dient in erster Linie als abdichtende Barriere. Deshalb muss in situ eine durchgängig dichte Barriere im Rötssalz ohne Fehlstellen im Kavernendach vorhanden sein, damit ein Eindringen von Lauge in das Deckgebirge ausgeschlossen werden kann. Eine mechanisch induzierte Bildung von Auflockerungszonen wird für den hier untersuchten Fall der unter hydrostatischen Laugendruck stehenden Kavernen ausgeschlossen.

Die Lastabtragung geschieht hauptsächlich über die hangenden Schichten des Oberen Buntsandsteins und nur unwesentlich über das geringmächtige Sicherheitsdach im Rötssalz. Nur bei ausreichender Festigkeit des Deckgebirges wird eine sichere Lastabtragung gewährleistet. Die in den FE-Berechnungen angesetzten und durch Laborversuche belegten Materialparameter für das Deckgebirge gewährleisten rechnerisch eine sichere Lastabtragung. Nur bei einem heterogen aufgebauten Deckgebirge mit lokal vorhandenen Schwächezonen sind Standfestigkeitsprobleme nicht auszuschließen. Wenn solche Schwächezonen in situ tatsächlich vorhanden sind, sind Sonderuntersuchungen notwendig.

Unter der Voraussetzung, dass eine mindestens 5 m mächtige durchgängig dichte Salzbarriere im Kavernendach vorhanden ist und geologische Anomalien ausgeschlossen werden können, werden keine kritischen Beanspruchungen im Rötssalz und auch nicht im direkt darüber befindlichen Deckgebirge berechnet (auch nicht bei Ansatz von Gleitflächen zwischen den Anhydritschichten). Mechanisch induziertes Eindringen von Sole in das Kavernendach kann ausgeschlossen werden, da die Spannungszustände im kompressiblen Bereich unterhalb der Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCH (1998) verbleiben. Die Ergebnisse der durchgeführten Modellberechnungen belegen die Standfestigkeit der Klasse 0-Kavernen im Kavernenfeld Hengelo.

Ein Teil der in situ vorhandenen Kavernen und/oder Pfeiler entspricht nicht den Auslegungsmaßen. Zur Bewertung der Standfestigkeit von solchen Kavernen-Pfeiler-Kombinationen existiert bisher kein Instrumentarium. Zur Bewertung der Standfestigkeit paralleler Kavernenreihen können konservativ unter Vernachlässigung der in Reihenrichtung angeordneten Pfeiler FE-Modelle im ebenen Verzerrungszustand entwickelt werden. Bei Ansatz eines geeigneten Kriteriums – z. B. Ausnutzungsgradverfahren nach LUX (1984) – kann dann die Standfestigkeit der Pfeiler konservativ abgeschätzt werden. Die Ergebnisse einer geeigneten Sensitivitätsstudie können so aufbereitet werden, dass eine einfache standardisierte Bewertung der Standfestigkeit aller auftretenden Kavernendurchmesser-Pfeilerbreiten-Kombinationen möglich wird.

Kavernencluster, die nicht einer Reihenanordnung entsprechen, bedürfen in der Regel einer gesonderten Analyse. Evtl. sind dreidimensionale FE-Berechnungen notwendig.

2 Einführung

Seit 1936 produziert Akzo Nobel in der Nähe von Hengelo und Enschede Salz, wobei bis heute insgesamt 463 Bohrungen zur Erstellung von 192 Solekavernen abgeteuft wurden (Stand: 01.01.2002). Bisher sind ca. 75 Mio. t Salz gefördert worden. Jährlich werden zurzeit aus 212 Bohrungen bzw. 76 Kavernen 7,0 Mio. m³ gesättigte Lauge gefördert, was ungefähr 2,0 Mio. t Salz entspricht. Als Folge der Salzgewinnung hat sich die Geländeoberfläche gesenkt und wird sich auch in Zukunft weiter senken. In der Vergangenheit sind sowohl kaum messbare Senkungen als auch beträchtliche Senkungen bis hin zu einem Sinkhole von 3,50 m Tiefe registriert worden.

Die Gemeinden Hengelo und Enschede möchten in Teilen des Kavernenfeldes Industrie ansiedeln. Augenblicklich besteht besonderes Interesse am westlichen Teil des Kavernenfeldes. Dieses Gebiet beinhaltet sowohl bereits abgeworfene als auch in Betrieb befindliche Kavernen. Schon vor geraumer Zeit haben die Gemeinden Hengelo und Enschede Akzo Nobel aufgefordert, eine Meinung und Empfehlungen bzgl. der Machbarkeit einer industriellen Entwicklung abzugeben. Akzo Nobel machte deutlich, dass Senkungen über dem gesamten Gebiet auftreten werden und dass über einigen Kavernen die Senkungsbeträge sogar beträchtlich sein könnten (> 1 m). Auch die Bildung von Sinkholes könne nicht ausgeschlossen werden. Akzo Nobel empfahl daher erstens eine vorsichtige Herangehensweise an die industrielle Entwicklung und zweitens, dass jede Art von erlaubter Industrieansiedlung im Gebiet entweder offen sein müsse, Senkungen ohne Schädigung aufzunehmen oder Konstruktionsmethoden und Materialien gewählt werden müssten, die für Routinereparaturen infolge Senkungsschäden geeignet seien.

Auf der Basis von Akzo Nobels Verständnis der Senkungsmechanismen (warum, wo, wann und mit welchem Senkungsbetrag) wurden Karten erstellt, die zu erwartende Senkungsbeträge innerhalb des Gebietes ausweisen, und den Gemeinden zur Verfügung gestellt. Auf diesen Karten sind die Bohrungen in den für industrielle Entwicklung ausgewiesenen Gebieten zusammen mit den Umrissen der Solekavernen dargestellt. In den Karten werden auch die Kavernenklassifizierung und die Senkungsphase für jede Kaverne angegeben, damit das zukünftige Kavernenverhalten und die zukünftigen Bodensenkungen abgeschätzt werden können.

Akzo Nobel erstellt zurzeit nur so genannte Klasse 0 - Kavernen und wird dies auch in Zukunft so tun. Klasse 0 - Kavernen befinden sich vollständig im Rötssalz und besitzen im Hangenden mindestens ein 5 m mächtiges Sicherheitsdach aus Salzgestein. Die Kavernen sind standfest. Die durch Kriechprozesse im Salzgestein und Kavernenkonvergenz hervorgerufenen Senkungen an der Geländeoberfläche sind nicht signifikant (< 1 mm/Jahr).

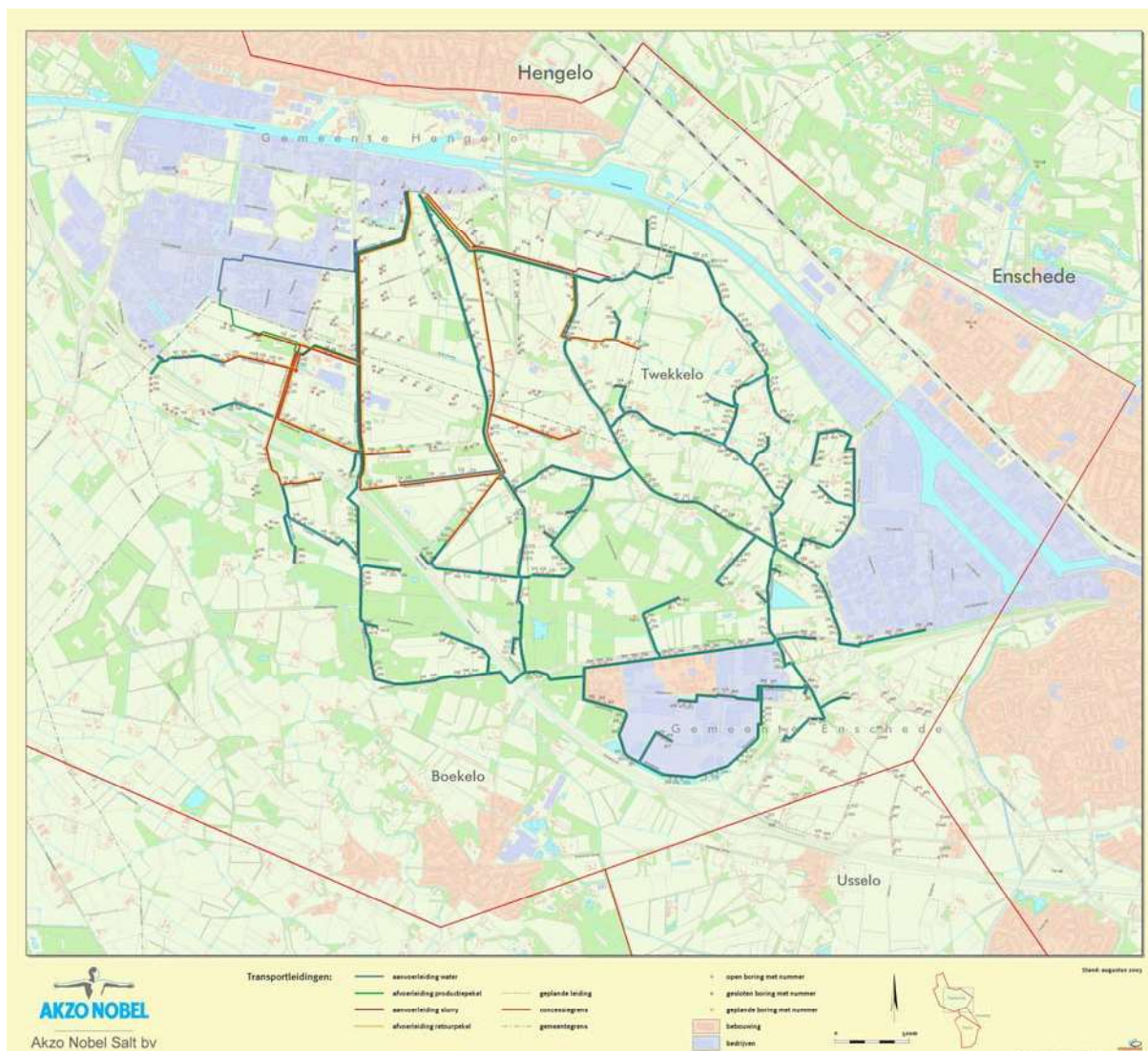


Abbildung 1: Kavernenfeld Hengelo

3 Auftrag und Arbeitsumfang

Im vorliegenden Bericht sind Berechnungen zur Oberflächensenkung über Klasse 0 – Kavernen nach derzeitigem Design (3 Bohrungen je Kaverne mit jeweils 40 m Abstand und 80 bzw. 120 m Söldurchmesser) und nach neuem Design (2 Bohrungen je Kaverne mit 60 m Abstand und 120 m Söldurchmesser) durchgeführt worden.

Unter Auftrags-Nr. 5145013106 hat Akzo Nobel die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) am 19.06.2003 beauftragt, die Studie „Detailed Subsidence Evaluation Hengelo Brine Field“ zu erstellen. Grundlage dieses Auftrages ist das Angebot der BGR vom 10.03.2003, BZ.4-20. Am 19.08.2003 hat die BGR Akzo Nobel die Auftragsbestätigung mit Hinweis auf den inzwischen einvernehmlich geänderten und neu geltenden Projektplan vom 24.06.2003 (BGR, 2003) zugestellt. Im neuen Projektplan

wurde abweichend festgelegt, dass der Bericht in deutscher Sprache zu erstellen ist. Unter dem Titel „Geomechanische Modellberechnungen zu Geländeoberflächensenkungen im Kavernenfeld Hengelo“ wurden das „Arbeitspaket 1: Derzeitiges Kavernendesign“ und das „Arbeitspaket 2: Zukünftiges Kavernendesign“ bearbeitet. Es wurden geeignete zwei- und dreidimensionale FE-Modelle entwickelt und FE-Berechnungen mit dem BGR-Programm ANSALT I durchgeführt.

Arbeitspaket 1: Derzeitiges Kavernendesign

Es wurden zwei verschiedene Designs (Standarddesign und orthogonales Design) mit jeweils 2 unterschiedlichen Kavernenabmessungen berücksichtigt. Es wurden ausschließlich rotationssymmetrische 2D-Modelle erstellt. Die Mächtigkeit des Sicherheitsdaches im Rötsalz wurde variiert (1, 5 und 10 m). Zusätzlich wurden im Hangenden direkt oberhalb des Rötsalzes Steifigkeit und Festigkeit in einer 10 m mächtigen Schicht des Oberen Buntsandsteins dreifach variiert (Tonstein mit geringem Anhydritanteil, Tonstein mit hohem Anhydritanteil bzw. kompakter Anhydrit). Gemäß Projektplan (BGR 2003) waren nur zwei Varianten vorgesehen.

Die im Projektplan (BGR 2003) vorgesehen Berechnungen für eine Einzelkaverne wurden nicht durchgeführt, da Einzelkavernen im Kavernenfeld nicht vorhanden sind.

Arbeitspaket 2: Zukünftiges Kavernendesign

Es wurden drei verschiedene Designs (Future Design 1 bis 3) ohne Variation der horizontalen Kavernenabmessungen berücksichtigt. Auf eine Variation der Mächtigkeit des Sicherheitsdaches im Rötsalz wurde abweichend zum Projektplan (BGR 2003) aufgrund der Ergebnisse im Arbeitspaket 1 verzichtet. Das Sicherheitsdach wurde in sämtlichen FE-Modellen mit 5 m berücksichtigt. Oberhalb des Rötsalzes wurde eine 10 m mächtige kompakte Anhydritschicht angesetzt. Geringere Steifigkeiten und Festigkeiten wurden in dieser 10 m mächtigen Deckgebirgsschicht abweichend zum Projektplan (BGR 2003) nicht angesetzt. Zusätzlich zum Projektplan (BGR 2003) wurden in dieser Schicht in einigen FE-Modellen Gleitschichten berücksichtigt, welche der Simulation geologischer Anomalien in Anlehnung an BEKENDAM (2002) dienen.

Für die Future Designs 1 (Reihendesign) und 2 (Orthogonales Design) wurden zusätzlich zu den eigentlich nur vorgesehenen 2D-Modellen auch 3D-Modelle erstellt. Aufgrund numerischer Probleme für die verschiedenen Varianten des Designs 3 (Doppelreihen mit Pfeilerbreiten von 120, 160 und 200 m) fanden die Ergebnisse dieser Berechnungsvarianten keinen Eingang in den Bericht.

Der Abbaugrad sämtlicher Designs mit Reihenanordnung war gering, während alle orthogonalen Designs hohe Abbaugrade aufwiesen. Um auch Ergebnisse für ein Reihendesign mit hohem Abbaugrad zu erhalten, wurden zusätzlich 2D-Modelle für das Design 4 erstellt.

4 Voraussetzungen (V), Annahmen (A) und Idealisierungen (I)

In den Modellberechnungen werden Klasse 0 – Kavernen vorausgesetzt. Für die Gültigkeit der Berechnungsergebnisse gelten folgende Voraussetzungen:

- (V1) Die Kaverne liegt vollständig im Rötssalz. Das 5 m mächtige Sicherheitsdach im Rötssalz muss an jeder Stelle im Kavernendach zu jeder Zeit vorhanden sein. Die in einigen Berechnungsfällen angesetzte geringere Mächtigkeit von 1 m ist als theoretischer Fall zu betrachten und ist nicht als neue Mindestmächtigkeit des Sicherheitsdaches zu verstehen.
- (V2) Das Rötssalz muss im Dachbereich **durchgängig** eine ausreichend dichte Barriere darstellen. Lokale Schwächezonen im Sicherheitsdach dürfen nicht vorhanden sein.
- (V3) Es dürfen keine geologischen Anomalien im Einflussbereich der Kavernen vorhanden sein.
- (V4) Subrosion des Salzspiegels darf nicht zu einer signifikanten Mächtigkeitsreduktion des Sicherheitsdaches führen.
- (V5) Die in den Berechnungsmodellen angenommenen Kavernenkonturen sind als Einhüllende zu verstehen. Die Kavernen müssen vollständig mit ihrer tatsächlich vorhandenen Kontur in dieser Einhüllenden liegen, damit die Berechnungsergebnisse als abdeckend angesehen werden können (Abbildung 2).
- (A1) Die Lauge in der Kaverne steht über den gesamten Berechnungszeitraum von 1000 Jahren bis zur Geländeoberkante an, so dass der hydrostatische Laugendruck permanent stützend auf die Kontur der Kaverne wirkt.
- (A2) Die Kaverne steht über den gesamten Berechnungszeitraum offen.
- (A3) Havariezustände werden nicht betrachtet, so dass sich die Aussagen zur Standfestigkeit nur auf planmäßige Produktions- und Nachbetriebszustände beziehen.
- (I1) Das flach nach SSW orientierte Einfallen der Schichten wird in den Berechnungsmodellen vernachlässigt.
- (I2) Die Materialeigenschaften des Deckgebirges und des Rötssalzes werden über den gesamten Berechnungszeitraum nicht verändert. Feuchtekriechen, Herabsetzung der Festigkeiten durch Auflösungserscheinungen oder ähnliches bleiben also außer Betracht.
- (I3) Alle Kavernen in den jeweiligen FE-Modellen werden gleichzeitig gesolt und weisen über den gesamten Berechnungszeitraum keine sonstigen Unterschiede in ihrer Geschichte auf.

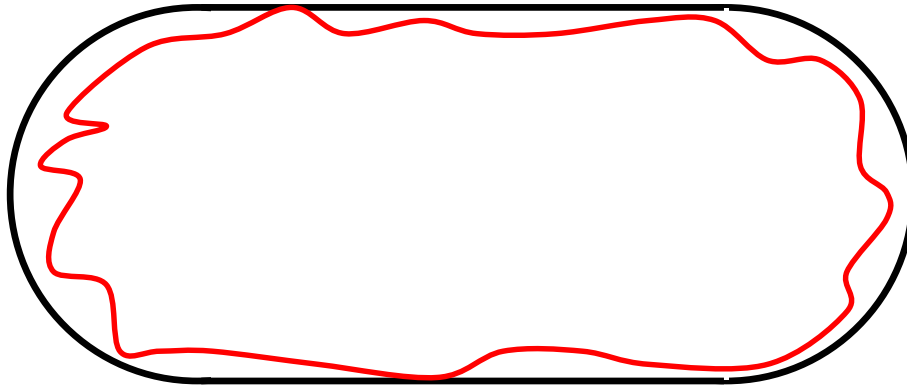


Abbildung 2: Schematischer Grundriss einer Kaverne: Für die Modellierung angenommene abdeckende Einhüllende (schwarz) und tatsächlich vorhandene Kavernenkontur (rot)

5 Stoffgesetze

Die Gleichungen für Elastizität und stationäres Kriechen (BGRa) sind nachfolgend dargestellt:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^t = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}, \quad (5.1)$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^t &= \text{Gesamtverzerrungsrate,} \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} &= \text{elastischer Anteil der Verzerrungsrate,} \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} &= \text{Kriechverzerrungsrate.} \end{aligned}$$

Der elastische Anteil der Verzerrungsrate $\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$ wird bestimmt durch

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{el} = -\frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \frac{(1+\nu)}{E} \dot{\sigma}_{ij} + \alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij}. \quad (5.2)$$

Die Kriechverzerrungsrate wird bestimmt über:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}}{\sigma_{eff}} \dot{\varepsilon}_{eff}^{cr}, \quad (5.3)$$

$$\text{mit } \dot{\varepsilon}_{eff}^{cr} = A_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*} \right)^{n_1} \quad (\text{BGRa}). \quad (5.4)$$

Die FE-Berechnungen wurden mit dem Kriechgesetz BGRa durchgeführt. LANGER (1984) hat an Proben des Rötsalzes A und C standortspezifische Kriechparameter ermittelt. Daraus folgte für den Vorfaktor A_1 für das Rötsalz A ein Wert von 0.4 [1/d] und für das Rötsalz C ein Wert von 0.7 [1/d]. In den Berechnungen wird ein mittlerer Wert von 0.5 [1/d] für das gesamte Rötsalz angesetzt.

Für das Deckgebirge wird Bruchversagen nach Drucker-Prager berücksichtigt:

$$F = 0 = \alpha I_\sigma + \sqrt{II_s} - k$$

6 Randbedingungen und Berechnungsannahmen

Sämtliche inneren und äußeren Modellränder (Kanten oder Flächen) sind in den jeweils normal dazu gelegenen Richtungen horizontal unverschieblich gelagert. Der untere Modellrand ist vertikal unverschieblich gelagert. Der Anfangsspannungszustand ergibt sich aus den Wichten der verschiedenen Gesteinsschichten. Im Deckgebirge und im Liegenden werden für alle Gesteinsschichten anisotrope Spannungen angesetzt. Dabei wird in vertikaler Richtung der Überlagerungsdruck und in allen horizontalen Richtungen der K_0 -fache Druck angesetzt ($\sigma_{vert}(z) = \int_0^z \gamma(z) dz$, $\sigma_{hor}(z) = K_{0i}(z) \cdot \sigma_{vert}(z)$ mit z als

Teufe und $K_{0i}(z) = \frac{\nu_i}{1 - \nu_i}$, wobei die Querdehnungszahl ν_i der jeweiligen Gesteinsschicht einzusetzen ist).

Um den Erstellungsprozess der Kavernen zu simulieren, wurde in der Kaverne zunächst der aus den überlagernden Gesteinsschichten resultierende lithostatische Druck angesetzt, der dann im Laufe eines Jahres linear auf den hydrostatischen Laugendruck abgesenkt wurde. Die Wichte der Lauge wurde dabei konservativ zu 0.010 MN/m^3 angenommen. In der Folge bleibt der Druck im Kaverneninnern konstant. Die Kaverne wird also über den gesamten Berechnungszeitraum offen stehend angenommen. Abbildung 3 zeigt die zeitliche Entwicklung des Druckes im Dach der Kaverne für eine Teufe von 425 m.

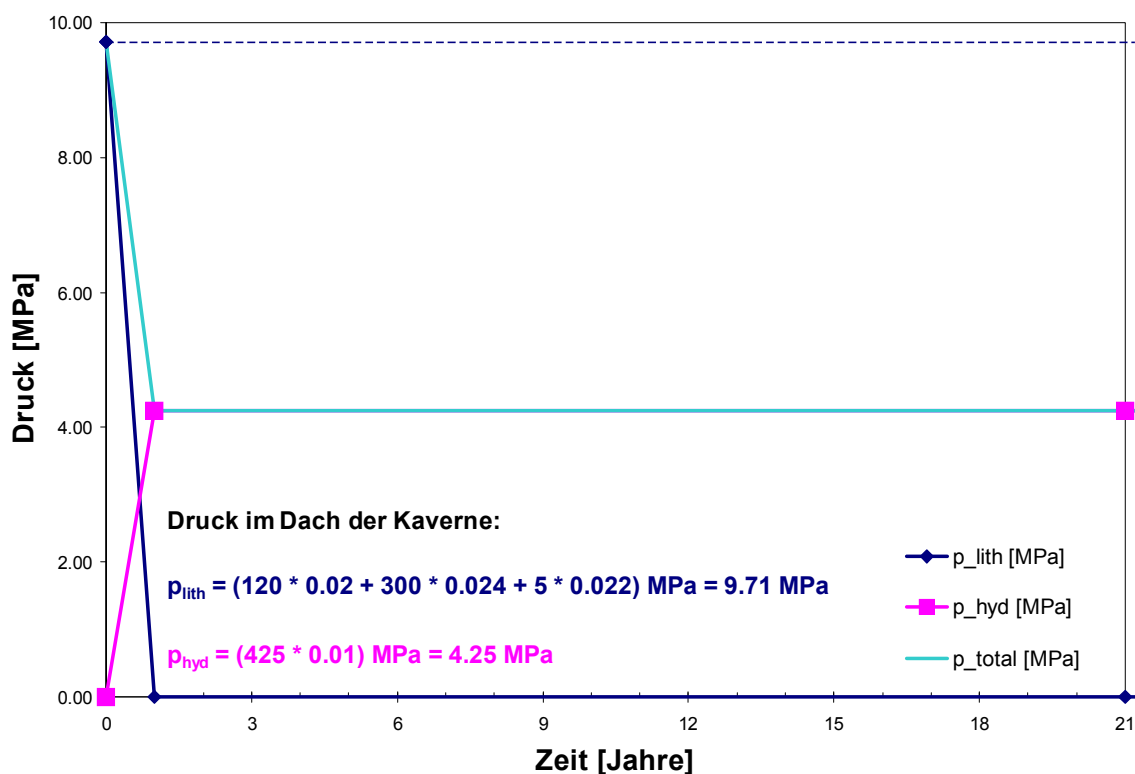


Abbildung 3: Solungssimulation (Kavernendach in 425 m Teufe)

Die in situ vorhandenen klastischen „Steinlagen“ zwischen den Rötsalzschichten A – D werden nicht als solche modelliert sondern dem Rötsalz zugerechnet.

In sämtlichen Berechnungsfällen wird im Rötsalz eine konstante Temperatur von 25 °C als Kriechtemperatur angesetzt.

7 Bewertungskriterien

7.1 Dilatanzgrenze für Steinsalz

Abbildung 4 zeigt die vom Belastungspfad unabhängige Dilatanzgrenze für Steinsalz nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998). Unterhalb der Dilatanzgrenze liegende Spannungszustände sind auf Dauer ertragbar und führen nicht zu Mikrorissbildung, Auflockerung und Kriechbruch. Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze und unterhalb der Kurzzeitfestigkeit führen nach gewisser Zeit zu Kriechbruch und gehen mit Auflockerung und Mikrorissbildung einher. Je näher der Spannungszustand an der Kurzzeitfestigkeit liegt, desto eher tritt Kriechbruch ein.

Zusätzlich dargestellt sind die Kurzzeitfestigkeitsgrenzen nach HUNSCHE, SCHULZE & LANGER (1994) für Kompression ($m=-1$), Torsion ($m=0$) und Extension ($m=+1$). Die gestrichelten Linien zeigen jeweils die Belastungspfade, die im Labor zur Bestimmung der einaxialen Festigkeiten auftreten. Nur unterhalb dieser Linien sind alle Hauptspannungen im jeweiligen Belastungszustand (Lodeparameter m) Druckspannungen. Sämtliche Versuchsergebnisse liegen unterhalb dieser Geraden, so dass die Gültigkeit der Festigkeitsgrenzen auf diese Bereiche beschränkt werden muss.

Kurzzeitfestigkeit nach HUNSCHE, SCHULZE & LANGER (1994):

$$\sqrt{II_s} = -a g h \left(\frac{|I_\sigma|}{\sigma^*} \right)^p \sigma^* \text{sign}(I_\sigma) + c \quad (7.1)$$

mit $a = 1.619[-]$

$$g = \frac{2k}{(1+k) + (1-k) \cdot f}$$

$$f = \frac{m(9 - m^2)}{(3 + m^2)^{1.5}}$$

$$m = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ sind die der Größe nach geordneten Hauptspannungen, wobei Druckspannungen negativ einzusetzen sind.

$$h = 1 \text{ für } T \leq T_0 \text{ bzw. } h = 1 - d(T - T_0) \text{ für } T > T_0$$

$$d = 0.002[1/^\circ\text{C}]$$

$$T_0 = 100[^\circ\text{C}]$$

$$\sigma^* = 1.0[\text{MPa}]$$

$$c = 0[\text{MPa}]$$

$$k = 0.74[-]$$

$$p = 0.65[-]$$

Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCH (1998):

$$\sqrt{II_s} = f_1 I_\sigma^2 + f_2 I_\sigma \quad (7.2)$$

mit $f_1 = -0.0023093 [1/\text{MPa}]$

und $f_2 = -0.36726 [-]$.

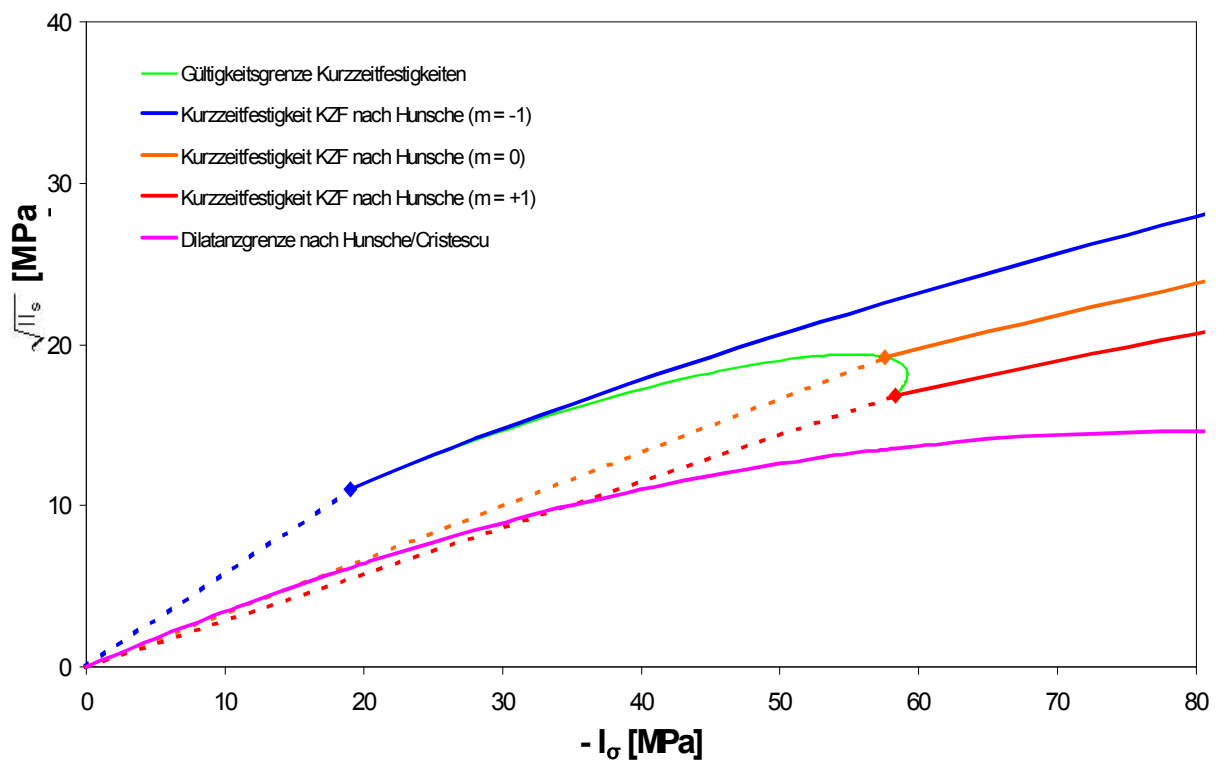


Abbildung 4: Kurzzeitfestigkeiten nach HUNSCH, SCHULZE & LANGER (1994) und Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCH (1998)

7.2 Effektivverzerrungen im Steinsalz

Die Überprüfung des Spannungszustandes allein stellt nicht immer ein hinreichendes Kriterium zum Nachweis der Standfestigkeit dar. Insbesondere bei Spannungszuständen oberhalb der Dilatanzgrenze wird für die Einschätzung der zeitlich befristeten Standfestigkeit ein weiteres Kriterium benötigt. Hierfür eignen sich besonders Energiekriterien, die auch die zeitliche Entwicklung von Spannung und Verformung berücksichtigen.

Alternativ ist auch die Effektivverzerrung heranzuziehen, um die Dauerstandfestigkeit zu beurteilen: Festigkeitsversuche an Rötsalz belegen Bruchverformungen von 5-10% (LANGER 1984). Die zugehörigen Spannungspunkte befinden sich im Invariantendiagramm direkt auf bzw. oberhalb der als untere Einhüllende definierten Kurzzeitfestigkeit. Sämtliche Bruchspannungszustände liegen also im **dilatanten Bereich**.

Im **kompressiblen Bereich** – also unterhalb der Dilatanzgrenze – werden Verformungen theoretisch unbegrenzt ohne Bruch aufgenommen. Für diesen Fall kann also die Effektivverzerrung als Kriterium zur Beurteilung der Dauerstandfestigkeit außer Betracht bleiben.

7.3 Festigkeit und Nachbruchfestigkeit im Deckgebirge

LANGER (1985) hat an Bohrkernen des Deckgebirges gesteinsmechanische Untersuchungen durchgeführt. Die damals gewählte Klassifizierung der Gesteine in Tonstein mit geringem Anhydritanteil (TS-A), Tonstein mit hohem Anhydritanteil (TS+A) und Anhydrit (A) wurde für diesen Bericht übernommen. Zur Bestimmung konservativer Gesteinsfestigkeiten wurden die Versuche neu ausgewertet. Die ermittelten Festigkeitsparameter nach Drucker-Prager sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Messwerte und die ermittelten Bruchgrenzen sind in Invariantendiagrammen in den Abbildungen 5 bis 7 veranschaulicht.

Tabelle 1: Gesteinsfestigkeiten des Deckgebirges

Material	Bruchfestigkeit		Nachbruchfestigkeit	
	α	k	α	k
TS-A	0.1985	4.297	0.1588	3.438
TS+A	0.3219	4.844	0.2092	3.148
A	0.4442	4.888	0.3332	3.666
Drucker-Prager-Kriterium: $F = 0 = \alpha I_{\sigma} + \sqrt{II_s} - k$, Zugspannungen positiv				

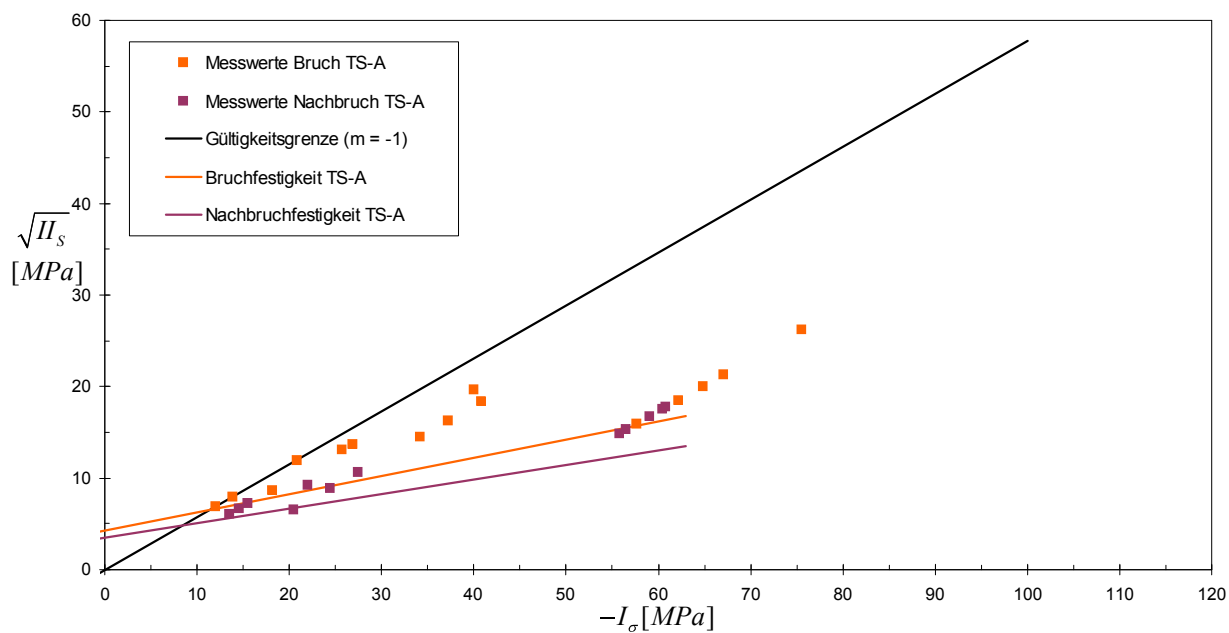


Abbildung 5: Bruch- und Nachbruchfestigkeiten von Tonstein mit geringem Anhydritanteil (TS-A)

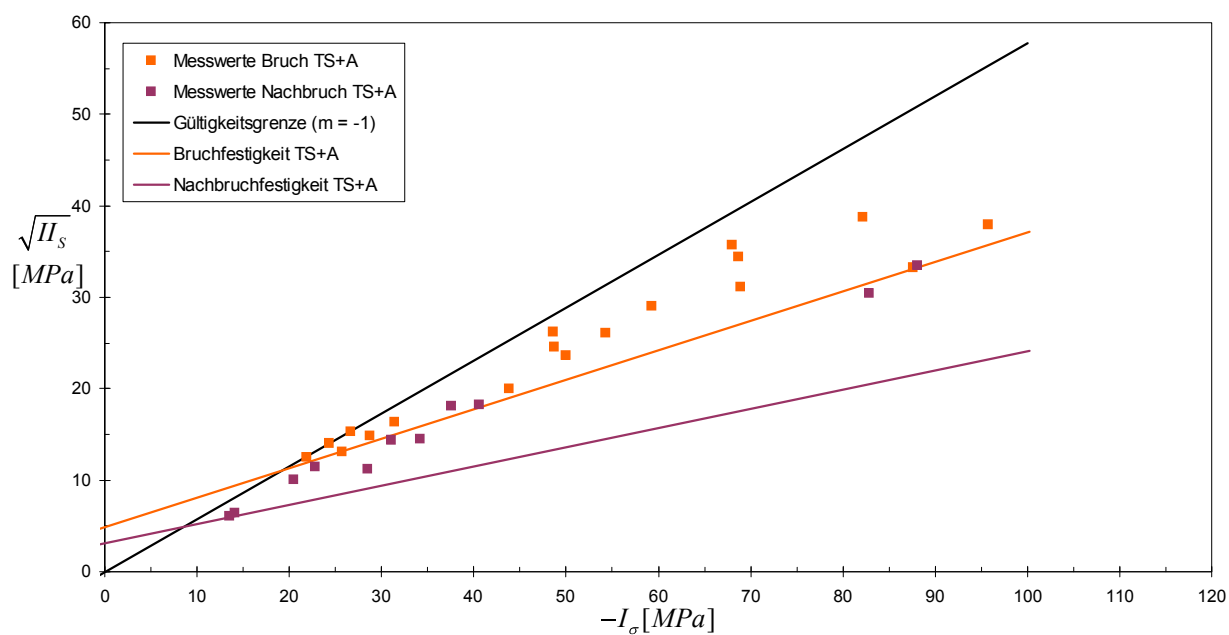


Abbildung 6: Bruch- und Nachbruchfestigkeiten von Tonstein mit hohem Anhydritanteil (TS+A)

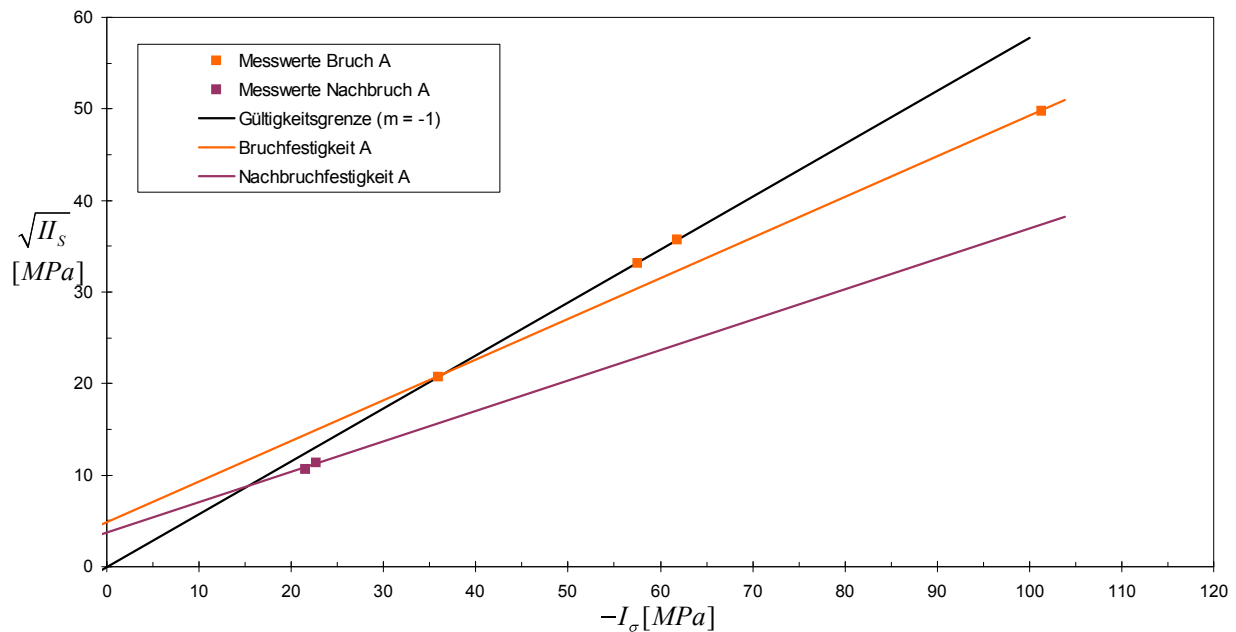


Abbildung 7: Bruch- und Nachbruchfestigkeiten von Anhydrit (A)

7.4 Bewertung der Beanspruchung durch Auswertung des Lodeparameters

Zur Veranschaulichung des Beanspruchungszustandes wird aus den Spannungskomponenten der Lodeparameter berechnet und ausgewertet. So können Gebirgsbereiche identifiziert werden, die überwiegend durch Extensions-, Torsions- bzw. Kompressionsbeanspruchung gekennzeichnet sind. Diese Kenntnis ist z. B. wichtig für die Planung und Durchführung von neuen Laborversuchen (z. B. Notwendigkeit der Bestimmung der Dilatanzgrenze bei Extensions- und Kompressionsbeanspruchung).

8 Arbeitspaket 1: Derzeitiges Design

8.1 Materialparameter

Die verwendeten Kriechparameter für das Steinsalz und die Bruchparameter für den Oberen Buntsandstein ergeben sich aus den in den Abschnitten 5 und 7.3 aufgeführten Daten.

Die in den Berechnungen (AP1) angesetzten elastischen Materialparameter sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der besseren räumlichen Zuordnung dient Abbildung 8. Die Parameter für den Oberen Buntsandstein sind LANGER (1985) entnommen. Die Eigenschaften des Tonsteins aus dem Oberen

Buntsandstein werden auch dem Unteren Buntsandstein zugeordnet. Für den Bereich des Muschelkalkes wurde aus Konservativitätsgründen ein sehr weiches Last verteilendes Material angenommen.

Tabelle 2: Elastische Materialparameter – Arbeitspaket 1

Stratigraphie	Lithologie	Teufe der Basis [m]	E [MPa]	ρ [kg/m³]	ν [-]	K_0 [-]
Quartär und Tertiär	Sande und Tone	120	34	2000	0.33	0.493
Muschelkalk	(Tonstein, Kalkstein, Dolomit), hier: Last verteilendes Material	220	6	2400	0.45	0.818
Oberer Buntsandstein 3	Tonstein	400	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 2	Tonstein	410	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 1	Tonstein/Anhydrit	420	5500 8700 15500	2400	0.33	0.493
Röt	Rötsalz	475	25000	2200	0.25	1.0
Unterer Buntsandstein	Tonstein	800	5500	2400	0.33	0.493

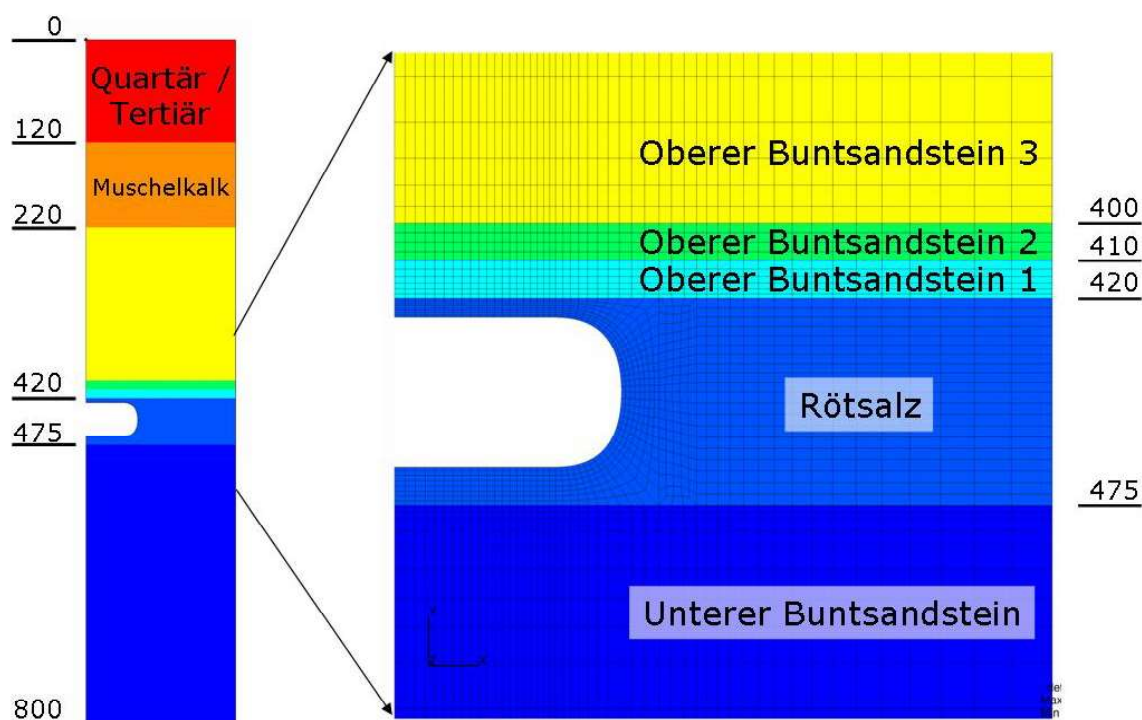


Abbildung 8 Modellierte Gebirgsschichten

8.2 Berechnungsmodelle

Die verschiedenen Modelle sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Nachfolgend werden die Annahmen für die einzelnen Modelle erläutert.

Standarddesign 1 (Abbildung 9):

Das Standarddesign 1 setzt eine unendliche Anzahl von parallelen Kavernenreihen voraus. Die einzelne Kaverne ist 160 m lang und 80 m breit. Die Solung jeder einzelnen Kaverne geschieht über drei jeweils 40 m auseinander liegende Bohrungen. Von dort aus wird mit einem Durchmesser von jeweils 80 m gesolt. Die Kavernenhöhe wird im Modell zu 40 m bei 5 m Sicherheitsdach angenommen. Bei 1 bzw. 10 m mächtigem Sicherheitsdach ist die Kaverne 44 bzw. 35 m hoch. In der Längsachse der Kavernenreihe beträgt die Pfeilerstärke 80 m ($= 2 \cdot 40$ m), in Querrichtung 320 m ($= 2 \cdot 160$ m). Zur Simulation dieses unendlichen Kavernenfeldes ist es ausreichend, eine Viertelkaverne mit entsprechenden Gebirgsbereichen unter Ausnutzung von Symmetrien abzubilden. Alle 4 vertikalen Begrenzungsflächen des Berechnungsausschnittes sind Symmetrieebenen.

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells sd1 wird für die Fläche des quasi ellipsenförmigen Kavernengrundrisses ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt bestimmt. Ebenso wird für die charakteristische Fläche des Gebirges verfahren, in der die Kaverne angeordnet ist. Es ergeben sich dann die Ersatzradien für die Kaverne und für den äußeren Modellrand. In der dritten Dimension ist eine Bestimmung von geometrischen Ersatzmaßen nicht notwendig.

Orthogonales Design 1 (Abbildung 10):

Grundlage des orthogonalen Designs 1 bildet eine Kavernenreihe des Standarddesigns 1. Jeweils auf Höhe einer Kaverne dieser Reihe werden um 90° gedrehte Kavernen beidseitig im Wechsel mit nicht gedrehten Kavernen angeordnet. Die Pfeilerbreite zwischen den längs und quer angeordneten Kavernen beträgt 80 m. Die charakteristische Fläche bleibt gegenüber dem Standarddesign unverändert.

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells od1 wird für die Fläche der quasi ellipsenförmigen Kavernen ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt zweier Kavernen bestimmt. Ebenso wird für die charakteristische Fläche des Gebirges verfahren, in der die beiden Kavernen angeordnet sind. Es ergeben sich dann die Ersatzradien für eine Fläche, die der zweier Kavernen entspricht, und für den äußeren Modellrand.

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells od1_v2 wird für die Fläche des quasi ellipsenförmigen Kavernengrundrisses ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt einer Kaverne bestimmt. Da hier also nur von der Fläche einer Kaverne ausgegangen wird, muss für die Bestimmung des

Ersatzradius für den äußeren Modellrand die Hälfte der charakteristischen Fläche angesetzt werden.

Standarddesign 2 (Abbildung 11):

Das Standarddesign 2 entspricht weitestgehend dem Standarddesign 1. Jedoch werden größere Kavernen angenommen. Sie sind 200 m lang und 120 m breit.

Die Ermittlung der Ersatzradien für das rotationssymmetrische Modell sd1 geschieht analog zum Standarddesign 1.

Orthogonales Design 2 (Abbildung 12):

Das orthogonale Design 2 entspricht weitestgehend dem orthogonalen Design 1, wobei zum einen größere Kavernen (200 m lang, 120 m breit) und zum anderen eine größere charakteristische Fläche angesetzt wird, so dass die Pfeilerbreite von 80 m zwischen zwei Kavernen erhalten bleibt. Dadurch erhöht sich die Kantenlänge der charakteristischen Fläche in z-Richtung von 200 auf 240 m.

Die rotationssymmetrischen Ersatzmodelle od2 und od2_v2 werden wie für das orthogonale Design 1 bestimmt.

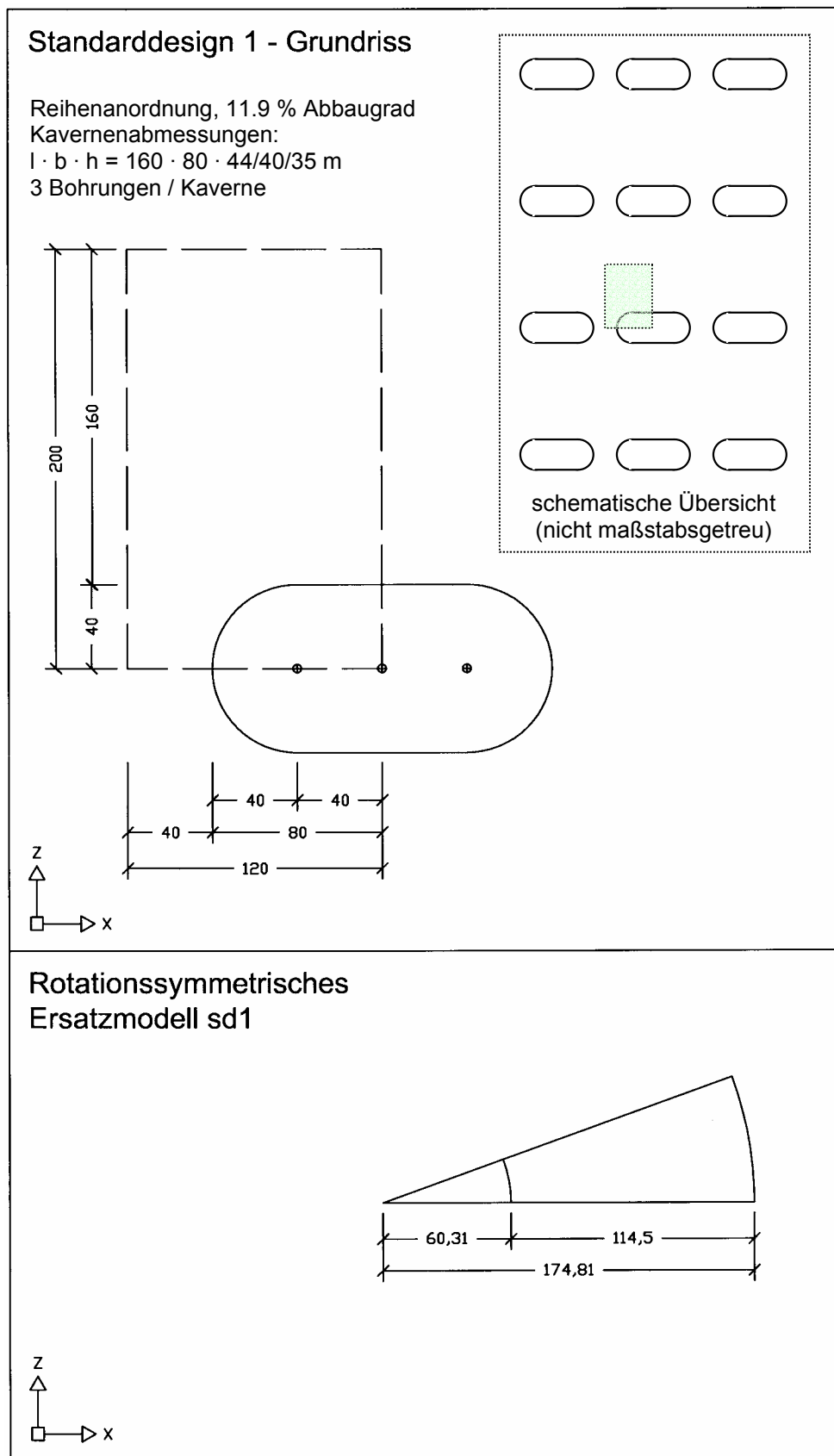


Abbildung 9: Standarddesign 1 – Grundriss und rotationssymmetrisches Ersatzmodell

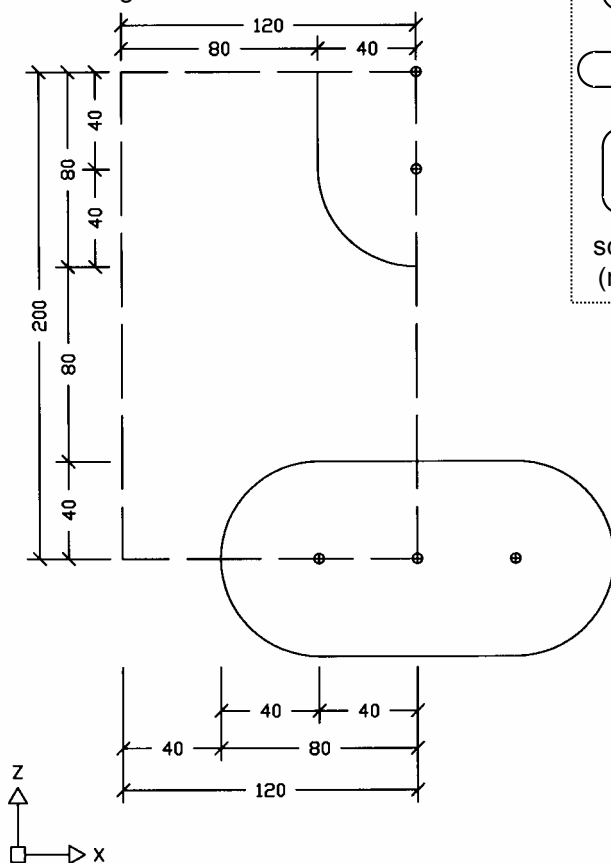
Orthogonales Design 1 - Grundriss

orthogonale Anordnung, 23.8 % Abbaugrad

Kavernenabmessungen:

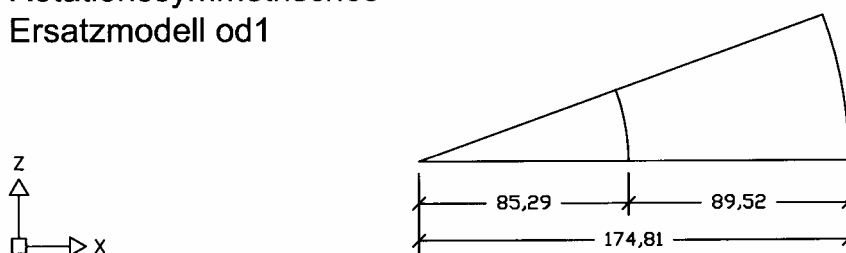
$$l \cdot b \cdot h = 160 \cdot 80 \cdot 44/40/35 \text{ m}$$

3 Bohrungen / Kaverne



schematische Übersicht
(nicht maßstabsgetreu)

Rotationssymmetrisches Ersatzmodell od1



Rotationssymmetrisches Ersatzmodell od1_v2

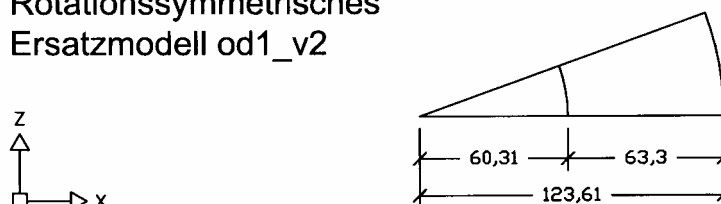


Abbildung 10: Orthogonales Design 1 – Grundriss und rotationssymmetrische Ersatzmodelle

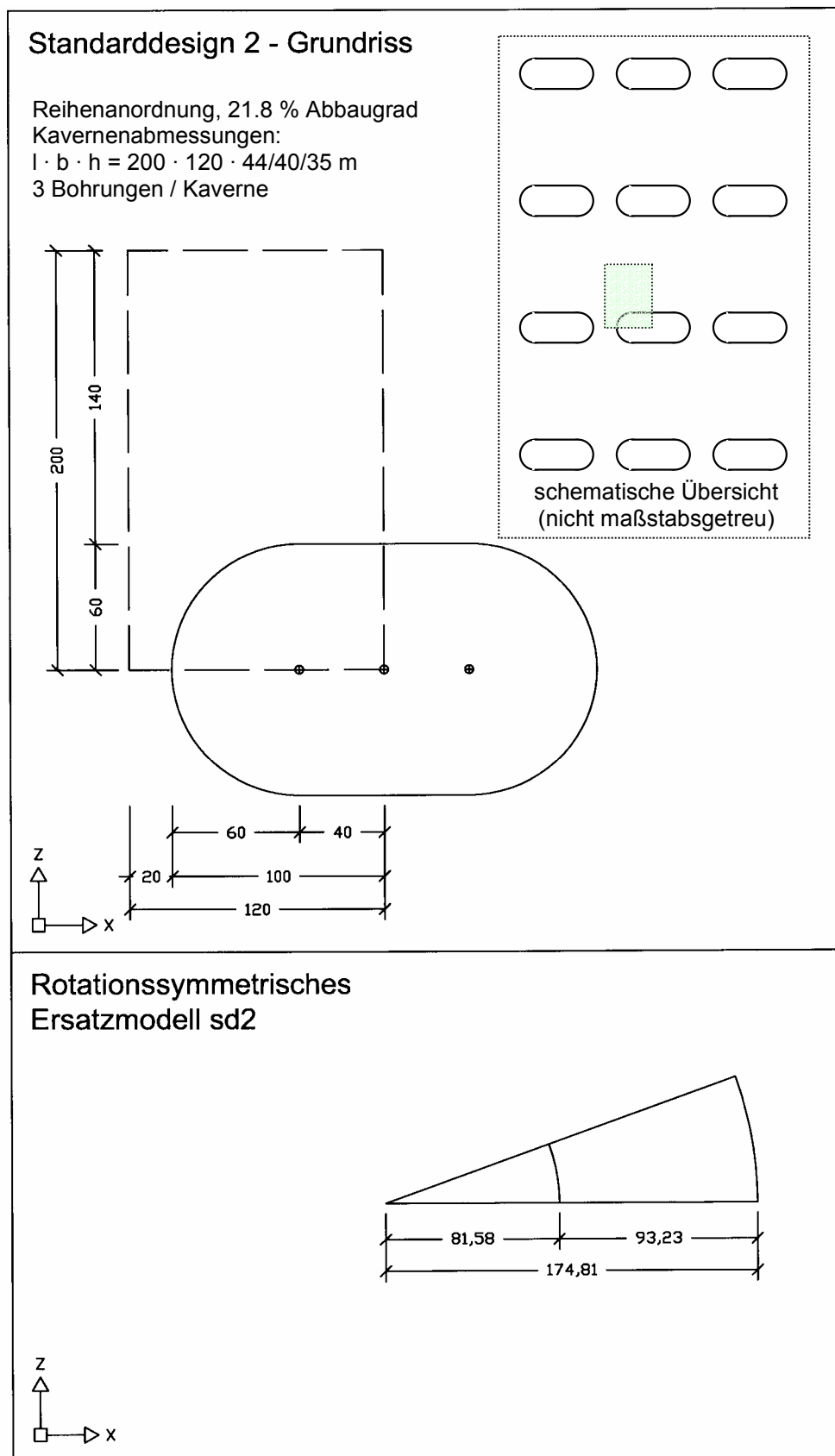


Abbildung 11: Standarddesign 2 – Grundriss und rotationssymmetrisches Ersatzmodell

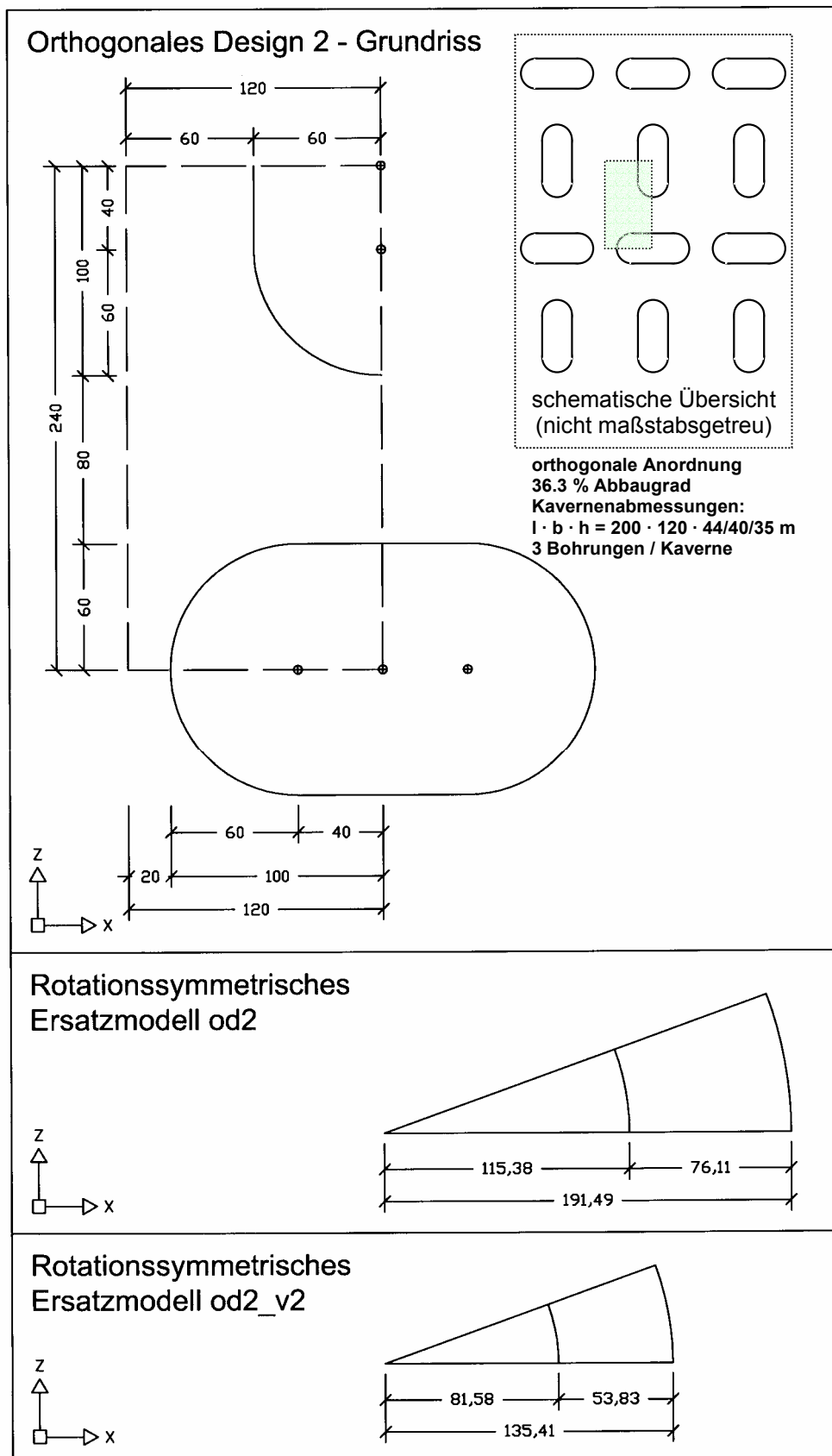


Abbildung 12: Orthogonales Design 2 – Grundriss und rotationssymmetrische Ersatzmodelle

Tabelle 3: Berechnungsmodelle – Arbeitspaket 1

Typ	Modell	Kavernen- abmessungen	Charakteristische Fläche			Kaverne	Modellrand	Abbaugrad [%]	Abb.
		l · b [m]	Länge _x [m]	Länge _z [m]	Fläche [m ²]	Ersatzradius [m]	Ersatzradius [m]		
Reihe	sd1	160 · 80	120	200	24000	60.31	174.81	11.9	9
orthogonal	od1					85.29	174.81	23.8	10
	od1_v2					60.31	123.61	23.8	10
Reihe	sd2	200 · 120	120	200	24000	81.58	174.81	21.8	11
orthogonal	od2		120	240	28800	115.38	191.49	36.3	12
	od2_v2					81.58	135.41	36.3	12

Tabelle 4: Berechnungsfälle – Arbeitspaket 1

Typ	Variante	Kavernenhöhe [m]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	44	x	x	x
	sd1_05	40	x	x	x
	sd1_10	35	x	x	x
orthogonal	od1_01	44	x	x	x
	od1_05	40	x	x	x
	od1_10	35	x	x	x
	od1_v2_01	44	x	x	x
	od1_v2_05	40	x	x	x
	od1_v2_10	35	x	x	x
Reihe	sd2_01	44	x	x	x
	sd2_05	40	x	x	x
	sd2_10	35	x	x	x
orthogonal	od2_01	44	x	x	x
	od2_05	40	x	x	x
	od2_10	35	x	x	x
	od2_v2_01	44	x	x	x
	od2_v2_05	40	x	x	x
	od2_v2_10	35	x	x	x

Legende:

TS-A: Tonstein mit geringem Anhydritanteil

TS+A: Tonstein mit hohem Anhydritanteil

A: Anhydrit

8.3 Berechnungsfälle

Auf der Grundlage der zuvor definierten Berechnungsmodelle wurden insgesamt 54 Berechnungsfälle definiert und berechnet (Tabelle 4). Die eindeutige Kennzeichnung der einzelnen Fälle geschieht über die Modellkurzbezeichnung (z.B. sd1, od1) und über die Angabe der Mächtigkeit des Sicherheitsdaches sowie der angesetzten Steifigkeit und Bruchfestigkeit in der direkt im Hangenden über dem Rötsalz anstehenden Deckgebirgsschicht des Oberen Buntsandsteins in folgender Weise:

- Berücksichtigung unterschiedlicher Mächtigkeiten im Sicherheitsdach des Rötsalzes:
 - 1 m Mächtigkeit (z.B.: sd1_**01**)
 - 5 m Mächtigkeit (z.B.: sd1_**05**)
 - 10 m Mächtigkeit (z.B.: sd1_**10**)
- Berücksichtigung unterschiedlicher Steifigkeiten und Bruchfestigkeiten in der 10 m mächtigen Deckgebirgsschicht direkt über dem Rötsalz:
 - Tonstein mit geringem Anhydritanteil (TS-A, z.B. sd1_01_**a**)
 - Tonstein mit hohem Anhydritanteil (TS+A, z.B. sd1_01_**b**)
 - Anhydrit (A, z.B. sd1_01_**c**)

8.4 Ergebnisse

8.4.1 Senkungen und Senkungsraten

In den Tabellen 6 bis 17 sind die berechneten Senkungen und Senkungsraten aller Berechnungsfälle zu charakteristischen Zeitpunkten (40, 100, 500 und 1000 Jahre) zusammengestellt.

Die Tabellen 6 bis 9 zeigen die Senkungen bzw. Senkungsraten in 120 m Teufe. Hier sind neben den aktuellen Berechnungsergebnissen auch die Berechnungsergebnisse von WALLNER & KOß (1998) berücksichtigt. Die Senkungen in 120 m Teufe werden hier nur deshalb betrachtet, weil in WALLNER & KOß (1998) das Gebirge nur im Teufenbereich von 800 m bis 120 m diskretisiert wurde. An der Oberseite des Modells wurde eine dem überlagernden Gebirgsdruck entsprechende Ersatzlast angesetzt. Auch wurden wesentlich höhere Steifigkeiten im Deckgebirge (z.B. Muschelkalk: $E = 50000$ MPa, Oberer Buntsandstein: $E = 15000$ MPa) verwendet. Daher sind die Senkungen und Senkungsraten nicht direkt vergleichbar und fallen auf Grund der höheren Steifigkeit des Deckgebirges geringer aus.

Für alle Tabellen können folgende allgemeine Aussagen getroffen werden:

- Bei zunehmender Schichtsteifigkeit der 10 m mächtigen, direkt über dem Rötsalz liegenden Deckgebirgsschicht ($a \rightarrow b \rightarrow c$) ergeben sich erwartungsgemäß geringere Senkungen, allerdings sind die Unterschiede sehr gering (bis ca. 5%).
- Auch bei größerer Mächtigkeit des Sicherheitsdaches ($01 \rightarrow 05 \rightarrow 10$) ergeben sich geringere Senkungen. Die Unterschiede fallen jedoch etwas größer aus als bei Erhöhung der Schichtsteifigkeit über dem Rötsalz (ca. 20% oder mehr).

Für die repräsentativen Berechnungsmodelle (sd1, od1, od1_v2 und sd2) ergeben sich nach 40 Jahren in 120 m Teufe minimale Senkungen von 1.8 cm und minimale Senkungsraten von 0.12 mm/Jahr sowie maximale Senkungen von 6.1 cm und maximale Senkungsraten von 0.44 mm/Jahr. Die Berechnungsergebnisse aus dem Jahr 1998 weisen auf Grund der zuvor beschriebenen höher angesetzten Deckgebirgssteifigkeiten etwas geringere Senkungen (0.86 bis 2.37 cm) und Senkungsraten (0.073 bis 0.22 mm/Jahr) aus. Nur für das Modell od2 ergeben sich nach 40 Jahren größere Senkungen (10.0 bis 13.6 cm) und Senkungsraten (0.66 bis 1.64 mm/Jahr).

Für die repräsentativen Berechnungsmodelle (sd1, od1, od1_v2 und sd2) ergeben sich nach 100 Jahren in 120 m Teufe minimale Senkungen von 2.3 cm und minimale Senkungsraten von 0.067 mm/Jahr sowie maximale Senkungen von 7.7 cm und maximale Senkungsraten von 0.35 mm/Jahr. Die Berechnungsergebnisse aus dem Jahr 1998 weisen auf Grund der zuvor beschriebenen höher angesetzten Deckgebirgssteifigkeiten etwas geringere Senkungen (1.2 bis 3.1 cm) und Senkungsraten (0.041 bis 0.15 mm/Jahr) aus. Nur für das Modell od2 ergeben sich nach 100 Jahren größere Senkungen (15.1 bis 22.7 cm) und Senkungsraten (0.49 bis 1.6 mm/Jahr).

Die nach 40 bzw. 100 Jahren an der Geländeoberfläche auftretenden Senkungen und Senkungsraten (Tab. 10 bis 13) unterscheiden sich von denen in 120 m Teufe nur gering. Auf eine detaillierte Beschreibung kann daher verzichtet werden.

Die Senkungen und Senkungsraten nach 500 und 1000 Jahren (Tab. 14 bis 17) zeigen das Langzeitverhalten von offen stehenden Kavernen auf. Die Senkungen nehmen mit weiter abnehmenden Senkungsraten zu, bis quasi stationäre Zustände erreicht werden. Bei größerem Abbaugrad werden diese quasi stationären Zustände schneller erreicht.

Für den Berechnungsfall sd1_05_a (geringer Abbaugrad) verringert sich z. B. die Senkungsrate von 0.134 mm/Jahr nach 40 Jahren und 0.0768 mm/Jahr nach 100 Jahren und 0.0309 mm/Jahr nach 500 Jahren auf 0.0223 mm/Jahr nach 1000 Jahren. Nach 1000 Jahren beträgt die Gesamtsenkung 5.7 cm.

Für den Berechnungsfall od2_05_a (hoher Abbaugrad) verringert sich z. B. die Senkungsrate von 0.800 mm/Jahr nach 40 Jahren und 0.654 mm/Jahr nach 100 Jahren und 0.6413 mm/Jahr nach 500 Jahren auf 0.6412 mm/Jahr nach 1000 Jahren. Nach 1000 Jahren ist dann eine Gesamtsenkung von 75 cm aufgelaufen.

Tabelle 5: Zuordnung des Berechnungsfalles zur Deckgebirgsausbildung

Berechnungsfall	Angenommene Ausbildung der direkt über dem Rötsalz liegenden 10 m mächtigen Deckgebirgsschicht	
	Kürzel	Langtext
a	TS-A	Tonstein mit geringen Anhydritanteilen
b	TS+A	Tonstein mit hohen Anhydritanteilen
c	A	Anhydrit

Tabelle 6: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum in 120 m Teufe nach 40 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	2.14	2.09	2.05
	sd1_05		2.08	2.03	1.99
	sd1_10		1.91	1.87	1.83
	sd1_05-1998	11.9	0.86	-	-
	sd2_01	21.8	5.26	5.16	5.08
	sd2_05		5.11	5.01	4.93
	sd2_10		4.76	4.66	4.59
	sd2_05-1998	21.8	2.37	-	-
orthogonal	od1_01	23.8	6.06	5.94	5.85
	od1_05		5.89	5.77	5.69
	od1_10		5.48	5.38	5.29
	od1_v2_01	23.8	5.04	4.89	4.78
	od1_v2_05		4.82	4.68	4.33
	od1_v2_10		4.33	4.21	4.11
	od1_05-1998	23.8	2.01	-	-
	od2_01	36.3	13.63	13.40	13.22
	od2_05		13.18	12.96	12.79
	od2_10		12.23	12.03	11.88
	od2_v2_01	36.3	12.98	12.71	12.50
	od2_v2_05		12.07	11.82	11.62
	od2_v2_10		10.42	10.18	10.00

Tabelle 7: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum in 120 m Teufe nach 40 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	0.1425	0.1415	0.1408
	sd1_05		0.1347	0.1338	0.1332
	sd1_10		0.1190	0.1183	0.1179
	sd1_05-1998	11.9	0.0725	-	-
	sd2_01	21.8	0.3100	0.3073	0.3053
	sd2_05		0.2923	0.2899	0.2881
	sd2_10		0.2579	0.2561	0.2550
	sd2_05-1998	21.8	0.1859	-	-
orthogonal	od1_01	23.8	0.3563	0.3528	0.3501
	od1_05		0.3353	0.3322	0.3299
	od1_10		0.2949	0.2927	0.2912
	od1_v2_01	23.8	0.4365	0.4291	0.4237
	od1_v2_05		0.3976	0.3905	0.3854
	od1_v2_10		0.3287	0.3229	0.3187
	od1_05-1998	23.8	0.2217	-	-
	od2_01	36.3	0.8812	0.8715	0.8647
	od2_05		0.8007	0.7914	0.7846
	od2_10		0.6687	0.6608	0.6550
	od2_v2_01	36.3	1.6365	1.6322	1.6298
	od2_v2_05		1.4064	1.4012	1.3984
	od2_v2_10		1.0212	1.0148	1.0112

Tabelle 8: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum in 120 m Teufe nach 100 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	2.77	2.71	2.67
	sd1_05		2.67	2.61	2.57
	sd1_10		2.43	2.38	2.34
	sd1_05-1998	11.9	1.17	-	-
	sd2_01	21.8	6.63	6.52	6.43
	sd2_05		6.40	6.29	6.21
	sd2_10		5.89	5.79	5.71
	sd2_05-1998	21.8	3.11	-	-
orthogonal	od1_01	23.8	7.65	7.52	7.42
	od1_05		7.38	7.25	7.15
	od1_10		6.79	6.67	6.58
	od1_v2_01	23.8	7.29	7.12	6.99
	od1_v2_05		6.83	6.66	5.93
	od1_v2_10		5.94	5.79	5.67
	od1_05-1998	23.8	3.08	-	-
	od2_01	36.3	18.33	18.07	17.88
	od2_05		17.35	17.10	16.90
	od2_10		15.53	15.30	15.12
	od2_v2_01	36.3	22.71	22.43	22.22
	od2_v2_05		20.41	20.14	19.93
	od2_v2_10		16.38	16.13	15.94

Tabelle 9: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum in 120 m Teufe nach 100 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	0.0816	0.0810	0.0806
	sd1_05		0.0771	0.0765	0.0761
	sd1_10		0.0682	0.0677	0.0674
	sd1_05-1998	11.9	0.0411	-	-
	sd2_01	21.8	0.1834	0.1813	0.1797
	sd2_05		0.1717	0.1698	0.1684
	sd2_10		0.1501	0.1487	0.1476
	sd2_05-1998	21.8	0.0932	-	-
orthogonal	od1_01	23.8	0.2156	0.2130	0.2110
	od1_05		0.2007	0.1984	0.1966
	od1_10		0.1739	0.1721	0.1707
	od1_v2_01	23.8	0.3481	0.3458	0.3444
	od1_v2_05		0.3062	0.3037	0.3022
	od1_v2_10		0.2362	0.2335	0.2317
	od1_05-1998	23.8	0.1548	-	-
	od2_01	36.3	0.7498	0.7482	0.7472
	od2_05		0.6537	0.6517	0.6505
	od2_10		0.4970	0.4942	0.4925
	od2_v2_01	36.3	1.6180	1.6176	1.6173
	od2_v2_05		1.3838	1.3832	1.3830
	od2_v2_10		0.9856	0.9847	0.9844

Tabelle 10: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 40 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	2.13	2.08	2.04
	sd1_05		2.06	2.01	1.97
	sd1_10		1.90	1.85	1.82
	sd2_01	21.8	5.23	5.12	5.04
	sd2_05		5.08	4.98	4.90
	sd2_10		4.73	4.63	4.56
orthogonal	od1_01	23.8	6.02	5.91	5.82
	od1_05		5.85	5.74	5.65
	od1_10		5.45	5.34	5.26
	od1_v2_01	23.8	5.04	4.89	4.78
	od1_v2_05		4.81	4.68	4.57
	od1_v2_10		4.33	4.21	4.11
	od2_01	36.3	13.53	13.30	13.12
	od2_05		13.09	12.87	12.70
	od2_10		12.15	11.94	11.79
	od2_v2_01	36.3	12.97	12.70	12.50
	od2_v2_05		12.07	11.81	11.61
	od2_v2_10		10.42	10.18	9.99

Tabelle 11: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 40 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	0.1419	0.1408	0.1401
	sd1_05		0.1341	0.1331	0.1325
	sd1_10		0.1184	0.1176	0.1172
	sd2_01	21.8	0.3094	0.3065	0.3044
	sd2_05		0.2916	0.2891	0.2872
	sd2_10		0.2571	0.2553	0.2541
orthogonal	od1_01	23.8	0.3557	0.3521	0.3493
	od1_05		0.3346	0.3314	0.3290
	od1_10		0.2942	0.2919	0.2903
	od1_v2_01	23.8	0.4365	0.4291	0.4237
	od1_v2_05		0.3975	0.3905	0.3854
	od1_v2_10		0.3286	0.3229	0.3186
	od2_01	36.3	0.8809	0.8711	0.8640
	od2_05		0.8003	0.7908	0.7838
	od2_10		0.6679	0.6599	0.6539
	od2_v2_01	36.3	1.6365	1.6322	1.6298
	od2_v2_05		1.4064	1.4012	1.3984
	od2_v2_10		1.0212	1.0148	1.0112

Tabelle 12: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 100 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	2.75	2.69	2.65
	sd1_05		2.65	2.59	2.55
	sd1_10		2.42	2.37	2.33
	sd2_01	21.8	6.60	6.48	6.39
	sd2_05		6.37	6.26	6.17
	sd2_10		5.86	5.76	5.68
orthogonal	od1_01	23.8	7.62	7.48	7.38
	od1_05		7.34	7.22	7.12
	od1_10		6.75	6.64	6.54
	od1_v2_01	23.8	7.29	7.12	6.99
	od1_v2_05		6.82	6.66	6.53
	od1_v2_10		5.93	5.79	5.67
	od2_01	36.3	18.24	17.98	17.78
	od2_05		17.25	17.00	16.81
	od2_10		15.44	15.21	15.03
	od2_v2_01	36.3	22.70	22.43	22.22
	od2_v2_05		20.40	20.13	19.93
	od2_v2_10		16.38	16.12	15.93

Tabelle 13: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 100 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	0.0813	0.0807	0.0802
	sd1_05		0.0768	0.0762	0.0758
	sd1_10		0.0679	0.0674	0.0670
	sd2_01	21.8	0.1831	0.1810	0.1793
	sd2_05		0.1714	0.1695	0.1681
	sd2_10		0.1498	0.1483	0.1472
orthogonal	od1_01	23.8	0.2154	0.2128	0.2107
	od1_05		0.2005	0.1981	0.1963
	od1_10		0.1737	0.1718	0.1703
	od1_v2_01	23.8	0.3481	0.3458	0.3444
	od1_v2_05		0.3062	0.3037	0.3022
	od1_v2_10		0.2362	0.2335	0.2317
	od2_01	36.3	0.7499	0.7482	0.7472
	od2_05		0.6538	0.6517	0.6505
	od2_10		0.4970	0.4942	0.4924
	od2_v2_01	36.3	1.6180	1.6176	1.6173
	od2_v2_05		1.3838	1.3832	1.3830
	od2_v2_10		0.9856	0.9848	0.9844

Tabelle 14: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 500 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	4.61	4.54	4.49
	sd1_05		4.41	4.34	4.29
	sd1_10		3.97	3.91	3.86
	sd2_01	21.8	11.52	11.36	11.24
	sd2_05		10.85	10.70	10.59
	sd2_10		9.61	9.47	9.36
orthogonal	od1_01	23.8	13.89	13.72	13.59
	od1_05		12.99	12.82	12.69
	od1_10		11.34	11.19	11.07
	od1_v2_01	23.8	20.68	20.50	20.36
	od1_v2_05		18.45	18.27	18.13
	od1_v2_10		14.52	14.36	14.23
	od2_01	36.3	47.89	47.62	47.42
	od2_05		42.95	42.69	42.49
	od2_10		34.50	34.25	34.07
	od2_v2_01	36.3	87.36	87.08	86.87
	od2_v2_05		75.68	75.41	75.20
	od2_v2_10		55.70	55.45	55.25

Tabelle 15: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 500 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	0.0329	0.0325	0.0323
	sd1_05		0.0309	0.0306	0.0304
	sd1_10		0.0272	0.0270	0.0268
	sd2_01	21.8	0.1066	0.1063	0.1061
	sd2_05		0.0947	0.0944	0.0941
	sd2_10		0.0751	0.0746	0.0743
orthogonal	od1_01	23.8	0.1440	0.1438	0.1437
	od1_05		0.1268	0.1265	0.1264
	od1_10		0.0980	0.0976	0.0974
	od1_v2_01	23.8	0.3334	0.3333	0.3333
	od1_v2_05		0.2887	0.2887	0.2887
	od1_v2_10		0.2117	0.2116	0.2116
	od2_01	36.3	0.7406	0.7405	0.7405
	od2_05		0.6413	0.6413	0.6413
	od2_10		0.4746	0.4745	0.4745
	od2_v2_01	36.3	1.6161	1.6161	1.6161
	od2_v2_05		1.3817	1.3817	1.3817
	od2_v2_10		0.9828	0.9827	0.9827

Tabelle 16: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 1000 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	5.99	5.90	5.84
	sd1_05		5.69	5.61	5.55
	sd1_10		5.10	5.02	4.97
	sd2_01	21.8	16.77	16.61	16.49
	sd2_05		15.49	15.33	15.21
	sd2_10		13.21	13.06	12.94
orthogonal	od1_01	23.8	21.06	20.88	20.75
	od1_05		19.28	19.11	18.98
	od1_10		16.15	15.99	15.87
	od1_v2_01	23.8	37.35	37.16	37.02
	od1_v2_05		32.88	32.70	32.57
	od1_v2_10		25.10	24.93	24.80
	od2_01	36.3	84.91	84.65	84.44
	od2_05		75.01	74.75	74.55
	od2_10		58.23	57.98	57.79
	od2_v2_01	36.3	168.16	167.88	167.67
	od2_v2_05		144.76	144.49	144.28
	od2_v2_10		104.84	104.58	104.38

Tabelle 17: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 1000 Jahren Standzeit

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	a (TS-A)	b (TS+A)	c (A)
Reihe	sd1_01	11.9	0.0240	0.0237	0.0236
	sd1_05		0.0223	0.0221	0.0219
	sd1_10		0.0193	0.0191	0.0190
	sd2_01	21.8	0.1046	0.1045	0.1045
	sd2_05		0.0921	0.0920	0.0920
	sd2_10		0.0707	0.0707	0.0706
orthogonal	od1_01	23.8	0.1431	0.1431	0.1431
	od1_05		0.1256	0.1256	0.1255
	od1_10		0.0957	0.0956	0.0956
	od1_v2_01	23.8	0.3332	0.3332	0.3332
	od1_v2_05		0.2886	0.2886	0.2886
	od1_v2_10		0.2115	0.2115	0.2115
	od2_01	36.3	0.7404	0.7404	0.7404
	od2_05		0.6412	0.6412	0.6412
	od2_10		0.4745	0.4745	0.4745
	od2_v2_01	36.3	1.6160	1.6160	1.6160
	od2_v2_05		1.3816	1.3816	1.3816
	od2_v2_10		0.9827	0.9827	0.9827

8.4.2 Exemplarische Darstellung der Effektivverzerrungen

In den Abbildungen 13 und 14 sind die räumlichen Verteilungen der Effektivverzerrung ε_{eff} für den Berechnungsfall sd1_05_a zum Berechnungszeitpunkt 40 und 100 Jahre dargestellt. Man erkennt insbesondere am oberen und unteren Stoßbereich der Kaverne erhöhte Effektivverzerrungen bis zu 6 ‰ nach 40 Jahren und bis zu 8 ‰ nach 100 Jahren. Diese Verzerrungen sind so gering, dass sie bzgl. der Standfestigkeit nicht bewertet werden müssen. Auch befinden sich die Spannungszustände im kompressiblen (= nicht dilatanten Bereich im Invariantendiagramm) Bereich, so dass auch aus diesem Grunde eine Beurteilung der Effektivverzerrungen bzgl. der Standfestigkeit nicht erforderlich ist.

8.4.3 Exemplarische Darstellung des Lodeparameters

In den folgenden Abbildungen 15 und 16 ist die räumliche Verteilung des Lodeparameters m für die Berechnungsvariante sd1_05_a zum Berechnungszeitpunkt 40 und 100 Jahre dargestellt. Während in zentralen Bereichen des Kavernenbodens und der Kavernenfirste Extension ($m = 1$) vorherrscht, ändert sich die Beanspruchungsart zum Kavernenäußeren etwas in Richtung Torsionsbeanspruchung. Am vertikalen Stoß treten Beanspruchungszustände zwischen Torsion und Extension auf. Mit zunehmender Zeit bilden sich hier zunehmend Extensionsbeanspruchungen aus. Im äußeren Modellbereich bilden sich im Rötsalz mit der Zeit zunehmend größere kompressionsbeanspruchte Zonen aus. Im Deck- und Grundgebirge herrschen auf Grund des angesetzten anisotropen Anfangsspannungszustandes auch nach vielen Jahren ausschließlich Kompressionsbeanspruchungen vor.

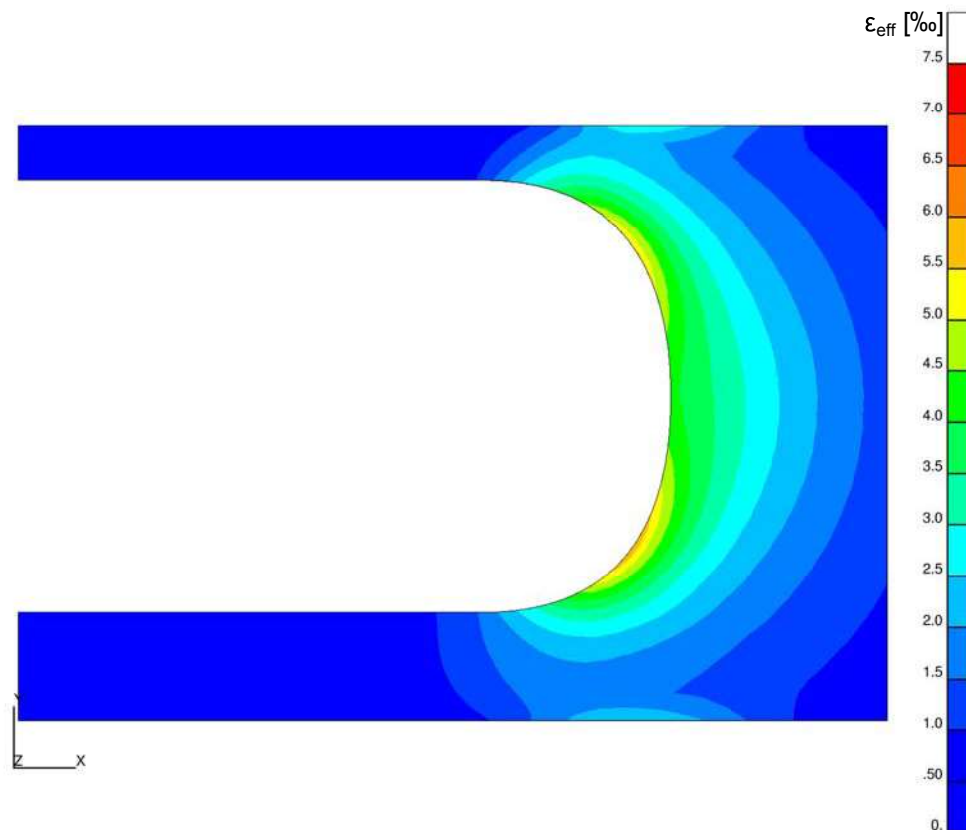


Abbildung 13: Räumliche Verteilung der Effektivverzerrungen [%] nach 40 Jahren (sd1_05_a)

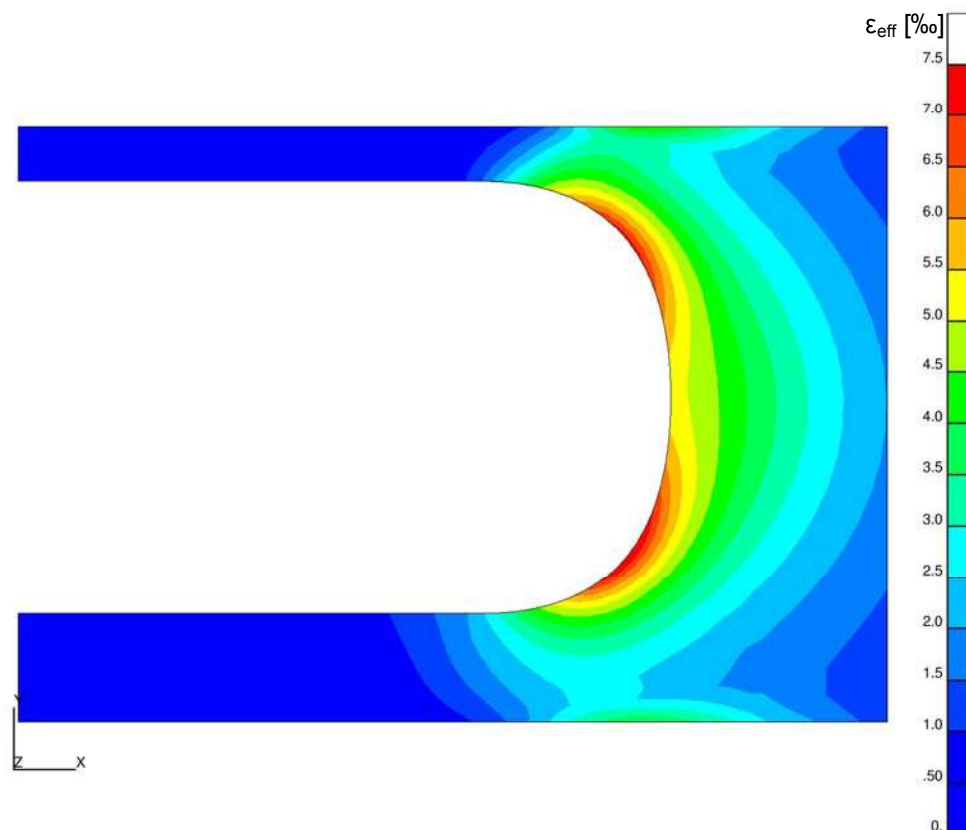


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Effektivverzerrungen [%] nach 100 Jahren (sd1_05_a)

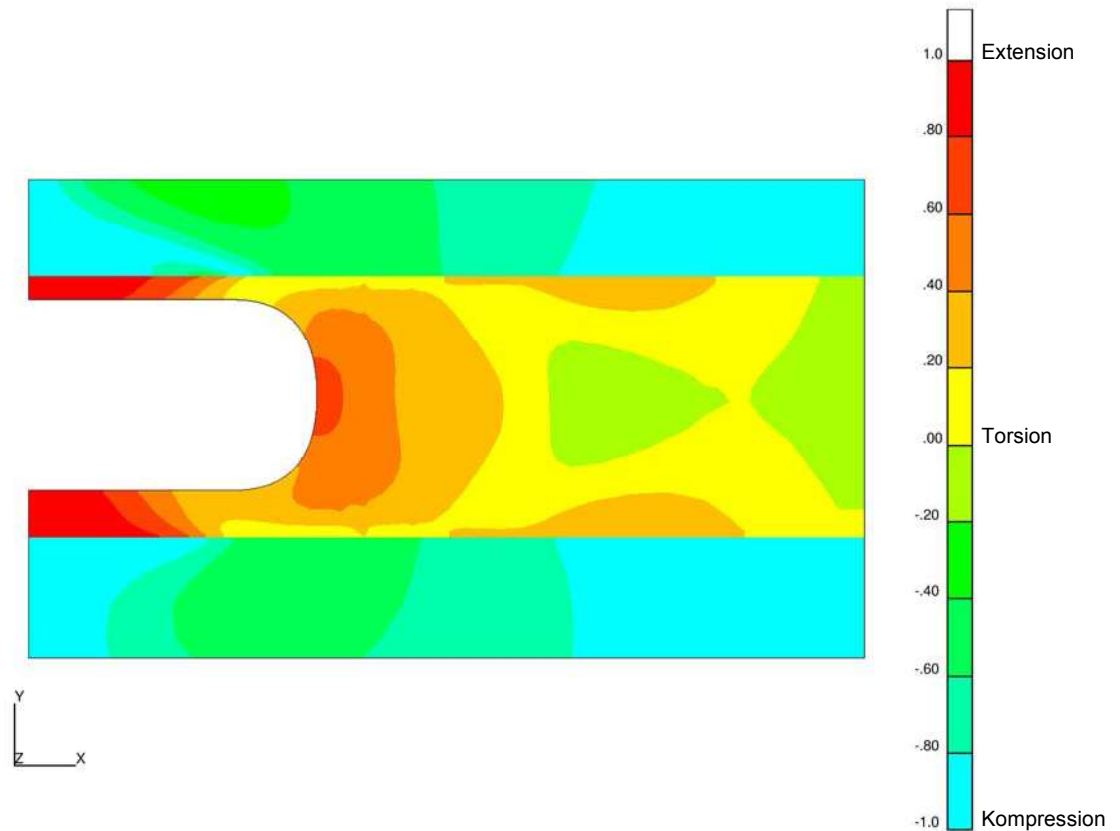


Abbildung 15: Räumliche Verteilung des Lodeparameters [-] nach 40 Jahren
(sd1_05_a)

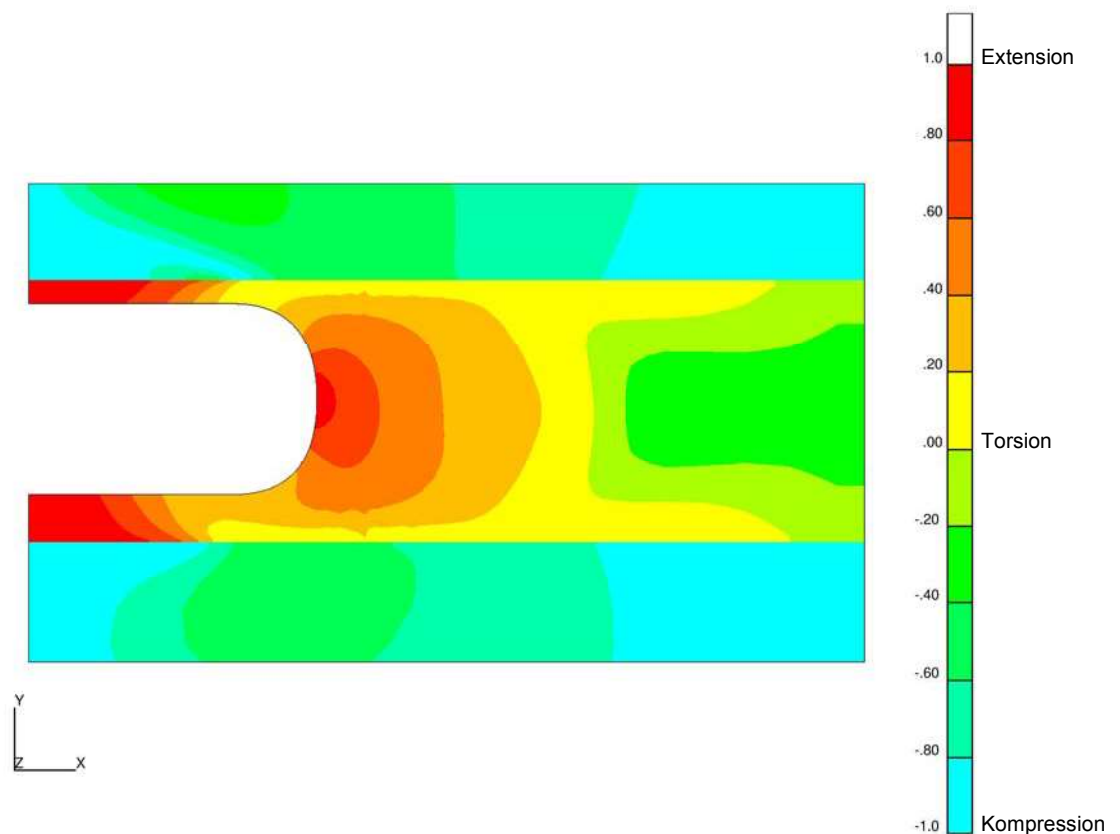


Abbildung 16: Räumliche Verteilung des Lodeparameters [-] nach 100 Jahren
(sd1_05_a)

8.4.4 Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Rötsalz

In Abbildung 17 sind für den Berechnungsfall sd1_05_a Spannungspfade am oberen Rand des Rötsalzes dargestellt. Das Ende der modelltechnischen Kavernenerstellung nach einem Jahr ist durch eine Raute in diesem und in allen folgenden Invariantendiagrammen gekennzeichnet.

Die polygonzugartige Kurve für die ersten sechs Berechnungszeitpunkte der Spannungspfade hat ihre Ursache in der speziellen Simulation der Kavernenerstellung: Der lithostatische Gebirgsdruck wird innerhalb eines Jahres in fünf Schritten auf den hydrostatischen Soledruck abgesenkt. Bei dieser geringen Zahl von Schritten weisen die Spannungspfade für das erste Jahr einen unstetigen Verlauf auf. Bei einer Druckverminderung in einer größeren Anzahl von Berechnungsschritten würde sich ein abgerundeter Verlauf der Spannungspfade ergeben. Die Korrektheit der Berechnungsergebnisse wird dadurch jedoch nicht beeinträchtigt.

Die Spannungspfade in den ausgewerteten Punkten (s. Skizze im Diagramm) weisen von links nach rechts immer geringere Beanspruchungszustände aus. Da im Punkt 1 die geringsten vertikalen Abstände zur Dilatanzgrenze auftreten, werden für Vergleichsdarstellungen zwischen den Berechnungsfällen ausschließlich Spannungspfade für äquivalente Punkte der jeweiligen Berechnungsfälle ausgewertet. Eine exakte Bestimmung des Punktes maximaler Beanspruchung für jeden Berechnungsfall wird nicht vorgenommen, da die Spannungspfade dicht beieinander liegen und nicht in die Nähe der Dilatanzgrenze kommen.

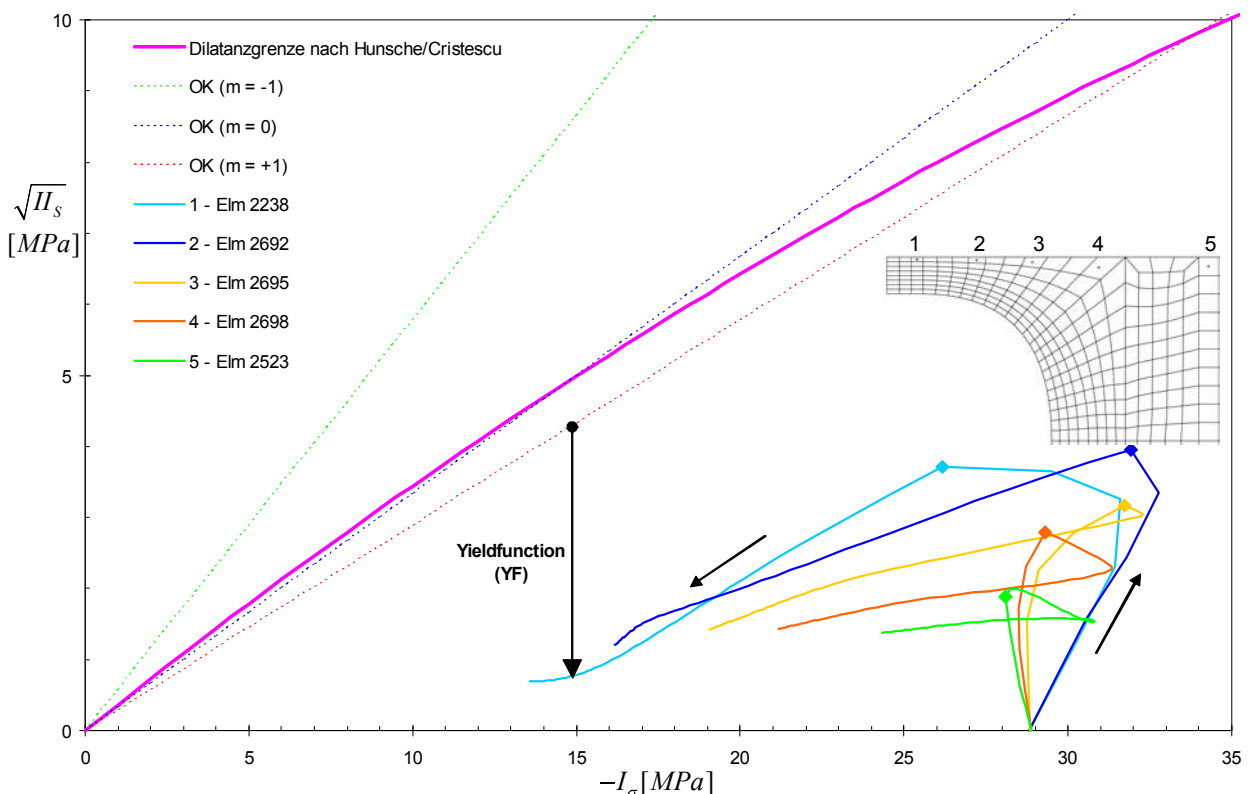


Abbildung 17: Spannungspfade im äußeren Kavernendachbereich (oben), Vergleich verschiedener Auswertelokationen (sd1_05_a)

In Abbildung 17 ist exemplarisch der als Yieldfunction definierte Abstand eines Spannungspunktes zur Ortskurve $OK(m=+1)$ für das Auftreten von Zugspannungen gekennzeichnet. Spannungspunkte unterhalb dieser Ortskurve werden durch einen negativen, oberhalb davon durch einen positiven Wert der Yieldfunction gekennzeichnet. Alle Spannungspunkte mit $m = +1$ und mindestens einer Hauptspannung $= 0$ liegen auf dieser Ortskurve. Die Ortskurve $OK(m=+1)$ kann für Spannungen mit geringem $|I_\sigma|$ (< 35 MPa) als konservative Näherung der Dilatanzgrenze nach Hunsche/Cristescu angesehen werden. In Abbildung 18 ist die Yieldfunction in Isoflächendarstellung für den Berechnungsfall sd1_05_a nach 40 Jahren Standzeit dargestellt. Im gesamten Rötsalz werden nirgendwo positive Yieldfunctionwerte ausgewiesen, d. h. es wird nirgendwo die Dilatanzgrenze verletzt. Der max. Wert der Yieldfunction ist kleiner als -3.0 MPa und wird am oberen Rand des Rötsalzes im Übergang des Kavernendaches zum Rötsalzpfiler berechnet.

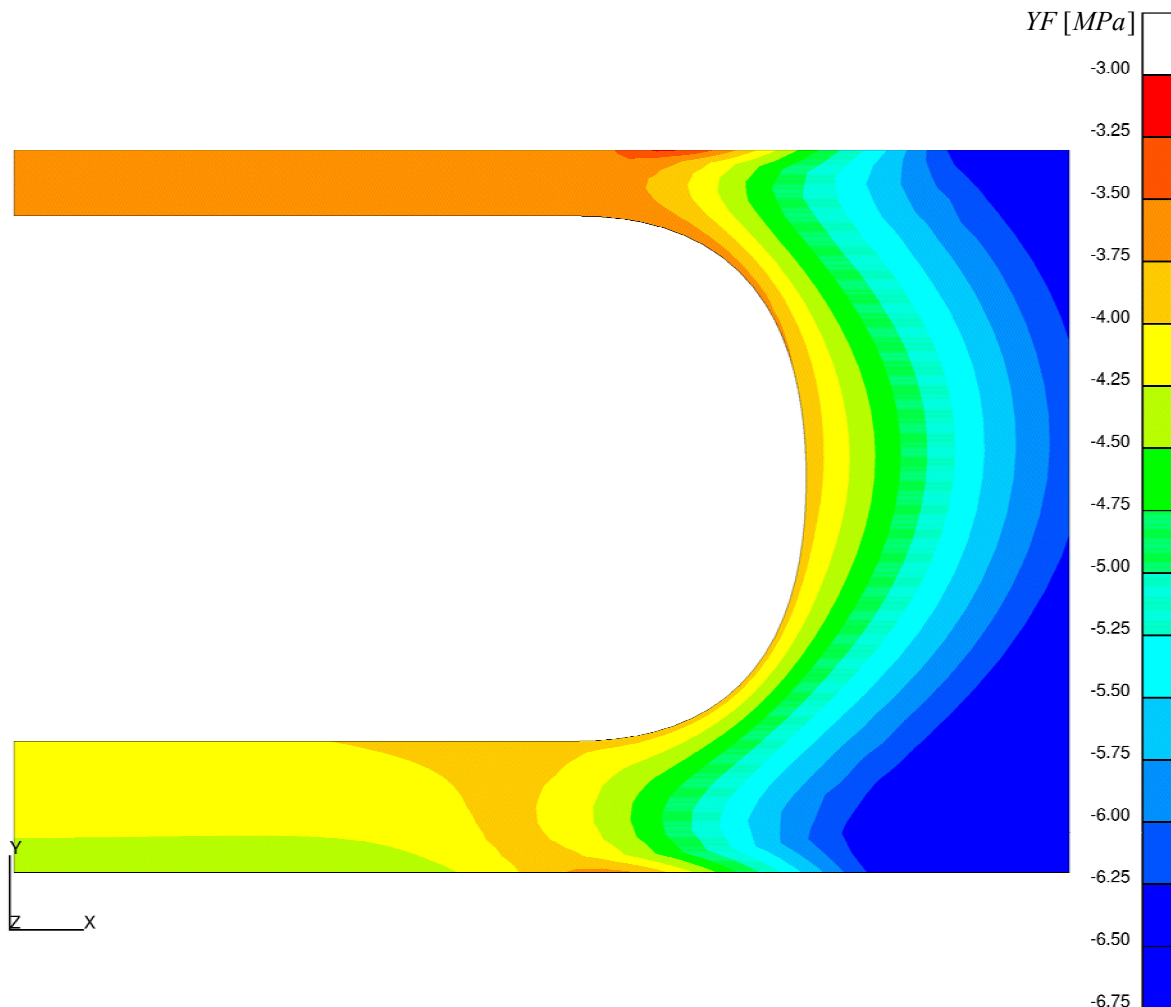


Abbildung 18: Yieldfunction im Rötsalz nach 40 Jahren Standzeit (sd1_05_a)

In den Abbildungen 19 bis 24 sind vergleichende Darstellungen für die Spannungspfade im Rötsalz dargestellt.

In Abbildung 19 sind die Spannungspfade in Kavernendachmitte bei 1 m Mächtigkeit des Sicherheitsdaches dargestellt. Die Spannungspfade für die Berechnungsfälle sd1_01_a und od1_v2_01_a liegen dicht beieinander. Der Pfad für den Berechnungsfall od1_01_a liegt tiefer und ist quasi deckungsgleich mit dem Pfad des Berechnungsfalles od2_v2_01_a. Die Berechnungsfälle für die größere Kaverne (sc2_01_a, sd2_01_a, od2_v2_01_a und od2_01_a) liegen noch einmal weiter entfernt von der Dilatanzgrenze.

Das Invariantendiagramm für ein 5 m mächtiges Sicherheitsdach (Abbildung 20) weist im Vergleich zur zuvor beschriebenen Abbildung nur geringe Unterschiede auf. Bei einem 10 m mächtigem Sicherheitsdach ergeben sich geringere Beanspruchungen in der Mitte der Unterseite des Kavernendaches (Abbildung 21). Die Spannungspfade sämtlicher Berechnungsfälle liegen hier sehr dicht beieinander.

Für den äußeren Kavernendachbereich ergeben sich im oberen Bereich (s. a. Abbildung 17) für alle Berechnungsfälle bei den drei unterschiedlichen Mächtigkeiten des Sicherheitsdaches von 1, 5 und 10 m nur geringfügig voneinander abweichende Spannungspfade (Abb. 21 bis 23) mit ausreichendem Abstand zur Dilatanzgrenze.

Insgesamt ist die Beanspruchung des Salzgebirges als unkritisch einzustufen.

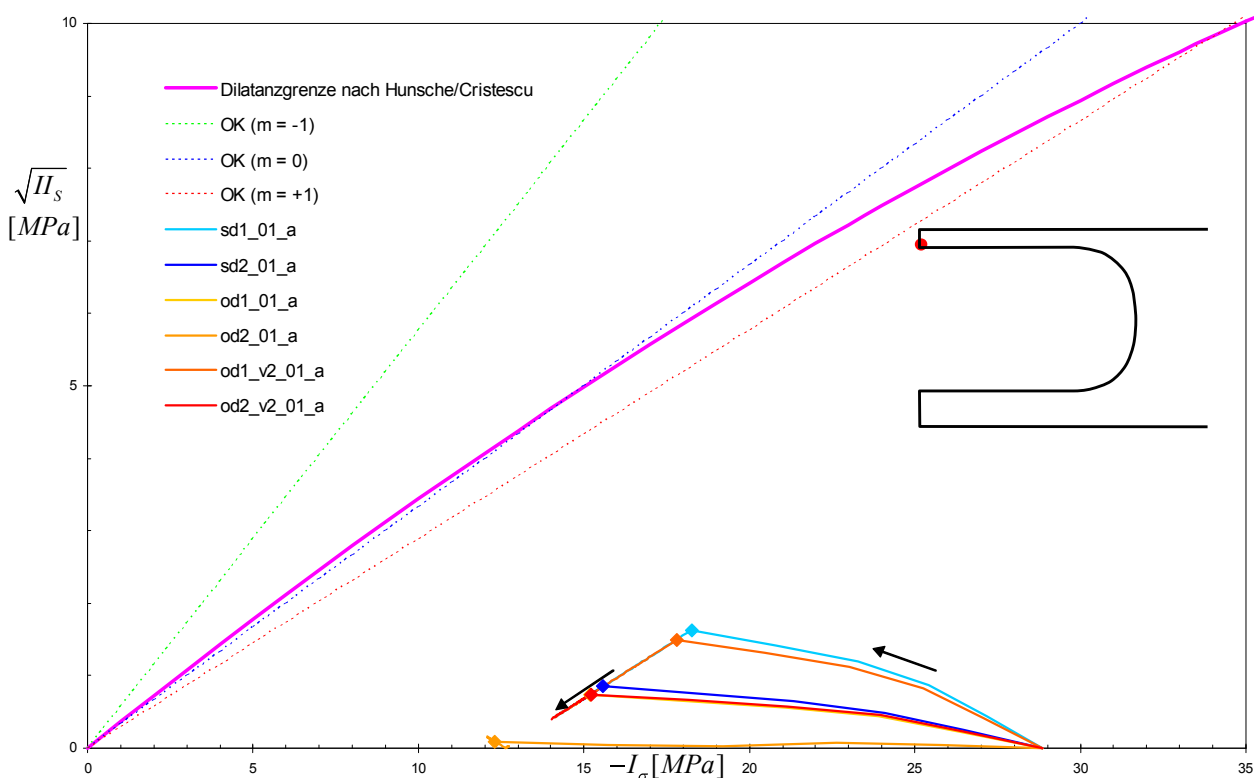


Abbildung 19: Spannungspfade in Kavernendachmitte (unten), 1 m mächtiges Sicherheitsdach (xxx_01_a)

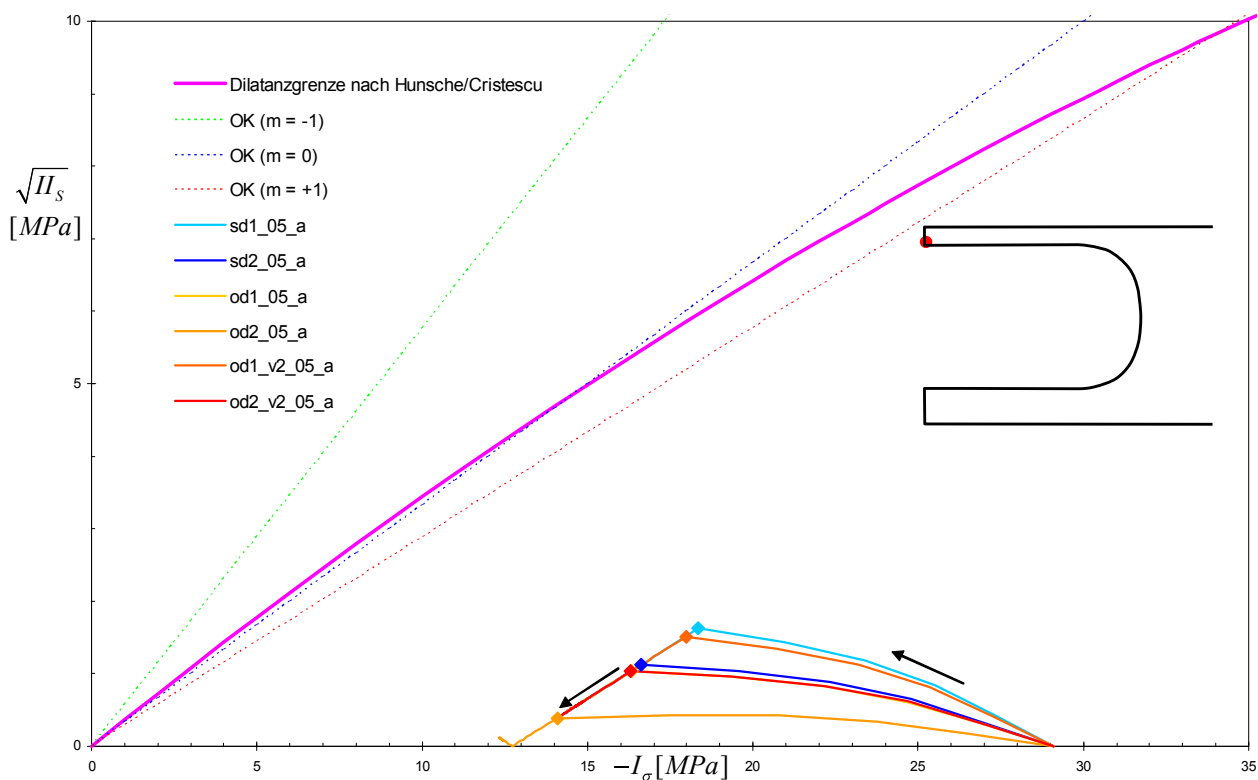


Abbildung 20: Spannungspfade in Kavernendachmitte (unten), 5 m mächtiges Sicherheitsdach (xxx_05_a)

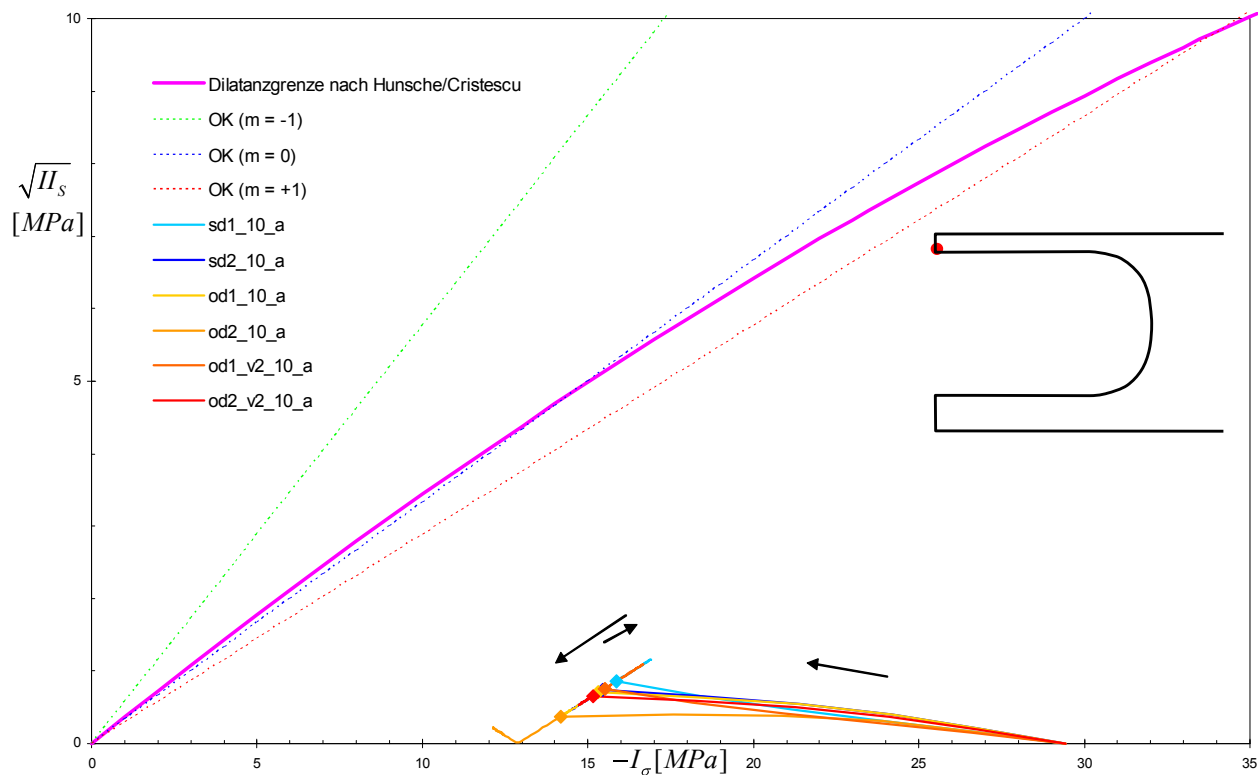


Abbildung 21: Spannungspfade in Kavernendachmitte (unten), 10 m mächtiges Sicherheitsdach (xxx_10_a)

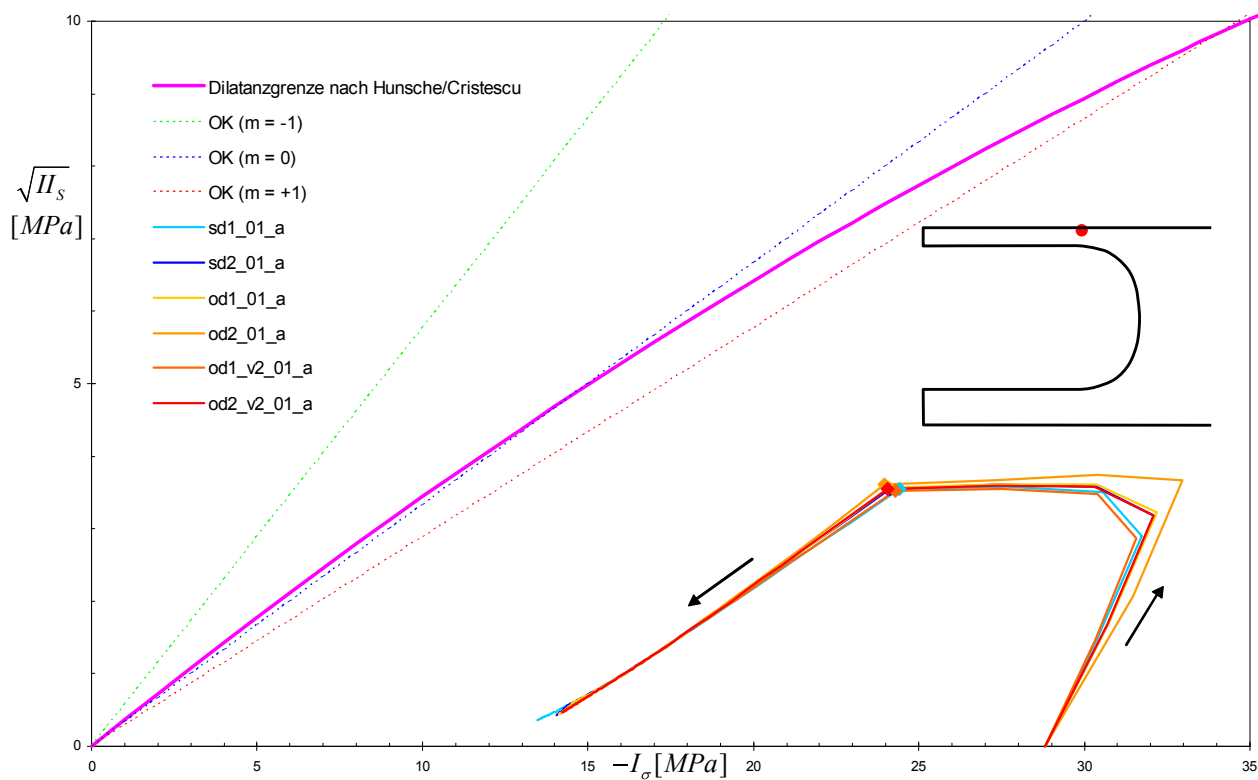


Abbildung 22: Spannungspfade im äußeren Kavernendachbereich (oben),
1 m Sicherheitsdach (xxx_01_a)

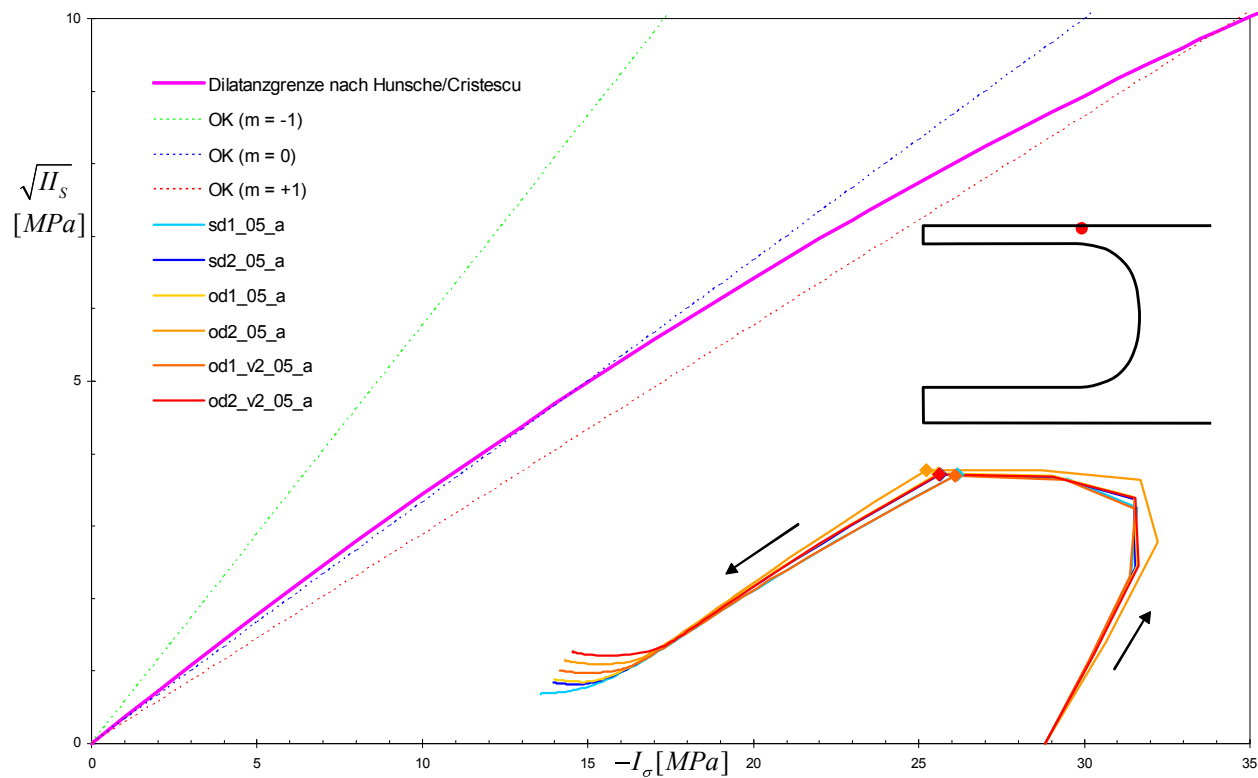


Abbildung 23: Spannungspfade im äußeren Kavernendachbereich (oben),
5 m Sicherheitsdach (xxx_05_a)

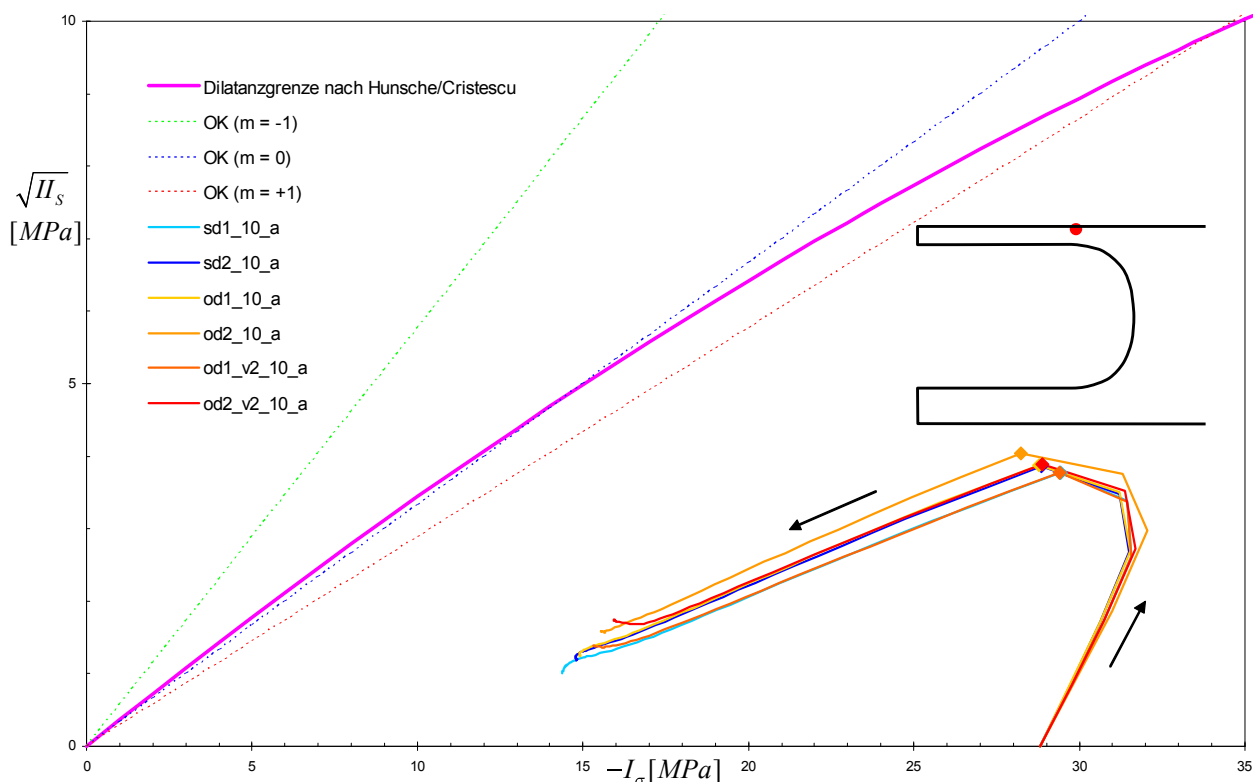


Abbildung 24: Spannungspfade im äußeren Kavernendachbereich (oben),
10 m Sicherheitsdach (xxx_10_a)

8.4.5 Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Deckgebirge

Zur Überprüfung des Beanspruchungszustandes des Deckgebirges sind in Abbildung 25 für den Berechnungsfall sd1_05_c in der direkt über dem Rötsalz liegenden, 10 m mächtigen Anhydritschicht Spannungspfade für relevante Punkte (s. Skizze im Diagramm) aufgetragen. Die Spannungspfade beginnen auf Grund des anisotropen Anfangsspannungszustandes nicht auf der horizontalen Achse. An der Unterseite des Anhydrits (Punkte 1 bis 3) fällt die 1. Invariante des Spannungstensors $(-I_\sigma = -(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = -3\sigma_m)$ zunächst im ersten Jahr ebenso wie der deviatorische Spannungsanteil $(\sqrt{II_S} = \sigma_{eff} / \sqrt{3})$. Danach steigt der deviatorische Spannungsanteil bei weiter abnehmendem hydrostatischen Druck leicht an. An der Oberseite des Anhydrits ergeben sich in einem weiten Bereich über dem Kavernenstoß (Punkte 4 bis 9) zunächst Erhöhungen des Deviators bei nur leicht verändertem hydrostatischen Druck. Bei Erreichen eines Maximums kehrt sich der Prozess um und der deviatorische Spannungsanteil fällt genauso wie der hydrostatische Druck. Die Bruchgrenze und auch die Nachbruchfestigkeit des Anhydrits werden zu keinem Zeitpunkt überschritten. An der Oberkante des Anhydrits werden die Spannungszustände mit der Zeit sogar immer unkritischer, d. h. sie bewegen sich von der Bruchgrenze weg.

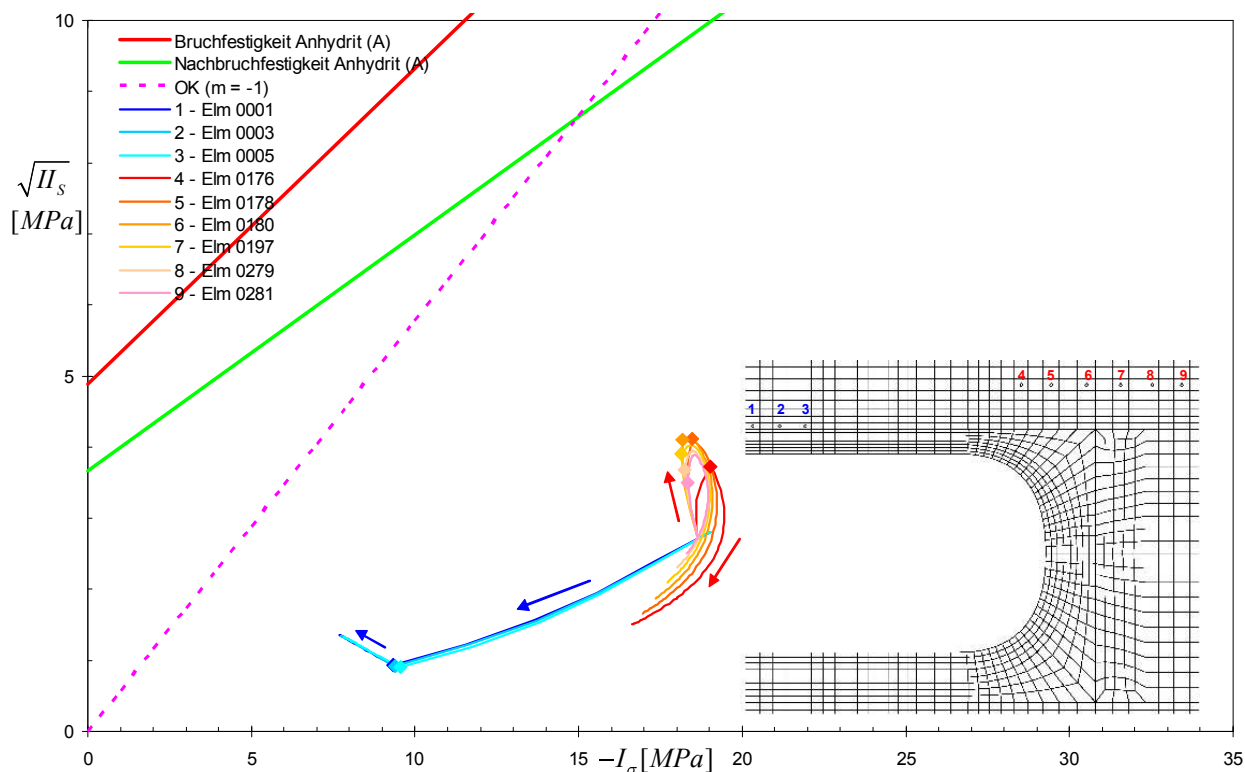


Abbildung 25: Spannungspfade Deckgebirge (Anhydrit), Berechnungsfall sd1_05_c

8.5 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Arbeitspaket 1

Zur Bestimmung der Senkungsraten von bestehenden Klasse 0-Kavernen wurden insgesamt 54 Berechnungen für 18 unterschiedliche FE-Modelle unter Zugrundelegung eines Berechnungszeitraumes von 1000 Jahren durchgeführt. Dabei wurden unendliche Felder in verschiedenen Designs (Standarddesign, Orthogonales Design) für zwei verschiedene Kavernengrößen modelliert:

	Kavernengröße 1 (160 · 80 m)	Kavernengröße 2 (200 · 120 m)
	Modellkurzbezeichnung	Modellkurzbezeichnung
Standarddesign	sd1	sd2
Orthogonales Design	od1	od2

Neben der Variation der Mächtigkeit des Sicherheitsdaches im Rötsalz (1, 5 und 10 m) wurde der Einfluss einer unterschiedlichen Steifigkeit und Bruchfestigkeit in einer 10 m mächtigen Deckgebirgsschicht im Oberen Buntsandstein direkt über dem Rötsalz auf das Tragverhalten des Gebirges untersucht.

Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

- Zum Berechnungszeitpunkt 40 Jahre ($\approx$ heute) werden für alle Designs außer od2 geringe Senkungsraten an der Geländeoberfläche zwischen 0.12 und 0.44 mm/Jahr berechnet. Für das Design od2 werden je nach Berechnungsfall Senkungsraten von 0.66 bis 1.64 mm/Jahr berechnet.
- Zum Berechnungszeitpunkt 100 Jahre ($\approx$ in 60 Jahren) werden für alle Designs außer od2 geringe Senkungsraten an der Geländeoberfläche zwischen 0.067 und 0.35 mm/Jahr berechnet. Für das Design od2 werden je nach Berechnungsfall Senkungsraten von 0.49 bis 1.62 mm/Jahr berechnet.
- In allen Berechnungsfällen wird keine Überschreitung der Bruchfestigkeiten im Deckgebirge berechnet.
- In allen Berechnungsfällen wird keine Überschreitung der Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) im Rötsalz berechnet.
- In allen Berechnungsfällen werden in keinen Schichten Zugspannungen berechnet.
- Die Senkungen und Senkungsraten aus den 3D-Berechnungen des Jahres 1998 sind etwa um den Faktor 1.5 bis 3 geringer als für die entsprechenden 2D-Modelle der vorliegenden Analyse. Diese Unterschiede ergeben sich, da zum einen 2D-Modelle grundsätzlich weicher reagieren und zum anderen im Jahre 1998 höhere Deckgebirgssteifigkeiten angesetzt wurden.

9 Arbeitspaket 2: Zukünftiges Design

9.1 Materialparameter

Die verwendeten Kriechparameter für das Steinsalz und die Bruchparameter für den Oberen Buntsandstein ergeben sich aus den in den Abschnitten 5 und 7.3 aufgeführten Daten.

Die in den Berechnungen für das Arbeitspaket 2 angesetzten elastischen Materialparameter sind in Tabelle 18 zusammengestellt. Der besseren Veranschaulichung dient Abbildung 26. Die Parameter für den Oberen Buntsandstein sind LANGER (1985) entnommen. Die Eigenschaften des Tonsteins aus dem Oberen Buntsandstein werden auch dem Unteren Buntsandstein sowie dem Muschelkalk zugeordnet.

Tabelle 18: Elastische Materialparameter – Arbeitspaket 2

Stratigraphie	Lithologie	Teufe der Basis [m]	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	K_0 [-]
Quartär und Tertiär	Sande und Tone	120	34	2000	0.33	0.493
Muschelkalk	Tonstein, Kalkstein, Dolomit	220	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 3	Tonstein	400	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 2	Tonstein	410	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 1	Anhydrit	420	15500	2400	0.33	0.493
Röt	Rötsalz	475	25000	2200	0.25	1.0
Unterer Buntsandstein	Tonstein	800	5500	2400	0.33	0.493

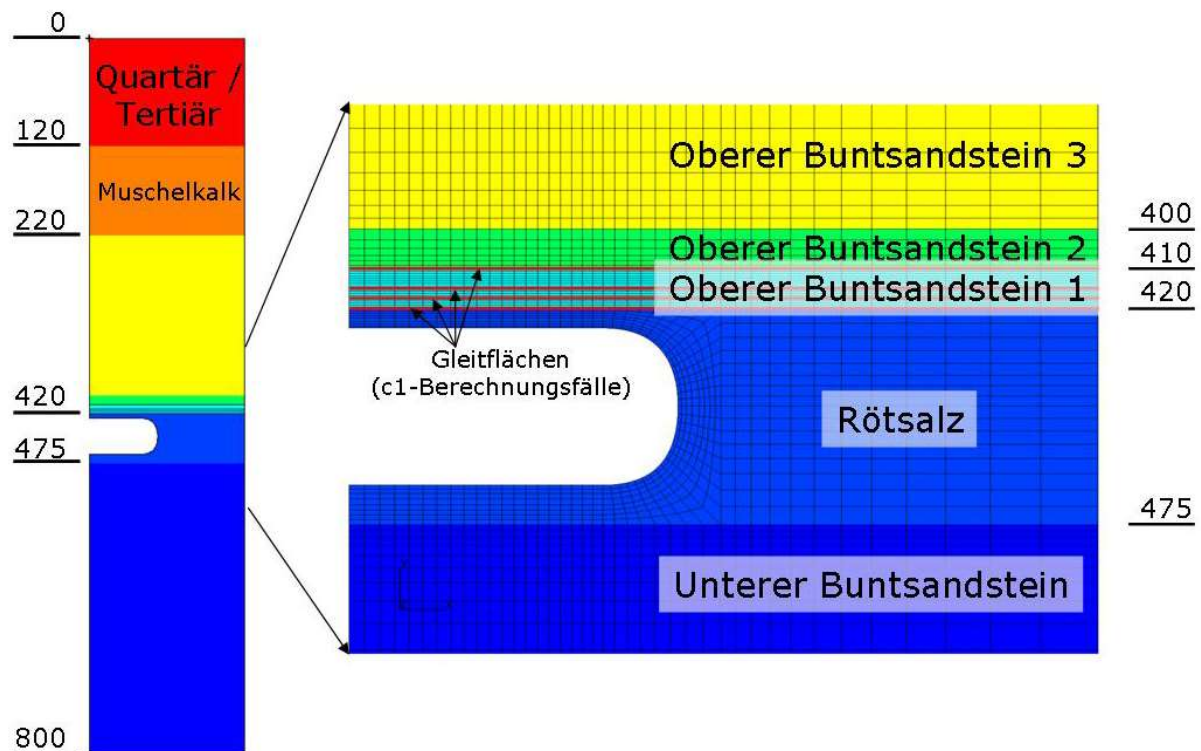


Abbildung 26: Modellierte Gesteinsschichten (mit Gleitflächen)

9.2 Berechnungsmodelle

Die verschiedenen Modelle sind in Tabelle 19 zusammengestellt. Nachfolgend werden die Annahmen für die einzelnen Modelle erläutert.

Future Design 1 (Abbildung 27):

Das Future Design 1 setzt eine unendliche Anzahl von parallelen Kavernenreihen voraus. Die einzelne Kaverne ist 180 m lang und 120 m breit. Die Solung jeder einzelnen Kaverne geschieht über zwei jeweils 60 m voneinander entfernte Bohrungen. Von dort aus mit einem Radius von jeweils 60 m gesolt. Die Kavernenhöhe wird im Modell zu 40 m bei einem 5 m mächtigen Sicherheitsdach angenommen. In der Längsachse der Kavernenreihe beträgt die Pfeilerstärke 60 m ($= 2 \cdot 30$ m), in Querrichtung 280 m ($= 2 \cdot 140$ m). Zur Simulation dieses unendlichen Kavernenfeldes ist es ausreichend, eine Viertekaverne mit entsprechenden Gebirgsbereichen unter Ausnutzung von Symmetrien abzubilden. Alle 4 vertikalen Begrenzungsflächen des dreidimensionalen Berechnungsausschnittes sind Symmetrieebenen. Für dieses Design wird das dreidimensionale Modell fd1 erstellt.

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells fd1_2d wird für die Grundfläche des quasi ellipsenförmigen Kavernengrundrisses ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt bestimmt. Ebenso wird für die charakteristische Fläche des Gebirges verfahren, in der die Kaverne angeordnet ist. Es ergeben sich

dann die Ersatzradien für die Kaverne und für den äußeren Modellrand. In der dritten Dimension ist eine Bestimmung von geometrischen Ersatzmaßen nicht notwendig.

Future Design 2 (Abbildung 28):

Grundlage des Future Designs 2 bildet eine Kavernenreihe des Future Designs 1. Jeweils auf Höhe einer Kaverne dieser Reihe werden um 90° gedrehte Kavernen beidseitig im Wechsel mit nicht gedrehten Kavernen angeordnet. Die charakteristische Fläche wird gegenüber dem Future Design 1 von 24000 m² (=120 · 200 m) auf 27600 m² (=120 · 230 m) vergrößert, damit die angestrebte Pfeilerbreite von 80 m zwischen den längs und quer angeordneten Kavernen erhalten bleibt. Für dieses Design wird das dreidimensionale Modell fd2 erstellt.

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells fd2_2d wird für die Grundfläche des quasi ellipsenförmigen Kavernengrundrisses ein Kreis mit einem Flächeninhalt bestimmt, der dem zweier Kavernen entspricht. Ebenso wird für die charakteristische Fläche des Gebirges verfahren, in der die beiden Kavernen angeordnet sind. Es ergeben sich dann die Ersatzradien für die Ersatzkaverne und für den äußeren Modellrand.

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells fd2_2d_v2 wird für die Grundfläche des quasi ellipsenförmigen Kavernengrundrisses ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt einer Kaverne bestimmt. Da hier also nur von der Fläche einer Kaverne ausgegangen wird, muss für die Bestimmung des Ersatzradius für den äußeren Modellrand die Hälfte der charakteristischen Fläche angesetzt werden.

Future Designs 3-120 (Abbildung 29), 3-160 und 3-200:

Für die Berechnung von zwei unendlichen parallelen Reihen wurden drei verschiedene Designs entwickelt, die sich durch den Abstand der beiden Reihenachsen unterscheiden. Im Future Design 3-120 beträgt der halbe Reihenabstand 120 m, im Future Design 3-160 160 m und im Future Design 3-200 200 m. Die Kavernengröße entspricht der des Future Designs 1. Zur Simulation der beiden Einzelreihen wird quer zur Reihenerstreckung ein genügend breiter Pfeiler angeordnet (im Idealfall mit unendlicher Breite). Im Modell beträgt der Abstand zwischen äußerer Reihenachse und Modellaußenrand 1400 m. Für diese Modelle können keine rotationssymmetrischen Ersatzmodelle erstellt werden. Daher werden für die drei vorher erwähnten Designs ausschließlich 3D-Modelle erstellt (fd3-120, fd3-160 und fd3-200).

Die Resultate sämtlicher Berechnungsfälle für die Future Designs fd3-120, fd3-160 und fd3-200 zeichnen sich durch numerische Instabilitäten während der FE-Berechnung aus. Dadurch werden die Berechnungsergebnisse zu einem gewissen, nicht näher quantifizierbarem Grad verfälscht, so dass auf eine Darstellung dieser Ergebnisse verzichtet werden musste.

Zur Vermeidung dieser numerischen Schwierigkeiten könnten unter Vernachlässigung einer Tragwirkung der in Reihenrichtung angeordneten Pfeiler relativ einfache 2D-Modelle im ebenen Verzerrungszustand erstellt werden. Diese Modelle eignen sich dann zur konservativen Abschätzung von Geländensenkungen und Pfeilerbeanspruchungen. Grundsätzlich ist bei Vorgabe des Kavernendurchmessers und der Pfeilerbreite (jeweils in Querrichtung) die Erstellung mehrerer Varianten möglich:

- Modelle mit 2 bzw. n parallelen Reihen (Ausnutzung von Symmetrien)
- Modelle mit unendlich vielen parallelen Reihen (modelliert wird nur eine halbe Kaverne und ein halber Pfeiler)

Future Designs 4 (Abbildung 30):

Sämtliche Designs, für die eine Reihenanzahl berücksichtigt wurde (AP 1 und AP 2), weisen geringe Abbaugrade auf. Orthogonale Designs wurden demgegenüber ausschließlich mit hohen Abbaugraden versehen. Es fehlt also ein Reihendesign mit hohem Abbaugrad. Deshalb wurde ergänzend das Future Design 4 entwickelt.

Die Kavernengröße entspricht der aus dem Future Design 1 ($180 \cdot 120$ m). Die Kavernenhöhe wird im Modell zu 40 m bei einem 5 m mächtigen Sicherheitsdach angenommen. In der Längsachse der Kavernenreihe beträgt die Pfeilerstärke 40 m ($= 2 \cdot 20$ m), in Querrichtung 80 m ($= 2 \cdot 40$ m).

Zur Erstellung des rotationssymmetrischen Ersatzmodells fd4_2d wird für die Grundfläche des quasi ellipsenförmigen Kavernengrundrisses ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt bestimmt. Ebenso wird für die charakteristische Fläche des Gebirges verfahren, in der die Kaverne angeordnet ist. Es ergeben sich dann die Ersatzradien für die Kaverne und für den äußeren Modellrand. In der dritten Dimension ist eine Bestimmung von geometrischen Ersatzmaßen nicht notwendig.

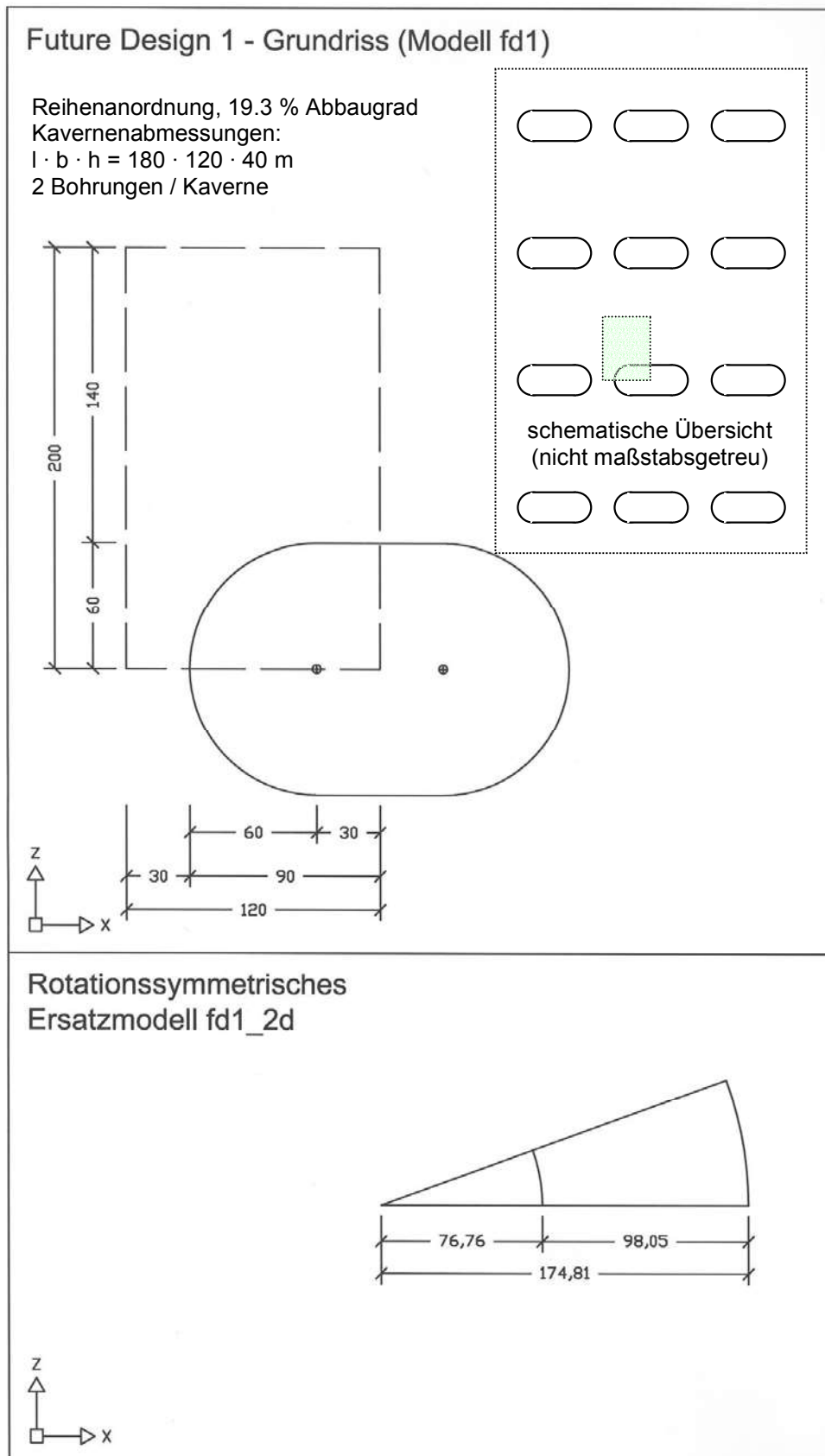


Abbildung 27: Future Design 1 – Grundriss und rotationssymmetrisches Ersatzmodell

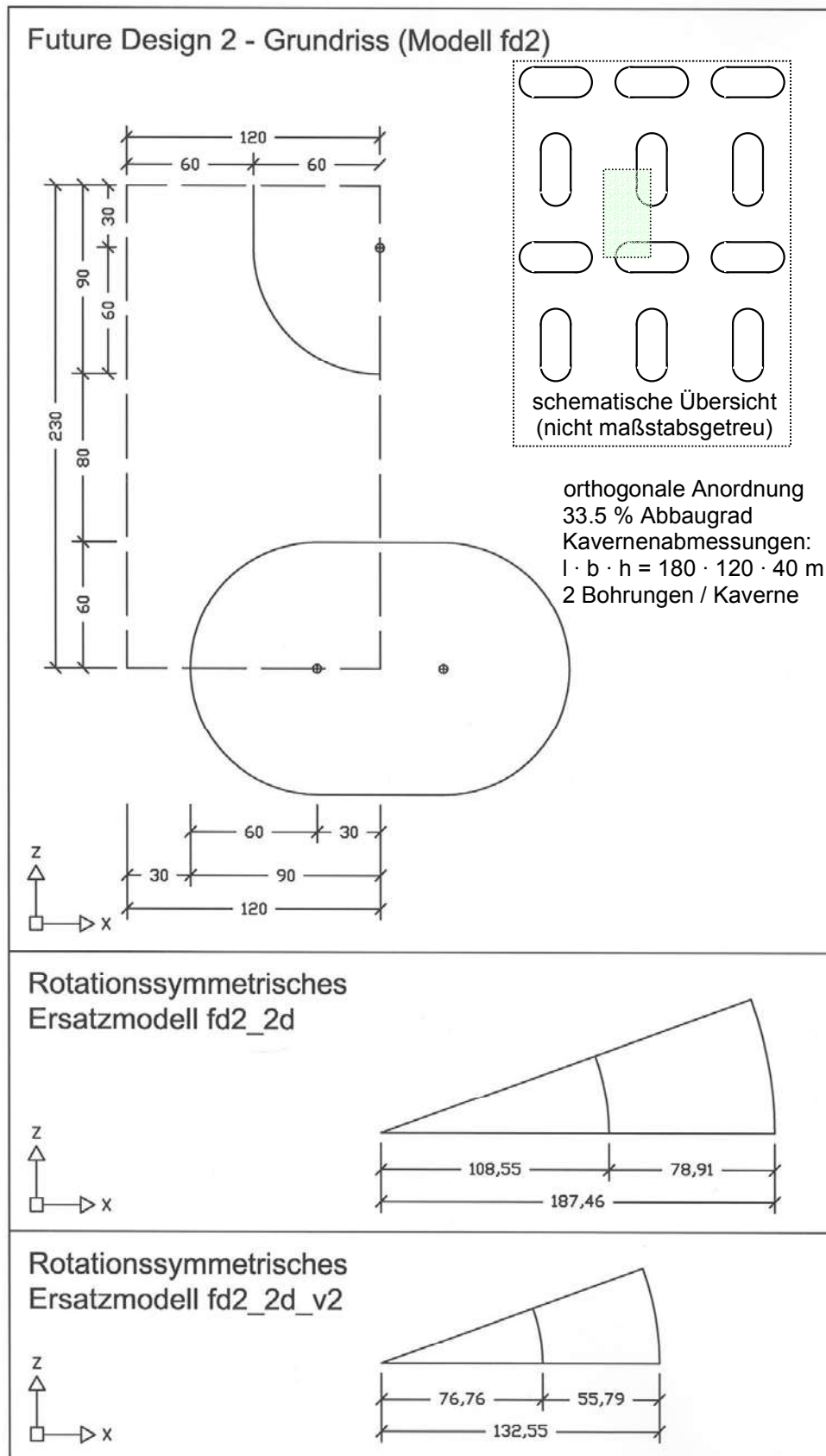


Abbildung 28: Future Design 2 – Grundriss und rotationssymmetrische Ersatzmodelle

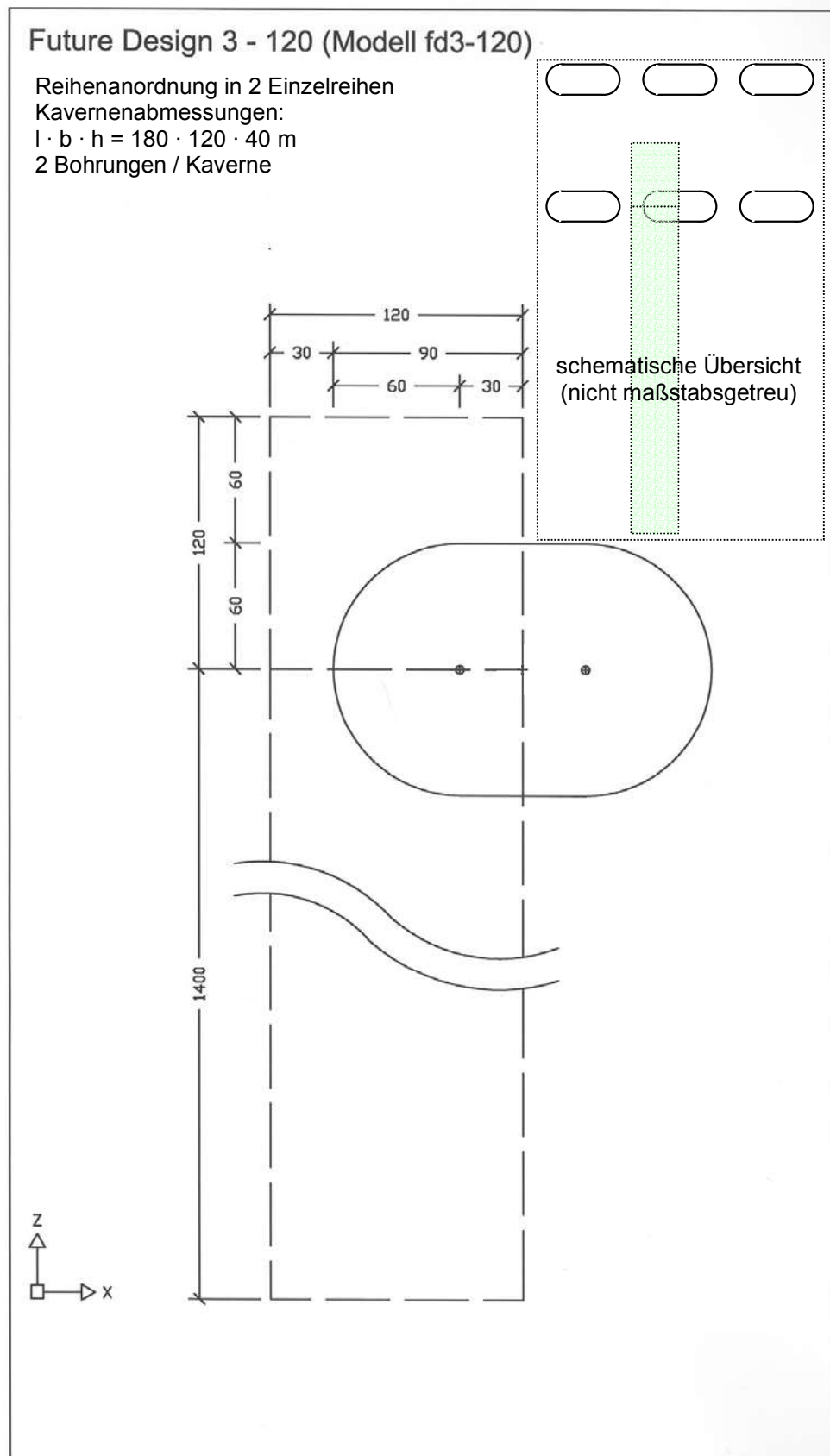


Abbildung 29: Future Design 3-120 – Grundriss

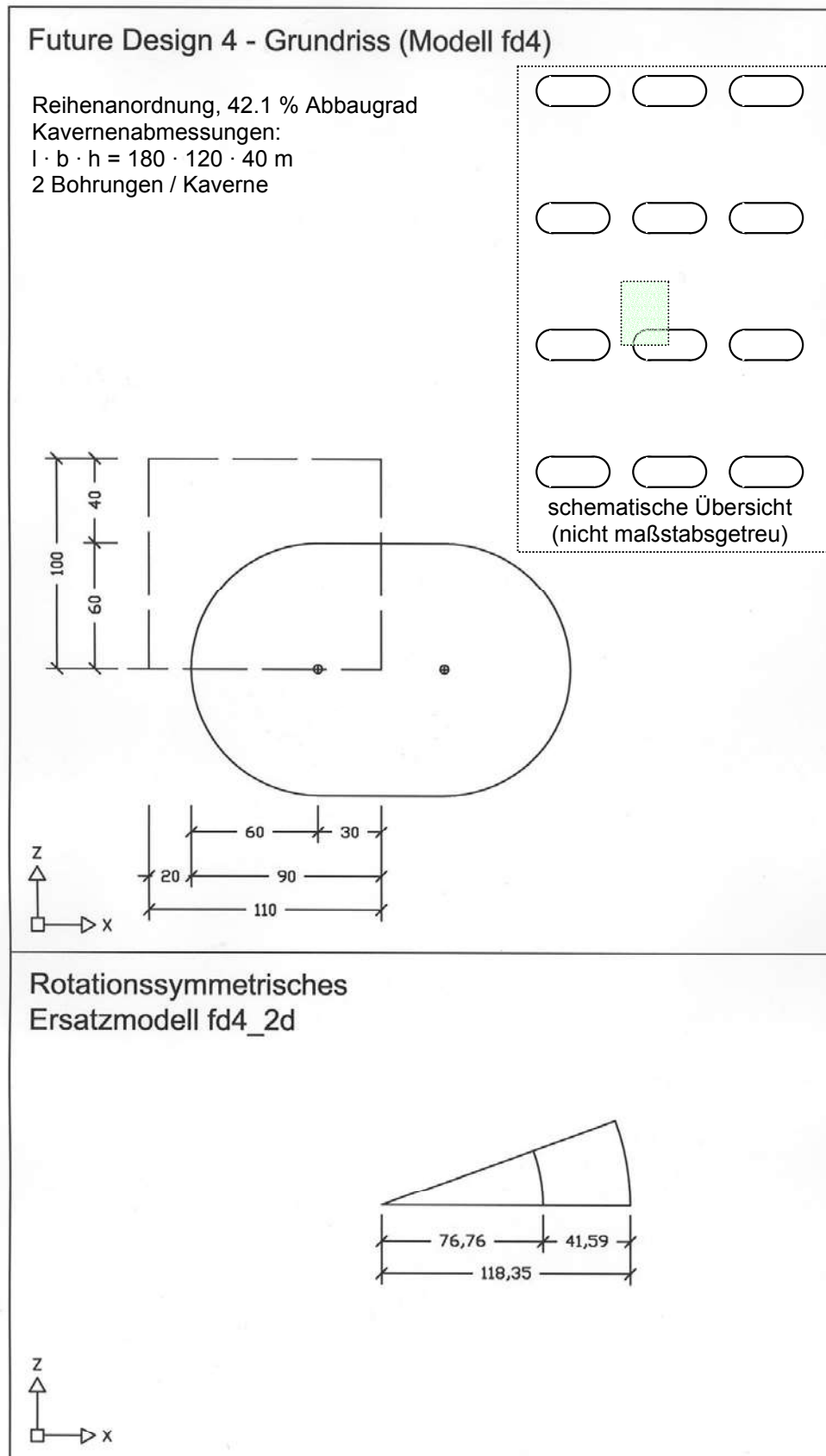


Abbildung 30: Future Design 4– Grundriss

Tabelle 19: Berechnungsmodelle – Arbeitspaket 2

Modell	Kavernen- abmessungen	Charakteristische Fläche			Kaverne	Modellrand	Abbaugrad [%]	Abb.
	l · b · h [m]	Länge _x [m]	Länge _z [m]	Fläche [m²]	Ersatzradius [m]	Ersatzradius [m]		
fd1 Reihe – 3D	180 · 120 · 40	120	200	24000	-	-	19.3	27
fd1_2d Reihe – 2D				24000	76.76	174.81	19.3	27
fd2 orthogonal – 3D		120	230	27600	-	-	33.5	28
fd2_2d orthogonal – 2D				27600	108.55	187.46	33.5	28
fd2_2d_v2 orthogonal – 2D				27600	76.76	132.55	33.5	28
fd3-120 2 Einzelreihen – 3D		120	-	-	-	-	-	29
fd4_2d Reihe – 2D		110	100	11000	76.76	118.35	42.1	30

9.3 Berechnungsfälle

Auf der Grundlage der zuvor definierten Berechnungsmodelle wurden insgesamt 13 Berechnungsfälle definiert und berechnet (Tabelle 20). Die eindeutige Kennzeichnung der einzelnen Fälle geschieht über das Modell (z.B. fd1, fd2) und über die Angabe der Mächtigkeit des Sicherheitsdaches sowie der angesetzten Steifigkeit und Bruchfestigkeit in der direkt im Hangenden über dem Rötsalz anstehenden Deckgebirgsschicht des Oberen Buntsandsteins in folgender Weise:

- Berücksichtigung eines Sicherheitsdaches im Rötsalz:
 - 5 m Mächtigkeit (z.B.: fd1_05)
- Berücksichtigung einer unterschiedlicher Ausbildung der direkt über dem Rötsalz angeordneten 10 m mächtigen Deckgebirgsschicht im Oberen Buntsandstein:
 - Anhydrit ohne Gleitflächen (z.B. fd1_05_c)
 - Anhydrit mit 4 reibungsfreien Gleitflächen (z.B. fd1_05_c1):
 1. Gleitfläche: zwischen Rötsalz und Anhydrit (= Salzspiegel)
 2. Gleitfläche: 2.5 m oberhalb des Salzspiegels
 3. Gleitfläche: 5.0 m oberhalb des Salzspiegels
 4. Gleitfläche: 10.0 m oberhalb des Salzspiegels

Diese Gleitflächen sind in der entsprechenden Teufe über die gesamte Modellbreite und –tiefe angeordnet.

Tabelle 20: Berechnungsfälle – Arbeitspaket 2

Typ	Modell	c (Anhydrit)	c1 (Anhydrit mit 4 Gleitflächen)	Kavernenabmessungen l · b · h [m]
Reihe - 3D	fd1_05	x	x	180 · 120 · 40
Reihe - 2D	fd1_2d_05	x	x	
orthogonal - 3D	fd2_05	x	x	
orthogonal - 2D	fd2_2d_05	x	x	
orthogonal - 2D	fd2_2d_v2_05	x	x	
2 Reihen - 3D	fd3-120_05	(x)	(x)	
Reihe - 2D	fd4_2d_05	x	-	

Legende:

- x: Berechnungen erfolgreich, Ergebnisse sind im Bericht dargestellt.
(x): Berechnungen zeichnen sich durch numerische Instabilitäten während der FE-Berechnung aus. Dadurch werden die Berechnungsergebnisse zu einem gewissen nicht näher quantifizierbaren Grad verfälscht, so dass auf eine Darstellung dieser Ergebnisse verzichtet werden musste.
- Berechnung wurde nicht durchgeführt.

In den c1-Berechnungsfällen wird geklüfteter Anhydrit direkt über dem Rötssalz angenommen, um geologische Anomalien im überlagernden Deckgebirge zu simulieren. Auch BEKENDAM (2002) wählte eine Simulation von Gleitflächen in einigen FE-Berechnungen, um ungünstige Verhältnisse im Deckgebirge abzubilden. Er setzte allerdings bestimmte Scherparameter und Zugfestigkeiten in den Gleitflächen voraus. In den c1-Varianten dieser Studie wurde jedoch eine reibungsfreie Kopplung der angrenzenden 2D-Elemente gewählt. Somit ist die hier angesetzte Simulation der Gleitflächen bzgl. des Gesamttragverhaltens konservativer zu bewerten.

9.4 Ergebnisse

9.4.1 Senkungen und Senkungsraten

In den Tabellen 21 bis 26 sind die Senkungen und Senkungsraten an der Geländeoberfläche zu charakteristischen Zeitpunkten (40, 100 und 500 Jahre) zusammengestellt. Die Berechnungsergebnisse für den Berechnungsfall fd2_05_c1 sind ab dem Berechnungszeitpunkt 40 Jahre mit leichten, durch geringe numerische Instabilität verursachte Fehler behaftet. Deshalb sind die entsprechenden Werte für diesen Berechnungsfall in den Tabellen kursiv dargestellt (weitere Erläuterungen dazu weiter unten im Text).

Nach 40 Jahren ergeben sich für die 3D-Berechnungsfälle fd1_05_c und fd2_05_c Senkungen von 4.39 und 9.37 cm (Tabelle 21). Im Vergleich dazu ergeben sich für die Berechnungsfälle mit Gleitflächen (c1-Berechnungsfälle) bis um Faktor 2 erhöhte Senkungen. Die Ergebnisse für die zweidimensionalen Berechnungsfälle weisen im Vergleich zu den Ergebnissen der 3D-Varianten nur geringe Abweichungen auf. Für einen hohen Abbaugrad in Reihenanordnung (fd4_2d_05_c) wird eine erheblich größere Gelände-senkung von 21.12 cm berechnet.

Die Senkungsraten werden zu 0.26 mm/Jahr für den Berechnungsfall fd1_05_c und zu 0.81 mm/Jahr für den Berechnungsfall fd2_05_c nach 40 Jahren berechnet. Im Vergleich dazu ergeben sich für die Berechnungsfälle mit Gleitflächen (c1-Berechnungsfälle) bis um Faktor 4 erhöhte Senkungs-

raten. Für den Berechnungsfall fd4_2d_05_c ergibt sich eine Senkungsrate von 3.908 mm/Jahr.

Zu späteren Berechnungszeitpunkten (insbesondere nach 500 Jahren, Tabelle 25) werden durchgängig größere Senkungsbeträge der Geländeoberfläche für die 2D-Berechnungsfälle berechnet als für die 3D-Berechnungsfälle (bis zu einem Faktor von ca. 2.5). Die Senkungen betragen für den Berechnungsfall fd1_05_c 8.03 cm und für den Berechnungsfall fd2_05_c 26.58 cm. Bei den Senkungsraten treten sogar noch größere Unterschiede auf (Tabelle 26, bis zu einem Faktor von ca. 4). Für die Berechnungsfälle fd1_05_c und fd2_05_c ergeben sich Senkungsraten von 0.039 bzw. 0.235 mm/Jahr. Für den Berechnungsfall fd4_2d_05_c ergibt sich nach 500 Jahren eine Geländesenkung von 200.67 cm sowie eine Senkungsrate von 3.903 mm/Jahr.

Tabelle 21: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 40 Jahren Standzeit (c: ohne Gleitflächen, c1: mit Gleitflächen)

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	c	c1
Reihe	fd1_05	19.3	4.39	6.59
	fd1_2d_05		4.05	6.14
orthogonal	fd2_05	33.5	9.37	17.71
	fd2_2d_05		10.70	19.08
	fd2_2d_v2_05		9.38	19.85
Reihe	fd4_2d_05	42.1	21.12	-

Tabelle 22: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 40 Jahren Standzeit (c: ohne Gleitflächen, c1: mit Gleitflächen)

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	c	c1
Reihe	fd1_05	19.3	0.261	0.510
	fd1_2d_05		0.241	0.521
orthogonal	fd2_05	33.5	0.806	2.333
	fd2_2d_05		0.628	2.433
	fd2_2d_v2_05		1.009	3.497
Reihe	fd4_2d_05	42.1	3.908	-

Tabelle 23: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 100 Jahren Standzeit (c: ohne Gleitflächen, c1: mit Gleitflächen)

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	c	c1
Reihe	fd1_05	19.3	5.48	8.83
	fd1_2d_05		5.11	8.75
orthogonal	fd2_05	33.5	13.22	30.79
	fd2_2d_05		13.80	33.50
	fd2_2d_v2_05		15.30	40.79
Reihe	fd4_2d_05	42.1	44.55	-

Tabelle 24: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 100 Jahren Standzeit
(c: ohne Gleitflächen, c1: mit Gleitflächen)

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	c	c1
Reihe	fd1_05	19.3	0.133	0.297
	fd1_2d_05		0.139	0.390
orthogonal	fd2_05	33.5	0.540	2.019
	fd2_2d_05		0.468	2.395
	fd2_2d_v2_05		0.981	3.487
Reihe	fd4_2d_05	42.1	3.904	-

Tabelle 25: Senkung [cm] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 500 Jahren Standzeit
(c: ohne Gleitflächen, c1: mit Gleitflächen)

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	c	c1
Reihe	fd1_05	19.3	8.03	15.36
	fd1_2d_05		8.53	23.01
orthogonal	fd2_05	33.5	26.58	82.58
	fd2_2d_05		31.78	129.23
	fd2_2d_v2_05		54.48	180.21
Reihe	fd4_2d_05	42.1	200.67	-

Tabelle 26: Senkungsrate [mm/Jahr] über dem Kavernenzentrum an der Geländeoberfläche nach 500 Jahren Standzeit
(c: ohne Gleitflächen, c1: mit Gleitflächen)

Typ	Modell	Abbaugrad [%]	c	c1
Reihe	fd1_05	19.3	0.039	0.117
	fd1_2d_05		0.067	0.351
orthogonal	fd2_05	33.5	0.235	0.878
	fd2_2d_05		0.448	2.393
	fd2_2d_v2_05		0.979	3.485
Reihe	fd4_2d_05	42.1	3.903	-

Die in den vorstehenden Tabellen zusammengestellten Senkungen und Senkungsrate sind in den folgenden Abbildungen 31 bis 34 als Funktion der Zeit graphisch dargestellt. Während die Senkungsrate für die 2D-Berechnungsfälle nach gewisser Zeit quasi stationär werden, nimmt die Senkungsrate bei den 3D-Berechnungsfällen weiter stetig ab. So ergeben sich für die Senkungen und Senkungsrate aus 2D- und 3D-Berechnungen kein einheitlicher Trend über den gesamten Berechnungszeitraum. D. h., die berechneten Senkungen bzw. Senkungsrate der 3D-Berechnungen können zunächst größer sein als die der 2D-Berechnungen. Zu späten Zeitpunkten ergeben sich jedoch in der Regel für die 3D-Berechnungen kleinere Werte als für die 2D-Berechnungen.

Der unstetige Verlauf der Senkungsrate des Berechnungsfalles fd2_05_c1 in Abbildung 34 ist durch eine zeitweilige numerische Instabilität während der FE-Berechnung bedingt, so dass die Werte für Senkungen und Senkungsrate dieses Berechnungsfalles ab einem bestimmten Zeitpunkt mit Fehlern behaftet sind. Auf die komplette Streichung dieses Berechnungsfalles wird jedoch aus der guten Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse bis zum Zeitpunkt 40 Jahre verzichtet.

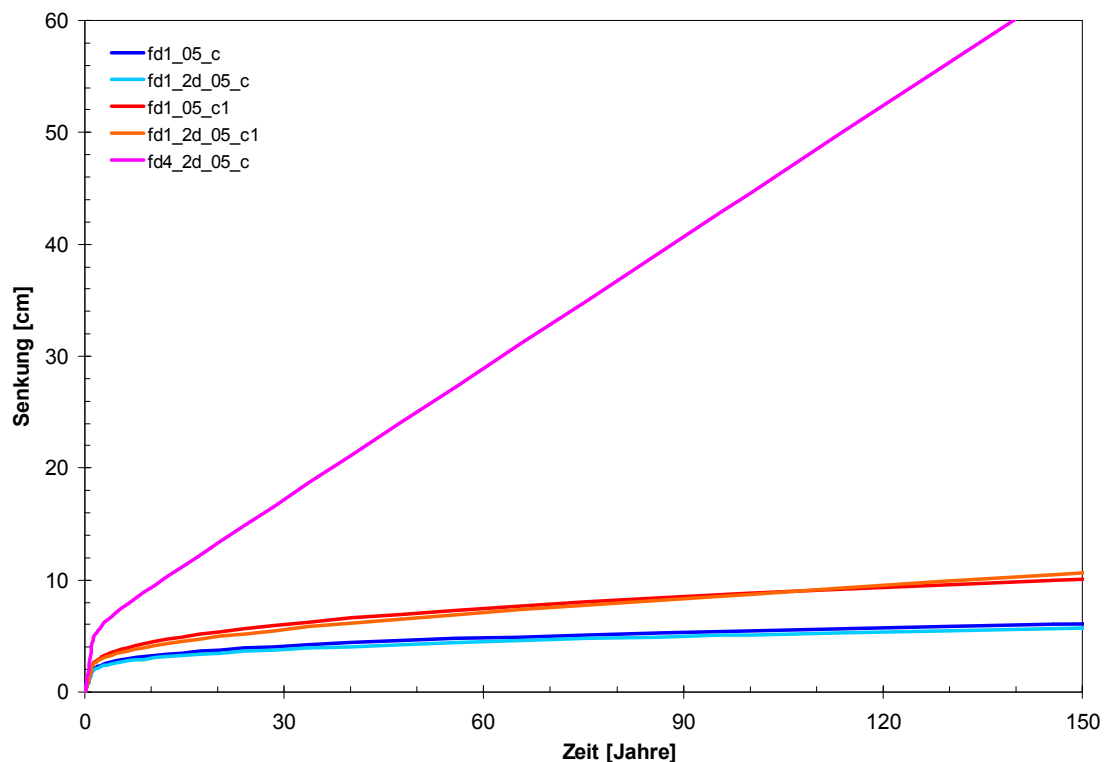


Abbildung 31: Zeitliche Entwicklung der Senkung [cm]
(Reihenmodelle fd1 und fd4)

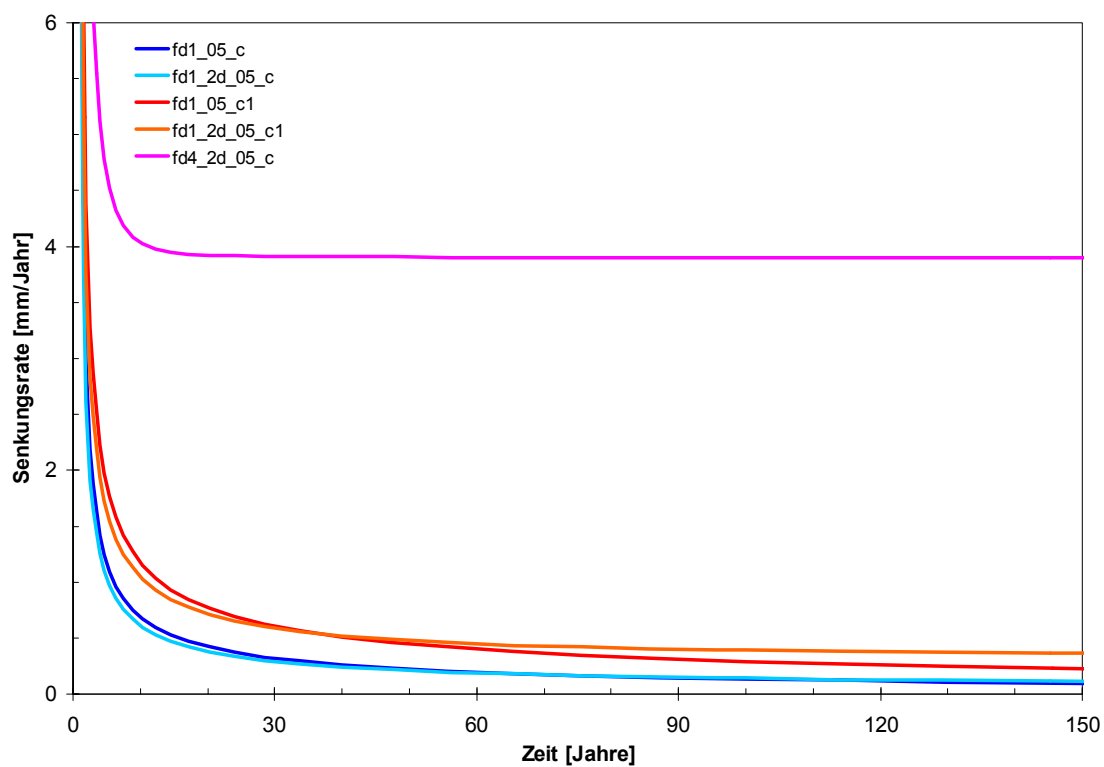


Abbildung 32: Zeitliche Entwicklung der Senkungsrate [mm/Jahr]
(Reihenmodelle fd1 und fd4)

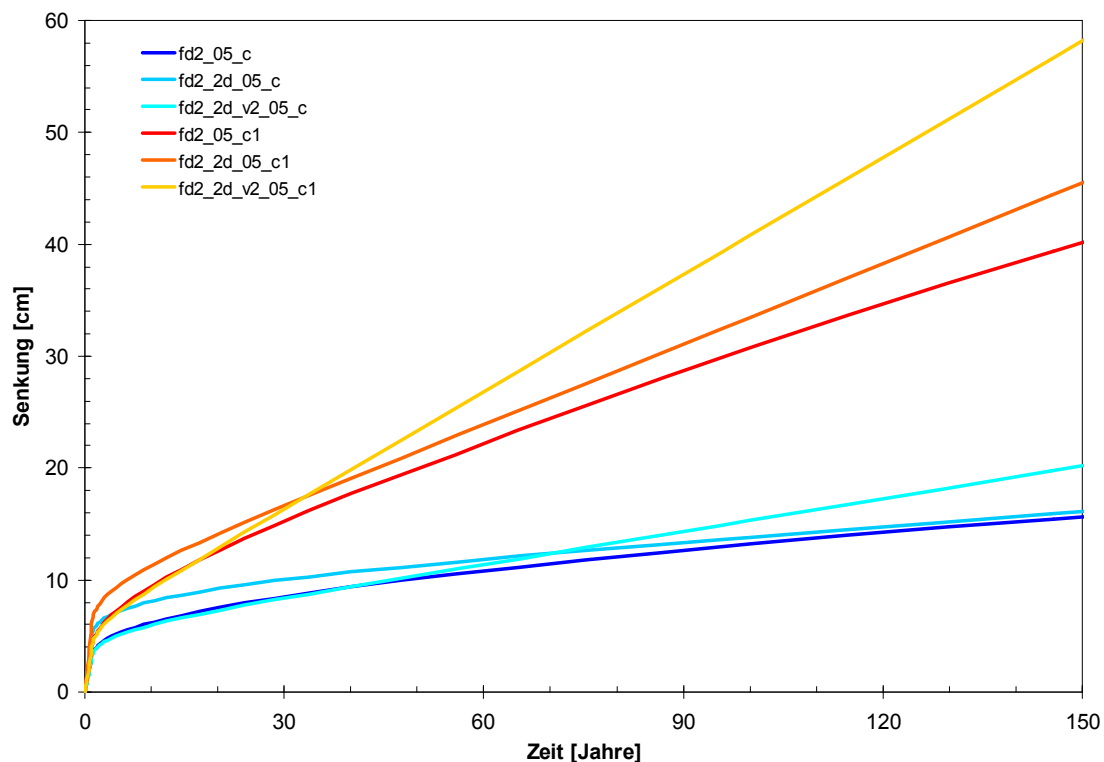


Abbildung 33: Zeitliche Entwicklung der Senkung [cm]
(orthogonale Modelle fd2)

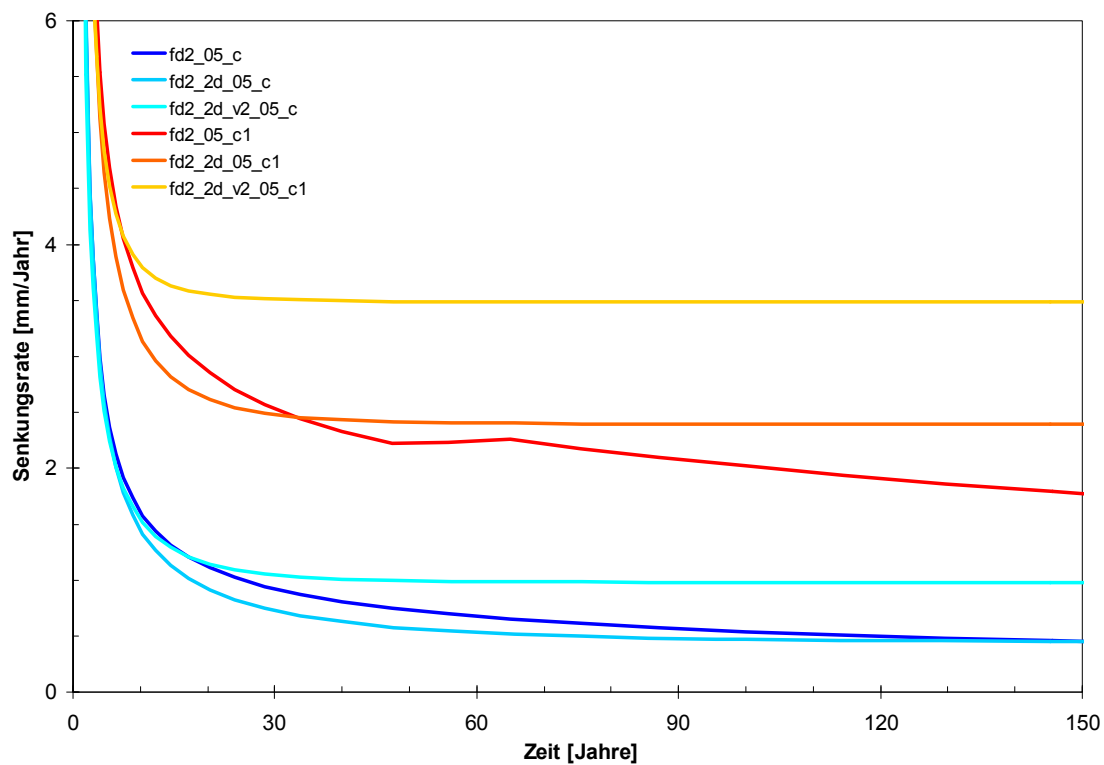


Abbildung 34: Zeitliche Entwicklung der Senkungsrate [mm/Jahr]
(orthogonale Modelle fd2)

9.4.2 Exemplarische Darstellung der Verformung der Kavernenkontur

In den Abbildungen 35 und 36 ist die verformte Struktur zweier Berechnungsfälle mit und ohne Gleitflächen zum Zeitpunkt 40 Jahre in 20-facher Überhöhung dargestellt. In Abbildung 35 (Berechnungsfall fd1_2d_05_c) wird die gleichmäßige Konvergenz der Kaverne deutlich, während in Abbildung 36 sehr schön die gleitende Bewegung des Salzes am Salzspiegel durch den Versatz der verformten Anhydrit- und Rötsalzelemente hervortritt. Dadurch entstehen im oberen Kavernenbereich eine erhöhte laterale Kavernenkonvergenz sowie eine erhöhte Absenkung des Kavernendaches. Auch ein Gleiten zwischen der oberen Anhydritschicht in 7.5 bis 10 m Entfernung vom Salzspiegel und dem darüber liegenden Tonstein ist erkennbar.

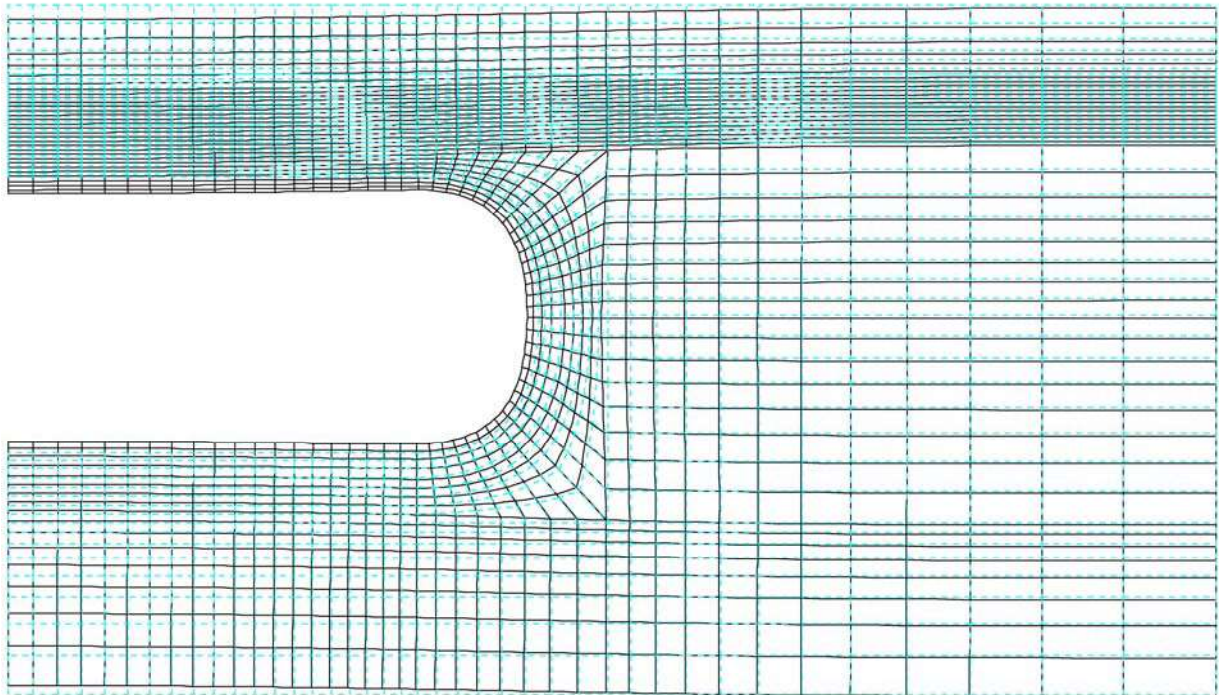


Abbildung 35: Verformte Struktur (Ausschnitt) nach 40 Jahren Standzeit, fd1_2d_05_c (ohne Gleitflächen, Verschiebungen 20-fach überhöht)

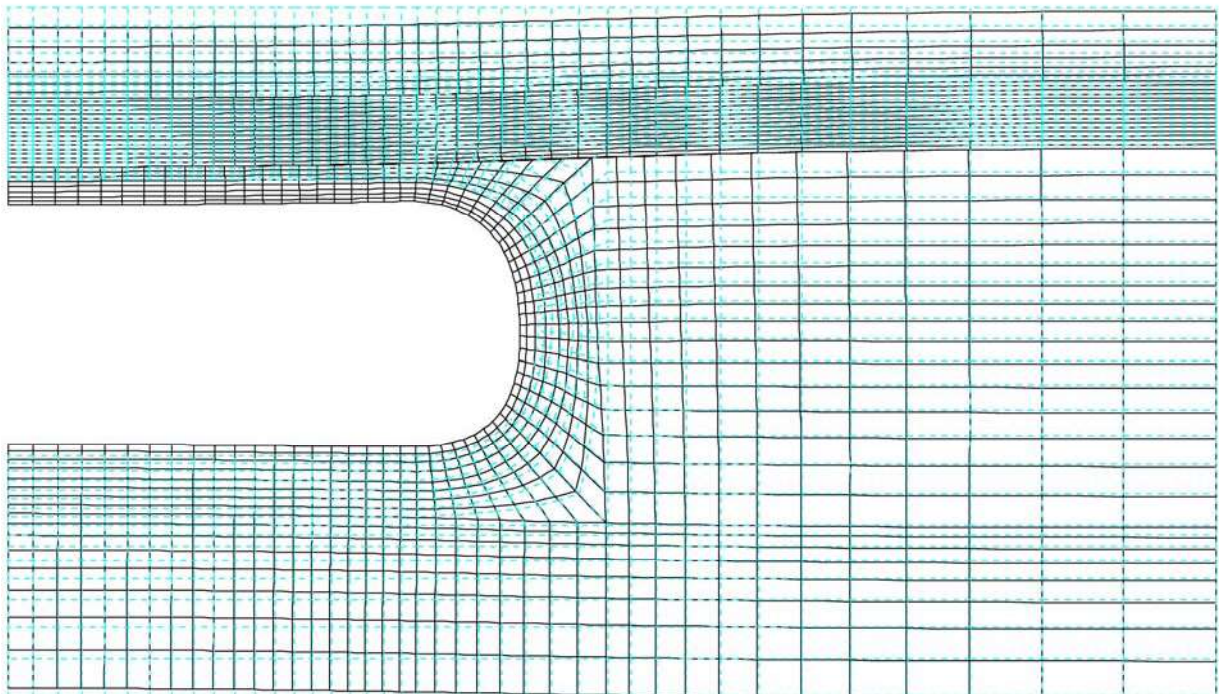


Abbildung 36: Verformte Struktur (Ausschnitt) nach 40 Jahren Standzeit, fd1_2d_05_c1 (mit Gleitflächen, Verschiebungen 20-fach überhöht)

9.4.3 Exemplarische Darstellung der Effektivverzerrungen

Die Effektivverzerrungen werden exemplarisch für die Berechnungsfälle fd1_2d_05_c und fd1_05_c dargestellt. Für den 2D-Fall fd1_2d_05_c ergeben sich nach 40 Jahren (Abbildung 37) in weiten Bereichen kleine Effektivverzerrungen unter 5‰. Nur in den Stößen der Kavernen ergeben sich etwas erhöhte Effektivverzerrungen bis 7.3‰. Nach 100 Jahren (Abbildung 38) ergeben sich insgesamt größere Effektivverzerrungen. Die Maximalwerte im Kavernenstoß liegen dann bei 9.7‰.

Für den 3D-Berechnungsfall ergeben sich im Kavernenstoß ebenfalls die höchsten Effektivverzerrungen. Die Maximalwerte betragen nach 40 Jahren 11.6‰ und nach 100 Jahren 15.1‰. Sie erreichen damit Werte, die sogar über den Werten für das 2D-Ersatzmodell fd1_2d_05_c liegen.

In Abbildung 41 ist die zeitliche Entwicklung der Effektivverzerrungen über dem äußeren Kavernenrandbereich nahe des Salzspiegels für verschiedene Punkte dargestellt (Berechnungsfall fd1_05_c). Die Verzerrungen verbleiben auch nach 1000 Jahren unter 10‰.

Insgesamt treten also geringe Effektivverzerrungen auf, die in keiner Weise die Standfestigkeit beeinträchtigen.

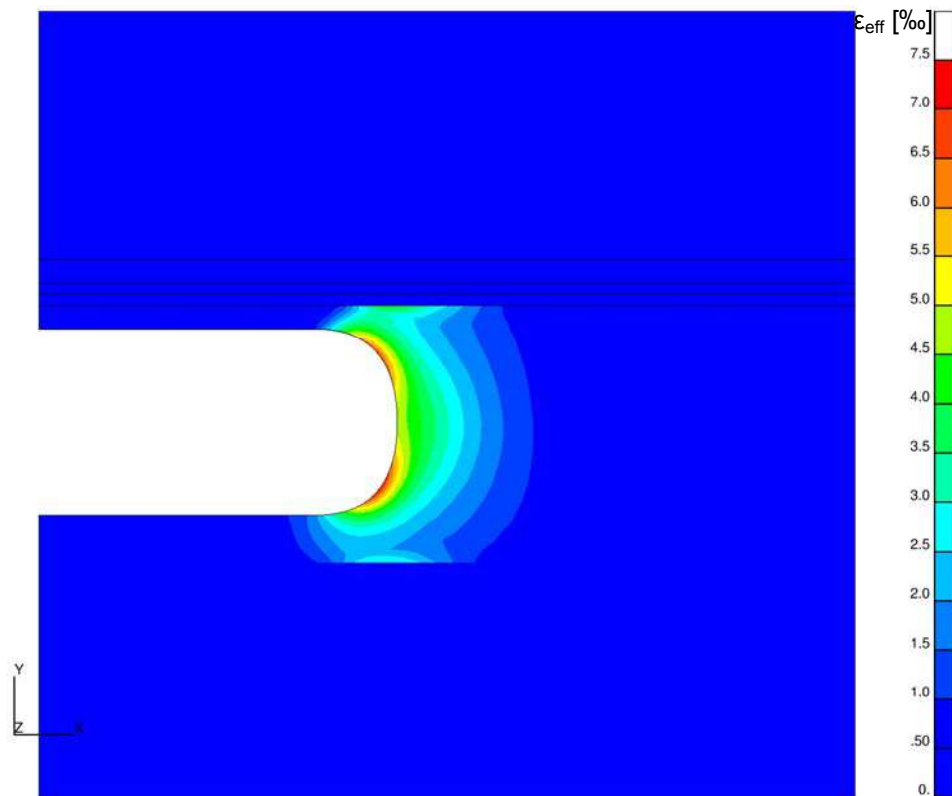


Abbildung 37: Räumliche Verteilung der Effektivverzerrungen [%] nach 40 Jahren Standzeit (Berechnungsfall fd1_2d_05_c)

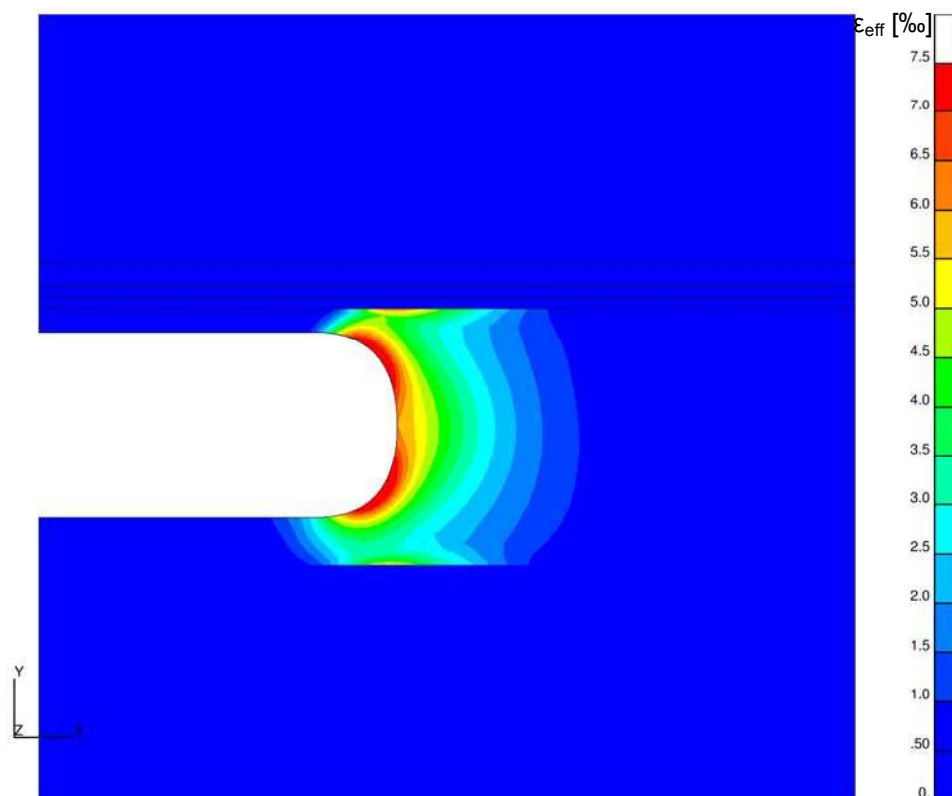


Abbildung 38: Räumliche Verteilung der Effektivverzerrungen [%] nach 100 Jahren Standzeit (Berechnungsfall fd1_2d_05_c)

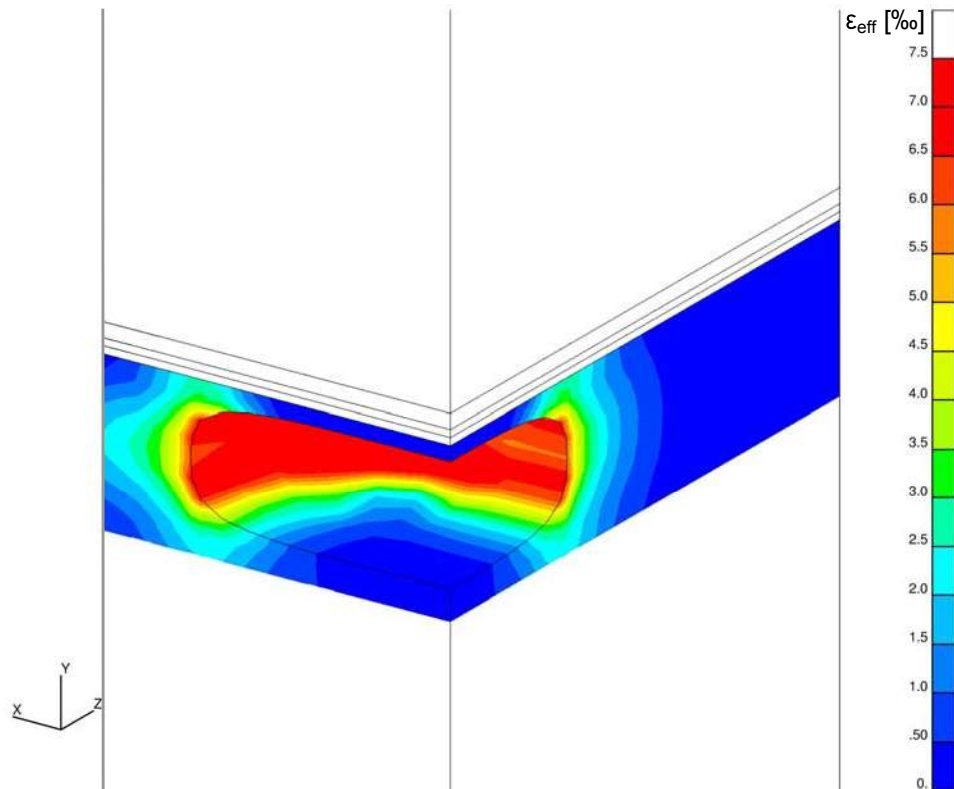


Abbildung 39: Räumliche Verteilung der Effektivverzerrungen [%] nach 40 Jahren Standzeit (Berechnungsfall fd1_05_c)

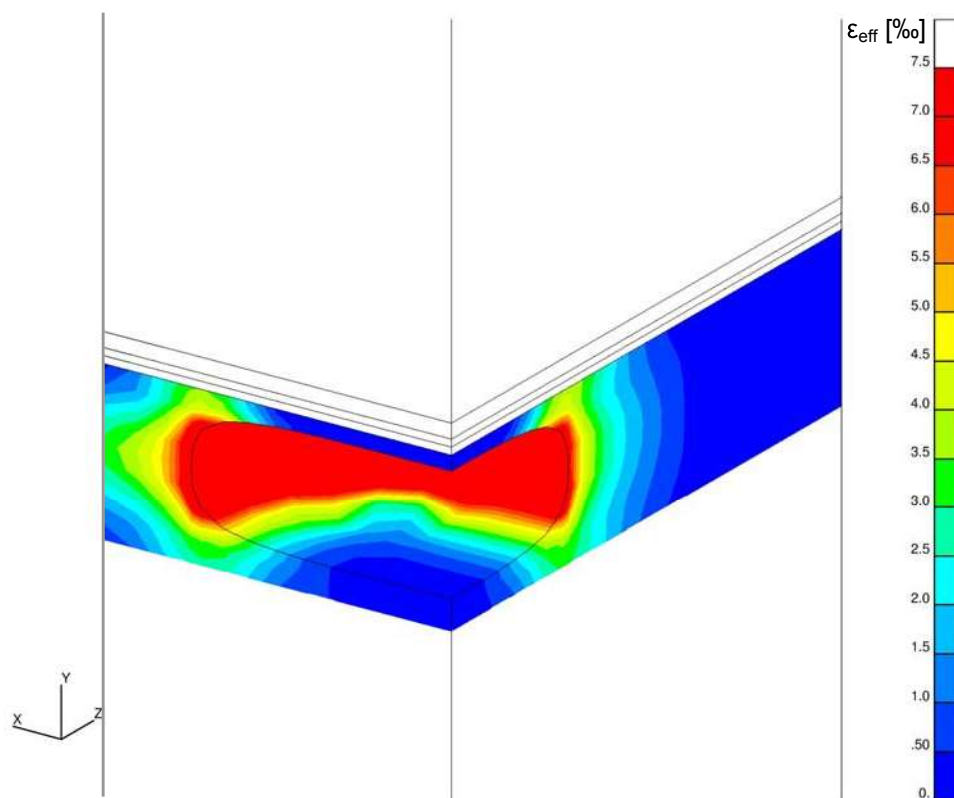


Abbildung 40: Räumliche Verteilung der Effektivverzerrungen [%] nach 100 Jahren Standzeit (Berechnungsfall fd1_05_c)

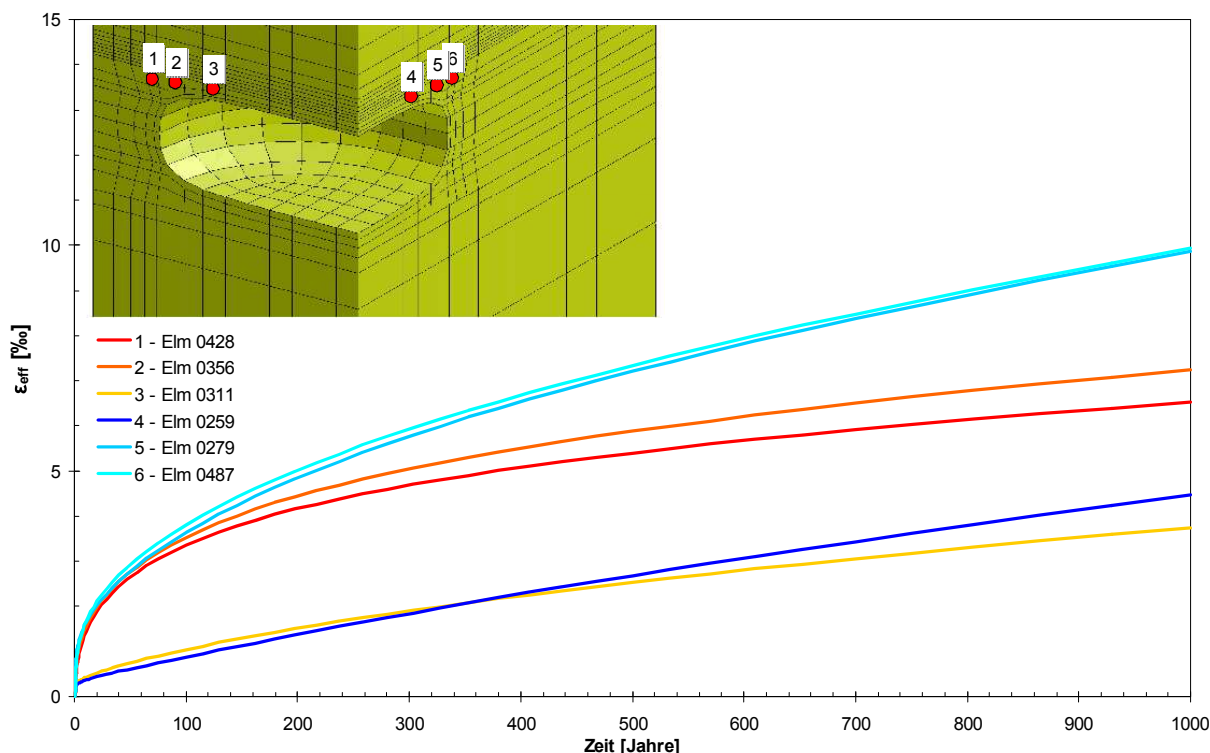


Abbildung 41: Zeitliche Entwicklung der Effektivverzerrungen im äußeren Kavernendachbereich (oben), Vergleich verschiedener Auswertelokationen (fd1_05_c)

9.4.4 Exemplarische Darstellung des Lodeparameters

Die räumliche Verteilung des Lodeparameters nach 40 Jahren Standzeit ist in Abbildung 42 für das 2D-Berechnungsmodell fd1_2d_05_c dargestellt. Insbesondere im mittleren Dach- und Bodenbereich wie auch im Stoßbereich der Kaverne herrschen im Rötssalz Extensionsspannungszustände vor. Weiter außen herrschen Spannungszustände vor, die zwischen Torsion und Kompression liegen. Im Deckgebirge herrschen Spannungszustände vor, die auf Grund des anisotropen Anfangsspannungszustandes hauptsächlich durch Kompression gekennzeichnet sind. Lediglich an der Oberkante des Anhydrits werden über der Kaverne Extensionsspannungszustände ausgewiesen. Nach 100 Jahren weiten sich die eher extensionsbeanspruchten Bereiche aus und führen gleichzeitig zu einer Einschnürung der eher kompressionsbeanspruchten Bereiche direkt neben der Kaverne (Abbildung 43).

Für den 3D-Fall sind nach 40 Jahren ähnliche Verteilungen des Lodeparameters wie für den 2D-Fall zu erkennen (Abbildung 44). Auch nach 100 Jahren ergeben sich seitlich der Kaverne Änderungen des Lodeparameters in Richtung Extension (Abbildung 45). Die Extensionsspannungszustände im Anhydrit sind nicht über dem Kavernenzentrum angeordnet, sondern liegen weiter außen über der Kaverne.

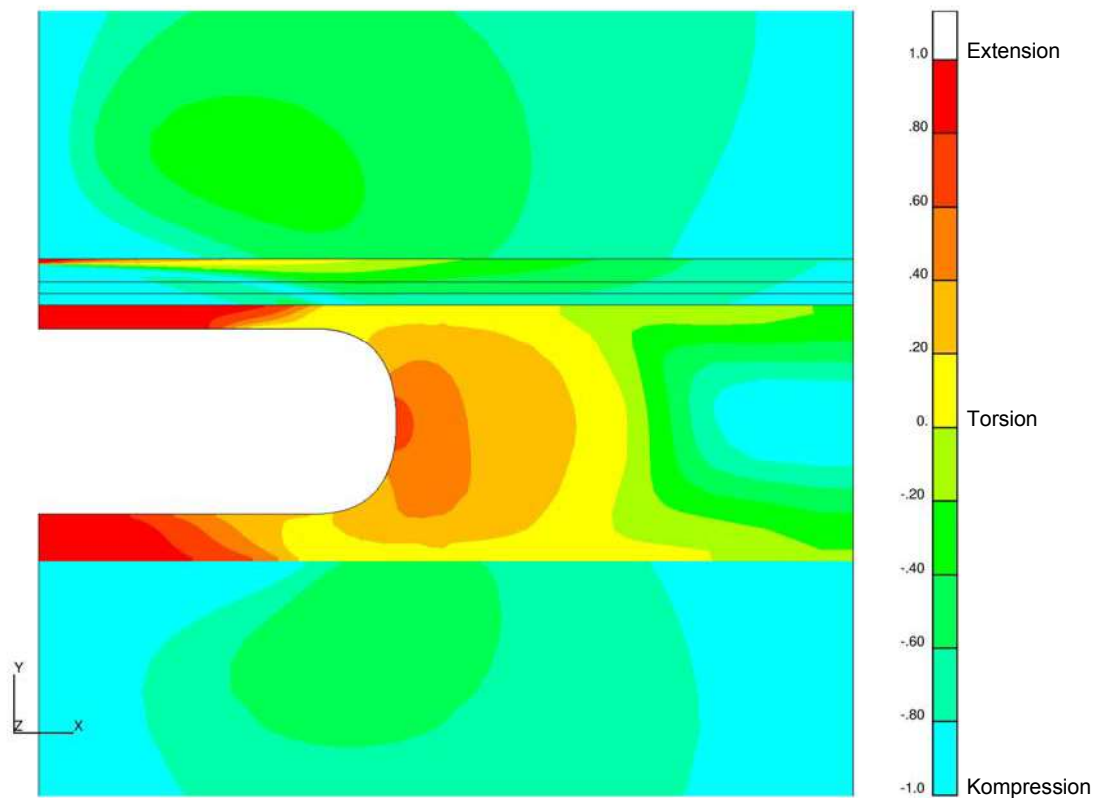


Abbildung 42: Räumliche Verteilung des Lodeparameters [-] nach 40 Jahren
Standzeit (Berechnungsfall fd1_2d_05_c)

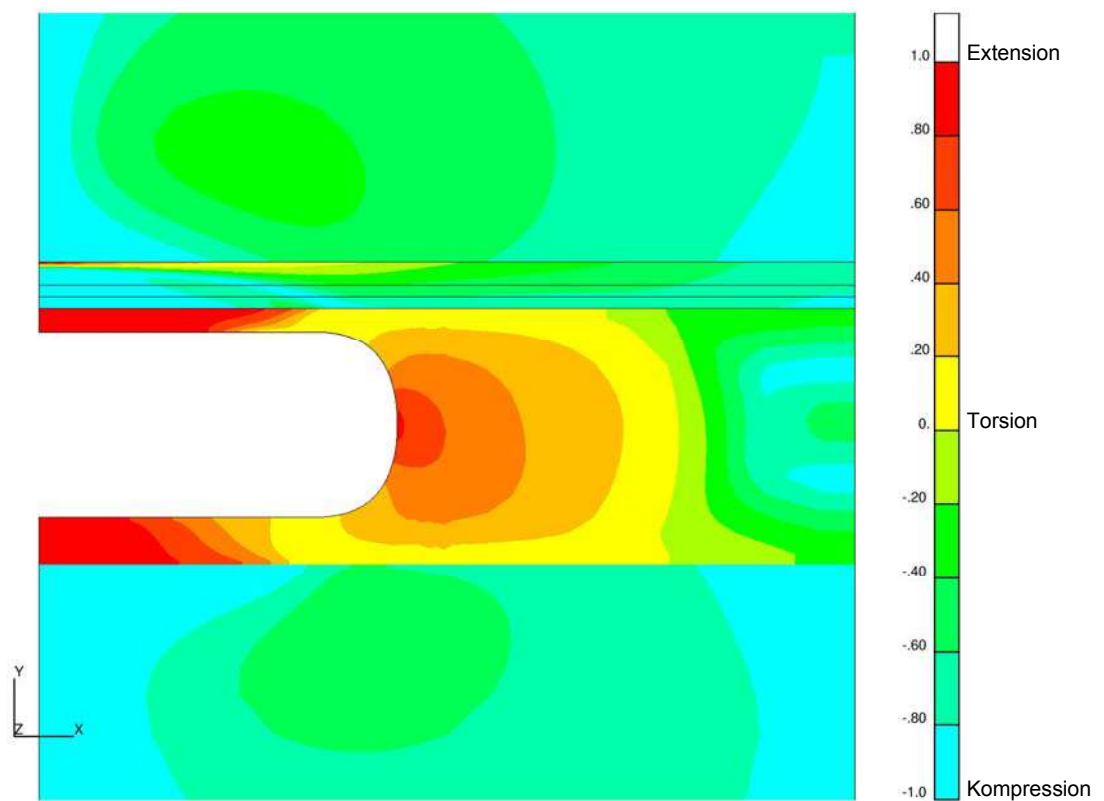


Abbildung 43: Räumliche Verteilung des Lodeparameters [-] nach 100 Jahren
Standzeit (Berechnungsfall fd1_2d_05_c)

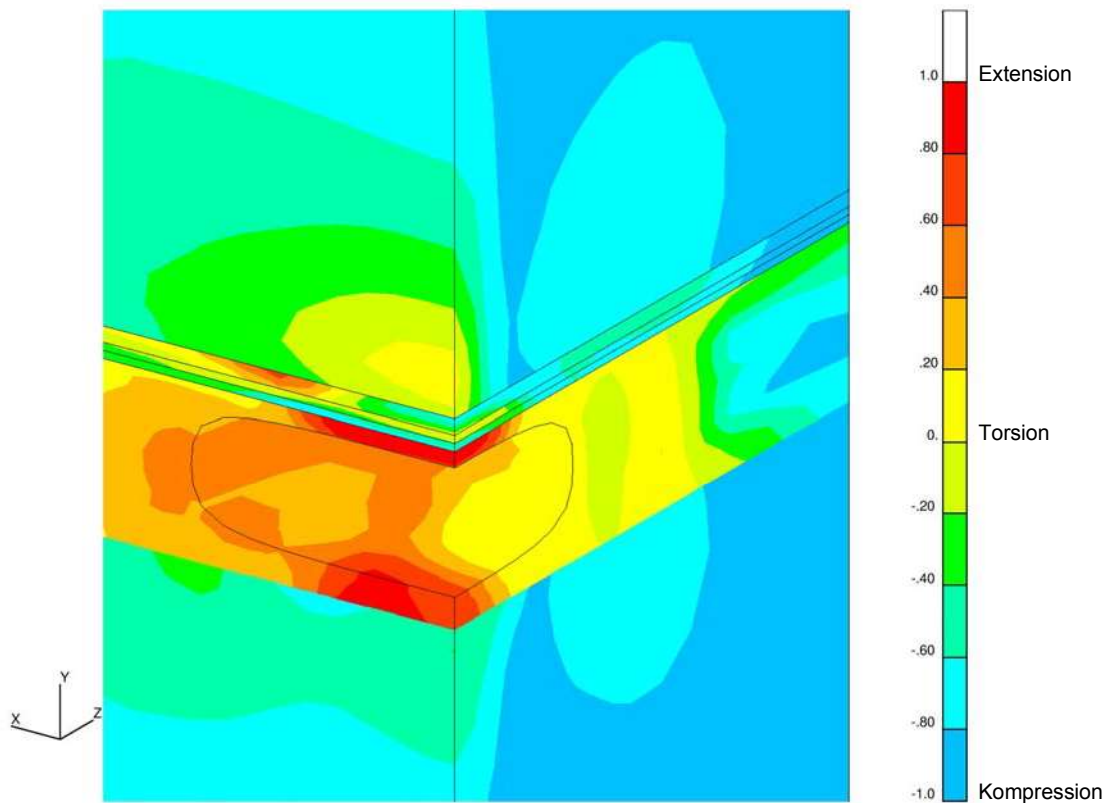


Abbildung 44: Räumliche Verteilung des Lodeparameters [-] nach 40 Jahren
Standzeit (Berechnungsfall fd1_05_c)

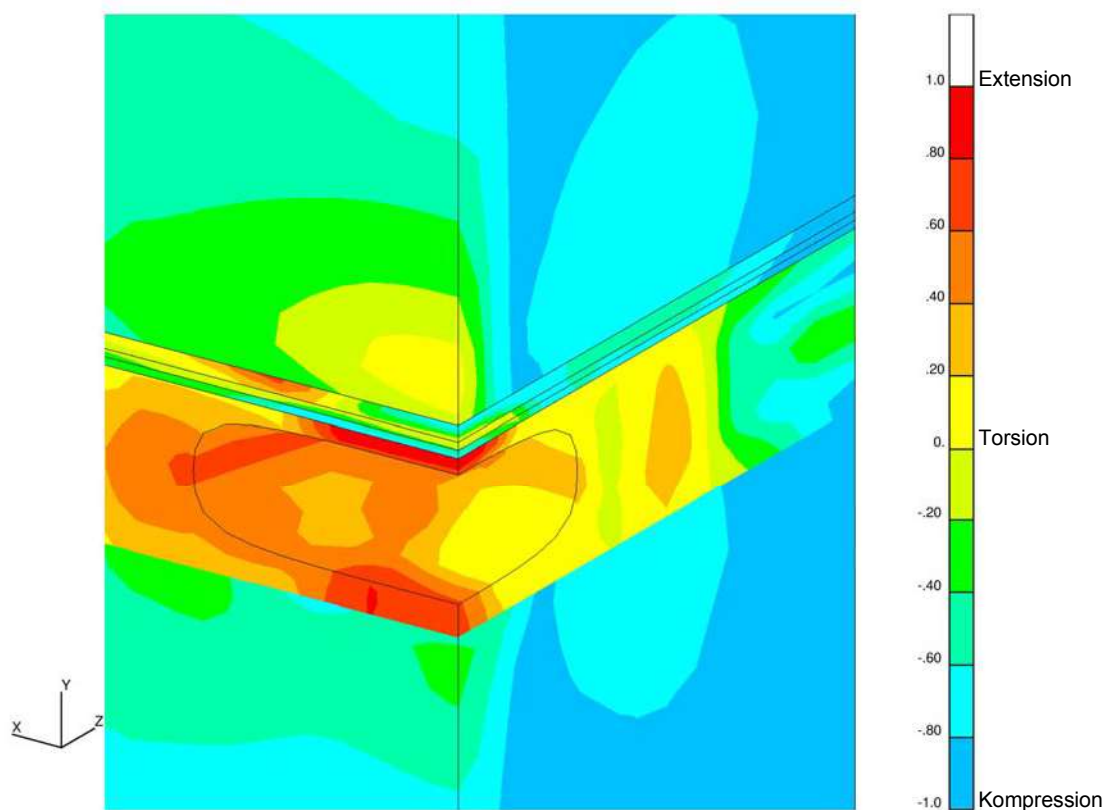


Abbildung 45: Räumliche Verteilung des Lodeparameters [-] nach 100 Jahren
Standzeit (Berechnungsfall fd1_05_c)

9.4.5 Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Rötssalz

In Abbildung 46 sind oberhalb des Kavernenrandes Spannungspfade im Rötssalz für den Berechnungsfall fd1_2d_05_c aufgetragen. Alle Spannungspfade liegen deutlich unterhalb der Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998), so dass mechanisch bedingte Auflockerungen nicht zu erwarten sind. Die Spannungspfade der ersten drei Punkte weisen näherungsweise gleich große Abstände zur Dilatanzgrenze auf, während die weiter im Pfeilerbereich liegenden Punkte größere Abstände zur Dilatanzgrenze aufweisen.

Die in Abbildung 47 dargestellten Spannungspfade des 3D-Berechnungsfalles fd1_05_c haben ähnliche Gestalt und Abstände zu der Dilatanzgrenze wie die Spannungspfade des zuvor dargestellten 2D-Berechnungsfalles fd1_2d_05_c. Somit können auch hier mechanisch bedingte Auflockerungen ausgeschlossen werden.

Abbildung 48 zeigt Spannungspfade im Rötssalz im Übergang zum Anhydrit (dünne Kurven) sowie im Pfeilerbereich auf halber Kavernenhöhe (dicke Kurven) für den Berechnungsfall fd4_2d_05_c. Sämtliche Spannungspfade bleiben trotz unterschiedler Verläufe im unkritischen kompressiblen Spannungsbereich unterhalb der Dilatanzgrenze.

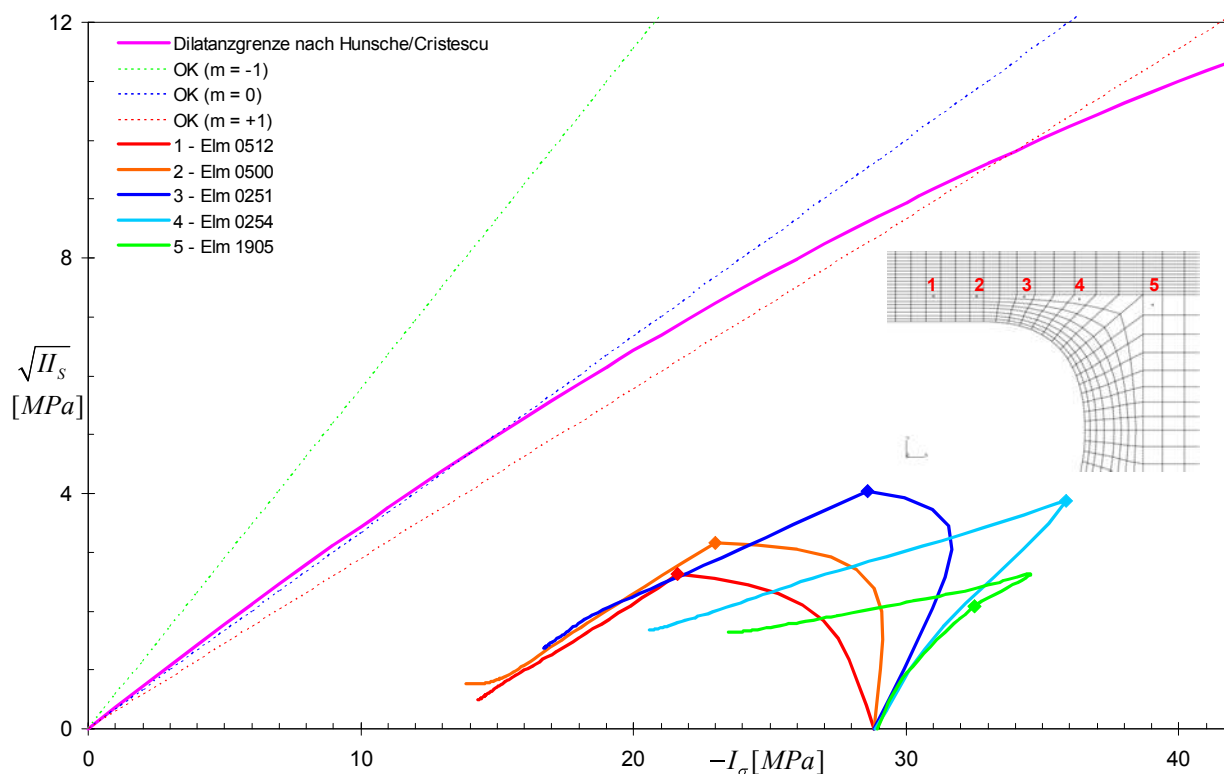


Abbildung 46: Spannungspfade im äußeren Kavernendachbereich (oben), Vergleich verschiedener Auswertelokationen (fd1_2d_05_c)

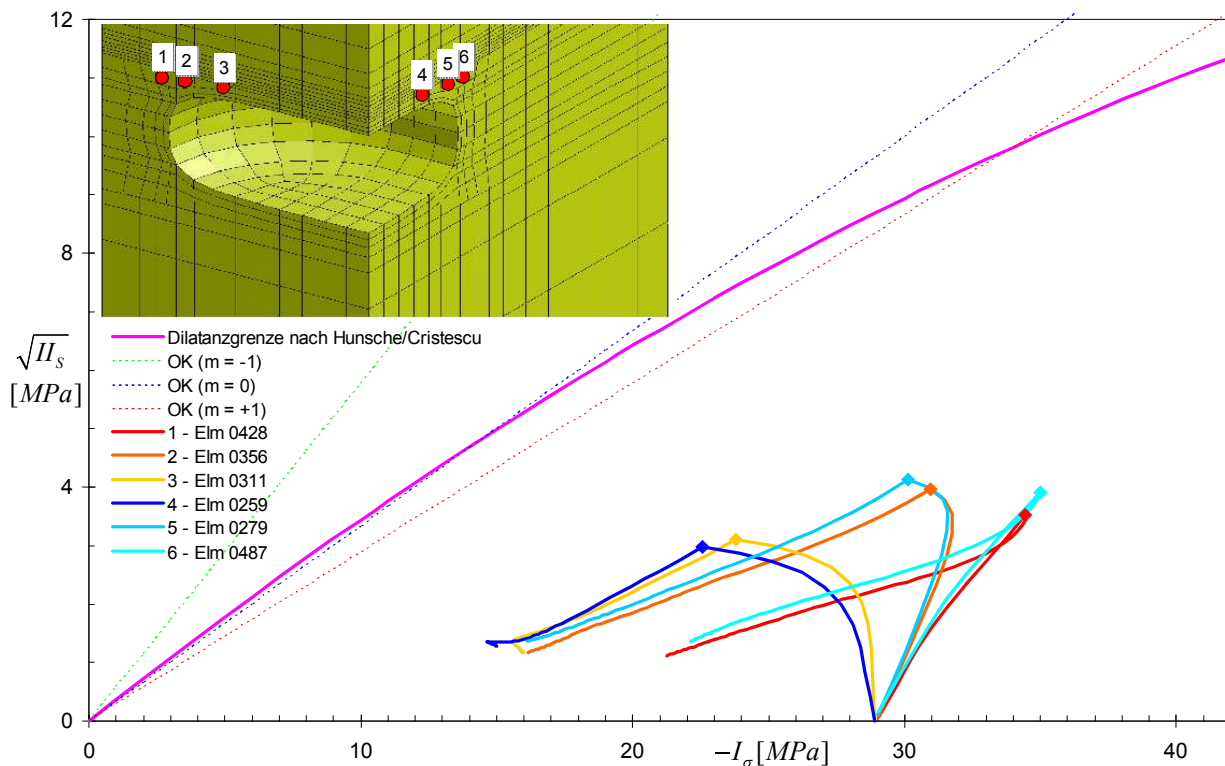


Abbildung 47: Spannungspfade im äußeren Kavernendachbereich (oben), Vergleich verschiedener Auswertelokationen (fd1_05_c)

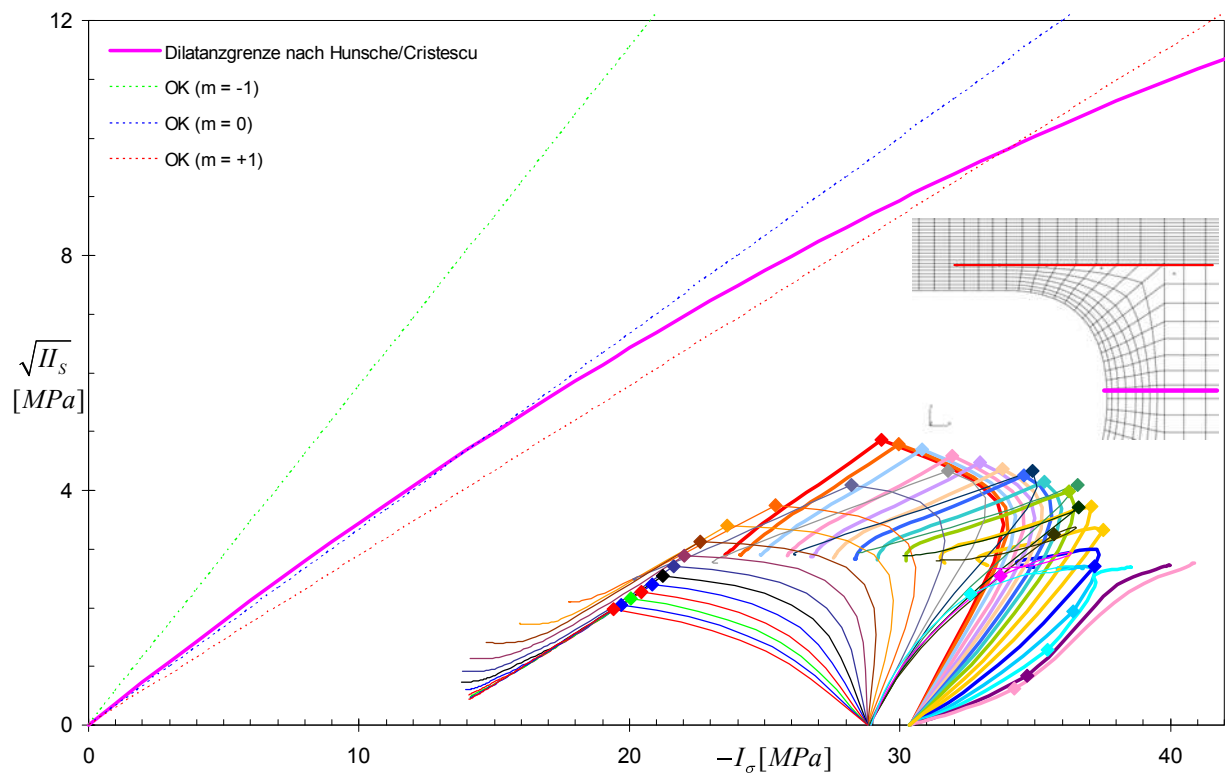


Abbildung 48: Spannungspfade im oberen Kavernendach und im Pfeilerbereich, Vergleich verschiedener Auswertelokationen (fd4_2d_05_c)

9.4.6 Exemplarische Darstellung von Spannungspfaden im Deckgebirge

In der Abbildung 49 sind die Spannungspfade im Anhydrit für den Berechnungsfall fd1_2d_05_c dargestellt. Zusätzlich zu den Spannungspfaden sind die Festigkeits- und Nachbruchfestigkeitskurven für Anhydrit dargestellt (s. a. Abschnitt 7.3). Die Spannungspfade beginnen auf Grund des anisotropen Anfangsspannungszustandes nicht auf der Abszisse sondern in einem gewissen Abstand von ihr. An der Unterseite der 10 m mächtigen Anhydritschicht (Punkt 1) wandert der Spannungspfad sehr deutlich bei abnehmendem Spannungsdeviator und bei gleichzeitiger Abnahme des hydrostatischen Spannungsanteils nach einem Jahr in einen unkritischen Spannungszustand. Von diesem Punkt aus zeigen sich in den nächsten 999 Jahren nur kleine weiter fallende Werte des Spannungsdeviators und leicht steigende Werte für den hydrostatischen Spannungsanteil. Die Punkte an der Oberkante der Anhydritschicht zeigen bei sich wenig änderndem hydrostatischen Spannungsanteil im ersten Jahr schnelle Anstiege des Spannungsdeviators. Anschließend fällt der Spannungsdeviator bei sich wenig änderndem hydrostatischen Spannungsanteil. Insgesamt sind die Spannungszustände unkritisch, da weder Bruch- noch Nachbruchfestigkeitsgrenze überschritten werden.

In Abbildung 50 sind für den Berechnungsfall fd1_2d_05_c1 die Spannungspfade in den hier angesetzten drei Anhydritschichten (Mächtigkeiten: 2 · 2.5 und 5 m) für die jeweiligen Unterseiten der Schichten (Punkte 1, 2 und 3) sowie die Oberseiten der Schichten (Punkte 4 bis 12) dargestellt. Die Spannungspfade der 5 m mächtigen oberen Anhydritschicht (Punkte 6, 9 und 12) reichen etwas näher an die Festigkeitsgrenze heran, verbleiben jedoch in ausreichender Entfernung. Insgesamt treten also – auch bei geschichtetem Anhydrit – keine Überbeanspruchungen im Deckgebirge auf.

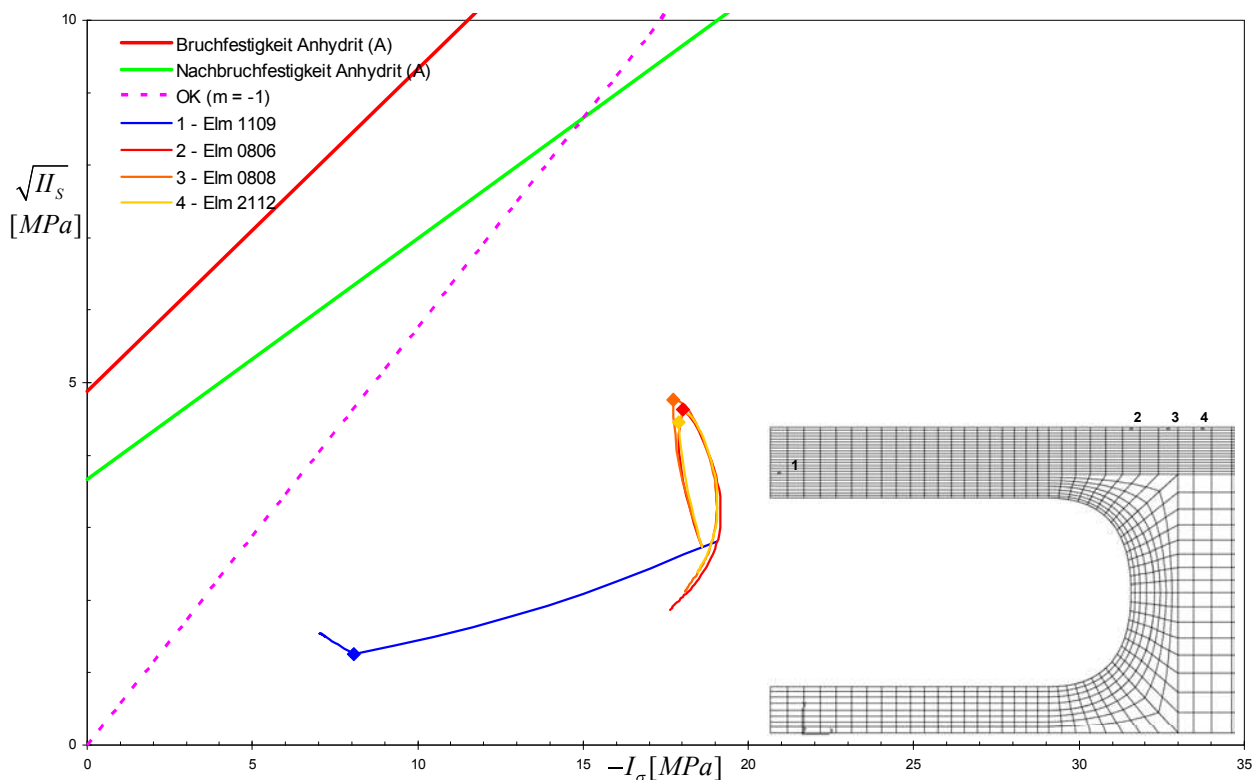


Abbildung 49: Spannungspfade in der 10 m mächtigen Anhydritschicht
(Berechnungsfall fd1_2d_05_c, ohne Gleitflächen)

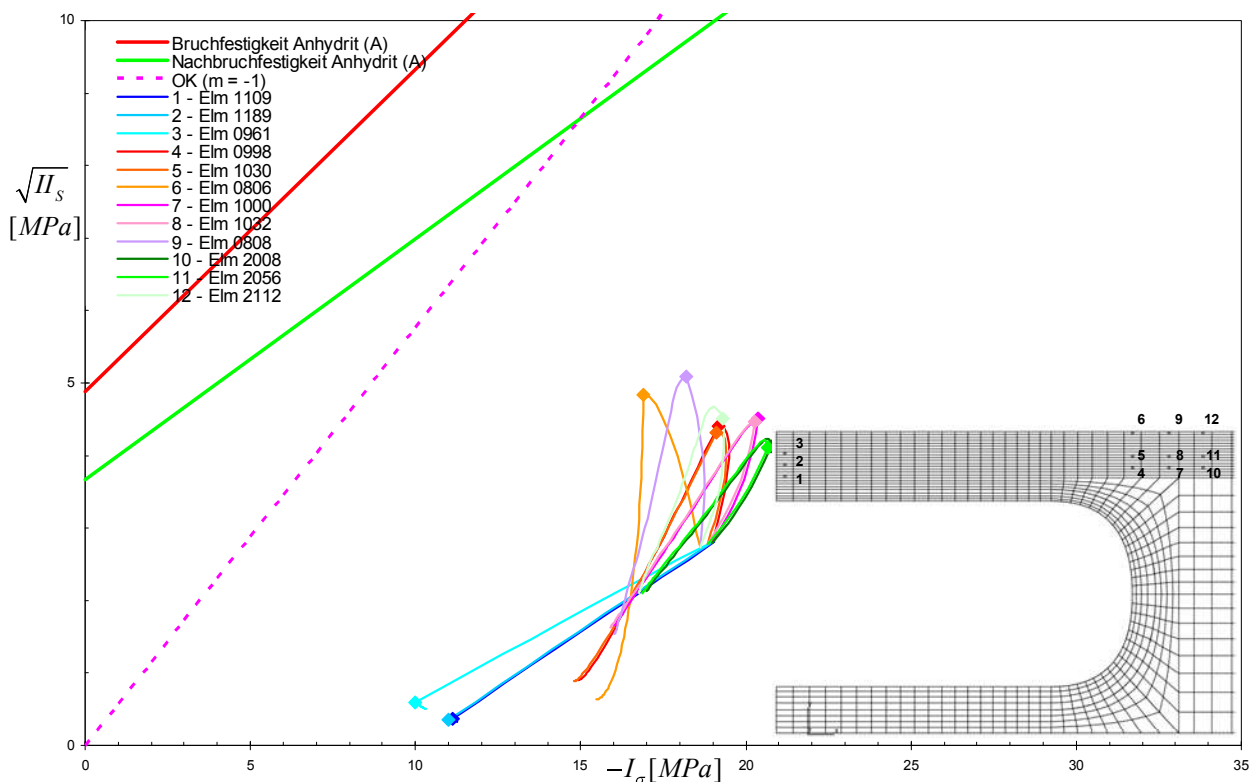


Abbildung 50: Spannungspfade in der 10 m mächtigen Anhydritschicht
(Berechnungsfall fd1_2d_05_c1, mit Gleitflächen)

9.5 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse – Arbeitspaket 2

Zur Bestimmung der Senkungsraten von neuen Klasse 0 - Kavernen wurden insgesamt 17 Berechnungen für 9 unterschiedliche FE-Modelle unter Zugrundelegung eines Berechnungszeitraumes von 1000 Jahren durchgeführt. Dabei wurden verschiedene zukünftige Designs in Standardanordnung (unendliche viele parallele Reihen), orthogonaler Anordnung (unendlich lange Reihen längs angeordneter Kavernen im Wechsel mit unendlich langen Reihen quer angeordneter Kavernen) und zwei unendliche lange parallele Reihen (mit drei unterschiedlichen Achsabständen der beiden Reihen):

	Kavernengröße
	180 · 120 · 40 m
	Modellkurzbezeichnung
Standarddesign (Reihe)	fd1, fd4
Orthogonales Design	fd2
drei 2-reihige Designs	fd3-120, fd3-160, fd3-200

Die Mächtigkeit des Sicherheitsdaches im Rötsalz wurde zu 5 m angenommen. Im Hangenden wurde direkt über dem Rötsalz eine 10 m mächtige Deckgebirgsschicht aus Anhydrit im Oberen Buntsandstein angesetzt. In der Hälfte der Berechnungsfälle wurde dieser Anhydrit in drei Schichten geklüftet angenommen, die sich reibungsfrei gegeneinander verschieben konnten. Die Berechnungsergebnisse für die Designs fd3-120, fd3-160 und fd3-200 konnten auf Grund numerischer Instabilitäten während der FE-Berechnungen nicht in den Bericht aufgenommen werden.

Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:

- Zum Berechnungszeitpunkt 40 Jahre werden bei kompaktem Anhydrit für das Design fd1 Senkungsraten an der Geländeoberfläche von 0.26 mm/Jahr, für das Design fd2 0.81 mm/Jahr berechnet. Bei Ansatz geklüfteten Anhydrits ergeben sich Senkungsraten von 0.51 bzw. 2.33 mm/Jahr. Bei hohem Abbaugrad (fd4) werden Senkungsraten von 3.908 mm/Jahr berechnet.
- Zum Berechnungszeitpunkt 100 Jahre werden bei kompaktem Anhydrit für das Design fd1 Senkungsraten an der Geländeoberfläche von 0.13 mm/Jahr, für das Design fd2 0.54 mm/Jahr berechnet. Bei Ansatz von geschichtetem Anhydrit ergeben sich Senkungsraten von 0.29 bzw. 2.02 mm/Jahr. Bei hohem Abbaugrad (fd4) werden Senkungsraten von 3.904 mm/Jahr berechnet.
- In allen Berechnungsfällen werden keine Überschreitungen der Bruchfestigkeiten im Deckgebirge berechnet.
- In allen Berechnungsfällen werden keine Überschreitungen der Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCH (1998) im Rötsalz berechnet.
- In allen Berechnungsfällen werden in keiner Schicht Zugspannungen berechnet.

10 Zusammenfassender Vergleich AP1 und AP2

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungsvarianten mit dem 5 m mächtigen Sicherheitsdach aus Steinsalz und einem direkt über dem Steinsalz liegenden 10 m mächtigen Anhydrit zusammengefasst worden (Varianten xxx_05_c). Es werden sowohl die 2D- wie auch die 3D-Ergebnisse berücksichtigt. Abbildung 51 zeigt die Geländesenkung nach 100 Jahren als Funktion des Abbaugrades. Die Ergebnisse der Berechnungen für Reihen- bzw. orthogonale Designs sind getrennt gekennzeichnet. Insgesamt ist festzustellen, dass bei größeren Abbaugraden die Geländesenkung stark überproportional ansteigt, wobei es keine Rolle spielt, ob ein Reihen- oder orthogonales Design vorliegt. Auch die Senkungsraten (Abbildung 52) zeigen ein ähnliches Verhalten.

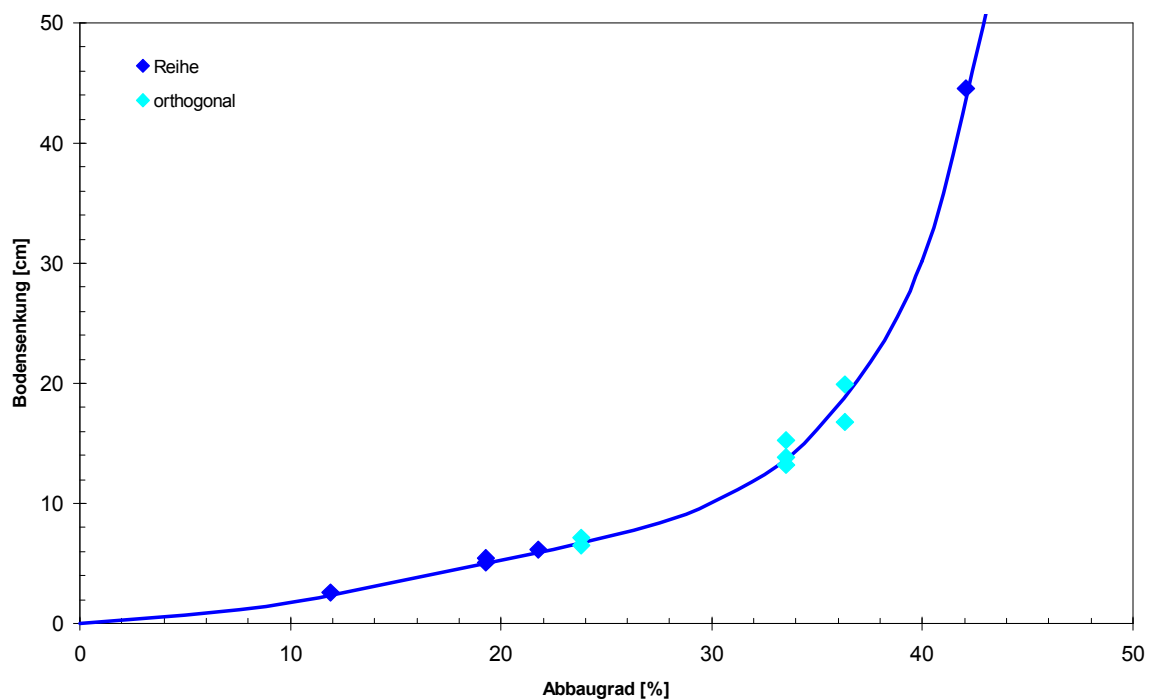


Abbildung 51: Geländesenkung nach 100 Jahren als Funktion des Abbaugrades

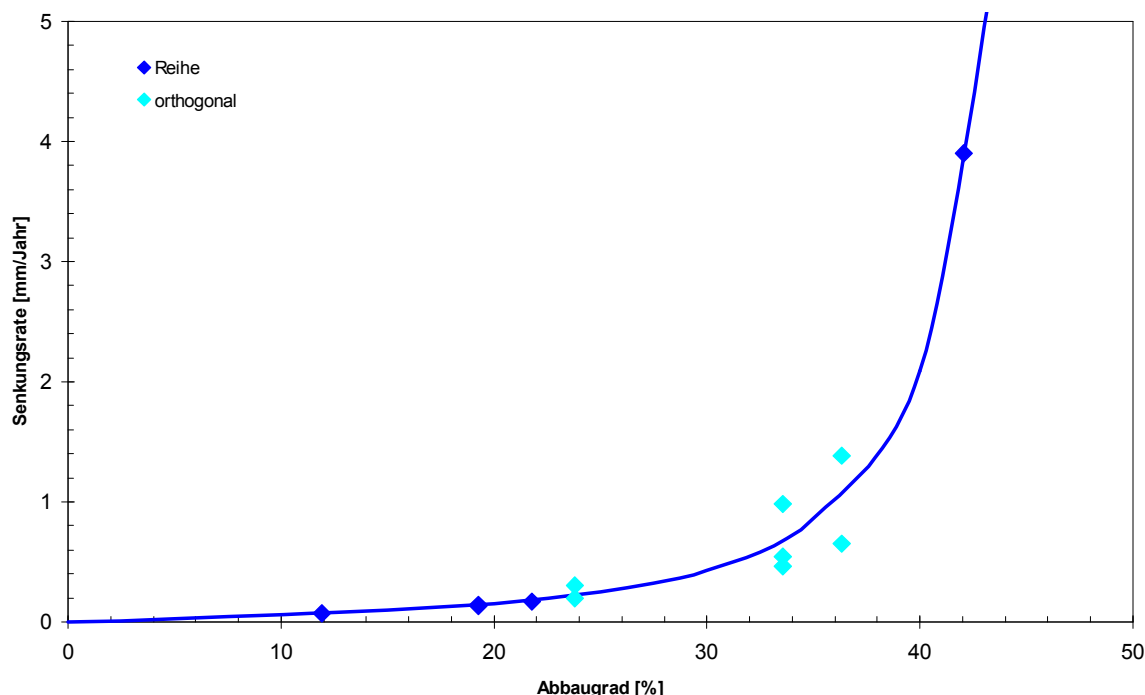


Abbildung 52: Senkungsrate nach 100 Jahren als Funktion des Abbaugrades

11 Gebirgsmechanische Bewertung der Standfestigkeit der Klasse 0-Kavernen im Kavernenfeld Hengelo

Im Kavernenfeld Hengelo wurden bisher Kavernen mittels dreier Bohrungen mit jeweils 40 m Abstand gesolt. Der planmäßige Söldurchmesser der Kavernen betrug dabei 80 m. Dadurch entstanden planmäßig flache, annähernd ellipsoide Kavernen, deren horizontale Achsmaße ca. 80 und 160 m betrugen. Die vertikale Achse (= Kavernenhöhe) maß bei völlig ausgesolter Kaverne ca. 40 m. Zwischen benachbarten Kavernen wurde in Kavernenlängsrichtung planmäßig ein Pfeiler von mindestens 80 m Breite angeordnet.

Zusätzlich zu diesen planmäßig gesolten Kavernen entstanden auch Kavernen mit größeren Abmessungen. Zur abdeckenden Berechnung wurden Kavernen mit horizontalen Achsmaßen von 120 und 180 m simuliert. In Kavernenlängsrichtung ergab sich - bei sonst gleichen Bedingungen wie für die planmäßig gesolten Kavernen - eine reduzierte Pfeilerbreite von 40 m.

In Zukunft sollen Kavernen durch zwei Bohrungen mit einem planmäßigen Söldurchmesser von 120 m gesolt werden. Dabei entstehen dann annähernd ellipsoide Kavernen, deren horizontale Achsmaße dann 120 und 180 m betragen, die vertikale Achse (= Kavernenhöhe) bleibt bei völlig ausgesolter Kaverne unverändert bei 40 m.

All diese Kavernen werden den so genannten Klasse 0-Kavernen zugeordnet. Diese besitzen in situ ein mindestens 5 m mächtiges durchgängiges Sicherheitsdach, liegen vollständig im Rötsalz und sind standfest, was in der vorliegenden Studie zu bestätigen war.

11.1 Ergebnisse der FE-Berechnungen

In allen Modellberechnungen wurde das Rötsalz in einer Teufe von 420 bis 475 m berücksichtigt. Die im Deckgebirge des Kavernenfeldes Hengelo vereinzelt auftretenden Störungen konnten in den Modellberechnungen nicht berücksichtigt werden, so dass die Schlussfolgerungen nur für Bereiche des Kavernenfeldes gelten, in denen ggf. vorhandene geologische Anomalien oder Störungen keinen Einfluss haben.

Aufgrund der im Kavernenfeld Hengelo vorhandenen Anordnung der bereits vorhandenen Kavernen wird das Standarddesign 1 (Anordnung der Kavernen in unendlich vielen parallelen Reihen mit planmäßigen Kavernenabmessungen) als das Gesamtfeld charakterisierende Konfiguration angesehen.

11.1.1 Derzeitiges Design

Die Steifigkeit und die Festigkeit des Gebirges wurden für die derzeitigen Designs in einer 10 m direkt über dem Rötsalz liegenden Schicht variiert:

- Tonstein mit geringem Anhydritanteil
- Tonstein mit hohem Anhydritanteil
- Anhydrit

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass eine Überbeanspruchung im Deckgebirge bei keiner dieser Varianten auftritt.

Das Sicherheitsdach im Rötsalz, das mit einer Mindestmächtigkeit von 5 m in situ vorausgesetzt wird, wird auch bei einer modellierten geringeren bzw. größeren Mächtigkeit (1 bzw. 10 m) mechanisch unkritisch beansprucht. Eine mechanisch induzierte Bildung von Auflockerungszonen kann ausgeschlossen werden, da die Spannungspfade im kompressiblen Bereich, d. h. unterhalb der Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) verbleiben.

Die charakteristischen Senkungsraten betragen rechnerisch zum jetzigen Zeitpunkt 0.13 mm/Jahr. Nach weiteren 60 Jahren reduzieren sich diese Senkungsraten rechnerisch weiter auf Werte von 0.077 mm/Jahr.

11.1.2 Zukünftiges Design

Bei den Berechnungen für das zukünftige Design wurden neben den Berechnungsvarianten, die eine einzelne 10 m mächtige kompakte Anhydritschicht über dem Rötsalz berücksichtigen, auch Berechnungsvarianten mit geschichtetem Anhydrit über dem Rötsalz angesetzt. Dabei wurde eine reibungsfreie Kontaktfläche zwischen Rötsalz und Anhydrit simuliert. Weitere reibungsfreie Kontaktflächen liegen in 2,5, 5 und 10 m Entfernung oberhalb des Salzspiegels, so dass insgesamt drei verschiedene Anhydritschichten ohne horizontale Schubspannungsübertragung im Berechnungsmodell vorhanden sind.

Eine Variation der Mächtigkeit des Sicherheitsdaches im Rötsalz wurde auf Grund der erzielten Ergebnisse für die derzeitigen Designs (AP 1) nicht vorgenommen.

Auch für die zukünftigen Designs ergeben sich unkritische Beanspruchungszustände im Deckgebirge und im Rötsalz.

Die charakteristischen Senkungsraten betragen rechnerisch nach 40 Jahren 0.26 mm/Jahr. Nach 100 Jahren reduzieren sich diese Senkungsraten rechnerisch weiter auf Werte von 0.13 mm/Jahr.

11.2 Gesamtbewertung

Klasse 0-Kavernen weisen in situ ein Sicherheitsdach mit einer durchgängigen Mindestmächtigkeit von 5 m auf. Dieses Sicherheitsdach dient in erster Linie als abdichtende Barriere. Deshalb muss in situ eine **durchgängig dichte Barriere** im Rötsalz ohne Fehlstellen im Kavernendach vorhanden sein, damit ein Eindringen von Lauge in das Deckgebirge ausgeschlossen werden kann. Die Bedeutung des Sicherheitsdaches als Tragelement ist jedoch von eher untergeordneter Bedeutung. Eine mechanisch induzierte Bildung von Auflockerungszonen wird für den hier untersuchten Fall der offen und unter Soledruck bis zur Geländeoberfläche stehenden Kavernen ausgeschlossen.

Die eigentliche Lastabtragung geschieht über die hangenden Schichten des Oberen Buntsandsteins. Nur bei ausreichender Festigkeit wird eine sichere Lastabtragung gewährleistet. Die in den Modellberechnungen angesetzten und durch Laborversuche belegten Materialparameter für das Deckgebirge gewährleisten rechnerisch eine sichere Lastabtragung. Nur bei einem heterogen aufgebauten Deckgebirge mit lokal vorhandenen Schwäche-zonen sind Standfestigkeitsprobleme nicht auszuschließen. Wenn solche Schwäche-zonen in situ tatsächlich vorhanden sind, sind Sonderuntersuchungen notwendig.

Unter der Voraussetzung, dass eine mindestens 5 m mächtige durchgängig dichte Salzbarriere im Kavernendach vorhanden ist und geologische Anomalien ausgeschlossen werden können, werden keine kritischen Beanspruchungen im Rötsalz und auch nicht im direkt darüber befindlichen Deckgebirge berechnet (auch nicht bei Ansatz von Gleitflächen zwischen den Anhydritschichten). Mechanisch induziertes Eindringen von Sole in das

Kavernendach kann ausgeschlossen werden, da die Spannungszustände im kompressiblen Bereich unterhalb der Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCH (1998) verbleiben. Die Ergebnisse der durchgeführten Modellberechnungen belegen bei Gültigkeit der im Abschnitt 4 beschriebenen Voraussetzungen die Standfestigkeit der Klasse 0-Kavernen im Kavernenfeld Hengelo.

11.3 Empfehlungen

Im Kavernenfeld Hengelo entspricht ein Teil der Kavernen und/oder Pfeiler nicht den Auslegungsmaßen. Zur Bewertung der Standfestigkeit von solchen Kavernen-Pfeiler-Kombinationen existiert bisher kein Instrumentarium. Als Bewertungsgrundlage zur Abschätzung der Standfestigkeit paralleler Kavernenreihen können konservativ unter Vernachlässigung der in Reihenrichtung angeordneten Pfeiler FE-Modelle im ebenen Verzerrungszustand entwickelt werden. Bei Ansatz eines geeigneten Kriteriums – z. B. Ausnutzungsgradverfahren nach Lux (1984) – kann dann die Standfestigkeit der Pfeiler konservativ abgeschätzt werden. Damit nicht für jede Kavernendurchmesser-Pfeilerbreiten-Kombination individuelle Berechnungen durchgeführt werden müssen, sollten Sensitivitätsstudien erstellt werden und die Ergebnisse so aufbereitet werden, dass eine einfache standardisierte Bewertung der Standfestigkeit aller auftretenden Kavernendurchmesser-Pfeilerbreiten-Kombinationen möglich wird.

Kavernencluster, die nicht einer Reihenanordnung entsprechen, bedürfen in der Regel einer gesonderten Analyse. Evtl. sind dreidimensionale FE-Berechnungen notwendig.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

5.1.2.e

– Direktor und Professor –

Autoren:

5.1.2.e

– Wissenschaftlicher Oberrat –

5.1.2.e

– Wissenschaftlicher Direktor –

12 Literaturverzeichnis

BGR (2003): Project plan „Detailed Subsidence Evaluation in the Hengelo Brine Field“ in der endgültigen Fassung vom 24.06.2003

BEKENDAM, R. F. (2002): Induction of Subsidence by Brine Removal. – Maastricht (GeoControl)

CRISTESCU, N. & HUNSCHKE, U. (1998): Time effects in rock mechanics. – Chichester (John Wiley & Sons).

HUNSCHKE, U., SCHULZE, O. & LANGER, M. (1994): Creep and failure behaviour of rock salt around underground cavities. – In: Der Bergbau an der Schwelle des XXI. Jahrhunderts, Proc. 16th World Mining Congress (WMC). Sofia (Bulgarien) 1994. Vol. 5: 217–230. Bulgarian National Organizing Committee, Sofia.

LANGER, M. (1984): Geotechnische Laboruntersuchungen an Bohrkernen des Kavernenfeldes Hengelo. – Hannover (BGR).

LANGER, M. (1985): Gesteinsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen des Deckgebirges Kavernenfeld Hengelo. – Hannover (BGR).

LUX, K.-H. (1984): Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau – Ein Beitrag zur Entwicklung von Prognosemodellen für den Hohlraumbau im duktilen Salzgebirge: 360 S.; Stuttgart (Enke). – ISBN 3-432-94171-4.

WALLNER, M. & KOß, S. (1998): Gebirgsmechanisches Gutachten zur Standfestigkeit bestehender Kavernen und für die Dimensionierung neuer Kavernen in Feld Hengelo. – Hannover (BGR).