



Kavernenfeld Hengelo

Auftrags-Nr.:
5145027121 vom 23.01.2004

Ermittlung der zulässigen
Beanspruchung von Pfeilern
im Kavernenfeld Hengelo

Abschlussbericht

Hannover, März 2004

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN
UND ROHSTOFFE
HANNOVER**

Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern
im Kavernenfeld Hengelo

Abschlussbericht

- | | |
|------------------|--|
| 1. Autoren: | 5.1.2.e .
5.1.2.e . |
| 2. Auftrags-Nr.: | 5145027121 vom 23.01.2004 |
| 3. Auftraggeber: | Akzo Nobel Salt bv Hengelo, Boortorenweg 27,
7554 RS Hengelo, Niederlande |
| 4. Datum: | 15. März 2004 |
| 5. Tagebuch-Nr.: | 10527/04 |

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einführung	3
2	Auftrag und Arbeitsumfang	5
3	Stoffgesetze	5
4	Randbedingungen und Berechnungsannahmen	6
5	Bewertungskriterien	7
5.1	Kurzzeitfestigkeit und Dilatanzgrenze für Steinsalz	7
5.2	Bruch- und Nachbruchfestigkeit des Deckgebirges	10
6	Materialparameter	11
6.1	Berechnungsmodelle	12
7	Ergebnisse	19
7.1	Konzept für die Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern	19
7.2	Fall 1 (Kavernenhöhe 40 m, kompakter Anhydrit)	20
7.2.1	P-D-Diagramm	20
7.2.2	Spannungspunkte im Invariantendiagramm	21
7.3	Fall 2 (Kavernenhöhe 40 m, geklüfteter Anhydrit)	24
7.3.1	P-D-Diagramm	24
7.4	Fall 3 (Kavernenhöhe 25 m, kompakter Anhydrit)	26
7.4.1	P-D-Diagramm	26
7.5	P-D-Tabellen zur Ermittlung der Mindestpfeilerbreiten	26
8	Empfehlungen	30
9	Literaturverzeichnis	32

1 Einführung

Seit 1936 produziert Akzo Nobel in der Nähe von Hengelo und Enschede Salz (Abbildung 1), 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. Pro Jahr 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 nach BEKENDAM (1996) für jede Kaverne angegeben, damit das zukünftige Kavernenverhalten und die zukünftigen Bodensenkungen abgeschätzt werden können.

Akzo Nobel hat inzwischen eine Kriterienkarte erstellt, auf der Kavernen gekennzeichnet sind, die eine

- Überschreitung der bisher zulässigen Kavernendurchmesser in Längs- und / oder Querrichtung

und / oder eine

- Unterschreitung der bisherigen Mindestpfeilerbreiten in Längs- und / oder Querrichtung

aufweisen.

Da viele Kavernen die zulässigen Kavernendurchmesser überschreiten und / oder Pfeiler Mindestbreiten unterschreiten, ist BGR mit der Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern beauftragt worden. Die Ergebnisse werden für die Beurteilung der Standfestigkeit von Pfeilern zwischen parallel angeordneten Kavernenreihen eingesetzt. Clusterartige Anordnungen von Kavernen bedürfen in der Regel einer gesonderten Untersuchung.

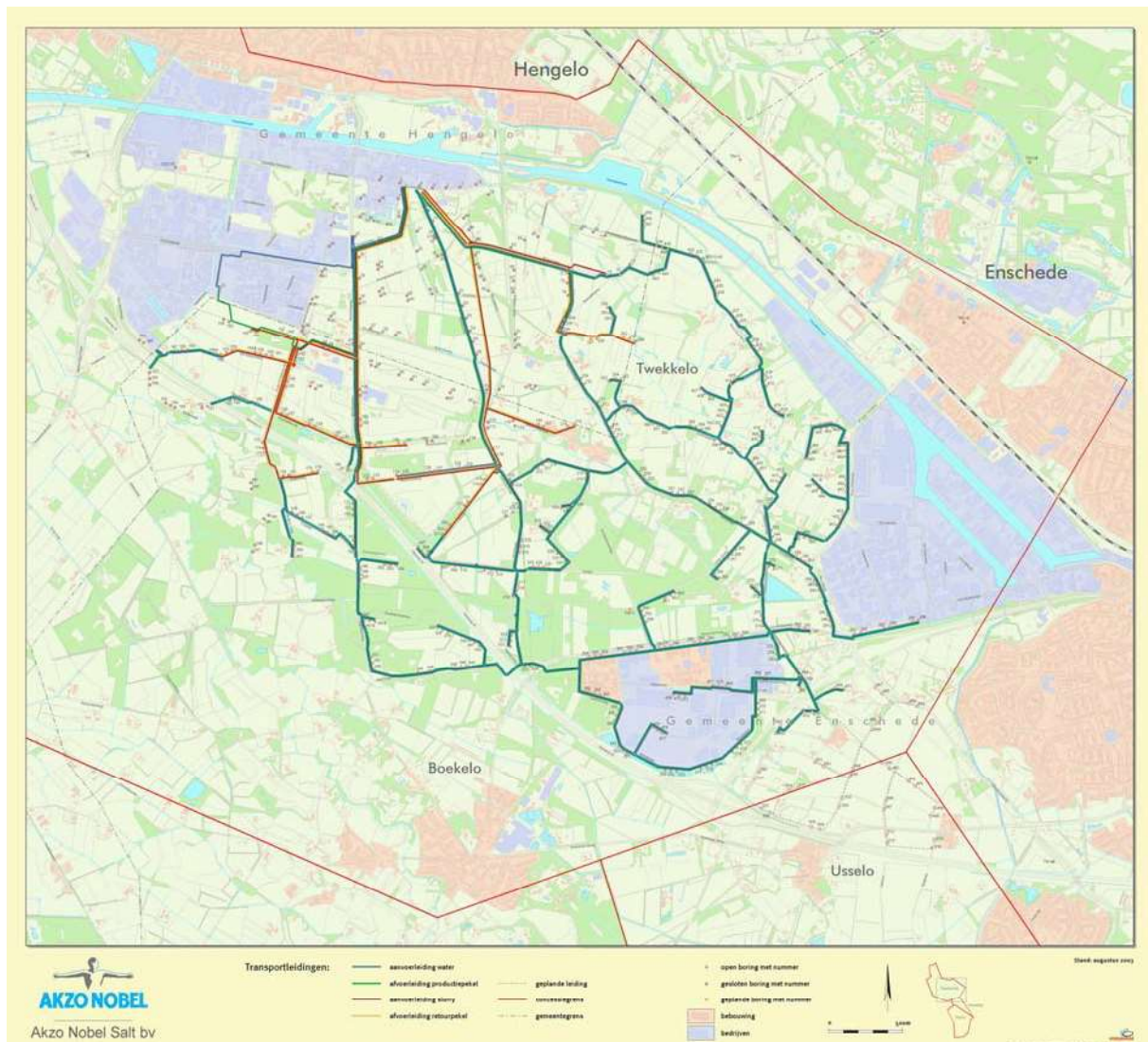


Abbildung 1: Kavernenfeld Hengelo

2 Auftrag und Arbeitsumfang

In EICKEMEIER & HEUSERMANN (2003) empfahl die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Durchführung von speziellen FE-Berechnungen zur Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern. Unter Auftrags-Nr. 5145027121 hat Akzo Nobel die BGR am 23.01.2004 beauftragt, solche FE-Berechnungen für das Kavernenfeld Hengelo auszuführen.

Die im Detail von BGR durchzuführenden Arbeiten wurden am 12.01.2004, 02.02.2004 und 24.02.2004 bei drei gemeinsamen Experten-Meetings mit Akzo Nobel, SodM, RWTH Aachen, RESPEC und BGR festgelegt. Die Arbeiten umfassen im Wesentlichen die Bestimmung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern nach dem η -Verfahren (Lux 1984: 178-184). Zusätzlich wird die Beanspruchung des Anhydrits direkt oberhalb des Rötosalzes an Hand eines Drucker-Prager-Kriteriums überprüft.

Zur Bestimmung dieser zulässigen Beanspruchung wurden FE-Modelle für drei unterschiedliche Fälle erstellt. Aufgrund der zweidimensionalen Modellierung im ebenen Verzerrungszustand werden Hohlräume in den Modellen unendlich lang abgebildet. So werden auch die Kavernen im Modell zu unendlich langen, mit Lauge gefüllten Hohlräumen. Eine Tragwirkung von den in Reihenrichtung angeordneten Pfeilern innerhalb einer Reihe wird also vernachlässigt. Diese Art der Modellierung erlaubt damit eine konservative Abschätzung der Beanspruchung des Pfeilers zwischen den beiden Reihen.

3 Stoffgesetze

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

$$\dot{\epsilon}_{ij}^t = \dot{\epsilon}_{ij}^{el} + \dot{\epsilon}_{ij}^{cr}, \quad (3.1)$$

mit

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

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

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{el} = -\frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \frac{(1+\nu)}{E} \dot{\sigma}_{ij} + \alpha_t \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij}. \quad (3.2)$$

Die Kriechverzerrungsrate wird bestimmt über:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{cr} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}}{\sigma_{eff}} \dot{\epsilon}_{eff}^{cr}, \quad (3.3)$$

$$\text{mit } \dot{\epsilon}_{eff}^{cr} = A_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma^*} \right)^{n_1} \quad (\text{BGRa}). \quad (3.4)$$

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.

4 Randbedingungen und Berechnungsannahmen

Sämtliche inneren und äußeren Modellränder sind 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/m³ angenommen. In der Folge bleibt der Druck im Kaverneninnern konstant. Die Kaverne wird also über den gesamten Berechnungszeitraum offen stehend angenommen. Abbildung 2 zeigt die zeitliche Entwicklung des Druckes im Dach der Kaverne für eine Teufe von 425 m.

Die in situ vorhandenen klastischen „Steinlagen“ zwischen den Rötsalzschiechten 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.

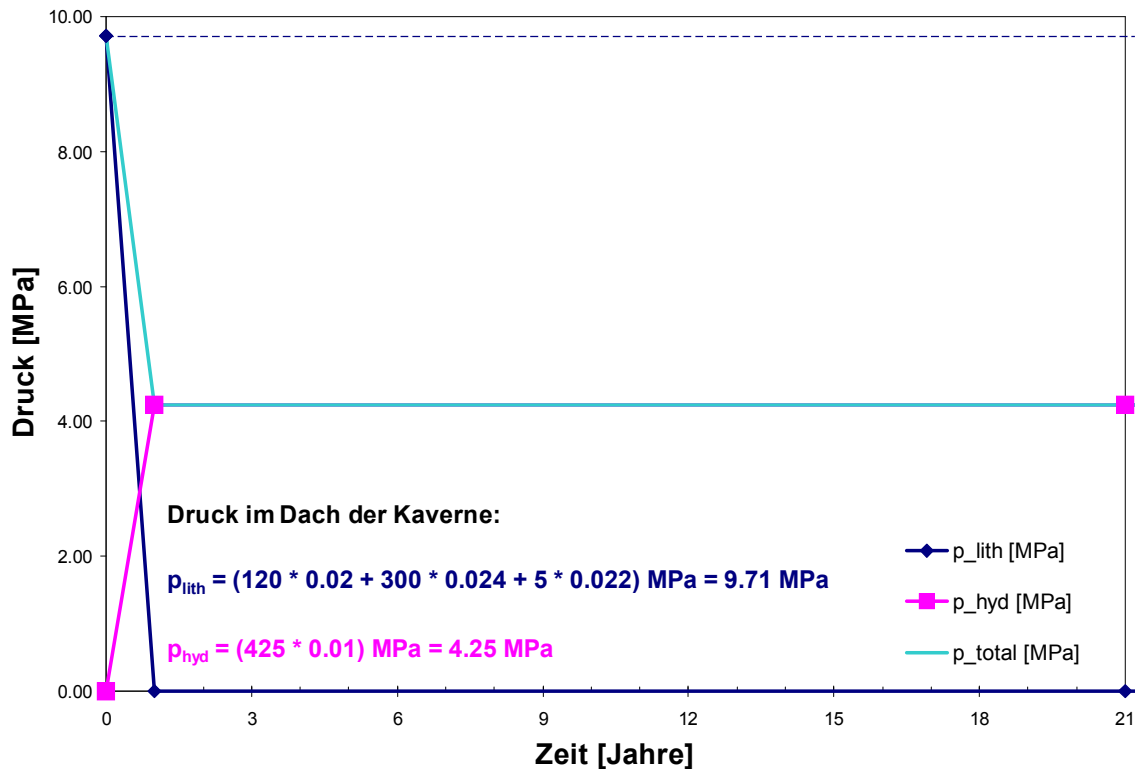


Abbildung 2: Solungssimulation (Kavernendach in 425 m Teufe)

5 Bewertungskriterien

5.1 Kurzzeitfestigkeit und Dilatanzgrenze für Steinsalz

Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen 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 ($m=+1$) sowie die jeweils dazugehörenden η -Kurven für $\eta = 25, 30$ und 35% .

Kurzzeitfestigkeit nach Hunsche, Schulze & Langer (1994) mit standort-spezifischen Kennwerten für das Rötsalz:

$$\sqrt{II_s} = -a g h \left(\frac{|I_\sigma|}{\sigma^*} \right)^p \sigma^* \operatorname{sign}(I_\sigma) + c \quad (5.1)$$

mit $a = 1.439[-]$

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

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

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

$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ 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 & HUNSCHE (1998)

$$\sqrt{II_s} = f_1 I_\sigma^2 + f_2 I_\sigma \quad (5.2)$$

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

und $f_2 = -0.36726 [-]$.

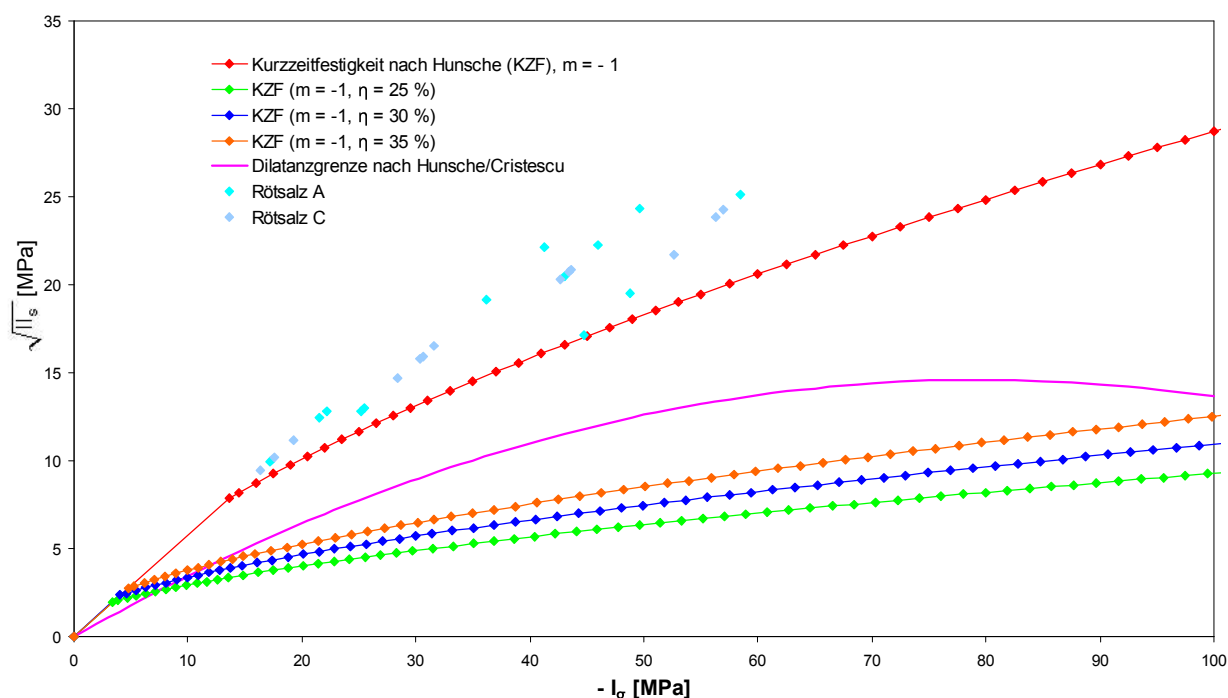


Abbildung 3: Kurzzzeitfestigkeit (KZF) nach HUNSCHE, SCHULZE & LANGER (1994) mit ausgewählten η -Kurven ($m=-1$) und Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) sowie Laborergebnisse für Rötsalz A und C

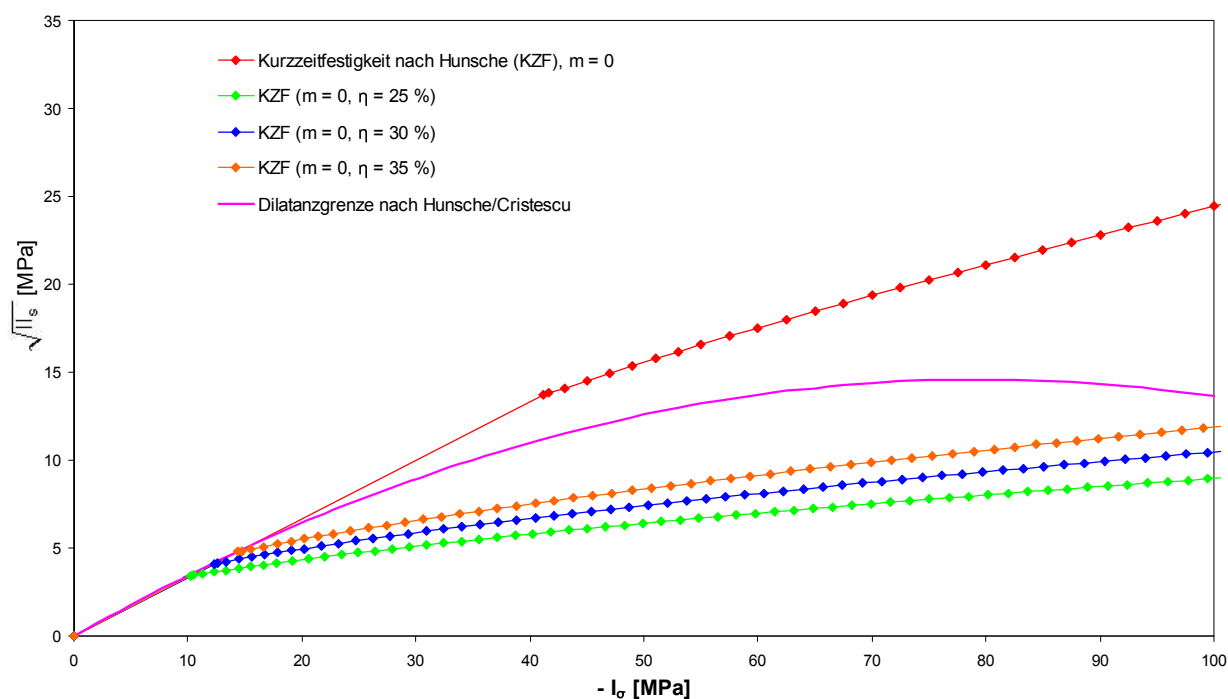


Abbildung 4: Kurzzzeitfestigkeit (KZF) nach HUNSCHE, SCHULZE & LANGER (1994) mit ausgewählten η -Kurven ($m=0$) und Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998)

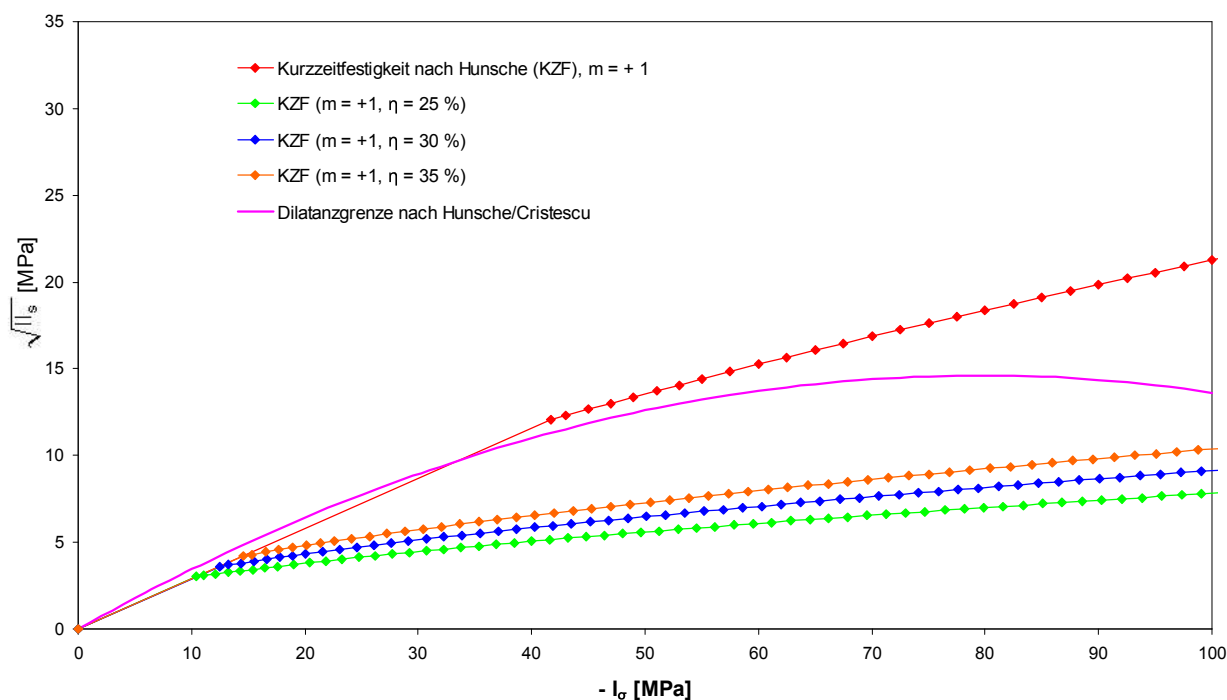


Abbildung 5: Kurzzeitfestigkeit (KZF) nach HUNSCHE, SCHULZE & LANGER (1994) mit ausgewählten η -Kurven ($m=+1$) und Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998)

5.2 Bruch- und Nachbruchfestigkeit des Deckgebirges

Von LANGER (1985) wurden gesteinsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen des Deckgebirges durchgeführt. Die damals gewählte Klassifizierung der Gesteine in Tonstein mit geringem Anhydritanteil (TS-A), Tonstein mit hohem Anhydritanteil (TS+A) und Anhydrit (A) wurde übernommen. Zur Bestimmung konservativer Gesteinsfestigkeiten wurden die Versuche neu ausgewertet. Die ermittelten Festigkeitsparameter nach Drucker-Prager für den Anhydrit sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Messwerte und die ermittelten Bruchgrenzen sind im Invariantendiagramm (Abbildung 6) veranschaulicht.

Tabelle 1: Gesteinsfestigkeiten des Anhydrits (A)

Material	Bruchfestigkeit		Nachbruchfestigkeit	
	α	k	α	k
Anhydrit (A)	0.4442	4.888	0.3332	3.666
Drucker-Prager-Kriterium: $F = 0 = \alpha I_\sigma + \sqrt{II_s} - k$, Zugspannungen positiv				

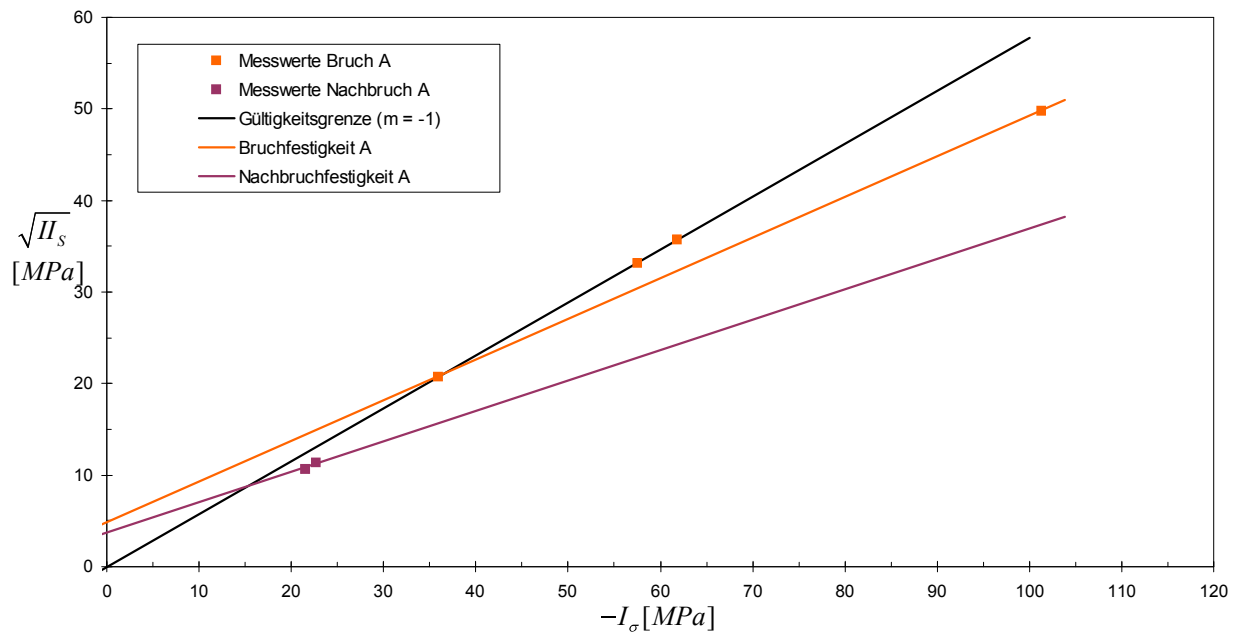


Abbildung 6: Bruch- und Nachbruchfestigkeiten von Anhydrit (A)

6 Materialparameter

Die verwendeten Kriechparameter für das Röttsalz und die Bruchparameter für den Anhydrit des Oberen Buntsandsteins ergeben sich aus den in den Abschnitten 3 und 5.2 aufgeführten Daten.

Die in den Berechnungen angesetzten elastischen Materialparameter sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der besseren räumlichen Zuordnung dient z. B. Abbildung 7. Die Parameter für den Oberen Buntsandstein sind LANGER (1985) entnommen. Die Eigenschaften des Tonsteins aus dem Oberen Buntsandstein werden auch dem Unteren Buntsandstein zugeordnet, da hierfür keine standortspezifischen Werte ermittelt wurden.

Tabelle 2: Elastische Materialparameter

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	0.45	0.818
Oberer Buntsandstein 3	Tonstein (TS-A)	400	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 2	Tonstein (TS-A)	410	5500	2400	0.33	0.493
Oberer Buntsandstein 1	Anhydrit (A)	420	15500	2400	0.33	0.493
Röt	Rötsalz	475	25000	2200	0.25	1.0
Unterer Buntsandstein	Tonstein (TS-A)	800	5500	2400	0.33	0.493
Gleitflächen (Fall 2 gem. Abschnitt 6.1)	Steifigkeit: 1/100 Anhydrit (A)	420.0, 422.5, 425.0, 429.5	155	2400	0.33	0.493

6.1 Berechnungsmodelle

Bei optimaler Ausbeutung des angenommenen 55 m mächtigen Rötsalzlagers entstehen Kavernen mit einer maximalen Höhe von 40 m (Fall 1). Um den günstigen Einfluss geringerer Kavernenhöhen auf die Standfestigkeit der Pfeiler zeigen zu können, wird zusätzlich ein weiteres Modell mit einer reduzierten Kavernenhöhe von 25 m erstellt (Fall 2). Für die Maximalhöhe von 40 m wird darüber hinaus in einem weiteren Modell ein 10 m mächtiger geklüfteter Anhydrit direkt über dem Rötsalz angenommen (Fall 3).

Die Berechnungsfälle sind also:

- Fall 1 (Abb. 8, 9): Kavernenhöhe 40 m, kompakter Anhydrit,
- Fall 2 (Abb. 10, 11): Kavernenhöhe 40 m, in drei Schichten mit jeweils 2.0, 2.0 und 4.0 m Mächtigkeit geklüfteter Anhydrit mit vier Gleitflächen von jeweils 0.5 m Stärke und
- Fall 3 (Abb. 12, 13): Kavernenhöhe 25 m, kompakter Anhydrit.

Zur Bestimmung der zulässigen Beanspruchung der Pfeiler werden verschiedene Berechnungen mit unterschiedlichen Kavernendurchmessern und Pfeilerbreiten durchgeführt. In den Abbildungen 9, 11 und 13 sind die in den Berechnungen angesetzten minimalen und maximalen Kavernendurchmesser und Pfeilerbreiten angegeben. Das FE-Netz ist exemplarisch für die Kombination der geringsten Abmessungen (Kavernendurchmesser $D = 35$ m und Pfeilerbreite $P = 20$ m) vollständig dargestellt.

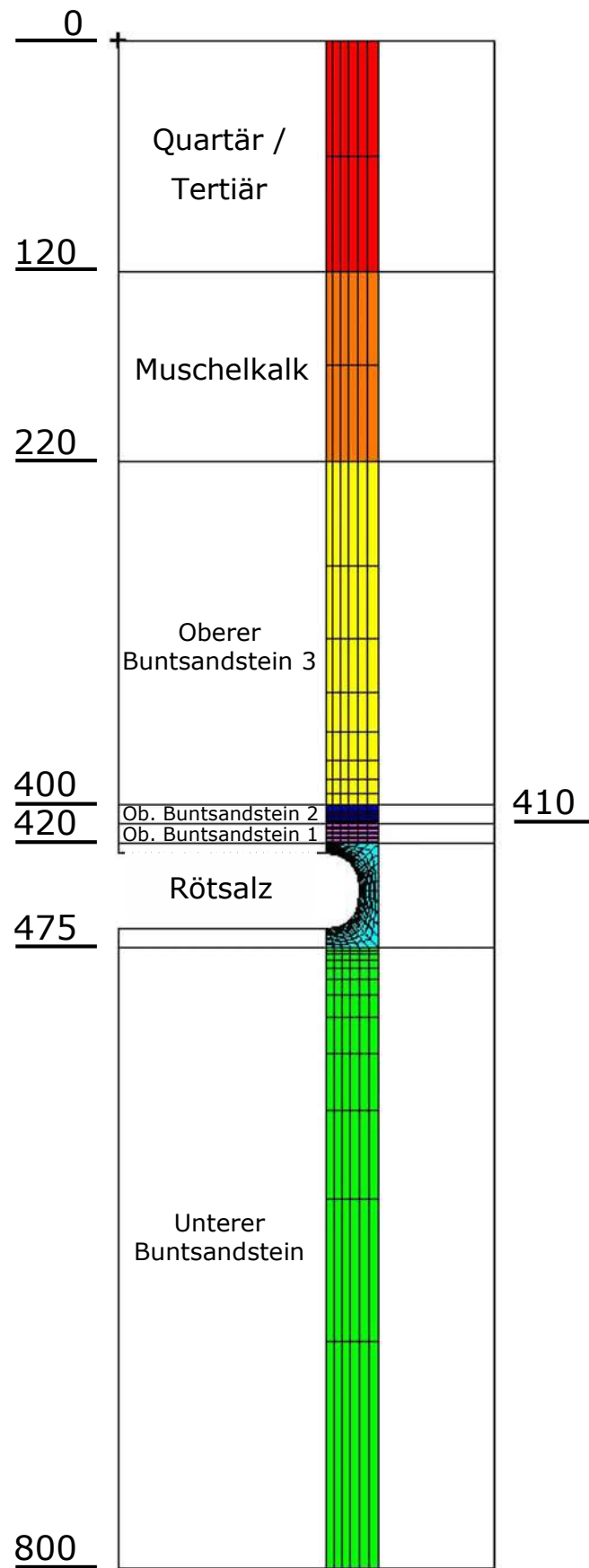


Abbildung 7: Fall 1: Kavernenhöhe 40 m, kompakter Anhydrit (gesamtes FE-Netz)

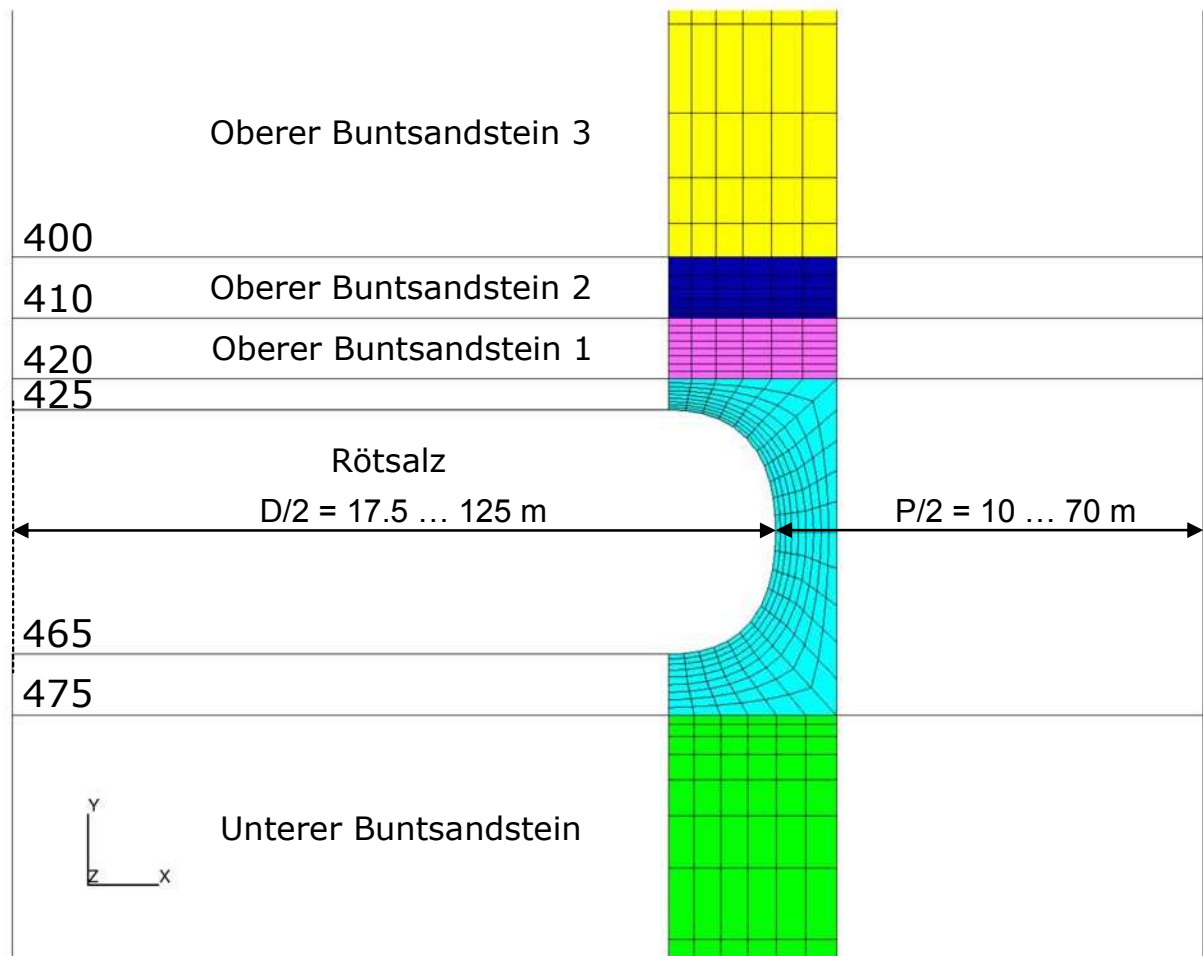


Abbildung 8: Fall 1: Kavernenhöhe 40 m, kompakter Anhydrit (Ausschnitt FE-Netz)

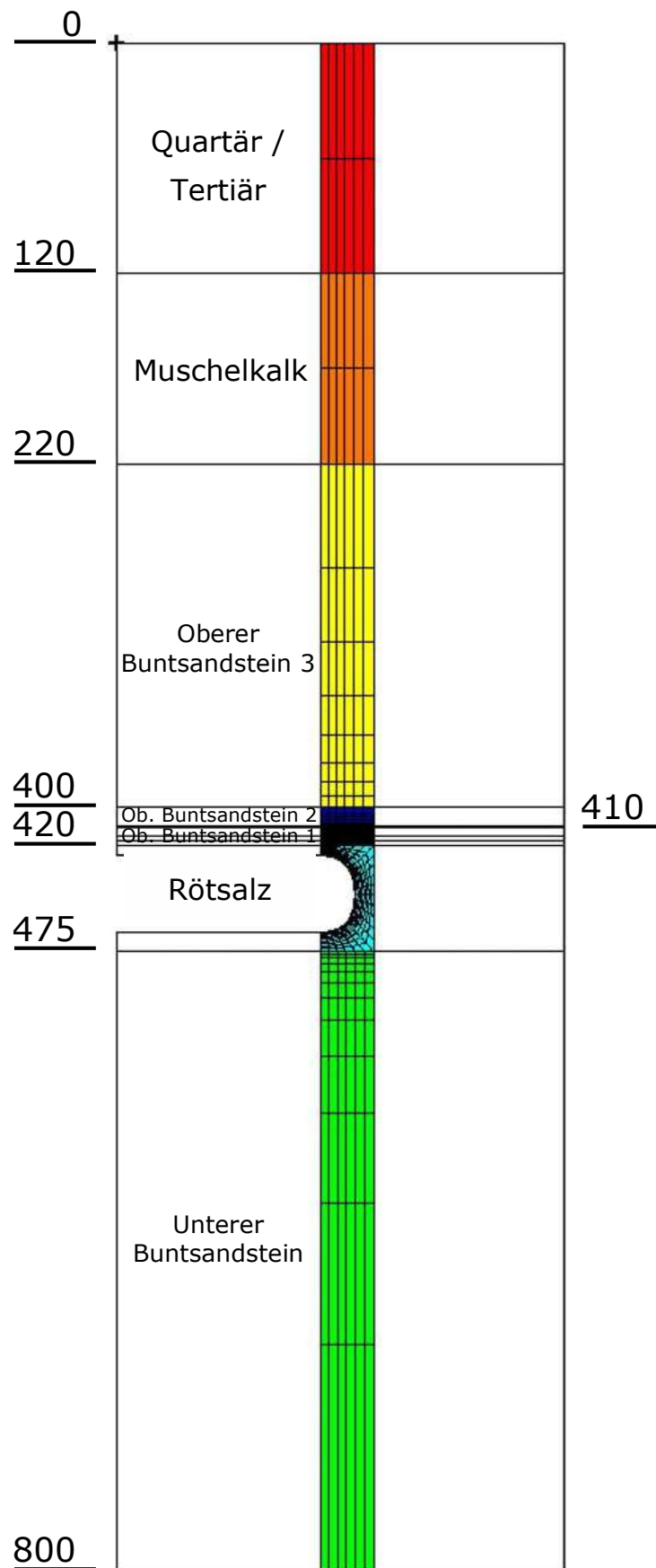


Abbildung 9: Fall 2: Kavernenhöhe 40 m, geklüfteter Anhydrit (gesamtes FE-Netz)

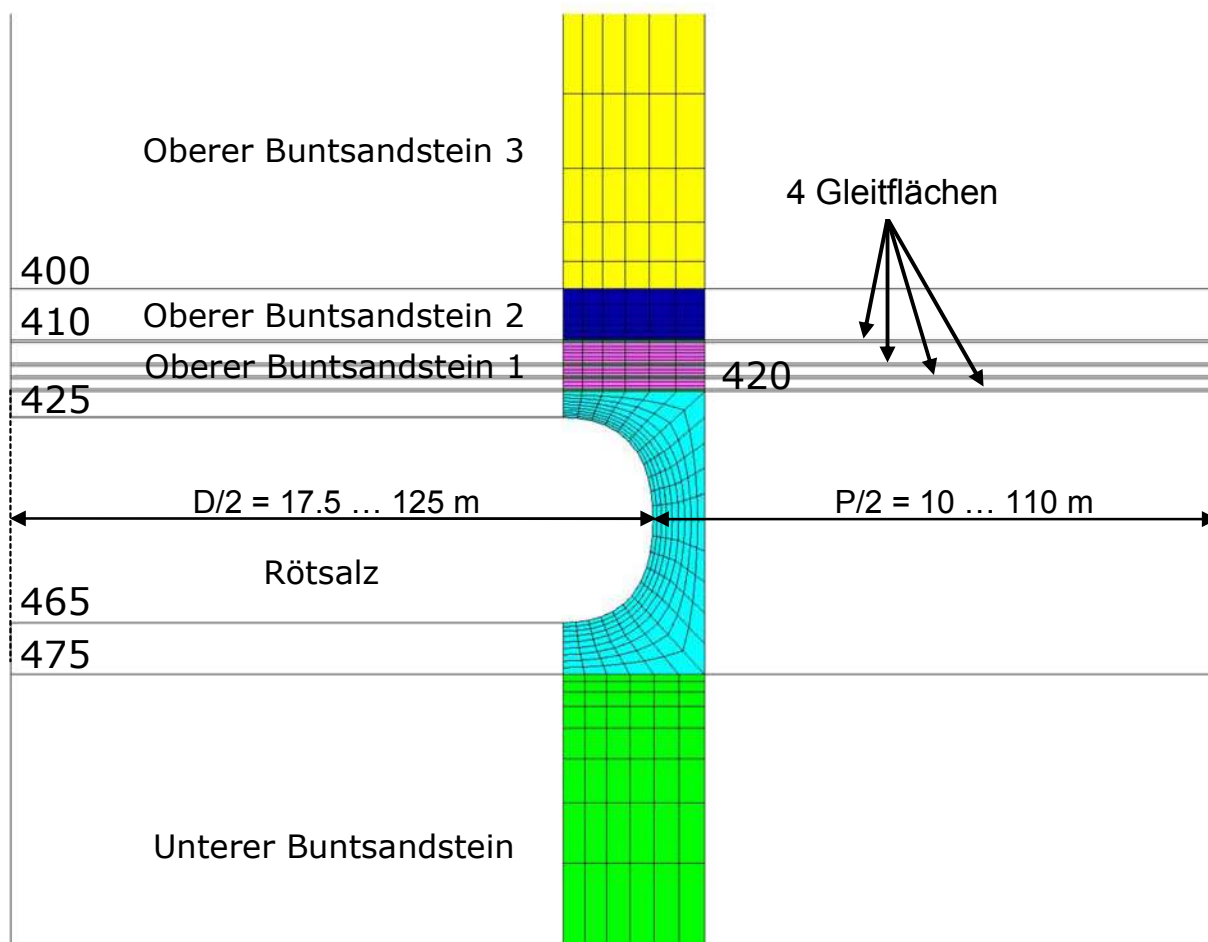


Abbildung 10: Fall 2: Kavernenhöhe 40 m, geklüfteter Anhydrit (Ausschnitt FE-Netz)

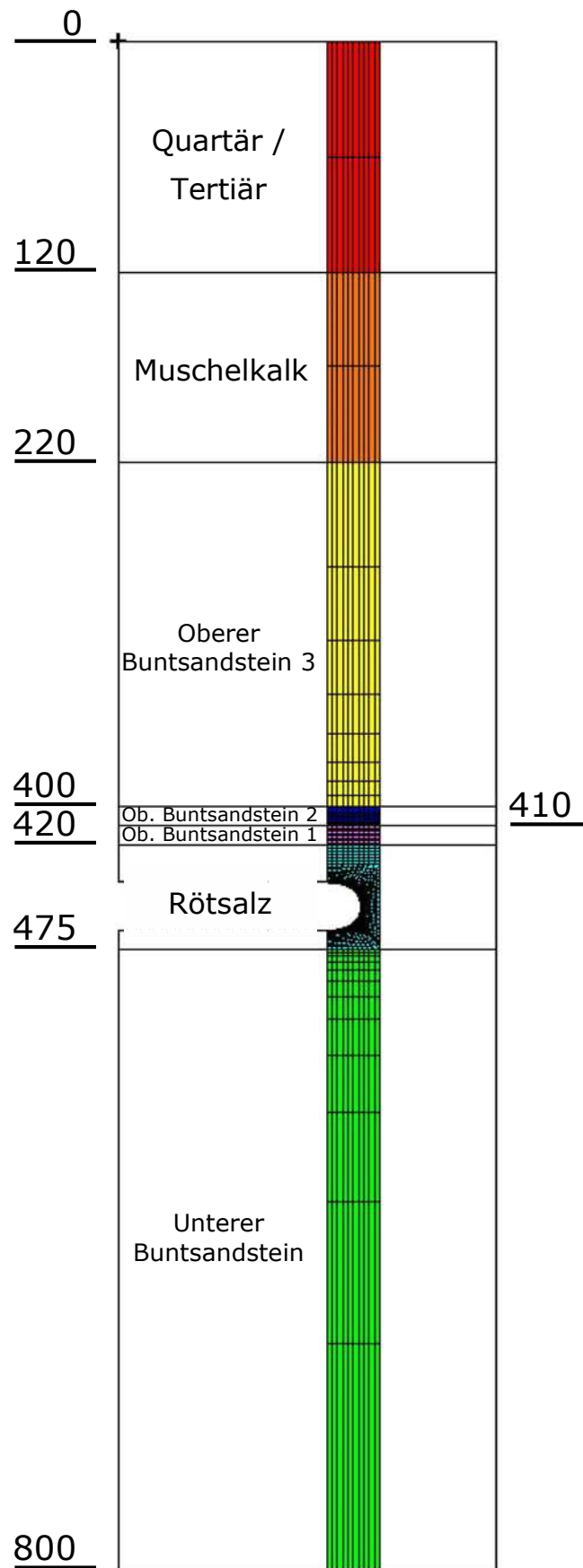


Abbildung 11: Fall 3: Kavernenhöhe 25 m, kompakter Anhydrit (gesamtes FE-Netz)

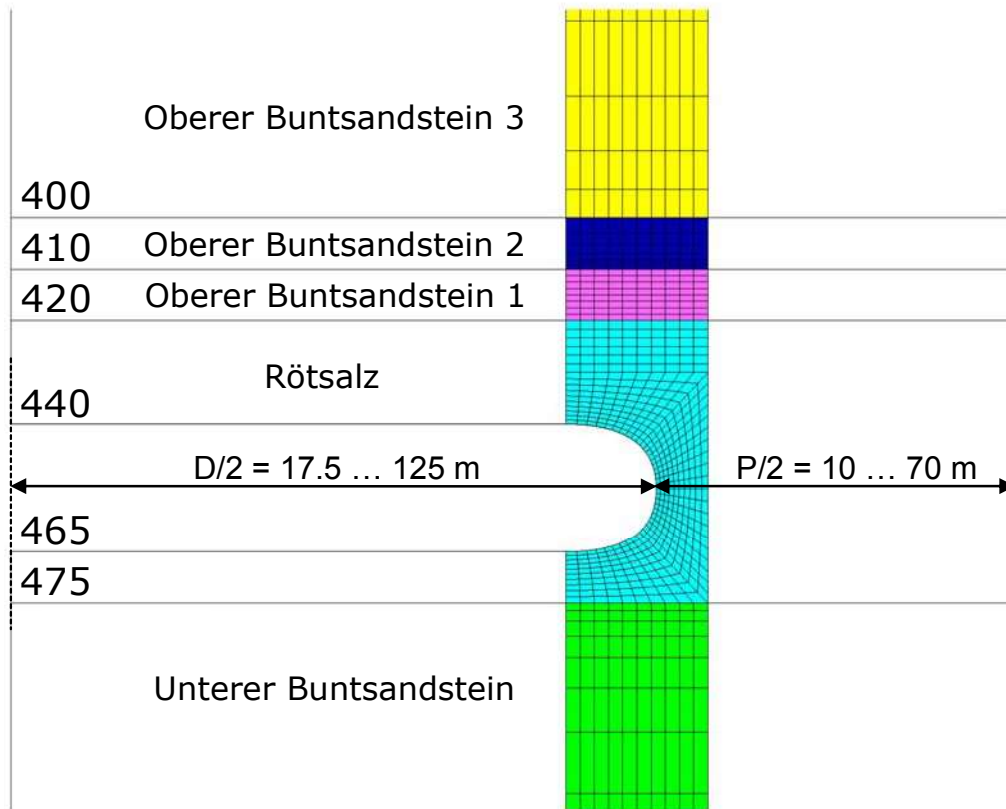


Abbildung 12: Fall 3: Kavernenhöhe 25 m, kompakter Anhydrit (Ausschnitt FE-Netz)

7 Ergebnisse

7.1 Konzept für die Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern

Zur Ermittlung der zulässigen Beanspruchung der Pfeiler wurden ausgewählte Varianten mit bestimmten Kombinationen von Kavernendurchmesser und Pfeilerbreite berechnet. Zu bestimmten Zeitpunkten (40, 100 und 200 Jahre) wurden die Ergebnisse jeweils folgendermaßen ausgewertet:

1. Bestimmung des maximalen η -Wertes (Ausnutzungsgrad) im gesamten Rötsalz, also auch im Dachbereich der Kaverne¹,
2. Ermittlung des Maximalwertes der berechneten Festigkeitsüberschreitung im 10 m mächtigen Anhydrit oberhalb des Rötsalzes und
3. Notierung des Kavernendurchmessers, der Pfeilerbreite, des maximalen η -Wertes im Rötsalz und der maximalen Festigkeitsüberschreitung im Anhydrit.

Zur Ermittlung der zulässigen Beanspruchung waren Beanspruchungsgrenzen (Kriterien) zu definieren:

- Für das Rötsalz wurden zunächst drei unterschiedliche η -Werte (25, 30 und 35%) als Beanspruchungsgrenzen gewählt.
- Für den Anhydrit wurde als Kriterium die Bruchgrenze nach dem Drucker-Prager-Kriterium ($F = 0$) angesetzt.
- Anschließend wurden mittels multivariabler Regression P-D-Kurven für das Rötsalz und den Anhydrit bestimmt. Diese P-D-Kurven kennzeichnen diejenigen Kombinationen von Kavernendurchmesser D und Pfeilerbreite P, für die die oben beschriebenen Kriterien gerade erfüllt sind.

¹ Das Maximum der η -Werte tritt i. d. R. im Übergangsbereich Kavernendach / Pfeiler an der Kavernenkontur auf und kennzeichnet punktuell die maximale Beanspruchung. Dies ist nicht zwingend mit einer Überbeanspruchung des gesamten Pfeilers gleichzusetzen, da die Ausnutzungsgrade in anderen Bereichen des Pfeilers i. d. R. wesentlich kleiner sind.

Alternativ könnte ein integraler Ausnutzungsgrad ermittelt werden, indem der Mittelwert der η -Werte z.B. in einem charakteristischen Bereich berechnet wird. Diese Vorgehensweise führt grundsätzlich zu einer günstigeren Bewertung der Pfeilerbeanspruchung und damit auch zu geringeren Mindestpfeilerbreiten.

Die erstgenannte Methode der Verwendung lokaler η -Werte ist daher konservativ.

7.2 Fall 1 (Kavernenhöhe 40 m, kompakter Anhydrit)

7.2.1 P-D-Diagramm

Abbildung 13 zeigt die ermittelten P-D-Kurven ($\eta = 25, 30$ und 35%) für das Rötsalz nach 200 Jahren. Die P-D-Kurven für 40 und 100 Jahre sind aufgrund des quasi stationären Spannungszustandes nahezu identisch und werden deshalb nicht gesondert dargestellt. Im Anhydrit treten keine Überbeanspruchungen auf, so dass die P-D-Kurve für den Anhydrit fehlt. Die für die Regressionsanalyse durchgeführten Kavernendurchmesser-Pfeilerbreiten-Kombinationen sind im Diagramm durch Einzelsymbole gekennzeichnet. Je nach Form und Farbe ergeben sich für die einzelnen Berechnungsvarianten jeweils charakteristische Beanspruchungen, die wie folgt gekennzeichnet sind:

- $\eta < 25\%$ im Rötsalz und kein Anhydritversagen ($F < 0$)
- ▲ $\eta > 25\%$ im Rötsalz und kein Anhydritversagen ($F < 0$)
- ◆ $\eta < 25\%$ im Rötsalz und Anhydritversagen ($F > 0$)
- $\eta > 25\%$ im Rötsalz und Anhydritversagen ($F > 0$)

Für den exemplarisch durch die Pfeile veranschaulichten Fall ($D = 120$ m, $\eta = 30\%$) ergibt sich eine Mindestpfeilerbreite von $P = 68$ m.

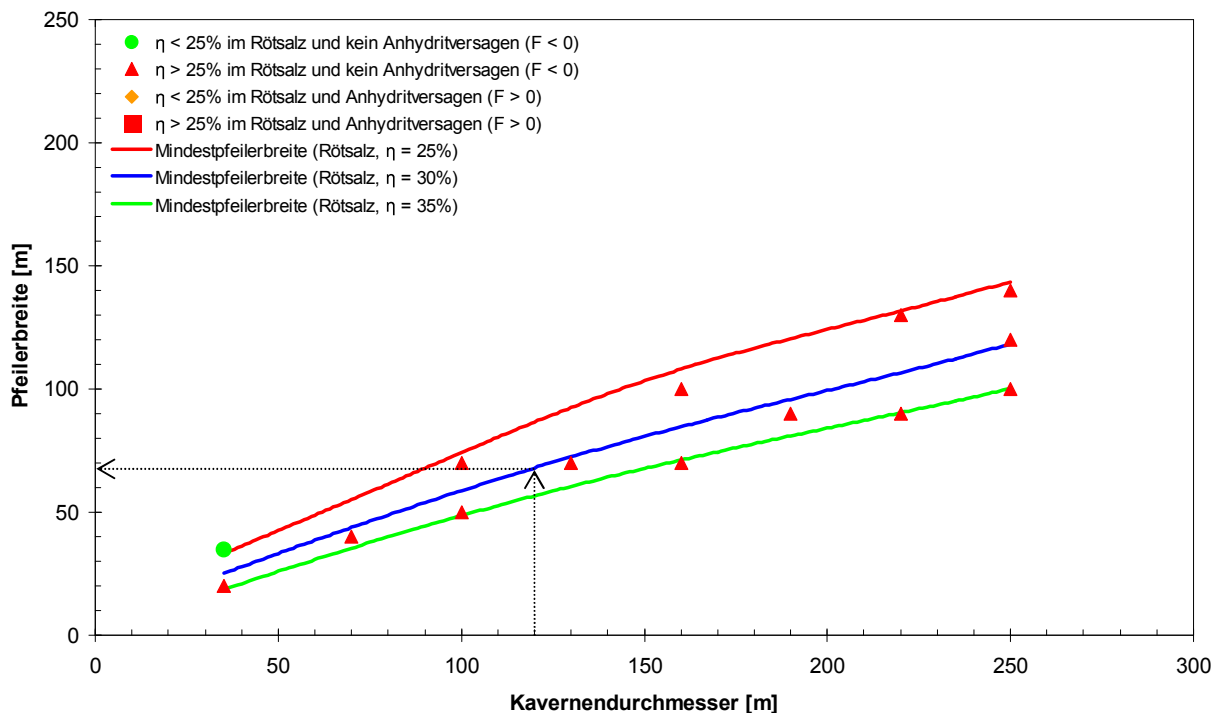


Abbildung 13: Fall 1: P-D-Kurven nach 200 Jahren

7.2.2 Spannungspunkte im Invariantendiagramm

In den Abbildungen 14 bis 18 sind sämtliche Spannungspunkte des Rötsalzes für verschiedene Kavernendurchmesser-Pfeilerbreiten-Kombinationen in Invariantendiagrammen dargestellt. Besonders auffällig ist, dass nahezu sämtliche Spannungspunkte durch Torsionsbeanspruchung gekennzeichnet sind ($-1/3 < m < +1/3$). Die Spannungspunkte, die ausgeprägte Extensions- bzw. Kompressionsbeanspruchung aufweisen, zeichnen sich durch geringe Werte von $\sqrt{II_s}$ aus (< 1 MPa).

Zur Bewertung der Standfestigkeit ist die Kurzzeitfestigkeit nach HUNSCH, SCHULZE & LANGER (1994) für $m = +1/3$ ebenfalls im Diagramm dargestellt. Der Lode-Parameter von $m = +1/3$ wurde gewählt, da sich daraus für die dargestellten Spannungen mit Lode-Parametern im Bereich von $-1/3 < m < +1/3$ konservativ eine untere Festigkeitskurve ergibt. Nur Spannungspunkte mit Torsionsbeanspruchung ($-1/3 < m < +1/3$) erreichen die aus der Kurzzeitfestigkeit für $m = +1/3$ abgeleiteten η -Kurven. Alle übrigen Spannungspunkte in Extensions- bzw. Kompressionsbeanspruchung bleiben sehr weit entfernt von den η -Kurven für $m = +1/3$ und bedürfen keiner weiteren Überprüfung bzgl. der spezifischen η -Kurven (z. B. für $m = +1$).

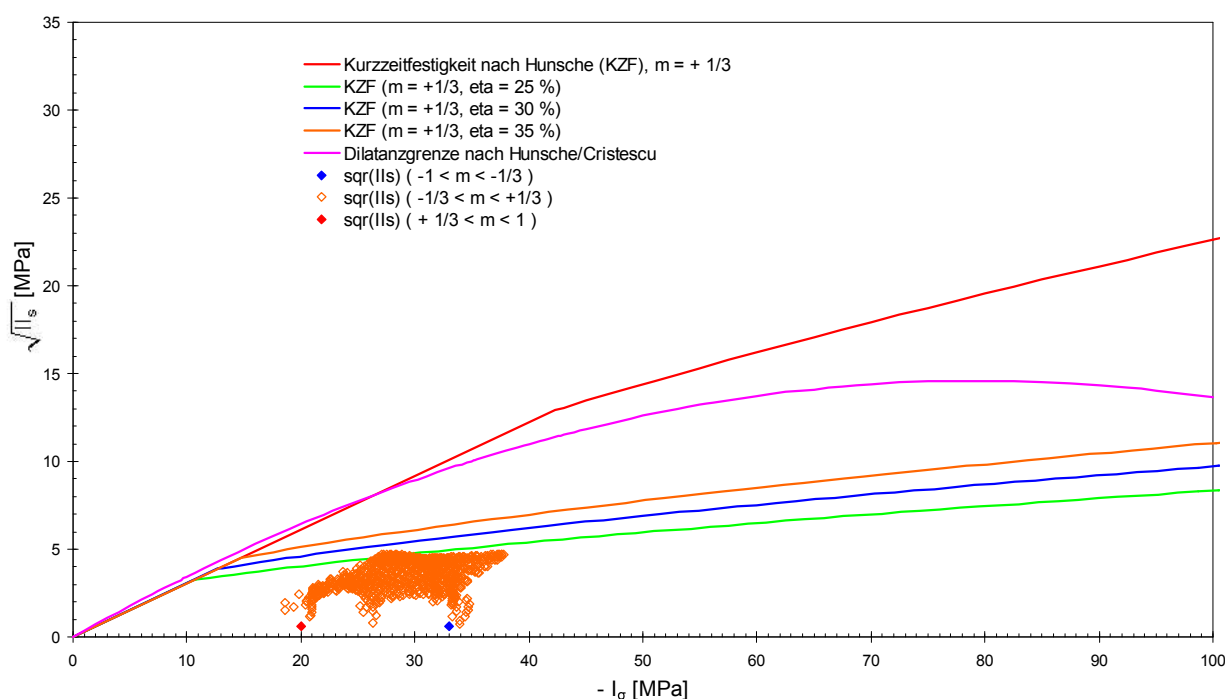


Abbildung 14: Fall 1 (D = 35 m, P = 35 m), Spannungspunkte des Rötsalzes im Invariantendiagramm nach 200 Jahren

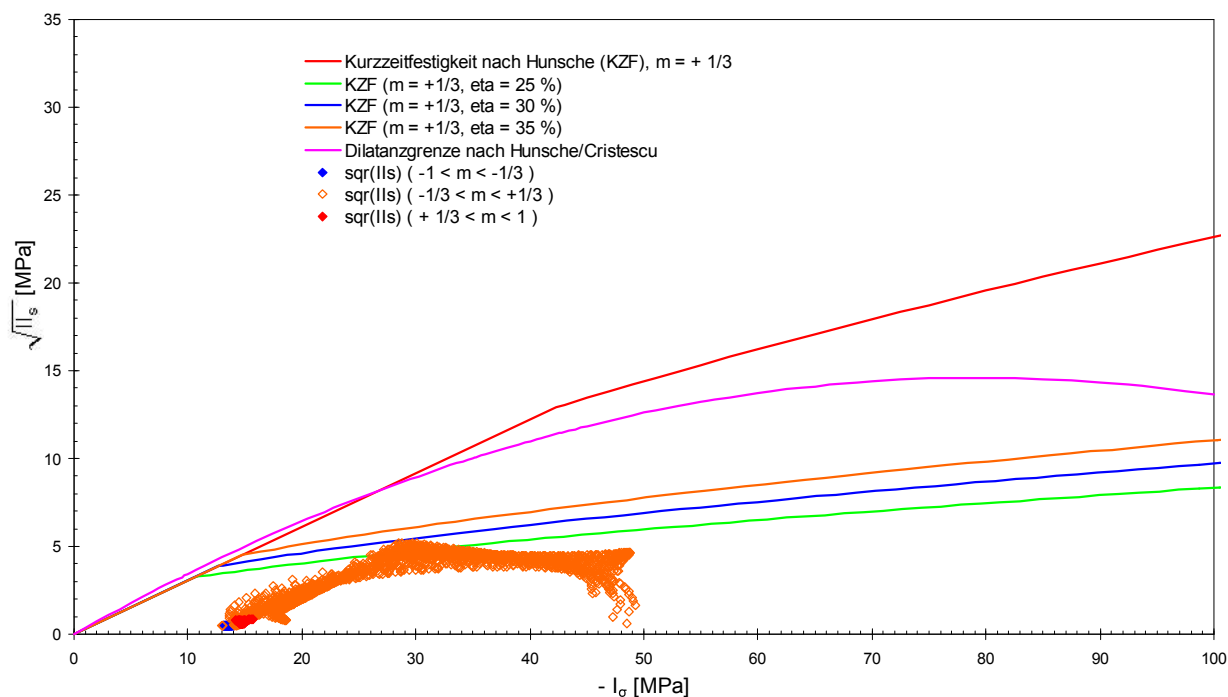


Abbildung 15: Fall 1 (D = 100 m, P = 70 m), Spannungspunkte des Rötsalzes im Invariantendiagramm nach 200 Jahren

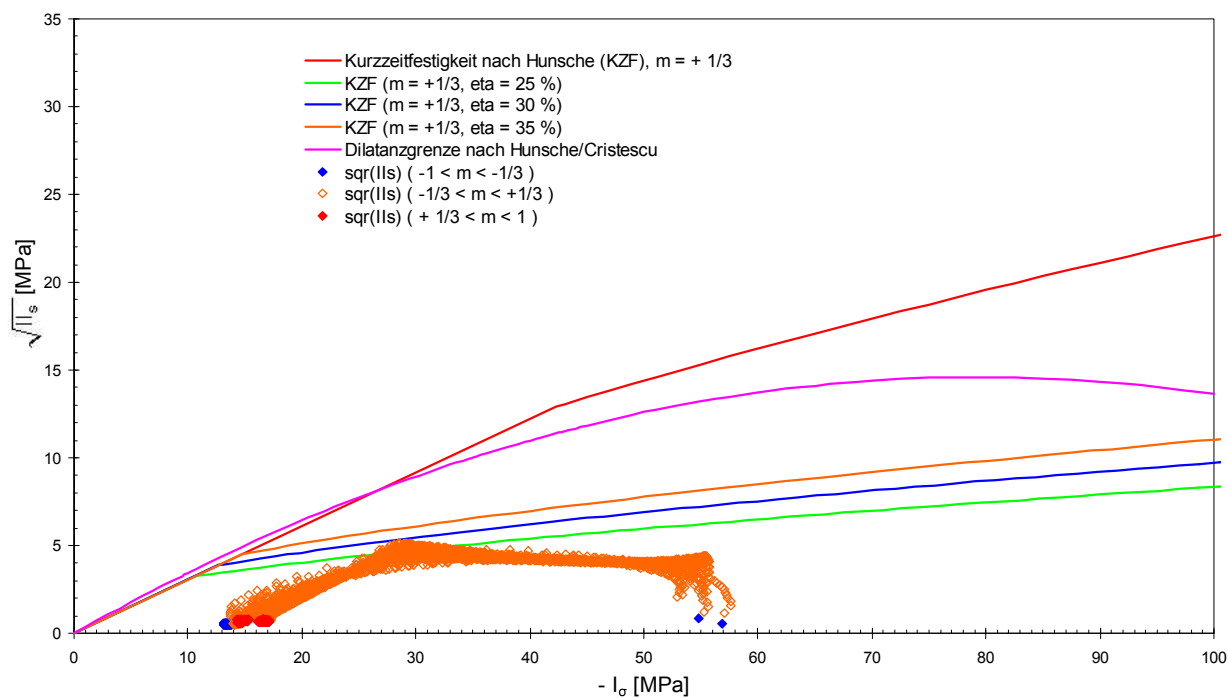


Abbildung 16: Fall 1 (D = 160 m, P = 100 m), Spannungspunkte des Rötsalzes im Invariantendiagramm nach 200 Jahren

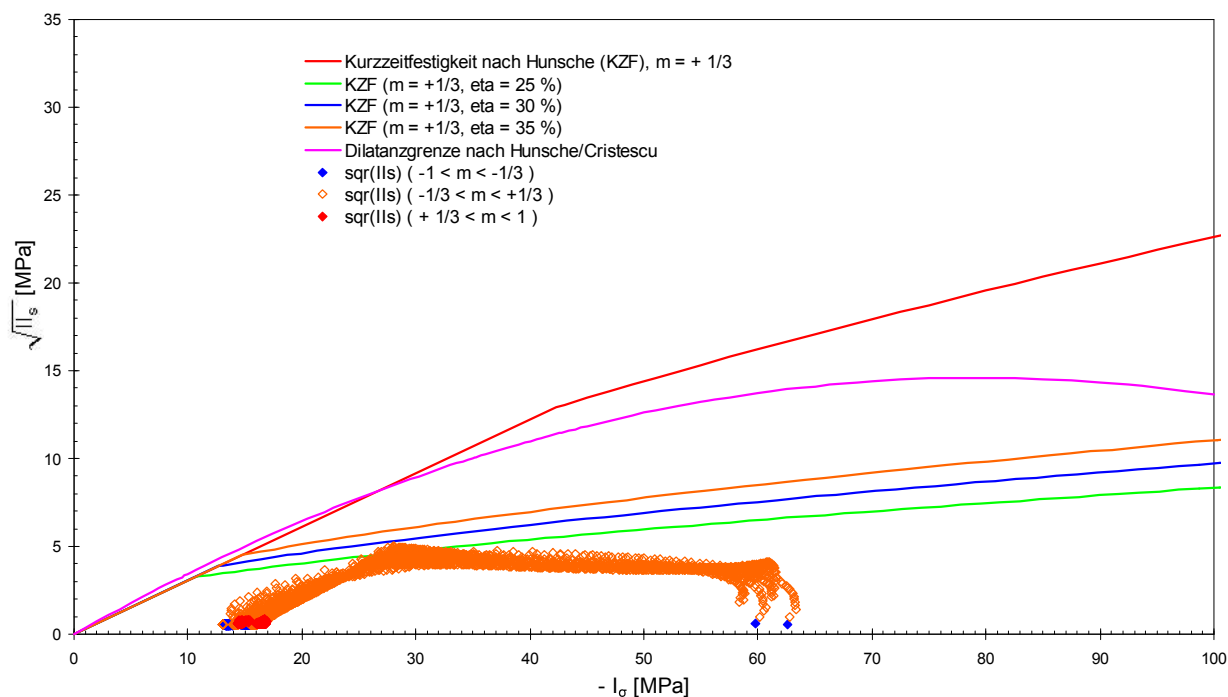


Abbildung 17: Fall 1 (D = 220 m, P = 130 m), Spannungspunkte des Rötsalzes im Invariantendiagramm nach 200 Jahren

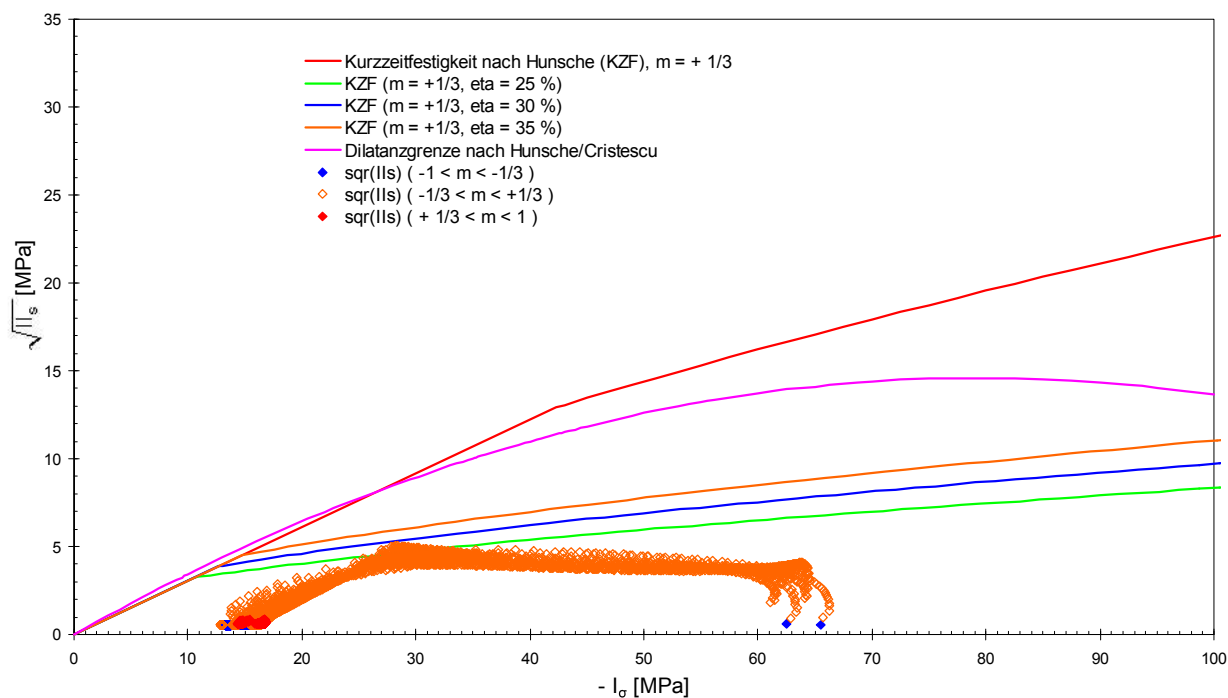


Abbildung 18: Fall 1 (D = 250 m, P = 140 m), Spannungspunkte des Rötsalzes im Invariantendiagramm nach 200 Jahren

7.3 Fall 2 (Kavernenhöhe 40 m, geklüfteter Anhydrit)

7.3.1 P-D-Diagramm

Abbildung 19 zeigt die P-D-Kurven für das Rötsalz ($\eta = 25, 30$ und 35%) sowie die P-D-Kurve für den Anhydrit ($F = 0$) nach 40 Jahren. Eine Überbeanspruchung des Anhydrits tritt über dem Pfeiler an der Oberkante der unteren Anhydritlage auf und fällt durch die spezielle Modellierung der Klüfte sehr ungünstig aus. So wären große Pfeilerbreiten nötig, um hier ein lokales Anhydritversagen auszuschließen. Trotz der Überbeanspruchung des Anhydrits bleibt die Standfestigkeit des Rötsalzpfeilers erhalten. Die beiden oberen Anhydritlagen weisen aufgrund der modellierten dicken und weichen Gleitflächen keine Überbeanspruchung auf. Im Vergleich zu Fall 1 (kompakter Anhydrit, Abbildung 13) ergeben sich nur wenig veränderte P-D-Kurven für das Steinsalz.

Abbildung 20 zeigt die P-D-Kurven für das Rötsalz ($\eta = 25, 30$ und 35%) sowie die P-D-Kurve für den Anhydrit ($F = 0$) nach 100 Jahren. Hier wird deutlich, dass mit fortschreitender Zeit im Anhydrit weitere Spannungen akkumuliert werden und zu einer höheren Beanspruchung führen, so dass nach 100 Jahren noch größere Pfeilerbreiten zur Vermeidung eines Anhydritversagens als für den Zeitpunkt 40 Jahre gewählt werden müssten. Die P-D-Kurven für das Rötsalz ändern sich nicht.

Nach 200 Jahren (Abbildung 21) ergibt sich ebenfalls eine weitere Vergrößerung der Mindestpfeilerbreite durch weiter zunehmende Anhydritbeanspruchung. Die P-D-Kurven für das Rötsalz bleiben unverändert.

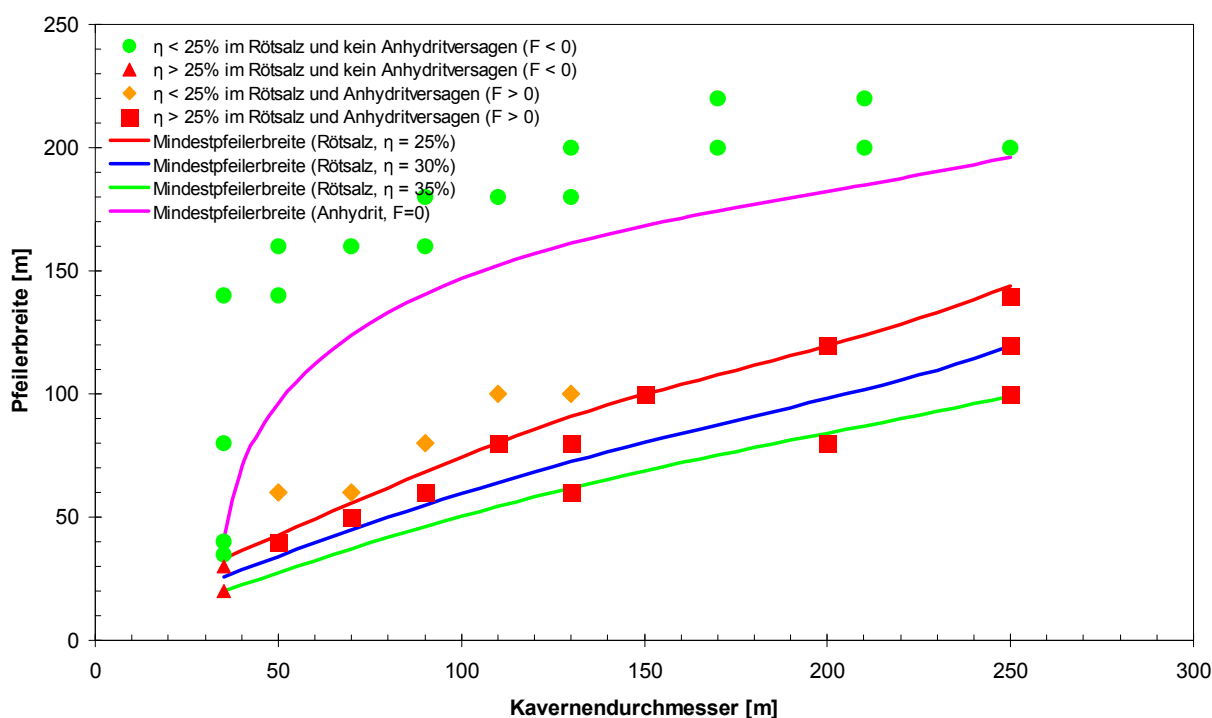


Abbildung 19: Fall 2: P-D-Kurven nach 40 Jahren

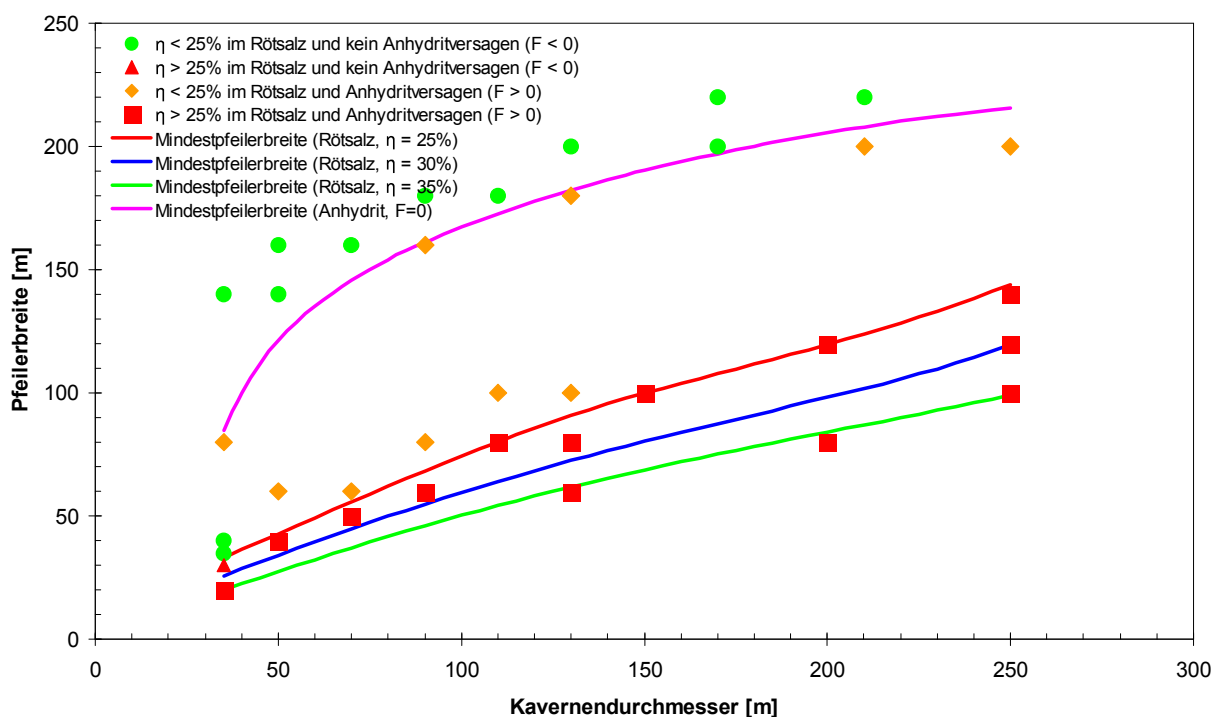


Abbildung 20: Fall 2: P-D-Kurven nach 100 Jahren

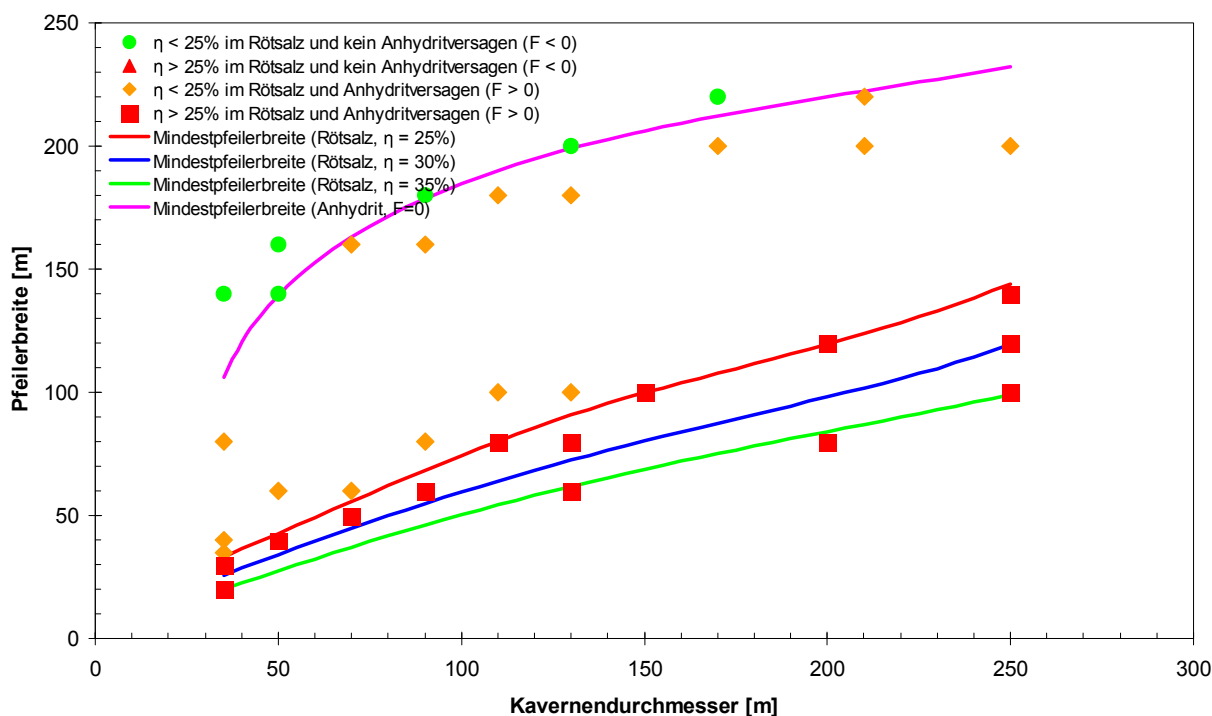


Abbildung 21: Fall 2: P-D-Kurven nach 200 Jahren

7.4 Fall 3 (Kavernenhöhe 25 m, kompakter Anhydrit)

7.4.1 P-D-Diagramm

Abbildung 22 zeigt die ermittelten P-D-Kurven ($\eta = 25, 30$ und 35%) für das Rötssalz nach 200 Jahren. Die P-D-Kurven für 40 und 100 Jahre sind aufgrund des quasi stationären Spannungszustandes nahezu identisch und werden deshalb nicht gesondert dargestellt. Im Anhydrit treten keine Überbeanspruchungen auf, so dass die P-D-Kurve für den Anhydrit fehlt. Die sich aus den P-D-Kurven für das Rötssalz ergebenden Mindestpfeilerbreiten fallen im Vergleich zu Fall 1 (Kavernenhöhe 40 m, kompakter Anhydrit) um ca. 10 bis 20 m geringer aus.

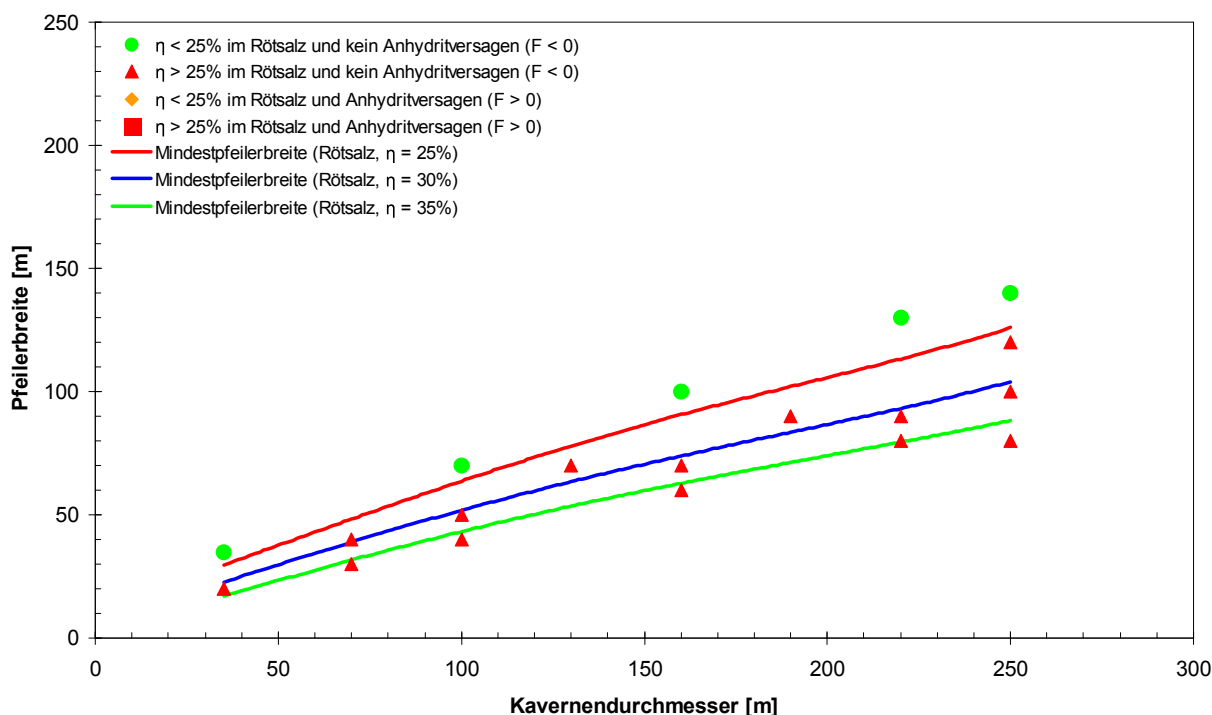


Abbildung 22: Fall 3: P-D-Kurven nach 200 Jahren

7.5 P-D-Tabellen zur Ermittlung der Mindestpfeilerbreiten

In Tabelle 3 sind die zuvor für das Rötssalz ermittelten P-D-Werte für die relevanten Fälle zusammengestellt: Die Mindestpfeilerbreite ist als Funktion des Kavernendurchmessers D ($35 \leq D \leq 250$ m), der Kavernenhöhe H (25 oder 40 m) und des Ausnutzungsgrades η (25, 30 oder 35%) ablesbar. Zusätzlich ist der zugehörige Abbaugrad ψ [%] angegeben, der den Quotienten aus der Kavernengrundfläche und der Gesamtfläche angibt. Bei den hier durchgeführten Berechnungen ergibt sich der Abbaugrad aus dem Kavernendurchmesser D und der Pfeilerbreite P wie folgt:

$$\psi = 100 \cdot D / (D+P) \quad (7.1)$$

Tabelle 3: P-D-Tabelle (Rötsalz, $\eta = 25, 30$ und 35%), Kavernenhöhe 40 oder 25 m, kompakter Anhydrit

Durchmesser [m]	Kavernenhöhe 40 m						Kavernenhöhe 25 m					
	$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$		$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$	
	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]
35	33.1	51.4	25.1	58.2	18.5	65.4	29.6	54.2	22.6	60.8	16.7	67.6
36	33.7	51.6	25.6	58.4	19.0	65.4	30.1	54.5	23.1	60.9	17.2	67.7
37	34.4	51.8	26.2	58.6	19.5	65.4	30.6	54.7	23.6	61.1	17.6	67.7
38	35.0	52.1	26.7	58.7	20.0	65.5	31.2	54.9	24.0	61.2	18.1	67.8
39	35.6	52.3	27.3	58.8	20.5	65.5	31.7	55.2	24.5	61.4	18.5	67.8
40	36.2	52.5	27.8	59.0	21.0	65.5	32.2	55.4	25.0	61.5	19.0	67.8
41	36.9	52.7	28.4	59.1	21.5	65.6	32.8	55.6	25.5	61.7	19.4	67.9
42	37.5	52.8	28.9	59.2	22.0	65.6	33.3	55.8	26.0	61.8	19.8	67.9
43	38.1	53.0	29.4	59.4	22.5	65.6	33.9	55.9	26.4	61.9	20.3	68.0
44	38.7	53.2	30.0	59.5	23.0	65.7	34.4	56.1	26.9	62.1	20.7	68.0
45	39.4	53.3	30.5	59.6	23.5	65.7	34.9	56.3	27.4	62.2	21.1	68.0
46	40.0	53.5	31.1	59.7	24.0	65.7	35.5	56.5	27.9	62.3	21.6	68.1
47	40.6	53.6	31.6	59.8	24.5	65.8	36.0	56.6	28.3	62.4	22.0	68.1
48	41.2	53.8	32.1	59.9	24.9	65.8	36.5	56.8	28.8	62.5	22.4	68.2
49	41.9	53.9	32.7	60.0	25.4	65.8	37.1	56.9	29.3	62.6	22.9	68.2
50	42.5	54.1	33.2	60.1	25.9	65.9	37.6	57.1	29.7	62.7	23.3	68.2
51	43.1	54.2	33.7	60.2	26.4	65.9	38.2	57.2	30.2	62.8	23.7	68.3
52	43.8	54.3	34.3	60.3	26.9	65.9	38.7	57.3	30.7	62.9	24.1	68.3
53	44.4	54.4	34.8	60.4	27.4	66.0	39.2	57.5	31.1	63.0	24.6	68.3
54	45.0	54.5	35.3	60.4	27.8	66.0	39.8	57.6	31.6	63.1	25.0	68.4
55	45.6	54.6	35.9	60.5	28.3	66.0	40.3	57.7	32.1	63.2	25.4	68.4
56	46.3	54.8	36.4	60.6	28.8	66.0	40.8	57.8	32.5	63.3	25.8	68.4
57	46.9	54.9	36.9	60.7	29.3	66.1	41.4	58.0	33.0	63.3	26.3	68.5
58	47.5	55.0	37.5	60.8	29.7	66.1	41.9	58.1	33.5	63.4	26.7	68.5
59	48.2	55.1	38.0	60.8	30.2	66.1	42.4	58.2	33.9	63.5	27.1	68.5
60	48.8	55.1	38.5	60.9	30.7	66.2	43.0	58.3	34.4	63.6	27.5	68.6
61	49.4	55.2	39.0	61.0	31.2	66.2	43.5	58.4	34.8	63.6	27.9	68.6
62	50.1	55.3	39.6	61.0	31.6	66.2	44.0	58.5	35.3	63.7	28.3	68.6
63	50.7	55.4	40.1	61.1	32.1	66.2	44.5	58.6	35.8	63.8	28.8	68.7
64	51.3	55.5	40.6	61.2	32.6	66.3	45.1	58.7	36.2	63.9	29.2	68.7
65	52.0	55.6	41.1	61.2	33.0	66.3	45.6	58.8	36.7	63.9	29.6	68.7
66	52.6	55.7	41.7	61.3	33.5	66.3	46.1	58.9	37.1	64.0	30.0	68.8
67	53.2	55.7	42.2	61.4	34.0	66.4	46.7	58.9	37.6	64.1	30.4	68.8
68	53.9	55.8	42.7	61.4	34.4	66.4	47.2	59.0	38.0	64.1	30.8	68.8
69	54.5	55.9	43.2	61.5	34.9	66.4	47.7	59.1	38.5	64.2	31.2	68.9
70	55.1	55.9	43.7	61.5	35.4	66.4	48.2	59.2	38.9	64.3	31.6	68.9
71	55.8	56.0	44.3	61.6	35.8	66.5	48.8	59.3	39.4	64.3	32.0	68.9
72	56.4	56.1	44.8	61.7	36.3	66.5	49.3	59.4	39.8	64.4	32.4	68.9
73	57.0	56.1	45.3	61.7	36.7	66.5	49.8	59.4	40.3	64.5	32.8	69.0
74	57.7	56.2	45.8	61.8	37.2	66.6	50.3	59.5	40.7	64.5	33.2	69.0
75	58.3	56.3	46.3	61.8	37.6	66.6	50.9	59.6	41.1	64.6	33.6	69.0
76	58.9	56.3	46.8	61.9	38.1	66.6	51.4	59.7	41.6	64.6	34.0	69.1
77	59.6	56.4	47.3	61.9	38.5	66.6	51.9	59.7	42.0	64.7	34.4	69.1
78	60.2	56.4	47.9	62.0	39.0	66.7	52.4	59.8	42.5	64.7	34.8	69.1
79	60.8	56.5	48.4	62.0	39.4	66.7	52.9	59.9	42.9	64.8	35.2	69.2
80	61.5	56.5	48.9	62.1	39.9	66.7	53.5	59.9	43.3	64.9	35.6	69.2
81	62.1	56.6	49.4	62.1	40.3	66.8	54.0	60.0	43.8	64.9	36.0	69.2
82	62.8	56.6	49.9	62.2	40.8	66.8	54.5	60.1	44.2	65.0	36.4	69.3
83	63.4	56.7	50.4	62.2	41.2	66.8	55.0	60.1	44.6	65.0	36.8	69.3
84	64.0	56.7	50.9	62.3	41.7	66.8	55.5	60.2	45.1	65.1	37.2	69.3
85	64.7	56.8	51.4	62.3	42.1	66.9	56.0	60.3	45.5	65.1	37.5	69.4
86	65.3	56.8	51.9	62.4	42.6	66.9	56.6	60.3	45.9	65.2	37.9	69.4
87	65.9	56.9	52.4	62.4	43.0	66.9	57.1	60.4	46.4	65.2	38.3	69.4
88	66.6	56.9	52.9	62.5	43.4	67.0	57.6	60.4	46.8	65.3	38.7	69.5
89	67.2	57.0	53.4	62.5	43.9	67.0	58.1	60.5	47.2	65.3	39.1	69.5

Tabelle 3 (Forts.): P-D-Tabelle (Rötsalz, $\eta = 25, 30$ und 35%), Kavernenhöhe 40 oder 25 m, kompakter Anhydrit

Durchmesser [m]	Kavernenhöhe 40 m						Kavernenhöhe 25 m					
	$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$		$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$	
	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]
101	74.8	57.4	59.2	63.0	49.0	67.3	64.2	61.2	52.2	65.9	43.5	69.9
102	75.5	57.5	59.7	63.1	49.4	67.4	64.6	61.2	52.6	66.0	43.9	69.9
103	76.1	57.5	60.2	63.1	49.8	67.4	65.1	61.3	53.0	66.0	44.3	69.9
104	76.7	57.5	60.7	63.2	50.2	67.4	65.6	61.3	53.4	66.1	44.6	70.0
105	77.3	57.6	61.1	63.2	50.7	67.5	66.1	61.4	53.8	66.1	45.0	70.0
106	78.0	57.6	61.6	63.2	51.1	67.5	66.6	61.4	54.2	66.2	45.3	70.0
107	78.6	57.7	62.1	63.3	51.5	67.5	67.1	61.5	54.6	66.2	45.7	70.1
108	79.2	57.7	62.5	63.3	51.9	67.5	67.6	61.5	55.0	66.2	46.1	70.1
109	79.8	57.7	63.0	63.4	52.3	67.6	68.1	61.6	55.4	66.3	46.4	70.1
110	80.5	57.8	63.5	63.4	52.7	67.6	68.6	61.6	55.8	66.3	46.8	70.2
111	81.1	57.8	63.9	63.5	53.1	67.6	69.1	61.6	56.2	66.4	47.1	70.2
112	81.7	57.8	64.4	63.5	53.5	67.7	69.5	61.7	56.6	66.4	47.5	70.2
113	82.3	57.9	64.9	63.5	53.9	67.7	70.0	61.7	57.0	66.5	47.8	70.3
114	82.9	57.9	65.3	63.6	54.3	67.7	70.5	61.8	57.4	66.5	48.2	70.3
115	83.6	57.9	65.8	63.6	54.7	67.8	71.0	61.8	57.8	66.6	48.5	70.3
116	84.2	57.9	66.2	63.7	55.1	67.8	71.5	61.9	58.2	66.6	48.8	70.4
117	84.8	58.0	66.7	63.7	55.5	67.8	71.9	61.9	58.6	66.6	49.2	70.4
118	85.4	58.0	67.1	63.7	55.9	67.9	72.4	62.0	58.9	66.7	49.5	70.4
119	86.0	58.0	67.6	63.8	56.3	67.9	72.9	62.0	59.3	66.7	49.9	70.5
120	86.6	58.1	68.0	63.8	56.7	67.9	73.3	62.1	59.7	66.8	50.2	70.5
121	87.2	58.1	68.5	63.9	57.1	68.0	73.8	62.1	60.1	66.8	50.5	70.5
122	87.8	58.1	68.9	63.9	57.5	68.0	74.3	62.2	60.5	66.9	50.9	70.6
123	88.4	58.2	69.4	63.9	57.8	68.0	74.7	62.2	60.8	66.9	51.2	70.6
124	89.0	58.2	69.8	64.0	58.2	68.0	75.2	62.2	61.2	66.9	51.6	70.6
125	89.6	58.2	70.3	64.0	58.6	68.1	75.7	62.3	61.6	67.0	51.9	70.7
126	90.2	58.3	70.7	64.1	59.0	68.1	76.1	62.3	62.0	67.0	52.2	70.7
127	90.8	58.3	71.1	64.1	59.4	68.1	76.6	62.4	62.3	67.1	52.5	70.7
128	91.4	58.4	71.6	64.1	59.8	68.2	77.0	62.4	62.7	67.1	52.9	70.8
129	91.9	58.4	72.0	64.2	60.1	68.2	77.5	62.5	63.1	67.2	53.2	70.8
130	92.5	58.4	72.4	64.2	60.5	68.2	78.0	62.5	63.4	67.2	53.5	70.8
131	93.1	58.5	72.9	64.3	60.9	68.3	78.4	62.6	63.8	67.2	53.9	70.9
132	93.7	58.5	73.3	64.3	61.3	68.3	78.9	62.6	64.2	67.3	54.2	70.9
133	94.2	58.5	73.7	64.3	61.6	68.3	79.3	62.6	64.5	67.3	54.5	70.9
134	94.8	58.6	74.2	64.4	62.0	68.4	79.7	62.7	64.9	67.4	54.8	71.0
135	95.4	58.6	74.6	64.4	62.4	68.4	80.2	62.7	65.3	67.4	55.1	71.0
136	95.9	58.6	75.0	64.5	62.7	68.4	80.6	62.8	65.6	67.5	55.5	71.0
137	96.5	58.7	75.4	64.5	63.1	68.5	81.1	62.8	66.0	67.5	55.8	71.1
138	97.0	58.7	75.8	64.5	63.5	68.5	81.5	62.9	66.3	67.5	56.1	71.1
139	97.6	58.8	76.3	64.6	63.8	68.5	81.9	62.9	66.7	67.6	56.4	71.1
140	98.1	58.8	76.7	64.6	64.2	68.6	82.4	63.0	67.0	67.6	56.7	71.2
141	98.6	58.8	77.1	64.7	64.6	68.6	82.8	63.0	67.4	67.7	57.0	71.2
142	99.2	58.9	77.5	64.7	64.9	68.6	83.2	63.0	67.8	67.7	57.4	71.2
143	99.7	58.9	77.9	64.7	65.3	68.7	83.7	63.1	68.1	67.7	57.7	71.3
144	100.2	59.0	78.3	64.8	65.7	68.7	84.1	63.1	68.5	67.8	58.0	71.3
145	100.7	59.0	78.7	64.8	66.0	68.7	84.5	63.2	68.8	67.8	58.3	71.3
146	101.3	59.0	79.1	64.8	66.4	68.7	84.9	63.2	69.1	67.9	58.6	71.4
147	101.8	59.1	79.6	64.9	66.7	68.8	85.4	63.3	69.5	67.9	58.9	71.4
148	102.3	59.1	80.0	64.9	67.1	68.8	85.8	63.3	69.8	67.9	59.2	71.4
149	102.8	59.2	80.4	65.0	67.4	68.8	86.2	63.4	70.2	68.0	59.5	71.5
150	103.3	59.2	80.8	65.0	67.8	68.9	86.6	63.4	70.5	68.0	59.8	71.5
151	103.8	59.3	81.2	65.0	68.1	68.9	87.0	63.4	70.9	68.1	60.1	71.5
152	104.3	59.3	81.6	65.1	68.5	68.9	87.4	63.5	71.2	68.1	60.4	71.6
153	104.8	59.4	82.0	65.1	68.8	69.0	87.8	63.5	71.5	68.1	60.7	71.6
154	105.3	59.4	82.4	65.2	69.2	69.0	88.2	63.6	71.9	68.2	61.0	71.6
155	105.7	59.4	82.7	65.2	69.5	69.0	88.7	63.6	72.2	68.2	61.3	71.7

Tabelle 3 (Forts.): P-D-Tabelle (Rötsalz, $\eta = 25, 30$ und 35%), Kavernenhöhe 40 oder 25 m, kompakter Anhydrit

Durchmesser [m]	Kavernenhöhe 40 m						Kavernenhöhe 25 m					
	$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$		$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$	
	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]
167	111.2	60.0	87.4	65.7	73.6	69.4	93.4	64.1	76.2	68.7	64.8	72.0
168	111.6	60.1	87.7	65.7	73.9	69.4	93.8	64.2	76.5	68.7	65.1	72.1
169	112.1	60.1	88.1	65.7	74.2	69.5	94.2	64.2	76.8	68.7	65.4	72.1
170	112.5	60.2	88.5	65.8	74.6	69.5	94.6	64.3	77.2	68.8	65.7	72.1
171	112.9	60.2	88.9	65.8	74.9	69.5	94.9	64.3	77.5	68.8	66.0	72.2
172	113.3	60.3	89.2	65.8	75.2	69.6	95.3	64.3	77.8	68.9	66.3	72.2
173	113.7	60.3	89.6	65.9	75.5	69.6	95.7	64.4	78.1	68.9	66.5	72.2
174	114.2	60.4	90.0	65.9	75.9	69.6	96.1	64.4	78.5	68.9	66.8	72.3
175	114.6	60.4	90.4	65.9	76.2	69.7	96.5	64.5	78.8	69.0	67.1	72.3
176	115.0	60.5	90.7	66.0	76.5	69.7	96.8	64.5	79.1	69.0	67.4	72.3
177	115.4	60.5	91.1	66.0	76.8	69.7	97.2	64.5	79.4	69.0	67.7	72.3
178	115.8	60.6	91.5	66.1	77.2	69.8	97.6	64.6	79.7	69.1	67.9	72.4
179	116.2	60.6	91.8	66.1	77.5	69.8	98.0	64.6	80.0	69.1	68.2	72.4
180	116.6	60.7	92.2	66.1	77.8	69.8	98.3	64.7	80.4	69.1	68.5	72.4
181	117.0	60.7	92.6	66.2	78.1	69.8	98.7	64.7	80.7	69.2	68.8	72.5
182	117.4	60.8	92.9	66.2	78.5	69.9	99.1	64.8	81.0	69.2	69.1	72.5
183	117.8	60.8	93.3	66.2	78.8	69.9	99.4	64.8	81.3	69.2	69.3	72.5
184	118.2	60.9	93.7	66.3	79.1	69.9	99.8	64.8	81.6	69.3	69.6	72.5
185	118.6	60.9	94.0	66.3	79.4	70.0	100.2	64.9	82.0	69.3	69.9	72.6
186	118.9	61.0	94.4	66.3	79.7	70.0	100.6	64.9	82.3	69.3	70.2	72.6
187	119.3	61.0	94.7	66.4	80.0	70.0	100.9	64.9	82.6	69.4	70.5	72.6
188	119.7	61.1	95.1	66.4	80.4	70.1	101.3	65.0	82.9	69.4	70.7	72.7
189	120.1	61.1	95.5	66.4	80.7	70.1	101.7	65.0	83.2	69.4	71.0	72.7
190	120.5	61.2	95.8	66.5	81.0	70.1	102.0	65.1	83.5	69.5	71.3	72.7
191	120.9	61.2	96.2	66.5	81.3	70.1	102.4	65.1	83.9	69.5	71.6	72.7
192	121.2	61.3	96.5	66.5	81.6	70.2	102.8	65.1	84.2	69.5	71.8	72.8
193	121.6	61.3	96.9	66.6	81.9	70.2	103.1	65.2	84.5	69.6	72.1	72.8
194	122.0	61.4	97.3	66.6	82.3	70.2	103.5	65.2	84.8	69.6	72.4	72.8
195	122.4	61.4	97.6	66.6	82.6	70.3	103.9	65.2	85.1	69.6	72.7	72.9
196	122.7	61.5	98.0	66.7	82.9	70.3	104.2	65.3	85.4	69.6	72.9	72.9
197	123.1	61.5	98.3	66.7	83.2	70.3	104.6	65.3	85.7	69.7	73.2	72.9
198	123.5	61.6	98.7	66.7	83.5	70.3	105.0	65.4	86.1	69.7	73.5	72.9
199	123.9	61.6	99.0	66.8	83.8	70.4	105.3	65.4	86.4	69.7	73.7	73.0
200	124.2	61.7	99.4	66.8	84.1	70.4	105.7	65.4	86.7	69.8	74.0	73.0
201	124.6	61.7	99.8	66.8	84.4	70.4	106.1	65.5	87.0	69.8	74.3	73.0
202	125.0	61.8	100.1	66.9	84.8	70.4	106.5	65.5	87.3	69.8	74.6	73.0
203	125.4	61.8	100.5	66.9	85.1	70.5	106.8	65.5	87.6	69.8	74.8	73.1
204	125.7	61.9	100.8	66.9	85.4	70.5	107.2	65.6	88.0	69.9	75.1	73.1
205	126.1	61.9	101.2	67.0	85.7	70.5	107.6	65.6	88.3	69.9	75.4	73.1
206	126.5	62.0	101.6	67.0	86.0	70.5	107.9	65.6	88.6	69.9	75.7	73.1
207	126.8	62.0	101.9	67.0	86.3	70.6	108.3	65.6	88.9	70.0	75.9	73.2
208	127.2	62.1	102.3	67.0	86.6	70.6	108.7	65.7	89.2	70.0	76.2	73.2
209	127.6	62.1	102.6	67.1	86.9	70.6	109.1	65.7	89.6	70.0	76.5	73.2
210	128.0	62.1	103.0	67.1	87.3	70.6	109.4	65.7	89.9	70.0	76.8	73.2
211	128.3	62.2	103.4	67.1	87.6	70.7	109.8	65.8	90.2	70.1	77.0	73.3
212	128.7	62.2	103.7	67.1	87.9	70.7	110.2	65.8	90.5	70.1	77.3	73.3
213	129.1	62.3	104.1	67.2	88.2	70.7	110.6	65.8	90.9	70.1	77.6	73.3
214	129.4	62.3	104.4	67.2	88.5	70.7	110.9	65.9	91.2	70.1	77.9	73.3
215	129.8	62.4	104.8	67.2	88.8	70.8	111.3	65.9	91.5	70.1	78.1	73.3
216	130.2	62.4	105.2	67.3	89.1	70.8	111.7	65.9	91.8	70.2	78.4	73.4
217	130.6	62.4	105.5	67.3	89.4	70.8	112.1	65.9	92.2	70.2	78.7	73.4
218	130.9	62.5	105.9	67.3	89.8	70.8	112.5	66.0	92.5	70.2	79.0	73.4
219	131.3	62.5	106.3	67.3	90.1	70.9	112.9	66.0	92.8	70.2	79.2	73.4
220	131.7	62.6	106.6	67.4	90.4	70.9	113.3	66.0	93.2	70.3	79.5	73.5
221	132.1	62.6	107.0	67.4	90.7	70.9	113.6	66.0	93.5	70.3	79.8	73.5

Tabelle 3 (Forts.): P-D-Tabelle (Rötsalz, $\eta = 25, 30$ und 35%), Kavernenhöhe 40 oder 25 m, kompakter Anhydrit

Durchmesser [m]	Kavernenhöhe 40 m						Kavernenhöhe 25 m					
	$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$		$\eta=25\%$		$\eta=30\%$		$\eta=35\%$	
	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]	Pfeiler- breite [m]	Abbau- grad [%]
233	136.7	63.0	111.5	67.6	94.5	71.1	118.5	66.3	97.6	70.5	83.2	73.7
234	137.1	63.1	111.9	67.6	94.8	71.2	118.9	66.3	98.0	70.5	83.5	73.7
235	137.5	63.1	112.3	67.7	95.2	71.2	119.3	66.3	98.3	70.5	83.8	73.7
236	137.9	63.1	112.7	67.7	95.5	71.2	119.7	66.3	98.7	70.5	84.1	73.7
237	138.3	63.2	113.1	67.7	95.8	71.2	120.1	66.4	99.0	70.5	84.4	73.7
238	138.7	63.2	113.5	67.7	96.1	71.2	120.6	66.4	99.4	70.5	84.7	73.8
239	139.1	63.2	113.9	67.7	96.5	71.2	121.0	66.4	99.8	70.6	85.0	73.8
240	139.5	63.2	114.3	67.7	96.8	71.3	121.4	66.4	100.1	70.6	85.3	73.8
241	139.9	63.3	114.7	67.8	97.1	71.3	121.9	66.4	100.5	70.6	85.5	73.8
242	140.3	63.3	115.1	67.8	97.5	71.3	122.3	66.4	100.9	70.6	85.8	73.8
243	140.7	63.3	115.5	67.8	97.8	71.3	122.7	66.4	101.3	70.6	86.2	73.8
244	141.1	63.4	115.9	67.8	98.1	71.3	123.2	66.5	101.6	70.6	86.5	73.8
245	141.5	63.4	116.3	67.8	98.5	71.3	123.6	66.5	102.0	70.6	86.8	73.8
246	141.9	63.4	116.7	67.8	98.8	71.3	124.1	66.5	102.4	70.6	87.1	73.9
247	142.3	63.4	117.1	67.8	99.2	71.4	124.5	66.5	102.8	70.6	87.4	73.9
248	142.8	63.5	117.6	67.8	99.5	71.4	125.0	66.5	103.2	70.6	87.7	73.9
249	143.2	63.5	118.0	67.9	99.8	71.4	125.4	66.5	103.6	70.6	88.0	73.9
250	143.6	63.5	118.4	67.9	100.2	71.4	125.9	66.5	104.0	70.6	88.3	73.9

8 Empfehlungen

Die im Abschnitt 7 ermittelten P-D-Kurven können für eine Bewertung von Pfeilern im Kavernenfeld Hengelo eingesetzt werden, sofern es sich um Pfeiler zwischen Kavernenreihen handelt. Dabei verbleibt bei der Festlegung, welche Kavernen tatsächlich in einer Reihe angeordnet sind, ein gewisser Ermessensspielraum. Da ein Versagen des überlagernden Anhydrits keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Rötsalzpfilers selbst hat, ist eine Bewertung mit den für das Steinsalz ermittelten P-D-Kurven ausreichend. Ein η -Wert von 30% liegt in der Größenordnung des bei Standsicherheitsnachweisen für Speicherkavernen als zulässig angesehenen Wertes von 25-35% (Lux 1984), so dass die BGR die Bewertung von Pfeilern mit den für $\eta = 30\%$ ermittelten P-D-Kurven empfiehlt.

Mit den P-D-Kurven ist außerdem die Planung neuer Kavernen möglich, soweit eine Anordnung in parallelen Reihen gewählt wird. Empfohlen wird auch hier die Verwendung der P-D-Kurven für $\eta = 30\%$. Da die berechneten Abbaugrade der verschiedenen Kavernendurchmesser-Pfeilerbreiten-Kombinationen (Tabelle 3) zwischen 58.2 und 67.9% ($H = 40$ m, $\eta = 30\%$) bzw. zwischen 60.8 und 70.6% ($H = 25$ m, $\eta = 30\%$) liegen, werden trotz standsicherer Pfeiler große Verformungen berechnet. Um die Senkungen an

der Geländeoberfläche zu begrenzen, muss daher der Abbaugrad ψ im neuen Teil des Kavernenfeldes auf geringere Werte begrenzt werden (EICKEMEIER & HEUSERMANN 2003). Für eine genauere Abschätzung der zu erwartenden Geländesenkungen sollten ergänzende Auslegungsberechnungen für das zukünftige Design erstellt werden.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE HANNOVER

5.1.2.e

5.1.2.e

– Direktor und Professor –

Autoren:

5.1.2.e

5.1.2.e

– Wissenschaftlicher Oberrat –

5.1.2.e

5.1.2.e

– Wissenschaftlicher Direktor –

9 Literaturverzeichnis

BEKENDAM, R. F. (1996): Subsidence over Solution Cavities in Salt in the Twenthe-Rijn Concession Area – Memoirs of the Centre for Engineering Geology in the Netherlands, No. 138. – Delft (University of Technology).

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

EICKEMEIER, R. & HEUSERMANN, S. (2003): Geomechanische Modellberechnungen zu Geländeoberflächensenkungen im Kavernenfeld Hengelo. – Hannover (BGR).

HUNSCHE, 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.