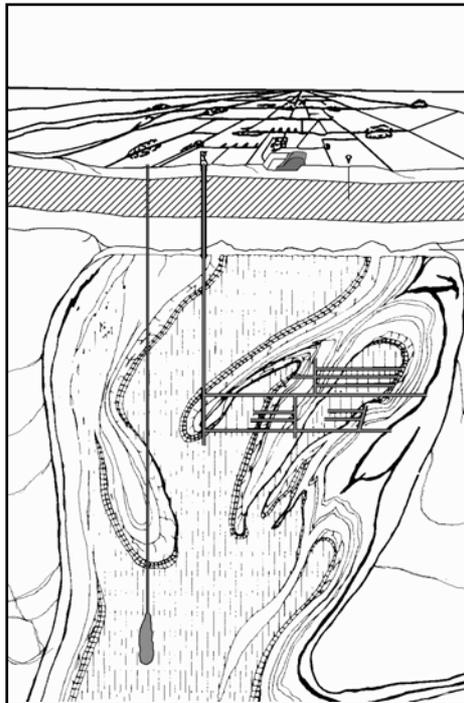


Bericht

**Entwicklung und Fundierung der Anforderung
„Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“
*Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen***



Gutachten im Auftrag des AkEnd

TU- Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, März 2002

**Professur für Deponietechnik und Geomechanik
Technische Universität Clausthal**

Bericht

**Entwicklung und Fundierung der Anforderung
„Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“
*Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen***

Gutachten im Auftrag des AkEnd

TU- Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, März 2002

(Dipl.-Ing. G.M. Lomo-Appeyh)

(Dipl.-Ing. S. Eberth)

(Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux)

Entwicklung und Fundierung der Anforderung

„Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung.....	1
2	Unterlagen	3
2.1	Projektunterlagen	3
2.2	Literatur.....	4
3	Zielsetzung und Bearbeitungsmethodik	5
4	Entwicklung der geometrischen und geomechanischen Grundlagen für die Analyse des Tragverhaltens einer exemplarischen Strecke	10
4.1	Grundlegende Annahmen.....	10
4.2	Geometrie der Strecke und des Berechnungsmodells.....	10
4.3	Einwirkungen	11
4.3.1	Geogene und technogene Einwirkungen.....	11
4.3.2	Geogene (mechanische) Einwirkungen	12
4.3.3	Technogene (thermische) Einwirkungen	12
4.4	Stoffmodelle und Bruchbedingungen	13
4.5	Gebirgseigenschaften/ Variation der Gesteinsart und der Gebirgsqualität.....	17
4.5.1	Grundsätzliche Vorgehensweise	17
4.5.2	Granitgesteine	19
4.5.3	Tongestein.....	22
4.5.4	Salzgestein	26

4.6	Primärspannungszustand/ Variation der horizontalen Primärspannungen in Abhängigkeit von der Teufe	28
4.7	Bewertungskriterien	30
5	Durchführung der Berechnungen	31
5.1	Grundsätzliche Vorgehensweise	31
5.2	Berechnungsmodell und Diskretisierung	32
6	Berechnungsergebnisse und Überprüfung der numerischen Qualität, Teufe $z = 900\text{m}$	33
6.1	Vorgehensweise	33
6.2	Granitgestein	35
6.3	Tongestein.....	37
6.4	Salzgestein	38
7	Berechnungsergebnisse und Aufarbeitung für die Bewertung/ Variation	
	der Teufenlage z	40
8	Vorschlag für die Operationalisierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ und die indikatorbezogene Ableitung von Kriterien	40
8.1	Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“	40
8.2	Indikatoren	41
8.2.1	Definition der Indikatoren.....	41
8.2.2	Spezifizierung der Indikatoren durch Kriterien	42
8.3	Rechnerische Befunde.....	44
9	Zusammenfassung und Empfehlungen für das weitere Vorgehen	49
10	Anhang	52



Entwicklung und Fundierung der Anforderung

„Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“

1 *Veranlassung und Zielsetzung*

Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat im Rahmen der Entwicklung des Auswahlverfahrens etwa zehn geowissenschaftlich-geotechnisch orientierte Anforderungen formuliert, die bei entsprechender Ausarbeitung dazu herangezogen werden sollen, für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignete Standorte in Deutschland zu identifizieren. Eine dieser an Standorte für ein Endlager zu stellenden Anforderungen ist in zunächst allgemeiner Formulierung zu beschreiben mit „**Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen**“.

Die methodische Vorgehensweise des AkEnd bei der Ausformung der einzelnen Anforderungen bis hin zu der Ableitung von quantifiziert orientierten Kriterien sieht die folgenden Entwicklungsstufen vor:

- Anforderungen,
- Eigenschaften,
- Indikatoren,
- Kriterien.

Einzelheiten hinzu sind zu entnehmen AkEnd 2. Zwischenbericht – Stand der Diskussion, August 2001, *AkEnd (2001)*.

Die Entwicklung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ ist auch in engem Zusammenhang zu sehen mit der Anforderung „Geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten“. Die weitere Herleitung und Fundierung einer Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ ist notwendig, weil in der Anforderung „Geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten“ eher die Gebirgseigenschaften, nicht aber die Beanspruchungen des Gebirges aus Auffahrung und Betrieb des Endlagerbergwerkes mit ihren Folgen für das Tragverhalten des Gebirges und natürlich auch nicht für die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität erfasst sind. Die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität nach räumlicher Ausdehnung und Intensität ist allerdings ein wesentlicher Aspekt der Gewährleistung der



Langzeit-Sicherheit in Bezug auf die Integrität der geologischen Barriere und die Leistungsfähigkeit geotechnischer Barrieren (Streckendämme, Schachtabschlussbauwerke).

Methodischer Ansatz des AkEnd ist es, potentielle Endlagerstandorte über funktional orientierte und petrographisch damit a priori nicht weiter spezifiziert formulierte Anforderungen zunächst und soweit im Auswahlverfahren möglich unabhängig von der Benennung einzelner Wirtsgesteinstypen zu identifizieren. Dennoch ist es notwendig, die einschlägige Leistungsfähigkeit verschiedener Gebirgsformationen, die gerade bei der geforderten Eigenschaft einer nur geringen Permeabilität wesentlich über die jeweiligen anstehenden Gesteinstypen definiert sind, zu ermitteln. Einengend auf die hier bei der Bearbeitung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ relevanten Sachverhalte sind von besonderer Bedeutung die Tragfähigkeit und damit in engem Zusammenhang stehend die entfestigungsbedingte Veränderung der primären Permeabilität der den technogenen Einwirkungen unterliegenden und im Rahmen des Endlagersystems als Wirts- und Barrierengestein herangezogenen Gebirgsformationen.

Die Erfahrung zeigt, dass die mit geringer Permeabilität ausgezeichneten Gebirgsformationen ein sehr unterschiedliches mechanisches Verhalten aufweisen. Durch auf charakteristische Gesteinsarten bezogene und vergleichende Berechnungen soll daher das jeweilige Tragverhalten im Hinblick auf Standfestigkeit und Gebirgsentfestigung analysiert werden. Dabei wird die Gebirgsentfestigung als Maß für die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität angesehen.

Aus den schon fortgeschrittenen internationalen Arbeiten und Forschungsprojekten im Rahmen der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen kristallisieren sich mit einer Focussierung auf deutsche Verhältnisse vornehmlich folgende Gesteinstypen als endlagergeeignet heraus, *Herrmann/ Röthemeyer (1998)*:

- *Granitgesteine*: laufende Forschungsarbeiten z.B. in Schweden (Äspö), Finnland und in der Schweiz (Felslabor Grimsel) sowie in Japan
- *Tongesteine*: Forschungsarbeiten z.B. in Frankreich (Bure) und in der Schweiz (Mont Terri)
- *Salzgesteine*: Forschungsarbeiten in den USA (WIPP Site) und in der Bundesrepublik Deutschland (Asse, Gorleben)



Die folgenden Untersuchungen sollen sich auf diese für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland relevant erscheinenden Gesteinstypen konzentrieren und es soll auf der Grundlage von generalisierten rechnerischen Befunden zumindest eine qualitative Aussage und wenn möglich auch eine quantitative Tendenz in Bezug auf das Tragverhalten dieser Gebirgsformationen sowie die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität herausgearbeitet und darauf aufbauend sollen die Bedingungen für günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen abgeleitet werden.

2 Unterlagen

2.1 Projektunterlagen

AkEnd (2001): 2. Zwischenbericht – Stand der Diskussion, BMU.

DBE (1993), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, DEA B T55, DBE, Peine;

Lux, K.-H. (1994): Gutachten zur Eignungshöflichkeit von Gorleben, TU- Clausthal;

Pircher & Partner (1999): MISES3, Benutzungshandbuch, TDV, Graz;

Lux, K.-H., Lomo-Appeyh, G. M. (2002): Datenbank Materialkennwerte Tongestein, unveröffentlicht;

JNC - Japan Nuclear Cycle Development (26.11.1999): /unter www.jnc.go.jp, link to H12 Report Website/ “H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan”, Report all-so1.pdf, dort Tab. 3.5-1, S. 293;

Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU-Clausthal (1999): Interner Laborbericht Kriechparameter;

Professur für Deponietechnik und Geomechanik TU-Clausthal (2000): Interner Laborbericht Kriechparameter;

Professur für Deponietechnik und Geomechanik TU-Clausthal (1998): Interner Laborbericht Kriechparameter;

Schweizerische Landeshydrologie und- geologie (1999): Interner Laborbericht;

BGR (1987): Interner Laborbericht



Technischer Bericht Nagra (2001): Interne Informationen.

2.2 Literatur

Herrmann, A.G., Röthemeyer, H. (1998): Langfristig sichere Deponien. Springer-Verlag. ISBN 3-540-64233-1;

Ehlert, C. (1981): Thermospannungen in Endlagern für radioaktive Abfälle. Dissertation RWTH Aachen;

Brady, B.H.G. und Brown, E.T. (1985): Rock Mechanics for Underground Minings. George Allen und Unwin Publishers Ltd., London;

Ploumen, P., Strickmann, C., Winkse, P. (1979): Untersuchungen zur Temperaturentwicklung bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Atomwirtschaft;

Lux, K.-H. (1984): Gebirgsmechanischer Entwurf und Erfahrungen im Salzkavernenbau, Enke Verlag, Stuttgart;

Lama, R.D., Vutukuri, V.S. (1978): Mechanical Properties of Rocks, Vol. II., Trans Tech, Clausthal;

Eloranta, P., Simonen, A., Johansson, E. (1992): Creep in Crystalline Rock with Application to High Level Nuclear Waste Repository Report YJT-92-10, IVO Oy, TVO Oy, ISSN-0359-578-X, Fig. 2.2, S. 4;

Ghoreychi, M. (1999): Comportement thermo- hydromécanique des argiles de l'Est et son incidence sur les ouvrages souterraines. Études pour la faisabilité des stockages des déchets radioactifs. Actes des journées scientifiques ANDRA, Nancy, 7., 8., 9. ,décembre 1999 ;

Thury, M., Bossart, P.(1999): Mont Terri Rock Laboratory- Results of the Hydrogeological and Geothermal Experiments;

Hou, Z. (1997): Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit für Untertagedeponien im Salzgebirge, Dissertation TU- Clausthal;

BGR (1999): Salzmechanik XVIII, Zusammenstellung von Veröffentlichungen der BGR über Salzmechanik, BGR, Hannover;



Hou, Z. und Lux, K.-H. (1999): A Material Model for Rock Salt including structural Damages as well as practice- oriented Application, Proceedings of 5th Conference of Mechanical Behaviour, August 1999, Bucharest

3 Zielsetzung und Bearbeitungsmethodik

Ziel der Untersuchung ist die Identifizierung von Eigenschaften/ Indikatoren und davon ausgehend dann die Ableitung von Kriterien, mit deren Hilfe die Anforderung „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ endlagerbezogen charakterisiert und nach Möglichkeit in eine quantifizierte Form überführt werden kann.

Begründung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“

Die mit der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ verbundene Zielsetzung aus geotechnischer bzw. gebirgsmechanischer Sicht besteht mit Blick auf die Gewährleistung der Langzeitsicherheit darin, im anstehenden Wirtsgebirge ein tragfähiges Grubengebäude mit Infrastrukturgrubenbauen und Abfallablagerungshohlräumen ohne nachhaltige Gefügeschädigung sowie mit möglichst geringem Aufwand an technischen Sicherungsmitteln für die vorgesehene Betriebszeit auslegen zu können. Darüber hinaus sollten sowohl durch die technogenen Einwirkungen in der Betriebszeit wie auch in der Nachbetriebszeit keine für den Erhalt der Barrierenintegrität nachteiligen mechanischen, thermischen oder hydraulischen Prozesse induziert werden. Insbesondere sollte die spätere Errichtbarkeit und Funktionsfähigkeit von geotechnischen Barrieren wie z.B. Streckendammbauwerken und Schachtverschlussbauwerken nicht beeinträchtigt werden. Daher ist eine geomechanische Situation anzustreben, bei der nach der Stilllegung des Endlagers im Lauf der Zeit die Folgewirkungen des technogenen Eingriffs in das Gebirge vermindert bzw. geheilt und schließlich bei kontinuierlichem Erhalt der Barrierenintegrität insgesamt möglichst sogar eliminiert werden. Zur Ermittlung des grundsätzlichen Tragverhaltens verschiedener Gebirgsarten bei endlagerrelevanten Einwirkungen wird diese Studie erarbeitet.



Eigenschaften

Zu einer ersten groben geomechanischen Charakterisierung der Trageigenschaften des anstehenden und unter Endlagerwirkung stehenden Gebirges werden zur Identifizierung von die Anforderung nach günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen präzisierenden Eigenschaften folgende Hypothesen formuliert:

Eine im Hinblick auf die Gewährleistung der Langzeitsicherheit geotechnisch/ gebirgsmechanisch günstige Situation liegt vor, wenn

- das Wirtsgebirge als Haupttragelement anzusehen ist,
- in den geologischen Barrieren keine die Langzeitsicherheit nachhaltig beeinträchtigenden Sekundärpermeabilitäten erzeugt werden und
- die Funktionstüchtigkeit von geotechnischen Barrieren (Querschnittsabdichtungen) durch Gebirgsentfestigung nicht über ein unvermeidbares Maß hinaus herabgesetzt wird.

Damit können zunächst zwei Indikatoren für günstige geomechanische Verhältnisse formuliert werden.

(1) Indikator "Gebirge als alleiniges Tragelement"

(1a) Sachstand

Das Gebirge wird als alleiniges Tragelement angesehen dann, wenn die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen Ausbau bei verträglichen Deformationen aufgenommen werden kann (→ kein Ausbauwiderstand, kein Verbundtragwerk Ausbau-Gebirge).

Das Gebirge wird hier als hinreichend tragfähig angesehen, wenn die aus den Einwirkungen (Lasten und Temperaturänderungen aus Gebirge und Abfall) resultierenden Beanspruchungen nicht seine Tragfähigkeit überschreiten. Die Gebirgstragfähigkeit ist erreicht, wenn nachhaltige Konturbrüche zu besorgen sind. Nachhaltige Konturbrüche wären dann zu besorgen, wenn im Grundsatz z.B. die berechnete Gebirgsbeanspruchung die angesetzte Gebirgsfestigkeit (Gesteinstyp, Gebirgsklasse) mehr als nur marginal überschreitet. Daraus folgt, dass eine erforderliche Kontursicherung z.B. durch Anker/ Maschendrahtverzug diesen Ansatz entspricht, nicht aber ein Ankerspritzbetonausbau.



Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass

- (a) *der im Felsbau bzw. im Bergbau im Rahmen von Tragwerksplanungen/ Standsicherheitsnachweisen an dieser Stelle übliche und notwendige Begriff der "Standsicherheit" hier absichtlich nicht benutzt wird, da hier keine Nachweise geführt werden und auch keine Sicherheitsmargen in diese grundsätzlichen Betrachtungen eingearbeitet sind sowie*
- (b) *der Begriff „Standfestigkeit“ bzw. „Standfest“ hier im Rahmen des Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte in einem funktional orientierten Sinn bezüglich der Erfordernisse der vorzunehmenden Kriterienableitung verwendet wird. Eine darüber hinausgehende Verwendung dieser hier gewählten Definition z. B. im Rahmen von Genehmigungsverfahren ist ausdrücklich ausgeschlossen.*

(1b) *Ableitung eines Kriteriums*

Die Ableitung eines zugeordneten Kriteriums erfolgt nachstehend gesteinstypspezifisch in Verbindung mit den Berechnungen.

(2) ***Indikator "keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbaren) konturnahen entfestigten Saumzone"***

(2a) *Sachstand*

Die Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten beruht

- (1) auf Zugspannungen, die die Zugfestigkeit des Gebirges überschreiten und zu Trennbrüchen führen sowie
- (2) auf deviatorischen Beanspruchungen, die die Dilatanzfestigkeit überschreiten bzw. die dazu führen, dass sich latente Trennflächen öffnen.

Dabei sind grundsätzlich konturnahe Gebirgsauflockerungen zu erwarten, aber auch konturfernere Gebirgsauflockerungen/ Rissbildungen nicht grundsätzlich auszuschließen.

Derartige Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen Saumzone z.B. infolge von thermisch bedingten Zugbeanspruchungen oder von dilatanzbehafteten Beanspruchungen sind allerdings nur bei entsprechenden (ungünstigen) Bedingungen (z.B. Geometrie Grubengebäude, Materialeigenschaften, Lasten) zu erwarten, nur aufgrund computergestützter Simulationen zum Tragverhalten des Endlagersystems in ihrer Entstehung zu prognostizieren und ohne



erhebliche Eingriffe in das Gebirge nicht vermessbar und bedingen daher zusätzliche, bei allerdings entsprechender Planung von Endlager/ Endlagersystem grundsätzlich vermeidbare Barrierenschwächungen und zusätzliche Unsicherheiten in Sicherheitsanalysen. Die Prognostizierbarkeit der geohydraulischen Situation des Endlagersystems wird dadurch herabgesetzt. Die Analyse dieser Phänomene bedingt aufwendige Untersuchungen mit großräumig angelegten Berechnungsmodellen und ist nicht Gegenstand dieser Studie. Grundsätzlich sollte durch die Endlagerplanung der Ausbildung derartiger Sekundärpermeabilitäten entgegen gearbeitet werden, um nicht dedektierbare Barrierenschwächungen zu vermeiden.

Bei der planungsmäßigen Beschränkung der Gebirgsentfestigungen auf konturnahe Grubenbaubereiche ist die sekundär nicht nachteilig überprägte geologische Barriere in ihrer räumlichen Ausdehnung zumindest für den Ist-Zustand eindeutig charakterisierbar (Berechnungen) und exemplarisch belegbar (Felduntersuchungen) → Untersuchung von Ausdehnung/Qualität der konturnahen Auflockerungszone.

Weiterhin bedingt eine von den Grubenbauen ausgehende, großräumig in das Gebirge sich erstreckende und nicht hinreichend quantifizierte Gebirgsentfestigung eine zusätzliche Minderung der ansetzbaren hydraulischen Leistungsfähigkeit von geotechnischen Barrieren wie Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerken. Eine konturnahe Entfestigungs-/ Auflockerungszone ist dann gegeben, wenn die Überschreitung der Dilatanzfestigkeit als moderat anzusehen ist und je nach Gesteinstyp und auch je nach Größe des Grubenbaus auf einige wenige Dezimeter bzw. Meter Stoßtiefe begrenzt bleibt.

(2b) Ableitung eines Kriteriums

Die Ableitung eines zugeordneten Kriteriums erfolgt nachstehend gesteinstypspezifisch in Verbindung mit dem Berechnungen.

Die Bilder 3.1 a bis c zeigen zur Illustration Grubenbaue in den verschiedenen Gesteinstypen sowie skizzenartige Darstellungen der Konturentfestigung.

Insgesamt stehen im Mittelpunkt der Untersuchung damit zwei Fragen:

- (1) Bis in welche Teufe können Grubenbaue gesteinstypabhängig ohne nachhaltigen Ausbau bei einer Standzeit in der Größenordnung von 50 Jahren aufgefahren werden?



- (2) Bis in welche Teufe können Grubenbaue gesteinstypabhängig ohne eine nachhaltige und über den Konturbereich hinausgehende Entwicklung einer Sekundärpermeabilität bei einer Standzeit in der Größenordnung von 50 Jahren aufgefahren werden?

Die Bearbeitung der Anforderung „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ bis hin zur Kriterienentwicklung soll fundiert werden auf der Grundlage einer rechnerischen Sensitivitätsanalyse zum Gebirgstragverhalten, wobei ein repräsentativer Grubenbau betrachtet wird und als Variationsparameter eingeführt werden die mechanischen Kennwerte zur Festigkeit und zur Verformbarkeit, repräsentiert durch die Scherparameter ϕ und C (Bruchfestigkeit) sowie die Deformationsparameter E und ν bzw. n und A (viskoses Stoffmodell), die Teufenlage z und die Seitendruckziffer K_0 . Die Seitendruckziffer ist dabei mit der Teufenlage in einer Bandbreite (Ober- und Untergrenze) verknüpft.

Für die Ausarbeitung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ wird folgende Bearbeitungsmethodik gewählt:

- (1) Definition eines langlebigen, über eine größere Standzeit offen zu haltenden, für ein Endlager repräsentativen Grubenbaus (Streckenquerschnitt, der im Einwirkungsbereich eines Einlagerungsfeldes liegt);
- (2) Abschätzung der Temperaturerhöhung im Gebirge infolge der Wärmefreisetzung der Abfälle. Die angesetzte Betriebszeit der Strecke von 50 Jahren bedingt, dass die Strecke als Infrastrukturstrecke anzusehen ist und daher nicht im zentralen Bereich des Einlagerungsfeldes liegt;
- (3) Ableitung von repräsentativen gesteinsmechanischen Kennwerten aus Literaturstellen und aus eigenen exemplarischen laborativen Untersuchungen;
- (4) Erarbeitung eines Berechnungsmodells mit Definition der Einwirkungen aus Auffahrung und Abfallablagerung;
- (5) Durchführung einer Sensitivitätsanalyse, wobei als Variationsparameter die Teufenlage z , die Seitendruckziffer K_0 , der Gesteinstyp und zugeordnete Gebirgskennwerte angesetzt werden. Um die Schwankungsbreite der mechanischen Qualität bei den Gesteinstypen zu erfassen, wird einerseits von einem intakten, d.h. ungeschädigten Material ausgegangen (kein Trennflächengefüge) und andererseits von einem leicht geschädigten Material (gering ausgeprägtes Trennflächengefüge);



- (6) Darstellung und Auswirkung der Berechnungsdaten im Hinblick auf die Prüfung der zahlenmäßigen Richtigkeit;
- (7) Formulierung eines Bewertungsmaßstabes im Hinblick auf die Indikatoren *Haupttrag-element Gebirge* und *Sekundärpermeabilität*;
- (8) Auswertung der Berechnungsdaten im Hinblick auf die zahlenmäßige Präzisierung der indikationsbezogene Kriterien;
- (9) Ableitung von indikatororientierten quantitativen Kriterien mit formationsabhängigen Schwellenwerten (Ausschlusskriterium) und Skalenwerten (Abwägungskriterium).

4 Entwicklung der geometrischen und geomechanischen Grundlagen für die Analyse des Tragverhaltens einer exemplarischen Strecke

4.1 Grundlegende Annahmen

Bezüglich der Festlegung der Geometrie des repräsentativen Grubenbaus und der Betriebszeit müssen im Vorfeld einige grundlegende Annahmen getroffen werden.

Bei dem repräsentativen Grubenbau soll es sich um eine Infrastrukturstrecke handeln, die von Fahrzeugen oder (gleisgebundenen) Maschinen mindestens einspurig befahren werden kann. Der lichte Querschnitt des Streckenprofils beträgt etwa 40 m². Es wird angenommen, dass über diese Strecke Einlagerungsfelder beschickt und längerfristig in ihrem Verhalten beobachtet werden. Folgender Betriebsablauf mit Einwirkungen auf die Strecke wird gesehen: Auffahrung der Infrastrukturstrecken, Auffahrung der Einlagerungskammern, die von einer Infrastrukturstrecke abzweigen, Einlagerung der Abfälle, Versatz der Einlagerungskammern im Rückbau, Erhalt der randlichen Infrastrukturstrecke für Kontrollzwecke, Versatz der randlichen Infrastrukturstrecke. Für diesen Ablauf wird eine Betriebszeit von 50 Jahren angesetzt. Daraus leitet sich eine relativ lange Betriebsdauer bis zum Versatz der Strecke ab ebenso wie eine gewisse thermische Belastung, da die Strecke zwar nicht unmittelbar im Einlagerungsfeld, aber doch in seiner Nähe positioniert ist.

4.2 Geometrie der Strecke und des Berechnungsmodells

Entsprechend der Vorgabe, dass es sich bezogen auf die Betriebszeit des Endlagers um einen langlebigen und repräsentativen Grubenbau handelt, wird eine randlich der Einlagerungsfel-



der gelegene Hauptstrecke ausgewählt, über die die Einlagerungskammern bedient werden. Unter Heranziehung mehrerer Forschungsberichte wird das in Bild 4.1 dargestellte Profil vorgeschlagen, *DBE (1993)*. Danach wird eine lichte Höhe der Strecke von $h = 5,25$ m von der Sohle bis zur Firste veranschlagt bei einer Streckenbreite von $b = 8,30$ m. Das Lichtraumprofil im Stoßbereich beträgt noch etwa 3 m. Der Streckenquerschnitt ist in Firste und Sohle gewölbt und in den Eckbereichen ausgerundet, um ein günstiges Tragverhalten zu erreichen und dadurch Spannungsspitzen zu vermeiden (Verminderung von Abschalungen). Insgesamt wird dadurch die Ausbildung von Spannungsextrema im umliegenden Gebirge reduziert.

Als Berechnungsmodell wird ein scheibenartiges Kontinuum im ebenen Verzerrungszustand gewählt. Der betrachte Gebirgsausschnitt erstreckt sich von der Streckenachse als Referenzteufe aus gesehen in vertikaler Richtung je 150m nach oben und unten sowie in lateraler Richtung je 150m zu jeder Seite.

Für das eingesetzte numerische Berechnungsverfahren nach der Methode der finiten Elemente (FEM) ist es zweckmäßig, die vertikale Symmetrie des Berechnungsmodells zu nutzen und unter Formulierung geeigneter geomechanischer Randbedingungen nur das halbe Berechnungsmodell zu betrachten. Beispielhaft liegt bei einer Teufe der Strecke von $z = 900$ m die obere Modellgrenze in einer Teufe von $z = 750$ m, die untere bei $z = 1050$ m.

Durch diese Wahl der Modellgröße wird die Ausbildung von thermisch indizierten Zugspannungen im Fernbereich gering gehalten. Zur Vereinfachung wird auf den Einsatz infiniter Elemente verzichtet.

4.3 Einwirkungen

4.3.1 Geogene und technogene Einwirkungen

Unter Einwirkungen werden sowohl die geogenen wie auch technogenen Lasten verstanden, denen das Tragwerk in seiner Standzeit widerstehen muss.

Die geogenen Einwirkungen reduzieren sich hier auf den primären Gebirgsspannungszustand mit den auffahrungsbedingt an der Ausbruchskontur aktivierten Umlagerungskräften. Weitere



gezogene Einwirkungen sind nicht relevant, da die Endlagerformation z.B. keinen Hebungen/Senkungen oder Erdbeben unterliegen soll.

Technogene Einwirkungen resultieren vornehmlich aus den Temperaturänderungen, die zeitabhängig aus der Einlagerung der radioaktiven Abfälle folgen.

4.3.2 Geogene Einwirkungen

Die auffahrungsbedingt aktivierten Umfangskräfte resultieren aus dem Primärspannungszustand des Gebirges. Der Primärspannungszustand wird wie folgt zahlenmäßig festgelegt:

Die vertikalen Primärspannungen nehmen linear mit der Teufe zu und ergeben sich zu

$$p_v = \bar{\gamma}_i \cdot z . \quad (4.1)$$

Die horizontalen Primärspannungen sind proportional zu den vertikalen Primärspannungen und werden zahlenmäßig mit Hilfe der Seitendruckziffer K_0 festgelegt:

$$p_h = K_0 \cdot p_v \quad (4.2)$$

mit

$\bar{\gamma}_i$ mittlere Wichte in MN/m^3

z Referenzteufe von OK Gelände bis zum Mittelpunkt der Strecke in m (vgl. Bild 1).

4.3.3 Technogene Einwirkungen

(a) Mechanische Einwirkungen/ Lasten

Aus dem Primärspannungsfeld nach Abschnitt 4.3.2 sind die jeweiligen ausbruchsbedingten Umlagerungskräfte an der Kontur zu berechnen und als äußere Lasten in die Berechnung einzuführen (\rightarrow Umlagerungsspannungen, Gebirgsdeformationen).

(b) Thermische Einwirkungen/ Lasten

Das hier für die Ableitung der thermischen Lasten zugrundegelegte Temperaturfeld ist aus Forschungsarbeiten abgeleitet worden, *DBE (1993)* und *Ehlert (1981)*.



Die thermischen Einwirkungen werden entsprechend Bild 4.2 für die Streckenkontur vorgegeben und dort als konstant angenommen. Im Lauf der Zeit ist dieses Temperaturfeld allerdings veränderlich.

Grundsätzlich wird eine Strecke betrachtet, die am Rand eines Einlagerungsfeldes liegt. Die ungleichmäßige Temperaturverteilung im Umgebungsbereich der Strecke wird vereinfachend symmetrisiert mit dem Maximalwert an der Streckenkontur entsprechend dem in Bild 4.2 dargestellten Temperaturverlauf und einer daraus dann zu berechnenden Abnahme ins umliegende Gebirge. Hier wird als Modellrandbedingung die primäre Gebirgstemperatur zu $\vartheta = 35^{\circ}\text{C}$ (in der Referenzteufe von $z = 900\text{m}$) angesetzt. Für eine Teufe von $z = 600\text{ m}$ wird eine primäre Gebirgstemperatur von 25°C angenommen, für eine Teufe von $z = 1200\text{ m}$ sind es $\vartheta = 45^{\circ}\text{C}$. Für die Ermittlung des zugehörigen Temperaturfeldes wird von einer stationären Wärmeleitung ausgegangen. Die Temperaturkurve in Bild 4.2 bzw. Tabelle 4.1 gibt den Verlauf der abfallbedingten zusätzlichen Erwärmung des Gebirges an der Streckenkontur wieder.

Zeit [a]	ΔT [$^{\circ}\text{C}/\text{a}$]
0 – 5	6,0
5 – 15	1,5
15 – 35	0,25
35 – 50	0,0

Tabelle 4.1: Abstrahierte jährliche Temperaturzunahme an der Streckenkontur in der 50jährigen Betrachtungszeit.

4.4 Stoffmodelle und Bruchbedingungen

Je nach Gesteinstyp werden unterschiedliche Stoffmodelle verwendet, um das jeweilige Verhalten in seinen grundsätzlichen gesteinsmechanischen Charakteristika möglichst realitätsnah zu erfassen.

Granitgestein wird als Vertreter der elastisch-spröden Gesteine behandelt, *Tongestein* als elastisch-(visko)plastisches Gestein und *Salzgestein* als elastisch-viskoses Gestein. Damit sind die aus geohydraulischer Sicht grundsätzlich für die Errichtung eines Endlagers möglichen Ge-



steinstypen mit hinreichend geringer Gebirgspermeabilität mit ihren auch grundsätzlich unterschiedlichen geomechanischen Eigenschaften in die Analyse einbezogen.

(a) *Granitgesteine* – linear-elastisches Stoffmodell

Für das linear-elastisch idealisierte Stoffverhalten der *Granitgesteine* wird das *Hookesche* Stoffmodell angesetzt:

$$\underline{\sigma} = \underline{E} \cdot \underline{\varepsilon} \quad (4.3)$$

mit

$\underline{\sigma}$ Spannungsvektor,

\underline{E} Elastizitätsmatrix

$\underline{\varepsilon}$ Verzerrungsvektor

sowie den Materialparametern

E Elastizitäts- (Verformungs)modul in MPa,

ν Poissonzahl in –.

Im Hinblick auf die Identifizierung von Bruchbereichen im konturnahen Gebirge wird das berechnete Sekundärspannungsfeld mit Hilfe einer Bruchbedingung geprüft. Die Bruchfestigkeit des Materials wird linearisiert angesetzt und charakterisiert durch die *Mohr-Coulombsche* Bruchbedingung in der Form

$$\tau_f = \sigma_n \cdot \tan \varphi + C \quad (4.4)$$

mit

τ_f aufnehmbare Schubspannungen im Bruchzustand in MPa,

σ_n Normalspannung senkrecht zur Bruchfläche in MPa,

φ Winkel der inneren Reibung in °

C Kohäsion in MPa.

(b) *Tongesteine* – linear-elastisch/ viskoplastisches Stoffmodell

Für das elastoplastisch idealisierte Materialverhalten der Tongesteine wird ein linear-elastisch/ viskoplastisches Stoffmodell herangezogen. Dabei wird davon ausgegangen, dass



- sich Gebirgsbereiche, deren Beanspruchung unterhalb einer Fließgrenzbedingung liegt, linear-elastisch verhalten und dass
- sich in Gebirgsbereichen, in denen die Beanspruchung größer ist als die der Fließgrenzbedingung entsprechende Beanspruchung, (wie auch immer rechnerisch simulierte) Spannungsumlagerungen einstellen derart, dass schließlich die Fließgrenzbedingung nicht überschritten wird. Diese Gebirgsbereiche werden unter dem Gesichtspunkt der rissbedingten Gefügeschwächungen als pseudoplastische Zonen bezeichnet. In diesen pseudoplastischen Zonen findet eine Gebirgsauflockerung statt, die mit einer Festigkeitsabnahme verbunden sein kann (→ Abfall der Spitzenbruchfestigkeit auf die Restfestigkeit). Bruchfestigkeit und Fließfestigkeit können im Grenzfall identisch sein. Es kann aber auch ein geringeres Beanspruchungsniveau als Fließgrenzfestigkeit angesetzt werden.

Für das linear-elastisch/viskoplastische Stoffmodell berechnet sich die Gesamtverzerrung aus dem Ansatz

$$\underline{\dot{\epsilon}} = \underline{\dot{\epsilon}}^{\text{el}} + \underline{\dot{\epsilon}}^{\text{vp}} \quad (4.5)$$

d.h. die inelastischen Verzerrungen werden aus dem elastischen und dem viskoplastischen Anteil additiv überlagert. Für die Berechnung der viskoplastischen Verzerrungen wird eine Fließgrenzbedingung der Form $F(\sigma, \kappa)$ herangezogen. Die viskoplastische Berechnung wird abgebrochen, wenn im Berechnungsgebiet gilt: $F(\sigma, \kappa) \rightarrow 0$ und $\dot{\epsilon}^{\text{vp}} \rightarrow 0$, d.h. es wird im Berechnungsgebiet ein Zustand erreicht, bei dem keine Überschreitung der Fließgrenzbedingung mehr vorliegt und insofern keine weiteren pseudo-plastischen Zonen mehr entstehen und auch keine Spannungen mehr in geringer belastete Gebirgsbereiche umgelagert werden müssen. Für den viskoplastischen Verzerrungsratenvektor $\underline{\dot{\epsilon}}^{\text{vp}}$ wird angenommen:

$$\underline{\dot{\epsilon}}^{\text{vp}} = \gamma \cdot A \cdot F(\sigma, \kappa) \cdot \frac{\partial Q(\sigma, \kappa)}{\partial \sigma} \quad (4.6)$$

mit

$A = 0$ für $F(\sigma, \kappa) \leq 0$ und

$A = 1$ für $F(\sigma, \kappa) > 0$,

γ (fiktiver) Viskositätsparameter,



Q plastische Potentialfunktion.

Als Fließfunktion wird die Bruchbedingung nach *Mohr-Coulomb* eingesetzt. Damit gilt als Fließfunktion:

$$\tau_f = \sigma_n \cdot \tan \varphi + C \quad (4.7a)$$

bzw. in Abhängigkeit von den Koordinatenspannungen

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sin^2(\sigma_x + \sigma_y + 2C/\tan\varphi)^2 \quad (4.7b)$$

mit

τ_f aufnehmbare Schubspannung im Bruchzustand in MPa,

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$ Korrdinatenspannungen in MPa

σ_n Normalspannung senkrecht zur Bruchfläche in MPa,

φ während der inneren Reibung in ° und

C Kohäsion in MPa.

Einzelheiten sind zu finden bei *Lux (1984), Pircher & Partner (1999), Hou (1997)*.

Mit dem Ansatz nach Gl. (4.6) und der Verwendung von Gl. (4.7a) bzw. Gl. (4.7b) auch als Potentialfunktion wird eine zu große Dilatanz und damit Entfestigung/ Auflockerung/ Sekundärpermeabilität im Bereich der pseudoplastischen Zone erhalten (Dilatanzwinkel \equiv Winkel der inneren Reibung). Bei Vorliegen von tongesteinsbezogenen Materialdaten kann hier eine Präzisierung erfolgen.

(c) *Salzgesteine* – linear-elastisch/ viskoses Stoffmodell

Für das linear-elastisch/ viskos idealisierte Materialverhalten der Salzgesteine (*Steinsalz*) wird das Stoffmodell nach *Hooke* und das Stoffmodell von *Norton* herangezogen. Dieses Stoffmodell beschreibt ein stationäres Kriechen ohne Berücksichtigen der transienten Kriechphase. Das viskose Stoffmodell ergibt sich zu, *Lux (1984)*:

$$\begin{aligned} \underline{\dot{\epsilon}} &= \underline{\dot{\epsilon}}^{el} + \underline{\dot{\epsilon}}^s \\ \underline{\dot{\epsilon}}^s &= \frac{3}{2} \cdot A \cdot \sigma_v^{n-1} \cdot \underline{M}_2 \cdot \underline{\sigma} \end{aligned} \quad (4.8)$$

mit



$\underline{\dot{\epsilon}}^s$ Vektor der stationären Kriechraten

$\underline{\sigma}$ Spannungsvektor

σ_v Vergleichsspannung; $\sigma_v = \sqrt{3J_2^D}$, $J_2^D = \frac{1}{6} \{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}$

M_2 Kondensationsmatrix

A Materialkonstante und

n Spannungsexponent.

Einzelheiten sind zu finden bei *Lux (1984)*.

4.5 Gebirgseigenschaften/ Variation der Gesteinsart und der Gebirgsqualität

4.5.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Die aus geohydraulischer Sicht geringe Permeabilitäten aufweisenden und daher als Wirts-/Barrierengestein geeignet erscheinenden, aus mechanischer Sicht allerdings auch sehr verschiedenen Gesteinsarten werden zu aus mechanischer Sicht zu charakteristischen Gesteinstypen zusammengefasst und nachstehend als **Granitgestein**, **Tongestein** und **Salzgestein** bezeichnet.

Für die den einzelnen Gesteinstypen zugeordneten Stoffmodelle werden Materialkennwerte benötigt, die zu diesem Zeitpunkt für die hier vorzunehmende grundsätzliche Analyse aus standortbezogenen Untersuchungen nicht zur Verfügung stehen. Daher wird zunächst folgende Vorgehensweise gewählt:

- (1) Einschätzung der erforderlichen Materialdaten anhand der felsmechanischen Literatur und eigenen vorhandenen Untersuchungsbefunden,
- (2) Literaturrecherche zu projektbezogenen Materialkennwerten für die Gesteinstypen Granitgestein, Tongestein und Salzgestein aus internationalen Endlagerprojekten (→ Ergänzung, Absicherung der Daten zu (1)),
- (3) Ableitung von repräsentativen Materialkennwerten unter Einbeziehung einer Bandbreite. Sollten die Materialkennwerte auf diese Weise nicht in den hier notwendigen Umfang ableitbar sein, sind weitere Überlegungen zu ihrer Einschätzung vorzunehmen.



Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die für die Errichtung eines Endlagers geeigneten Gebirgsformationen nur in geringem Maße durch ein mechanisch wirksames Trennflächengefüge überprägt sind und daher Gebirgs- und Gesteinskennwerte in etwa übereinstimmen.

Für die zuvor genannten Gesteinstypen werden die Berechnungen zum Tragverhalten einerseits in Abhängigkeit der Teufe und des Primärspannungszustandes (Seitendruckziffer) durchgeführt. Um andererseits die Bandbreite der Festigkeiten zu erfassen, werden aus der Literatur und den eigenen Datenbanken Kennwerte ermittelt, die einerseits den als möglich eingeschätzten unteren Wertebereich repräsentieren (*Material leicht geschädigt*) und die andererseits die obere Grenze der Festigkeitswerte darstellen (*Material intakt*). Somit wird in die Berechnungen nicht ein Mittelwert eingeführt, sondern die Berechnungen grenzen festigkeitsbezogen den Bereich ein, in dem sich wahrscheinlich diese Gesteinstypen bewegen werden. Dabei wird methodisch so vorgegangen, dass zwei Gebirgsklassen eingeführt werden, die als *intakt* und *leicht geschädigt* bezeichnet werden. Die nähere Ausgestaltung sieht als grundsätzlichen Ansatz vor, dass

- (1) in der Gebirgsklasse *intakt* die repräsentative Gesteinsfestigkeit für jeden Gesteinstyp eingeschätzt und ohne Modifikation auf das Gebirge übertragen wird (→ Gebirgsfestigkeit = Gesteinsfestigkeit) sowie ein derartiges ungeschädigtes Gebirge aus geohydraulischer Sicht als hinreichend gering permeabel angesehen wird und dieses Gebirge dann nach *Brady/ Brown (1985)* als *intact rock mass* klassifiziert wird und
- (2) das Gebirge in der Gebirgsklasse *leicht geschädigt* aus geohydraulischer Sicht auch als noch hinreichend gering permeabel eingeschätzt wird, wobei die zugehörigen Materialkennwerte mit Hilfe der zugehörigen gesteinstypischen *Hoek/ Brown*-Kennwerte m und s für die Gebirgsklasse *very good quality rock mass* aus der Gesteins- (Gebirgs-) Bruchfestigkeit zu (1) abgeleitet werden.

Da die benötigten Stoffkennwerte nicht vollständig der Literatur zu entnehmen bzw. beim Unterzeichnenden vorhanden sind, wird vorgeschlagen, in einem Teil B zu dieser Studie zur Ergänzung/Absicherung auch exemplarische laborative Untersuchungen durchzuführen. Nicht verfügbar sind insbesondere Daten zur Dilatanzfestigkeit, zur Abhängigkeit der Dilatanz von der Minimalspannung und zur Abhängigkeit der Permeabilität von der Dilatanz für die nicht-salinaren Gesteinstypen.



4.5.2 Granitgesteine

4.5.2.1 Materialkennwerte aus verschiedenen Lokationen

Tabelle 4.2 zeigt eine Zusammenstellung von Materialkennwerten für Granitgesteine, die der Literatur entnommen worden sind.

Ergänzend zu der Tabelle 4.2 wird die Dilatanzfestigkeit von Granit einer Lokation E¹ mit $\beta_{Dil} = 125 \text{ N/mm}^2 = 125 \text{ MPa}$ angegeben. Die Festigkeit des Gesteins derselben Lokation beträgt $\beta_{IU} \approx 155 \text{ MPa}$.

Aus diesen Werten wird eine Dilatanzfestigkeit von etwa 80% der Bruchfestigkeit abgeschätzt. Dieses Verhältnis zwischen Bruchfestigkeit und Dilatanzfestigkeit wird grundsätzlich auf Granitgestein übertragen.

¹ Eloranta, P., Simonen, A., Johansson, E. (1992): Creep in Crystalline Rock with Application to High Level Nuclear Waste Repository, Report YJT-92-10, IVO Oy, TVO Oy, ISSN-0359-578-X, Fig. 2.2, S. 4.



Granit (Werte von...bis)	Lokation A²	Lokation B³	Lokation C⁴	Lokation D⁵
Wichte, MN/m ³	∅ 0,0263 (max. 0,0337)	0,0262	0,027	0,0264
Elastizitätsmodul E, MPa	∅ 26500 (max. 160700)	56000	38200	38980
Poisson- Zahl ν , –	∅ 0,25 (max. 0,5)	---	0,08	0,19
Schubmodul G, MPa	---	---	19100	11790
einaxiale Druckfestigkeit β_{1U} , MPa	---	166,2	158,6	193,05
Kohäsion C, MPa	∅ 22,8 (max. 53,6)	---	---	---
Winkel der inneren Reibung φ , °	∅ 36,3 (max. 55,3)	---	---	---
thermischer Ausdehnungs- koeffizient α , 1/K · 10 ⁻⁶	∅ 8,2 (max. 12,9)	---	---	---

Tabelle 4.2: Materialkennwerte für Granitgesteine.

² JNC- Japan Nuclear Cycle Development unter www.jnc.go.jp, link to H12 Report Website, Report all-so1.pdf, dort Tab. 3.5-1, S. 293.

³ Japan, Inada aus *Lama R.D., Vutukuri, V.S. (1978): Mechanical Properties of Rocks, Vol. II*, Trans Tech, Clausthal.

⁴ USA, Unaweep, Colorado aus *Lama R.D., Vutukuri, V.S. (1978): Mechanical Properties of Rocks, Vol. II*, Trans Tech, Clausthal.

⁵ USA, Lithomia., Georgia aus *Lama R.D., Vutukuri, V.S. (1978): Mechanical Properties of Rocks, Vol. II*, Trans Tech, Clausthal.



4.5.2.2 Berechnungsannahmen

Aus den Literaturdaten werden für Granitgestein die in Tabelle 4.3 zusammengestellten Berechnungsdaten abgeleitet (obere Grenze = intaktes Gebirge, untere Grenze = leicht geschädigtes Gebirge)

Granitgestein, intakt		
mittlere Wichte, MN/m ³	0,025	
Elastizitätsmodul E, MPa	40000,00	
Poisson- Zahl ν , –	0,25	
Schubmodul G, MPa	16000,00	Dilatanzfestigkeit
Einaxiale Druckfestigkeit, MPa	167,4	133,45
Kohäsion C, MPa	31,32	27,53
innerer Reibungswinkel φ , °	48,84	45,16
Wärmeausdehnungskoeffizient α , 1/K	$7 \cdot 10^{-6}$	
Granitgestein, leicht geschädigt		
mittlere Wichte, MN/m ³	0,025	
Elastizitätsmodul E, MPa	30000,00	
Poisson- Zahl ν , –	0,25	
Schubmodul G, MPa	12000,00	Dilatanzfestigkeit
Einaxiale Druckfestigkeit, MPa	74,2	59,40
Kohäsion C, MPa	15,14	13,27
innerer Reibungswinkel φ , °	45,62	41,85
Wärmeausdehnungskoeffizient α , 1/K	$7 \cdot 10^{-6}$	

Tabelle 4.3: Berechnungskennwerte für Granitgesteine.

Die Dilatanzfestigkeit wird vorerst in Anlehnung an *Eloranta, Simonen (1992)* zu 80% der Bruchfestigkeit abgeschätzt. Bild 4.3 zeigt die grafische Darstellung der Bruch- und Dilatanzfestigkeiten beider Gesteinsklassen.



4.5.3 Tongestein

4.5.3.1 Materialkennwerte aus verschiedenen Lokationen

Tabelle 4.4 zeigt eine Zusammenstellung von Materialkennwerten für Tongesteine, die der Literatur entnommen worden sind. Eine Zusammenstellung ist bei *Lux, K.H. und Lomo, G. (2002)* zu finden.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient einer Lokation E⁶ wird mit $\alpha_t = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ angegeben. Mangels weiterer Quellen wird dieser Wert repräsentativ für die Berechnungen angenommen.

⁶ *Ghoreyci, M. (2001): Argilites de l'Est, Frankreich*



<i>Tongesteine</i>	<i>Lokation A⁷</i>	<i>Lokation B⁸</i>	<i>Lokation C⁹</i>	<i>Lokation D¹⁰</i>
Wichte, MN/m ³	0,0244	0,0245	Ø 0,0248	Ø 0,0252
Elastizitätsmodul E, MPa (⊥/ zur Schichtung)	8700	6000	Ø 10750	5500/ 11400
Poisson- Zahl ν , – (⊥/ zur Schichtung)	---	0,27	Ø0,28	0,27/ 0,27
Schubmodul G, MPa	---	1200	---	---
einaxiale Druckfestigkeit (⊥/ zur Schichtung)	---	16/ 10	---	30,3/ 28
Kohäsion C, MPa (⊥/ zur Schichtung)	2,4	5/ 2,2	4,1	---
Innere Reibung φ , ° (⊥/ zur Schichtung)	33,3	25/ 25	30,4	---
thermischer Ausdehnungs- koeffizient α , 1/K · 10 ⁻⁶	---	---	---	---

Tabelle 4.4: Materialkennwerte für Tongesteine.

⁷ Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU-Clausthal (2002): Interner Laborbericht, Materialwerte für Tonstein, (Stratigraphie Oberbathonium).

⁸ Schweizerische Landeshydrologie und- geologie (1999): Interner Laborbericht,

⁹ BGR (1987): Interner Laborbericht

¹⁰ *Nagra (2001)*: Technischer Bericht/ interne Informationen.



4.5.3.2 Berechnungsannahmen

Aus den Literaturdaten werden für Tongesteine die in Tabelle 4.5 zusammengestellten Berechnungsdaten abgeleitet (obere Grenze = intaktes Gebirge, untere Grenze = leicht geschädigtes Gebirge)

<i>Tongestein, intakt</i>		
mittlere Wichte, MN/m ³	0,025	
Elastizitätsmodul E, MPa	10000,00	
Schubmodul G, MPa	4000,00	
Poisson- Zahl ν , –	0,25	Dilatanzfestigkeit
einaxiale Druckfestigkeit β_{1U} , MPa	34,64	22,85
innere Reibung φ , °	30,00	20,00
Kohäsion C, MPa	10,00	8,00
Wärmeausdehnungskoeffizient α , 1/K	$1,7 \cdot 10^{-5}$	
<i>Tongestein, leicht geschädigt</i>		
mittlere Wichte, MN/m ³	0,025	
Elastizitätsmodul E, MPa	5000,00	
Schubmodul G, MPa	2000,00	
Poisson- Zahl ν , –	0,25	Dilatanzfestigkeit
einaxiale Druckfestigkeit β_{1U} , MPa	15,70	10,61
innere Reibung φ , °	25,00	16,00
Kohäsion C, MPa	5,00	4,00
Wärmeausdehnungskoeffizient α , 1/K	$1,7 \cdot 10^{-5}$	

Tabelle 4.5: Berechnungskennwerte für Tongestein.



Aufgrund von Literaturdaten aus *Ghoreychi (2001) – Argile de l'Est*, wird die Dilatanzfestigkeit für Tongesteine vorerst zu 65% der Bruchfestigkeit angesetzt. Bild 4.4 zeigt die grafische Darstellung der Bruch- und Dilatanzfestigkeiten beider Gesteinsklassen.

Hinweis:

Das Materialverhalten der Tongesteine wird durch einen erheblich vereinfachten Ansatz für das Stoffmodell beschrieben. Phänomene wie Kriechen, Schrumpfen, Quellen/ Schwellen, dilatanzbedingte Wassergehaltsänderungen werden nicht berücksichtigt.



4.5.4 Salzgestein

4.5.4.1 Materialkennwerte aus verschiedenen Lokationen

Aus eigenen Daten ergeben sich für duktile Salzgesteine wie Steinsalz für einige typische Lokationen und bei Idealisierung des Kriechverhaltens durch das Stoffmodell nach *Norton* die in der Tabelle 4.6 zusammengestellte Materialkennwerte.

<i>Salzgestein</i>	<i>Lokation A¹¹</i>	<i>Lokation B¹²</i>	<i>Lokation C¹³</i>	<i>Lokation D¹⁴</i>
mittlere Wichte, MN/m ³	0,0234	---	---	---
Elastizitätsmodul E, MPa	25000	25000	---	25000
Schubmodul G, MPa	---	---	---	---
Poisson- Zahl ν , –	0,25	0,25	---	0,27
Ausdehnungskoeffizient α , 1/K	$4,0 \cdot 10^{-5}$	---	---	---
Materialparameter A, 1/d	$2,43 \cdot 10^{-10}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$	$7,2 \cdot 10^{-12}$	$6,17 \cdot 10^{-11}$
Spannungsexponent Norton n	5	5	5	5

Tabelle 4.6: Materialkennwerte für duktile Salzgesteine (Steinsalz).

¹¹Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU-Clausthal (1994): Begutachtung Eignungshöflichkeit Endlagerprojekt Gorleben.

¹² Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU-Clausthal (1998): Interner Laborbericht

¹³ Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU-Clausthal (1999): Interner Laborbericht

¹⁴ Professur für Deponietechnik und Geomechanik, TU-Clausthal (2000): Interner Laborbericht



4.5.4.2 Berechnungsannahmen

Aus den Literaturdaten werden für Salzgesteine die in der Tabelle 4.7 zusammengestellte Berechnungsdaten abgeleitet. Die Kriechparameter A und n gelten nach einer (internen) Validation nunmehr für das Gebirge und charakterisieren ein Steinsalz mittlerer Kriechfähigkeit, *Lux (1984)*. Der Reduktionsfaktor 2 bezüglich des Parameters A ist begründet in einem Vergleich von vor Ort gemessenen mit berechneten Konturverschiebungen.

Steinsalz	
mittlere Wichte, MN/m ³	0,0234
Elastizitätsmodul E, MPa	25000,00
Schubmodul G, MPa	10000,00
Poisson- Zahl ν , –	0,25
Wärmeausdehnungskoeffizient α , 1/K	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Materialparameter A, 1/d (T = 25 °C)	$3,0 \cdot 10^{-11}$
Spannungsexponent Norton n	5
Bruchfestigkeit, β_{1U} , MPa	25
Dilatanzfestigkeit, β_{Dil} , MPa	5

Tabelle 4.7: Berechnungskennwerte für Salzgestein.

Die Temperaturabhängigkeit der Kriechfähigkeit wird nach *Lux (1984)* nach folgendem auf die stationäre Kriechrate bezogenen Zusatz berücksichtigt:

$$\dot{\epsilon}^s(T_1) / \dot{\epsilon}^s(T_2) = e^{l \cdot T_1} / e^{l \cdot T_2} \quad (4.9)$$

mit

$\dot{\epsilon}^s(T_i)$ stationäre Kriechrate bei der Temperatur T_i (in K)

l Temperaturfaktor



Aus diesem Ansatz folgt für den Temperaturbereich $T = 25 \text{ °C} - 45 \text{ °C}$ in der Größenordnung (Einheiten MPa, 1/d):

$$T = 25 \text{ °C} - A^{25} = 3,0 \cdot 10^{-11}$$

$$T = 35 \text{ °C} - A^{35} = 6,0 \cdot 10^{-11}$$

$$T = 45 \text{ °C} - A^{45} = 9,0 \cdot 10^{-11}$$

Die angesetzten Kriechcharakteristika für die verschiedenen Gebirgstemperaturen zeigt Bild 4.5. Für eine Gebirgstemperatur von $T = 25 \text{ °C}$ ($z = 600 \text{ m}$) zeigt dieses Bild zum Vergleich auch Kriechraten für Steinsalz verschiedener Lagerstätten (abgeleitet aus einaxialen Kriechversuchen).

In erster Näherung wird die abfallbezogene Temperaturveränderung nicht in den Kriechparametern berücksichtigt.

Bruchfestigkeit und Dilatanzfestigkeit für mehraxiale Beanspruchungen sind *Hou (1997)* entnommen und aus Bild 4.6 zu ersehen.

Hinweis:

Es ist anzumerken, dass die Ableitung der Kriechparameter über die laborative Ermittlung der stationären Kriechrate erfolgt. Der aus den laborativen Befunden abgeleitete Zahlenwert für die stationäre Kriechrate selbst ist abhängig vom Versuchszeitraum. Bei 4-Wochen-Kriechversuchen und einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren können die aus den Laborbefunden als stationäre Kriechraten identifizierten/ eingeschätzten Zahlenwerte noch um einen Faktor in der Größenordnung von 2 – 3 reduziert werden. Dieser Sachverhalt wird bei den Berechnungen in dem nach folgenden Teil B berücksichtigt.

Primärspannungszustand/ Variation der horizontalen Primärspannungen in Abhängigkeit von der Teufe

Die Beanspruchung des Gebirges durch Auffahrung von Grubenbauen ist wesentlich abhängig von dem im Gebirge vor dem technologischen Eingriff vorhandenen sogenannten Primärspannungszustand. Der an einer Lokation vorhandene Primärspannungszustand ist grundsätz-



lich nicht berechenbar und daher ebenso grundsätzlich lokationsbezogen zu ermitteln. Für eine generalisierte Einschätzung wird auch hier wie üblich angenommen:

$$p_v = \bar{\gamma} \cdot z \quad (4.10a)$$

$$p_h = K_0 \cdot p_v \quad (4.10b)$$

mit

- p_v Überlagerungsdruck in der Teufe z
 $\bar{\gamma}$ mittlere Wichte des Gebirges
 z Mächtigkeit des überlagernden Gebirges
 K_0 Seitendruckbeiwert.

Für die mittlere Gebirgswichte wird angenommen:

- (1) Granitgestein: $\bar{\gamma} = 0,25 \text{ MN/m}^3$
- (2) Tongestein: $\bar{\gamma} = 0,25 \text{ MN/m}^3$
- (3) Salzgestein: $\bar{\gamma} = 0,234 \text{ MN/m}^3$

Die über den Seitendruckbeiwert charakterisierten horizontalen Primärspannungen unterliegen nach Messbefunden in Gebirgsformationen aus nichtsalinaren Festgesteinen erheblichen Schwankungsbreiten. Tendenziell wird differenziert angenommen:

- oberflächennah (wenige hundert Meter Teufe) $2-3 > K_0 \geq 0,5$ und
- bei zunehmender Teufe (> 1000 Meter) $K_0 \rightarrow 1,0$

Für die hier vorzunehmenden rechnerischen Analysen wird gesteinstypspezifisch teufenabhängig eine Variation entsprechend nachstehender Tabelle 4.8 angenommen. Darin bedeuten

V1 = Material intakt,

V2 = Material leicht geschädigt.



(a) Granitgestein und Tongestein

Seitendruckziffer K_0	$z = 600\text{m}$	$z = 900\text{m}$	$z = 1200\text{m}$
0,775	V1, V2		
0,85		V1, V2	
0,925			V1, V2
1,075			V1, V2
1,15		V1, V2	
1,225	V1, V2		

Tabelle 4.8: Ansatz des Seitendruckbeiwertes in Abhängigkeit von der Teufe z .

Die mit der Einführung der Gebirgsklassen *intakt* (V1) und *leicht geschädigt* (V2) verbundene Variation der Deformations- und Festigkeitsparameter C , φ , E und ν deckt die Bandbreite der bei aus geohydraulischer Sicht noch geeignet erscheinenden Gebirgsqualitäten zu erwartenden Festigkeiten und Deformationseigenschaften des jeweiligen Gesteinstyps ab.

(b) Steinsalz

Da duktile Salzgesteine wie Steinsalz ein elastisch-viskoses Materialverhalten aufweisen, wird davon ausgegangen, dass sich im homogenen Salzgebirge in dem hier relevanten Teufenbereich grundsätzlich ein isotroper Spannungszustand einstellt. Daher werden keine Variationen bezüglich der Seitendruckziffer K_0 durchgeführt.

4.6 Bewertungskriterien

Aus den Berechnungsergebnissen für die Zustandsgrößen des Berechnungsgebietes ist das Tragverhalten des Gebirges unter den vorgegebenen Einwirkungen abzuleiten und im Hinblick auf eine vorgegebene Zielsetzung zu bewerten.

Im vorliegenden Fall werden als Anforderungen an das Tragverhalten und damit Zielsetzungen betrachtet:



- (1) Identifizierung der Situationen mit einem standfestem Gebirge ohne nachhaltigen Ausbau,
- (2) Identifizierung der Situationen mit auf Konturnähe begrenzten aufgelockerten Gebirgsbereichen und dadurch weitgehendem Erhalt der Primärpermeabilität.

Die zur diesbezüglichen Bewertung der Berechnungsergebnisse herangezogenen Kriterien werden in Abschnitt 8 abgeleitet.

5 Durchführung der Berechnungen

5.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Für die Durchführung der Berechnungen wird das Programmpaket *Mises3* der Firma TDV, Pircher & Partner, Graz, Austria, verwendet. *Mises3* ist ein Programm zur computergesteuerten Analyse insbesondere untertägiger Tragwerke nach der Methode der Finiten Elemente. In seiner ersten Version ist es 1976 der Fachöffentlichkeit vorgestellt worden. Seither ist das Programm beständig weiterentwickelt worden. Durch fachbezogene umfangreiche eigene Erweiterungen hat es sich zu einem bei der Bearbeitung von Aufgaben auf dem Gebiet der Geomechanik bevorzugt angewendeten Berechnungsprogramm an der Professur für Deponietechnik und Geomechanik entwickelt.

Im Hinblick auf die Durchführung der Berechnungen und die Prüfung/ Dokumentation der zahlenmäßigen Richtigkeit der Berechnungsergebnisse ist wie folgt vorgegangen worden:

- (1) Analyse des Grubenbau- bzw. Gebirgs-Tragverhalten für eine Teufe von $z = 900\text{m}$ für die verschiedene Gebirgstypen und detaillierte Prüfung der Ergebnisqualität sowie ausführliche Dokumentation der Berechnungsergebnisse. Die bewertungsrelevanten Daten wie Ausdehnung der pseudoplastischen Zone und Ausdehnung der Dilatanzzone, lokale Verzerrungen sowie Konturverschiebungen sind in spezielle Diagramme übertragen worden.
- (2) Analyse des Grubenbau- bzw. Gebirgstragverhaltens für die Teufe von $z = 600\text{m}$ und $z = 1200\text{m}$ für die verschiedenen Gebirgstypen mit grundsätzlicher Prüfung der Ergebnisqualität, Dokumentation wesentlicher Berechnungsdaten und Übernahme der bewertungsrelevanten Daten in Diagramme.



5.2 Berechnungsmodell und Diskretisierung

Den Berechnungen wird ein scheibenartiges Modell im ebenen Verzerrungszustand (EVZ) zugrunde gelegt. Der aus Symmetriegründen auf das halbe Modell beschränkte Berechnungsausschnitt wird durch 1224 isoparametrische 8-Knoten- Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion diskretisiert und ist aus Bild 5.1 zu entnehmen. Entsprechend dem Bedürfnis nach ausreichender Genauigkeit im Konturbereich und auch in den Eckbereichen des Streckenquerschnitts sind die Elementgrößen zur Kontur hin verkleinert worden und bezüglich ihrer Form etwa quadratisch gewählt worden, um möglichst geringe Abweichungen aus der Zustandsgrößeninterpolation von den Gaußpunkten auf die Knotenpunkte zu erhalten. Gerade in den Bereichen mit ausgeprägten Spannungskonzentrationen kann eine zusätzliche numerisch bedingte Abweichung das Ergebnis weiter verschlechtern.

Das Modell ist an den rechten und linken Berandungen in x- Richtung (horizontal), an der unteren Berandung in y- Richtung (vertikal) unverschieblich gelagert. Die Verschiebungen nach oben sind nicht behindert. Da die Deformationen in lateraler Richtung begrenzt sind, können über die primären Spannungen hinaus Randspannungen an der äußeren Berandung auftreten.

5.3 Berücksichtigung des Lastfalls Temperaturänderung

Die Berechnung des aus der von den Abfällen freigesetzten Wärmeenergie resultierenden Temperaturfeldes im Gebirge in der Streckenumgebung wird von der Berechnung der mechanischen Zustandsgrößenfelder getrennt durchgeführt. Für die Temperaturfeldberechnung wird die bereits in Bild 4.2 vorgestellte Temperaturkurve angesetzt, die für die Streckenkotur gelten soll. Aus den für die damit vorgegebenen Streckenrandtemperaturen berechneten Temperaturänderungen im Betrachtungsgebiet werden dann mit dem Programm *M3POT* unter dem Lastfall Temperaturänderung die zugehörigen Thermo- spannungen ermittelt. Diese Thermo- spannungen werden entsprechend dem jeweiligen Temperaturzuwachs zeitbezogen (jährlich) den aus dem Ausbruch resultierenden Zustandsgrößen überlagert. Auf diese Weise wird eine einseitige thermisch- mechanische Kopplung erreicht.



In den Berechnungen nicht berücksichtigt wird die durch die Gebirgserwärmung bedingte größere Deformationsfähigkeit des Gesteins und Reduzierung der Festigkeit. Hier ist eine besondere Wirkung auf das Salzgestein (Steinsalz) zu erwarten (Zunahme der Kriechrate). Allerdings bedingt die erhöhte Temperatur auch eine Zunahme der Duktilität und damit der bruchfreien Verformbarkeit.

Weiterhin nicht in den Berechnungen berücksichtigt werden die durch Dilatanz und Temperaturänderung induzierten Wassergehaltsänderungen im Tongestein mit ihren Konsequenzen auf Bruchfestigkeit und Deformationsfähigkeit.

6 Berechnungsergebnisse und Überprüfung der numerischen Qualität, Teufe $z = 900\text{m}$

6.1 Vorgehensweise

Die mit dem FE-Programm *Mises3* erhaltenen Berechnungsergebnisse werden einerseits als Graphen, andererseits als Flächenplots durch das Postprocessing- Programm *Femview* visualisiert.

Um die Einhaltung der Randbedingungen überprüfen zu können, werden ausgewählte Berechnungsergebnisse vorgestellt, anhand derer eine Validierung der Ergebnisse vorgenommen werden kann. Exemplarisch werden für Tongestein geschädigt die ausgewerteten Berechnungsergebnisse als Bild 6.1 – 6.6 beigelegt.

Möglichkeiten der Validierung der Berechnungsergebnisse sind in Verbindung mit Bild 6.1:

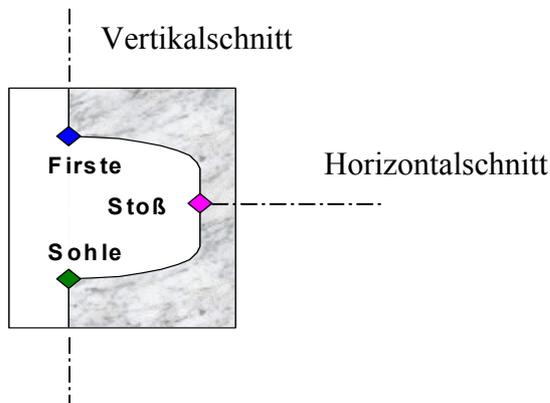


Bild 6.1: Auswertung der Berechnungsergebnisse.

- Horizontalschnitt/ Spannungen $\sigma_x \equiv 0$ an der Kontur; für den Lastfall *Ausbruch* ins Gebirge hinein allmählich Erreichen des Primärspannungszustandes; Spannungen aus Lastfall *Ausbruch und Temperatur* mit geringer zusätzlicher Druckspannung infolge behinderter Verformung durch Sperrung des Modellrandes und damit infolge behinderter Materialausdehnung.
- Horizontalschnitt/ Spannungen σ_y für den Lastfall *Ausbruch* ins Gebirge hinein mit allmählichem Erreichen des Primärspannungszustandes; Spannungen aus Lastfall *Ausbruch und Temperatur* mit geringer Zugspannung aufgrund behinderter Materialausdehnung.
- Vertikalspannung σ_x : für den Lastfall *Ausbruch* ins Gebirge hinein Übergang zum Primärspannungszustand mit Niveau $p_h = K_0 \cdot p_v$.
- Vertikalspannung σ_y : für den Lastfall *Ausbruch* ins Gebirge hinein Übergang zum Primärspannungszustand mit Niveau p_v .
- Konturschnitt $\sigma_l \equiv 0$: Diese Randbedingung muss in jedem Gebirgsэлеment an der Kontur erfüllt sein, da die Strecke keinen Ausbau aufweist. Tatsächlich entstehen in den Eckbereichen aufgrund der großen Spannungsgradienten und der gewählten Diskretisierung numerische Ungenauigkeiten mit abweichenden Spannungszuständen; außerdem können durch Extrapolation zu den Randknoten zusätzlich Ungenauigkeiten indiziert werden. Für elastische Berechnungen ergeben sich lokal Werte von $\Delta\sigma = \pm 5$ MPa in den als numerisch



problematisch erkannten Bereichen, die bezogen auf die Maximalspannungen als tolerabel erscheinen. Im Rahmen der elastoplastischen bzw. elasto-viskosen Berechnungen bei Tongestein respektive Salzgestein nehmen diese Werte infolge der Spannungsumlagerungen ab.

- Konturschnitt $\sigma_3 \equiv \beta_{1D}$: Diese Randbedingung muss in jedem Gebirgselement an der Kontur erfüllt sein. Tatsächlich entstehen in den Eckbereichen aufgrund der großen Spannungsgradienten und der Diskretisierung numerische Ungenauigkeiten; außerdem können durch Extrapolation zu den Randknoten zusätzlich Ungenauigkeiten bedingt sein. β_{1D} bezeichnet hierbei die einaxiale Druckfestigkeit, die aus der Formel

$$\beta_{1D} = 2 \cdot C \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (10)$$

zu berechnen ist mit

C Kohäsion

ϕ Winkel der inneren Reibung (Bruch- bzw. Plastizitätsbedingung bei $\min \sigma \equiv 0 \text{MPa}$).

6.2 Granitgestein

Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe von grafischen Berechnungsauswertungen (die hier nicht beigefügt sind), aus denen die Informationen abzulesen sind, die nach den tabellarischen Prüfprotokollen Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse benötigt werden.



(a) Granitgestein intakt

<i>Linie</i>	<i>berechnet</i>	<i>Schnitt</i>	<i>Spannung</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Ist (von-bis)</i>	<i>Soll (von-bis)</i>	<i>Erfüllt</i>
Alle	A, T, A+T	Hor.	σ_x	$\sigma_x = 0$			Ok
LC4	A	Hor.	σ_x	p_h	19	19,125	Ok
LC4	A	Hor.	σ_y	p_v	22	22,5	Ok
LC4	A	Vert.	σ_x	p_h	22-16	22,3-15,9	Ok
Alle	A, T, A+T	Vert.	σ_y	$\sigma_y = 0$			Ok
LC4	A	Vert.	σ_y	p_v	26-19	26,25-18,75	Ok
Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_1	$\sigma_1 = 0$	0-5	0	Ok
Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_3	$\sigma_3 < \sigma_D$	35-110	166,82	Ok

A: Lastfall *Ausbruch*, T: Lastfall *Temperatur*, A+T: Lastfall *Ausbruch und Temperatur*

Tabelle 6.1: Dokumentation der Berechnungsergebnisse für Granitgestein intakt

(b) Granitgestein leicht geschädigt

<i>Linie</i>	<i>berechnet</i>	<i>Schnitt</i>	<i>Spannung</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Ist (von-bis)</i>	<i>Soll (von-bis)</i>	<i>Erfüllt</i>
Alle	A, T, A+T	Hor.	σ_x	$\sigma_x = 0$			Ok
LC4	A	Hor.	σ_x	p_h	19	19,125	Ok
LC4	A	Hor.	σ_y	p_v	22	22,5	Ok
LC4	A	Vert.	σ_x	p_h	22 -16	22,3-15,9	Ok
Alle	A, T, A+T	Vert.	σ_y	$\sigma_y = 0$			Ok
LC4	A	Vert.	σ_y	p_v	26-19	26,25-18,75	Ok
Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_1	$\sigma_1 = 0$	0-5	0	Ok
Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_3	$\sigma_3 < \sigma_D$	35-110	166,82	Ok

A: Lastfall *Ausbruch*, T: Lastfall *Temperatur*, A+T: Lastfall *Ausbruch und Temperatur*

Tabelle 6.2: Dokumentation der Berechnungsergebnisse für Granitgestein leicht geschädigt.



6.3 Tongestein

Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe der Bilder 6.1 – 6.6, die exemplarisch für Tongestein leicht geschädigt beigefügt sind, aus denen die Informationen abzulesen sind, die nach den tabellari- schen Prüfprotokollen Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 zur Verifizierung der Berechnung benötig werden.

(a) Tongestein intakt

<i>Linie</i>	<i>berechnet</i>	<i>Schnitt</i>	<i>Span- nung</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Ist (von–bis)</i>	<i>Soll (von–bis)</i>	<i>Erfüllt</i>
Alle	A, T, A+T	Hor.	σ_x	$\sigma_x = 0$			Ok
LC1	A	Hor.	σ_x	p_h	19	19,125	Ok
LC1	A	Hor.	σ_y	p_v	22	22,5	Ok
LC1	A	Vert.	σ_x	p_h	22–16	22,3–15,9	Ok
Alle	A, T, A+T	Vert.	σ_y	$\sigma_y = 0$			Ok
LC1	A	Vert.	σ_y	p_v	26–19	26,25–18,75	Ok
Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_1	$\sigma_1 = 0$	0–4,5 (el.) 0–1,2 (pl.)	0	Ok
Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_3	$\sigma_3 < \sigma_D$ (pl.)	2–38 (pl.) 100 (el.)	34,65 (pl.)	Ok

A: Lastfall *Ausbruch*, T: Lastfall *Temperatur*, A+T: Lastfall *Ausbruch und Temperatur*

el. = elastisch, pl. = plastisch

Tabelle 6.3: Dokumentation der Berechnungsergebnisse für Tongestein intakt.



(b) Tongestein leicht geschädigt

<i>Bild</i>	<i>Linie</i>	<i>berechnet</i>	<i>Schnitt</i>	<i>Spannung</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Ist (von-bis)</i>	<i>Soll (von-bis)</i>	<i>Erfüllt</i>
6.1	Alle	A, T, A+T	Hor.	σ_x	$\sigma_x = 0$			Ok
6.1	LC1	A	Hor.	σ_x	p_h	19	19,125	Ok
6.2	LC1	A	Hor.	σ_y	p_v	22	22,5	Ok
6.3	LC1	A	Vert.	σ_x	p_h	22–16	22,3–15,9	Ok
6.4	Alle	A, T, A+T	Vert.	σ_y	$\sigma_y = 0$			Ok
6.4	LC1	A	Vert.	σ_y	p_v	26–19	26,25–18,75	Ok
6.5	Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_1	$\sigma_1 = 0$	0–4,3 (el.) 0–0,8 (pl.)	0	Ok
6.6	Alle	A, T, A+T	Kontur	σ_3	$\sigma_3 < \sigma_D$ (pl.)	2–17 (pl.) 90 (el.)	15,7 (pl.)	Ok

A: Lastfall *Ausbruch*, T: Lastfall *Temperatur*, A+T: Lastfall *Ausbruch und Temperatur*,
 el. = elastisch, pl. = plastisch

Tabelle 6.4: Dokumentation der Berechnungsergebnisse für Tongestein leicht geschädigt.

Besonderheiten: Die elastische Vergleichsberechnung in LC14 (vgl. Bilder) zeigt deutlich, wie in der Berechnung durch die Ausbildung pseudo-plastischer Zonen Spannungen umgelagert werden. Im Gegensatz zu Granitgestein liegen die Spannungsverläufe aus den Berechnungen unter Verwendung der Bruchhypothese nach *Mohr-Coulomb* nicht auf den Kurven der Spannungsverläufe aus der elastischen Berechnung nach dem *Hookeschen* Stoffmodell, woraus auf die Ausbildung pseudo-plastischer Zonen zu schließen ist. In Bild 6.2 ist deutlich an der y-Achse die Größe der pseudo-plastische Zone zu erkennen: LC13 (rot, Linie „A“) berührt die y-Achse bei $\sigma = -15,5$ MPa, der Bruchbedingung in diesem Fall entsprechend.

6.4 Salzgestein

Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe von grafischen Berechnungsauswertungen (die hier nicht beigefügt sind), aus denen die Informationen abzulesen sind, die nach den tabellarischen



Prüfprotokollen Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse benötigt werden.

(a) Salzgestein, Lastfall *Ausbruch*

<i>Linie</i>	<i>berechnet</i>	<i>Schnitt</i>	<i>Spannung</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Ist (von-bis)</i>	<i>Soll (von-bis)</i>	<i>Erfüllt</i>
Alle	A	Hor.	σ_x	$\sigma_x = 0$			Ok
Alle	A	Hor.	σ_y	p_v	22	22,5	Ok
Alle	A	Vert.	σ_x	p_h	25–17,6	24,6–17,55	Ok
Alle	A	Vert.	σ_y	$\sigma_y = 0$			Ok
Alle	A	Vert.	σ_y	p_v	25–17,5	24,6–17,55	Ok
Alle	A	Kontur	σ_1	$\sigma_1 = 0$	0–3,5 (el.) 0–1,55	0	Ok

A: Lastfall *Ausbruch*, T: Lastfall *Temperatur*, A+T: Lastfall *Ausbruch und Temperatur*

Tabelle 6.5: Dokumentation der Berechnungsergebnisse für Salzgestein, Lastfall *Ausbruch*.

(b) Salzgestein, Lastfall *Ausbruch und Temperaturänderung*

<i>Linie</i>	<i>berechnet</i>	<i>Schnitt</i>	<i>Spannung</i>	<i>Kriterium</i>	<i>Ist (von-bis)</i>	<i>Soll (von-bis)</i>	<i>Erfüllt</i>
Alle	A+ T	Hor.	σ_x	$\sigma_x = 0$			Ok
Alle	A+ T	Hor.	σ_y	p_v	22	22,5	Ok
Alle	A+ T	Vert.	σ_x	p_h	25–17,6	24,6–17,55	Ok
Alle	A+ T	Vert.	σ_y	$\sigma_y = 0$			Ok
Alle	A+ T	Vert.	σ_y	p_v	25–17,5	24,6–17,55	Ok
Alle	A+ T	Kontur	σ_1	$\sigma_1 = 0$	0–8,5 (el.) 0–3,5	0	Ok

A: Lastfall *Ausbruch*, T: Lastfall *Temperatur*, A+T: Lastfall *Ausbruch und Temperatur*

Tabelle 6.6: Dokumentation der Berechnungsergebnisse für Salzgestein, Lastfall *Ausbruch und Temperaturänderung*



7 Berechnungsergebnisse und Aufarbeitung für die Bewertung/ Variation der Teufenlage z

Die Berechnungsergebnisse werden nach der in Abschnitt 6 beschriebenen Verifikation bezüglich der Parameter *Ausdehnung von pseudoplastischer Zone* und *Ausdehnung von dilatanten Zonen* sowie *effektive Verzerrungen* und *Verformungen* in Firste, Sohle und Stoß ausgewertet. Aus den Verformungen wird zusätzlich die Konvergenz berechnet. Als Grundlage dienen die Plots für die Referenzteufe $z = 900\text{m}$. Für die weiteren Teufen und die Variation von K_0 werden für die Darstellung in speziellen Diagrammen analog die gleichen Bilder herangezogen, die diesem Bericht allerdings nicht beigelegt sind. Anhand der vorstehend vorgestellten Kriterien sind auch diese Berechnungen hinsichtlich der zahlenmäßigen Qualität überprüft worden.

Die Variation der Teufenlage geht in die Diagramme über die Auftragung der Ergebnisdaten in Abhängigkeit von der Teufe ein. Für die Variation des Seitendruckbeiwertes K_0 wird getrennt eine Auswertung für $K_0 < 1$ und $K_0 > 1$ vorgenommen (\rightarrow Kurvenschar).

Damit folgt:

- (1) Auswertung in Abhängigkeit der Teufenlage mit $K_0 < 1$. Die Diagramme der Auswertung sind auf den Bildern 8.2 bis 8.17 zu finden.
- (2) Auswertung in Abhängigkeit der Teufenlage mit $K_0 > 1$. Die Diagramme mit dem Ergebnissen der Auswertung sind auf den Bildern 8.26 bis 8.41 zu finden.

8 Vorschlag für die Operationalisierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ und die indikatorbezogene Ableitung von Kriterien

8.1 Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“

Die Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ wird dann als positiv erfüllt angesehen, wenn

- (1) das Gebirge als Haupttragelement die Beanspruchungen aus Auffahrung und Abfallablagung aufnimmt, d.h. Grubenbaue unter dem relevanten Einwirkungen über die vorgese-



hene Betriebszeit von 50 Jahren standfest sind ohne die Anordnung nachhaltiger Sicherungsmittel und

- (2) aufgrund des Sekundärspannungsfeldes durch Auffahrung und Temperaturänderungen nicht von einer signifikanten Herabsetzung der Primärpermeabilität durch eine weit in das Gebirge hineinreichende Auflockerungszone auszugehen ist.

Zusätzlich sollte die Sekundärpermeabilität in der unvermeidbaren konturnahem Auflockerungszone begrenzt sein, damit die Qualität und Leistungsfähigkeit von im Rahmen der Stilllegung einzubauenden Damm- und Verschlussbauwerken als sogenannten geotechnischen Barrieren nicht durch vorhandene, nicht zu verschließende Umläufigkeiten in Frage gestellt wird.

Zur Operationalisierung der Anforderung „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ werden daher zwei Indikatoren mit zugehörigen Kriterien formuliert, mit deren Hilfe vorgegebene Gebirgsformationen bezüglich dieser Anforderung beurteilt werden können.

Die Indikatoren behandeln einerseits das Gebirge als Haupttragelement, andererseits werden Aussagen über die Sekundärpermeabilität gemacht, die sich nach Auffahrung um die Kontur einstellt. Die Indikatoren sind mit den zugeordneten Kriterien dabei so zu wählen, dass direkt oder indirekt über vorhandene und in geologischen Karten katalogisierte Daten die für die Anwendung der Kriterien notwendige Informationen ermittelt werden können.

8.2 Indikatoren

8.2.1 Definition der Indikatoren

Zur Operationalisierung der Anforderung werden als Indikatoren vorgeschlagen:

(II) Gebirge als Haupttragelement

Das Gebirge hat die Funktion des Haupttragelementes, d.h. in der Gesteinsformation muss über eine Betriebszeit von einigen Jahrzehnten ein standfestes Grubengebäude ohne Anordnung nachhaltiger Sicherungsmittel errichtbar sein. Maß für das Tragverhalten des Gebirges ist die Standfestigkeit einer repräsentativen ausbaufreien Strecke über eine Standzeit von 50 Jahren. Der Indikator „Gebirge als Haupttragelement“ lässt sich über Berechnungen in quantifizierende Kriterien transformieren.



Anm.: Selbstverständlich ist im Rahmen späterer Tragwerksplanungen für eine Untertageerkundung bzw. für ein Endlager aufbauend auf dann vorhandene Standort bezogenen Daten eine angemessene Standsicherheit der jeweiligen Grubenbau nachzuweisen. Vorstehende Definition und nachfolgende Kriterien gelten nur für diese Konzeption des Standortauswahlverfahrens.

(I2) begrenzte Sekundärpermeabilität

Die Sekundärpermeabilität ist zahlenmäßig begrenzt und auf einen konturnahen Gebirgsbereich begrenzt, d.h., in der Gebirgsformation dürfen zusätzliche technogen bedingte Wegsamkeiten nur konturnah entstehen, damit die Wirksamkeit der geologischen Barriere und der als Damm- und Verschlussbauwerke zu errichtenden geotechnischen Barrieren langfristig gewährleistet ist. Maß für die Ausbildung einer Sekundärpermeabilität sind die Größe der Dilatanzzone und die Dilatanz.

Der Indikator (I2) lässt damit sich weiter differenzieren in die Teilindikatoren:

(I2a) keine Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen, durch die Auffahrung unvermeidbar aufgelockerten/ entfestigten Konturzone und

(I2b) begrenzte Sekundärpermeabilität innerhalb der dilatanten Konturzone.

Der Indikator begrenzter Sekundärpermeabilität nach keiner Ausbildung einer Sekundärpermeabilität außerhalb einer begrenzten Konturzone lässt sich über Berechnungen in qualifizierte Kriterien transformieren.

8.2.2 Spezifizierung der Indikatoren durch Kriterien

8.2.2.1 Kriterien für Granitgesteine

Zur Quantifizierung der Indikatoren für Granitgesteine, denen ein linear-elastisch/ sprödes Materialverhalten zugewiesen wird, werden die folgenden indikatorbezogenen Kriterien formuliert (r = radialer Abstand der Kontur von der Streckenachse):

$$(I1) \quad \text{vorh}\sigma < \beta_{ID}^G \text{ (Kontur)} \quad (8.1a)$$

$$(I2a) \quad \text{vorh}\sigma_v < \beta_{Dil} \text{ in } \max r < r + \Delta r \quad (8.1b)$$



Δr = zulässige Ausdehnung der Dilatanzzone (*Ansatz: $\Delta r = 1,0$ m*)

$$(I2b) \quad \Delta K \leq 10^x \text{ m}^2 \text{ in der Dilatanzzone} \quad (8.1c)$$

(*Ansatz: $x=1$; Begründung: wenn überhaupt, dann nur Rissverschließung; keine Konvergenz, keine Rissverheilung im Bereich geotechnischer Barrieren*)

8.2.2.2 Kriterien für Tongesteine

Zur Quantifizierung der Indikatoren für Tongesteine, denen im hier relevanten Beanspruchungsbereiche ein linear- elastisches/ ideal plastisches Materialverhalten zugewiesen wird, werden folgende indikatorbezogene Kriterien formuliert (r = radialer Abstand der Kontur von der Streckenachse) :

$$(I1a) \quad \text{vorh}\sigma^{\text{pl}} \text{ in } \max r < r + \Delta r \quad (8.2a)$$

Δr = zulässige Ausdehnung der pseudoplastischen Zone (*Ansatz: $\Delta r = 0,5$ m*)

$$(I1b) \quad \text{vorh}\varepsilon^{\text{ep}} < \varepsilon_f^{\text{ep}} / \xi_\varepsilon \quad (8.2b)$$

$\varepsilon_f^{\text{ep}}$ = Bruchverzerrung

ξ_ε = auf die Bruchverzerrung bezogener Sicherheitsbeiwert

(*Ansatz: $\varepsilon_f^{\text{ep}} / \xi_\varepsilon = 1,0\%$) $\xi_\varepsilon = 1,0$ ($1 \times$ Kontur nacharbeiten))*

$$(I2a) \quad \text{vorh}\sigma_v < \beta_{\text{Dil}} \text{ in } \max r < r + \Delta r \quad (8.2c)$$

Δr = zulässige Ausdehnung der Dilatanzzone (*Ansatz: $\Delta r = 2,0$ m*)

$$(I2b) \quad \Delta K \leq 10^y \text{ m}^2 \text{ in der Dilatanzzone} \quad (8.2d)$$

(*Ansatz: $y=2$; Begründung: Rissverschließung und Rissverheilung infolge moderater Konvergenz bzw. Quellverformung im Bereich geotechnischer Barriere*)

8.2.2.3 Kriterien für Salzgesteine

Zur Quantifizierung der Indikatoren werden für Salzgesteine, denen im hier relevanten Beanspruchungsbereich ein linearelastisch/ viskoses Materialverhalten ohne Dilatanz zugewiesen wird (Stoffmodell *Norton*), folgende indikatorbezogene Kriterien formuliert (r = radialer Abstand der Kontur von der Streckenachse):



$$(I1a) \quad \text{vorh}\eta < \text{zul}\eta = \frac{1}{\xi_1 \cdot \xi_2}, \text{ für vorh } r > r + \Delta r \quad (8.3a)$$

η = spannungsbezogener Ausnutzungsgrad der Kurzzeitfestigkeit

ξ_1, ξ_2 = Partial – Sicherheitsbeiwerte (*Ansatz: $\xi_1 \cdot \xi_2 = 2,0$ für $t \leq 50$ Jahre*)

Δr = Konturzone mit entfestigungsbedingter Spannungsumlagerung (Stoffmodell *Hou/Lux, Hou/Lux (1999)*), (*Ansatz: $\Delta r = 0,5m$*)

$$(I1b) \quad \text{vorh}\varepsilon_v^{ev} < \varepsilon_f(\min \sigma, \dot{\varepsilon}_v) / \xi_\varepsilon \quad (8.3b)$$

ε_f = Kriechbruchverzerrung

ξ_ε = auf die Kriechbruchverzerrung bezogener Sicherheitsbeiwert

(*Ansatz: $\varepsilon_f / \xi_\varepsilon = 10\%$, ($T = 298 K$) und $\varepsilon_f / \xi_\varepsilon = 20\%$ ($T \geq 318K$), $\xi_\varepsilon = 1,0$ ($1 \times$ Kontur nacharbeiten))*)

$$(I2a) \quad \text{vorh}\eta < \eta_{Dil} \text{ in } \max r < r + \Delta r \quad (8.3c)$$

Δr = zulässige Ausdehnung der Dilatanzzone (*Ansatz: $\Delta r = 3,0 m$*)

η_{Dil} = Ausnutzungsgrad zur Charakterisierung der Dilatanzfestigkeit

$$(I2b) \quad \Delta K \leq 10^2 m^2 \text{ in der Dilatanzzone} \quad (8.3d)$$

(*Ansatz: $z=4$; Begründung: Rissverschließung und Rissverheilung infolge ausgeprägter Konvergenz und Rekristallisation im Bereich von geotechnischen Barrieren*)

Hinweis: Die Zahlenwerte für die Parameter x, y, z sind erste quantifizierende tendenzielle Einschätzungen und in Teil B zu präzisieren.

8.3 Rechnerische Befunde

Die rechnerischen Ergebnisse sind im Hinblick auf die Bewertung der jeweiligen gebirgsmechanischen Tragwerkssituation entsprechend den kriterienbezogenen Zustandgrößen / Bewertungsparametern in den Diagrammen der Bilder 8.2 bis 8.17 ($K_0 \leq 1,0$) und 8.26 bis 8.41 ($K_0 \geq 1,0$) ausgewertet worden.

Danach ergibt sich in Verbindung mit den Bewertungskriterien / Grenzwerten des Abschnitts 8.2 folgenden Befund:



(1) Granitgesteine

Voraussetzung für nachstehende Aussagen: angesetzte Materialkennwerte zur Gebirgsqualität

(1a) Granitgestein intakt

(I1) $\text{vorh}\sigma < \beta_{1D}^G$ (Kontur) \rightarrow

im Teufenbereich 600 – 1200 m für die Lastfälle A/A+T

(I2a) $\text{vorh}\sigma_v < \beta_{Dil}$ \rightarrow

im Teufenbereich 600 – 1200 m für die Lastfälle A/A+T

(I2b) $\Delta K < 10^1 \text{ m}^2$ in der Dilatanzzone \rightarrow

keine rechnerische Ausbildung einer Dilatanzzone \rightarrow keine rechnerische Sekundärpermeabilität

Vorläufiges Fazit:

Bei Granitgestein der Gebirgsklasse *intakt* liegen im Teufenbereich 600 – 1200 m „gebirgsmechanisch günstige Voraussetzungen“ vor.

(1b) Granitgestein leicht geschädigt

(I1) $\text{vorh}\sigma < \beta_{1D}^G$ (Kontur) \rightarrow

im Teufenbereich 600 – 1200 m für die Lastfälle A/A+T

(I2a) $\text{vorh}\sigma_v < \beta_{Dil}$ \rightarrow

im Teufenbereich 600 – 1200 m für den Lastfall A sowie

$\text{vorh}\sigma_v < \beta_{Dil}$ in $\max r < r + 1,00 \text{ m} \rightarrow$

im Teufenbereich 600 - 1200 m für den Lastfall A+T

Die maximale Ausdehnung der Dilatanzzone erreicht $\Delta r = 0,23 \text{ m}$ in $z = 1200 \text{ m}$ Teufe im Lastfall A+T.

(I2b) $\Delta K < 10^1 \text{ m}^2$ in der Dilatanzzone \rightarrow



keine Bewertung möglich → Teil B

Die Streckenkonvergenz beträgt maximal 1 – 2 cm in beiden Lastfällen.

Vorläufiges Fazit:

Bei Granitgestein der Gebirgsklasse *leicht geschädigt* liegen bis in den Teufenbereich von $z = 1200$ m „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ vor.

(2) Tongesteine

Voraussetzung für nachstehende Aussagen: angesetzte Materialkennwerte zur Gebirgsqualität

(1a) Tongestein intakt

(I1a) $\text{vorh}\sigma^{\text{pl}}$ innerhalb $r + 0,5$ m →

- im Teufenbereich 600 – 900 m für den Lastfall A
- im Teufenbereich 600 – 700 m für den Lastfall A+T

(I1b) $\text{vorh}\epsilon^{\text{ep}} < 1\%$ →

im Teufenbereich 600 – 1100 m für die Lastfälle A/A+T

(I2a) $\text{vorh}\sigma_v < \beta_{\text{Dil}}$ in $\text{max}r < r + 2,00$ m →

für $K_0 < 1,0$:

- im Teufenbereich 600 – 1200 m für den Lastfall A sowie
- im Teufenbereich 600 – 1000 m für den Lastfall A+T

für $K_0 > 1,0$:

- im Teufenbereich 600 – 900 m für den Lastfall A sowie
- im Teufenbereich < 600 für den Lastfall A+T

(I2b) $\Delta K < 10^2$ m² in der Dilatanzzone →

keine Bewertung möglich → Teil B

Die Konvergenz erreicht Werte von < 5 cm bei einer Teufe bis zu $z = 1200$ m in beiden Lastfällen.



Vorläufiges Fazit:

Bei Tongestein der Gebirgsklasse *intakt* liegen bis in den Teufenbereich von

$z = 900$ m im Lastfall Ausbruch und

$z = 600$ m im Lastfall Ausbruch/ Temperatur

bei Ansatz einer Dilatanzzone $< 2,0$ m „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ vor.

Wird eine Dilatanzzone von $\Delta r \leq 3$ m vorgegeben, dann folgen für die Teufenbereiche

$z \leq 1200$ m im Lastfall Ausbruch und

$z \leq 900$ m im Lastfall Ausbruch/ Temperatur

„günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“.

(2b) Tongestein leicht geschädigt

(I1a) $\text{vorh}\sigma^{\text{pl}}$ innerhalb $r + 0,5$ m \rightarrow

- im Teufenbereich < 500 m (?) für die Lastfälle A/A+T

(I1b) $\text{vorh}\varepsilon^{\text{ep}} < 1\%$ \rightarrow

- im Teufenbereich bis 500 m für den Lastfall A
- im Teufenbereich bis 500 m für den Lastfall A+T

(I2a) $\text{vorh}\sigma_v < \beta_{\text{Dil}}$ in $\text{max}r < r + 2,00$ m \rightarrow

im Teufenbereich < 500 m (?) für die Lastfälle A/A+T bei $K_0 < 1,0$

Die Berechnungen weisen ergänzend aus für den Lastfall A + T:

$K_0 < 1,0$: $\Delta r < 3,0$ m bei $z < 700$ m

$K_0 > 1,0$: $\Delta r < 4,2$ m bei $z < 600$ m

(I2b) $\Delta K < 10^2 \text{ m}^2$ in der Dilatanzzone

keine Bewertung möglich \rightarrow Teil B

Die Konvergenz liegt im Bereich von 25 cm bei einer Teufe $z < 1200$ m und im Bereich von < 8 cm bei einer Teufe $z < 700$ m in beiden Lastfällen.



Vorläufiges Fazit:

Bei Tongestein der Gebirgsklasse *leicht geschädigt* liegen bis in den Teufenbereich von $z = 500$ m (?) für die Lastfälle Ausbruch und Ausbruch/ Temperatur bei $K_0 < 1,0$ „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ vor. Für $K_0 > 1,0$ sind die Beanspruchungsverhältnisse noch ungünstiger (Lastfall A + T: pseudo- plastische Zone $\Delta r < 3,2$ m bei $z = 600$ m)

(3) Salzgesteine

Voraussetzung für nachstehende Aussagen:

Angesetzte Materialkennwerte zur Gebirgsqualität

(I1a) $\text{vorh}\eta < \text{zul}\eta = 0,50$ in $\text{vorh } r > r + 0,5\text{m}$ (Kontur) \rightarrow

- im Teufenbereich 600- 1100m für den Lastfall A
- im Teufenbereich 600- 1000 m für den Lastfall A+T

(I1b) $\text{vorh}\epsilon_v^{\text{ev}} < \epsilon_f = 10/ 20 \%$ \rightarrow

- im Teufenbereich 600 – 900 m für den Lastfall A
- im Teufenbereich 600 – 800 m für den Lastfall A+T.

Die Konvergenz erreicht in $z = 900$ m Teufe

- Werte von 0,75 m im Lastfall A und
- Werte von 1,80 m im Lastfall A+T

(I2a) $\text{vorh}\eta < \eta_{\text{Dil}}$ in $\text{max } r < r + 3$ m \rightarrow

- im Teufenbereich 600 – 1200 m für den Lastfall A
- im Teufenbereich 600 – 1200 m für den Lastfall A+T.

(I2b) $\Delta K < 10^4$ m² in der Dilatanzzone \rightarrow

keine Bewertung möglich \rightarrow Teil B



Vorläufiges Fazit:

Bei Salzgestein mit der angesetzten mittleren Kriechcharakteristik liegen im Teufenbereich

- von 600 – 900 m für den Lastfall A und
- von 600 – 800 m für den Lastfall A+T

„günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ vor.

Hinzuweisen ist darauf, dass Konturauflockerungen aufgrund des Vortriebsverfahrens (z.B. Bohr- und Sprengvortrieb) nicht berücksichtigt sind. Grundsätzlich wird von einer gebirgschonenden Auffahrung ausgegangen.

9 Zusammenfassung und Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Im Rahmen der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen und der entwickelten Methode zur Operationalisierung der Anforderung „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ führen die rechnerischen Analysen und die Auswertung der rechnerischen Ergebnisse anhand der entwickelten Kriterien / angesetzten Grenzwerte zu einer gesteinsart- und gebirgsklassenbezogenen Aussage darüber, bis in welche Teufe jeweils „günstige gebirgsmechanische Verhältnisse“ zu erwarten sind.

Prinzipiell lässt sich derzeit vorläufig folgende Tendenz feststellen.

- (1) Für **Granitgestein** der Gebirgsklassen *intakt* und *leicht geschädigt* liegen bis in eine Teufe von 1200 m günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen vor für die Lastfälle Ausbruch /Ausbruch und Temperaturänderung.
- (2) Für **Tongestein** ist die Aussage erheblich zu differenzieren in Abhängigkeit von der Gebirgsklasse.

Für *Tongestein* der Gebirgsklasse *intakt* kann eingeschätzt werden, dass

- im Lastfall Ausbruch bis in eine Teufe von 900 (1200) m und
- im Lastfall Ausbruch/Temperatur bis in eine Teufe von 600 (900) m

jeweils günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen vorliegen (Werte in Klammern für Dilatanzzone $\Delta r < 3,0\text{m}$).



Für *Tongestein* der Gebirgsklasse *leicht geschädigt* ist dagegen davon auszugehen, dass in den beiden Lastfällen Ausbruch sowie Ausbruch und Temperaturänderung nur für Teufen < 500 m gebirgsmechanische Bedingungen vorliegen, die nach den abgeleiteten Kriterien/ eingeschätzten Grenzwerten „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ erwarten lassen.

Damit steht bei *Tongestein* erwartungsgemäß die mit Gewährleistung der Anforderung „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ erreichbare Teufe in dominanter Abhängigkeit von den Gebirgskennwerten, insbesondere der Gebirgsfestigkeit (ϕ , c).

Um hier eine differenziertere Aussage zu ermöglichen, wird eine ergänzende Untersuchung im Teil B vorgeschlagen (\rightarrow siehe Anhang).

- (3) Für *Salzgestein* der hier unterstellten Gebirgsklasse *mittlere Kriechfähigkeit* können in Verbindung mit den angesetzten Kriterien/ eingeschätzten Grenzwerten ausgehend von einer Teufe $z \geq 600$ m

– bis in eine Teufe von 1100 m für den Lastfall Ausbruch und

– bis in eine Teufe von 1000 m für den Lastfall Ausbruch/ Temperaturänderung

„günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ abgeleitet werden. Diese Aussage ist im Grundsatz in Übereinstimmung mit den bergbaulichen Erfahrungen (dort allerdings kein Lastfall Temperaturänderung!).

Hier ist allerdings zu ergänzen, dass bei Grubenbauen in *Salzgestein* (*Steinsalz*) durch gelegentliches Nachfirsten aufgelockerte/ entfestigte Konturbereiche entfernt werden können bzw. durch Konvergenz betrieblich beeinträchtigte Streckenquerschnitte (Licht- raumprofil) durch Nachschneiden der Konturen rekonstruiert werden können. Aufgrund des ausgeprägt duktil-viskoplastischen Materialverhaltens ist bei als Einzelhohlräumen anzusprechenden Grubenbauen ein Konturbereich mit Gefügeentfestigungen zu erwarten, der sich auch durch wiederholte Kontursanierungen eher nicht kumulativ progressiv in das Gebirge entwickelt. Diese Aussage gilt nicht für benachbarte Grubenbaue mit Beanspruchungsüberlagerung in Pfeilern bzw. Zwischensohlenschweben.



Nicht quantifizierbar ist bislang für die Gesteinstypen Granitgestein und Tongestein der Zusammenhang zwischen der Dilatanz und der Permeabilitätsänderung. Um hier die Permeabilitätsänderung als weiteren Indikator der Anforderung „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ auch quantifizierbar zu machen, wird eine Ergänzung der bisherigen Untersuchungen empfohlen (→ siehe Anhang).

Für den Gesteinstyp Salzgestein sind dazu ergänzende Berechnungen mit dem Stoffmodell *Hou/Lux* erforderlich, das eine explizite Berechnung der Dilatanz des Gebirges ermöglicht.

Clausthal, Januar 2002

(Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux)



10 Anhang

Angebot zu weiterführenden Untersuchungen – Bearbeitungsrahmen und Vorgehensweise

(a) Sachverhalt

- (1) Die ersten Berechnungsergebnisse zeigen, dass für die Referenzgesteinstypen *Granitgestein* und *Salzgestein* bei Annahme plausibler Daten (Granitgestein) bzw. erfahrungsgemäß abgesicherter Daten (Salzgestein) im Teufenbereich $z = 600 - 1200$ m keine dominant teufenabhängige Begrenzung der Machbarkeit vorliegen dürfte (Salzgestein: $\max z \approx 1000$ m je nach Kriechfähigkeit)
- (2) Die ersten Berechnungsergebnisse zeigen weiterhin, dass für den Referenzgesteinstyp *Tongestein* aufgrund der großen Bandbreite der in der Literatur dokumentierten Materialqualitäten diese Aussage nicht erhalten wird. Hier ergibt sich eine signifikante Abhängigkeit Bruchfestigkeit/Dilatanzfestigkeit – Teufe. Diese Abhängigkeit zu untersuchen ist bislang nicht Gegenstand der Beauftragung, ist aber notwendig, um bei dem gegenwärtigen Ansatz nur von Mittelwerten geeignete Lagerstätten aus gebirgsmechanischer Sicht im Auswahlverfahren nicht vorzeitig auszuschließen. Eine festigkeitsbezogene differenziertere Betrachtung gewinnt unter dem Aspekt eine zusätzliche Bedeutung, dass es vielleicht gelingen könnte, über genetische Daten (kartographiert bzw. ableitbar) Indikatoren für eine Festigkeitseinschätzung abzuleiten.
- (3) Während *Salzgesteine* in ihren Kenndaten / ihrer Kenndatenbandbreite aus eigener Ermittlung und literaturbezogenen Kenntnissen gut bekannt sind, gilt dieses für *Granitgestein* und *Tongesteine* weniger bzw. nicht. Dieser Sachverhalt der weitgehenden Unkenntnis betrifft insbesondere die Relationen Bruchfestigkeit – Dilatanzfestigkeit sowie Dilatanz – Permeabilitätsänderung bei Gebirgstemperatur und angehobener Temperatur.



- (4) Es ist gelungen, Bohrkernmaterial aus der Schweiz / Opalinuston zu erhalten. Es ist beabsichtigt, weiteres Tongesteinsmaterial zu beschaffen. Es ist beabsichtigt, entweder Granitgesteinsmaterial zu beschaffen oder die grundlegend benötigten Daten aus exemplarischen Untersuchungen an einem anderen Gestein mit ausgeprägtem elastisch-sprödem Materialverhalten zu ermitteln (z.B. Anhydrit).
- (5) Die Anforderung "günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen" gehört nach Einschätzung der AG Kriterien zu den Anforderungen, die als konkretisierte Anforderungen in das Auswahlverfahren eingehen sollen in Form von
- Ausschlusskriterien (Mindestwerte, Schwellenwerte) und
 - Abwägungskriterien (Klassifizierungswerte).

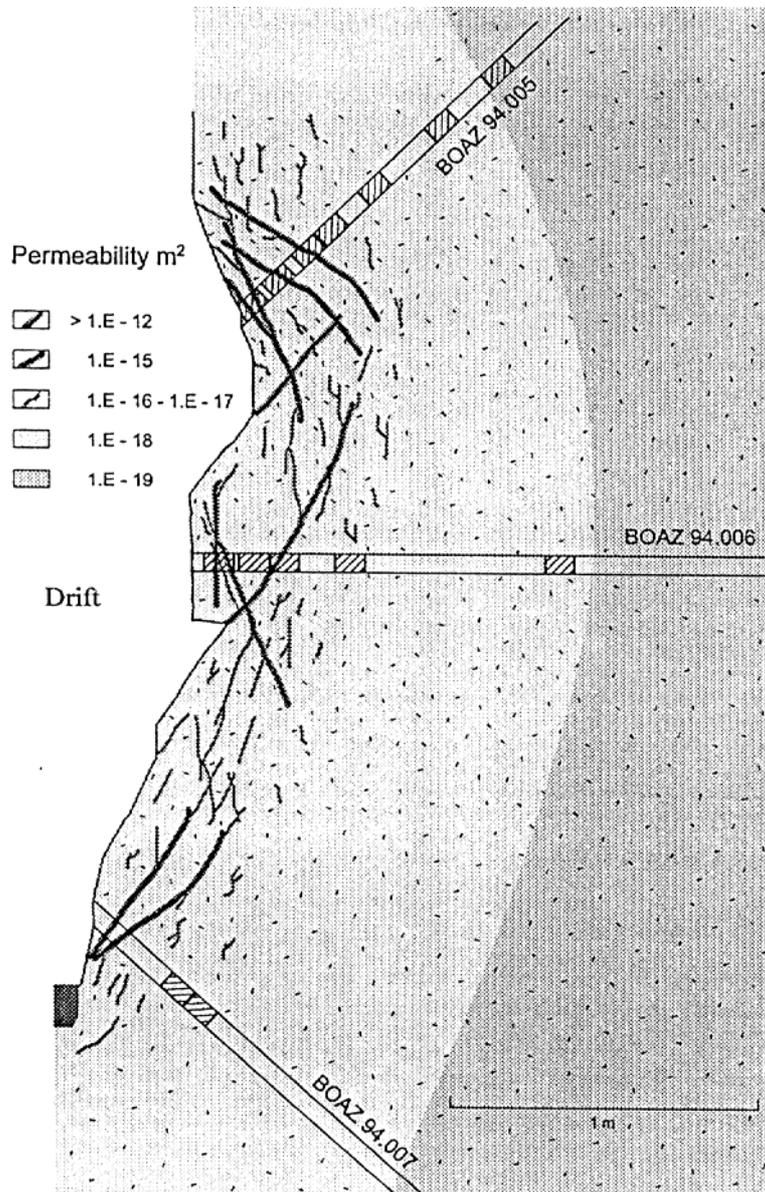
Dazu sind die abgeleiteten Indikatoren möglichst in Form von Kriterien zu quantifizieren. Voraussetzung hierzu sind aber wiederum etwas genauere Kenntnisse zu Beanspruchung und Materialverhalten.

Vorstehender Aufstockungsantrag betrifft genau diesen Sachverhalt.

(b) Arbeitsprogramm

- (1) Durchführung von ergänzenden Berechnungen zum Tragverhalten eines repräsentativen Grubenbaus im *Tongestein* bei Variation der Materialkennwerte für Tongestein.
- (2) Durchführung von laborativen Grundlagenuntersuchungen an Tongestein(en) und Granitgestein (bzw. granitähnlichem Gestein) zur Ermittlung von Grundlagendaten zur Bewertung rechnerischer Ergebnisse im Hinblick auf die gesteinstypabhängige Ableitung von Kriterien für die Anforderung "günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen"

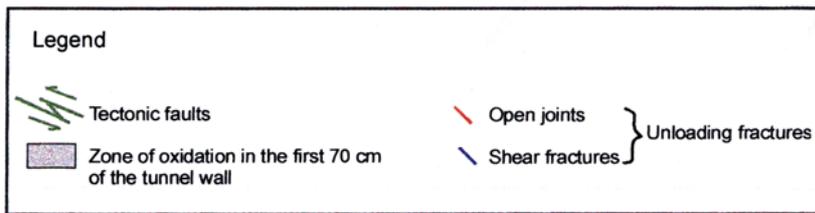
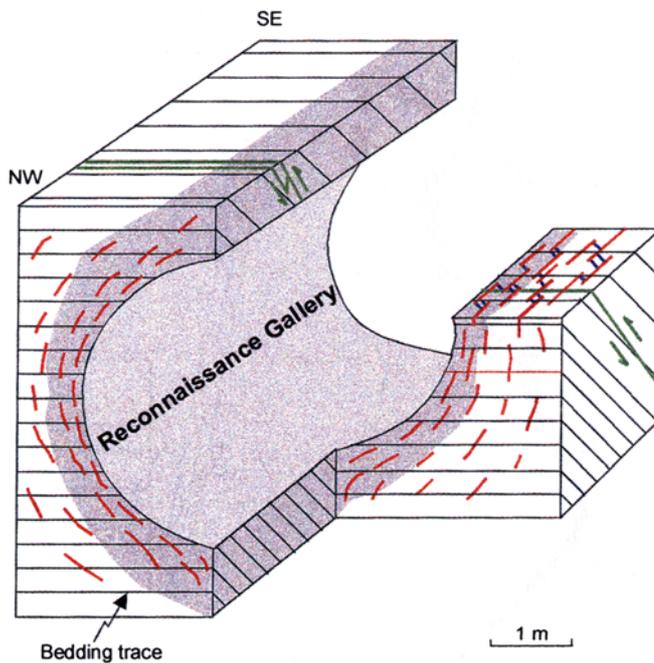
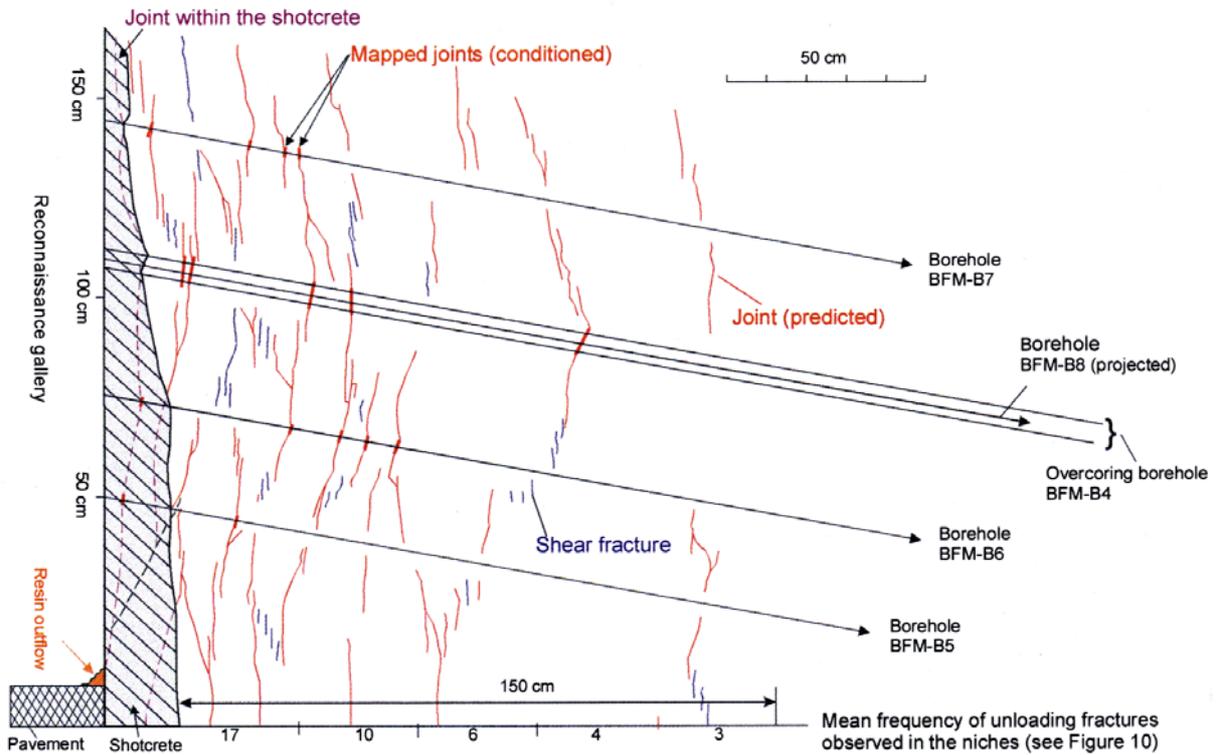
Konturentfestigung im Granitgestein



aus BGR (1999)

Konturentfestigung im Tongestein

NE Two-dimensional arrangement of unloading fractures. Vertical section. SW



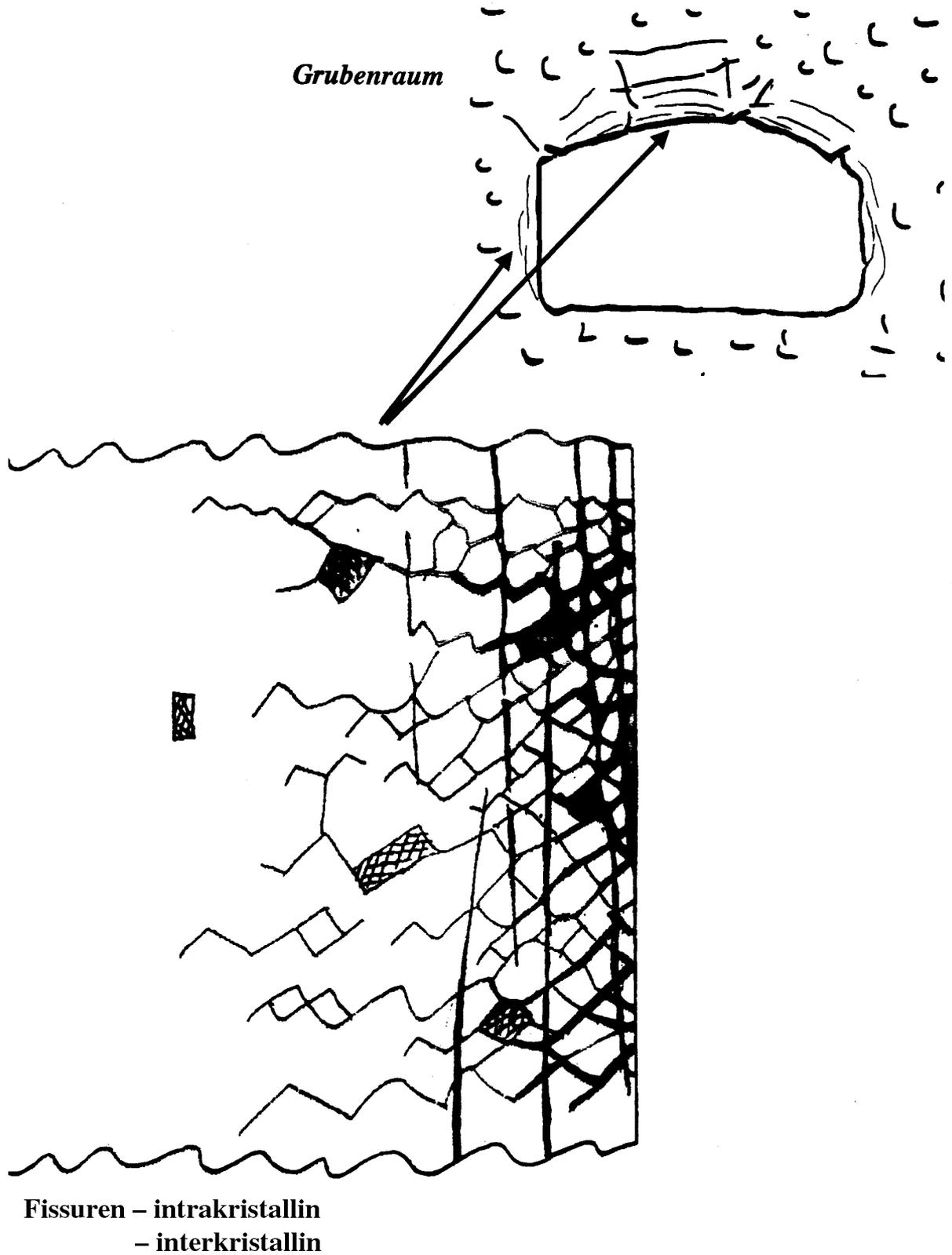
Konturentfestigung im Tongestein (Querstollen zur Hauptstrecke) Kontursicherung mit Spritzbeton



Tongestein – konturentfestigtes Gebirge in der Konturzone



Konturentfestigung im Salzgestein



nach Voigt

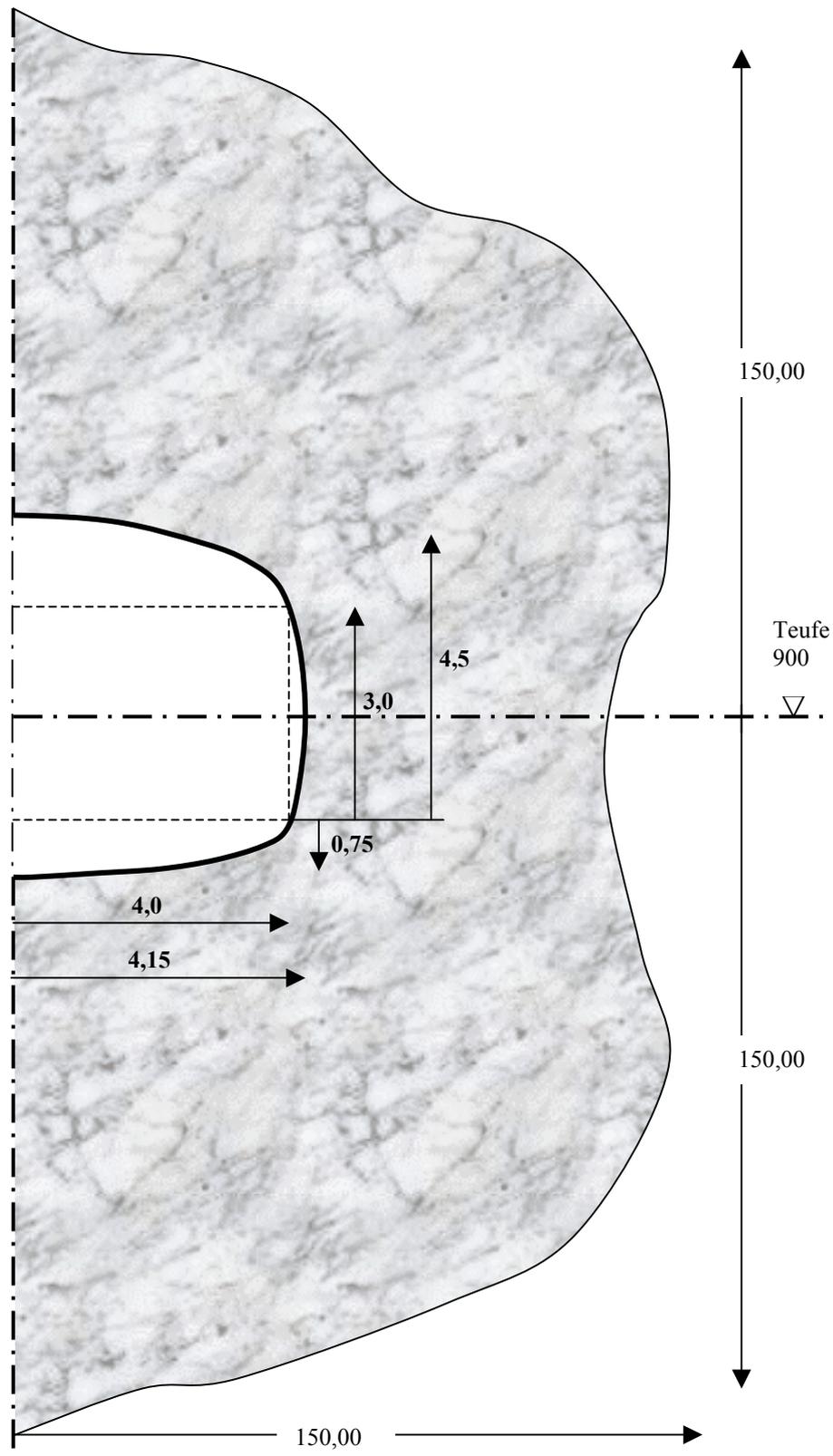
Konturentfestigung im Salzgestein

Nachgearbeitete Streckenkontur mit erneuten Konturentfestigungen

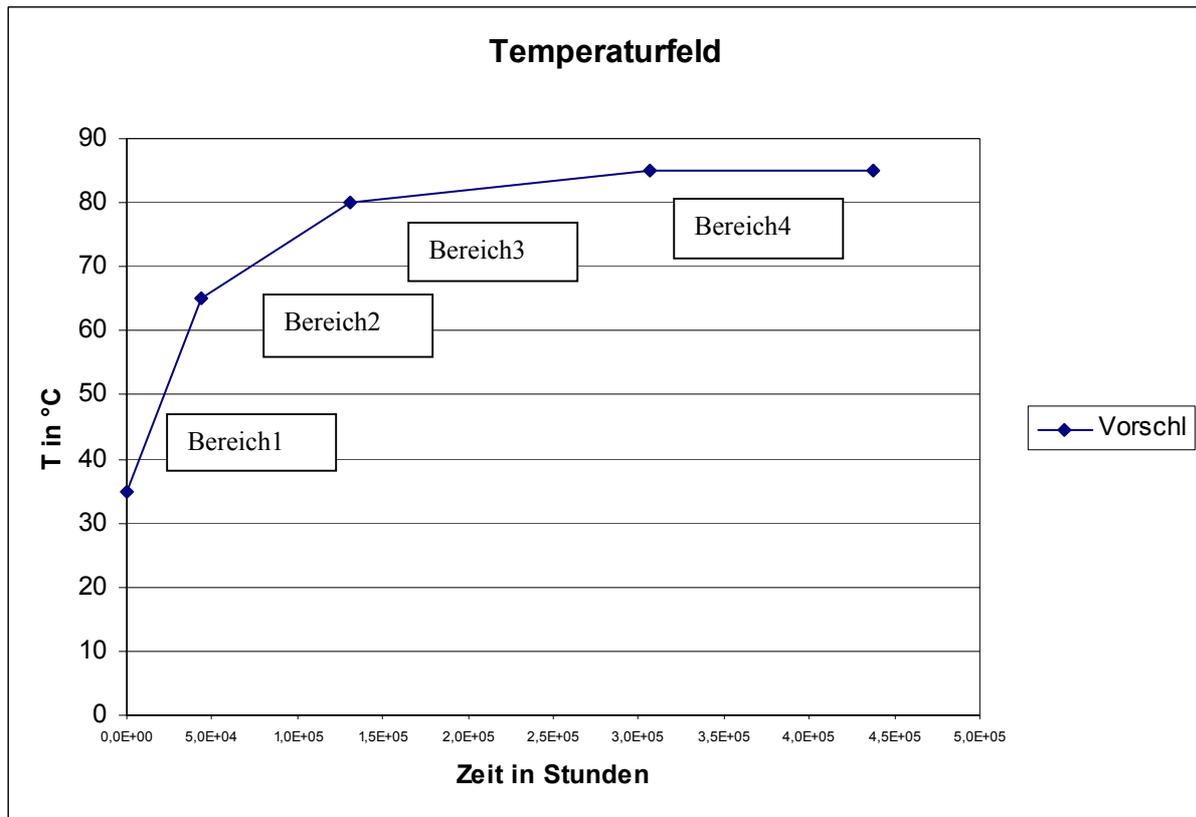


Berechnungsmodell: Repräsentativer Streckenquerschnitt

Zahlenangaben in m



Temperaturverteilung an der Streckenkontur, Teufe z = 900 m



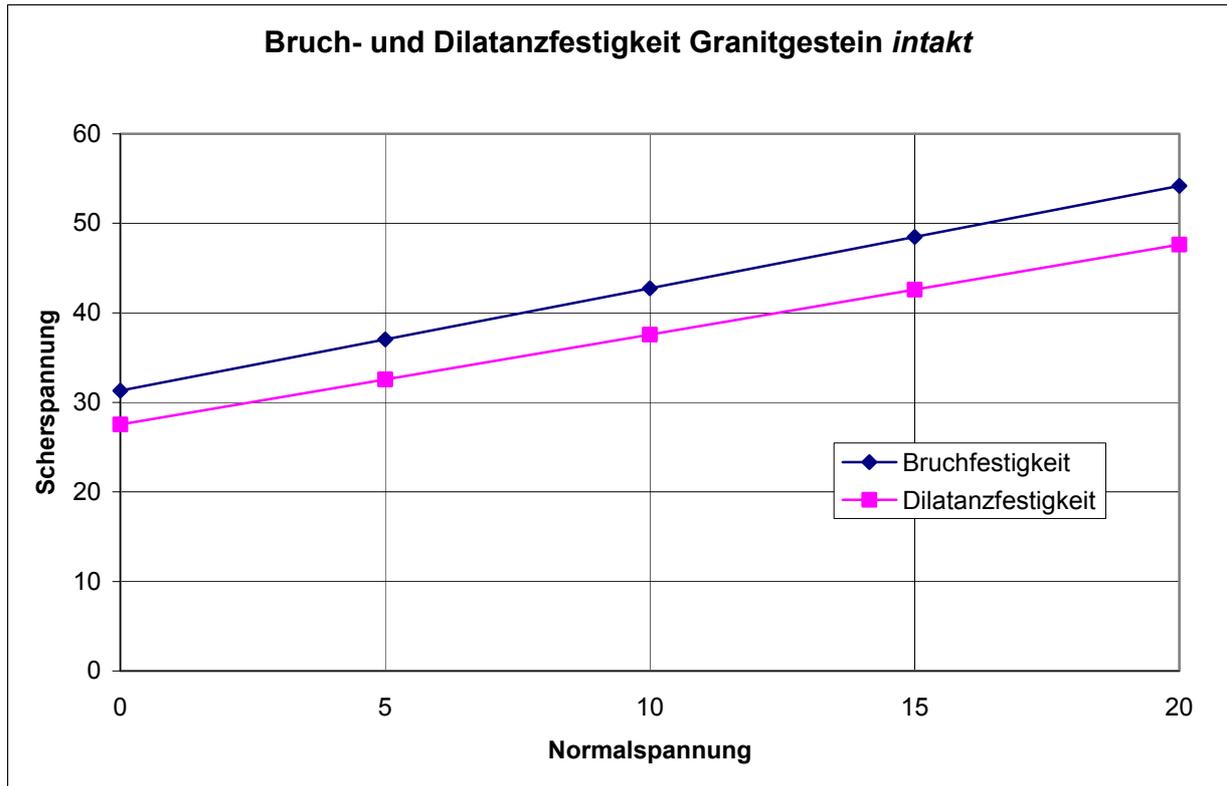
Temperaturbelastung für eine Teufe von z = 900 m.

Bereich	Zeit [a]	ΔT [°C/a]
1	0-5	6,0
2	5- 15	1,5
3	15- 35	0,25
4	35- 50	0,0

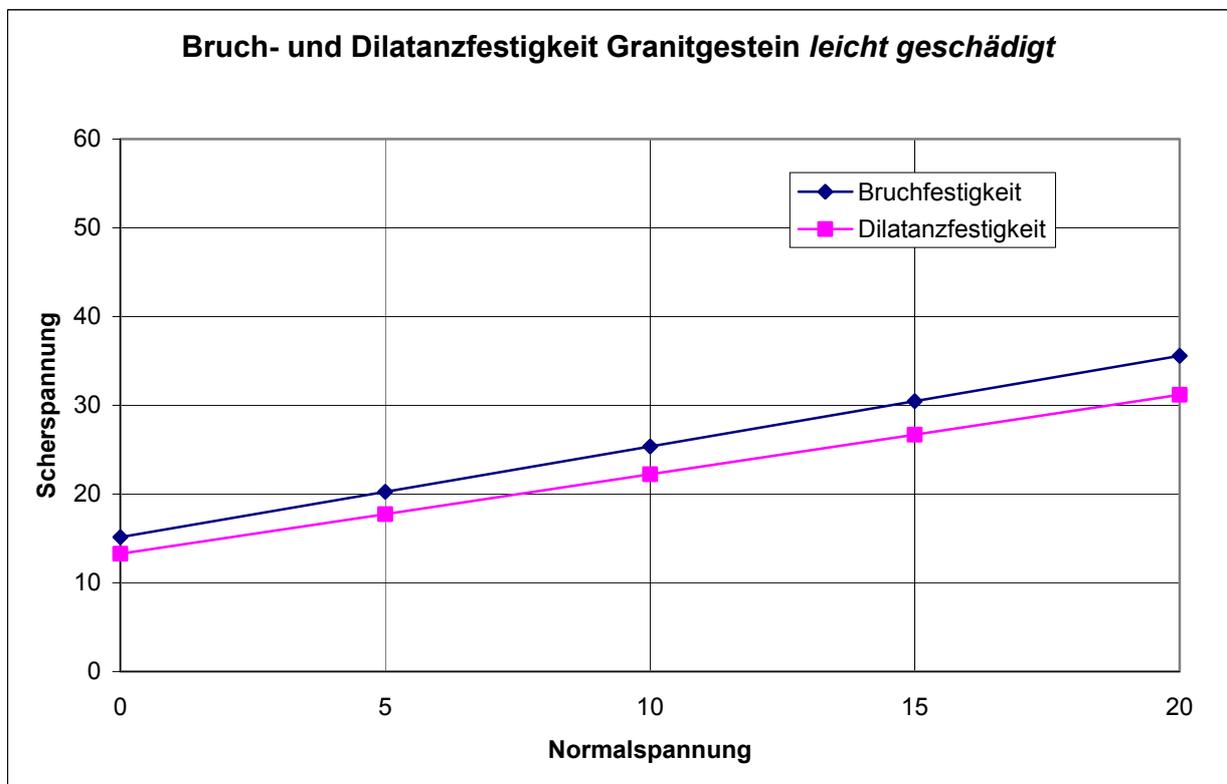
Temperaturerhöhung ΔT pro Jahr für die einzelnen Bereich der Temperaturanstiegskurve.

Für die Teufen z = 600 m und z = 1200 m wird die Temperaturkurve parallel verschoben auf eine konstante Gebirgstemperatur von 25 °C für z = 600 m bzw. 45 °C für z = 1200 m.

Bruch- und Dilatanzfestigkeit Granitgestein

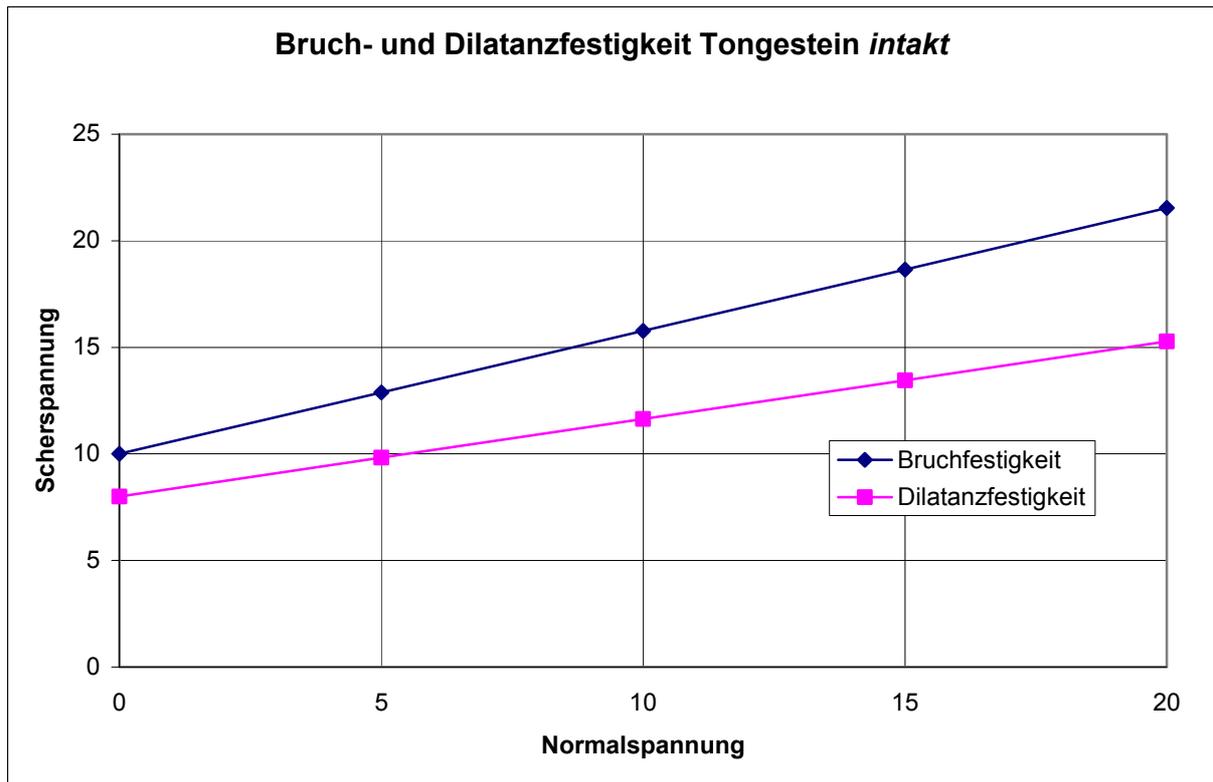


Gebirgsklasse: Granit *intakt*; $C_B = 31,32 \text{ MPa}$, $\varphi_B = 48,84^\circ$;
 $C_D = 27,53 \text{ MPa}$, $\varphi_D = 45,16^\circ$

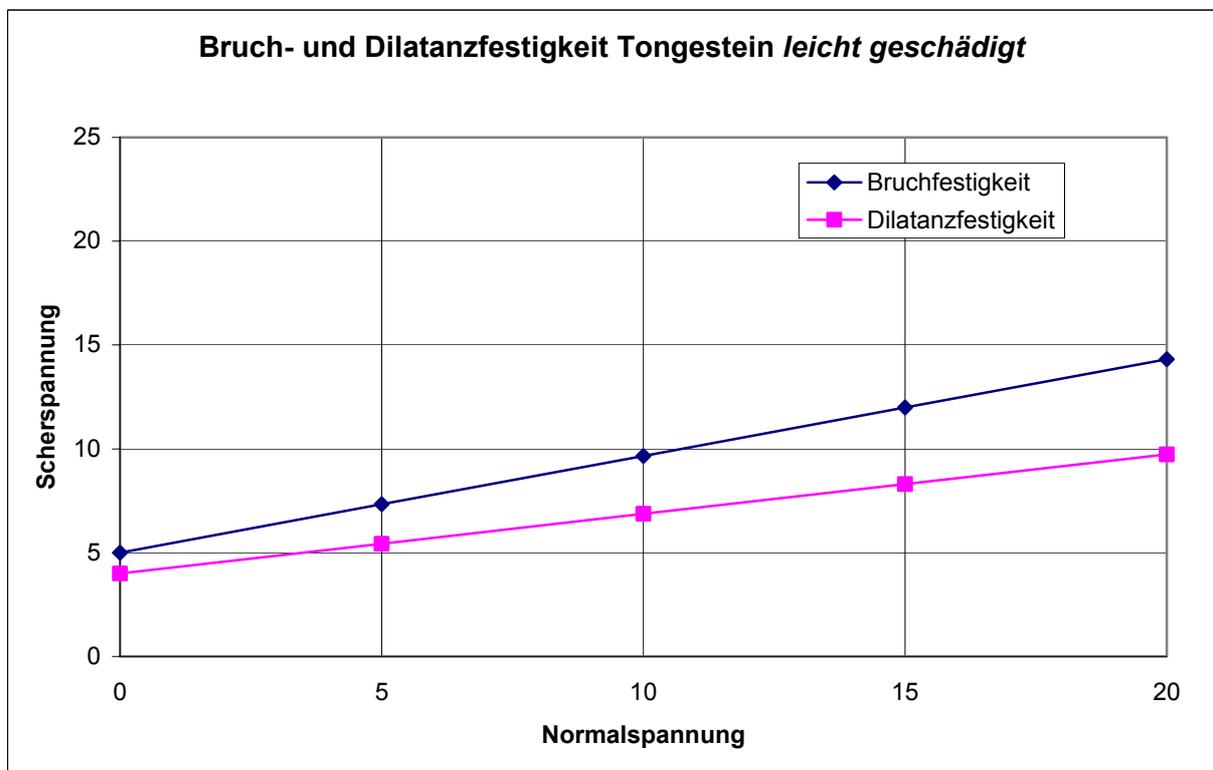


Gebirgsklasse: Granit *leicht geschädigt*; $C_B = 15,14 \text{ MPa}$, $\varphi_B = 45,62^\circ$;
 $C_D = 13,27 \text{ MPa}$, $\varphi_D = 41,85^\circ$

Bruch- und Dilatanzfestigkeit Tongestein

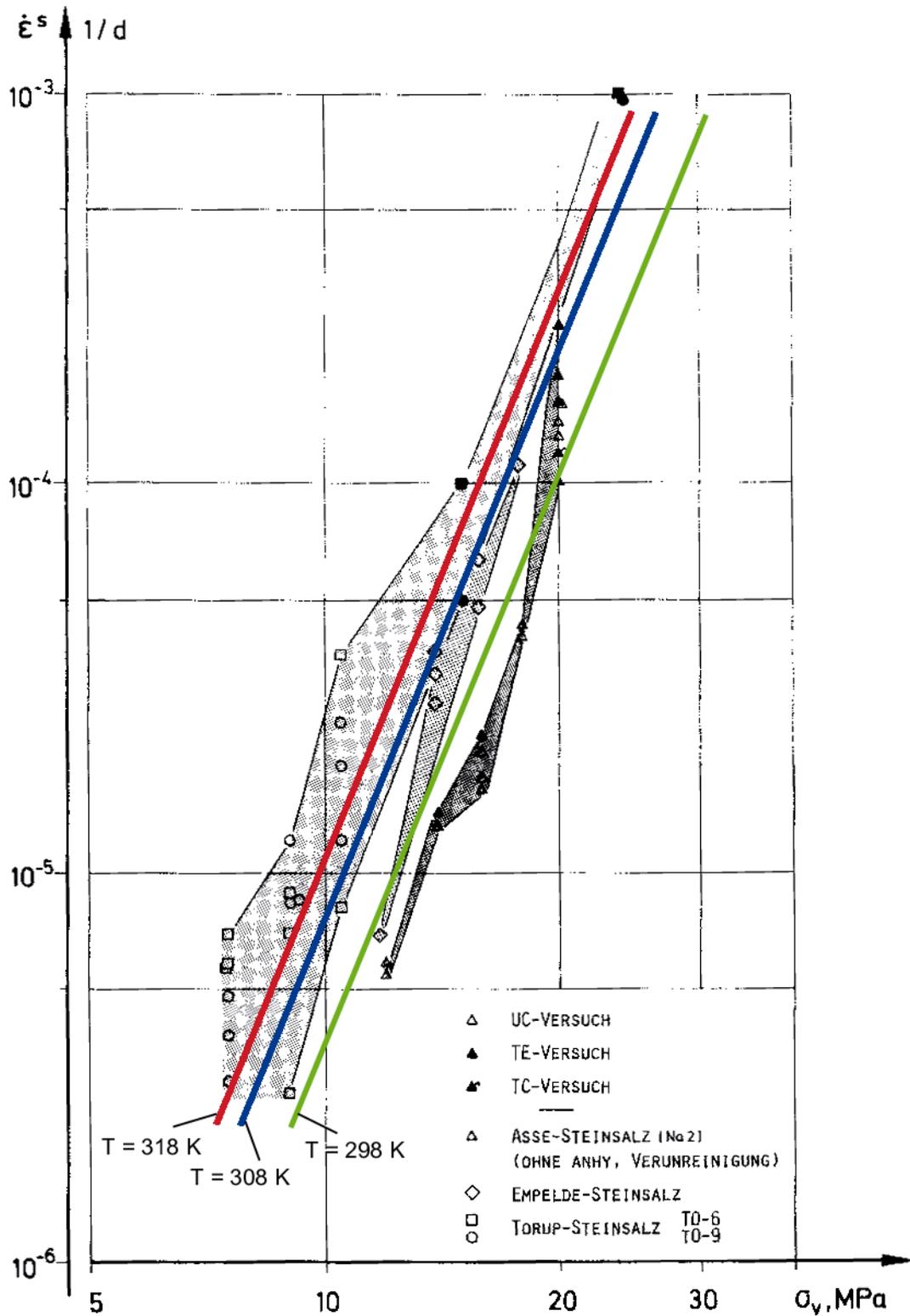


Gebirgsklasse: Tongestein *intakt*; $C_B = 10 \text{ MPa}$, $\varphi_B = 30^\circ$;
 $C_D = 8 \text{ MPa}$, $\varphi_D = 20^\circ$



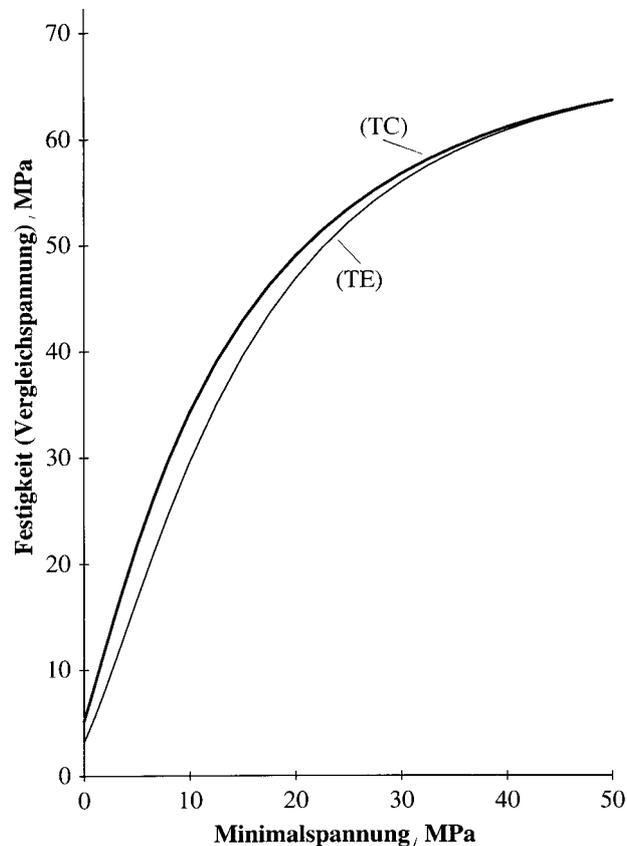
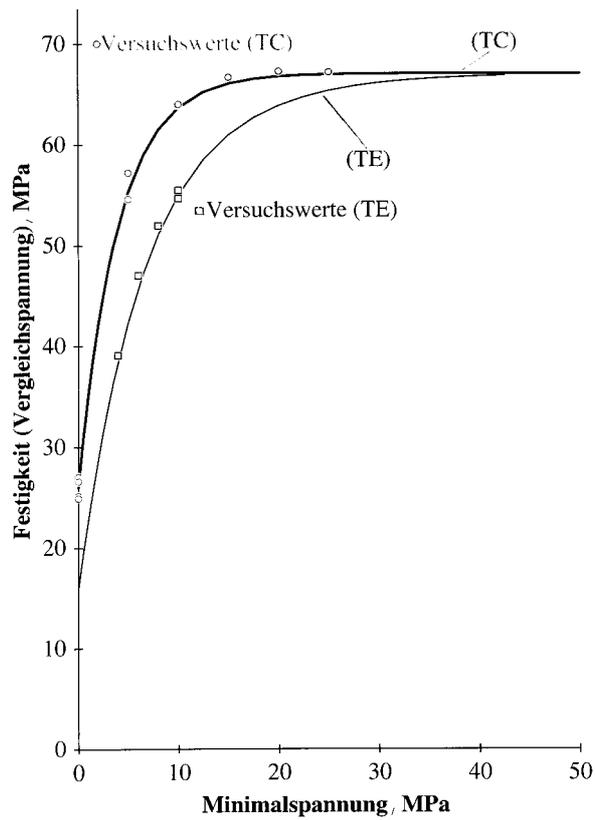
Gebirgsklasse: Tongestein *leicht geschädigt*; $C_B = 5 \text{ MPa}$, $\varphi_B = 25^\circ$;
 $C_D = 4 \text{ MPa}$, $\varphi_D = 16^\circ$

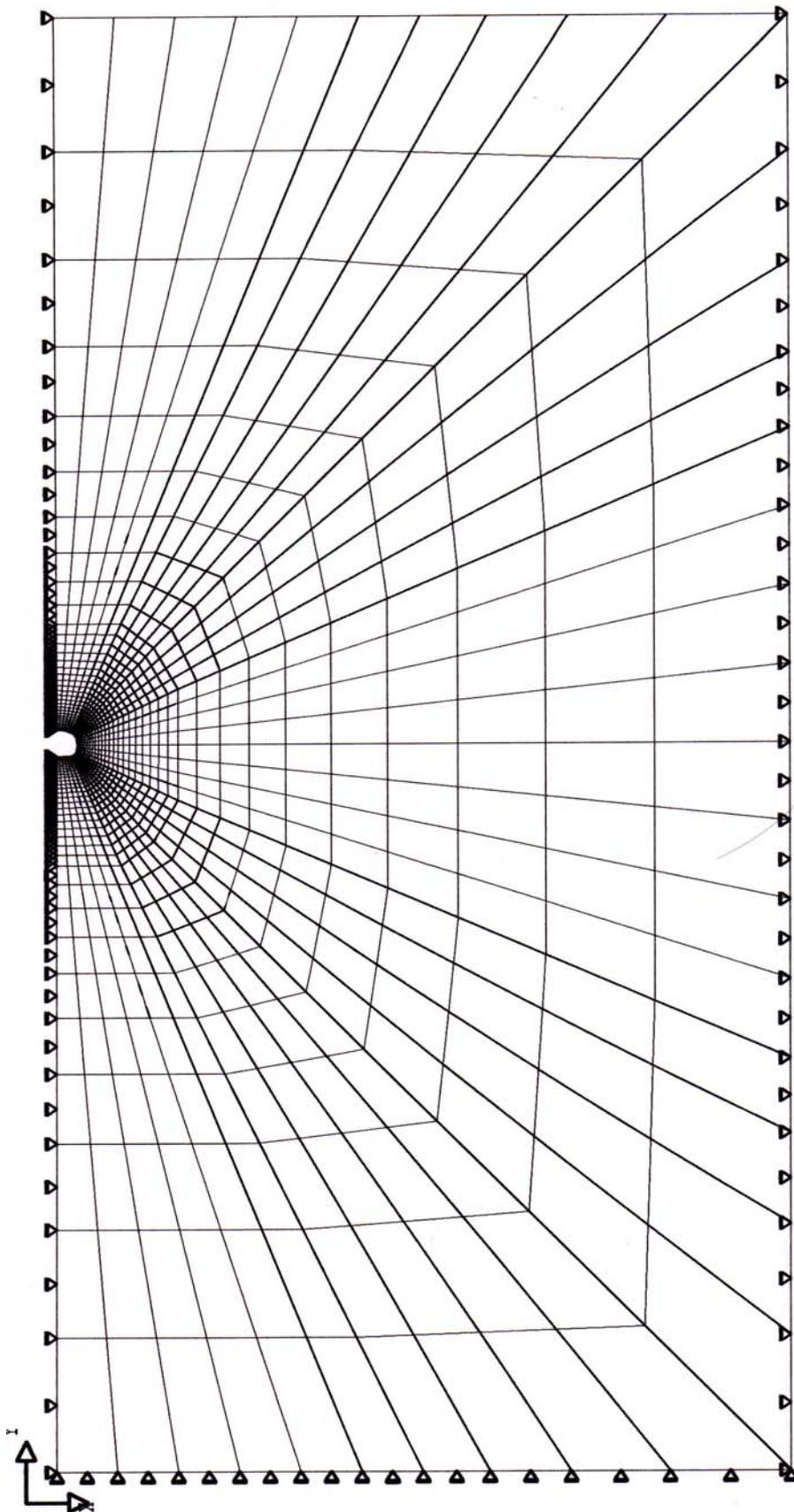
Kriechraten von Salzgestein



Nach Lux (1984)

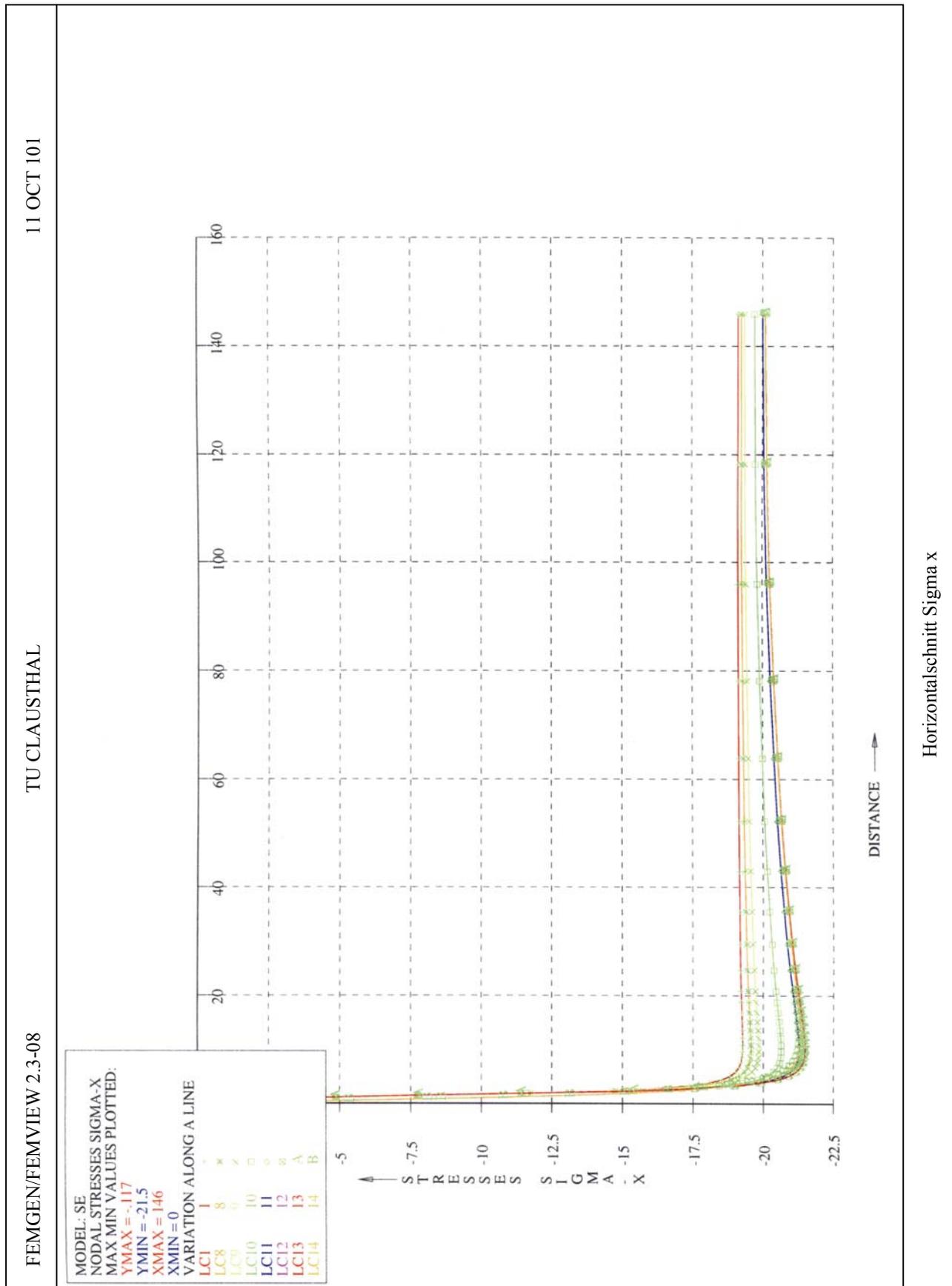
Bruch- und Dilatanzfestigkeit von Salzgestein (Steinsalz) in der $\min\sigma/\sigma_v$ -Ebene nach *Hou (1997)*



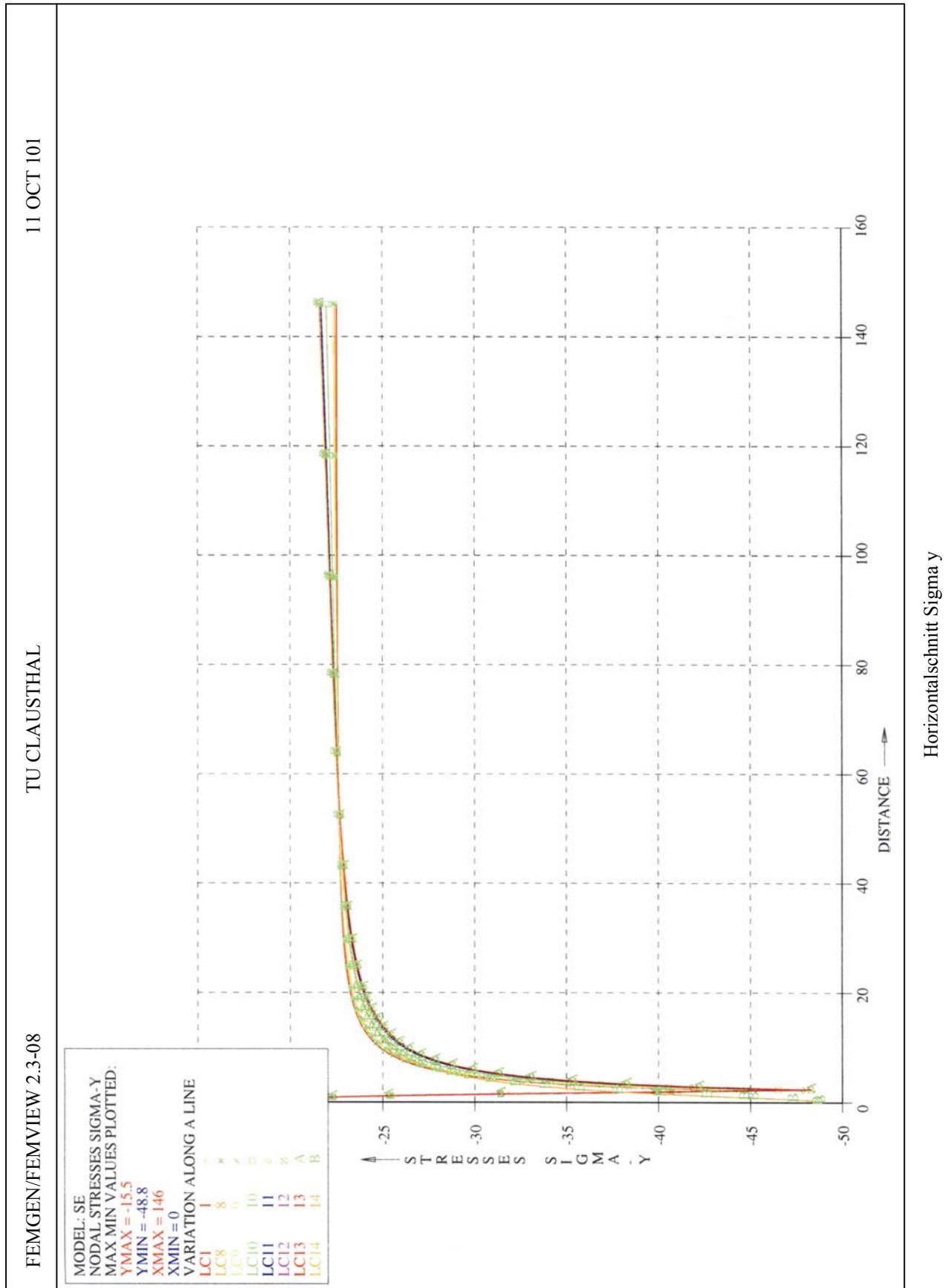


Berechnungsmodell mit Sperrungen, 1224 isoparametrische 8-Knotenelemente

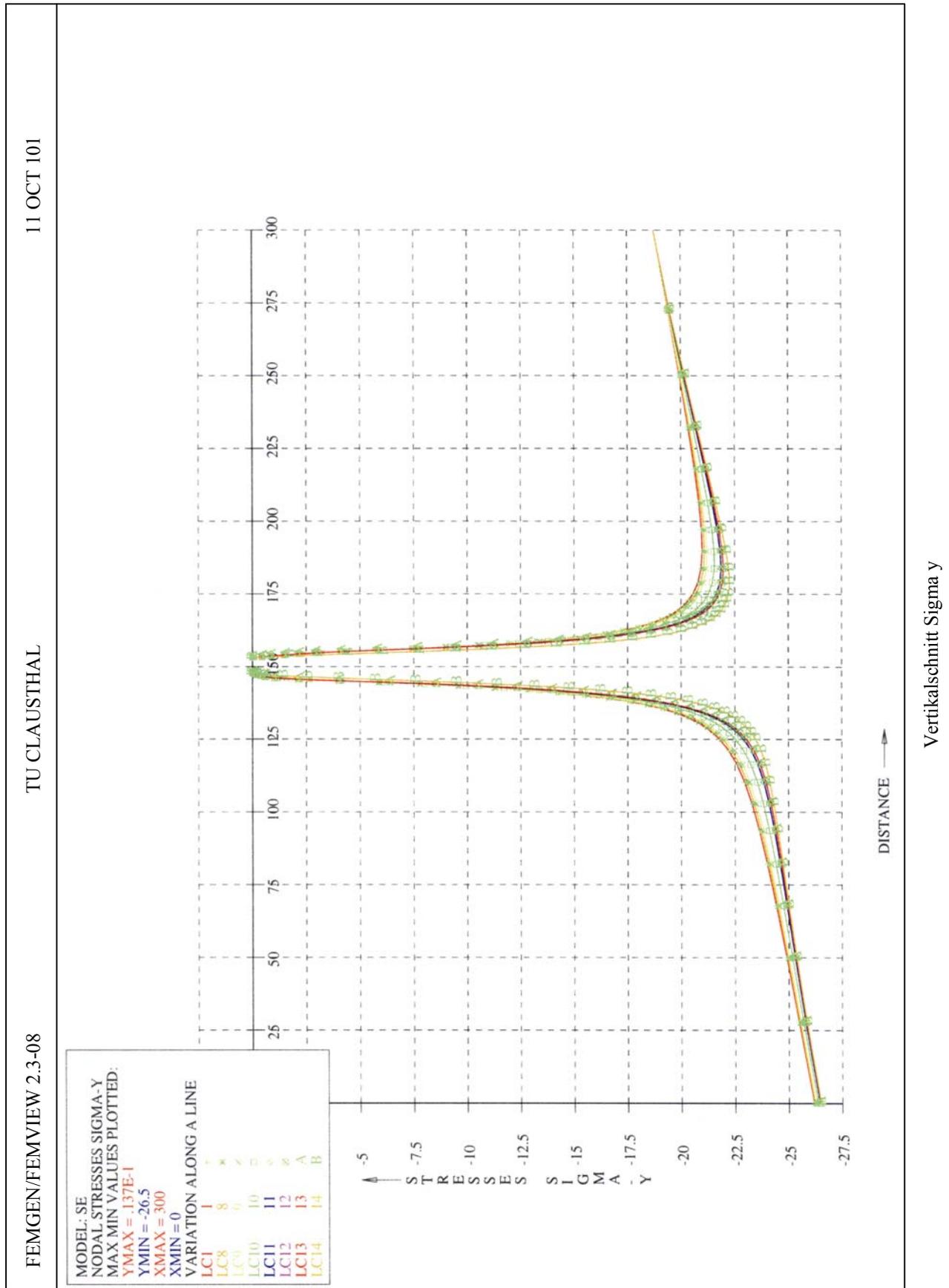
Verifizierung der Tabelle 6.4 Tonstein geschädigt, Teufe z = 900m, $K_0 = 0,85$



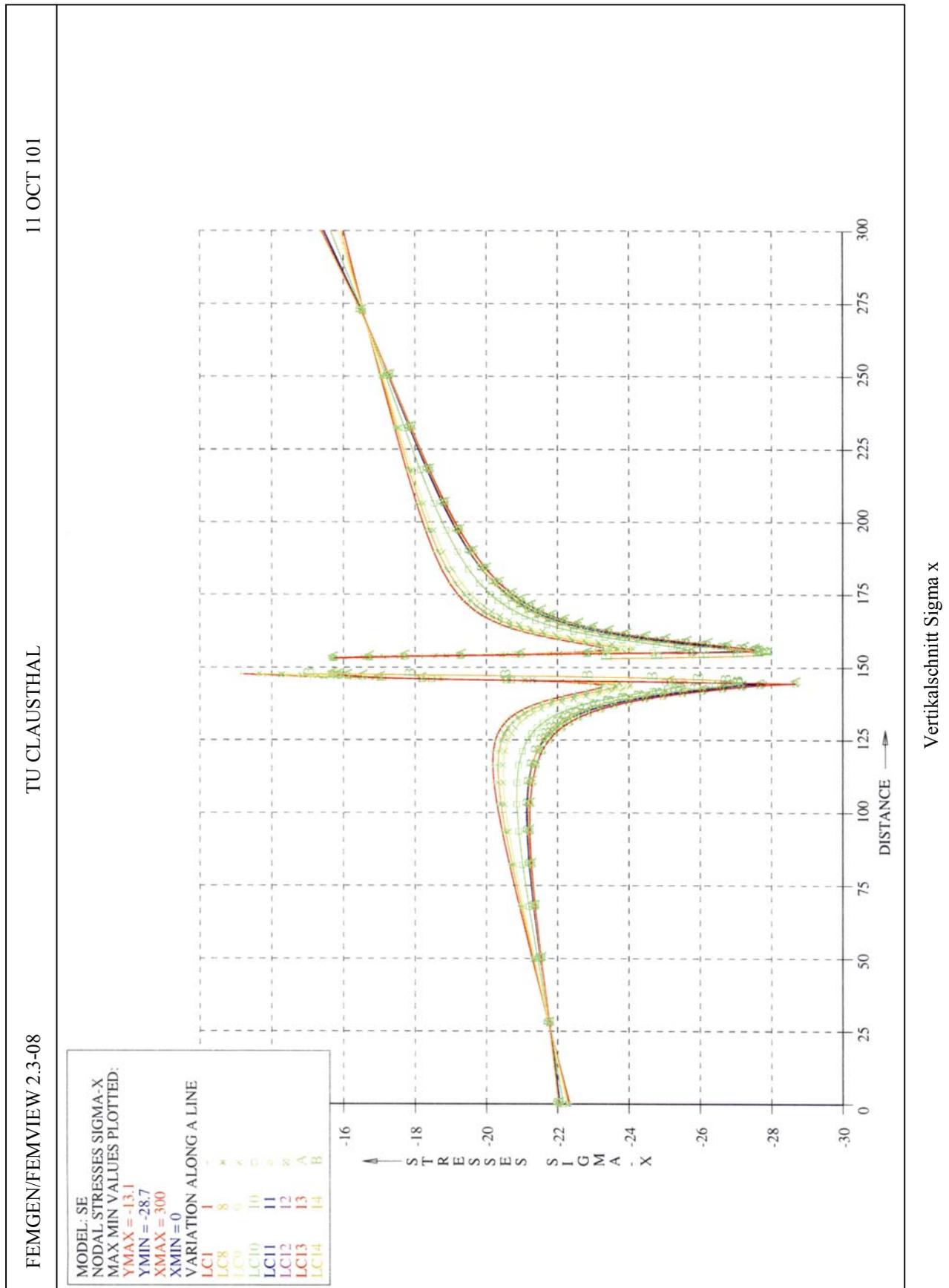
Verifizierung der Tabelle 6.4 Tonstein geschädigt, Teufe $z = 900\text{m}$, $K_0 = 0,85$



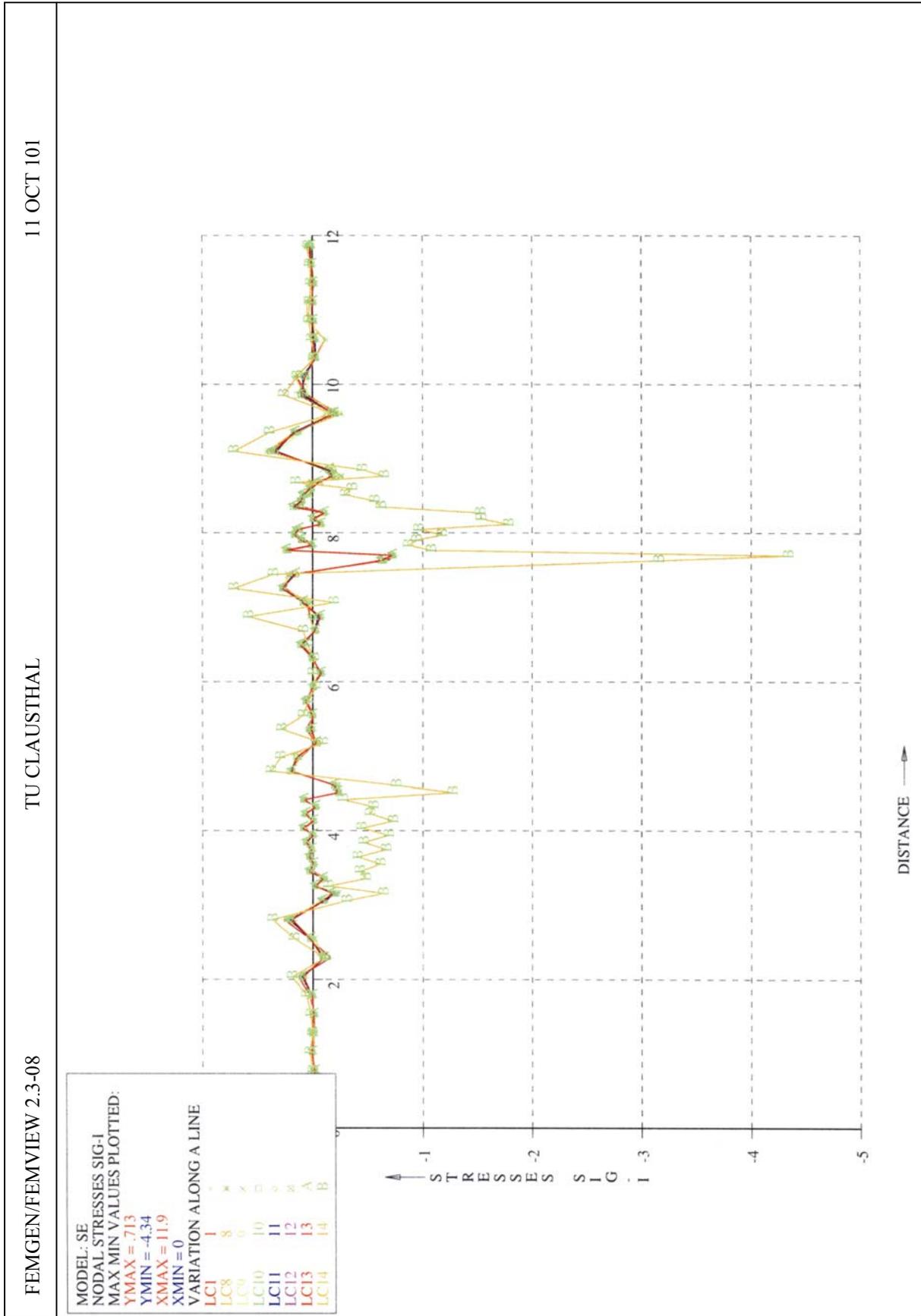
Verifizierung der Tabelle 6.4 Tonstein geschädigt, Teufe z = 900m, $K_0 = 0,85$



Verifizierung der Tabelle 6.4 Tonstein geschädigt, Teufe $z = 900\text{m}$, $K_0 = 0,85$

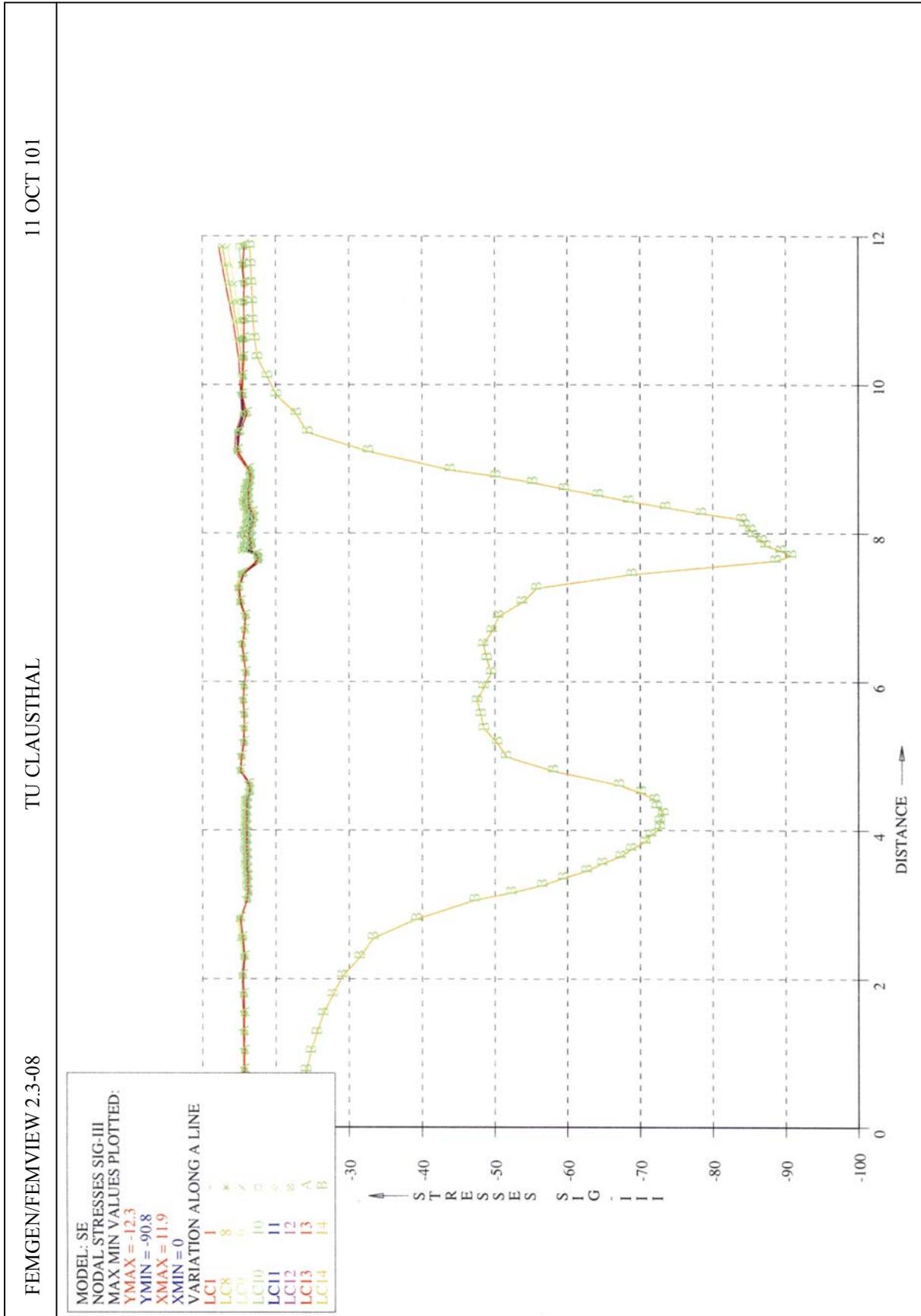


Verifizierung der Tabelle 6.4 Tonstein geschädigt, Teufe z = 900m, $K_0 = 0,85$



Kontur Sigma 1

Verifizierung der Tabelle 6.4 Tonstein geschädigt, Teufe z = 900m, $K_0 = 0,85$



Anforderung *Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften*

Für die Operationalisierung der Anforderung *günstige gebirgsmechanische Eigenschaften* sind maßgebend die **Indikatoren**:

- (I1) ***Gebirge als Haupttragelement (Standfestigkeit ohne nachhaltigen Ausbau)***
- (I2) ***begrenzte Sekundärpermeabilität (unvermeidbare konturnahe Entfestigungszone)***

Die Quantifizierung der Indikatoren erfolgt über nachstehende **Kriterien**:

(I1) Kriterien zu Indikator: *Gebirge Haupttragelement*

Granitgesteine/ Tongesteine

elastisch spröde/ gering plastisch

- * *Granitgestein*: $\text{vorh}\sigma < \beta_{1D}^G$ (Kontur)
- * *Tongestein*: $\text{vorh}\sigma^{pl}$ in $\max r < r + \Delta r$
 - $\Delta r = 0,5\text{m}$
- * *Tongestein*: $\text{vorh}\varepsilon^{ep} < \varepsilon_f^{ep} / \xi_\varepsilon$
 - Ansatz: $\varepsilon_f^{ep} / \xi_\varepsilon = 2,0\%$

Salinargesteine

elastisch- viskoplastisch

- * $\text{vorh}\eta < \text{zul}\eta = \frac{1}{\xi_1 \cdot \xi_2}$
 - $\xi_1 \cdot \xi_2 = 2,0$, $t \leq 50$ a
- * $\text{vorh}\varepsilon_v^{ev} < \varepsilon_f(\min \sigma, \dot{\varepsilon}_v) / \xi_\varepsilon$
 - Ansatz: $\varepsilon_f / \xi_\varepsilon = 10\%$, $T \approx 298\text{K}$
 - $\varepsilon_f / \xi_\varepsilon = 20\%$, $T > 318\text{K}$

Tongestein/ Salinargestein: bergbauübliche Konturnacharbeiten zulässig

(I2) Kriterien zu Indikator: *begrenzte Sekundärpermeabilität*

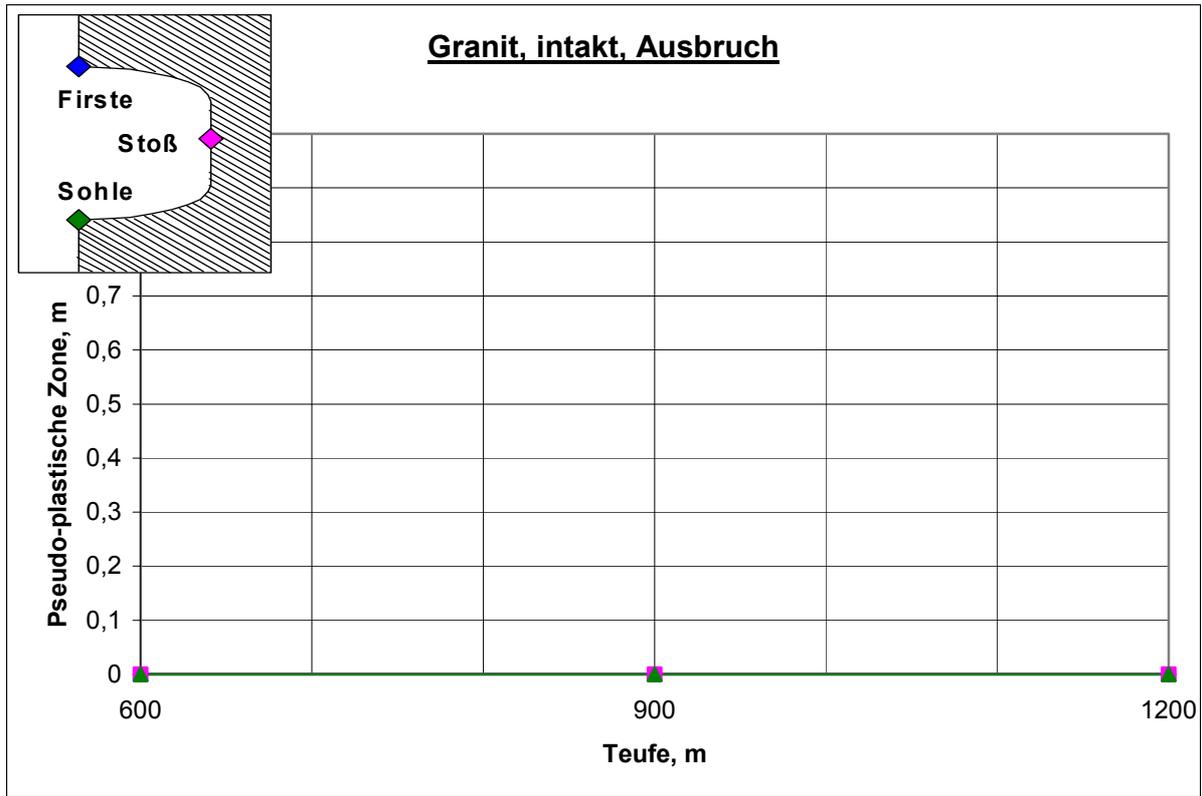
(I2a) *Keine Sekundärpermeabilität außerhalb einer begrenzten Konturzone*

- * $\text{vorh. } \sigma < \beta_{Dil}$ in $\max r \leq r + \Delta r$
 - $\Delta r = 1,0\text{m}$ (*Granitgesteine*)
 - $\Delta r = 2,0\text{m}$ (*Tongestein*)
- * $\text{vorh}\eta < \eta_{Dil}$ in $\max r < r + \Delta r$
 - $\Delta r = 3,0\text{m}$ (*Salinargesteine*)

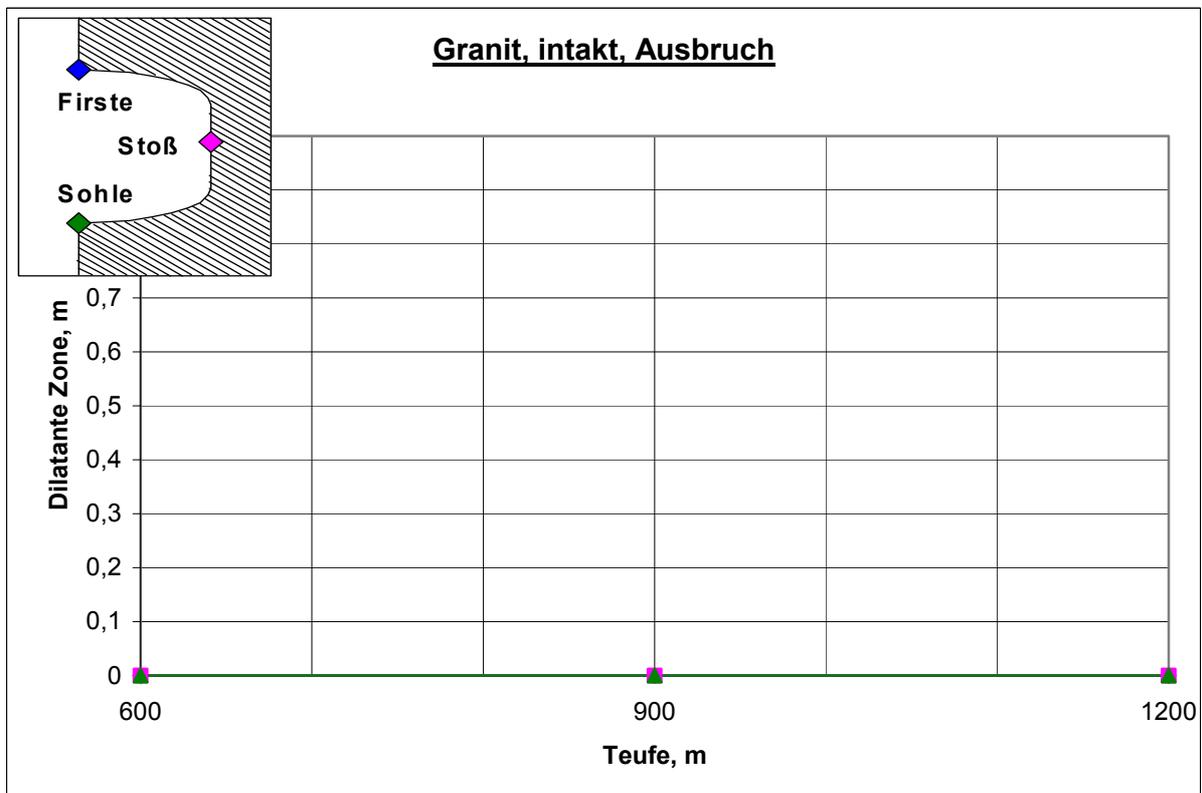
(I2b) *Begrenzte Sekundärpermeabilität innerhalb der Konturzone (noch hypothetisch)*

- * $\Delta K \leq 10^{x,y,z} \text{m}^2$ in der Dilatanzzone
 - x, y, z je nach Gesteinsart unterschiedlich festzulegen

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



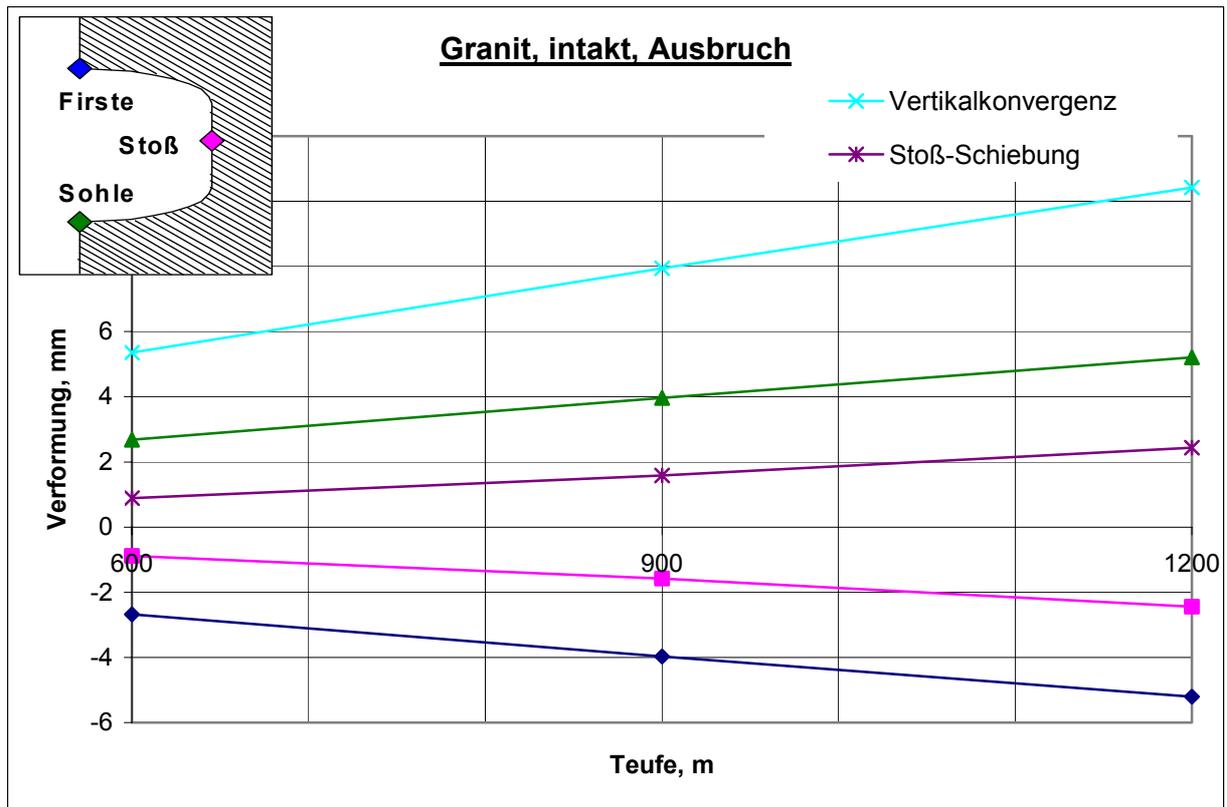
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$



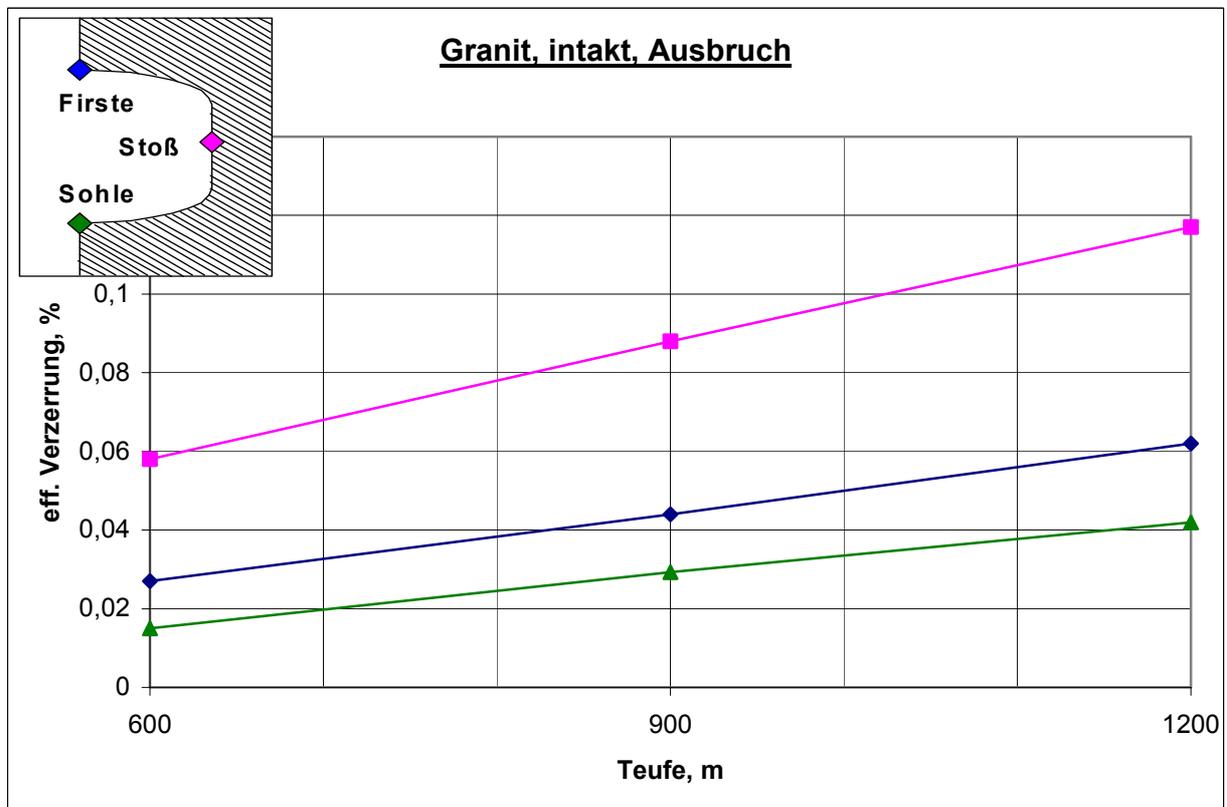
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$

Verformung, Verzerrung

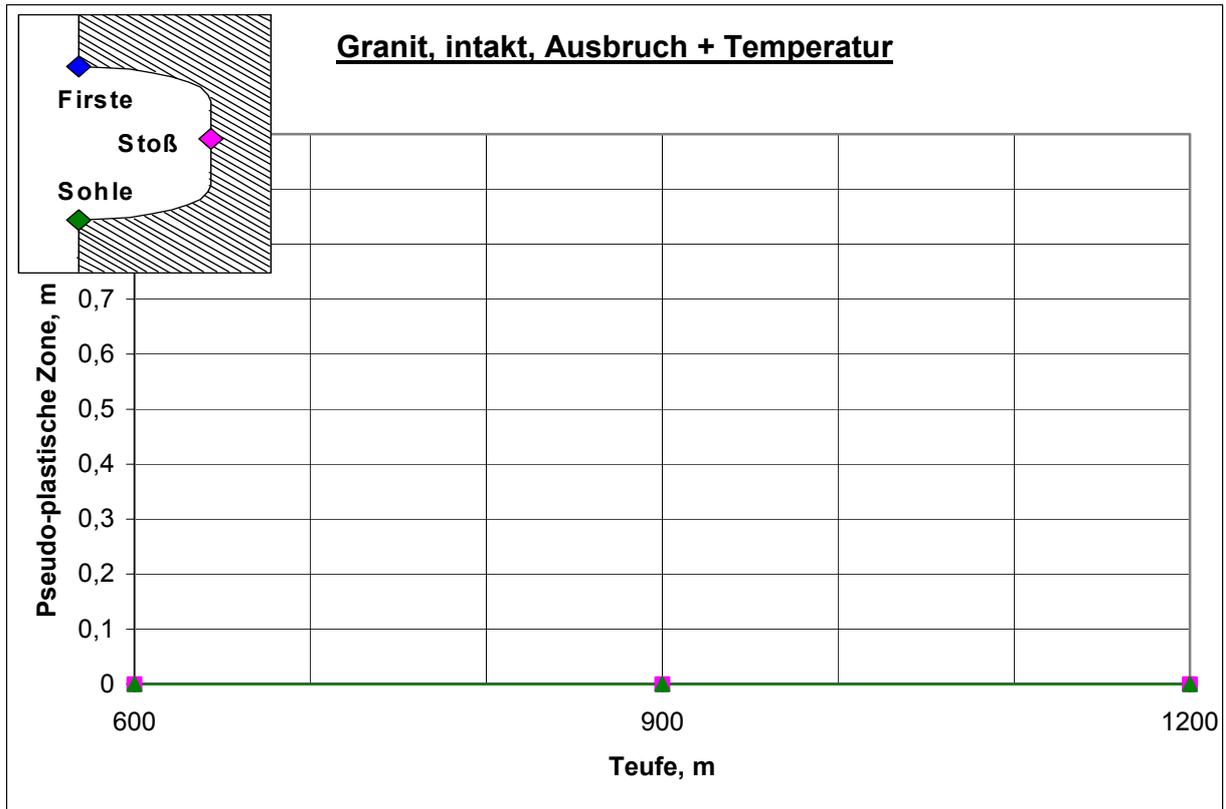


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

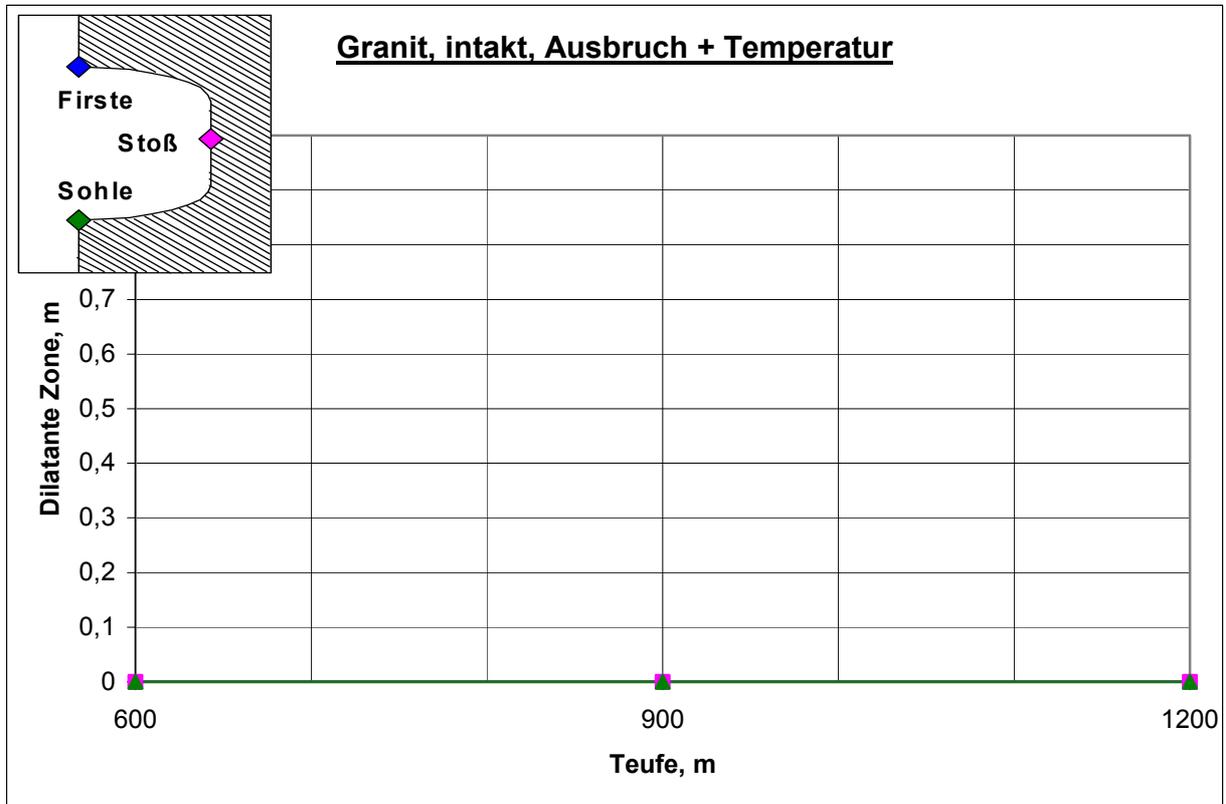


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



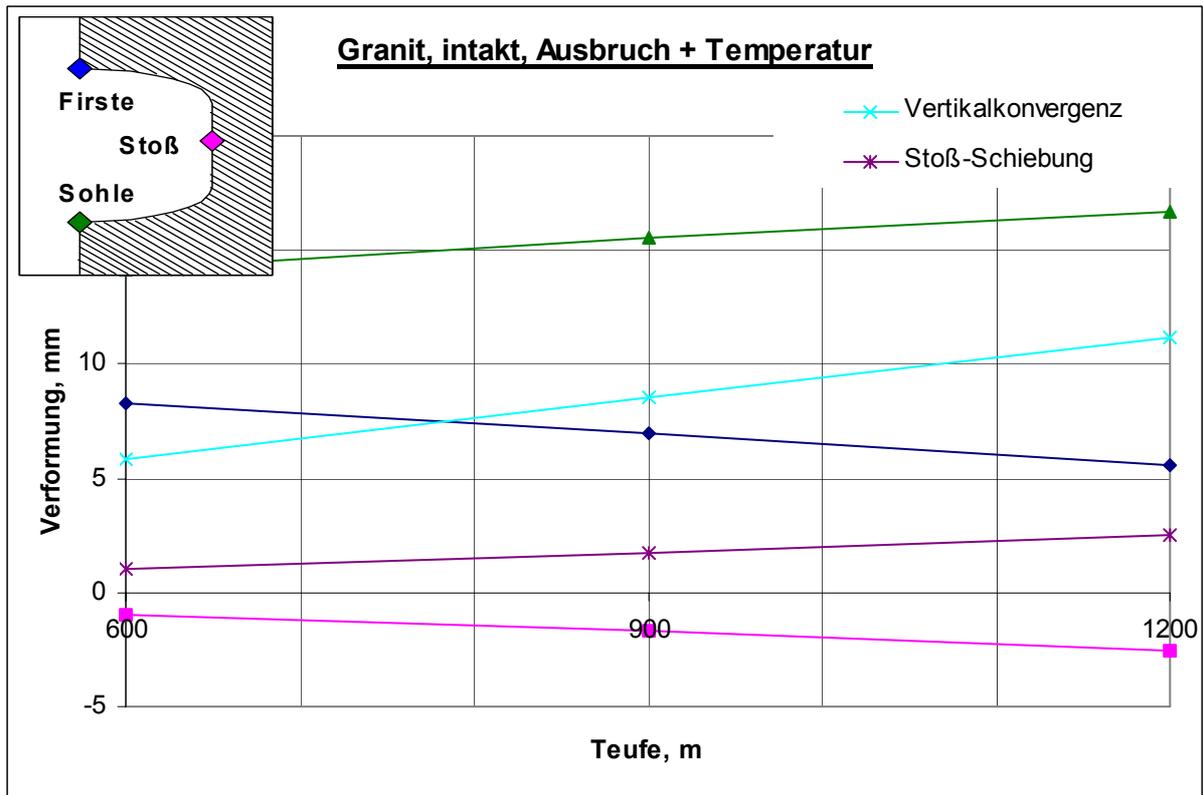
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$



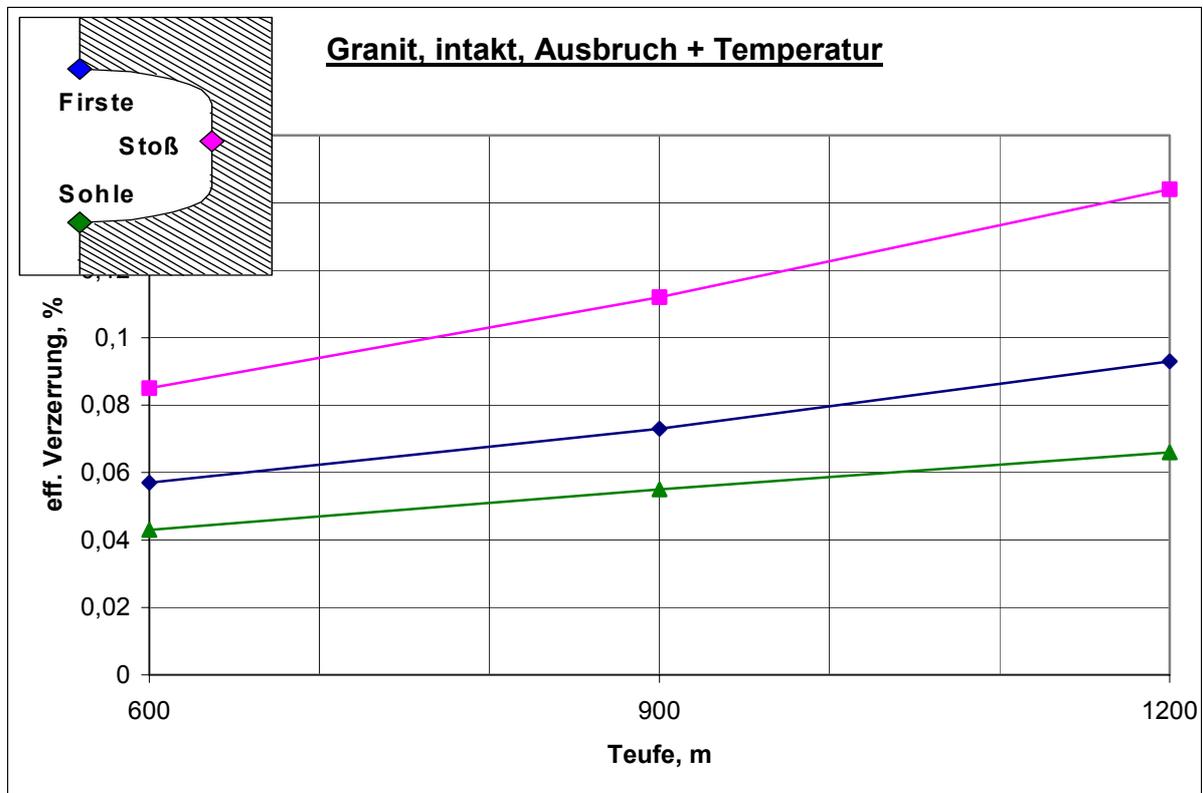
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$

Verformung, Verzerrung

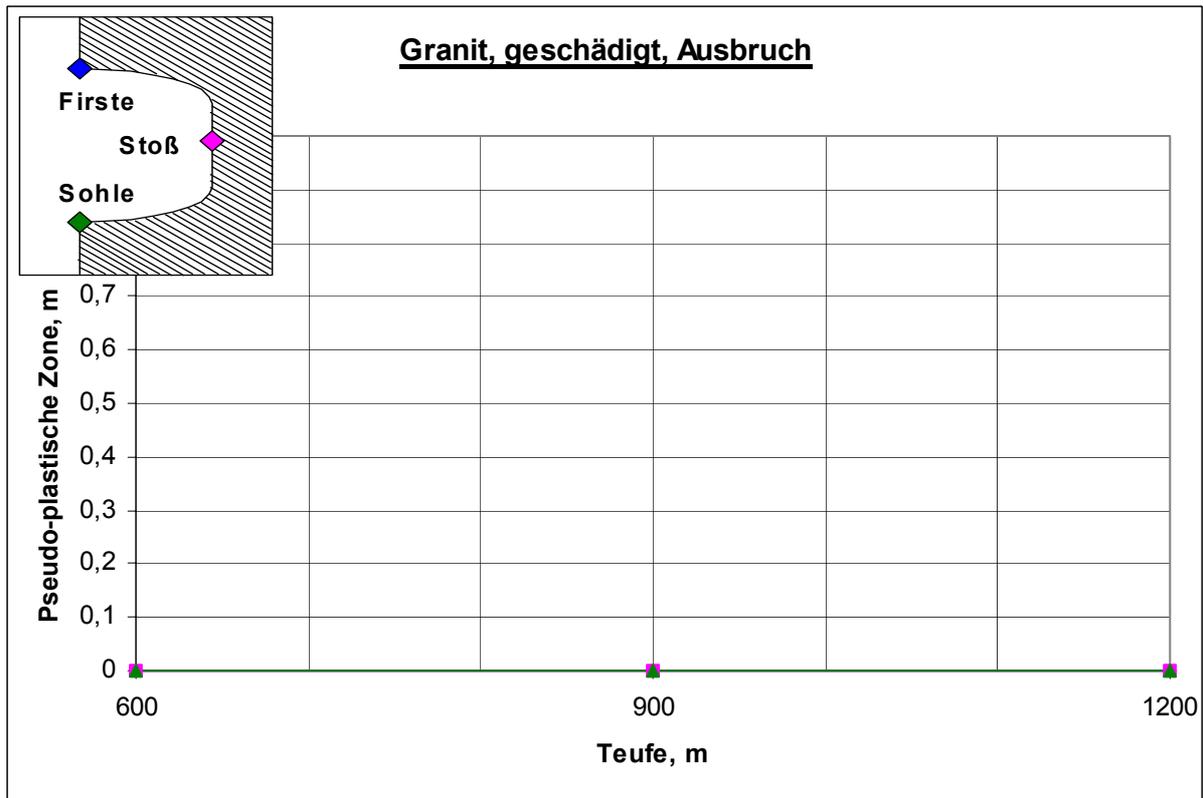


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

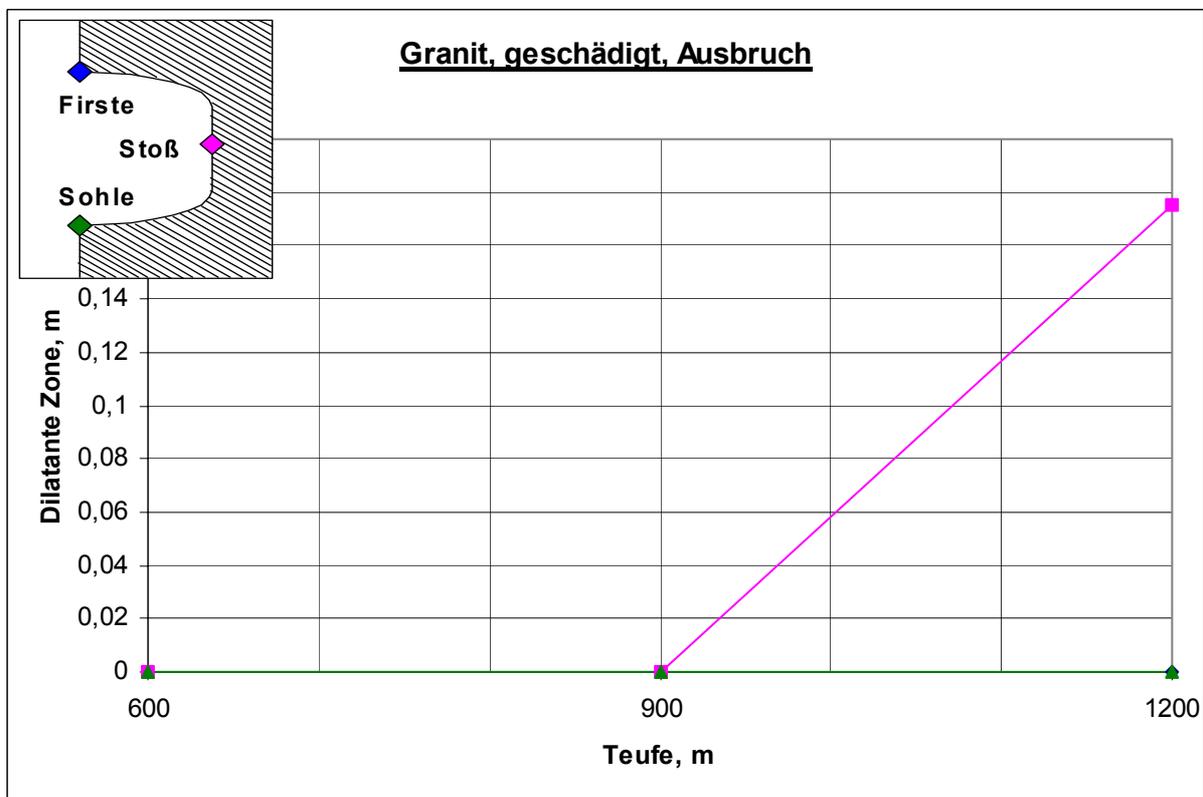


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



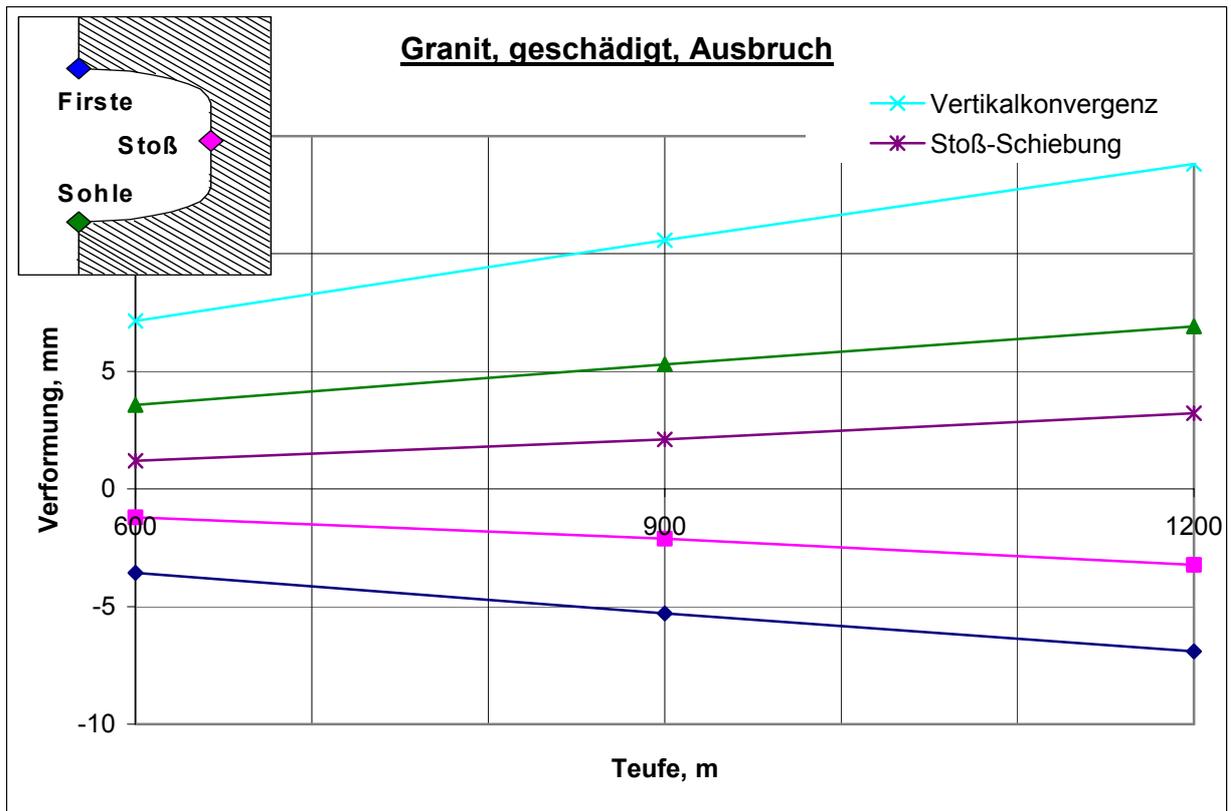
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$



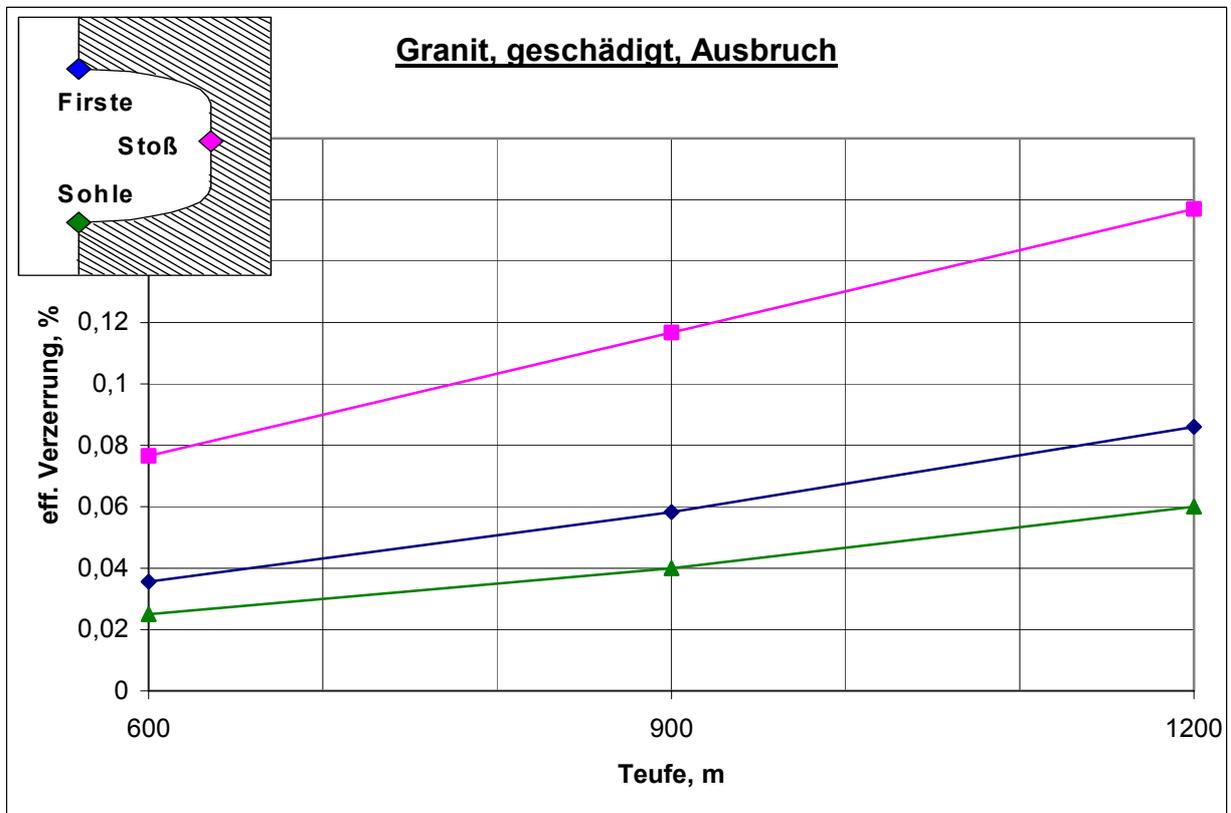
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$

Verformung und Verzerrung

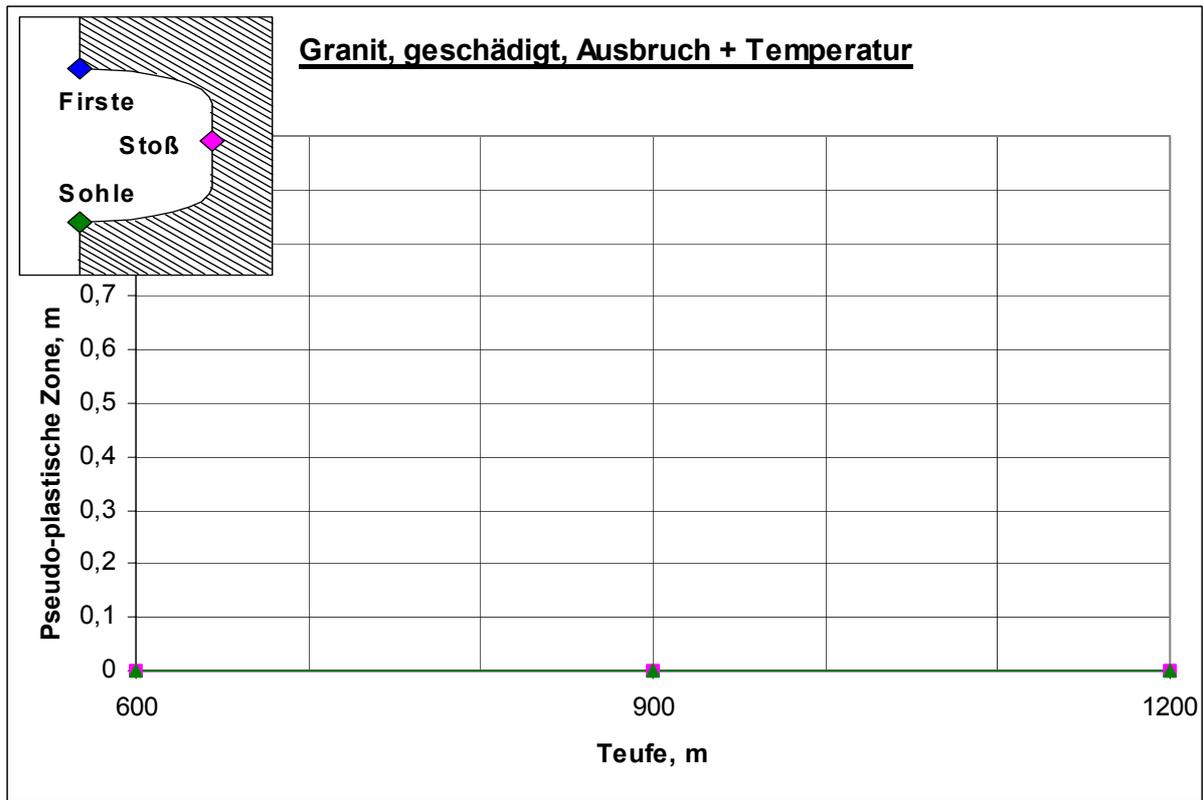


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

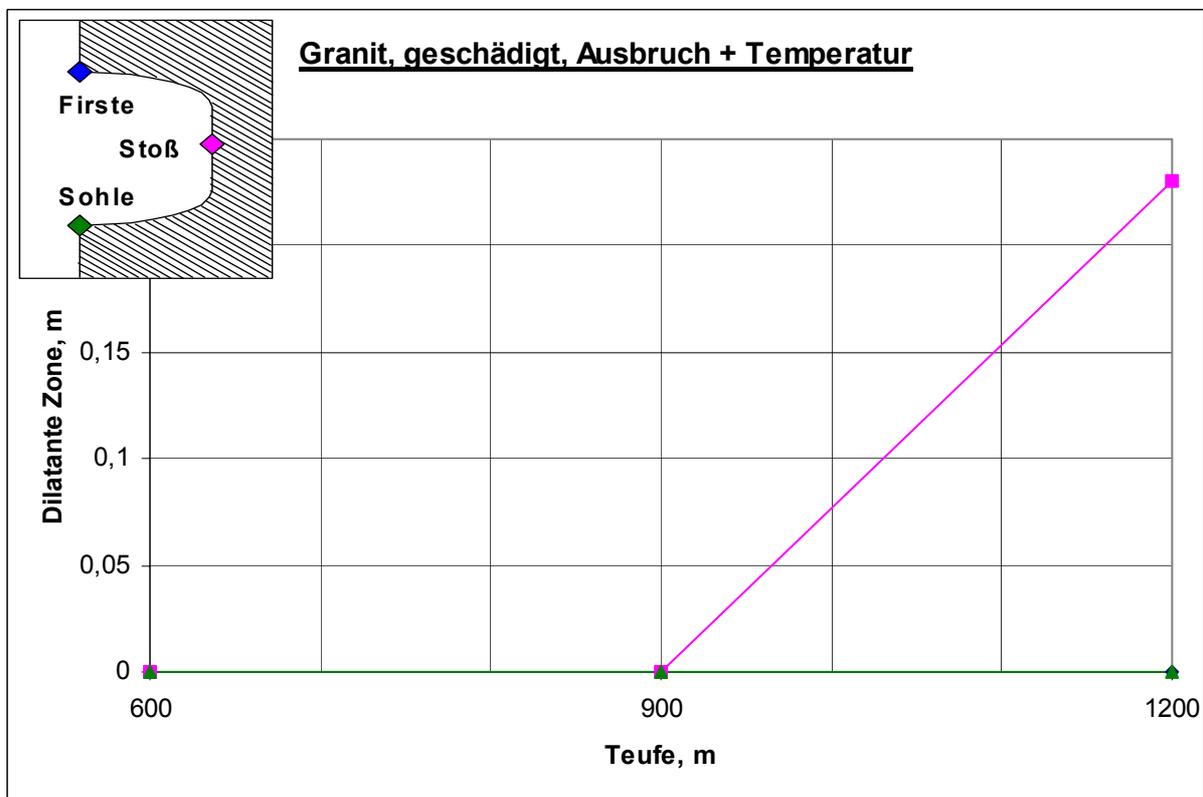


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



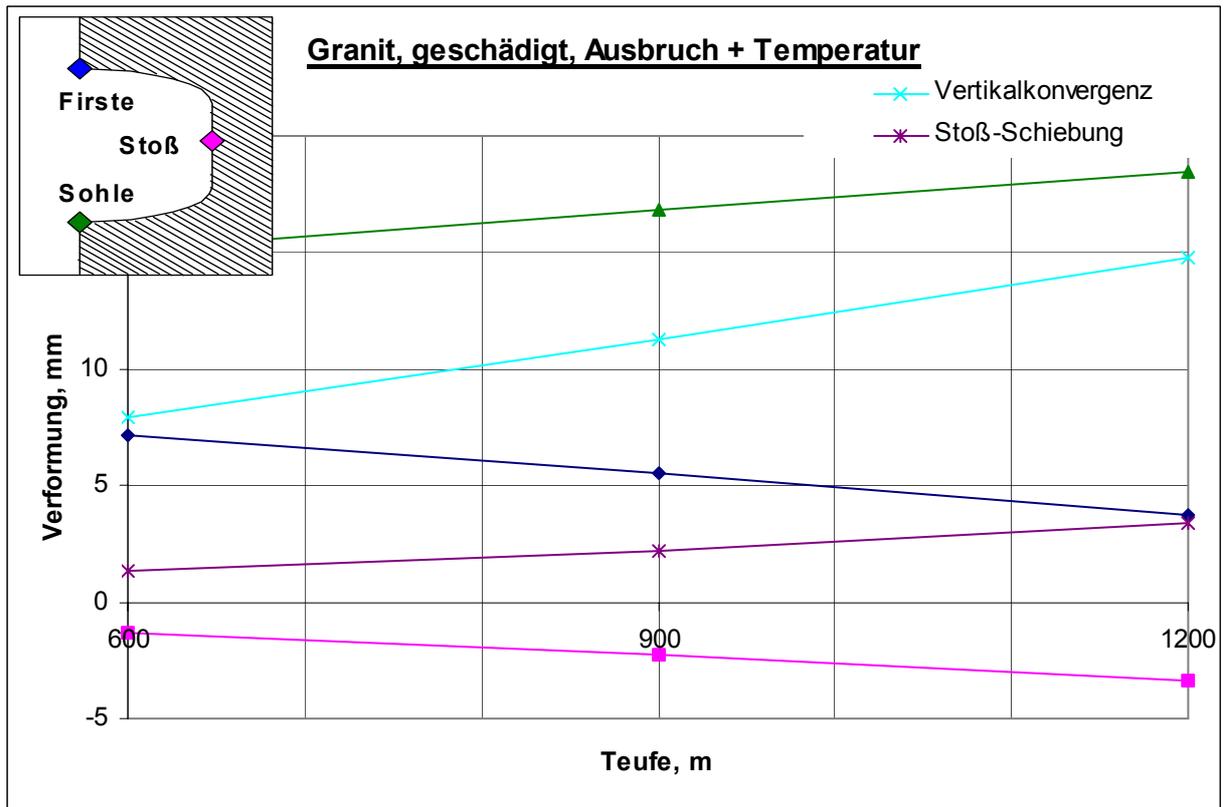
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$



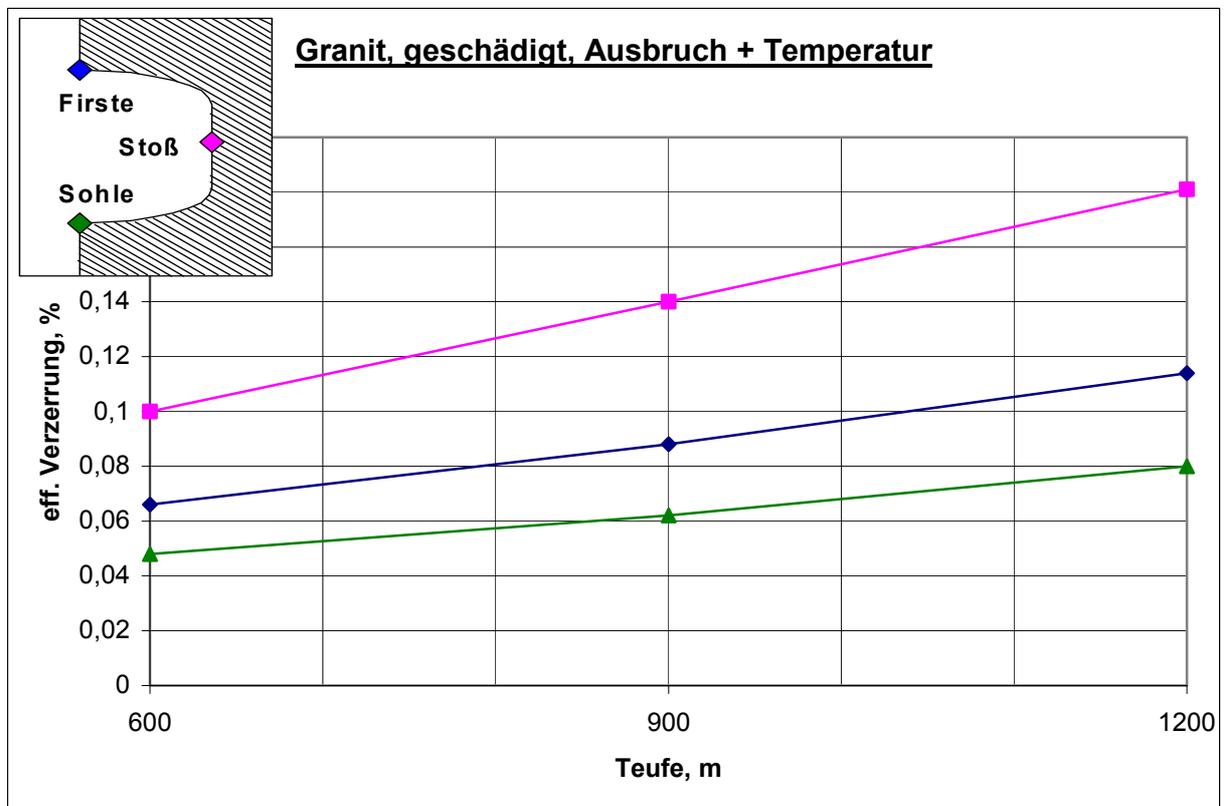
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$

Verformung, Verzerrung

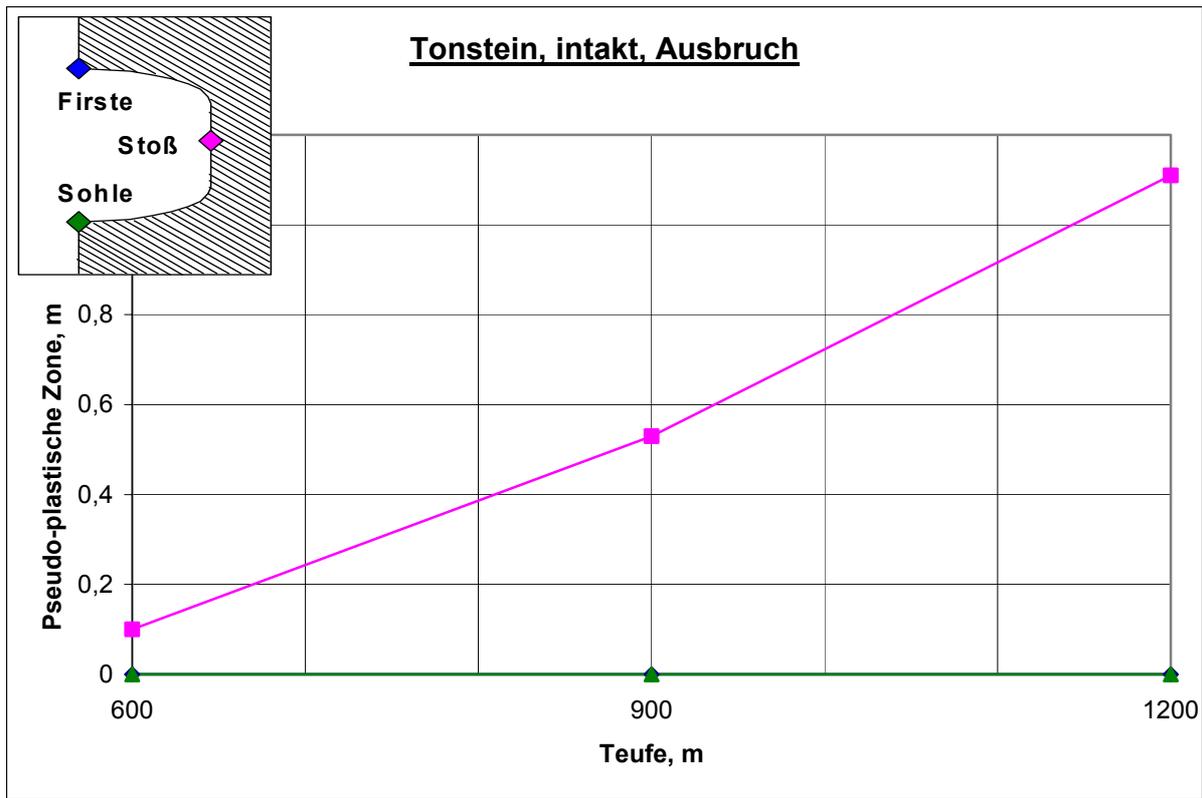


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

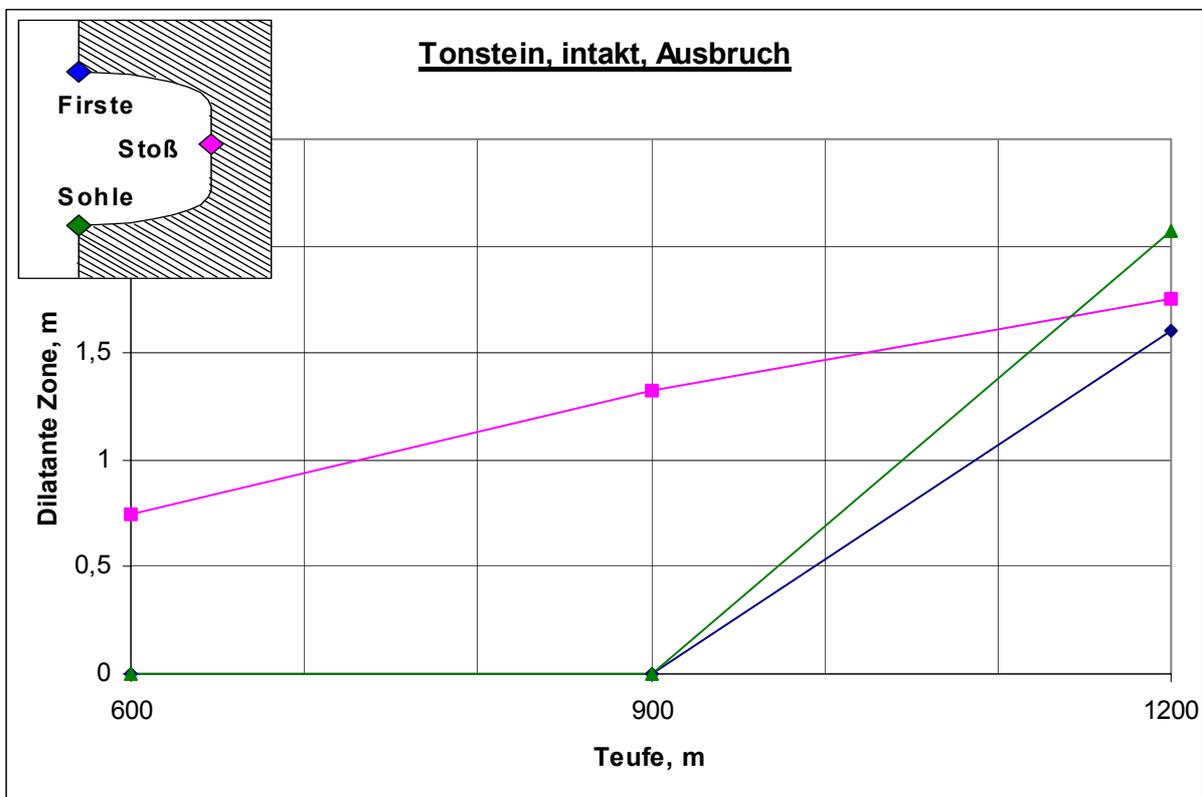


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

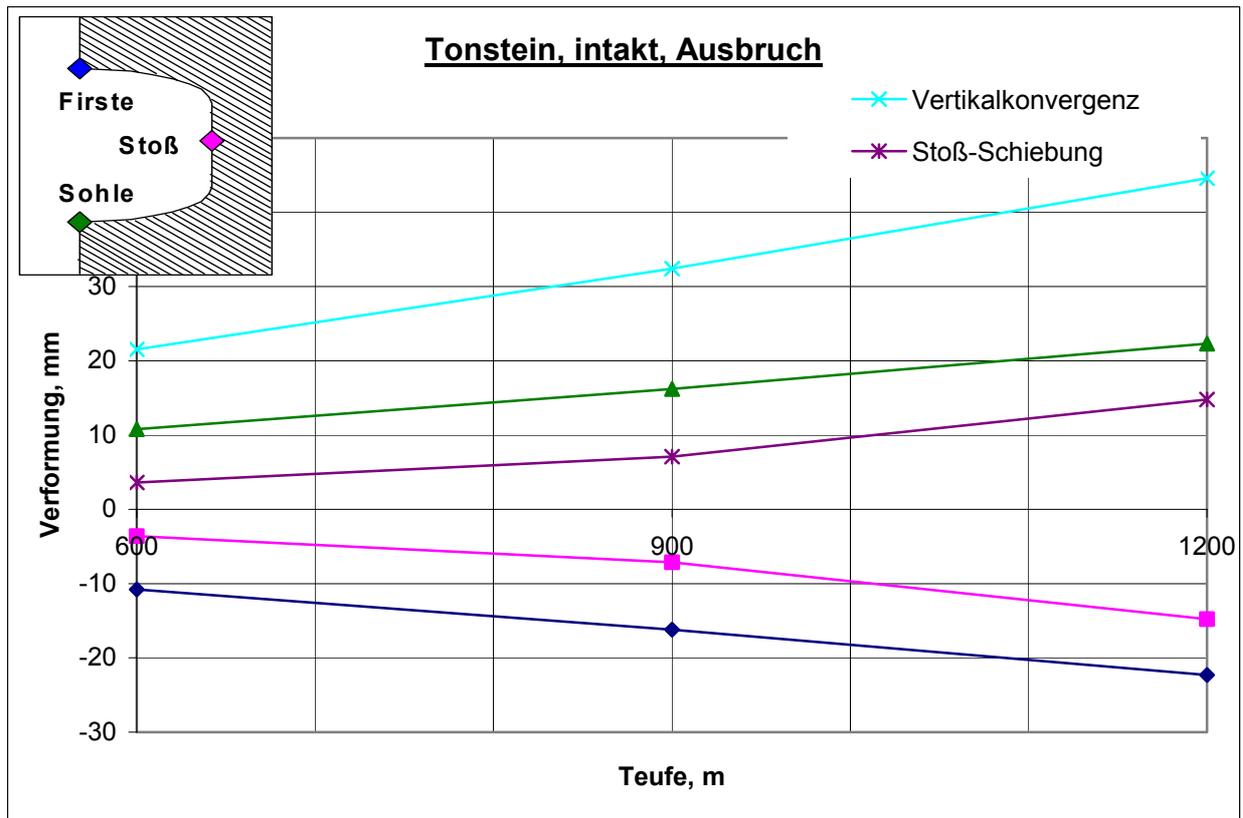


Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

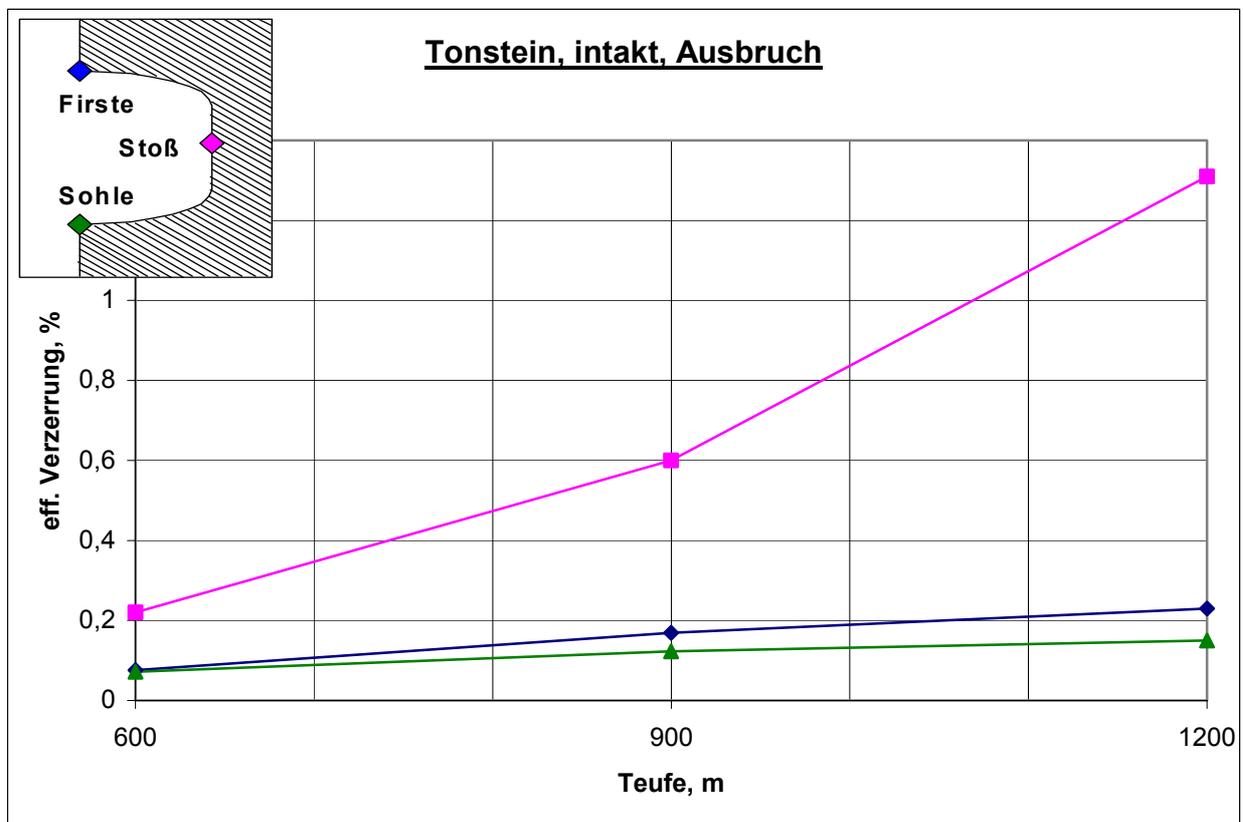


Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$ Verformung, Verzerrung

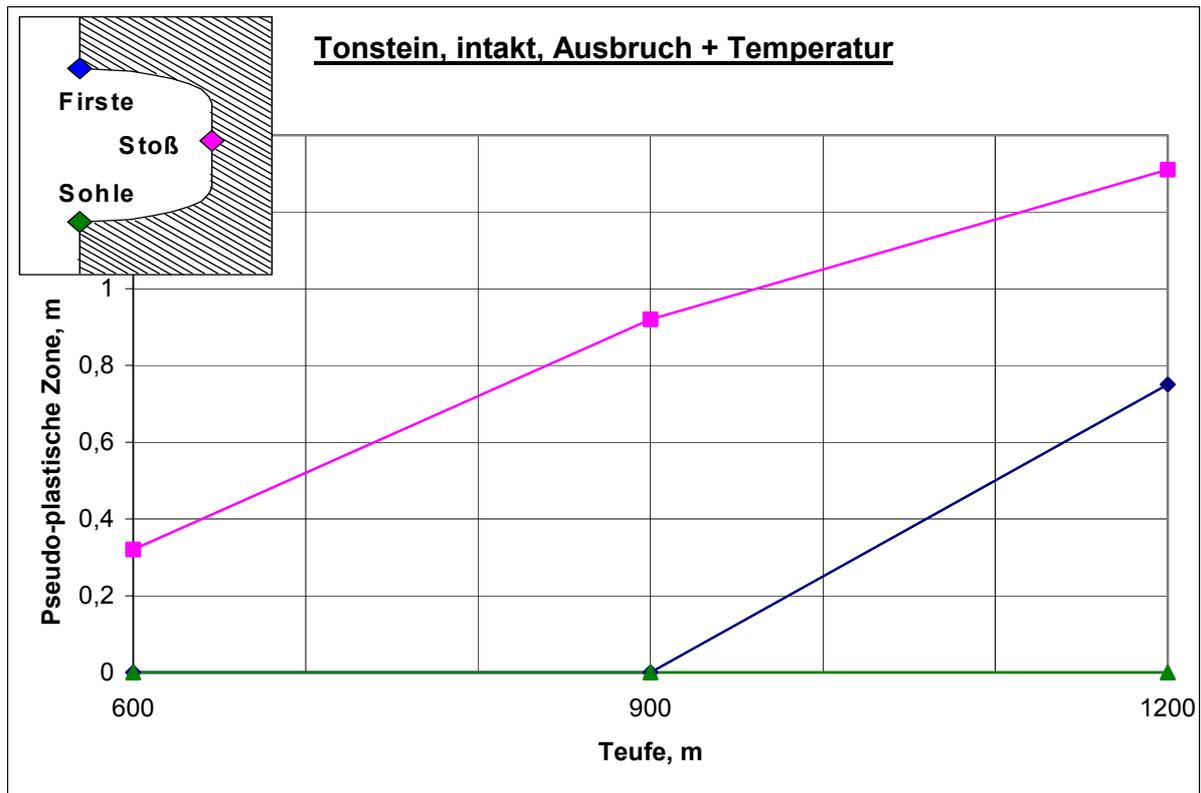


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

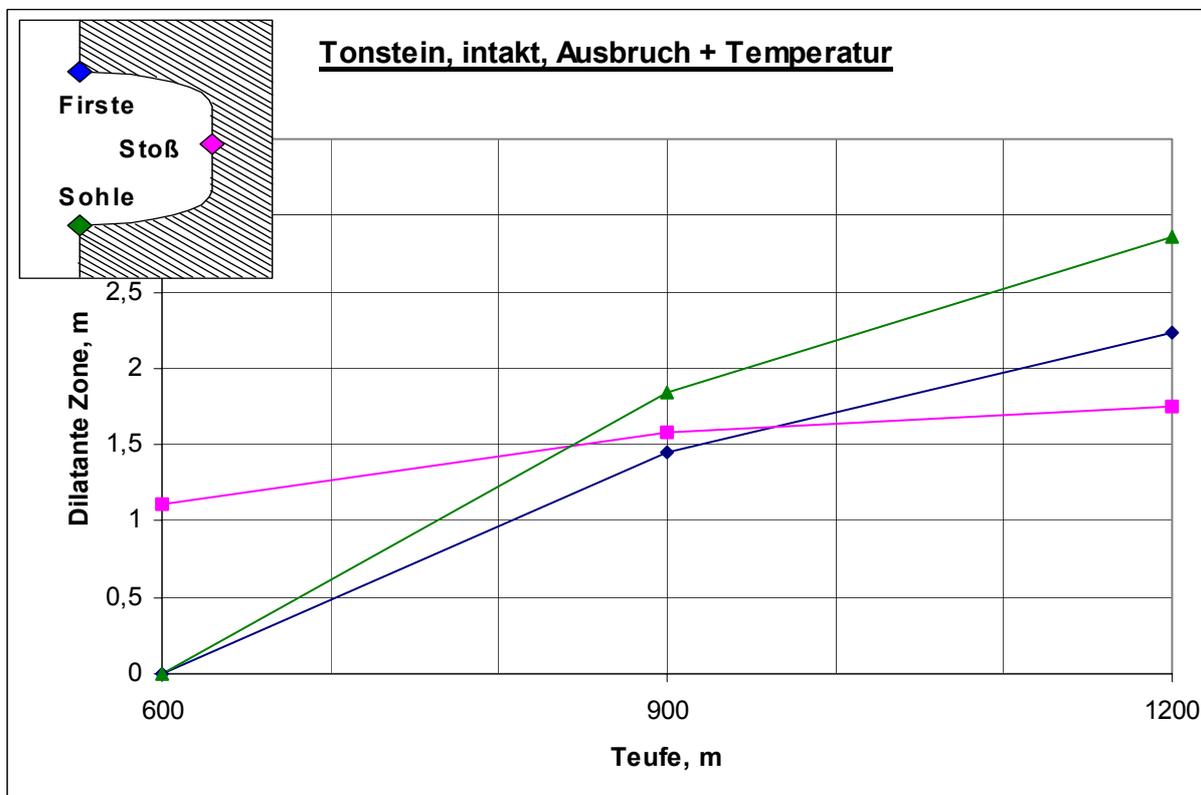


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



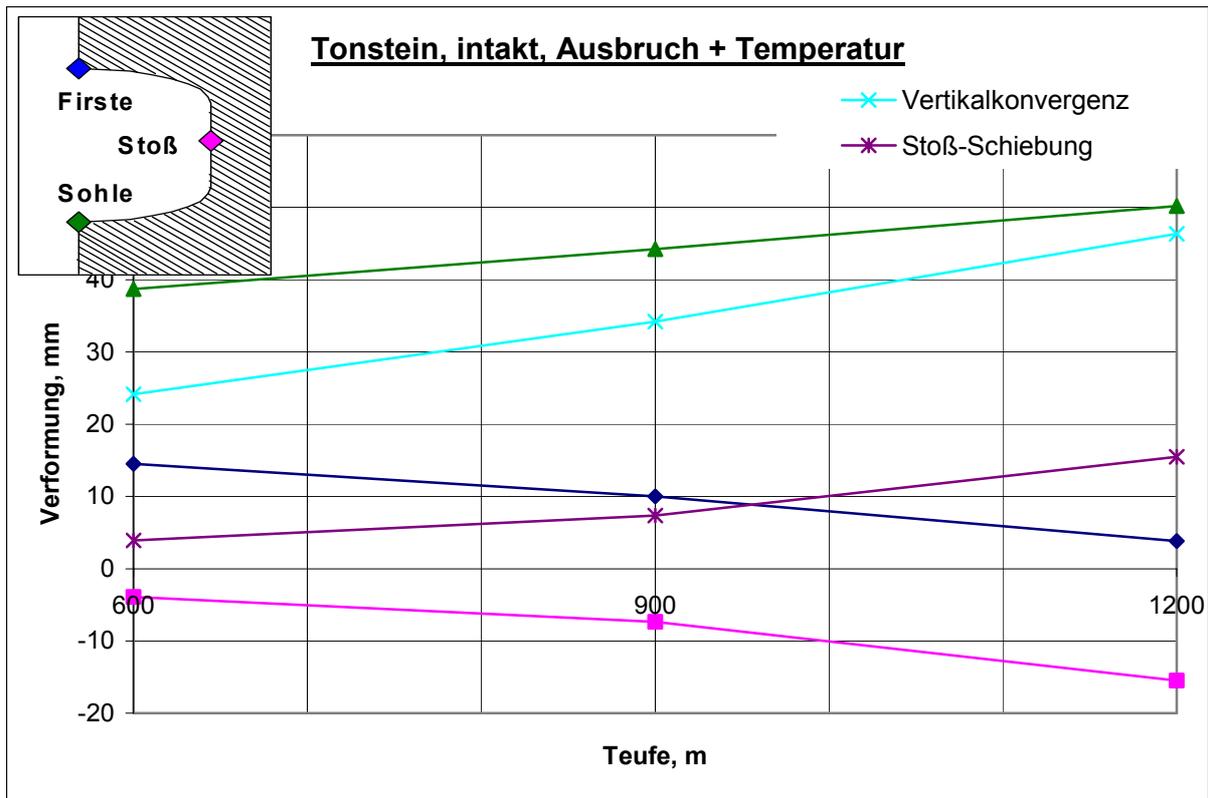
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$



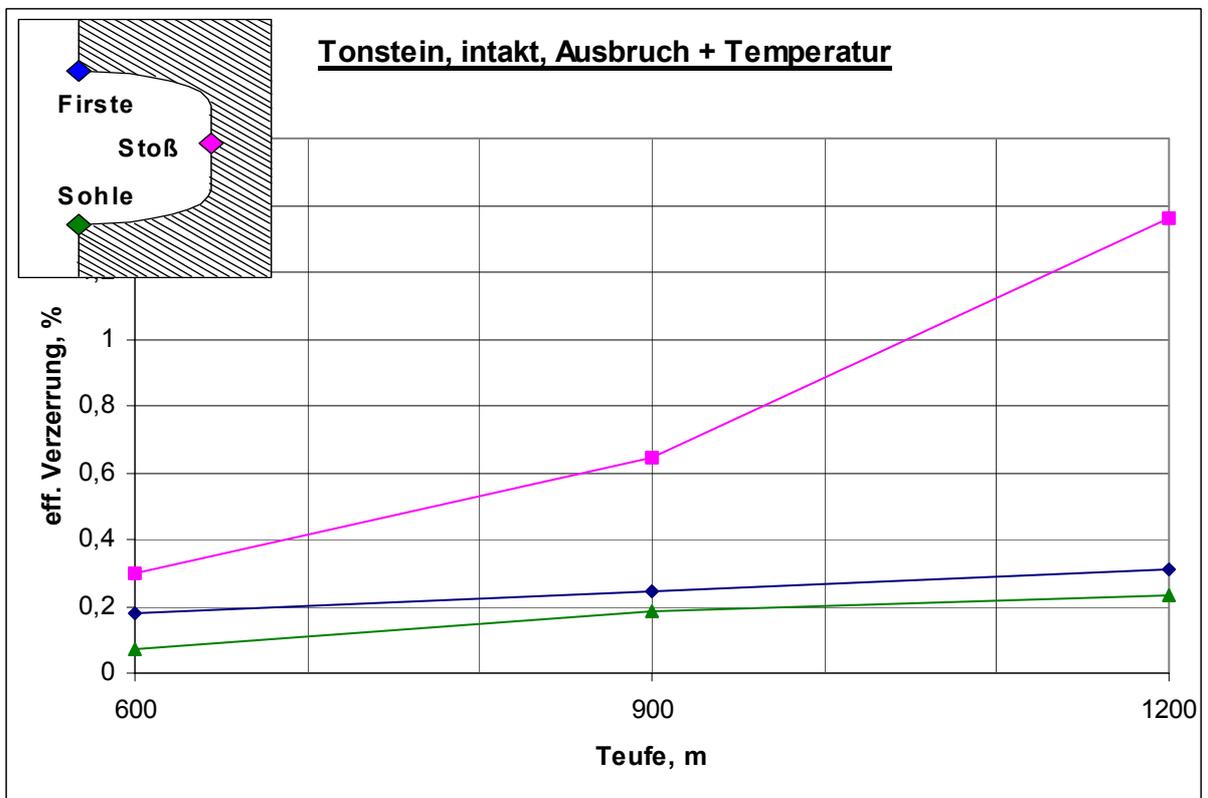
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$

Verformung, Verzerrung

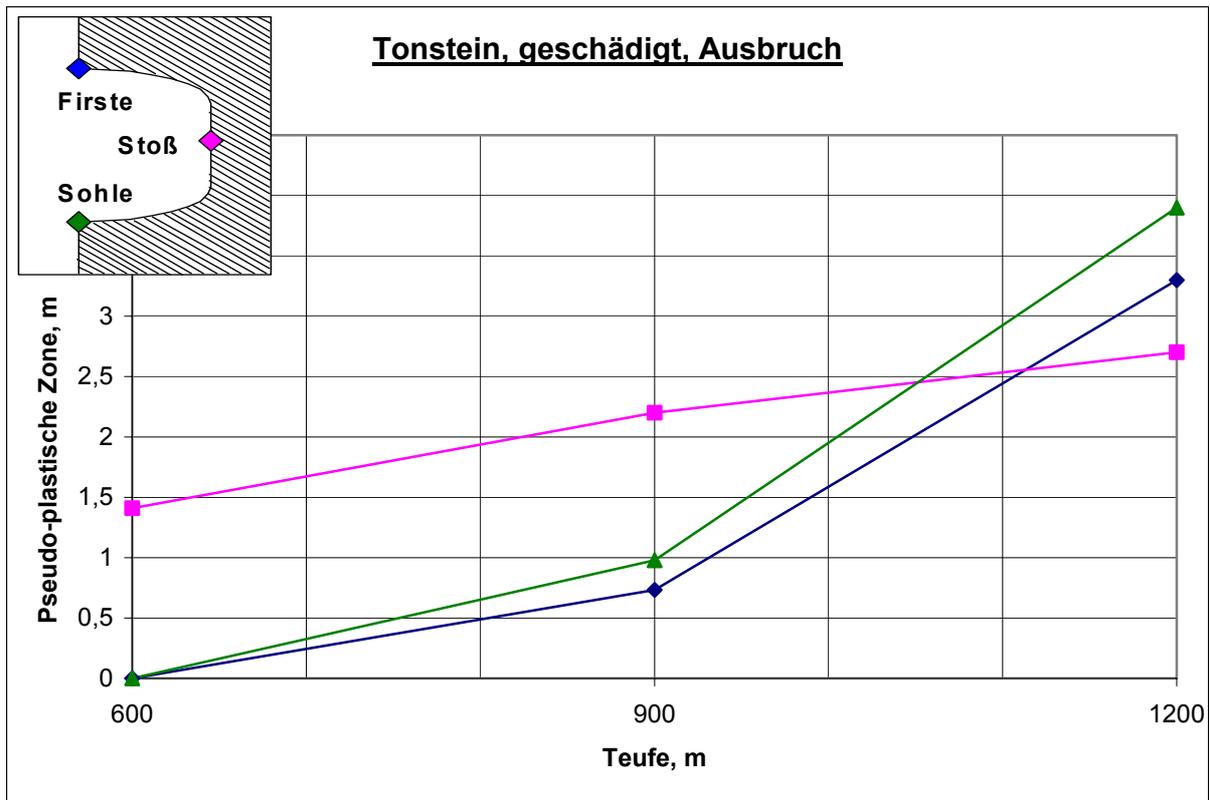


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

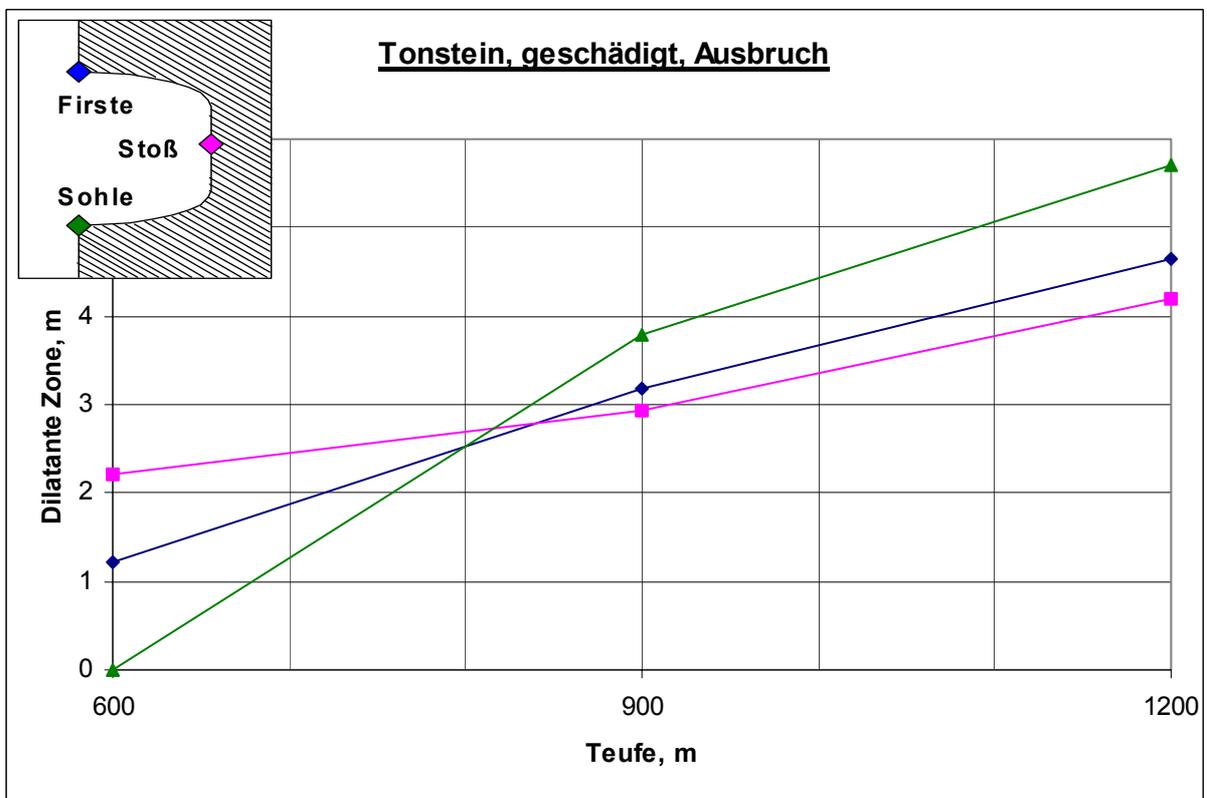


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



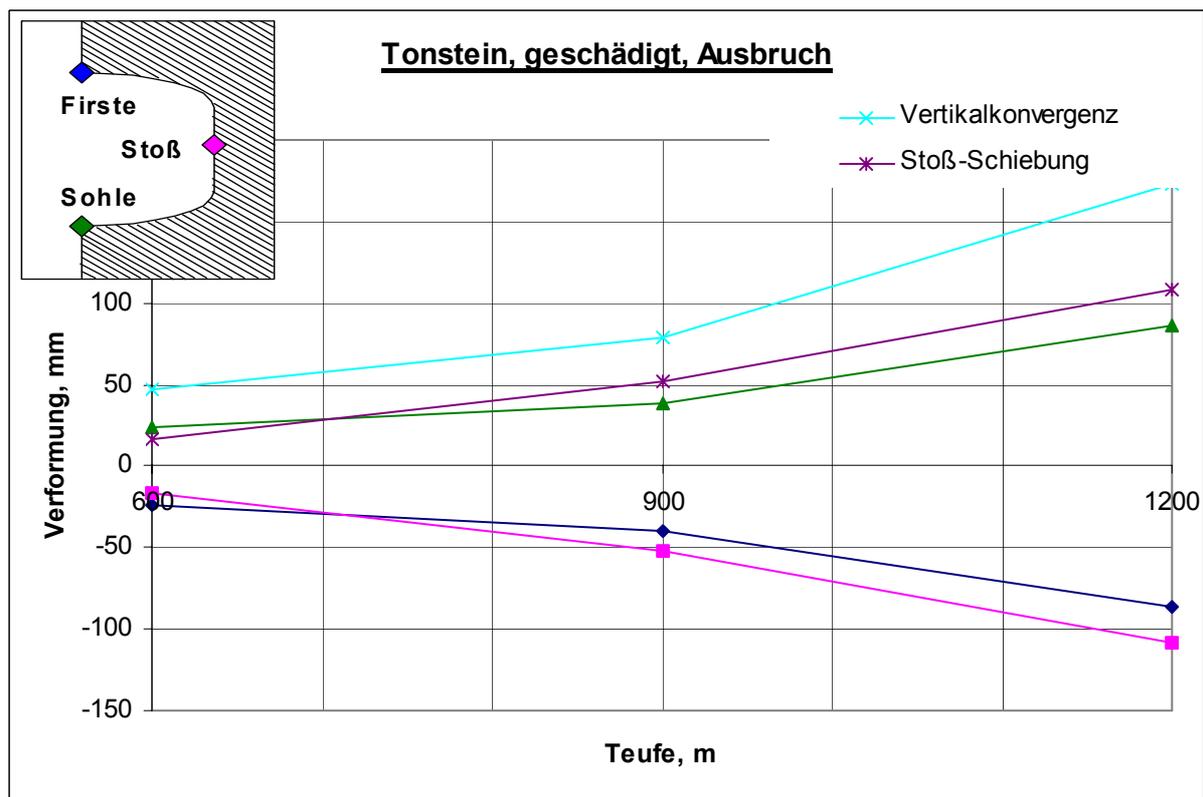
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$



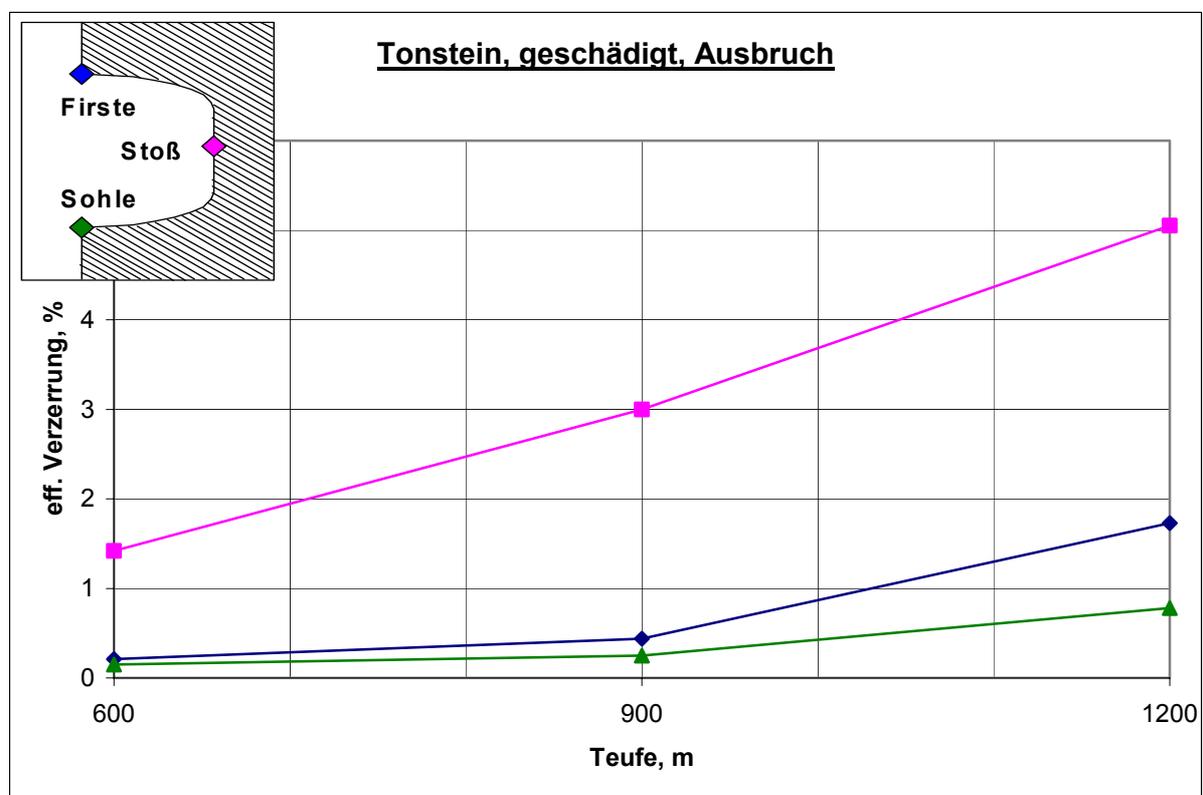
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$

Verformung, Verzerrung

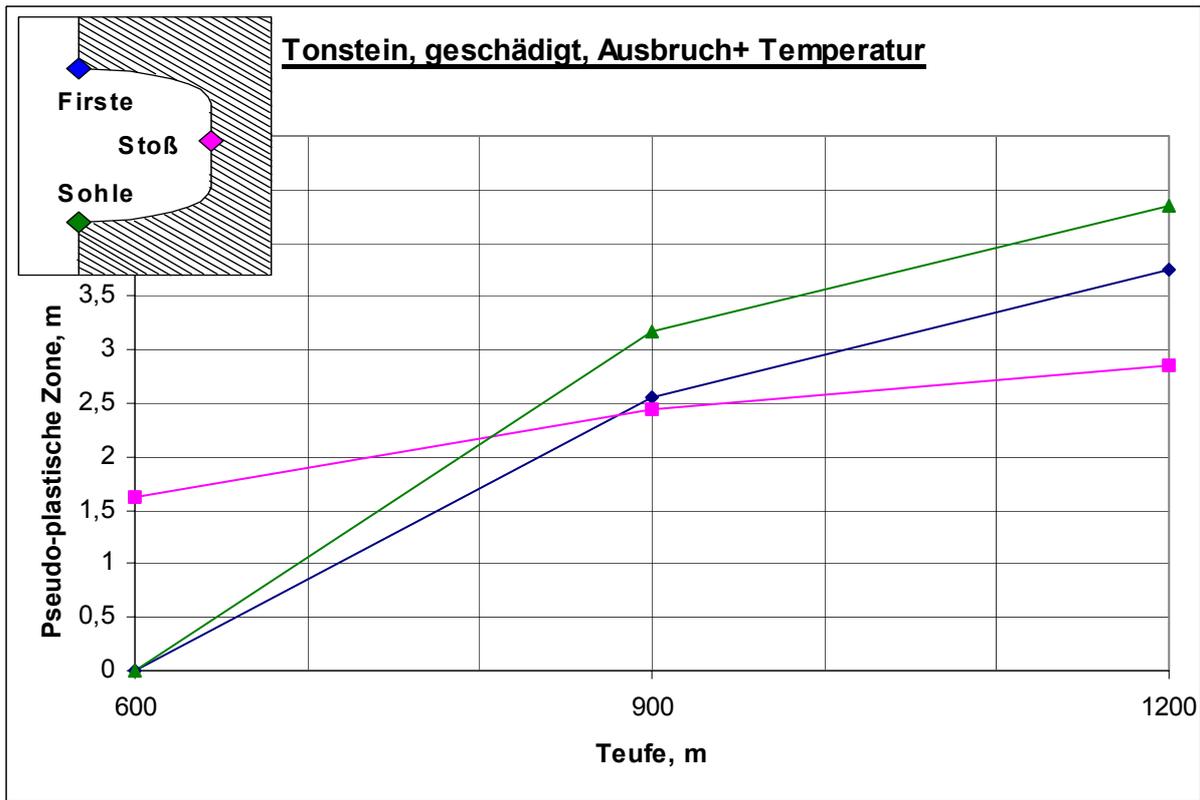


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

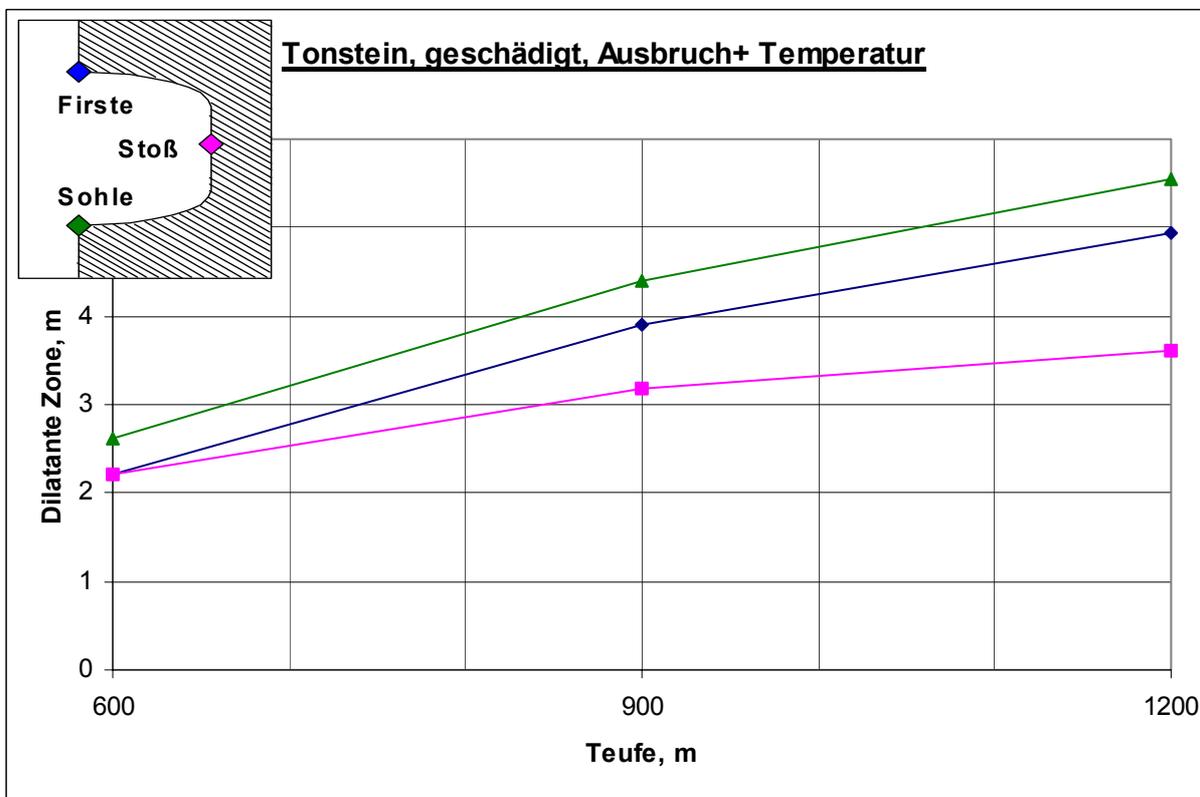


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$ pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

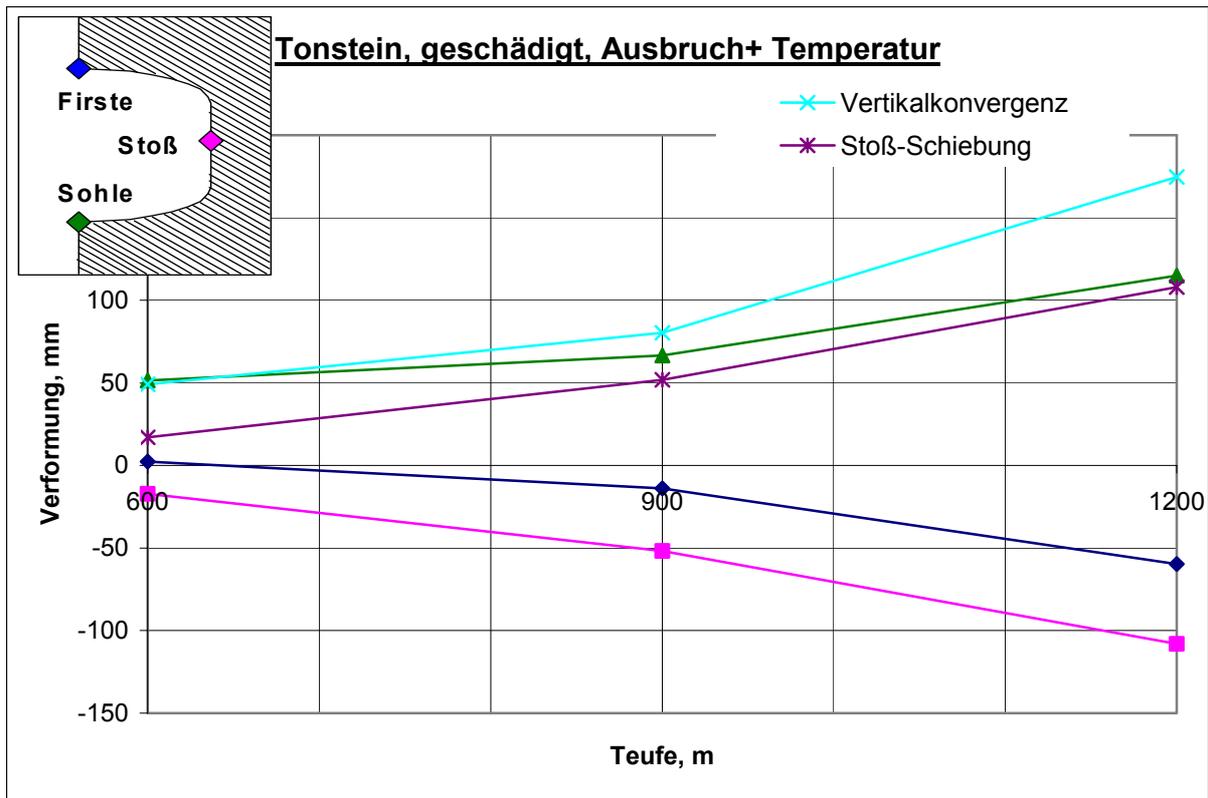


Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

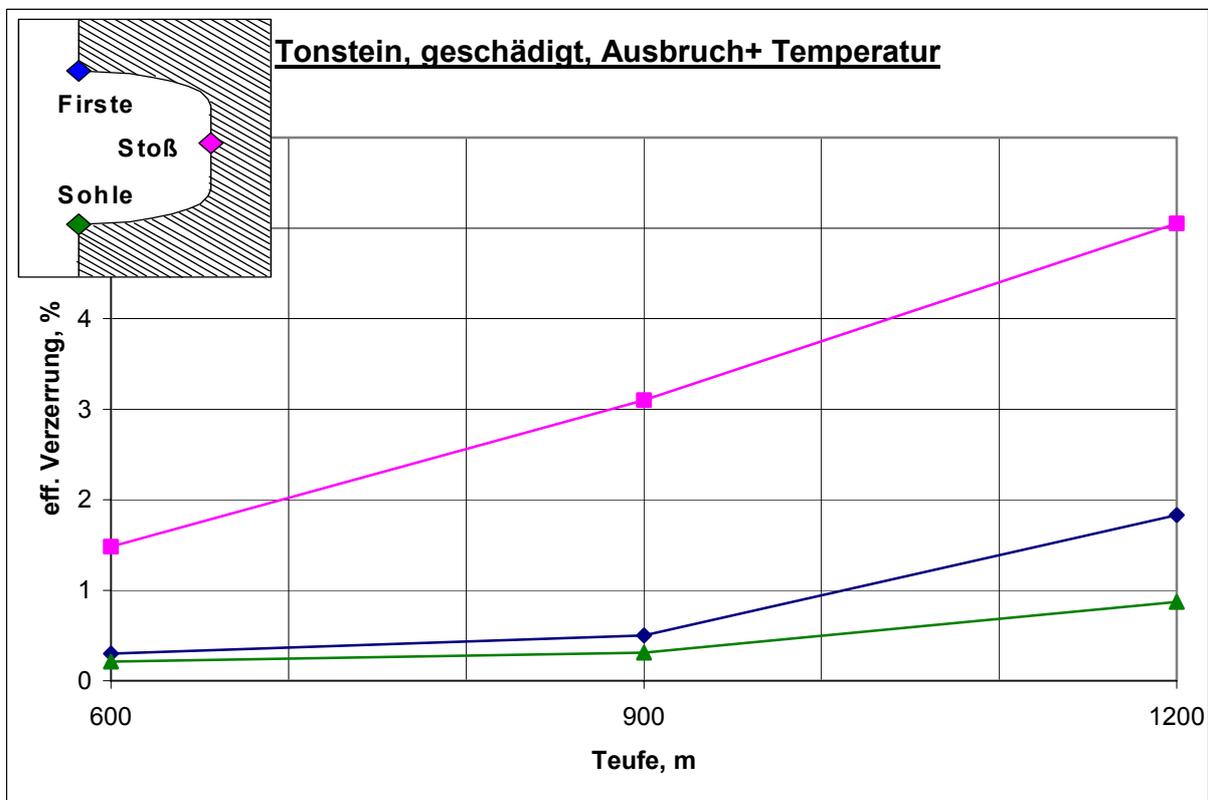


Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 < 1$ Verformung, Verzerrung

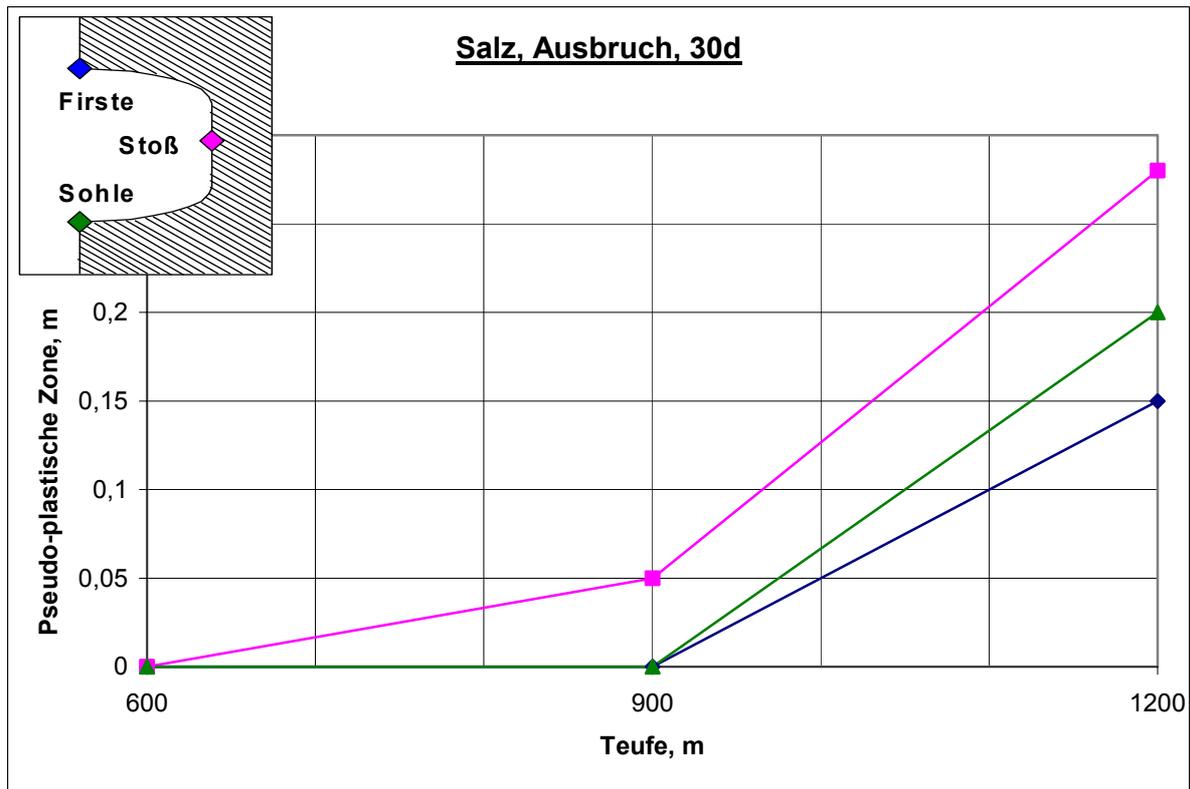


Verformung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

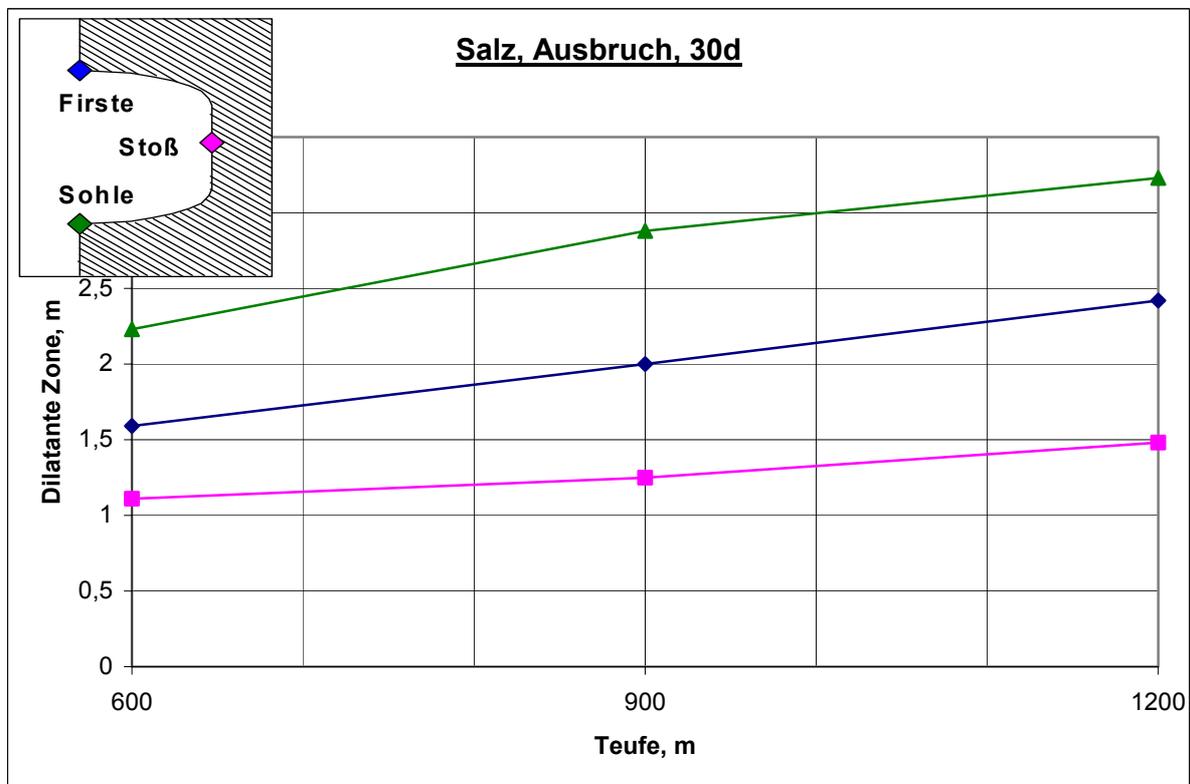


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=0,775$; Teufe 900m, $K_0=0,85$; Teufe 1200m, $K_0=0,925$

Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

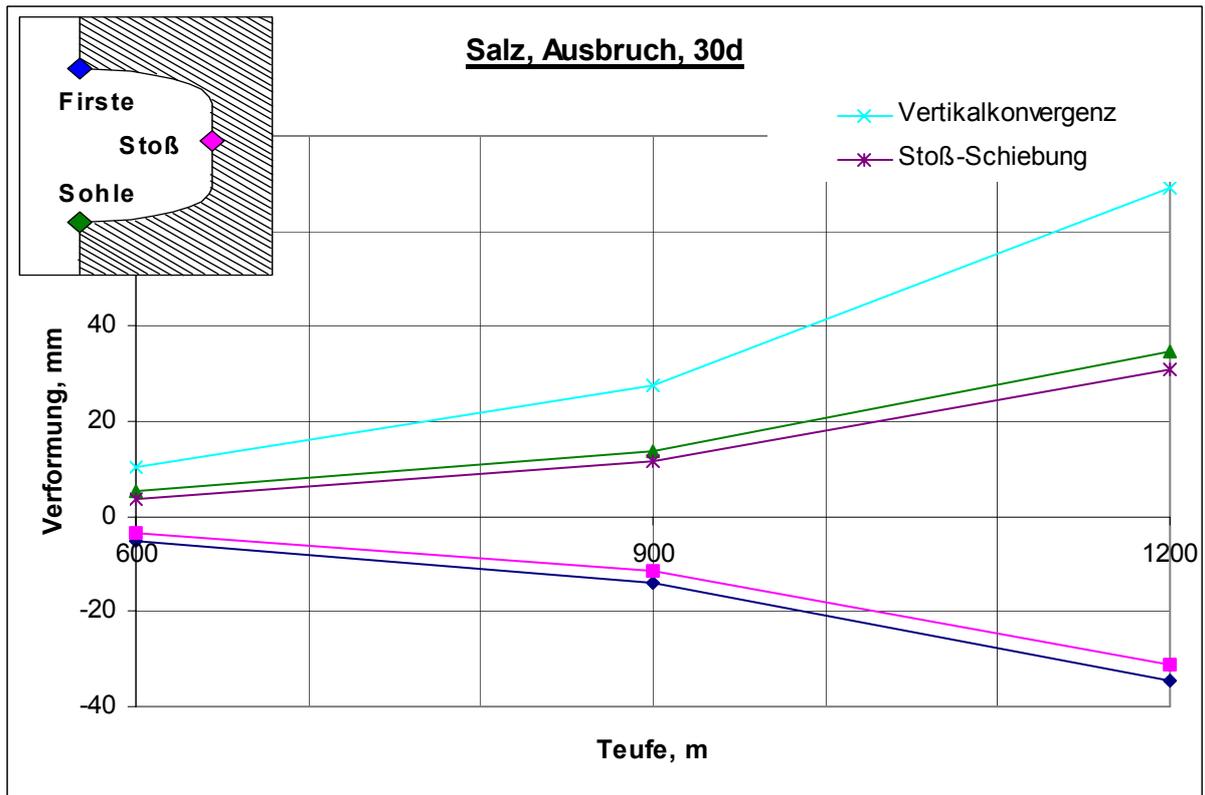


Pseudo-plastische Zone (Bruchfestigkeit β_{80}): Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

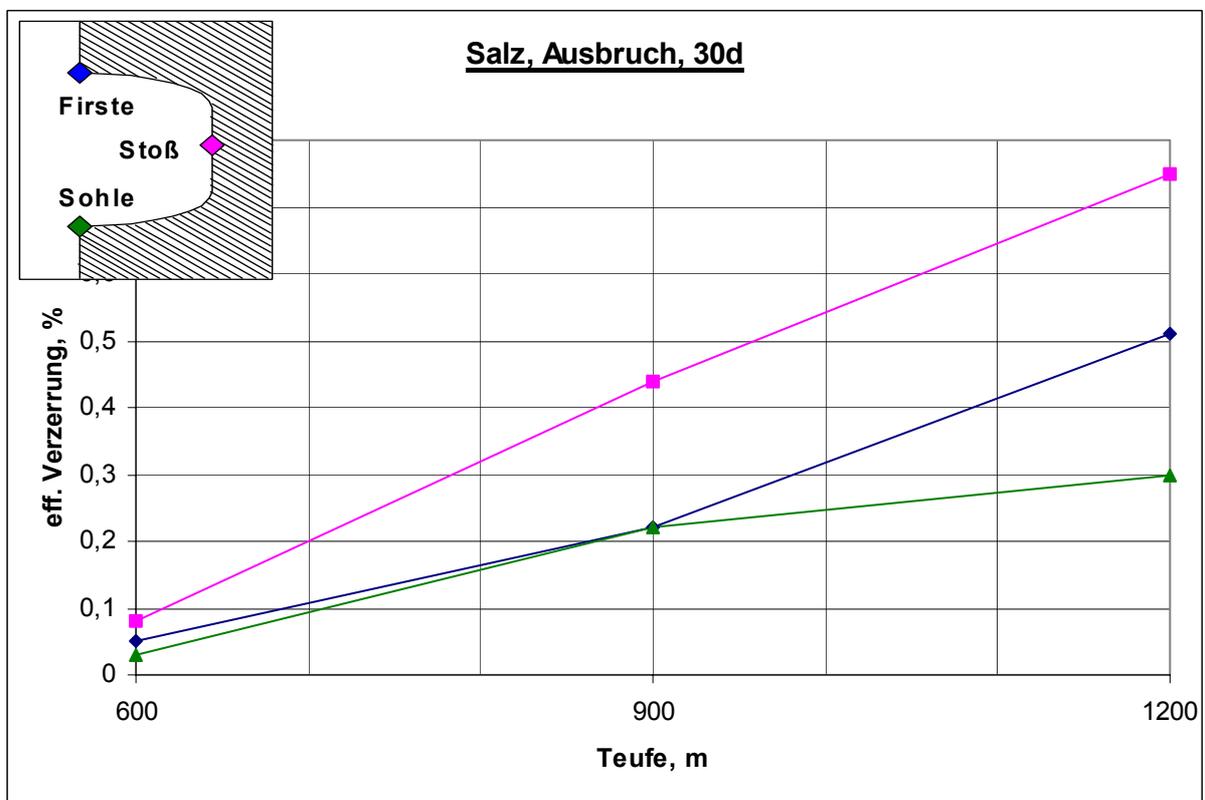


Dilatante Zone: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$ Verformung, Verzerrung

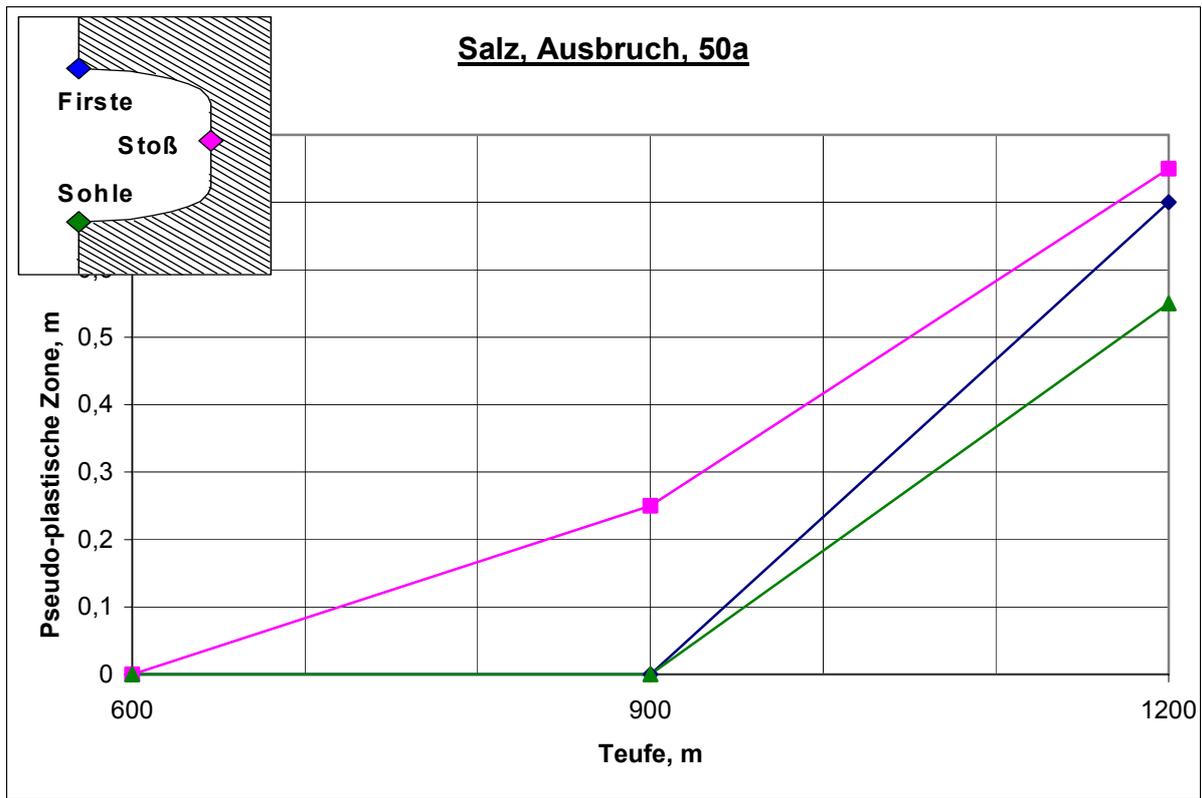


Verformung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

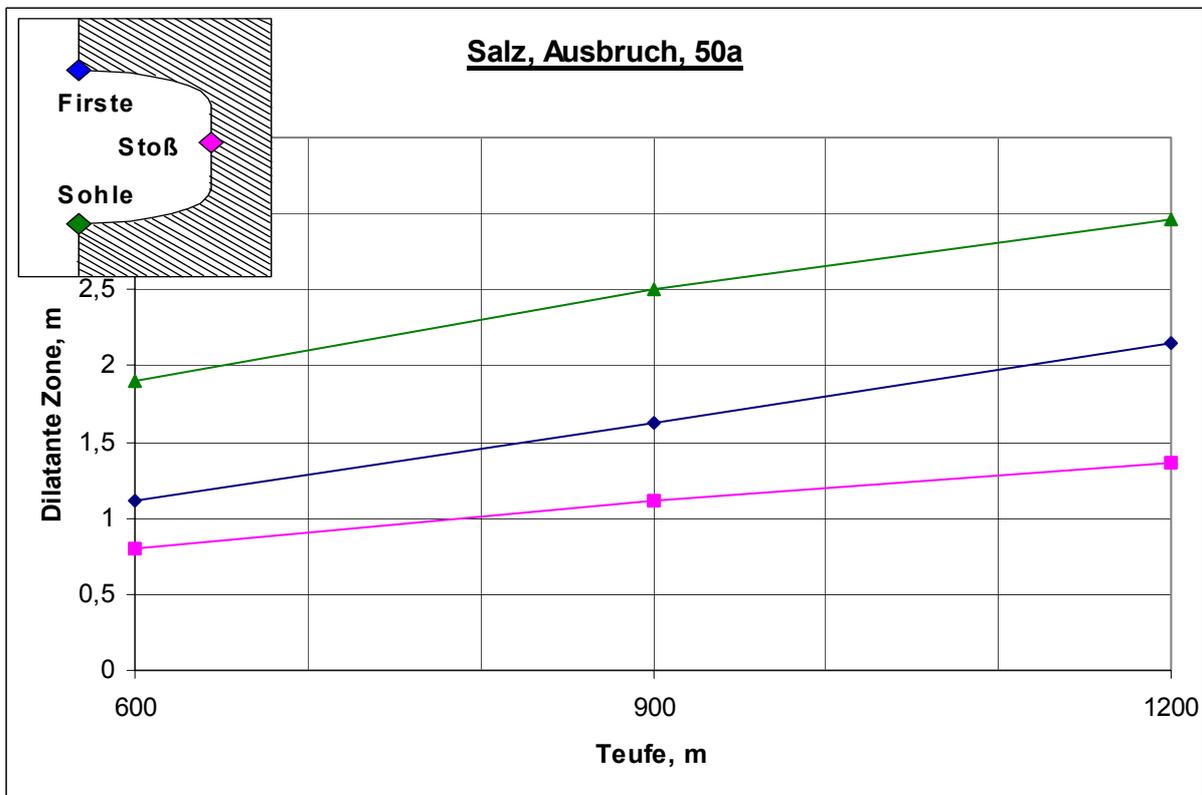


Verzerrung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$
pseudo-plastische, dilatante Zone

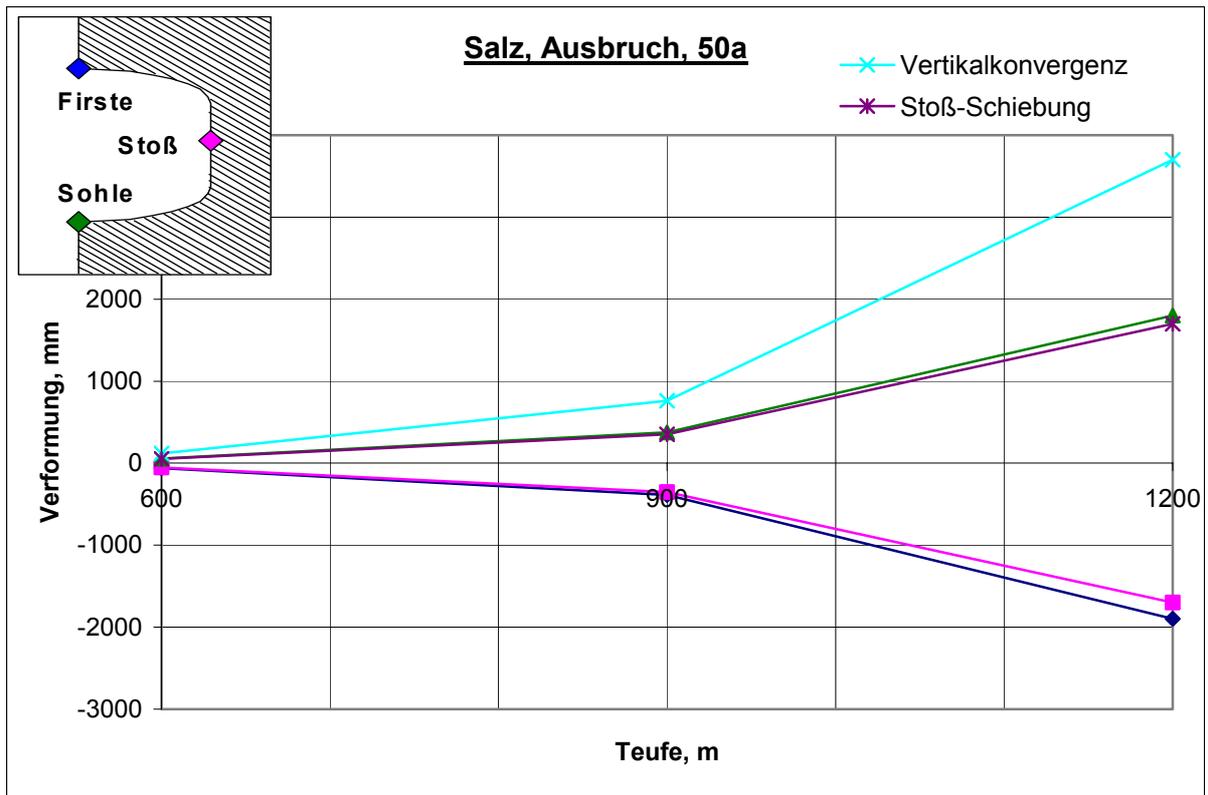


Pseudo-plastische Zone (Bruchfestigkeit β_{50}): Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

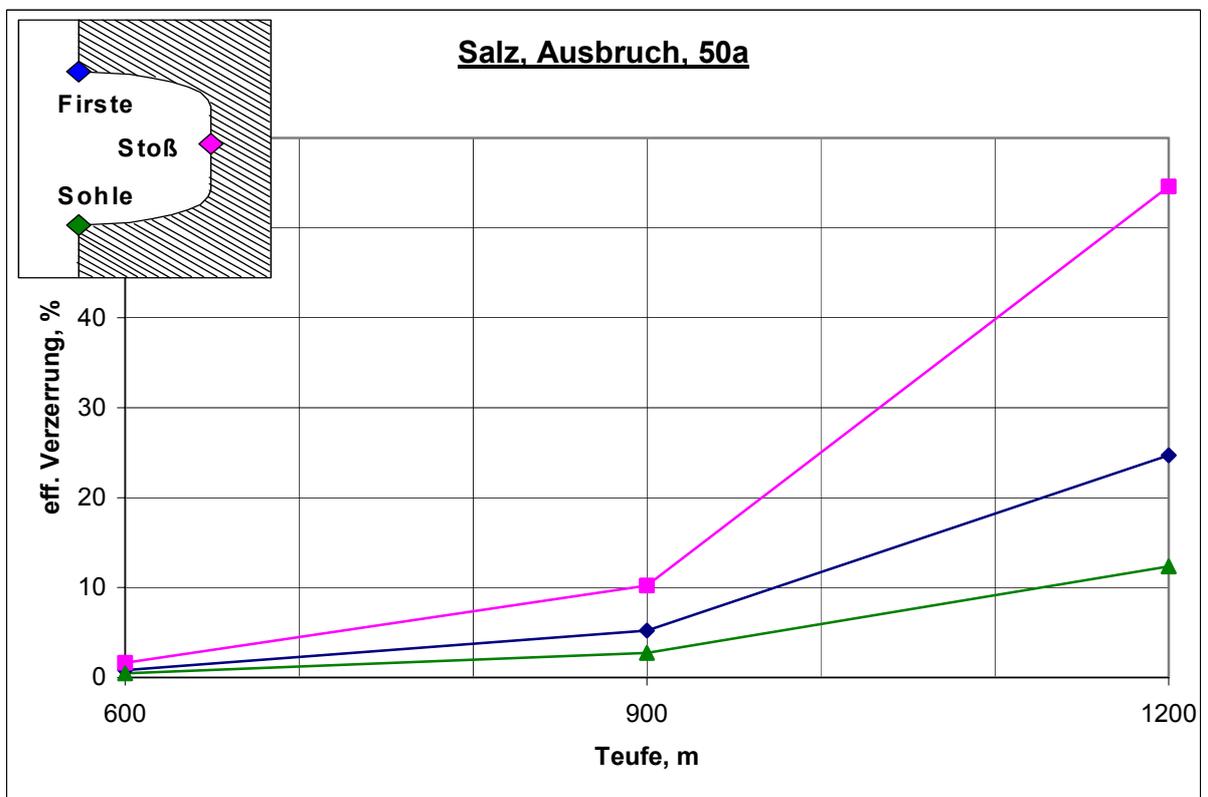


Dilatante Zone: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$ Verformung, Verzerrung

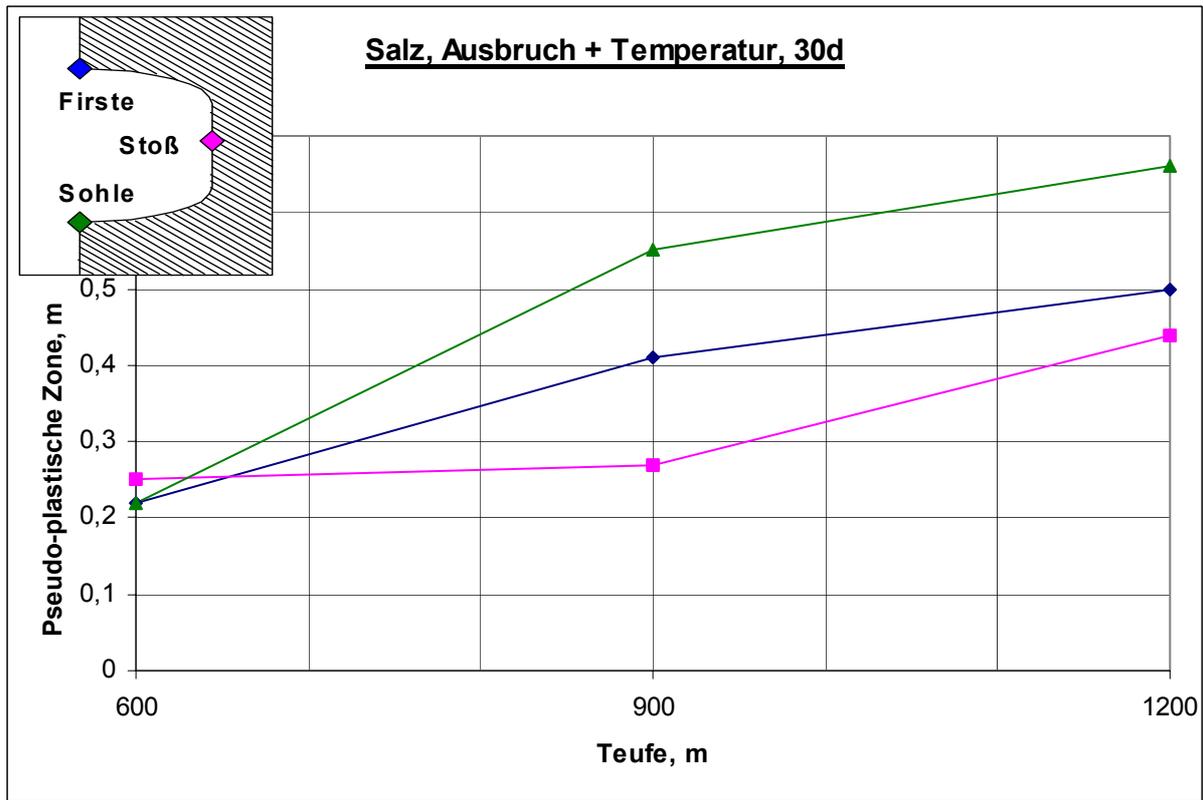


Verformung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

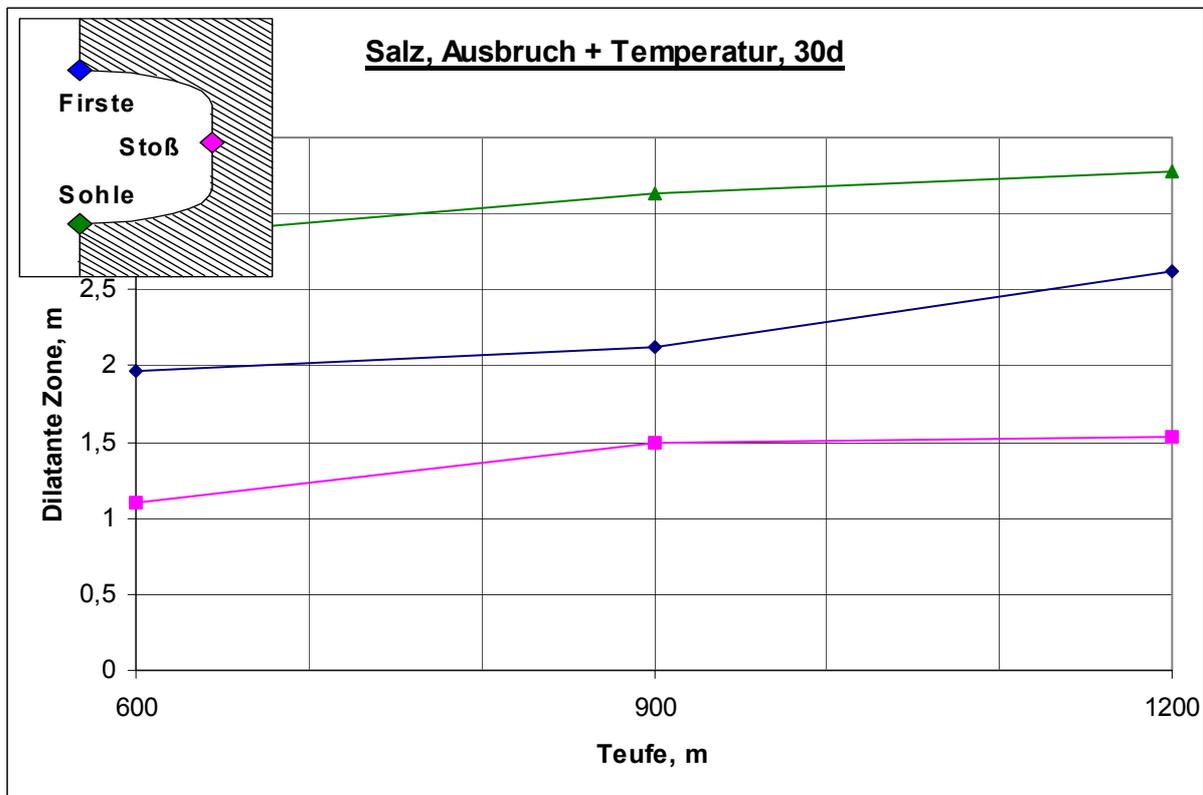


Verzerrung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

**Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$
pseudo-plastische, dilatante Zone**

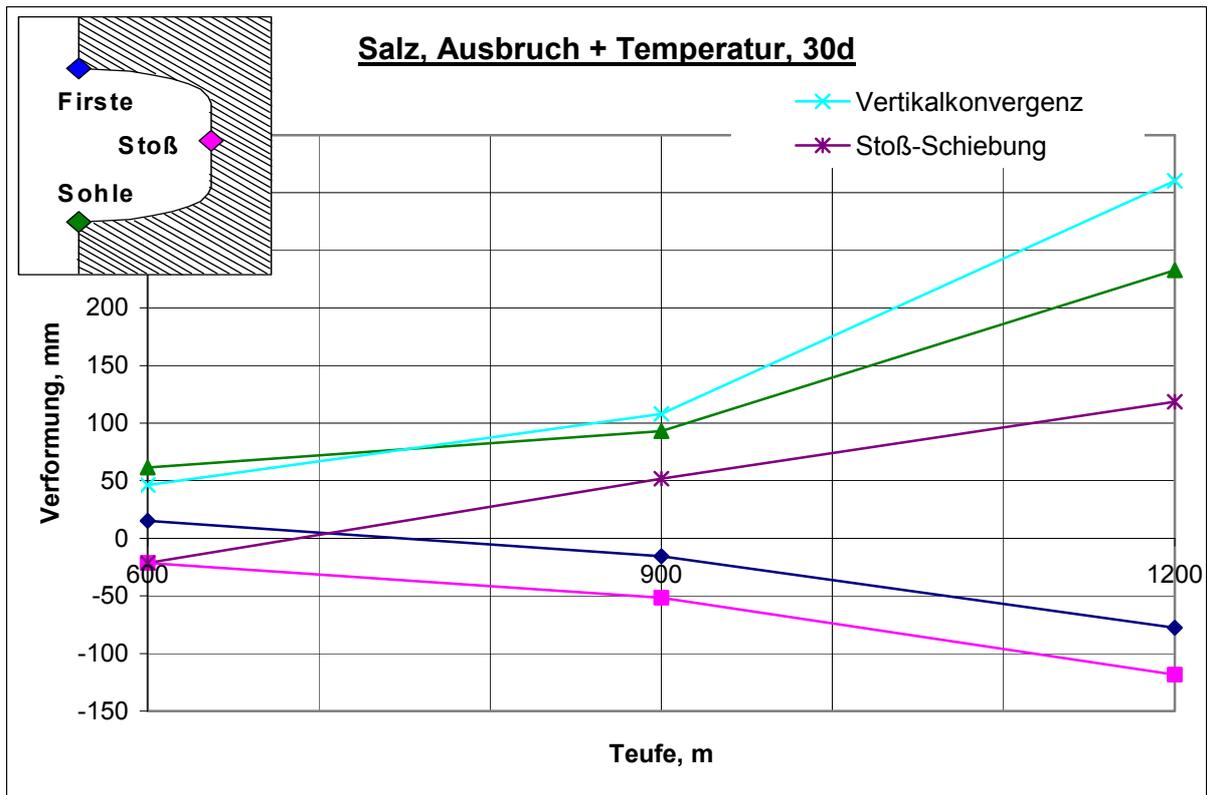


Pseudo-plastische Zone (Bruchfestigkeit β_{80}): Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

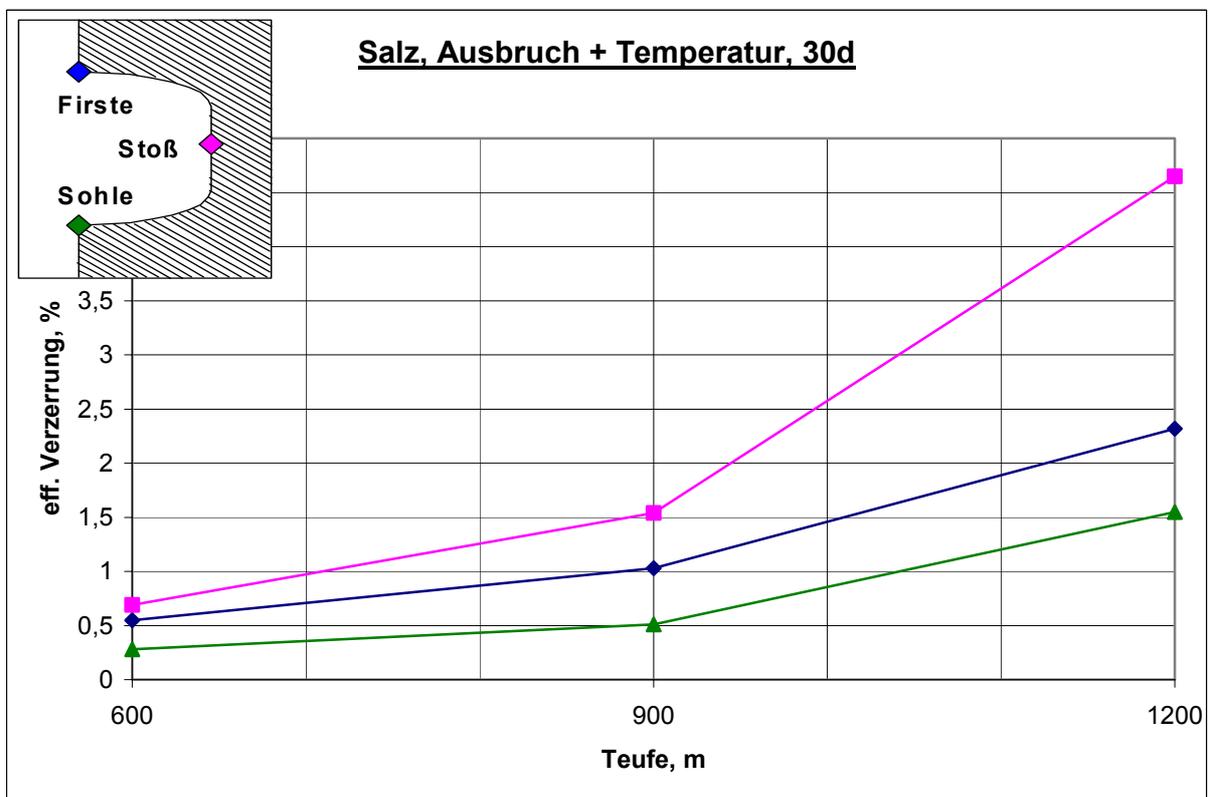


Dilatante Zone: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$ Verformung, Verzerrung

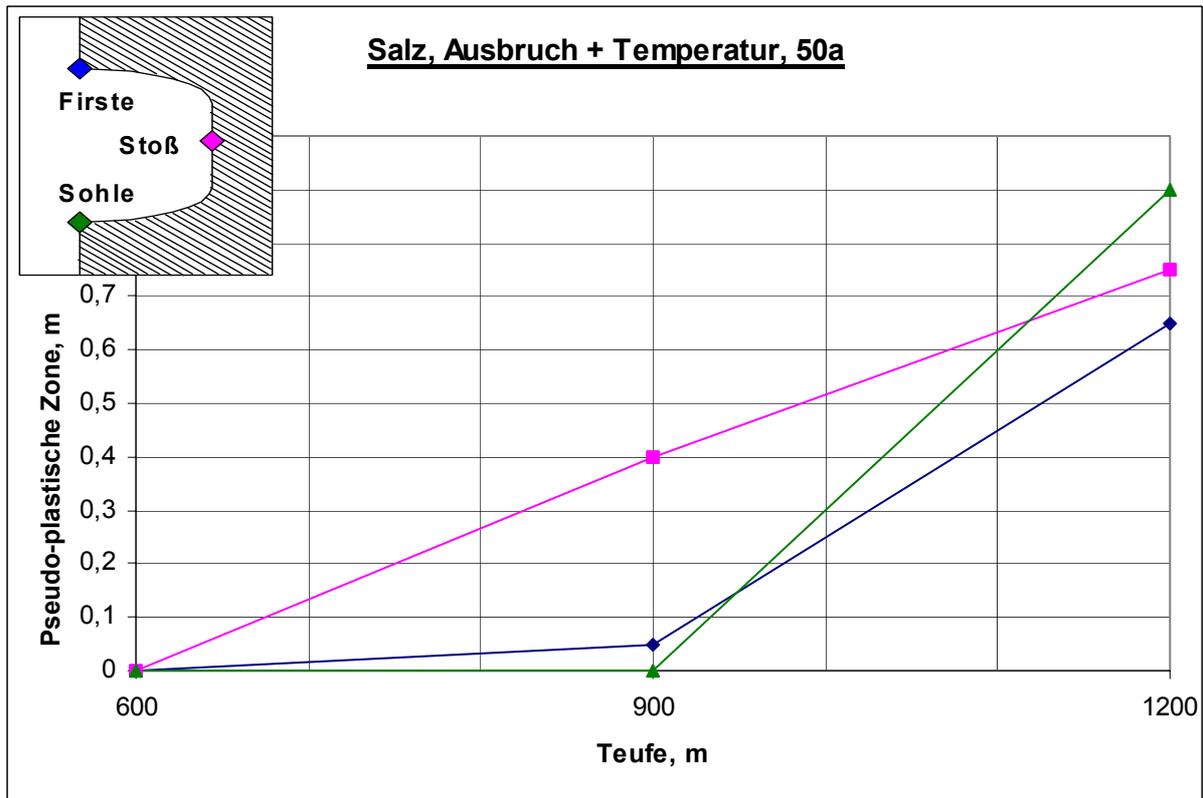


Verformung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

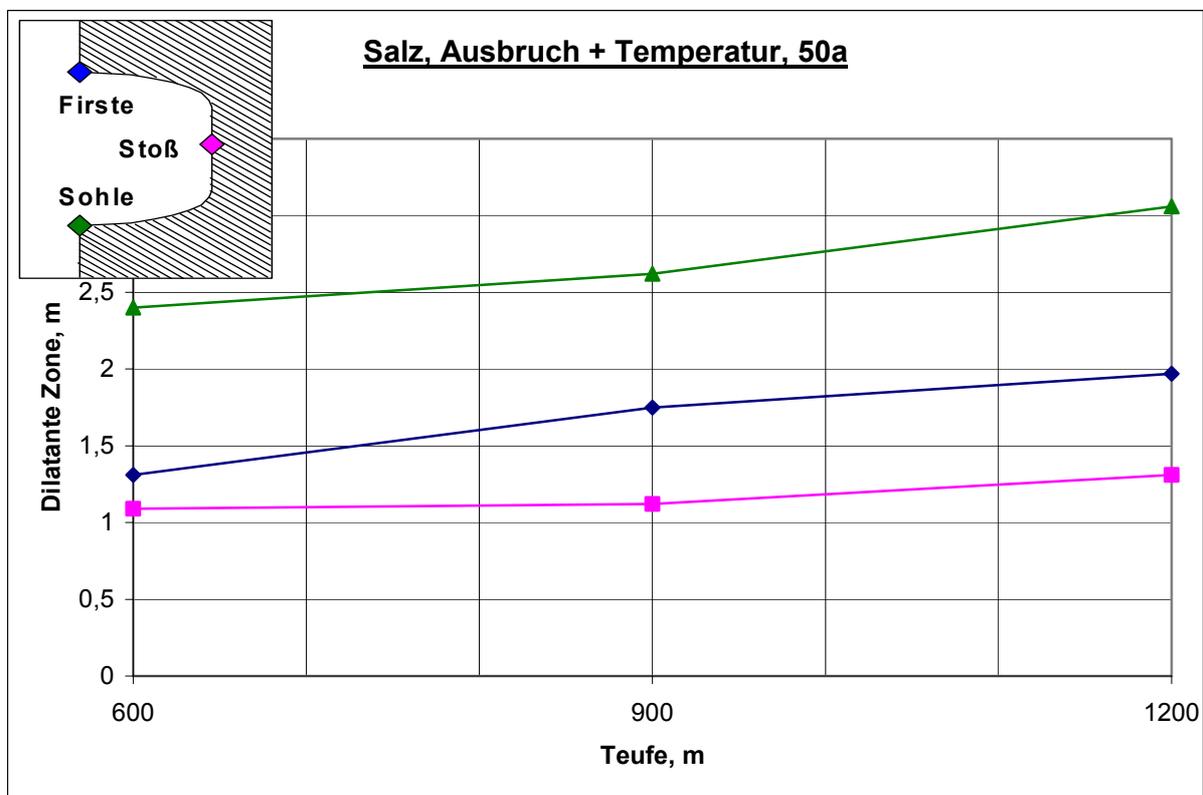


Verzerrung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

**Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$
pseudo-plastische, dilatante Zone**

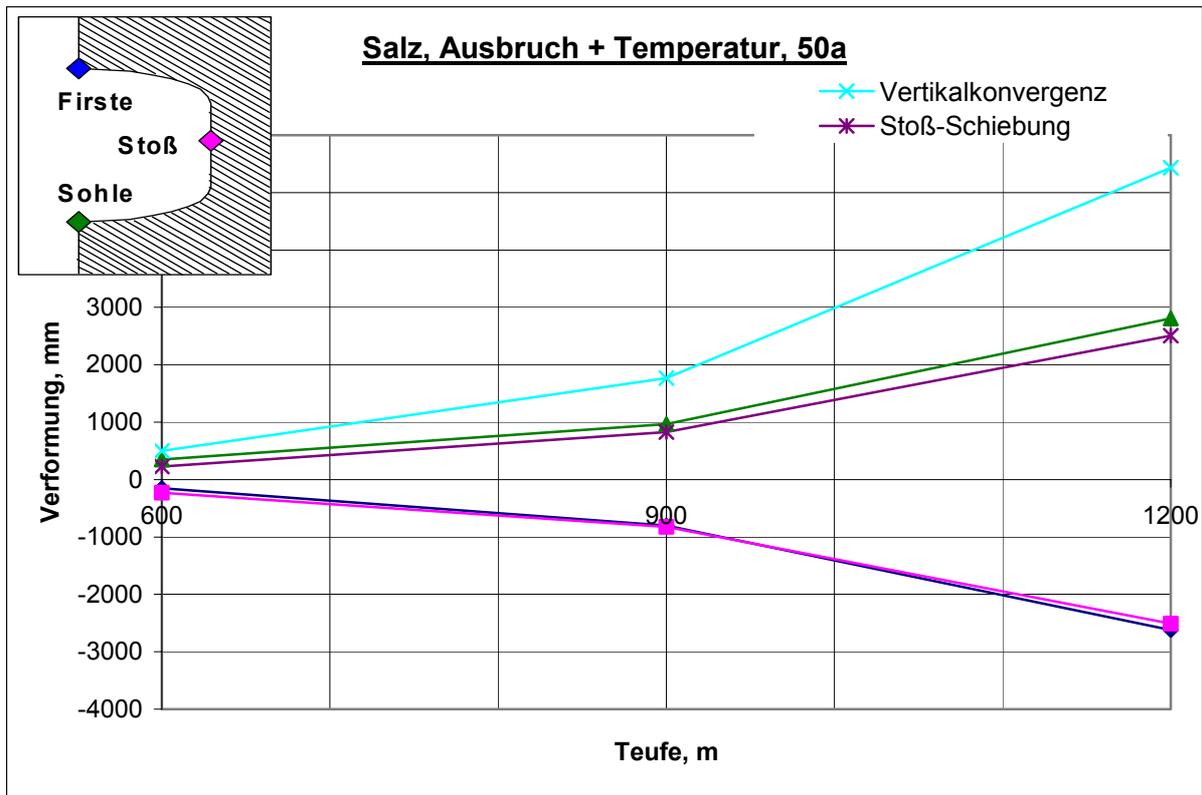


Pseudo-plastische Zone (Bruchfestigkeit β_{50}): Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

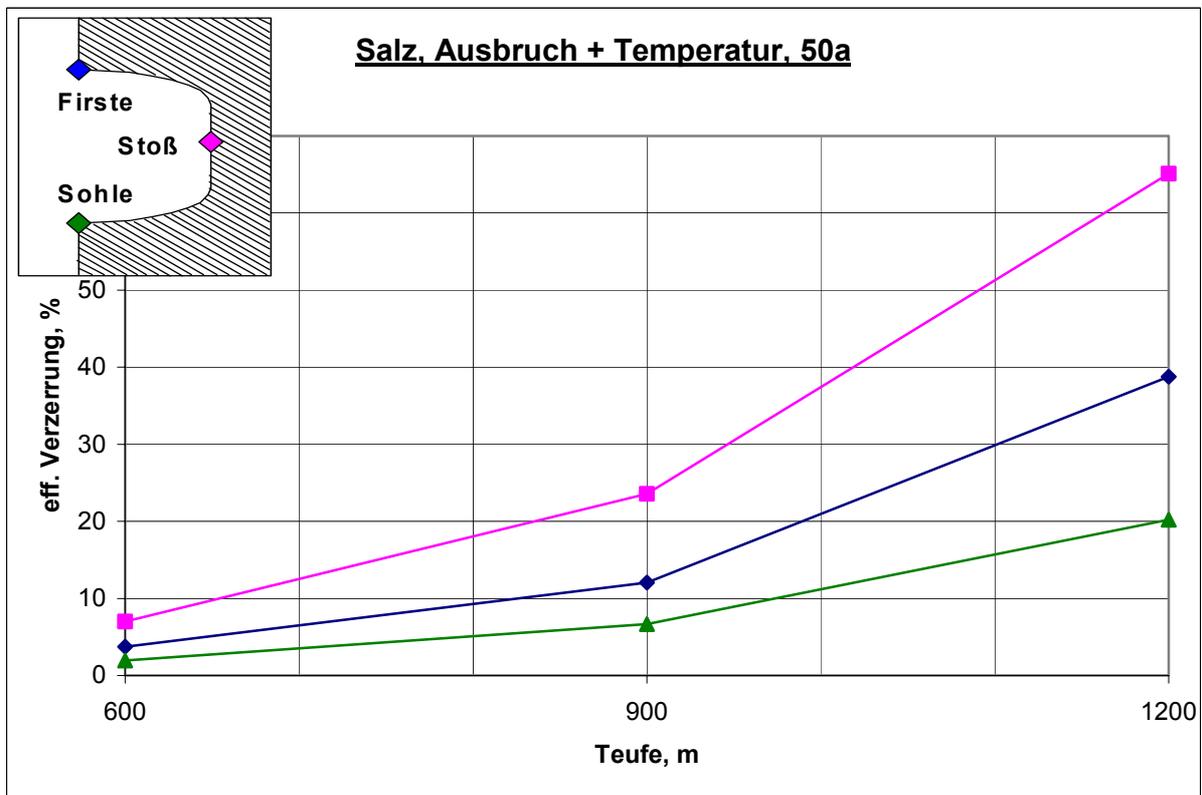


Dilatante Zone: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

Salz, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0=1$ Verformung, Verzerrung

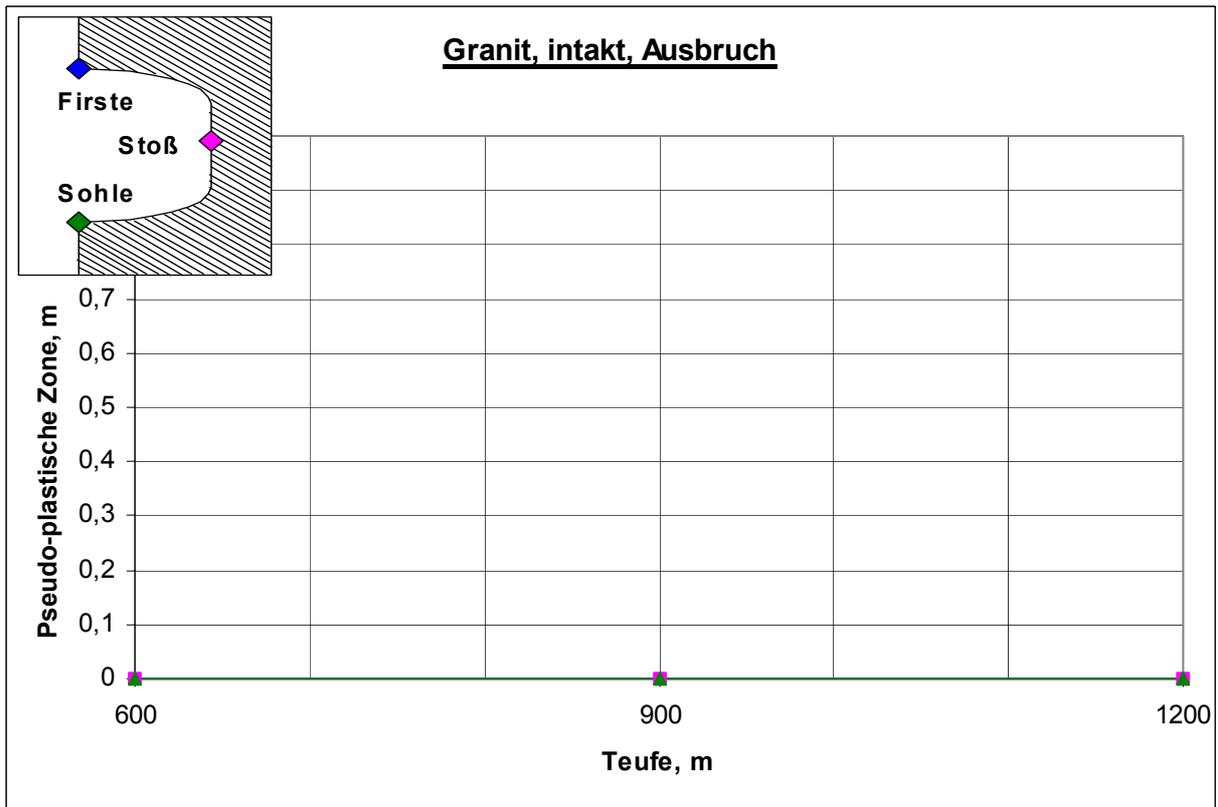


Verformung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

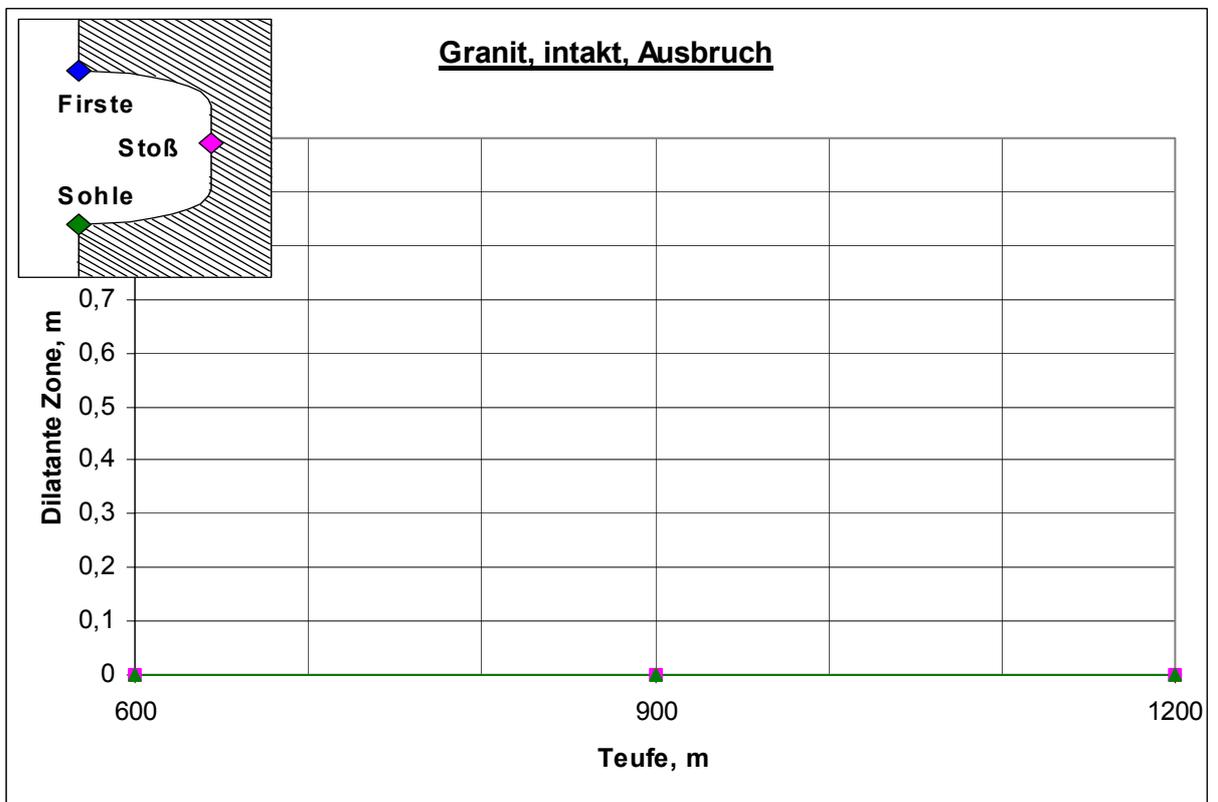


Verzerrung: Teufen 600m – 1200m; $K_0=1$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



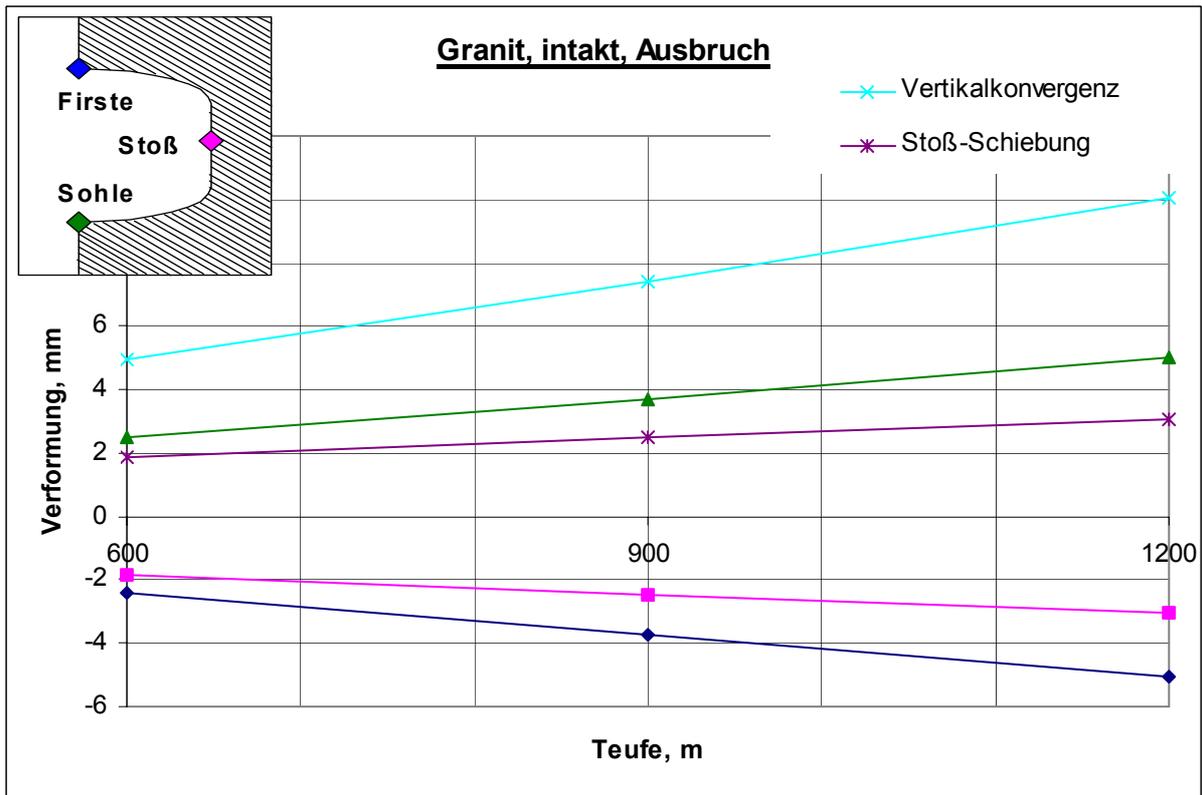
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$



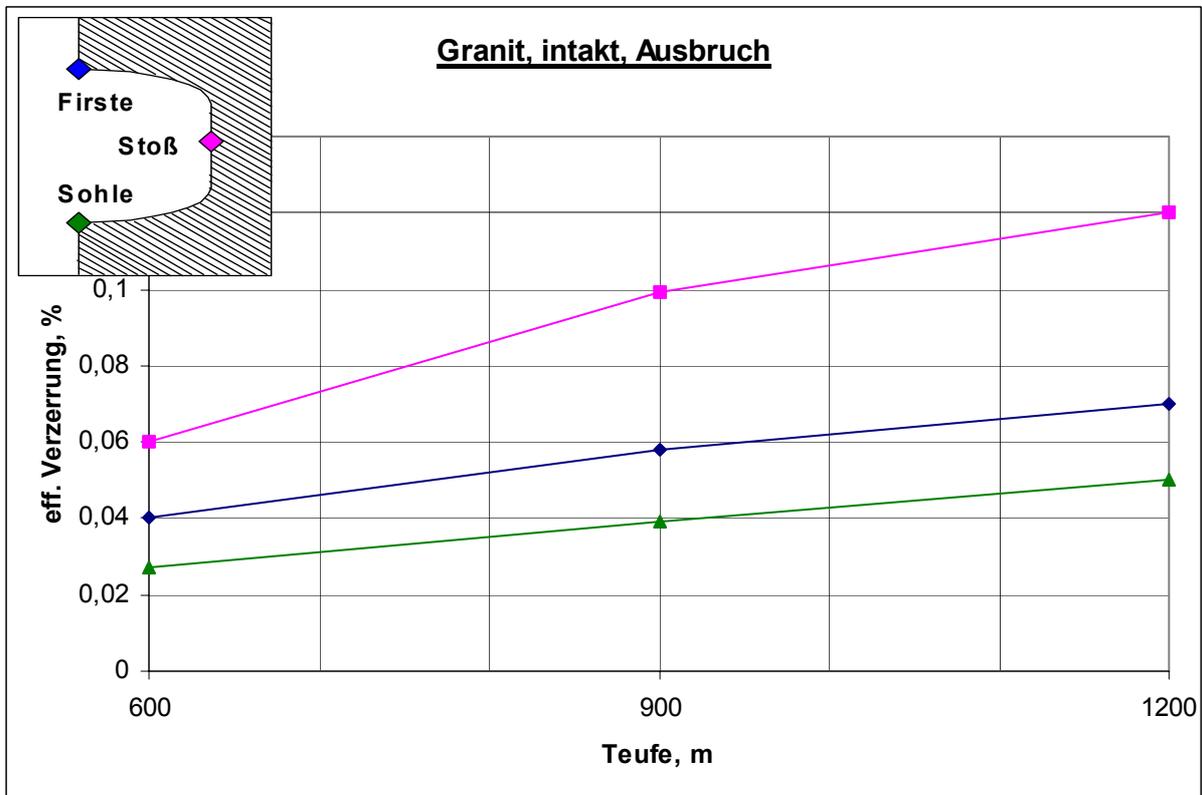
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$

Verformung, Verzerrung

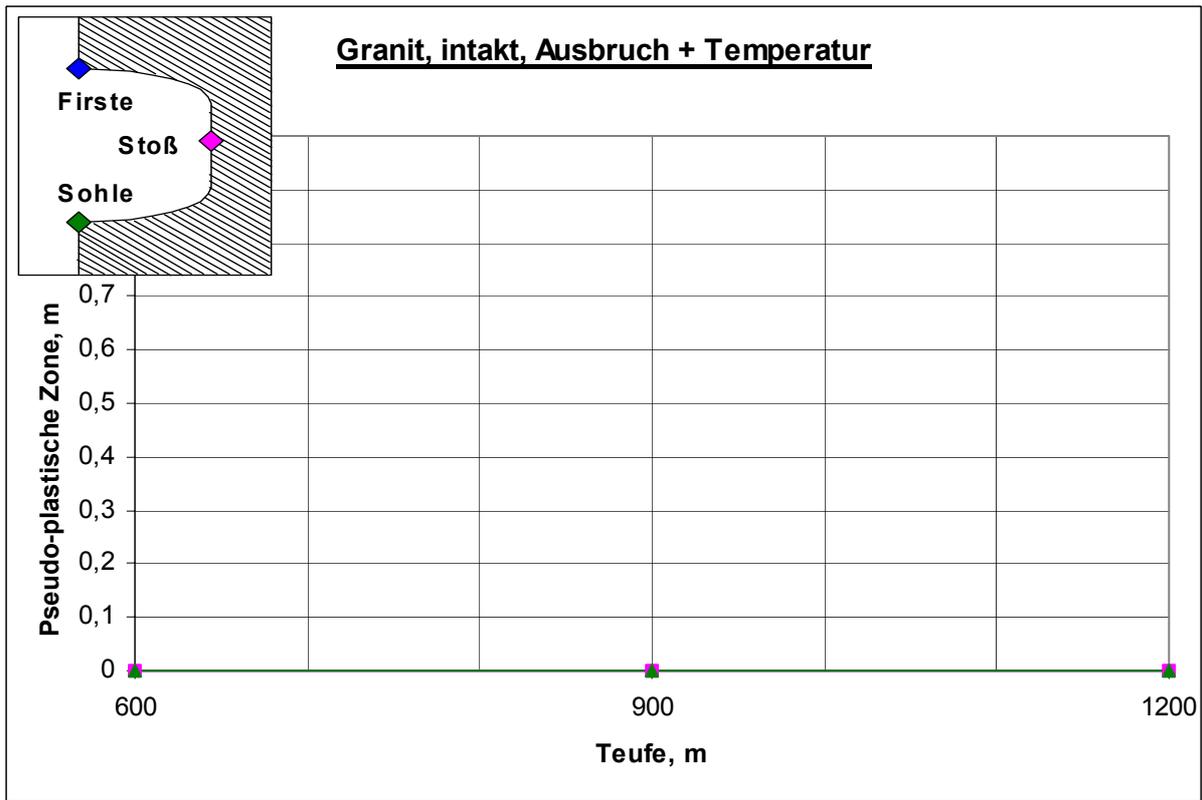


Verformung: : Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

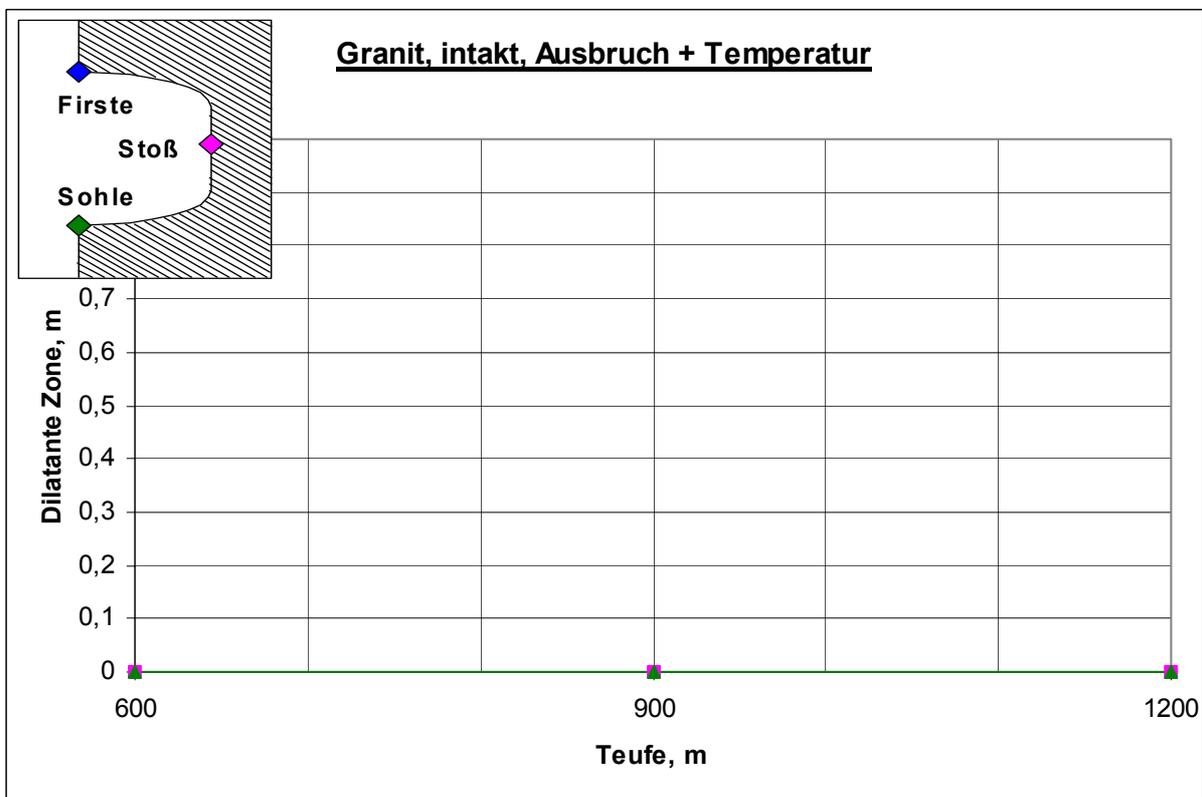


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



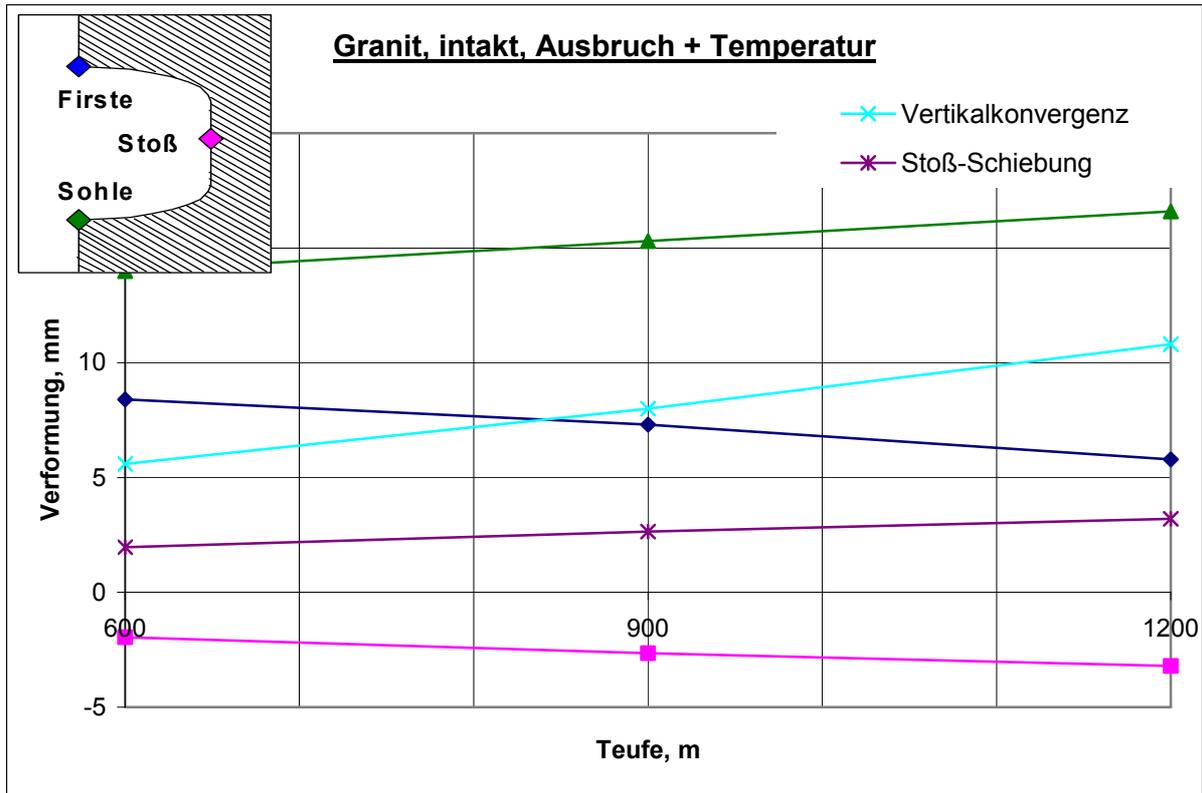
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$



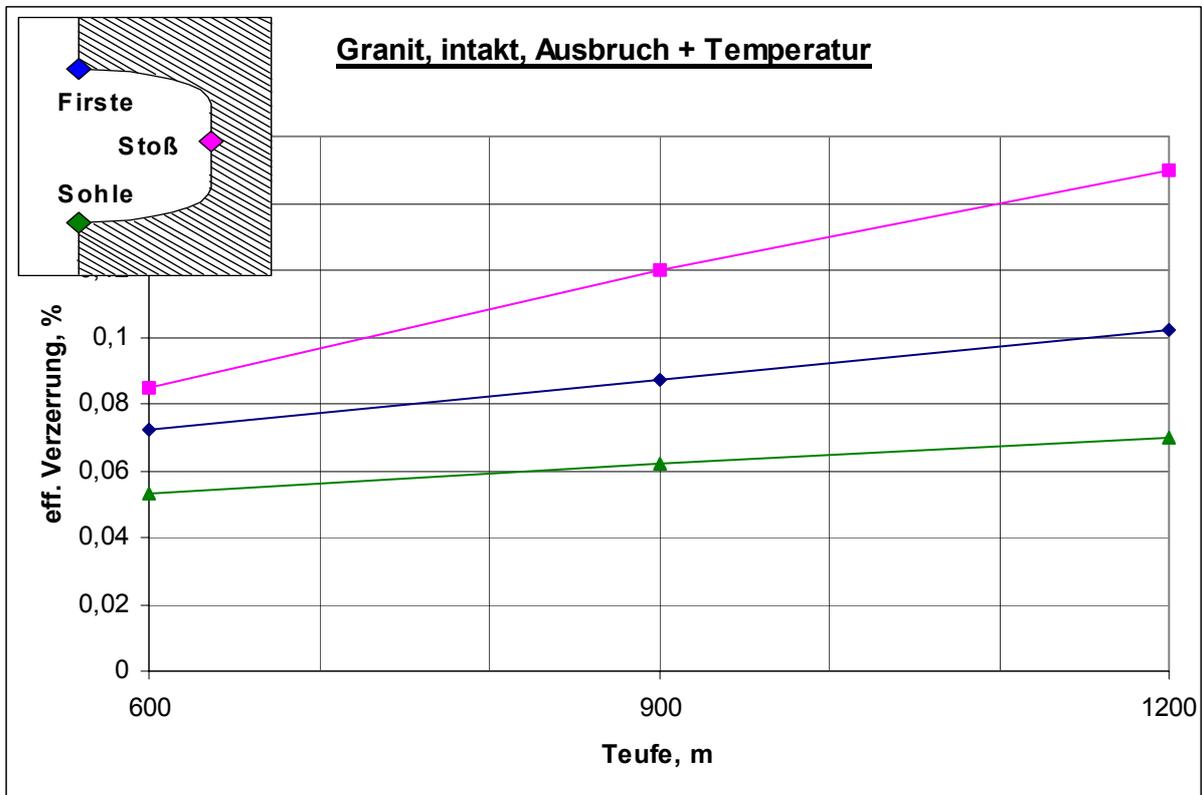
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Granit intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$

Verformung, Verzerrung

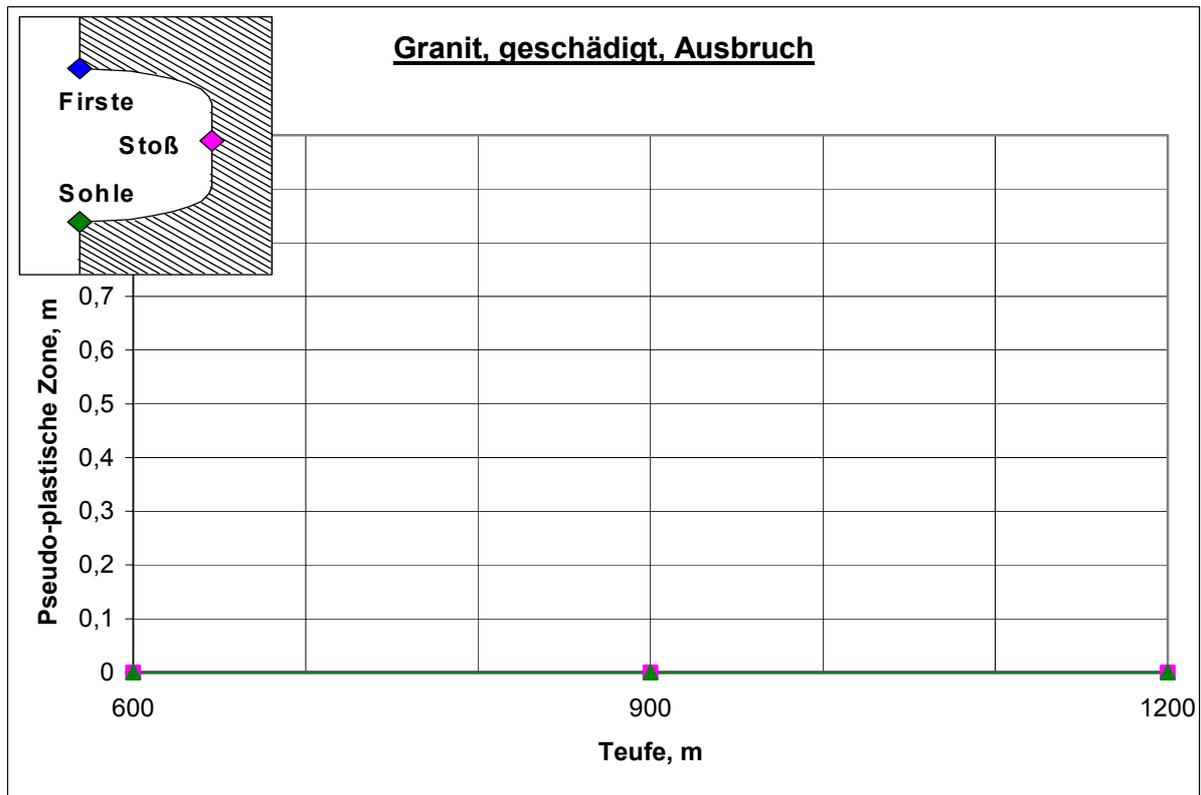


Verformung: : Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

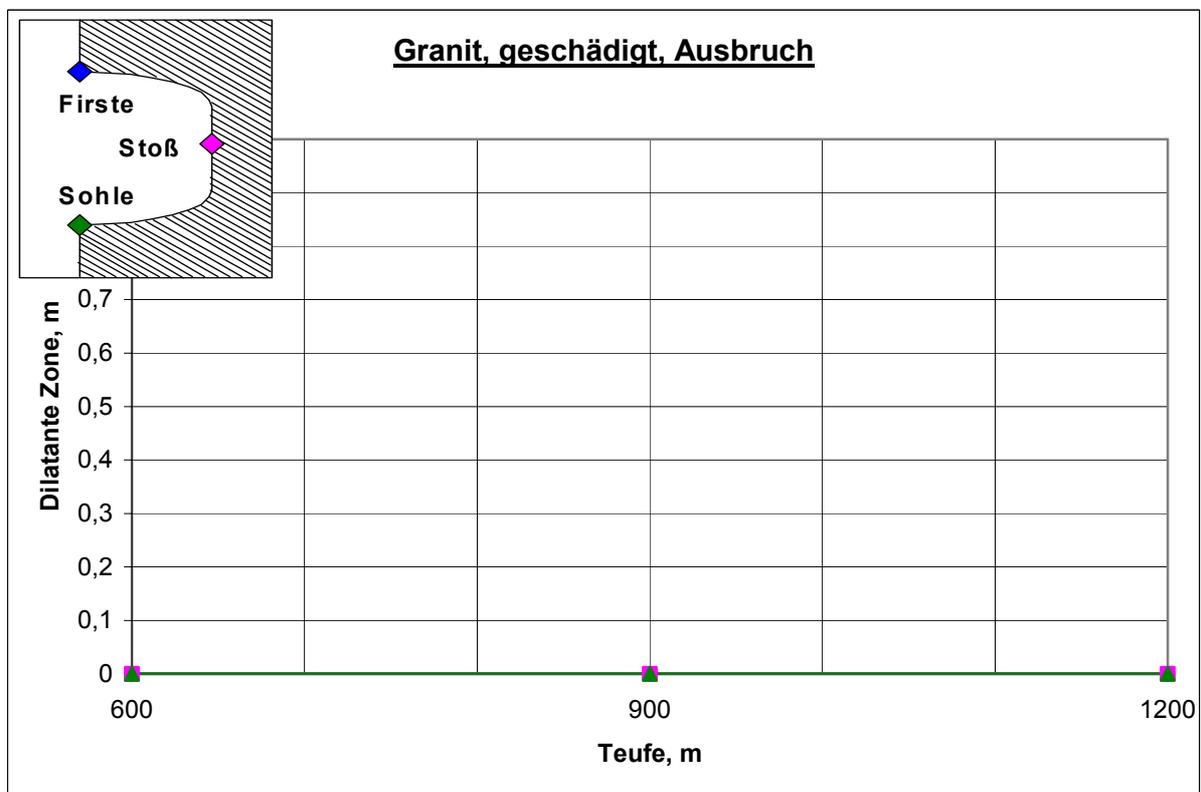


Verzerrung: : Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

**Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone**



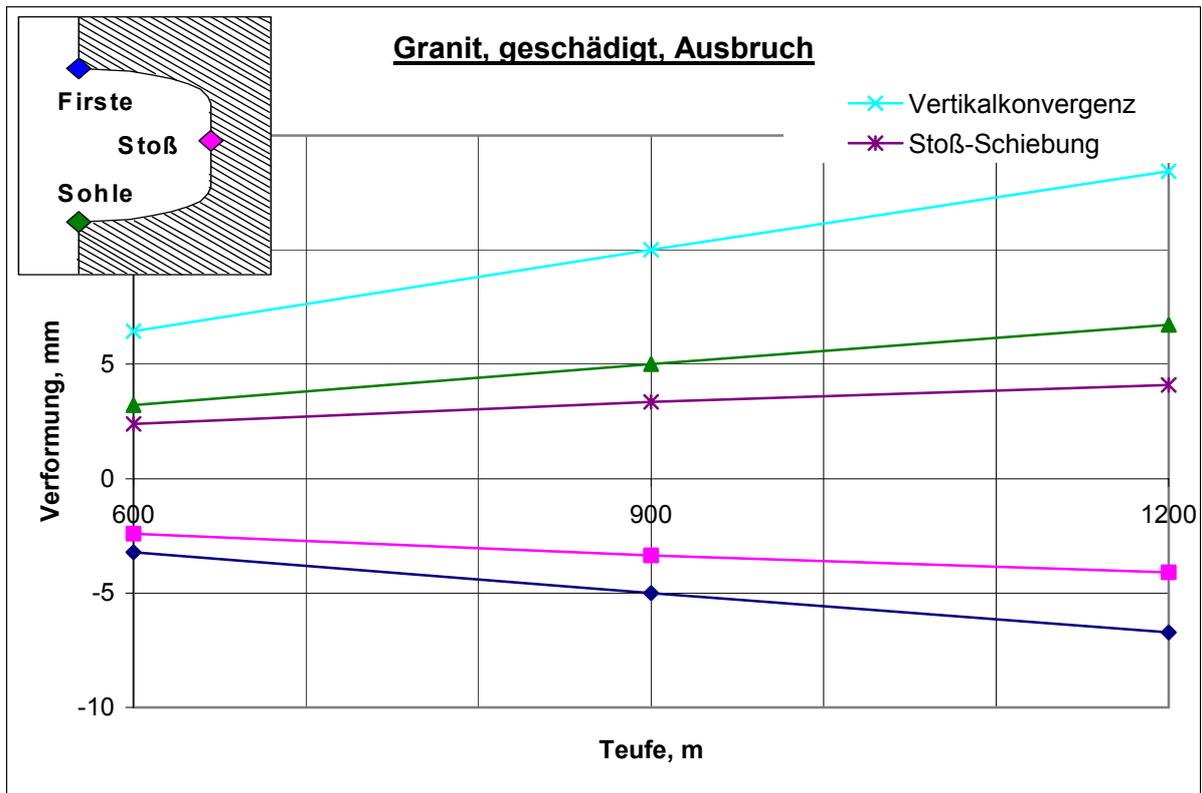
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$



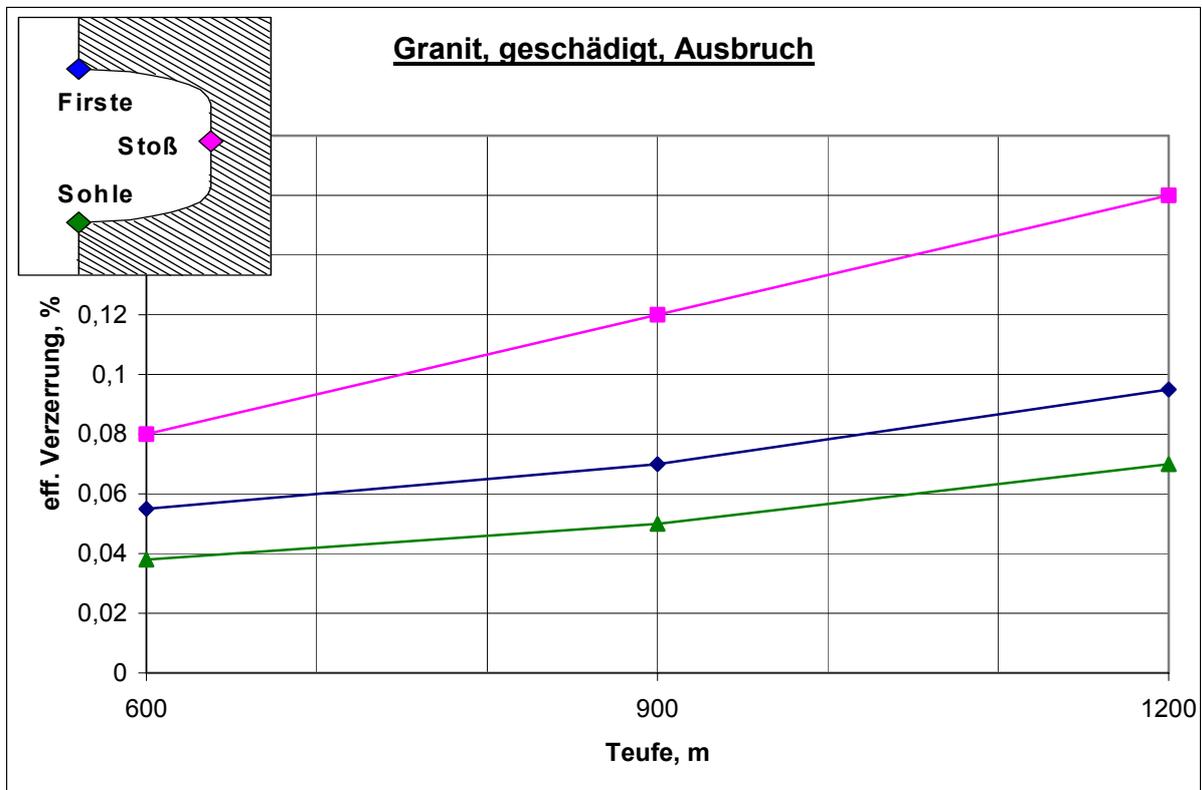
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$

Verformung, Verzerrung

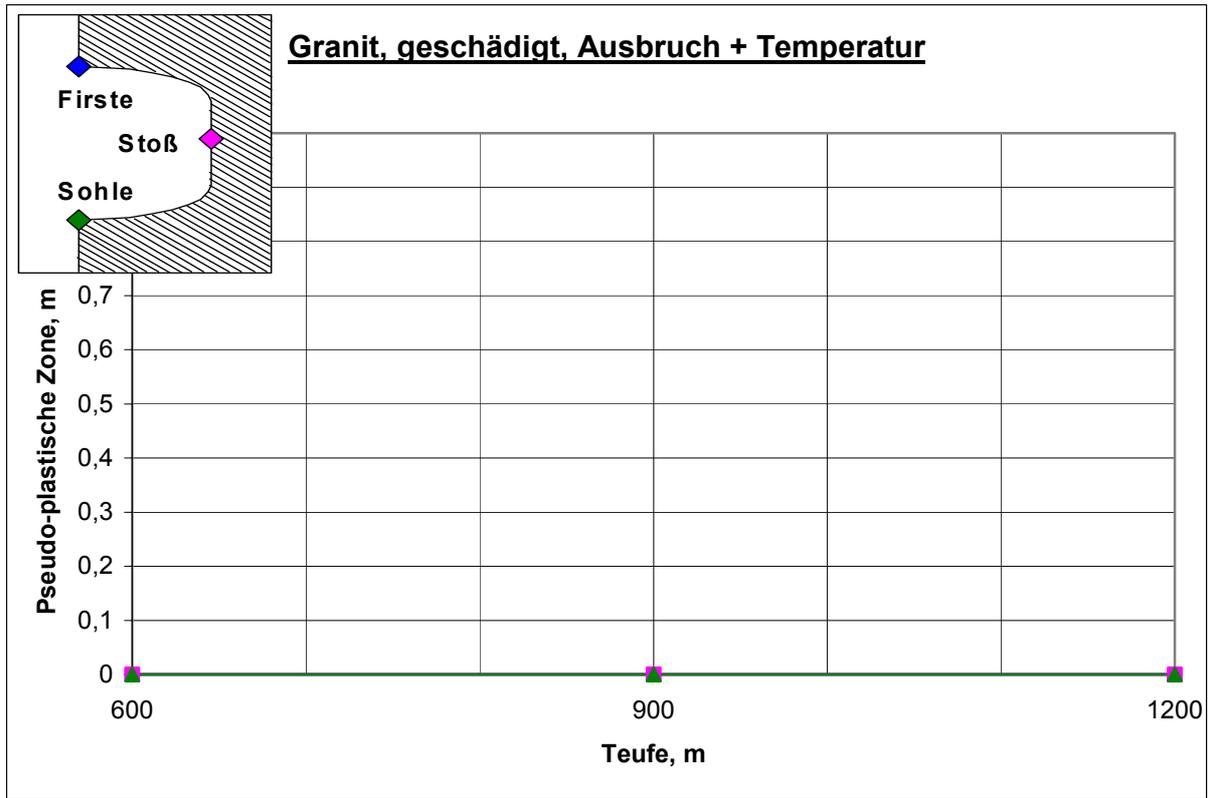


Verformung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

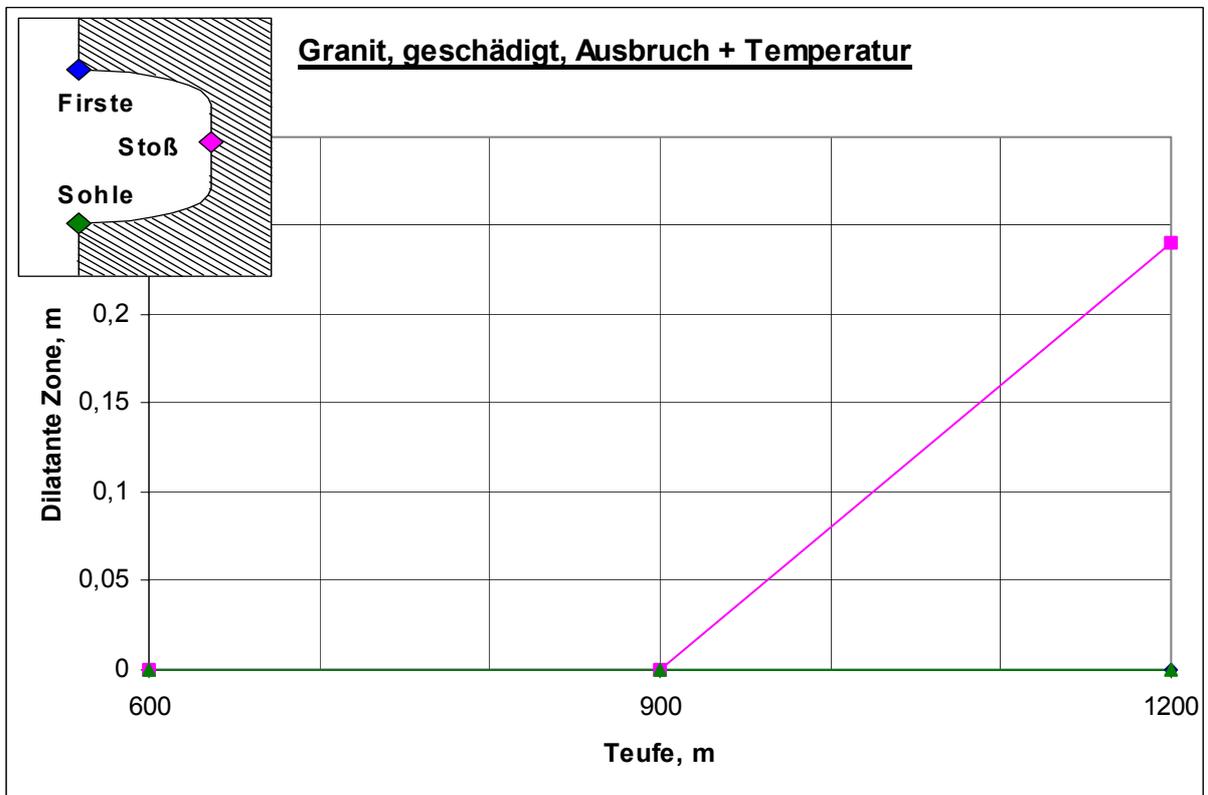


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone



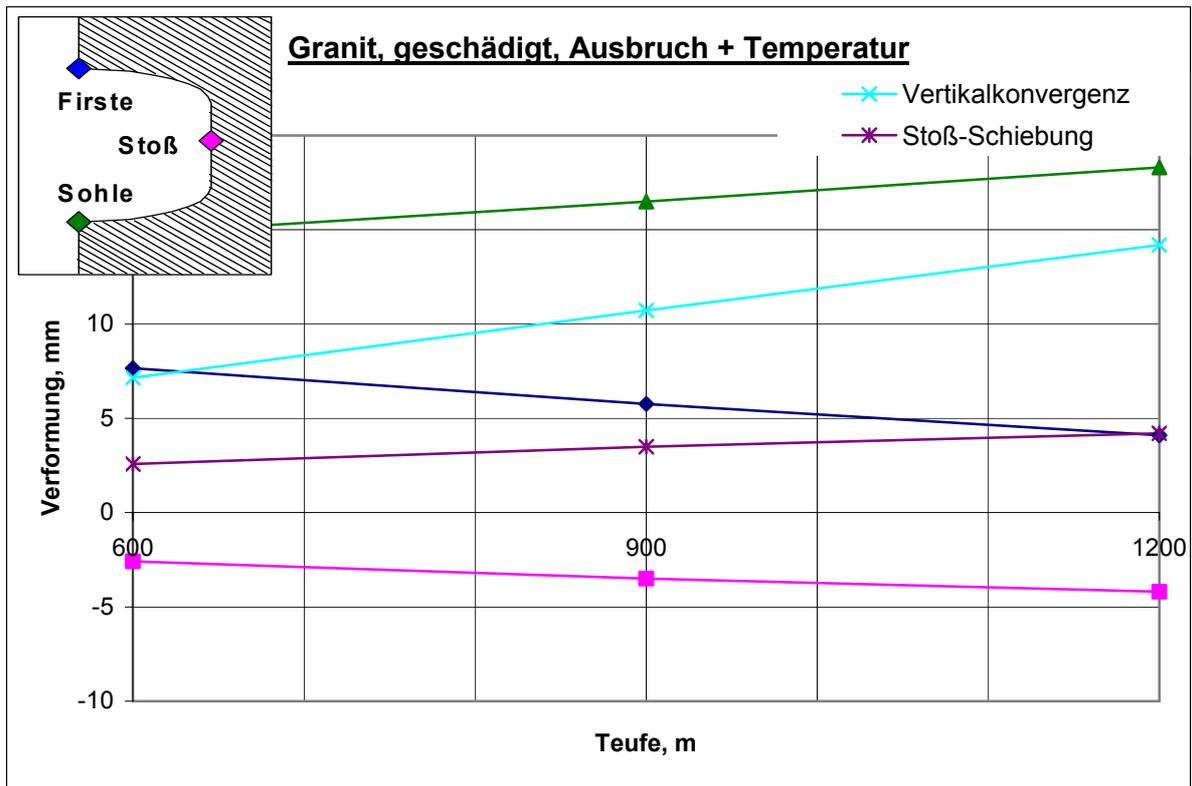
Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$



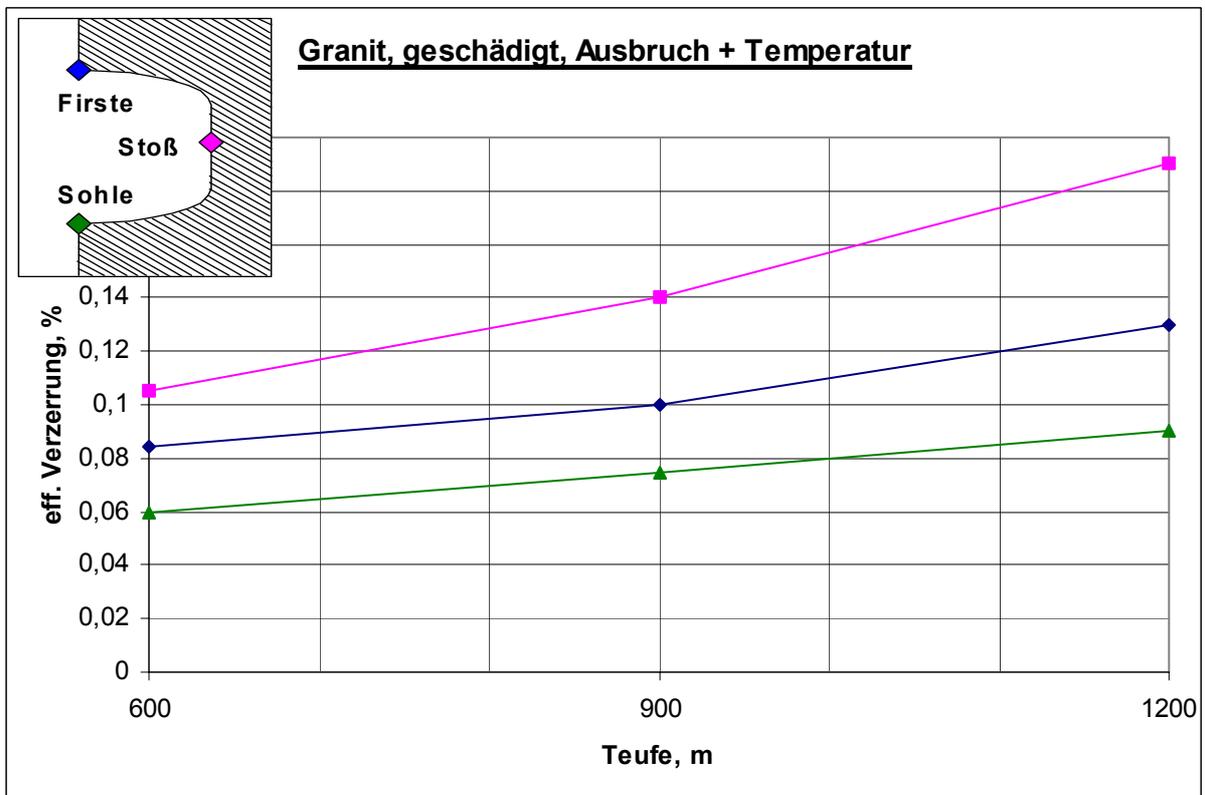
Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Granit geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$

Verformung, Verzerrung

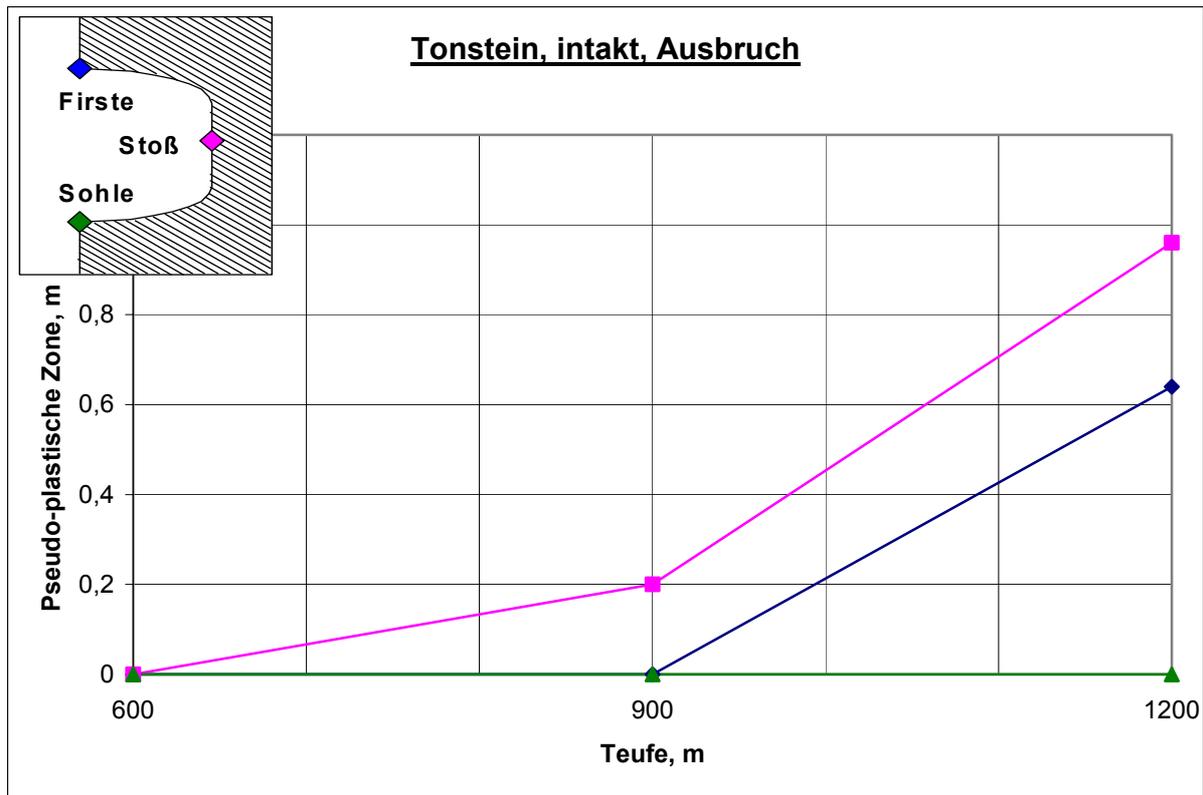


Verformung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

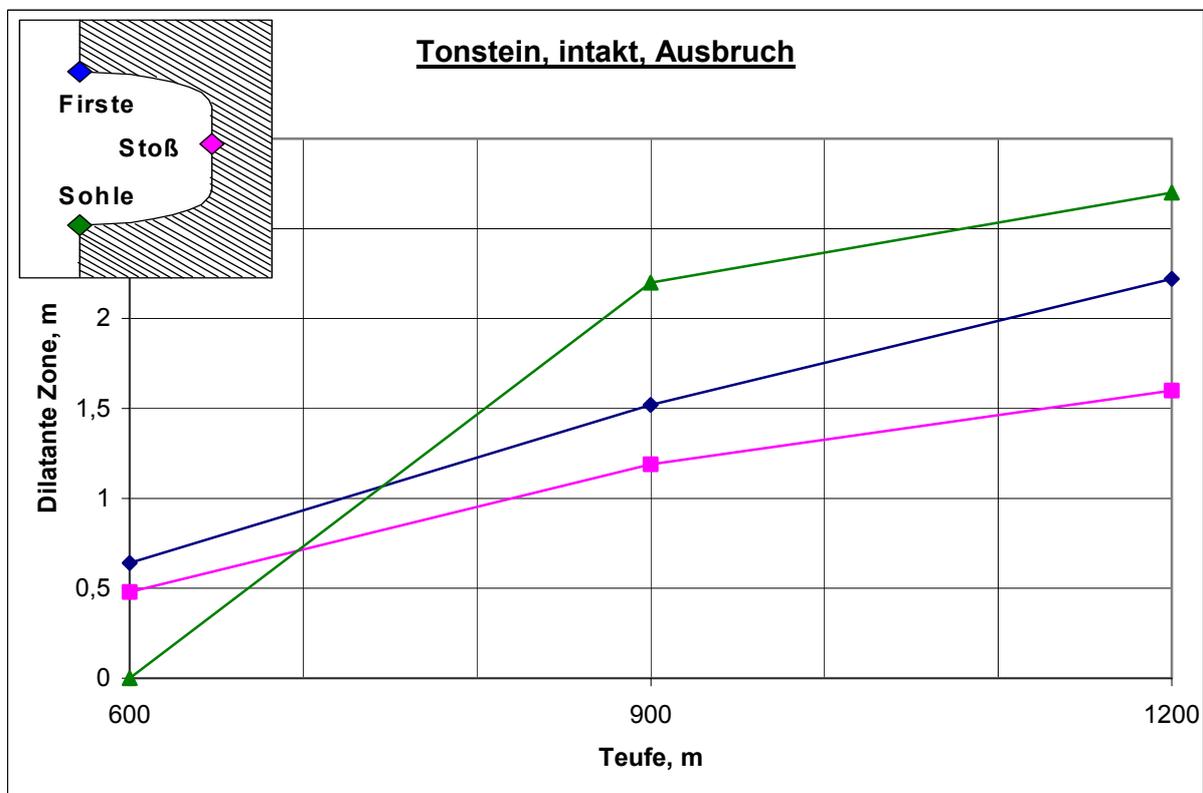


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

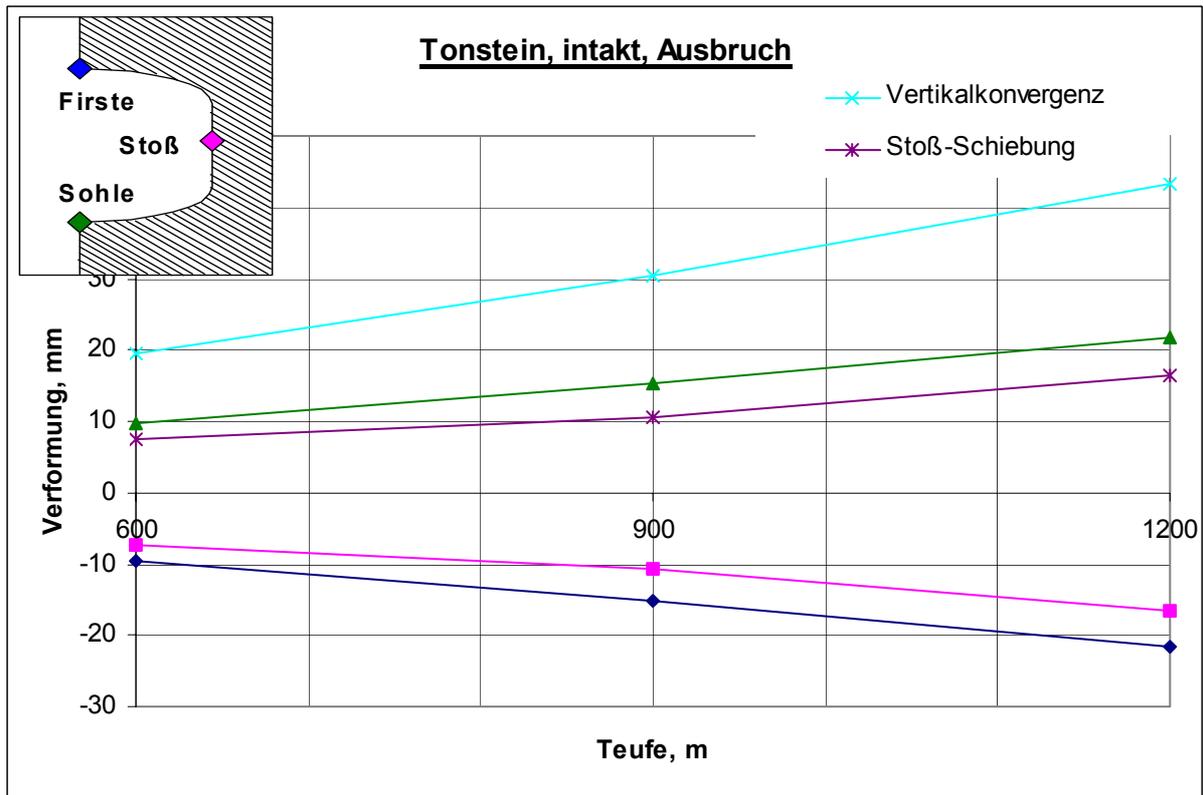


Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

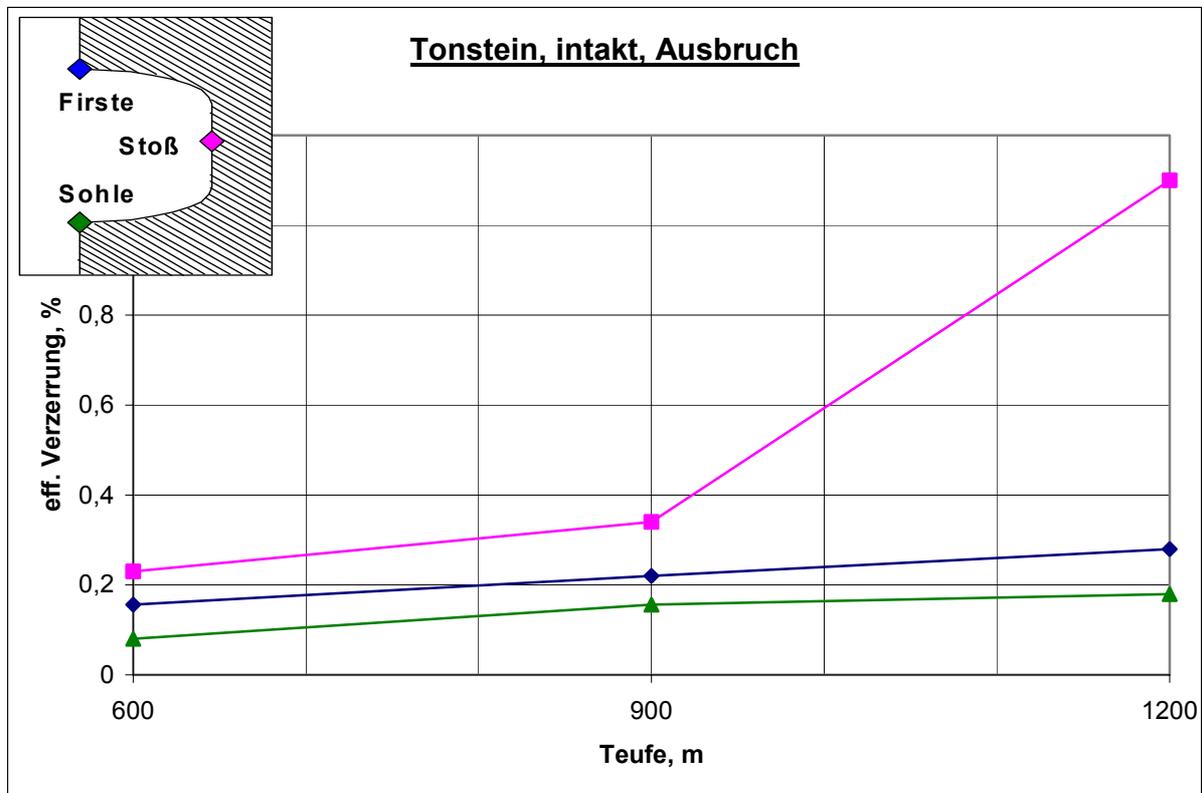


Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$ Verformung, Verzerrung

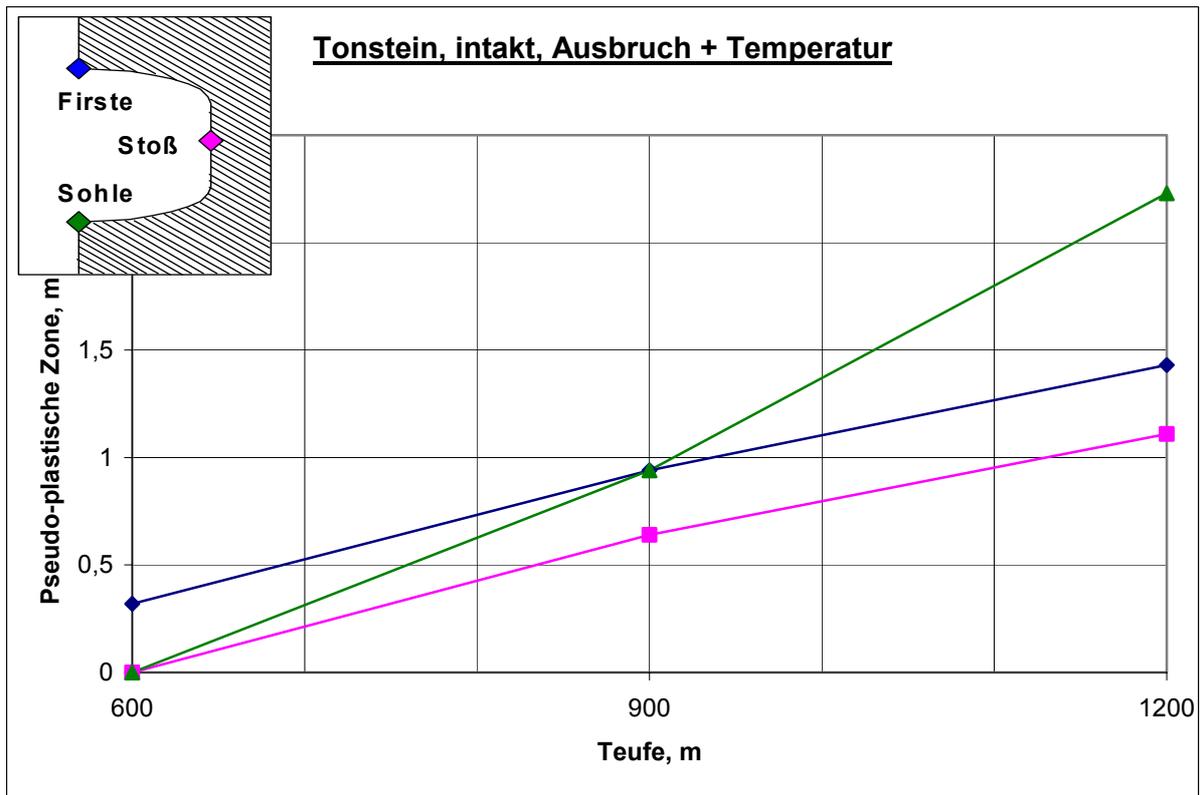


Verformung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

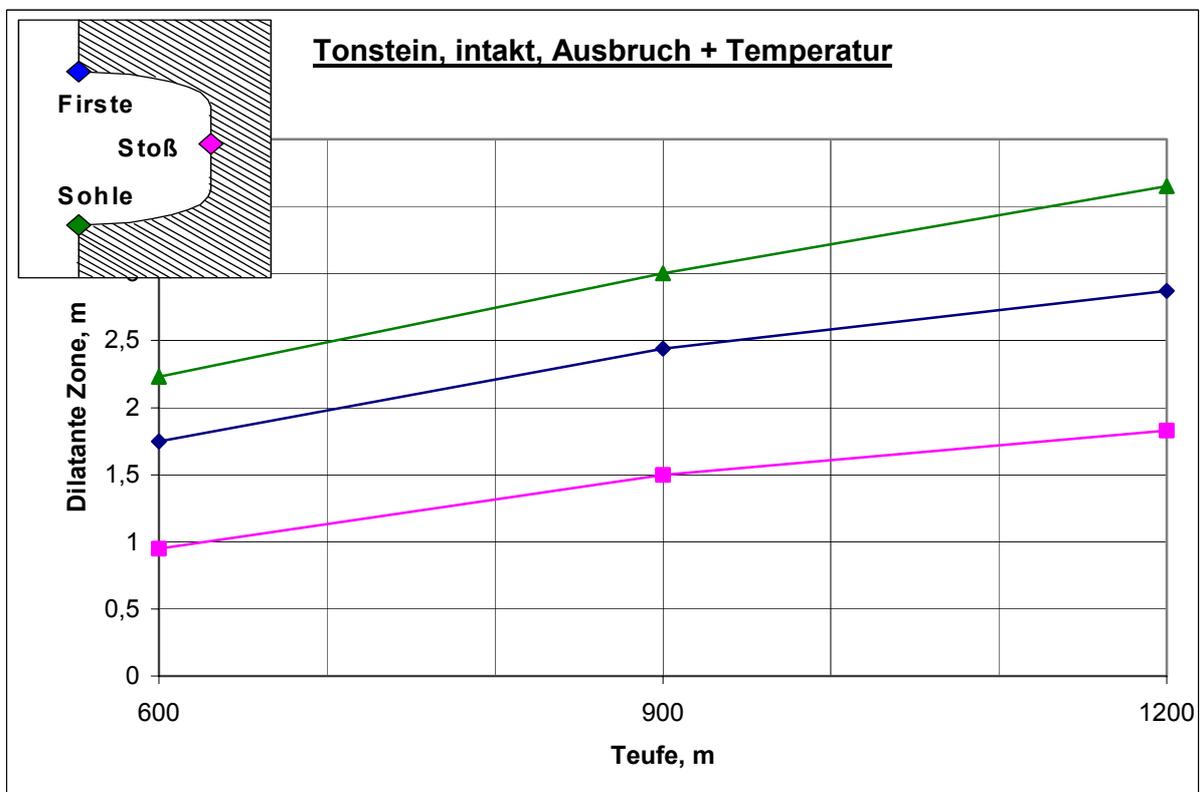


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$
pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

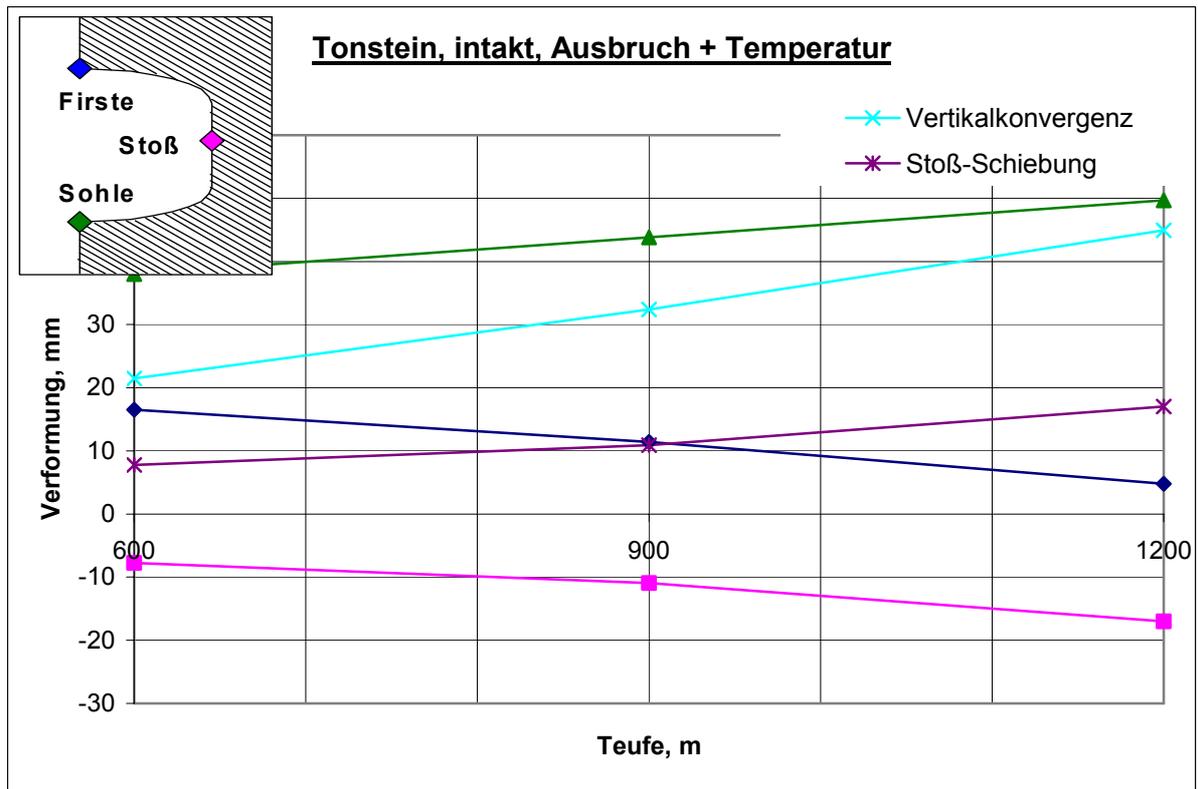


Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

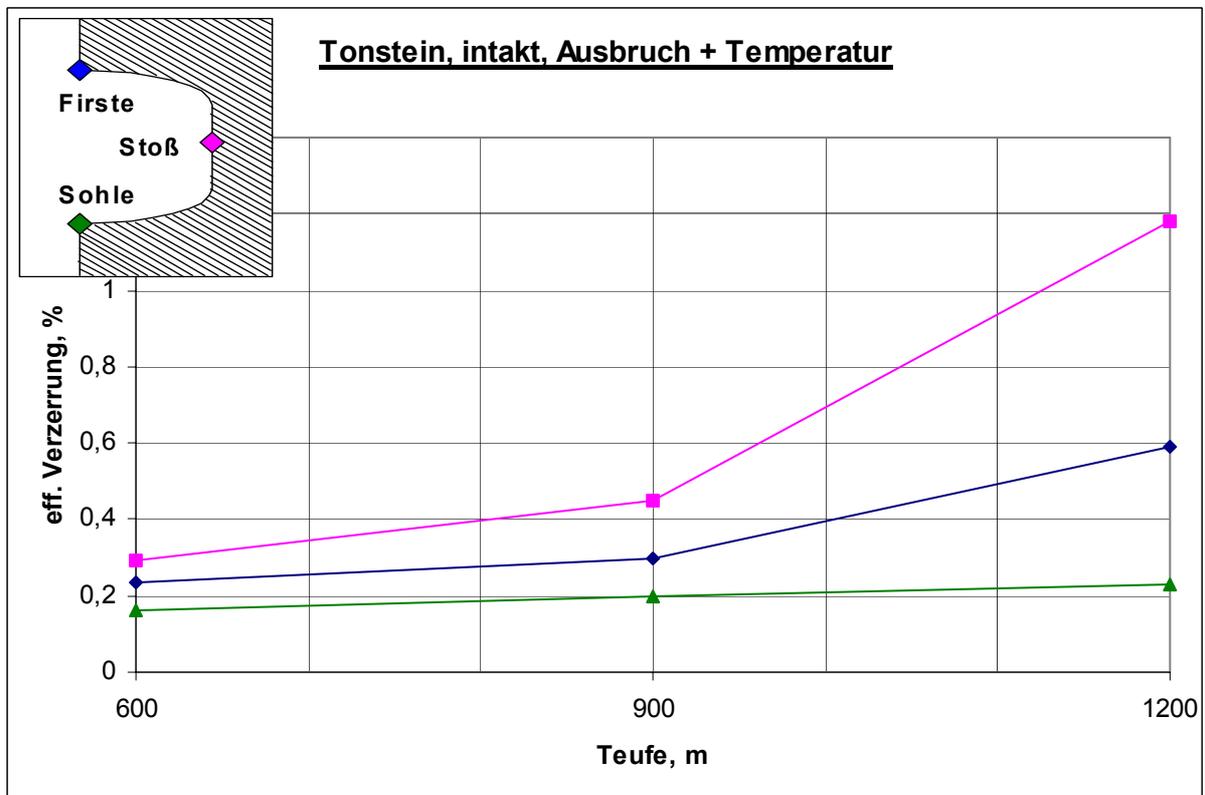


Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein intakt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$ Verformung, Verzerrung

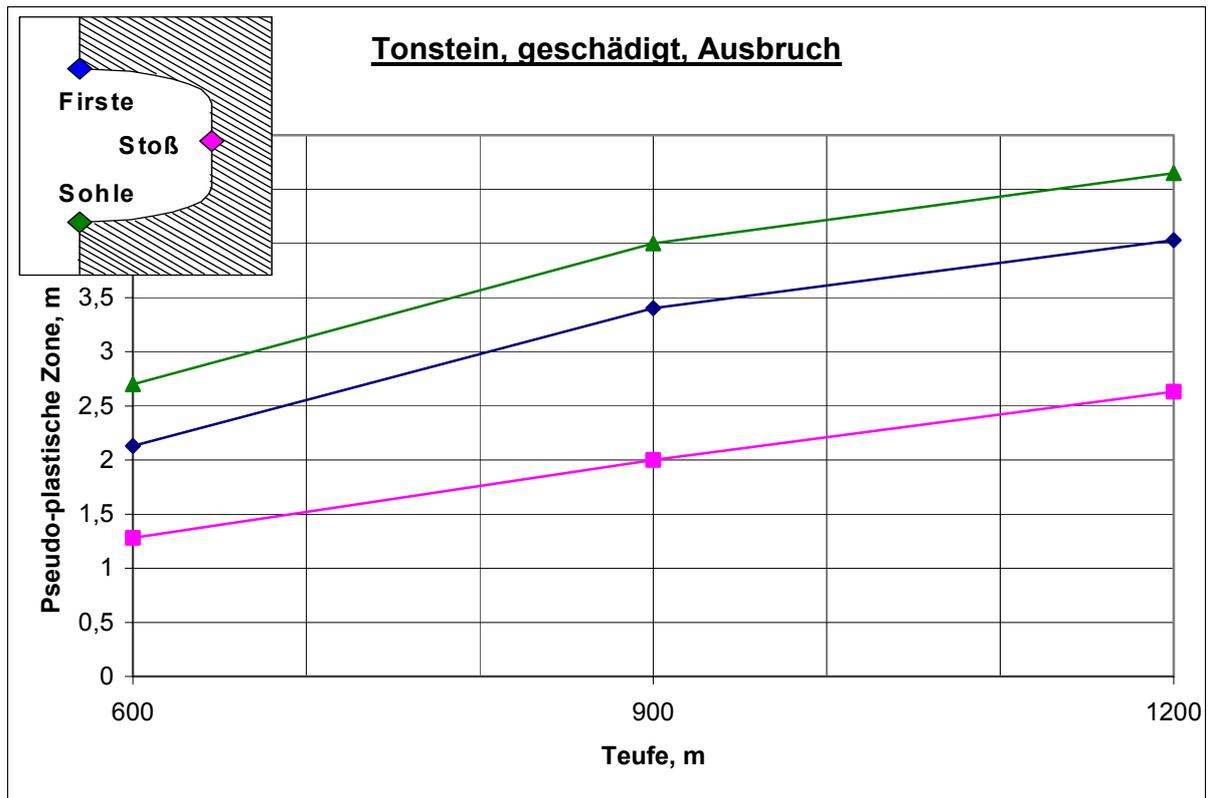


Verformung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

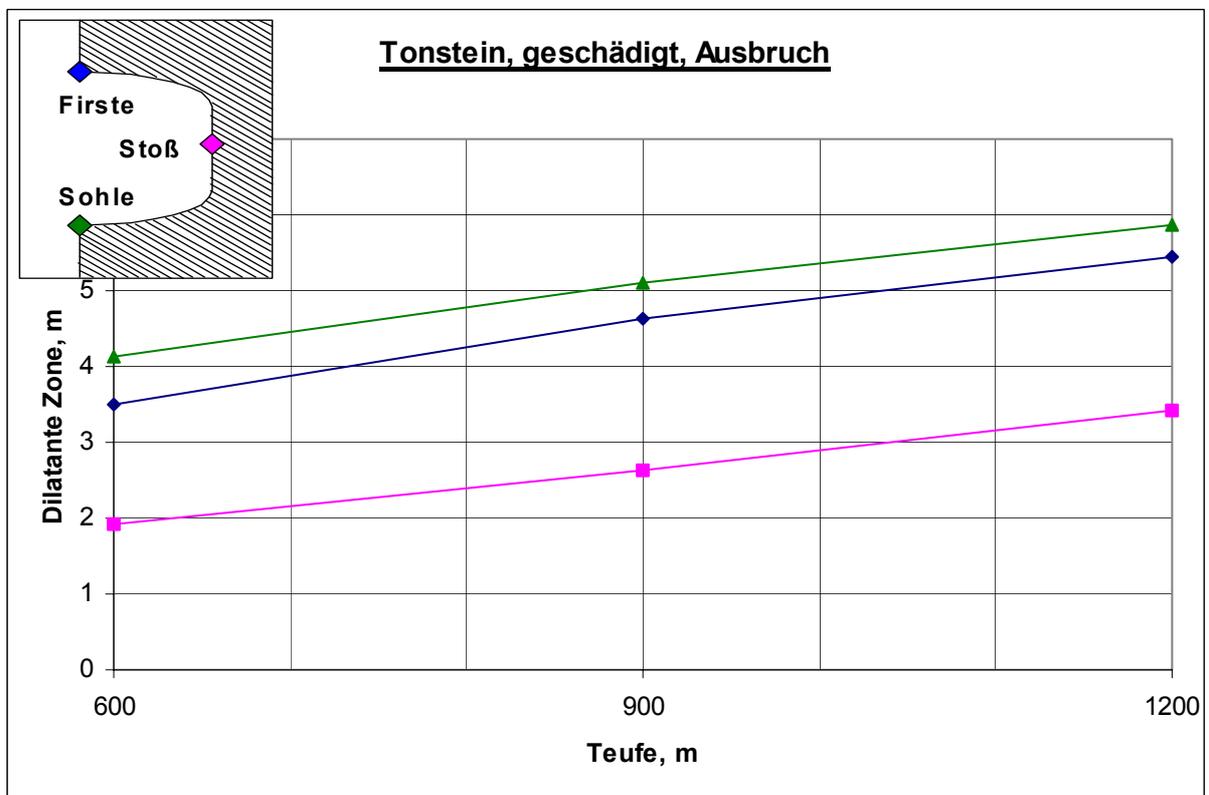


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$ pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

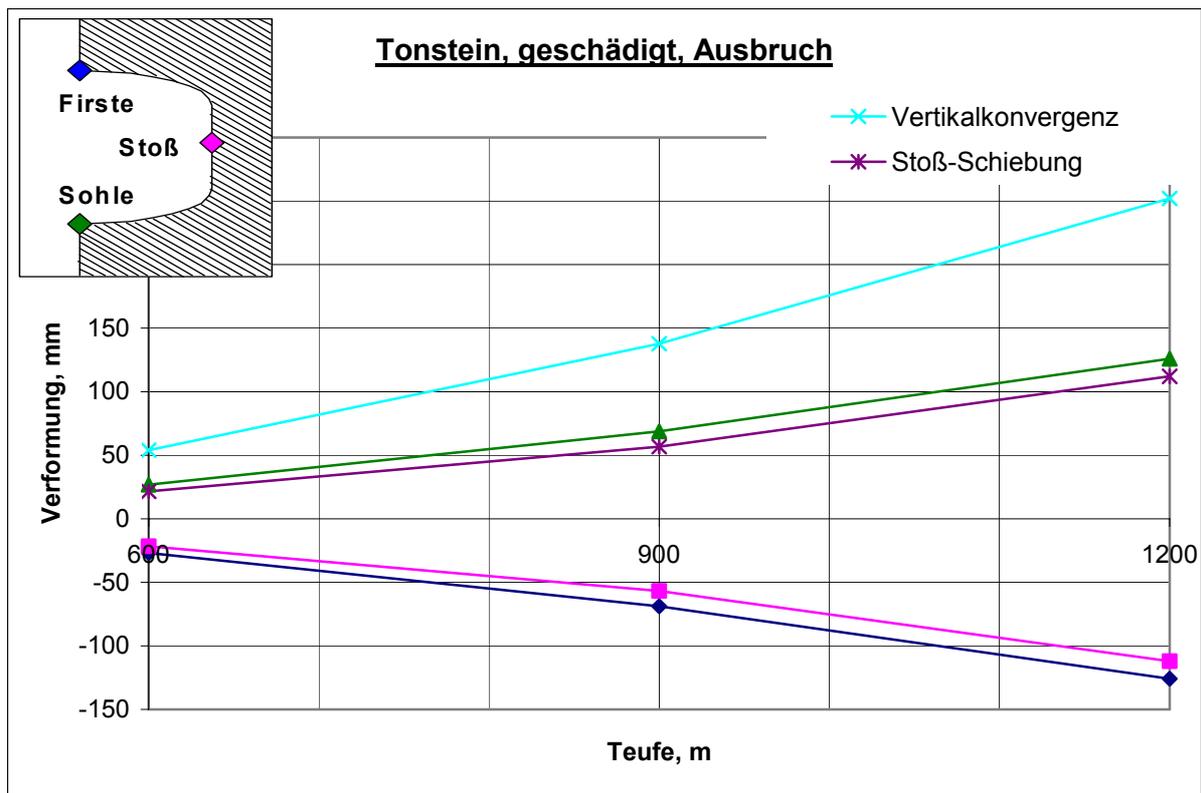


Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

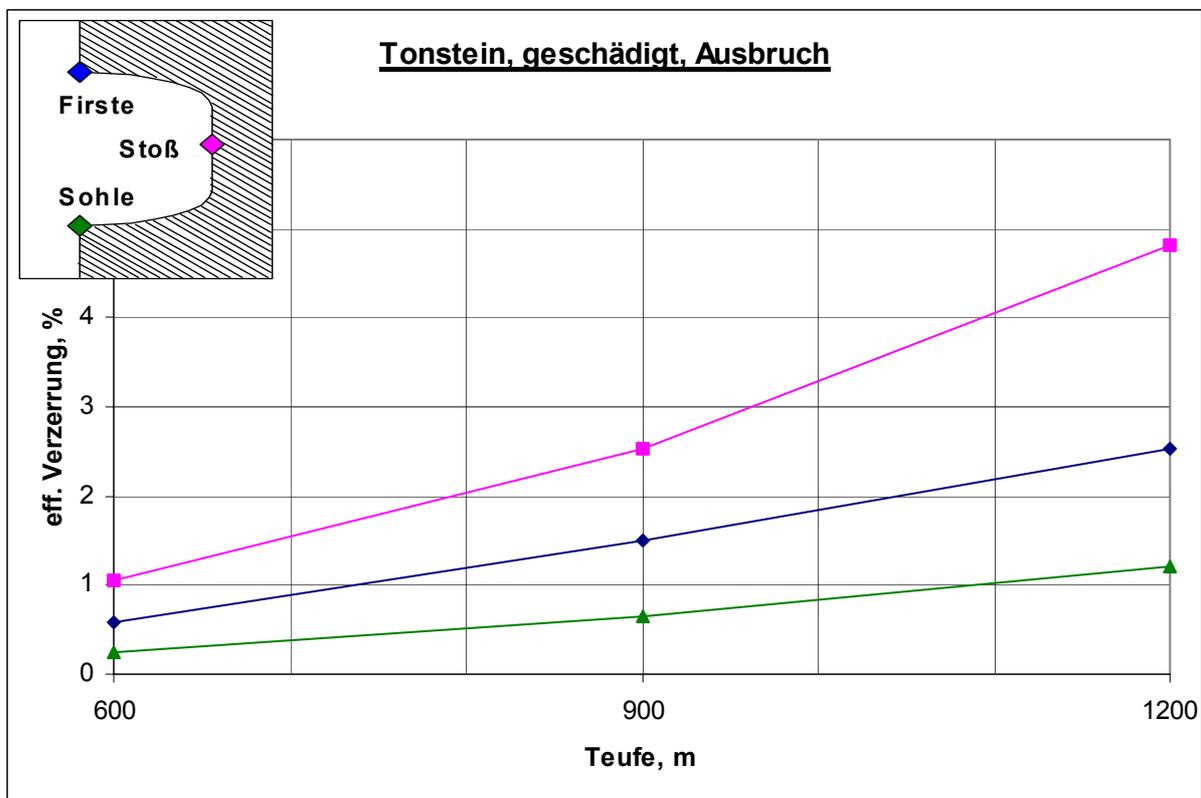


Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$ Verformung, Verzerrung

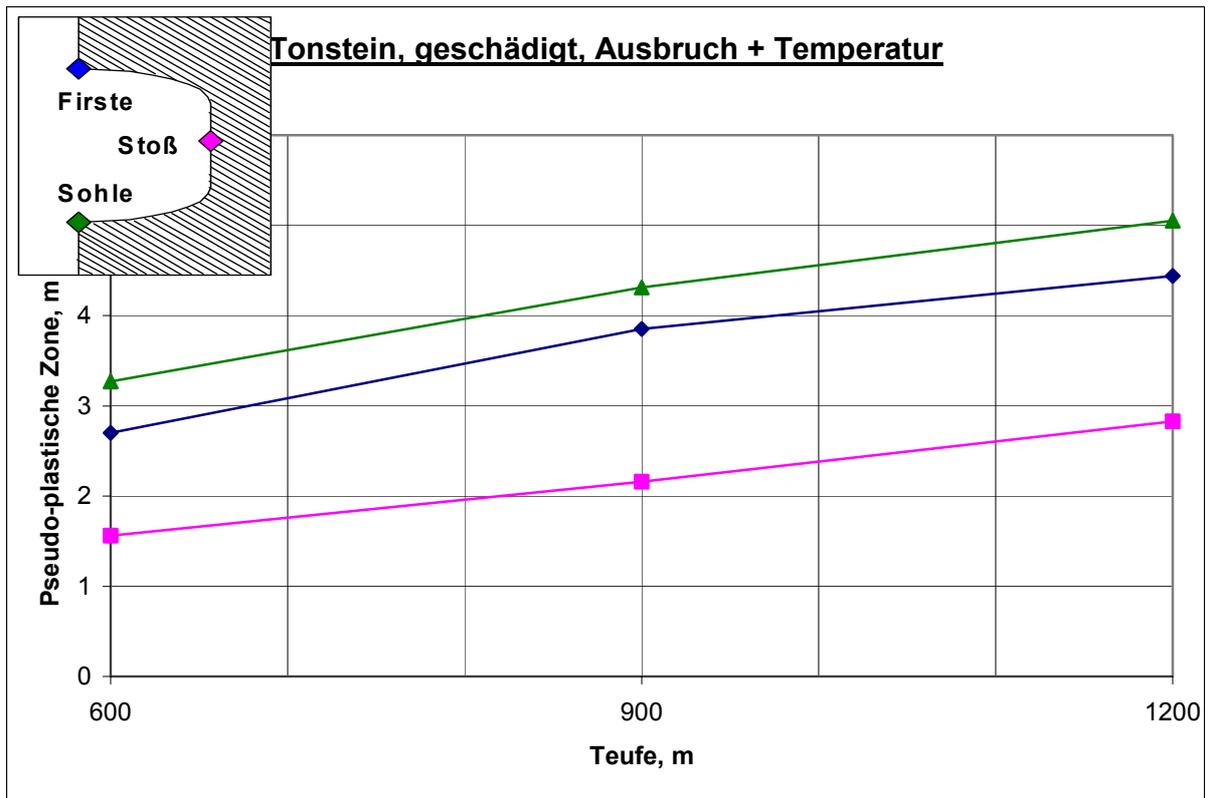


Verformung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

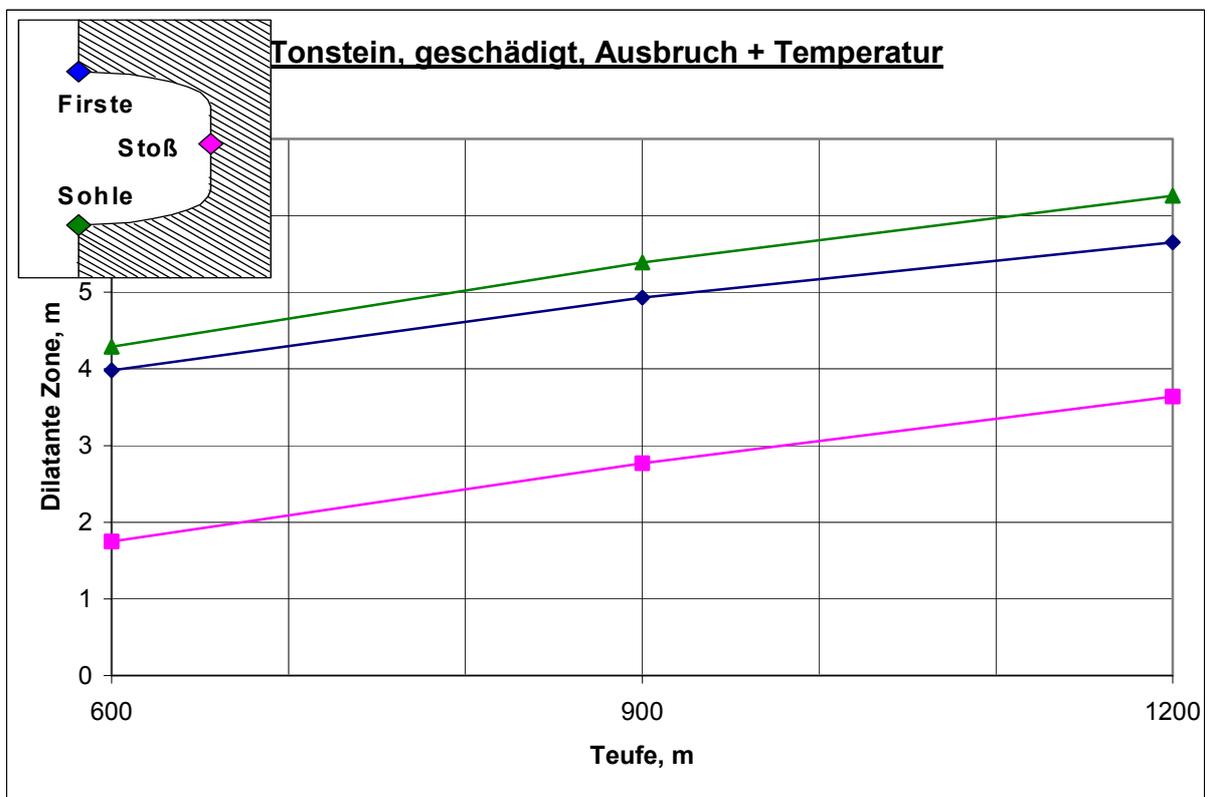


Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$ pseudo-plastische Zone, dilatante Zone

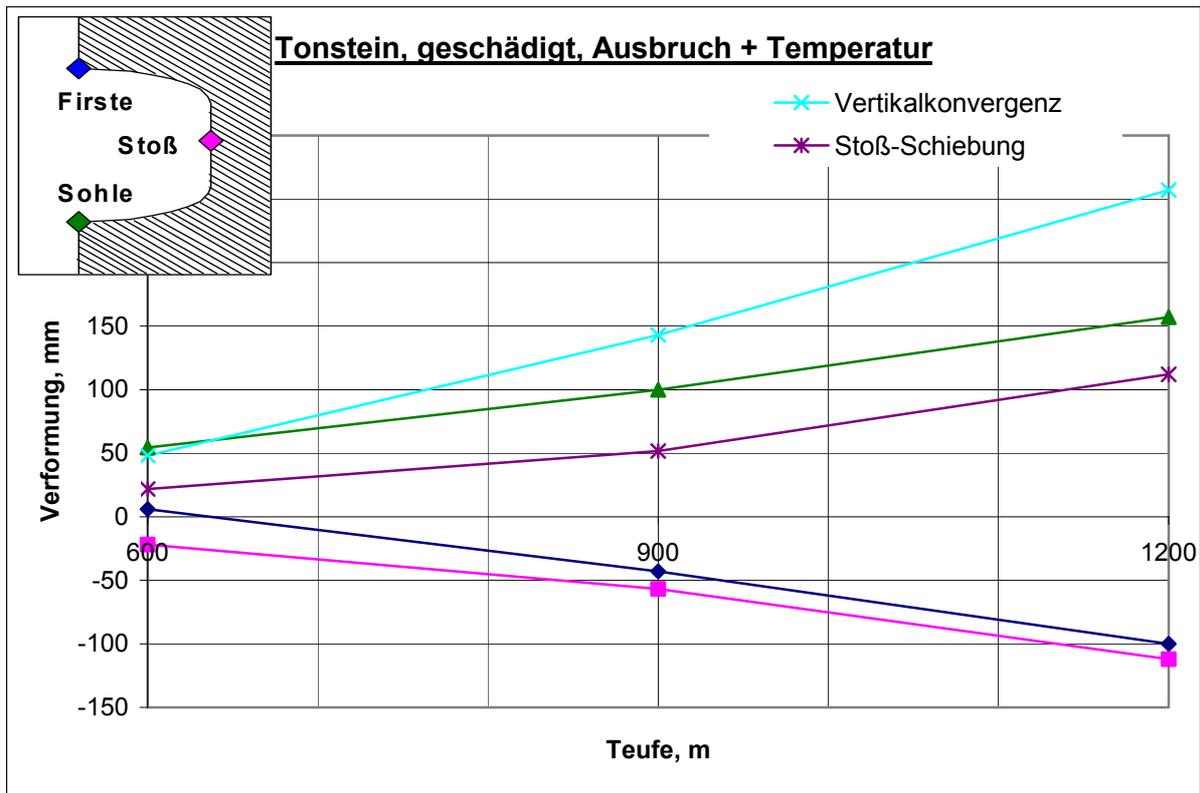


Pseudo-plastische Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

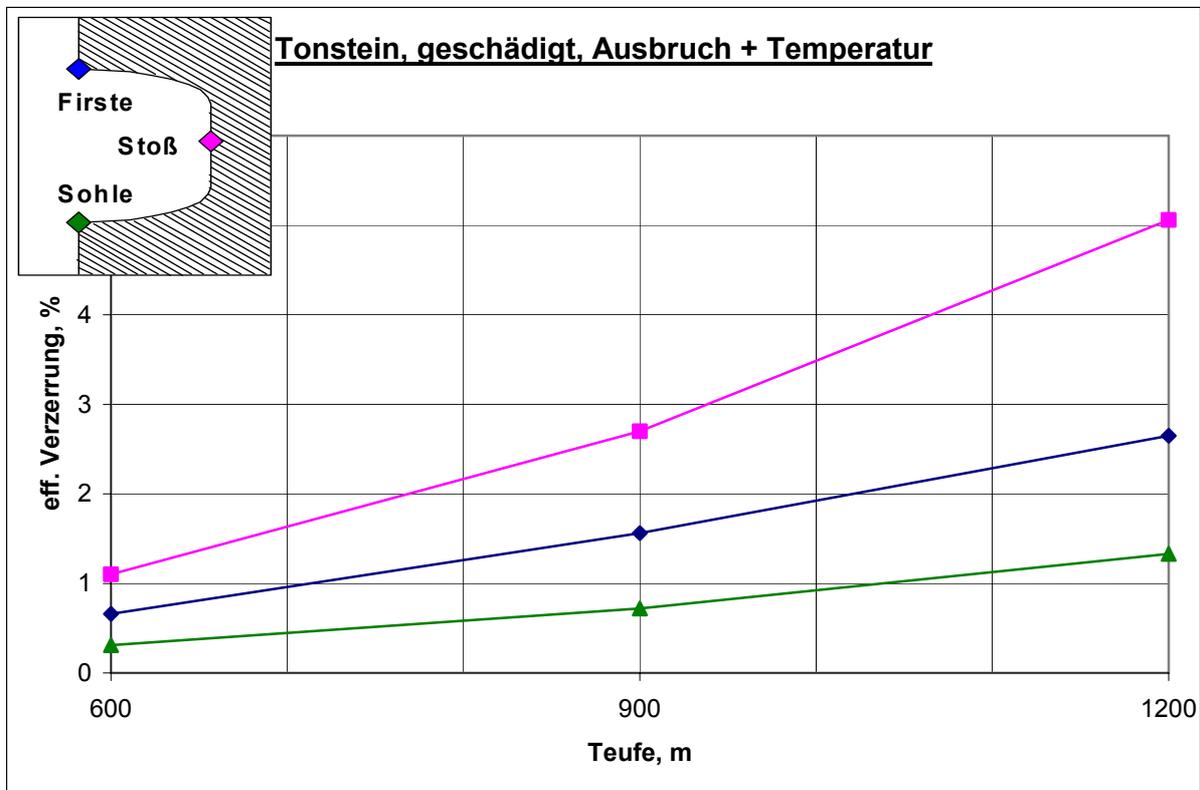


Dilatante Zone: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$

Tonstein geschädigt, Teufe 600m, 900m, 1200m, $K_0 > 1$ Verformung, Verzerrung



Verformung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$



Verzerrung: Teufe 600m, $K_0=1,225$; Teufe 900m, $K_0=1,15$; Teufe 1200m, $K_0=1,075$