

Trennbruchversagen von Festgesteinen unter triaxialen Spannungsbedingungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III
Institut für Geowissenschaften
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Herrn Enrico Bauch

geb. am: 18.06.74 in: Halle (Saale)

Gutachterin bzw. Gutachter:

1. Prof. Dr. habil. Ch. Lempp
2. Prof. Dr.-Ing. B. Fröhlich

verteidigt am 26.11.2007

Vorwort

Die Untersuchungen zum Trennbruchversagen von Festgesteinen waren Gegenstand meiner dankenswerter Weise vom Land Sachsen-Anhalt ermöglichten Forschungsarbeit am Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg – zunächst als Stipendiat der Graduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt und hiernach während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe Ingenieurgeologie.

Für die Initiierung, wissenschaftliche Betreuung und Unterstützung dieses Forschungsprojekts sowie für die fachlichen Hinweise und Anregungen bin ich Herrn Prof. Dr. habil. Ch. Lempp zu besonderem Dank verpflichtet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Fröhlich danke ich herzlichst für das entgegengebrachte Interesse an der Fragestellung und für die Übernahme der Zweitbegutachtung meiner Dissertation sowie die hilfreichen fachlichen Ratschläge.

Mein persönlicher Dank gilt zudem allen Beschäftigten inkl. Doktoranden, Diplomanden und studentischen HiWis der Fachgruppe Ingenieurgeologie, des Instituts für Geowissenschaften sowie den „Externen“, die mir bei der Realisierung der vorliegenden Dissertation durch ihre kollegiale und freundschaftliche Unterstützung auf die eine oder andere Weise hilfreich zur Seite standen. Nicht zuletzt verdanke ich meinen Freunden und meiner Familie Rückhalt und Bestärkung in meinem Streben.

Zusammenfassung

Das Anlegen eines untertägigen Hohlraums, wie z. B. der Vortrieb eines Tunnels oder das Abteufen einer Bohrung, führt zu komplexen, wechselhaften Spannungsbedingungen im umgebenden Gebirge infolge der Auffahrung. Im Konturbereich des untertägigen Hohlraums kommt dabei dem Spannungsregime Extension aufgrund der Reduzierung des Spannungsanteils normal zur freien Oberfläche besondere Bedeutung zu. Die damit im Zusammenhang stehenden Brucherscheinungen der Festgesteine sind häufig von Trennbruchversagen geprägt. Im Rahmen geotechnischer Bewertungen erfolgt die Prognose der Tragfähigkeit des Gebirges hinsichtlich des Bruchversagens gewöhnlich auf der Basis der Mohr-Coulombschen Festigkeitshypothese oder vergleichbarer Bruchkriterien, welche im Druckspannungsbereich die maximal aufnehmbaren Schubspannungen bis zum Eintreten des Scherbruchversagens definieren. Im Sprödbereich sind allerdings generell zwei verschiedene Bruchmechanismen bzw. Bruchtypen zu unterscheiden: Trennbruch- und Scherbruchversagen. Diesbezüglich existieren eine Reihe aktueller Problemstellungen des ingenieurmäßigen oder bergmännischen Untertagebaus. Den diesen Aspekt berücksichtigenden theoretischen Konzepten stehen bislang nur wenige verfügbare experimentelle Belege gegenüber, was auf die hohen versuchstechnischen Anforderungen an realitätsnahe Untersuchungen, d. h. unter allseitiger Beanspruchung, zurückzuführen ist.

Daher steht im Focus der hier vorgestellten laborativ-experimentellen Untersuchungen die Frage nach den kontrollierenden Bedingungen des Trennbruchversagens, um basierend auf diesen Ergebnissen die Relation zwischen beiden konträren Bruchtypen analysieren zu können. Hinsichtlich der einerseits geforderten triaxialen Spannungsbedingungen und andererseits angestrebten vergleichenden Betrachtung der divergierenden Versagensmechanismen verfolgt die vorliegende Arbeit das Konzept, dass diesem Anspruch sog. Triaxialversuche an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern am besten gerecht werden. In Abhängigkeit der Spannungsgeometrie bzw. Deformationsrichtung lassen sich Extensions- und Kompressionsbeanspruchung getrennt realisieren, wobei Trennbruchversagen insbesondere mit dem Extensionsregime verknüpft ist. In Anbetracht der eingeschränkten experimentellen Vorkenntnisse wurde eine kompositionelle und strukturelle Komparabilität der verwendeten klastischen Gesteinsserien gewählt, um eine Differenzierung gesteinspezifischer Einflussfaktoren auf die Trennbruch-Bedingungen zu ermöglichen. Zudem wurden exemplarisch magmatische Gesteinsvertreter involviert.

Die hier gewonnenen Untersuchungsergebnisse an insgesamt fünf klastischen und drei magmatischen Lithotypen zeigen, dass innerhalb dieses lithologischen Spektrums in der Spannungsgeometrie Extension prinzipiell bevorzugt Trennbrüche entstehen, während der

Kompressionsfall grundsätzlich mit Scherbruchversagen einhergeht. Überdies kann im triaxialen Extensionsversuch vereinzelt ein räumliches Nebeneinander in synchroner Entstehung von Trenn- und Scherbrüchen beobachtet werden. Die Trennbruchfestigkeiten liegen je nach Bezugsebene im Bereich oder sogar oberhalb der Bruchspannungen des Scherbruchversagens im Kompressionsfall. Darüber hinaus widersprechen die hier vorgestellten Resultate einer generellen Korrelation zwischen den standardisierten laborativen Festigkeitsparametern im Kompressions- und indirekten Zugversuch mit einer hinreichenden Prognose der Trennbruchfestigkeit im allseitigen Druckspannungsbereich. Insgesamt kann die allgemeine Vorstellung eines Übergangs von Trenn- zu Scherbruchversagen mit bereits geringer Steigerung des isostatischen Spannungsanteils nicht bestätigt werden. Die vornehmlich aus Kompressionsversuchen abgeleitete Annahme ist insofern nicht auf das Extensionsregime übertragbar.

Es lassen sich eine Reihe von Einflussfaktoren auf das Trennbruchverhalten ableiten. Die unterschiedlichen Wesensmerkmale von Trennbruch- und Scherbruchverhalten werden neben ihren wesensgemäß abweichenden Deformationsmustern besonders in Form der hier verifizierten Spannungspfadabhängigkeit der Trennbruchfestigkeit und des unterschiedlichen Minimalspannungseinflusses deutlich. Des Weiteren ist eine erhebliche Festigkeit reduzierende Wirkung der Extensionsgeschwindigkeit des Trennbruchversagens festzustellen. Eine mögliche Festigkeitsreduzierung mit steigendem Feuchtegehalt zeigen beide Bruchmechanismen, allerdings sind dabei die materialspezifischen Auswirkungen nicht zwangsläufig zwischen beiden Lastgeometrien übereinstimmend.

Die existierenden theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Trennbruch-Phänomene, wie die Konzepte der tatsächlich wirksamen, lokalen Inter-Partikel-Zugspannung oder der kritischen Extensionsdehnung, sind im Grundsatz in der Lage, die Trennbruch-Entstehung unter allseitigen Druckspannungen zu erklären. Zahlenmäßig können sie jedoch die hier ermittelten experimentellen Befunde nicht erfassen. Ein weiteres Defizit dieser Vorstellungen besteht in der fehlenden Aussagefähigkeit zum Zusammenhang von Spannungsgeometrie bzw. Versuchstechnik und bevorzugtem Bruchtypus.

Vielmehr lässt sich ein komplexer Zusammenhang zwischen Makrobruchmechanismus und Mikrorissentwicklung in Abhängigkeit der Spannungsgeometrie ableiten. Die anisotrope Mikrorissinitiierung und -ausbreitung bevorzugt in der Ebene der größten und mittleren Hauptspannung, die Ausrichtung dieser beiden Hauptspannungen bzgl. der Zylindergeometrie der Prüfkörper und ihre betragsmäßige Übereinstimmung im Extensionsfall des Triaxialversuchs werden als ursächlich für die hier festgestellte generelle Ausbildung von Trennbrüchen in diesem Beanspruchungsregime erachtet. Darüber hinaus ist zu schließen, dass hierin die Ursache für die erheblichen gesteinspezifischen Unterschiede der Trennbruchfestigkeiten im Gegensatz zu ihrem Kompressionsverhalten im Triaxialversuch liegt.

Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	III
	Tabellenverzeichnis	VI
	Verwendete Symbole	VII
1	Einleitung.....	1
2	Bedeutung von Trennbruchversagen im ingenieurmäßigen und bergmännischen Untertagebau.....	2
2.1	Abschalungen und Bergschläge	3
2.2	Bohrlochwand- und Bohrkerninstabilitäten	5
2.3	Hydraulic Fracturing	6
2.3.1	<i>Beispiel Erdgasförderung aus geringstpermeablen Formationen</i>	<i>8</i>
2.3.2	<i>Beispiel Erdwärmenutzung.....</i>	<i>8</i>
2.3.3	<i>Beispiel CO₂-Speicherung, Ausbeuteverbesserung der Kohlenwasserstoffförderung und Flözgasgewinnung</i>	<i>9</i>
3	Theoretische Ansätze und experimentelle Untersuchungen.....	12
3.1	Experimentelle Stimulation von Trennbrüchen	12
3.2	Theoretische Ansätze	21
4	Methodik, Versuchstechnik und Probenmaterial.....	25
4.1	Funktionsschema triaxialer Extensionsversuch	28
4.2	Spannungspfade, Versuchsmodi und Bedingungen im Triaxialversuch.....	30
4.3	Versuchsspezifika der Triaxialanlage	33
4.4	Probenmaterial	34
4.4.1	<i>Lithotypen-Auswahl und petrografische Beschreibung.....</i>	<i>35</i>
4.4.2	<i>Probennahme und Prüfkörperpräparation.....</i>	<i>37</i>
4.4.3	<i>Petrophysikalische und geomechanische Charakterisierung der Lithotypen</i>	<i>37</i>
5	Durchführung und Ergebnisse der triaxialen Extensionsversuche	42
5.1	Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Regulär- und Pinching-off-Modus	43
5.1.1	<i>Regulär-Modus</i>	<i>45</i>
5.1.2	<i>Pinching-off-Modus</i>	<i>50</i>
5.2	Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus.....	52
5.2.1	<i>Erzwungene, unregelmäßige Entlastung im Abrupt-Modus</i>	<i>52</i>
5.2.2	<i>Abrupte Entlastung im „Extremalversuch“</i>	<i>55</i>

5.3	Lithotyp „Magmatite“	57
5.4	Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K	58
5.4.1	<i>Regulär-Modus</i>	58
5.4.2	<i>Pinching-off-Modus</i>	62
5.4.3	<i>Abrupt-Modus</i>	64
5.5	Lithotyp Lindau-Sandstein	66
6	Trennbruchausbildung und Trennbruchfestigkeit – Einflussfaktoren und Abhängigkeiten des Splittings	67
6.1	Deformationsmuster im triaxialen Extensionsversuch.....	67
6.1.1	<i>Ausbildung der Trennbrüche</i>	68
6.1.2	<i>Abweichende Deformationsformen</i>	72
6.2	Trennbruchfestigkeit bei kontinuierlicher und abrupter Extension.....	73
6.3	Einflussfaktoren auf das Trennbruchverhalten	78
6.4	Splitting im triaxialen Extensionsversuch im Vergleich zum Scherbruch- versagen im Kompressionsversuch.....	82
7	Diskussion und Schlussfolgerungen	88
7.1	Zusammenhang zwischen Spannungsgeometrie und Bruchmechanismus	88
7.2	Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den theoretischen Lösungsansätzen	90
7.3	Notwendigkeit mikromechanischer Lösungsansätze	93
8	Fazit	98
9	Literatur	100
	Anhang	110

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Plattenförmige Abschaltungen an der Wandung von Untertagebauten subparallel zur freien Oberfläche	2
Abb. 2:	Beeinträchtigung der strukturellen Integrität von Hohlraumbauten durch Bergschlag	4
Abb. 3:	Bohrkern- und Bohrlochinstabilitäten bei Tiefbohrungen im Festgestein	5
Abb. 4:	Schematische Darstellung der Messung der Gebirgsspannungen mit Hilfe der Hydro-Frac-Methode.....	7
Abb. 5:	Verschiedene Konzepte zur Schaffung einer unterirdischen Austauscheroberfläche (geothermisches Reservoir) zur geothermischen Energiegewinnung mittels hydraulischer Stimulation.....	9
Abb. 6:	Verschiedene Optionen der dauerhaften CO ₂ -Speicherung in unterschiedlichen geologischen Formationen und Strukturen	10
Abb. 7:	Vorstellungen zum Zusammenhang von Bruchmechanismus, Bruchtyp und Versuchstechnik	14
Abb. 8:	Bridgmans „Pinching-off“-Experiment.....	16
Abb. 9:	Triaxialer Extensionsversuch an sog. Hundeknochen-förmigen Prüfzylindern zur Realisierung axialer Zugspannung im Zentrum der Probe als Funktion des radialen Manteldrucks.....	18
Abb. 10:	Schematische Darstellung zum Nebeneinander von Splitting und Scherung im echten triaxialen (polyaxialen) Spannungszustand ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) und die laborative Umsetzung dieser Beanspruchung im Triaxialversuch an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern (σ_{axial} vs. σ_{radial}).....	25
Abb. 11:	Rotationssymmetrische, triaxiale Spannungs- und Verformungszustände im Triaxialversuch bei Spannungsgeometrie / Deformationsrichtung Kompression und Extension (Spannungselipsoid und Zylinderdeformation)	26
Abb. 12:	Verwendete 5 MN-Prüfmaschine mit Triaxialzelle (Satellitenautoklav) für PC-gesteuerte triaxiale Belastung und Porenfluiddrücke bis jeweils 100 MPa	29
Abb. 13:	Prinzipskizze der drei hier entwickelten und angewendeten Versuchsmodi im triaxialen Extensionsversuch ausgehend von den Beanspruchungspfaden Axial-Entlastung und Radial-Belastung.....	31
Abb. 14:	Spektrum ausgewählter petrophysikalischer und geomechanischer Gesteinsparameter der hier untersuchten klastischen Probenserien.....	39
Abb. 15:	Spannungspfade im Regulär- und Abrupt-Modus (Axialentlastung, AE) sowie Pinching-off-Modus (Radialbelastung, RB) ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand (ISO).....	42
Abb. 16:	Gegenüberstellung von zeitlichem Verlauf und Spannungs-Verformungs-Kennlinie für die beiden Regelungsarten Spannungs- bzw. Druck-Steuerung (a) und Verformungs- bzw. Weg-Steuerung (b) im Regulär-Modus beispielhaft am Lithotyp Si-S.....	46

Abb. 17:	Axialverformungen aufgetragen gegen die Differenzspannung für die beiden Sandsteinserien BE-S und Si-S im Extensionsversuch getrennt nach den verschiedenen Versuchsvarianten im Regulär-Modus	47
Abb. 18:	Spannungs-Verformungs-Verlauf der beiden Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Regulär-Modus (Versuchsvariante R3a).....	48
Abb. 19:	Maximalbelastung im Pinching-off-Modus	51
Abb. 20:	Versuchsergebnisse der Lithotypen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus (A1–A3) bei abrupt-rapider Axialentlastung im Vergleich zum bruchlosen Regulär-Modus (Abb. 17) bei quasi-statischer Extension (R1–R3) oder extrem schneller, geregelter axialer Entlastung (SV).....	54
Abb. 21:	Durch Störungen der Versuchssteuerung bedingte Schwankungen von Spannung bzw. Verformung im Regulär-Modus	55
Abb. 22:	Typischer Verlauf von Extensionsexperimenten bei bruchhaftem und bruchlosem Testergebnis im spannungsgesteuerten Regulär-Modus am Beispiel des Lithotyps BE-K.....	59
Abb. 23:	Vergleich der maximalen Axialverformungen und zugehörigen Differenzspannungen der beiden konglomeratischen Probenklassen BE-K und Si-K.....	60
Abb. 24:	Trennbruchversagen im Pinching-off-Modus der konglomeratischen Lithotypen BE-K und Si-K.....	63
Abb. 25:	Maximale Axialverformung vs. Differenzspannung im Abrupt-Modus der Probenklassen BE-K und Si-K bei abrupter, unregelter Axialentlastung.	65
Abb. 26:	Deformationsmuster der im triaxialen Extensionsversuch erzeugten Trennbrüche der verschiedenen Lithotypen in den angewendeten Versuchsmodi.....	67
Abb. 27:	Anordnung der stimulierten Trennbrüche entlang der Längsachse des Prüfzylinders	69
Abb. 28:	Prozentuale Verteilung der Anzahl an stimulierten Trennbrüchen pro Prüfkörper.....	70
Abb. 29:	Gegenüberstellung von Bruchwinkel (Inklination der Bruchfläche zur Richtung der größten Hauptspannung) und der Radialspannung (größte Hauptsspannung) beim Bruch	71
Abb. 30:	Vergleichende Größenordnungen von Extensions- bzw. Entlastungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Versuchsmodi und -varianten bezüglich ihrer zugehörigen Bruchergebnisse in der Spannungsgeometrie Extension der Gesteinseinheiten BE-S und Si-S.....	73
Abb. 31:	Aus den sprunghaften Änderungen der „Extremalversuche“ resultierende extremale Momentan-Spannungs- und -Verformungsänderungen der Lithotypen BE-S und Si-S	75
Abb. 32:	Zusammenhang zwischen Spannungs- und Verformungsrate, größter Hauptspannung und Splitting der beiden Lithotypen BE-S und Si-S nach den Ergebnissen der „Extremalversuche“	76
Abb. 33:	Versuchsergebnisse der drei Versuchsmodi inklusive der entsprechenden Versuchsvarianten der konglomeratischen Haupt-Lithotypen BE-K und Si-K, dargestellt in der σ_1 - σ_3 -Ebene	78

Abb. 34:	Gegenüberstellung der Bruch- bzw. maximalen Spannungszustände der Deformationsrichtungen Extension und Kompression in der σ_1 - σ_3 -Ebene anhand der vier Haupt-Lithotypen	83
Abb. 35:	Vergleich der Verformungen im Extensions- und Kompressionsregime der untersuchten klastischen und magmatischen Lithotypen	86
Abb. 36:	Gegenüberstellung der Festigkeiten der verwendeten Lithotypen (LT) im einaxialen Kompressionsversuch sowie im einaxialen indirekten Zugversuch (Sprödigkeitsindex) und ihres zugehörigen Trennbruchverhaltens	95

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Angewendete allgemeine Randbedingungen der hier entwickelten Versuchsmodi im Rahmen der versuchstechnischen Möglichkeiten	32
Tab. 2:	Verwendete Haupt-Lithotypen – stratigrafische Einordnung und petrografische Charakterisierung	35
Tab. 3:	Petrophysikalische und geomechanische Eigenschaften der verwendeten Lithotypen, getrennt nach Haupt-Lithotypen und ergänzenden Gesteinsarten	38
Tab. 4:	Zusammenfassende Untersuchungsergebnisse der an den Sandstein- Lithotypen BE-S und Si-S durchgeführten Versuchsvarianten im Regulär- Modus (R1–R3, SV) und Pinching-off-Modus (P1–P3).....	44
Tab. 5:	Bruchspannungszustände und eingegrenzte maximale Bruchverformungen der verwendeten Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus mit abrupter, rapider Axialentlastung infolge unregelmäßiger schlagartiger Druckentlastung.....	53
Tab. 6:	Extremale Spannungs-Verformungs-Änderungen der schlagartigen Unstetigkeiten im regulären Versuchsablauf infolge von Störungen der Versuchssteuerung im Regulär-Modus der Lithotypen BE-S und Si-S	56
Tab. 7:	Spannungs- und Verformungszustände der Magmatit-Lithotypen bei quasi- statischer Maximalbelastung im Regulär-Modus und bei abrupter, rapider Axialentlastung im Abrupt-Modus.....	58
Tab. 8:	(Bruch-)Spannungs- und -Verformungszustände der triaxialen Extensions- versuche der Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K in den Versuchs- varianten des Regulär-Modus R1a und R2a.....	61
Tab. 9:	(Bruch-)Spannungszustände der verwendeten Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K im Pinching-off-Modus entsprechend den Randbedingungen der Versuchsvarianten P1–P2	64
Tab. 10:	Bruchspannungszustände und eingegrenzte maximale Bruchverformungen der verwendeten Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K im Abrupt- Modus mit abrupter, rapider Axialentlastung kraft unregelmäßiger schlagartiger Druckentlastung.....	65

Verwendete Symbole

In Übereinstimmung mit der üblichen Verwendung in der Boden- und Felsmechanik werden hier abweichend zur Vorzeichenkonvention der Technischen Mechanik Druckspannungen mit positivem Vorzeichen und Zugspannungen mit negativem Vorzeichen gekennzeichnet. Zur Verdeutlichung der Bezeichnungen und Relationen der Spannungen und Verformungen im vorliegenden Kontext wird auf Kap. 4 (Methodik) und insbesondere auf die Abb. 10 und 11 verwiesen. Weitere verwendete Symbole werden entsprechend im Text erläutert.

σ_1 größte Hauptspannung

σ_2 mittlere Hauptspannung

σ_3 kleinste Hauptspannung (Minimalspannung)

$\sigma_{\text{axial}} = \sigma_z$ Axialspannung, bzgl. Rotationssymmetrie der Prüfzylinder im Triaxialversuch

$\sigma_{\text{radial}} = \sigma_{x-y}$ Radialspannung, bzgl. Rotationssymmetrie der Prüfzylinder im Triaxialversuch

$\varepsilon_{\text{axial}} = \varepsilon_z$ Axialdehnung, bzgl. Rotationssymmetrie der Prüfzylinder im Triaxialversuch

$\varepsilon_{\text{radial}} = \varepsilon_{x-y}$ Radialdehnung, bzgl. Rotationssymmetrie der Prüfzylinder im Triaxialversuch

$\dot{\varepsilon}_{z, x-y}$ Dehnungs-/Verformungsrate in Axial- oder Radialrichtung

$\dot{\sigma}_{z, x-y}$ Spannungsrate in Axial- oder Radialrichtung

σ_m mittlere Spannung (Durchschnittsspannung),

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_{z=\text{axial}} + 2 \sigma_{x-y=\text{radial}}}{3}$$

$\Delta\sigma$ Differenzspannung,

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{z=\text{axial}} - \sigma_{x-y=\text{radial}}$$

σ_u einaxiale Bruchfestigkeit (Bruchspannung im einax. Kompressionsversuch)

ε_u einaxiale Bruchdehnung (Bruchverformung im einax. Kompressionsversuch)

σ_t einax. indirekte Zugfestigkeit (calc. max. Zugspannung im Brazilianversuch)

ϕ Reibungswinkel (calc. triaxialer Kompressionsversuch)

c Kohäsion (calc. triaxialer Kompressionsversuch)

ρ_d Trockendichte

Φ effektive Porosität (vernetzter Porenraum)

v_p Ultraschallgeschwindigkeit (Longitudinalwellen)

K Permeabilität

1 Einleitung

Beim Bauen im Festgestein sind zum Verständnis des summarischen mechanischen Verhaltens des Baustoffs Gebirge im Sinne eines Gesteinsverbandes gesicherte Kenntnisse der Bruchvorgänge unentbehrlich. Insbesondere im ingenieurmäßigen wie bergmännischen Hohlraumbau besteht aufgrund der allseitig wirkenden, z.T. hohen Gebirgsspannungen ein komplexer Zusammenhang zwischen Spannung, Verformung und Festigkeit der umgebenden Gesteine resp. Gebirge. Zu solchen Untertage- oder Hohlraumbauten zählen Tunnel, Stollen bzw. Strecken, Kavernen oder Schächte, aber auch Tiefbohrungen im Festgestein entsprechend ihrer jeweiligen Nutzung (Bohrlochbergbau), beispielsweise zur Erdöl-Erdgas-Förderung, Zwischenspeicherung, Erdwärme-Nutzung (Tiefengeothermie) oder CO₂-Versenkung.

Das Zusammenspiel von Spannung, Verformung und Festigkeit beschreiben Stoffmodelle und auf diesen beruhende Festigkeitshypothesen. Bei ingenieurmäßigen Problemstellungen im Festgestein in Teufen bis zu einigen Kilometern kommt dabei vor allem Sprödbbruchverhalten in Frage. Am gebräuchlichsten sind in der Geotechnik mathematische Beschreibungen der Festigkeit von Festgestein oder Gebirge auf Basis des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb (z. B. Kolymbas 2005, Natau 1995, Jaeger & Cook 1979). Die diesen Grenzzuständen der Bruchfestigkeit entsprechenden Hüllkurven definieren im Druckspannungsbereich die maximal aufnehmbaren Schubspannungen in Abhängigkeit von den Hauptspannungen bis zum Eintreten des Scherbruchversagens. Diese Kriterien werden auf den Zugspannungsbereich basierend auf der einaxialen Zugfestigkeit erweitert.

Grundsätzlich muss man jedoch zwei konträre Bruchtypen unterscheiden: Scherbrüche und Trennbrüche (s. d. Paterson & Wong 2005, Rowe 2001, Nicolas 1986, etc.). Trennbrüche sind durch Relativbewegung normal zur Bruchfläche gekennzeichnet. Sie werden im Allgemeinen mit Zugbeanspruchung in Verbindung gebracht, können jedoch ebenso unter allseitigen Druckspannungen im natürlichen, dreidimensionalen Spannungsfeld auftreten. Sie stehen in ihrem Erscheinungsbild und ihren Entstehungsbedingungen den Scherbrüchen gegenüber, die durch Scherbeanspruchung in einer dreiachsigen kompressiven Einspannung in der Ebene der maximalen Schubspannung entstehen. Die Relativbewegung ist parallel zur Bruchfläche gerichtet, die Bruchwinkel zur größten Hauptspannung betragen prinzipiell maximal 45°.

Das Anlegen eines untertägigen Hohlraums, wie z. B. der Vortrieb eines Tunnels oder das Abteufen einer Bohrung, führt zu komplexen, wechselhaften Spannungsbedingungen im umgebenden Gebirge während der Auffahrung. Diese temporären Spannungszustände infolge der Umlagerung der Gebirgsspannungen werden wesentlich von dem Ausbruchvorgang und der Form des Hohlraumes kontrolliert (Bräuner 1991, Hoek 2000, Brady & Brown 2004,

Junker et al. 2006, etc.). Im Konturbereich kommt dabei dem Spannungsregime Extension infolge der Reduzierung des Spannungsanteils normal zur freien Oberfläche besondere Bedeutung zu. Die damit im Zusammenhang stehenden Auflockerungen durch kontinuierliche oder schlagartige Brucherscheinungen, wie sie exemplarisch im Kap. 2 dargestellt werden, sind häufig von Trennbruchversagen resp. zumindest dessen Beteiligung geprägt. Besonders bei derartigen Bauvorhaben, i. S. von (berg-) baulichen Eingriffen im tieferen Untergrund, unter allseitiger Wirkung der Gebirgsspannungen, beschreiben die etablierten Festigkeitsmodelle Problemstellungen des Trennbruchversagens nur unzureichend, wie die Ausführungen in Kap. 2 und 3 belegen. Für die dementsprechend existierenden theoretischen Ansätze gibt es bislang nur wenige experimentelle Belege (Kap. 3).

Die vorliegende Arbeit verfolgt daher das Ziel, auf der Basis umfassender triaxialer Extensionsversuche das Entstehen von Trennbrüchen zu analysieren (Kap. 4). Die gewonnenen Daten aus den durchgeführten Triaxialversuchen an verschiedenen Gesteinsserien (Kap. 5) erlauben das Verifizieren unterschiedlicher Einflussfaktoren auf das Trennbruchverhalten sowie darüber hinaus eine Gegenüberstellung des bruchmechanischen Gesteinsverhaltens unter Extensions- und Kompressionsbeanspruchung (Kap. 6ff). Teilaspekte und erste Ergebnisse wurden vorab publiziert in Bauch & Lempp (2004), Hecht et al. (2005) und Bauch (2005).

2 Bedeutung von Trennbruchversagen im ingenieurmäßigen und bergmännischen Untertagebau

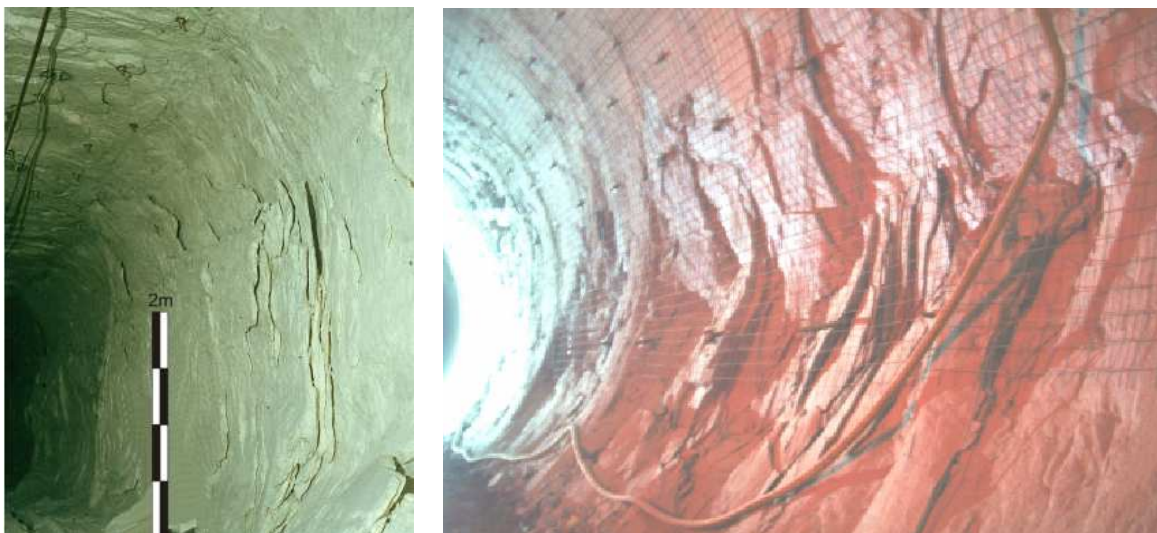


Abb. 1: Plattenförmige Abschalungen an der Wandung von Untertagebauten subparallel zur freien Oberfläche:
links: Stoß einer Strecke im bergmännischen Steinsalzabbau (Foto Ch. Lempp)
rechts: Tunnelwand im Granit, AlpTransit Lötschberg-Basistunnel (Vuilleumier & Seingre 2005)

Im Zusammenhang mit dem Bruchphänomen Trennbruch werden in der Literatur unterschiedliche Begriffe benutzt. Dabei vermengen sich z.T. deskriptive und genetische Aspekte. Deshalb sei hier zunächst eine Systematisierung von in der Fachliteratur häufig verwendeten Termini vorangestellt:

- *Core-Disking* (*scheibenförmiger Bohrkernzerfall*), *Hydrofrac* (*Wasserfrac, hydraulisches Aufreißen*), *Abschalung* (*spalling*) oder *Bergschlag* (*rockburst*) sind Benennungen für spezielle Brucherscheinungen im Zusammenhang mit Auffahrungen im Berg- und Untertagebau (Erläuterungen s. u.).
- *Axial – diametral – radial – longitudinal – transversal – columnar frac(ture), split(tings), cleavage, Bruch* beschreiben die geometrische Bruchausrichtung, häufig auf Basis von ein- oder biaxialen laborativen Versuchsergebnissen. Diese können dabei auf Schnittebenen des Prüfkörpers oder die Lasteintragsrichtung bezogen sein (s. Kap. 3).
- *Tensile fracture* im Sinne von *Zugbruch* fokussiert meist auf Brucherscheinungen aus dem einaxialen indirekten Zugversuch, wohingegen z. B. *tensile [damage, crack], tension* oder *Zugbeanspruchung* nicht auf einaxiale Spannungszustände begrenzt sein müssen (s. Kap. 3).
- *Extension fracture, Splitting* oder *Trenn-/Extensionsbruch* lassen sich am sinnvollsten als universale Beschreibung verwenden, da sie keine äußere Zugbeanspruchung (i. S. negativer Minimalspannung) voraussetzen. Sie zielen auf das Deformationsmuster bzw. den Bruchmechanismus im Allgemeinen und nicht auf spezielle geometrische Bedingungen ab. Dabei sind *Extensions-* bzw. *Trennbruch* (*extension fracture*) als Bruchergebnis und *Splitting* (*Extensions-* bzw. *Trennbruchversagen*) als Bruchprozess zu verstehen.

Trennbrüche lassen sich in unterschiedlichen Spannungsniveaus und in unterschiedlichen Maßstäben beobachten. Ihre generelle Bedeutung im Hohlraumbau und die daraus resultierenden aktuellen Fragestellungen sollen die folgenden Beispiele verdeutlichen:

2.1 Abschalungen und Bergschläge

Beim Auffahren von Untertagebauten treten *Abschalungen* in deren Berandung subparallel zur freien Oberfläche auf. Diese Platten oder Schalen sind in regelmäßiger Abfolge in Meter-Dimension angeordnet (Abb. 1). Sie können zum einen den aktuellen Vortrieb behindern und andererseits den bereits eingebrachten Ausbau beschädigen und somit zu einer zumindest lokalen Beeinträchtigung der strukturellen Integrität des Untergrundbauwerks führen. Generell werden dadurch unvorhergesehene, meist zeitlich, technisch und finanziell aufwendige Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen erforderlich. Im Extremfall können derartige Abschalungen beim plötzlichen, schlagartigen Lösen zum sog. *Bergschlag* (Abb. 2)

führen und damit zu einer Gefahr für Belegschaft und Technik werden. Die resultierenden Bruch- und Rissmuster sind durch dicht gescharte und subparallele Trennflächen gekennzeichnet. Die Größenordnung reicht von kleineren Gesteinsfragmenten bis hin zum Einbruch eines gesamten Hohlraumabschnitts.



Abb. 2: Beeinträchtigung der strukturellen Integrität von Hohlraumbauten durch Bergschlag:
links: Beschädigung der Ausbruchsicherung im Gneis durch Bergschlag, AlpTransit Gotthard-Basistunnel (Rehbock-Sander & Gerdes 2005)
rechts: Zusammenbruch des gesamten Hohlraums durch einen massiven Bergschlag im Erzbergbau (Hoek 2000)

Abschalungen und Bergschläge sind bekannte Phänomene im Hohlraumbau, vor allem in Tiefen mit größerer Überlagerung (z. B. Fairhurst & Cook 1966, Cook et al. 1966, Stacey & Jongh 1977, Nemat-Nasser & Horii 1982). Ihre Bildung steht im Zusammenhang mit Spannungsumlagerungen infolge der Hohlraumauffahrung. Generell wird folgender empirischer Zusammenhang angenommen: Je größer die Spannungen durch Überlagerung und je kompetenter die aufgefahrenen Gesteine, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Abschalungen sowie das Bergschlagrisiko. Derartige Bruchformen sind allerdings nicht nur in ausgesprochen spröden Gesteinen anzutreffen, sondern auch im vergleichsweise eher duktil reagierenden Steinsalz (Abb. 1). Beispiele für Bergschläge i. d. S. werden im Erzbergbau (z. B. Erzgruben Witwatersrand), im Steinkohlebergbau (z. B. Ruhrgebiet) oder im Salzbergbau beschrieben (Gimm & Pforr 1961, Cook et al. 1966, Burgert & Lippmann 1981, Bräuner 1991, Ortlepp & Stacey 1994, de Beer & Mendecki 1998, etc.).

Die bestehende Signifikanz dieser Bruchphänomene zeigen beispielhaft gegenwärtige Bauvorhaben wie die AlpTransit-Basistunnel Lötschberg und Gotthard: Trotz entsprechender Investitionen in Erkundung, Prognose und Konzeption im Vorfeld dieser Großprojekte sind Bergschläge und Abschalungen nicht hinreichend beherrsch- oder beeinflussbar und führen so in z.T. unvorhergesehenem Maß zu Beeinträchtigungen der Vortriebsarbeiten (z. B. Vuilleumier & Seingre 2005, sBfV 2005, Rehbock-Sander & Gerdes 2005, Vuilleumier &

Aeschbauch 2004, Kaiser & Tannant 1999). Die Mehrzahl der Bruchvorgänge (ca. 75%) ereigneten sich zeitlich unmittelbar während des Vortriebs an der Ortsbrust oder im rückwärtigen Bereich. Massive Einzelereignisse waren jedoch auch mit deutlichem Zeitversatz von mehreren Monaten nach den Ausbrucharbeiten zu verzeichnen und führten zu Ablösungen auf mehreren 10er Metern der Tunnelwand. Strecken in mittel- bis grobkörnigen Gneisen und Graniten sind besonders betroffen (Rehbock-Sander & Gerdes 2005, sBFV 2005, ATG-AG 2004).

Daher ist die Frage nach den Ursachen und kontrollierenden Parametern sowie optimierten Lösungsansätzen Gegenstand aktueller Forschungen. In diesem Kontext stehen u. a. Entspannungsbohrungen in Bereiche hoher Spannungsakkumulation im Umfeld des Untertagebauwerks, vorausseilende räumliche Ortung sich ankündigender Bruchgefahren, numerische Modellierungen von Bruchereignissen oder die Quantifizierung von Auflockerungszonen (z. B. Cai & Kaiser 2005, Diederichs et al. 2004, Cho et al. 2002, Feit et al. 2002, Alber & Heiland 2001a, b, Kong 2000, Guserle & Lippmann 1999).

2.2 Bohrlochwand- und Bohrkerninstabilitäten

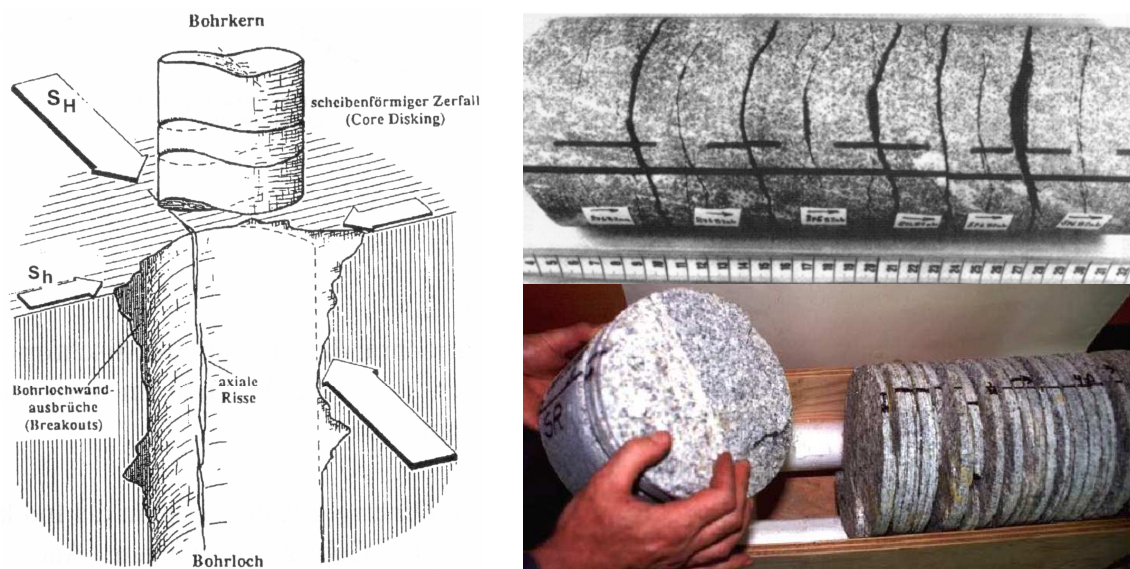


Abb. 3: Bohrkern- und Bohrlochinstabilitäten bei Tiefbohrungen im Festgestein:
links: verschiedene Arten im Kontext mit dem regionalen Spannungsfeld (Lempp & Röckel 1999)
rechts: Beispiele für Core-Disking im Gneis (oben Engeser 1996) und Granit (unten Hoek 2000)

Ebenso wie die beschriebenen spannungsinduzierten Phänomene in der Umgebung eines Hohlraumes im Untertagebau sind *Bohrkern- und Bohrlochwand-Instabilitäten* bei Tiefbohrungen im Festgestein generelle Begleiterscheinungen (z. B. Jaeger & Cook 1963, Obert & Stephenson 1965, Daemen & Fairhurst 1970, Stacey 1982, Lempp & Mühlhaus 1985). Ihre Entstehung ist dem Zusammenspiel von bohrtechnischer Einwirkung (beispielsweise Spülungsdruck, Druckstöße über Bohrgestänge beim Vortrieb oder Einbau), Lithologie und dem regionalen Spannungsfeld geschuldet. Sie beeinflussen den Kerngewinn

und können durch Spülungsverluste, Nachfall und Festklemmen des Gestänges den Bohrfortschritt behindern oder gar zum Aufgeben des Bohrlochs zwingen und stellen daher ein unkalkulierbares Kostenrisiko dar, so dass sie Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben sind (z. B. Lempp et al. 2007, Tenzer et al. 2004, Cuss et al. 2003, Kutter & Rehse 1996, Venet et al. 1993).

Der Umstand, dass die herrschenden Gebirgsspannungen typische Bruchformen im Bohrkern und in der Bohrlochwand bewirken und deren Ausrichtung und Geometrie bestimmen (Abb. 3 links), wird zunehmend für semiquantitative Abschätzungen der Spannungsrichtungen und Spannungsbeträge anhand der Informationen aus Bohrungen in größerer Tiefe genutzt (Zoback et al. 1985, Borm et al. 1989, Ishida & Saito 1995, Röckel 1996, Bell 1996, Haimson 1997, Brudy & Zoback 1999, Röckel & Lempp 2003, Kaga et al. 2003, etc.).

Typische Beispiele, wie *Core-Disking*, axiale Risse und Wandausbrüche, sowie ihre Ausrichtung im Bezug zum herrschenden Spannungsfeld zeigt Abb. 3. *Core-Disking*, ein scheibenförmiger Zerfall des Bohrkerns, bildet sich unter dem Einfluss des beim Freischneiden des Bohrkerns veränderten Spannungszustandes in cm- bis dm-Dimension an der Bohrlochsohle. Die regelmäßigen Abstände der Disken kennzeichnen ihre charakteristische Anordnung. *Axiale Risse* können unter der Wirkung der hydraulischen Drücke der Bohrspülung in Abhängigkeit des regionalen Spannungszustandes in 10er m-Dimension in der Bohrlochwand senkrecht zur minimalen Horizontalspannung erzeugt werden. Als Verschneidung von Trenn- und Scherbrüchen werden *Bohrlochwandausbrüche* verstanden. Sie können zu ausgeprägten Kalibererweiterungen des Bohrlochs führen und sich über weite Bereiche der Bohrung erstrecken.

2.3 Hydraulic Fracturing

Unter sog. *Hydraulic Fracturing* (hydraulisches Aufreißen) versteht man das Eintreten eines Bruchereignisses im Umgebungsgestein eines untertägigen Hohlraumes infolge der hydraulischen Einwirkung eines Flüssigkeits- oder Gasdrucks auf das umgebende Gebirge. Beispielsweise stimuliert das Verpressen einer Flüssigkeit mit hohem Druck in einem bestimmten durch Packer abgeschlossenen Bohrlochabschnitt (sog. Wasserfrac-Technik) ein Aufweiten vorhandener Klüfte sowie ein Aufbrechen neuer Trennflächen, sog. *Hydrofracs*. Die Ausrichtung der induzierten Hydrofracs ist vor allem vom herrschenden Gebirgsspannungszustand abhängig (Abb. 4). Prinzipiell sind sie mit den bohrtechnischen Axialen Rissen (Kap. 2.2) vergleichbar, die Anzeichen von Scherdeformation vermissen lassen.

In der Erdöl-Erdgas-Förderung findet diese Technik bereits seit den 1950er Jahren Anwendung, um durch die Stimulation von Rissen und Bruchstrukturen (hier sog. *Hydraulische Stimulation*) im Umfeld des abgepressten Tiefenbereiches höhere Gebirgs-

permeabilitäten und somit höhere Förderraten zu erzielen (Clark 1949, Howard & Fast 1970, Veatch 1989, etc.).

Die Abhängigkeit der sich ausbildenden Hydrofracs vom Gebirgsspannungszustand wird bei der sog. *Hydro-Frac-Methode* zur In-situ-Messung der lokalen Spannung ausgenutzt. Hierbei stimuliert man gezielt kleinere Bohrlochabschnitte. Aus den nötigen Injektionsdrücken, die das Aufbrechen und bei konstanter Injektionsrate das Offenhalten der Fracs realisieren, wird unter vereinfachten Annahmen auf die kleinste Horizontalspannung geschlossen (z. B. Haimson & Fairhurst 1968, Schonfel & Fairhurst 1970, Jaeger & Cook 1979, Evans et al. 1988, Haimson & Cornet 2003).

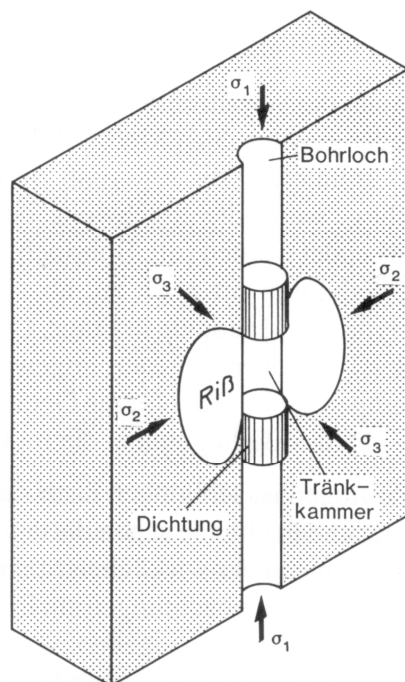


Abb. 4:

Schematische Darstellung der Messung der Gebirgsspannungen mit Hilfe der Hydro-Frac-Methode:

Das vereinfachte Modell zeigt die Orientierung der durch hydraulische Injektionsdrücke innerhalb des durch Packer (Dichtung) abgeschlossenen Bohrlochabschnitts (Tränkammer) erzeugten Trennfläche (Hydrofrac) in Abhängigkeit des regionalen Spannungsfeldes (aus Bräuner 1991)

Hydraulic Fracturing spielt auch im Hinblick auf die Integrität der sog. geologischen Barriere beispielsweise einer Kohlenwasserstoff-Lagerstätte oder im Kavernen- und untertägigen Deponiebau eine wichtige Rolle. Zum Integritäts- bzw. Dichtheitsnachweis des Barrieregesteins (z. B. Steinsalz, Tonstein) wird u. a. das Minimalspannungskriterium (auch als Fluid- oder Laugendruckkriterium bezeichnet) herangezogen, wonach ein potentieller Fluiddruck die kleinste kalkulierte Hauptspannung nicht überschreiten darf (s. d. z. B. Schulze & Popp 2002, Mazurek et al. 2003, Düsterloh & Lux 2007). Gegenstand aktueller Forschung sind dahingehend u. a. die Erfassung und mathematische Beschreibung mechanisch-hydraulisch gekoppelter Eigenschaften der verschiedenen Gesteinsarten, um beispielsweise Fragen der Flüssigkeits- und Gasdichtheit oder der spannungsabhängigen Permeabilitätsentwicklung der geologischen Barriere zufrieden stellend beantworten zu können (s. Düsterloh & Lux 2007, Popp et al. 2007, Trautwein & Huenges 2005, Marschall et al. 2005, Brückner et al. 2004, Heiland 2003, Schulze & Popp 2002, Zhu & Wong 1997, etc.).

2.3.1 Beispiel Erdgasförderung aus geringstpermeablen Formationen

Die Wasserfrac-Technik zur Steigerung der Produktivität von Erdöl-Erdgas-Lagerstätten wurde seit den 1950er Jahren stetig weiterentwickelt. Dabei wird eine möglichst weiträumige Stimulationswirkung im Umfeld des Bohrlochabschnitts angestrebt. Zur gezielten Steuerung und sicheren Prognose der initiierten Rissbildung (Hydrofracs) ist die Kenntnis der hydraulischen und felsmechanischen Einflussgrößen unabdingbar. Vornehmlich die felsmechanischen Modellvorstellungen stimmen bis heute nicht hinreichend mit den Frac-Resultaten überein (Sieber 2005, Gaupp et al. 2005, Friedel et al. 2002, Berghofer 1998, Brady et al. 1992).

Eine besondere Herausforderung ist die Gasförderung aus nahezu dichten, geringst-durchlässigen geologischen Formationen (z. B. nationales Forschungsvorhaben „Tight Gas Reservoirs“, s. d. Gaupp et al. 2005). Hydraulische Stimulationstechniken in Verbindung mit entsprechenden Bohrtechniken sollen die wirtschaftlich notwendigen Produktionsraten von Tight-Gas-Lagerstätten ermöglichen und somit zukünftige Versorgungsreserven erschließen. Die Wirtschaftlichkeit ist dabei entscheidend vom Erfolg der Frac-Stimulation abhängig. Häufig bleiben jedoch die Frac-Ergebnisse hinter den prognostizierten Werten zurück (z. B. Holditch & Tschirhart 2005, Hoppe et al. 2003, Schlager 2003, Friedel et al. 2002, Ehrl & Schueler 2000). Deshalb ist derzeit der weltweite Anteil der Erdgasförderung aus „dichten“ Speichergesteinen noch sehr gering (z. B. Fleischer et al. 2000).

2.3.2 Beispiel Erdwärmenutzung

Aufbauend auf den Erkenntnissen zum hydraulischen Aufbrechen entstand die Idee der ortsungebundenen Nutzung von Erdwärme aus großer Tiefe (sog. Tiefengeothermie, Hot Dry / Fractured Rock, Wärmebergbau). Die Bestrebungen begründen sich auf dem Potential, mit Hilfe der hydraulischen Injektion Risse resp. Brüche (Hydrofracs) zu erzeugen, die als eine unterirdische Wärmetauscherfläche fungieren sollen.

Hierbei wird der geothermische Gradient ausgenutzt: Das durch eine Injektionspumpe verpresste Wasser erwärmt sich am zerklüfteten und gefracten Gestein (Wärmetauscher) und wird wieder an die Oberfläche gepumpt. Dort entzieht man die Energie zur Strom- und Wärmeproduktion (Abb. 5). Da für die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage mindestens 100°C am Bohrkopf benötigt werden, sind bei einem geothermischen Gradienten von 3 K/100 m Teufen größer als 3 km nötig (z. B. Paschen et al. 2003, Tenzer 2001, Baumgärtner & Jung 1999).

Das künstliche Aufweiten des bereits vorhandenen Kluftsystems und das Aufbrechen neuer Wegsamkeiten zur Schaffung einer unterirdischen Austauscheroberfläche hat sich dabei als größte Schwierigkeit dieser Technologie herausgestellt. Die bisherigen Erfahrungen in verschiedenen weltweit verfolgten Forschungsprojekten zeigen, dass bis heute individuell

angepasste Lösungskonzepte nötig sind (Abb. 5) und der Erfolg einer Stimulation nicht vorausplanbar ist bzw. garantiert werden kann. Beispiele hierfür sind bereits langjährige internationale und nationale Großforschungsprojekte in kristallinen Zielhorizonten, wie Soultz oder Bad Urach (z. B. Tenzer et al. 2004, Paschen et al. 2003, Tenzer 2001, Weidler 2001, Baria et al. 1999).

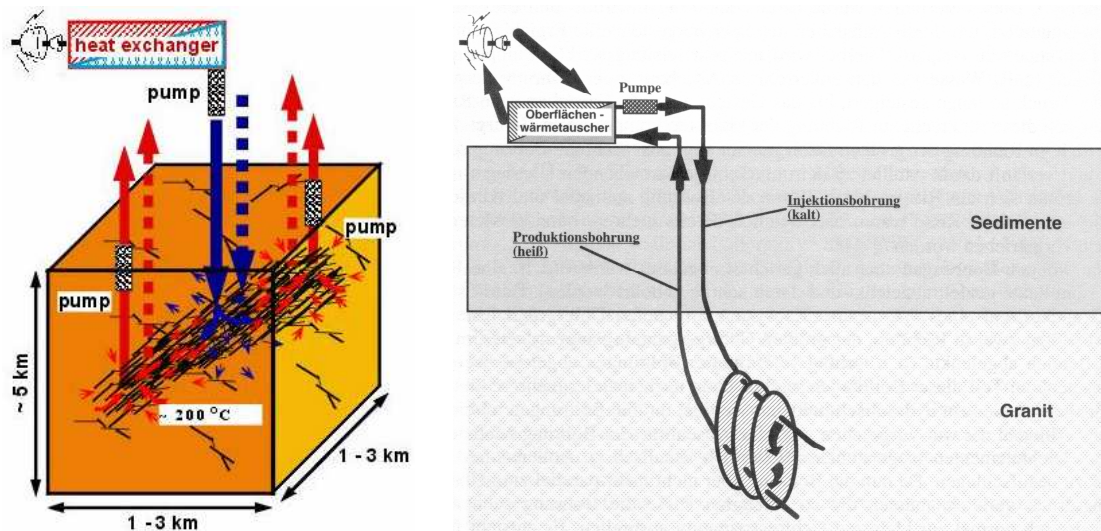


Abb. 5: Verschiedene Konzepte zur Schaffung einer unterirdischen Austauscheroberfläche (geothermisches Reservoir) zur geothermischen Energiegewinnung mittels hydraulischer Stimulation:
links: Nutzung des vorhandenen, natürlichen Trennflächensystems und Vernetzung durch künstlich stimulierte Hydrofracs (www.soultz.net)
rechts: Stimulieren diskreter, subparalleler Hydrofracs (Baumgärtner & Jung 1999)

Angedeutet ist ferner das Funktionsprinzip des Wärmekreislaufs innerhalb des unterirdischen Wärmereservoirs bestehend aus Injektions- und Förderbohrung(en) sowie die Umsetzung der Erdwärme in Strom- oder Wärmeenergie in entsprechenden Anlagen an der Tagesoberfläche.

Aufgrund der geothermischen Potentiale in Deutschland stehen geringdurchlässige Sedimentgesteine im Fokus aktueller Forschungen (z. B. GFZ-Groß Schönebeck, GeneSys-Hannover, Prometheus-Bochum) und einiger kommerzieller Aktivitäten (z. B. Hecht 2006). In sedimentären, zumeist gering permeablen Zielhorizonten gelten die obigen Ausführungen im Besonderen (s. d. u. a. Legarth et al. 2005, Jung et al. 2004, Orzol et al. 2004, Grosse et al. 2004).

2.3.3 *Beispiel CO₂-Speicherung, Ausbeuteverbesserung der Kohlenwasserstoffförderung und Flözgasgewinnung*

Ein weiteres Anwendungsbeispiel geht auf die politischen Vereinbarungen zum Emissionshandel auf Basis des Kyoto-Protokolls zurück. Die zugrunde liegende Idee besteht darin, den CO₂-Gehalt der Atmosphäre zu reduzieren, indem man CO₂ dauerhaft deponiert (Abb. 6), beispielsweise durch CO₂-Speicherung in geologischen Formationen (z. B. Davision et al. 2001, Borm 2004, Thomas & Benson 2005, Cook 2006).

In Deutschland zieht man u. a. die Deponierung von CO₂ in ausgebeuteten Erdöl-Erdgas-Lagerstätten oder bergmännisch nicht abbauwürdigen Steinkohleflözen in Betracht. Diese Überlegungen beruhen auf Erfahrungen aus der sog. Ausbeuteverbesserung und Produktionssteigerung bei der Erdöl-Erdgas-Förderung (EOR / EGR – Enhanced Oil / Gas Recovery). Produktionsraten und Ausbeute einer konventionellen Erdöl-Erdgas-Förderung lassen sich durch Injektion von CO₂ und somit Austreiben von Erdgas oder Erdöl verbessern.

Auf der analogen Technologie beruht das Austreiben von sog. Flözgas aus wirtschaftlich nicht abbauwürdigen Steinkohleflözen (ECBM – Enhanced Coal Bed Methan) mittels CO₂-Injektion (z. B. Fishedick 2005, May et al. 2003).

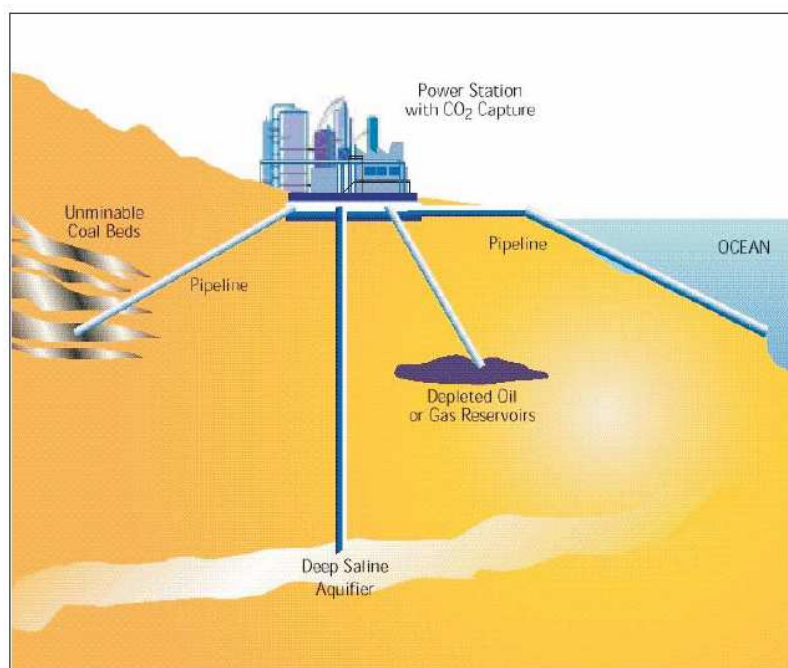


Abb. 6:

Verschiedene Optionen der dauerhaften CO₂-Speicherung bzw. Deponierung in unterschiedlichen geologischen Formationen und Strukturen, wie z. B. (Davision et al. 2001):

- in bergmännisch nicht (mehr) abbauwürdigen Flözhorizonten,
- in erschöpften Erdöl-Erdgas-Lagerstätten oder
- in salinaren Grundwasserleitern

Grundlegende Voraussetzung für derartige Einsatzzwecke sind ausreichende Gebirgsdurchlässigkeiten oder alternativ die Möglichkeit hydraulischer Stimulation zusätzlicher Wegsamkeiten. Diese Fördertechniken gelten jedoch gemessen an ihrem planbaren Erfolg insbesondere in sedimentären Zielhorizonten als unausgereift (s. d. May et al. 2003, Fleischer et al. 2000). So wurden beispielsweise zwei nationale Pilot-Projekte zur Gewinnung von Flözgas aufgrund zu geringer Förderraten nicht zuletzt infolge ungenügender Frac-Erfolge wieder eingestellt (s. d. Thielemann 2002, Conoco 1995, Saarberg-AG 1994).

Im Falle der Speicherung von CO₂ in geologischen Formationen bedingen dessen thermodynamische Eigenschaften Versenkungstiefen ab etwa 1 km. Aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus müssen einerseits genügend hohe Injektionsraten gewährleistet werden, ggf. mittels hydraulischer Stimulation. Andererseits darf der Injektionsdruck in dem

eigentlichen Speicherhorizont nicht zum weiteren Hydraulic Fracturing führen, um die allseitige Abdichtung des Speicherraums nicht zu gefährden (z. B. Fishedick 2005, May et al. 2003).

Hieraus wird insgesamt deutlich, dass auch für diese Anwendungen der Technologie des Hydraulic Fracturing, vornehmlich im Hinblick auf die aktuell im besonderen Focus stehende CO₂-Speicherung, weiterer Forschungsbedarf besteht (siehe z. B. Cook 2006, Thomas & Benson 2005, Borm 2004).

3 Theoretische Ansätze und experimentelle Untersuchungen

Die Ausführungen im vorstehenden Kapitel belegen die aktuelle Bedeutung von Trennbrüchen in der Berg- und Ingenieurbaupraxis. Sie treten nicht nur in unterschiedlichen Teufen, Spannungsniveaus und Größenordnungen auf, sondern sind in Abhängigkeit der jeweiligen technischen Nutzung an verschiedenste Gesteinstypen gebunden. Das Spektrum erstreckt sich von spröden Kristallingesteinen über verschiedenartige Sedimentgesteine bis hin zu duktilem Steinsalz oder Steinkohle. Dabei gehen die Anforderungen an die nötigen geomechanischen Konzepte weit auseinander: So ist man in Fragen von Abschaltungen und Bergschlägen, der Instabilitäten bei Festgesteinsbohrungen oder der Integrität von Barrieregesteinen zum einen daran interessiert, das Trennbruchversagen hinreichend zu unterdrücken bzw. zu beherrschen, um das Schadens- und Gefährdungspotential zu minimieren. Andererseits ist das Verständnis der für Bohrungsinstabilitäten ursächlichen Spannungsverhältnisse verlangt, um aus ihnen die für Bauvorhaben im tieferen Untergrund essentielle Kenntnis des Gebirgsspannungszustandes ableiten zu können. Gleiches gilt für die In-situ-Spannungsmessung mittels der Hydro-Frac-Methode. Schließlich soll bei hydraulischen Stimulationen die Brucherzeugung in unterschiedlichen Gesteinsformationen und Teufen dergestalt forciert werden, dass gezielte, möglichst orientierte Bruchergebnisse steuerbar sind, um genügend große Permeabilitäten zur Förderung und Speicherung verschiedener Medien zu schaffen.

Es wird deutlich, dass die konventionellen Methoden einer zuverlässigen Erklärung und Prognostizierung des Trennbruchversagens unter verschiedensten Anwendungsbedingungen nicht genügen und zum Verständnis der Splitting-Mechanismen sowie zur Ableitung entsprechender Bruchkriterien experimentelle Untersuchungen unabdingbar sind (vgl. u. a. Brown & Trollope 1967, Gudehus 1974, Stacey & Jongh 1977, Mühlhaus 1980, Engelder 1999, Mandl 2000, Alber & Heiland 2001 b, Bahat et al. 2005, Paterson & Wong 2005).

3.1 Experimentelle Stimulation von Trennbrüchen

Die grundlegende Unterscheidung von Trennbruch- und Scherbruchversagen ergibt sich zum einen bereits aus dem Deformationsmuster. Andererseits zeigt sich jedoch auch, dass ein Zusammenhang zur Versuchstechnik besteht (Abb. 7). Das Auftreten von Trennbrüchen wird aufgrund der wesensgemäßen Relativbewegung der Bruchöffnung normal zur Bruchfläche und der entsprechenden Bruchausbildung zunächst an das Vorhandensein von Zugspannungen (hier i. S. Minimalspannungen mit negativem Vorzeichen) geknüpft.

Eine versuchstechnische Realisierung und messtechnische Erfassung gleichförmiger Zugspannungen innerhalb einer Gesteinsprobe gestaltet sich aufgrund der nötigen Anbindebedingungen schwierig. Insbesondere für Gesteinsmaterialien ist die Anwendung direkter

Zugversuche (Abb. 7d) problematisch, so dass sich indirekte Methoden zur laborativen Bestimmung der Zugfestigkeit etabliert haben.

Bei diesen simplifizierten Versuchsanordnungen wird durch eine meist einaxiale kompressive Einspannung der Probe eine indirekte Zugspannung induziert. Ungeachtet der problemlosen Handhabung sind die Spannungsbedingungen komplex und deren analytische Lösung an bestimmte Voraussetzungen geknüpft, wie z. B. isotrope homogene Proben, ideal-elastisches sprödes Materialverhalten und eine im Zentrum beginnende Rissbildung (vgl. z. B. Brown & Trollope 1967, Jaeger & Cook 1979, Pahl 1985, Andreev 1995).

Standardmäßig wird die einaxiale indirekte Zugfestigkeit im sog. Brazilian-Test resp. Spaltzugversuch bestimmt. Ein liegender Kreiszyylinder wird durch eine Linienlast auf die Mantelfläche diametral zusammengedrückt, woraus im Zentrum indirekt eine Zugspannung resultiert (Pahl 1985, Bieniawski & Hawkes 1978). So entsteht ein Trennbruch in Richtung der kompressiven Krafteinleitung entlang der Zylinderlänge (auch: *Zugbruch*, *tensile/diametral frac / split*), senkrecht zur Zugspannung (Abb. 7e).

Trennbrüche lassen sich allerdings auch bei einaxialer Kompression beobachten (Abb. 7a). Bei einaxialer Kompression eines stehenden geraden Kreiszyinders wird so eine lateral zur Zylinderachse wirkende Zugspannung induziert, die zu Trennbrüchen in Richtung der axialen Belastung (*axial / longitudinal / columnar splitting(s) / cleavage*) normal zur Richtung der Zugspannung bzw. kleinsten Hauptspannung führt (u. a. Gramberg 1965, Fairhurst & Cook 1966, Brown & Trollope 1967, Wawersik & Fairhurst 1970, Holzhausen & Johnson 1979, Horii & Nemat-Nasser 1985, Andreev 1995, Bahat et al. 2001, Wong et al. 2002). Die zum Trennbruch nötige Axiallast ist hierbei erfahrungsgemäß geringer als beim Scherbruchversagen, aber größer als die einaxiale indirekte Zugfestigkeit. Die Bruchoberflächen lassen keinerlei Anzeichen für Scherung erkennen.

Zum Standardbruchmodus im einaxialen Kompressionsversuch finden sich unterschiedliche Ansichten in der Fachliteratur (vgl. z. B. Jaeger & Cook 1979, Nicolas 1986, Andreev 1995, Mandl 2000). Einerseits werden Trennbrüche unter allseitigen Druckspannungen als paradoxe Ausnahmeerscheinung angesehen und auf lokale innere Zugspannungen zurückgeführt (s.o.). Andererseits wird diese Versuchstechnik zur Untersuchung des Trennbruchverhaltens herangezogen (s. d. Andreev 1995, Mandl 2000, Bahat et al. 2005).

Als kontrollierende Faktoren der letztendlichen makroskopischen Bruchausbildung gelten Oberflächen- und Volumeneffekte, insbesondere Endflächenreibung und Schlankheitsmaß. Trennbrüche sind zumeist an eine eliminierte Endflächenreibung gebunden. Entsprechend existieren standardisierte Versuchskonventionen (Bieniawski & Bernede 1979a, Mutschler 2004), die gemeinhin in Scherbruchversagen resultieren. Dennoch sind bei dieser Versuchsart häufig Mischformen von Trenn- und Scherbrüchen zu verzeichnen (Jaeger & Cook 1979, Mutschler 2004).

Konsens besteht in der Fachliteratur darin, dass im triaxialen Kompressionsversuch bereits mit geringsten Seitendrücken (d. h. Minimalspannung wenig größer Null) Trennbruchversagen unterdrückt wird und Scherbruchversagen eintritt (Abb. 7 oben).

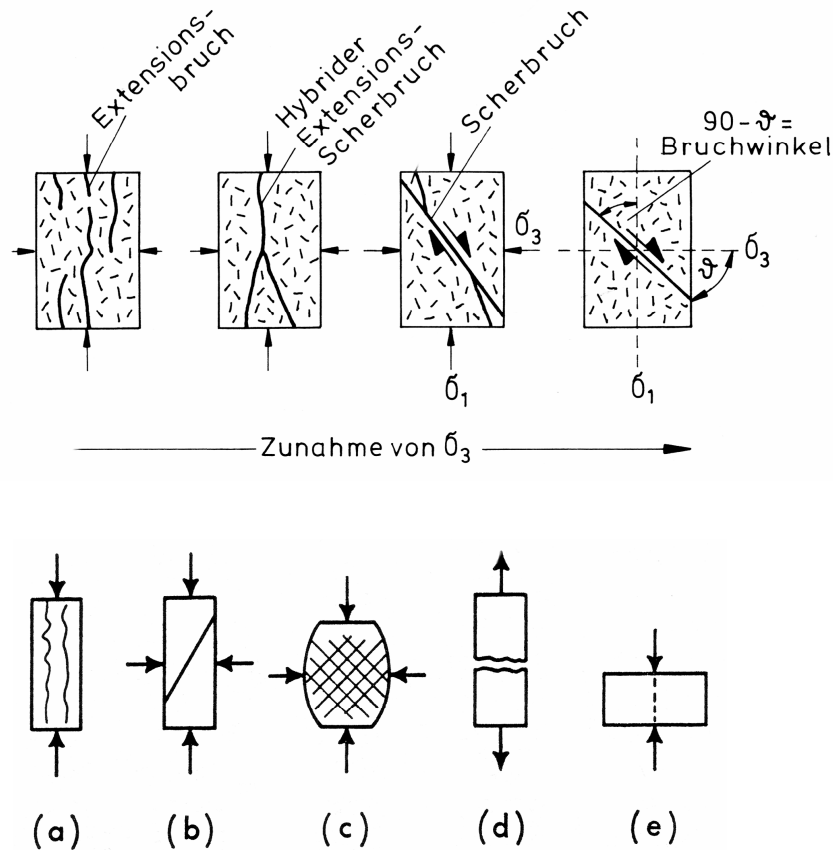


Abb. 7: Vorstellungen zum Zusammenhang von Bruchmechanismus, Bruchtyp und Versuchstechnik: Das (mögliche) Auftreten von Trennbrüchen im einaxialen Kompressionsversuch (oben: *Extensionsbruch*, unten (a): *axial splitting*) geht mit zunehmendem Seitendruck ($\sigma_2 = \sigma_3$) im triaxialen Kompressionsversuch über die Ausbildung von Mischformen (oben) zum Scherbruchversagen (unten: b, c) über. Der veränderliche Versagensmechanismus zwischen beiden „Endgliedern“ wird neben der unterschiedlichen Bruchöffnung und Ausbildung der Bruchoberflächen anhand der steigenden Bruchwinkel deutlich (oben). Angedeutet ist zudem eine der Makrobruchausbildung zugrunde liegenden Mikrorissentwicklung. Typischer Weise entstehen Trennbrüche im einaxialen direkten Zugversuch (unten: d) oder im Brazilian- bzw. Spaltzugversuch (unten: e) normal zur Richtung der größten Zugspannung. (oben: Eisbacher 1996, unten: Jaeger & Cook 1979)

In der Gesteinsmechanik gehören heute triaxiale Kompressionsversuche (Kovari et al. 1983, Pahl 1979) zur Simulation des Gesteinsverhaltens möglichst unter In-situ-Bedingungen zum Stand von Wissenschaft und Technik. Die den Scherbruchprozess beeinflussenden Faktoren sind experimentell gut untersucht. Das Materialverhalten bei Kompression wird entscheidend von Spannungsniveau und Porenflüssigkeitsdruck kontrolliert. Wesentlichen Einfluss üben zudem Verformungs- bzw. Belastungsrate (Zeitabhängigkeit), Temperaturbedingungen,

Größe und Geometrie der Proben oder Anisotropieeffekte aus (s. d. Jaeger & Cook 1979, Pinto da Cunha 1993, Lempp 1994, Lockner 1995, Andreev 1995, Stavrogin & Tarasov 2001, Brady & Brown 2004, Trautwein & Huenges 2005, Paterson & Wong 2005, etc.).

Aus der Analyse des Scherbruchversagens in ein- und triaxialen Kompressionsversuchen an verschiedenen Gesteinsarten wird geschlossen, dass die makroskopischen Scherbrüche generell durch Koaleszenz von Mikrorissen entstehen (Abb. 7 oben). Die Mikrorissausbildung spiegelt sich im Spannungs-Verformungs-Verhalten wider und geht mit Veränderungen verschiedener geophysikalischer Parameter und Emissionen von Schallwellen einher.

Die simultan zur Deformation erfassten Konduktivitätseigenschaften (z. B. elektrische Leitfähigkeit, Permeabilität, Ultraschallwellengeschwindigkeit) oder Schallemissionen liefern zusammen mit den Messgrößen Spannung und Verformung Erkenntnisse zu verschiedenen Phasen der Mikrorissentwicklung von der Initiierung, über das fortschreitende Wachstum, zur Koaleszenz der Rissindividuen bis zum Makro-Bruchversagen (z. B. Zhu & Wong 1997, Heiland & Raab 2001, Bahat et al. 2002, Rabinovitch et al. 2003, Diederichs et al. 2004). Die Mikrorissentwicklung wird zunächst von Zugrissen dominiert. Das Risswachstum erfolgt bevorzugt parallel zur Richtung der maximalen Kompression mit einer normal zur Minimalspannung orientierten Rissöffnung und setzt erheblich unterhalb der Peakfestigkeit ein. Mit fortschreitender Beanspruchung bildet sich schließlich infolge instabilen Mikrorisswachstums aus dem Zusammenspiel von Zugrissen und Scherrissen der Makrobruch aus (vgl. z. B. Fairhurst & Cook 1966, Brace et al. 1966, Hallbauer et al. 1973, Tapponnier & Brace 1976, Martin & Chandler 1994, Reches & Lockner 1994, Eberhardt et al. 1999, Heiland 2003, Stanchits et al. 2006).

Demnach besitzen Trennbruch- und Scherbruchversagen Gemeinsamkeiten ihrer zugrunde liegenden Mikrorissausbildung. Auf Unterschiede des Mikrorisswachstums unter einaxialen und polyaxialen Spannungsbedingungen verweisen z. B. Kawakata & Shimada (2000) und Sahouryeh et al. (2002).

Experimentelle Untersuchungen des Trennbruchversagens im triaxialen Spannungszustand stellen hohe versuchstechnische Anforderungen und sind daher deutlich unterrepräsentiert (vgl. z. B. Haimson 2006, Paterson & Wong 2005, Bahat et al. 2005, Brady & Brown 2004, Rowe 2001, Mandl 2000, Engelder 1999). Versuchsdaten und theoretische Ableitungen beruhen fast ausschließlich entweder auf Testapparaturen mit einaxialen Spannungszuständen (s.o.) und können somit nur bedingt Splitting-Bedingungen in dreidimensionaler Betrachtung simulieren, und / oder sie führen aufgrund sehr spezieller geometrischer Versuchsaufbauten zu komplexeren, inhomogenen Spannungsbedingungen.

Hierzu zählen Ringtests, Brazilian-Versuche, Confined-Brazilian-Tests oder Modified-Tension-Tests (s. d. z. B. Jaeger & Hoskins 1966a, b, Andreev 1995, Blümel 2000, Plinninger et al. 2003). Darüber hinaus verfolgen beispielsweise Deformationsexperimente an Hohl-

zylindern oder an gelochten Scheiben bzw. Platten und Laborversuche zum Bohren in triaxial vorgespanntes Material (u. a. Jaeger & Cook 1963, Obert & Stephenson 1965, Jaeger & Cook 1979, Ewy & Cook 1990a, b, Müller 1990, Behrmann & Elbel 1991, Schmitt & Zoback 1992, Venet et al. 1993, Kutter & Rehse 1996, Haimson 1997, Martin 1997, Kong 2000, Klaetsch & Haimson 2001, Cuss et al. 2003) das Ziel, im Modellversuch spezifische Problemstellungen, wie Auflockerungen (z. B. Abschaltungen, Ausbrüche) im Saumbereich von Hohlraumbauten, Entspannungsbohrereffekte (bzgl. Bergschlägen) oder Bohrkern- und Bohrlochinstabilitäten (z. B. Core-Disking, Bohrlochwandausbrüche), zu analysieren.

Das von Bridgman (1912) benutzte „Pinching-off“-Experiment zur Untersuchung der Bruchmechanismen an Proben aus Stahl oder Glas bezweckt, unter einfachen Randbedingungen gleichförmige Extensionsbeanspruchung zu ermöglichen (Abb. 8). Dabei wird die Mantelfläche eines Kreiszylinders mit einem hydraulischen Druck P beaufschlagt ($P = \sigma_1 = \sigma_2$). Bei freier Lagerung der Endflächen S wird eine Dehnung resp. Extension in Richtung der Zylinderachse bewirkt (biaxiale Kompression: $\sigma_1 = \sigma_2 > S = \sigma_3 = 0$).

Diese Technik wurde auch für Gesteinsmaterial angewandt (s. d. Jaeger & Cook 1963, Jaeger 1963, Fumagalli 1966, Jaeger & Cook 1979). Die Probe kann dabei entweder ummantelt sein, so dass der Flüssigkeitsdruck P als radialer Manteldruck wirkt, oder bei fehlender Ummantelung erzeugt die Druckflüssigkeit gleichzeitig einen Porenfluiddruck innerhalb der Gesteinsprobe. Im letzteren Fall bilden sich meist mehrere diametrale Trennbrüche zwischen den Endflächen aus, die zu einer scheibenförmigen Zerlegung des Probenzylinders führen. Der dazu nötige Flüssigkeitsdruck P ist in der Größenordnung aber höher als die indirekte einaxiale Zugfestigkeit. Sind die Proben gegen die Druckflüssigkeit isoliert, entstehen die Trennbrüche (*diametral / transversal splittings*) bei einem Manteldruck P in der Größenordnung der einaxialen Druckfestigkeit. Die Brüche konzentrieren sich hierbei auf den Bereich der Endflächen.

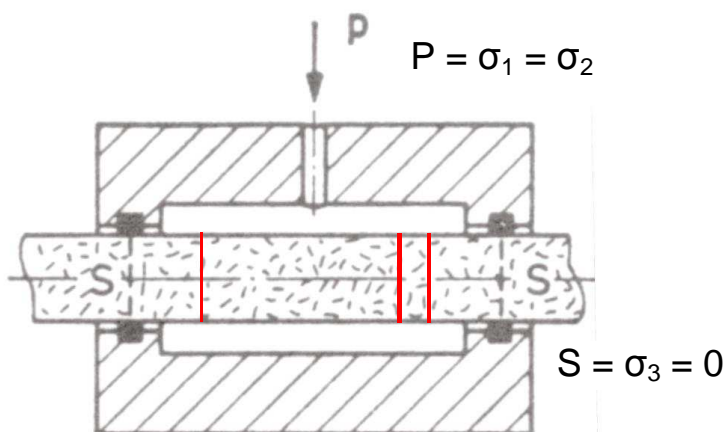


Abb. 8:
Bridgmans „Pinching-off“-
Experiment:

P bewirkt als Flüssigkeitsdruck auf die Mantelfläche einer kreiszylindrischen Probe eine axiale Längung bei freier Lagerung der Endflächen S . Bei ummantelten Gesteinsproben entstehen die Trennbrüche (*transversal / diametral splittings*) zumeist in der Nähe der Endflächen S .

(Bridgman 1912, Abb. modifiziert nach Jaeger & Cook 1979)

Engelder (1999) verweist auf die außerordentliche Schwierigkeit experimenteller Untersuchungen zum Spröbruchverhalten abseits des Scherbruchversagens, d. h. unter Zugbeanspruchung im triaxialen Druck-Spannungszustand. Er sieht die einzigen laborativen Anhaltspunkte in den Experimenten von Brace (1964) mit insgesamt 15 triaxialen Extensionsversuchen an so genannten Hundeknochen-förmigen axialsymmetrischen Prüfkörpern unterschiedlicher Gesteinsarten (u. a. Granit, Quarzit, Dolomit). Darüber hinaus hat beispielsweise Hunsche (1993) diese Versuchstechnik an Steinsalzproben angewandt.

Hierbei wird ebenso wie beim „Pinching-off“ eine ummantelte rotationssymmetrische Probe mit einem Radialdruck beaufschlagt. Aufgrund der speziellen Geometrie der präparierten konkaven Mantelfläche wird allein aus der Einwirkung des radialen Seitendrucks im Zentrum des „Hundeknochens“ eine axiale Zugspannung hervorgerufen (Abb. 9 rechts oben). Die resultierende axiale Spannung ergibt sich aus dieser Komponente und einer etwaigen äußeren axialen Zusatzlast (Jaeger & Cook 1979).

Ohne äußere Zusatzlast verläuft der Versuch wie beim „Pinching-off“ als biaxiale (radiale) Kompression. Hierbei erfolgt allerdings die Extension der Probe in Axialrichtung bei Steigerung der Radialspannung mit betragsmäßig steigender Zugspannung ($\sigma_3 < 0$). Mit einer zusätzlichen äußeren Axiallast wird die axiale Extension ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand durch eine in der Regel kontinuierliche axiale Entlastung bei konstantem Seitendruck erreicht. Die Axialspannung kann dabei den Bereich negativer (Zug) bis positiver (Druck) Minimalspannungen abdecken.

Diskutiert wird in diesem Zusammenhang das Auslösen eines Teils der Trennbruchphänomene unter der Einwirkung des Seitendrucks bzw. der Probenummantelung in Form so genannter *intrusion fractures*, die von so genannten *internal fractures* ohne Einwirkung über die Mantelfläche zu unterscheiden seien (s. d. z. B. Paterson & Wong 2005, Mandl 2000, Jaeger & Cook 1979).

Jüngste experimentelle Daten hierzu liefern Ramsey & Chester (2004). Wie Engelder (1999) sehen sie in Trenn- und Scherbrüchen die Endglieder eines Spröbruchspektrums (Abb. 7). Mit Hilfe von insgesamt 31 Triaxialversuchen im Extensionsregime an Hundeknochen-förmigen Marmorproben zeigen Ramsey & Chester (2004), dass ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand bei kontinuierlicher Axialentlastung bis in den Bereich negativer Minimalspannungen (Zugspannungen) ein Übergang von Trenn-, über Hybrid- zu Scherbrüchen mit steigenden Durchschnittsspannungen erfolgt (Abb. 9). Die verwendeten Prüfkörper haben ein relativ geringes Volumen von ca. 90 cm^3 . Die Extensionsgeschwindigkeit in axialer Richtung ist mit $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ vergleichsweise hoch.

Die drei Bruchformen grenzen sie insbesondere anhand ihrer Deformationsmuster, d. h. Oberflächenbeschaffenheit und Bruchwinkel, ab. Die Trennbrüche sind dabei durch konstante Bruchwinkel um etwa 2° und konstante Minimalspannungen von ca. -8 MPa bei sukzessiver

Erhöhung der größten Hauptspannung von 7,5 MPa bis 60 MPa gekennzeichnet. Mit weiterer Steigerung der Radialspannung ergeben sich zunächst abnehmende und schließlich ansteigende Minimalspannungen bei stetig anwachsenden Bruchwinkeln bis ca. 22°. Im Bereich negativer Minimalspannungen weisen die Deformationsmuster die erzeugten Bruchformen als Hybridbrüche, mit positiven Minimalspannungen als Scherbrüche aus.

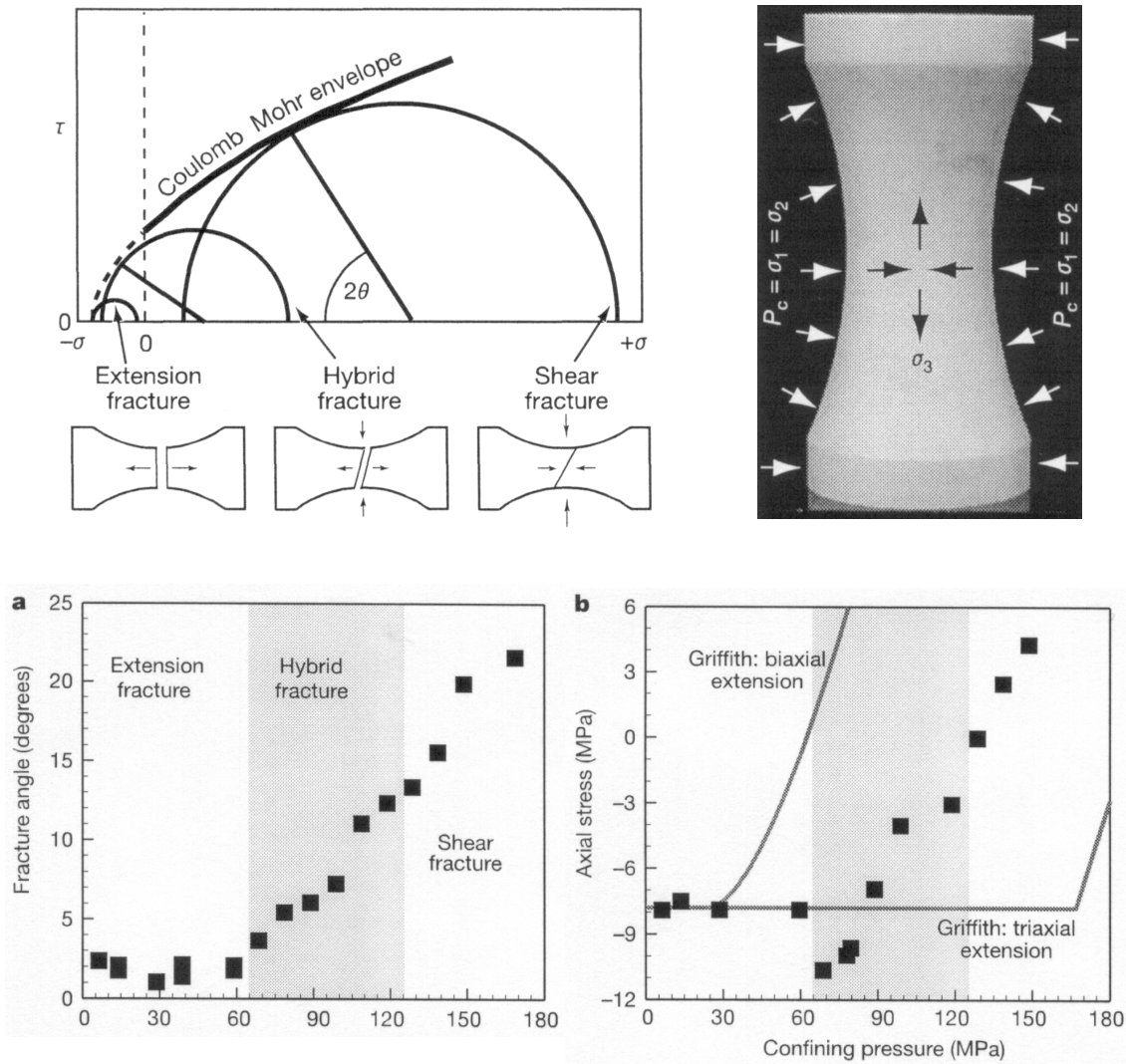


Abb. 9: Triaxialer Extensionsversuch an sog. Hundeknochen-förmigen Prüfzylindern zur Realisierung axialer Zugspannung im Zentrum der Probe als Funktion des radialen Manteldrucks (aus Ramsey & Chester 2004):

Die Mohrschen Spannungskreise (*links oben*) veranschaulichen die Spannungszustände für Extensions- (bzw. Trenn-), Hybrid- und Scherbrüche sowie die Hypothese eines kontinuierlichen Übergangs, welchen Ramsey & Chester (2004) nur z.T. bestätigt sehen.

Man beachte, dass die beschriebene Versuchstechnik bzw. Spannungsgeometrie (*rechts oben*) nicht den dargestellten Spannungszustand für Extensionsbrüche (*links oben*) realisiert, sondern vielmehr jenen für Hybridbrüche (konträre Vorzeichen für extensive axiale Zugspannung und kompressive Radialspannung).

Die beiden Diagramme (*unten*) zeigen die Abhängigkeit des Bruchwinkels und der axialen Minimalspannung beim Bruch von der Radialspannung und die Zuordnung zu den drei Bruchtypen. Dabei sind ein deutlich sprunghafter Wechsel zwischen Extensions- und Hybridbrüchen und ein kontinuierlicher Übergang von Hybrid- zu Scherbrüchen zu erkennen.

Im Hinblick auf die Beziehung der Bruch-Minimalspannung sowie des Bruchwinkels zur größten Hauptspannung heben sich die Trennbrüche deutlich ab (Abb. 9 unten). Hybrid- und Scherbruch unterscheiden sich voneinander lediglich in ihrer Oberflächenbeschaffenheit. Somit können sie die Hypothese eines kontinuierlichen Übergangs (Abb. 9 links oben) lediglich für Hybrid- und Scherbrüche belegen.

Die gleiche Versuchstechnik benutzt Hunsche (1993) für Steinsalzproben im Bereich niedriger mittlerer Spannungen. Wie bei Ramsey & Chester (2004) ist auch hier ein markanter Wechsel der Bruch-Minimalspannungen mit zunehmender radialer Einspannung festzustellen. Im Bereich negativer Minimalspannungen liegen mit anwachsenden Radialspannungen zunächst betragsmäßig steigende Bruch-Zugspannungen vor. Mit höheren Ausgangsniveaus isostatischer Spannungen erfolgt schließlich eine stetige Verringerung der Bruch-Zugspannungen resp. ein Ansteigen der Bruch-Minimalspannung. Das ausschließlich beobachtete Trennbruchversagen liegt auch unter allseitig positiven (d. h. Druck-) Spannungen vor.

In ihren Ergebnissen stimmen Ramsey & Chester (2004), Engelder (1999) und Hunsche (1993) dahingehend überein, dass das mit dieser Versuchstechnik erzeugte Bruchverhalten hinsichtlich der resultierenden Bruchspannungen und gemessenen Bruchwinkel von den Vorstellungen der Mohr-Coulombschen Festigkeitshypothese abweicht, und zwar für die verschiedenen Bruchtypen und Gesteinsarten in divergierender Weise. Im Gegensatz zu den Resultaten von Ramsey & Chester (2004) kann Hunsche (1993) unter vergleichbaren Spannungsverhältnissen in Extensionsversuchen an duktil reagierendem Steinsalz keinen Übergang der Bruchtypen von Trennbruch- zu Scherbruchversagen mit steigenden Durchschnittsspannungen feststellen.

Vereinzelte Veröffentlichungen experimenteller Untersuchungen mit Hilfe triaxialer Extensionsversuche an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern unter allseitigen Druckspannungen fokussieren vornehmlich auf Fragen der Permeabilitätsentwicklung verschiedener Festgesteinsarten als Funktion der Mikrorissentwicklung (Holt 1990, Zhu & Wong 1997, Zhu et al. 1997, Braun & Jahns 1998, Popp et al. 2001, Lomo-Appeyh et al. 2002, DeVries et al. 2002). Da eine Bestimmung der nicht-skalaren Transporteigenschaften im Triaxialversuch grundsätzlich entlang der Zylinderachse erfolgt, ist die Beurteilung ihrer Abhängigkeit von der Spannungsgeometrie an den Vergleich zwischen Kompressionsversuch (größte Hauptspannung in Axialrichtung) und Extensionsversuch (Minimalspannung in Axialrichtung) gebunden.

Diese laborativen Untersuchungen widmen sich speziellen Problemstellungen, wie beispielsweise der spannungsabhängigen Permeabilität von Reservoirgesteinen bei der

Förderung von Kohlenwasserstoffen oder der mechanisch-hydraulischen Eigenschaften zur Integritätsbewertung von Barrieregesteinen im Speicher- und Deponiebau (s. Kap. 2).

Aus diesem Grund ergeben sich hieraus nur wenige Erkenntnisse zum allgemeinen (Trenn)-Bruchverhalten von Festgesteinen. Die in diesem Zusammenhang beispielsweise von Zhu et al. (1997) peripher erwähnten Brüche an Sandsteinproben sublateral bis schräg zur Zylinderachse (Prüfzylinder 20 x 40 mm) deklarieren sie als Scherbrüche. Aus Untersuchungen an Steinsalzmaterial ist zu entnehmen, dass sich bezogen auf die größte und kleinste Hauptspannung die Ergebnisse zur Mikrorissbildung und Festigkeit zwischen den beiden Spannungsverhältnissen Extension und Kompression annähernd gleichen (z. B. Popp et al. 2001, Lomo-Appeyh et al. 2002).

Es ist mittlerweile anerkannt, dass die Bruchfestigkeit von Gesteinen auch von der mittleren Hauptspannung beeinflusst wird. Strittig ist allerdings die Relevanz dieser Einflussgröße. So ignoriert die weithin angewandte Mohr-Coulombsche Festigkeitshypothese eine solche Abhängigkeit (vgl. Paterson & Wong 2005, Mandl 2000, Andreev 1995, etc.). Die uneinheitliche Herangehensweise (s. d. z. B. Yi et al. 2006, Haimson 2006) ist wiederum auf die laborativ-experimentellen Möglichkeiten und versuchstechnischen Rahmenbedingungen zurückzuführen.

Im Triaxialversuch an zylindrischen Proben beispielsweise ist die mittlere Hauptspannung betragsmäßig stets mit einer der beiden übrigen Hauptspannungen identisch, so dass zwischen der Spannungsgeometrie Kompression und Extension zu differenzieren ist (s. Abb. 11). Versuchstechnische Beschränkungen echter Triaxialversuche (polyaxial) an würfelförmigen Prüfkörpern (s. Abb. 10) sind z. B. die Probengröße, der Bereich geringer Minimalspannungen oder Grenzen möglicher Spannungsverhältnisse (s. u. a. Haimson 2006, Yi et al. 2006, Hunsche 1993). Darüber hinaus verweisen Paterson & Wong (2005) auf die Bedeutung von Anisotropieeffekten und insbesondere den Bruchmodus bei der Bewertung der ermittelten Bruchspannungen im Bezug auf das herrschende Spannungsregime bzw. die vorliegende Spannungsgeometrie.

Für verschiedene Gesteinsarten lassen sich der Literatur unterschiedliche Experimentalergebnisse hinsichtlich der Abhängigkeit der Bruchfestigkeit von der mittleren Hauptspannung und den damit einhergehenden unterschiedlichen makroskopischen Brucherscheinungen entnehmen (vgl. z. B. Haimson 2006, Paterson & Wong 2005, Lomo-Appeyh et al. 2002, Critescu & Hunsche 1998).

3.2 Theoretische Ansätze

Infolge der oben beschriebenen eingeschränkten Datenlage experimenteller Untersuchungen gehen die Vorstellungen über die den Splitting-Prozess kontrollierenden Bedingungen weit auseinander. Abgesehen von analytischen Lösungsansätzen für spezielle Fragestellungen wie Bohrunstabilitäten, Bergschläge etc. (s. o.) reichen die Konzepte von der Formulierung kritischer Spannungsbedingungen über den Ansatz kritischer Verformungen auf Basis der Elastizitätstheorie bis hin zu Deformationskriterien auf Basis der Plastizitätstheorie.

Auf die Bedeutung von Kenntnis und Verständnis der Bruchmechanismen für die Wahl der Bruchkriterien zur Einschätzung geomechanischer Fragestellungen insbesondere im Hinblick auf Bruchphänomene abseits des Scherbruchs verweisen beispielsweise Brown & Trollope (1967), Stacey (1981), Engelder (1999), Mandl (2000) oder Paterson & Wong (2005) anhand verschiedener laborativer oder in-situ Beispiele (s. o.).

Brown & Trollope (1967) haben charakteristische Ergebnisunterschiede bei der Bestimmung der Zugfestigkeit auf Basis verschiedener zumeist einaxialer und biaxialer Versuchstechniken diskutiert. Mit Hilfe ihrer „effective-tensile-stress“-Theorie zeigen sie auf, dass sich die unterschiedlichen Messergebnisse zwischen den Versuchsmethoden, wie z. B. Brazilian-Versuch, Ringtest oder einaxialer Kompressionsversuch, auf übereinstimmende tatsächlich wirksame, lokale Zugspannungen zurückführen lassen. Demnach bestimmen aus der äußeren Beanspruchung resultierende Inter-Partikel-Spannungen auf mikrostruktureller Ebene das makroskopische Bruchverhalten der Gesteinsmaterialien. Diese definieren sie im dreidimensionalen Hauptspannungsraum auf Basis der Elastizitätstheorie zu:

$$\begin{aligned}\sigma_1' &= \sigma_1 - \nu'(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \sigma_2' &= \sigma_2 - \nu'(\sigma_1 + \sigma_3) \\ \sigma_3' &= \sigma_3 - \nu'(\sigma_1 + \sigma_2)\end{aligned}\tag{1}$$

mit :

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 =$ Hauptspannungen,

$\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3' =$ "effective tensile stresses"
(tatsächlich wirksame Inter - Partikel - Spannungen),

$\nu' =$ bei ideal - elastischem Material : Poissonzahl ν

Gleichsam wird hieraus ersichtlich, dass diese Inter-Partikel-Spannungen in Form lokaler Zugspannungen (negative Vorzeichen) auch unter allseitigen Druckspannungen (positives Vorzeichen) möglich sind. Dies erklärt das Auftreten von Trennbuchversagen beispielsweise im einaxialen Kompressionsversuch oder im Bridgman-Experiment (s. o.).

Bezogen auf das Beispiel von Bruchversagen parallel zur Richtung der größten Hauptspannung unterhalb der prognostizierten Festigkeit gemäß der Mohr-Coulombschen Festigkeitshypothese erklärt Stacey (1981) das Auftreten von Trennbrüchen unter äußerer allseitiger Druckbeanspruchung mit dem Überschreiten einer materialspezifischen kritischen Extensionsdehnung $\varepsilon_{\text{critical}}$ („critical extension strain“) unabhängig vom Betrag lokal wirksamer Zugspannungen.

Die Brüche entstehen in der Ebene normal zur Richtung der Extensionsdehnung, die mit der Richtung der kleinsten Hauptspannung übereinstimmt. Nach Stacey (1981) wird Bruchversagen initiiert, wenn die Extensionsdehnung einen kritischen materialspezifischen Wert erreicht bzw. übersteigt, d. h. $\varepsilon_3 \geq \varepsilon_{\text{critical}}$.

Für isotropes ideal-elastisches Materialverhalten gilt nach dem Hookeschen Gesetz folgender Zusammenhang zwischen Spannungszustand und Verformung in Richtung Minimalspannung:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)}{E}$$

mit :

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = \text{Hauptspannungen}, \quad (2)$$

$$E = \text{Elastizitätsmodul},$$

$$\nu = \text{Poissonzahl}$$

Bei positivem Vorzeichen für Druckspannungen wird ε_3 (Formel 2) zur Extensionsdehnung (negatives Vorzeichen), wenn gilt:

$$\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) < 0 \quad (3)$$

Für linear-elastisches Materialverhalten entspricht diese Betrachtung der „effective-tensile-stress“-Theorie (Formel 1), d. h. auch hier wird berücksichtigt, dass Trennbruchversagen auch bei allseitiger Druckbeanspruchung und somit positiven Minimalspannungen auftreten kann.

Den kritischen Wert der Extensionsdehnung bestimmt Stacey (1981) aus dem Verlauf von Axial- und Radialdeformation im einaxialen oder triaxialen Kompressionsversuch. Die Rissbildung setzt demnach an dem Punkt ein, an dem die Kurve vom linearen Verlauf abweicht (vgl. Kap. 3.1). Der zugehörige Wert der Radialdeformation wird als kritische Extensionsdehnung des gestesteten Gesteinstyps definiert.

Die in einaxialen und triaxialen Kompressionsversuchen ermittelten kritischen Extensionsdehnungen korrespondieren mit einem Spannungsbereich von etwa 30% der einaxialen Druckfestigkeit im konventionellen einaxialen Kompressionsversuch. Stacey (1981) räumt

ein, dass die Anwendung seines Bruchkriteriums auf Spröbruch unter geringen Umschließungsdrücken begrenzt ist.

Mit Hilfe der Plastizitätstheorie wird das Einsetzen von Splitting am Beispiel von Bohrlochwandausbrüchen oder Core-Disking subparallel zur freien Oberfläche in Abhängigkeit einer kritischen dilatanten plastischen Volumenänderung beschrieben (Lempp & Mühlhaus 1985, Vardoulakis & Mühlhaus 1986), ausgedrückt durch den Dilatanzwinkel. In der Axialsymmetrie kreiszylindrischer Gesteinsproben im Triaxialversuch ergibt sich der Dilatanzwinkel (β) zu:

$$\tan \beta = \frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta \gamma_p} = \frac{\sqrt{3}(\Delta \varepsilon_l + 2\Delta \varepsilon_q)}{2(\Delta \varepsilon_q - \Delta \varepsilon_l)}$$

mit :

$\varepsilon_l =$ axiale Verformung, $\varepsilon_q =$ radiale Verformung,

$$\gamma_p = \frac{2}{\sqrt{3}}(\varepsilon_q - \varepsilon_l)$$

(4)

Dieser Dilatanzwinkel (β) ist im Spannungsregime Extension kleiner (ca. 41°) als im Kompressionsfall (ca. 60°). Entsprechend diesem Konzept führen Spannungszustände unterhalb der Scherbruchfestigkeit zum Bruchversagen in Form von Trennbrüchen, wenn der entsprechende Dilatanzwinkel überschritten wird.

Gemäß den vorstehenden Ausführungen wird – vornehmlich gestützt auf experimentelle Befunde im einaxialen und triaxialen Kompressionsversuch – allgemein davon ausgegangen, dass mit steigender Minimalspannung die Ausbildung von Trennbrüchen unterdrückt wird, d. h. mit zunehmendem isostatischen Spannungsanteil resp. steigendem Spannungsniveau ein Übergang von Trennbruch- zu Scherbruchversagen stattfindet (s. d. z. B. Jaeger & Cook 1979, Andreev 1995, Mandl 2000, Paterson & Wong 2005).

In Übereinstimmung mit dem Konzept von Brown & Trollope (1967) wird das Trennbruchphänomen unter allseitigen Druckspannungen auf innerhalb des beanspruchten Festgesteins lokal induzierte Zugspannungen zurückgeführt (vgl. u. a. Mandl 2000, Paterson & Wong 2005). Diese werden ursächlich im Zusammenhang mit verschiedenen mikromechanischen Einzelprozessen in der Wechselwirkung von Mineralkörnern bzw. Gesteinspartikeln, Matrix und Poren bzw. Hohlräumen gesehen (s. d. z. B. Stacey 1981, Andreev 1995, Mandl 2000).

Ein mechanisches Gesamtkonzept, welches die Interaktionen im Zuge der Mikrorissentwicklung bis hin zur Makrobruchausbildung in Form von Scherbruch- oder Trennbruchversagen vollständig erfasst, existiert bislang nicht. Insofern ist fraglich, welche Bedingungen die letztendliche Bruchausbildung kontrollieren und wie ein solcher Übergang der makroskopischen Bruchtypen in Abhängigkeit der Minimalspannung bzw. des Spannungsniveaus erfolgen kann bzw. hinreichend zu prognostizieren ist (vgl. z. B. Mandl 2000, Bahat et al. 2005, Paterson & Wong 2005).

4 Methodik, Versuchstechnik und Probenmaterial

Aus den vorstehenden Darlegungen ist zusammenfassend zu schließen, dass grundsätzlich unter allseitiger Einspannung, also im triaxialen Spannungszustand, Scherung und Splitting nebeneinander auftreten können (Abb. 10). Die Trennbrüche

- bilden sich dabei in Richtung der größten und normal zur kleinsten Hauptspannung,
- zeigen keinerlei Anzeichen von Scherdeformation,
- treten oft in charakteristischem Abstand auf und
- sind sowohl in sprödem als auch viskoelastischem Material anzutreffen.

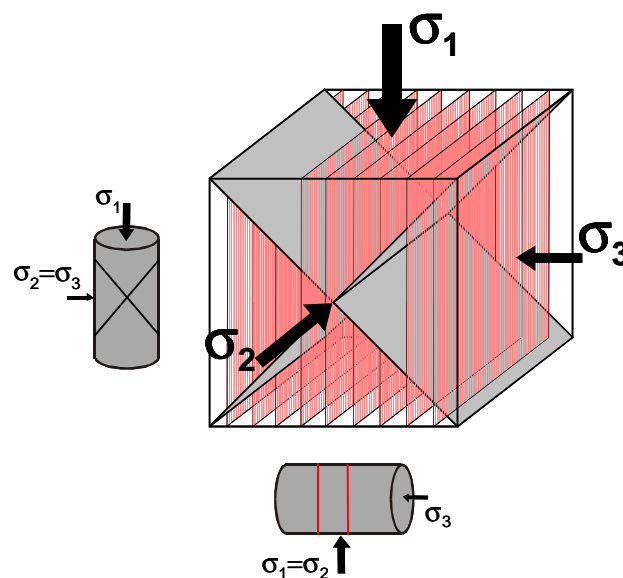


Abb. 10: Schematische Darstellung zum Nebeneinander von Splitting und Scherung im echten triaxialen (polyaxialen) Spannungszustand ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) und die laborative Umsetzung dieser Beanspruchung im Triaxialversuch an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern (σ_{axial} vs. σ_{radial}):

- triaxialer Kompressionsversuch (Kovari et al. 1983) mit $\sigma_{\text{axial}} = \sigma_1 > \sigma_{\text{radial}} = \sigma_2 = \sigma_3$ und
- triaxialer Extensionsversuch (z. B. Brady & Brown 2004) mit $\sigma_{\text{radial}} = \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_{\text{axial}} = \sigma_3$

Angesichts der Ausführungen der Kap. 2 und 3 verfolgt die vorliegende Arbeit das Konzept, dass sich in Analogie zum Bridgman-Experiment (Abb. 8) im triaxialen Extensionsversuch an rotations-symmetrischen Gesteinsprüfzylindern mit allseitiger Druckbeanspruchung unter bestimmten, zu analysierenden Bedingungen bzw. Gegebenheiten Trennbruchversagen erzeugen lässt.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Erläuterungen insbesondere hinsichtlich der existierenden laborativ-experimentellen Befunde verfolgen die hier gegenständlichen Untersuchungen den Ansatz, dass sich in Analogie zum Bridgman-Experiment (Kap. 3.1) Trennbruchversagen unter allseitiger Druckbeanspruchung (d. h. positives Vorzeichen) experimentell am sinnvollsten im sog. Triaxialversuch (z. B. Kovari et al. 1983, Rowe 2001, Brady & Brown 2004) stimulieren lässt.

Es wird erwartet, dass sich im Triaxialversuch Scherung und Splitting resp. Trennbruchversagen je nach Spannungsgeometrie bzw. Deformationsrichtung unter bestimmten Konstellationen der triaxialen Extensions- und Kompressionsversuche getrennt erzeugen lassen (Abb. 10 und 11).

Im Focus der vorliegenden Arbeit steht dabei einerseits die Relation zwischen den beiden grundsätzlich zu unterscheidenden Bruchtypen. Dabei wird zunächst mit Hilfe der experimentell stimulierten makroskopischen Bruchausbildung die Frage verfolgt, ob die vornehmlich aus Kompressionsbeanspruchung abgeleitete allgemeine Annahme eines Übergangs von Trennbruch- zu Scherbruchversagen mit steigendem Spannungsniveau (vgl. Kap. 3) mit Ergebnissen im triaxialen Extensionsversuch nachzuvollziehen ist bzw. welche Bedingungen die letztendliche Bruchausformung kontrollieren. Jene entsprechenden Bruchtyp-kontrollierenden Konstellationen sollen zum anderen der Charakterisierung des Trennbruchversagens und der Trennbruchfestigkeit von Festgesteinen unter triaxialen Spannungsbedingungen dienen, um schließlich Erkenntnisse hinsichtlich einer hinreichenden Festigkeitsprognose für Problemstellungen unter Beteiligung von Trennbruchversagen (vgl. Kap. 2) zu gewinnen. Die weitgehend übereinstimmenden geometrischen und versuchs-technischen Randbedingungen der beiden Versuchsarten triaxialer Kompression und triaxialer Extension bieten hierzu optimale Vergleichsmöglichkeiten.

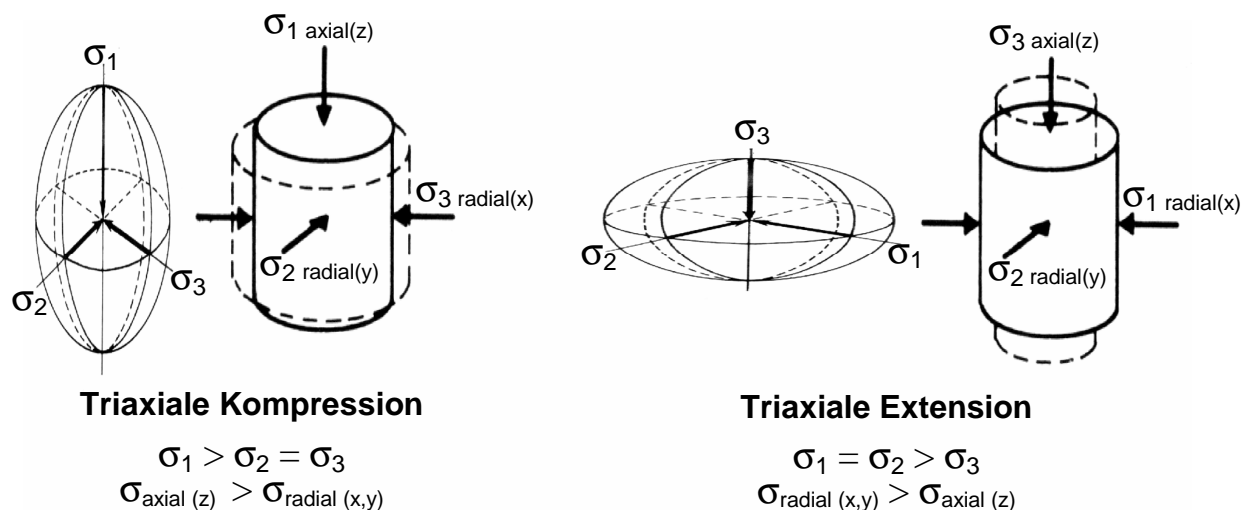


Abb. 11: Rotationssymmetrische, triaxiale Spannungs- und Verformungszustände im Triaxialversuch bei Spannungsgeometrie / Deformationsrichtung Kompression und Extension (Spannungsellipsoid und Zylinderdeformation):
 Ein gerader Kreiszylinder erfährt
links: im triaxialen Kompressionsversuch eine axiale Stauchung / Kompression und radiale Ausdehnung, wenn $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ist
rechts: im triaxialen Extensionsversuch eine axiale Längung / Extension und radiale Verkürzung (Einschnürung), wenn $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ist.
 (zusammengestellt und modifiziert nach Gudehus 1996 und Mattauer 1993)

Im Triaxialversuch wirken auf den ummantelten geraden Prüfzylinder radial zwei gleiche Hauptspannungen, indem die Mantelfläche mit einem hydraulischen Seitendruck beaufschlagt wird ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{\text{radial}}$). Ein Druckkolben erzeugt die axiale Belastung parallel zur Zylinderachse ($\sigma_z = \sigma_{\text{axial}}$). Zudem ist die Berücksichtigung eines Porenfluiddrucks möglich. Im Hinblick auf die Beträge resp. Richtungen der Hauptspannungen bezüglich der rotationssymmetrischen Prüfzylindergeometrie unterscheidet man zwischen den beiden Beanspruchungsarten (Last-/Spannungsgeometrie, Deformationsrichtung) Kompression und Extension (Abb. 10 und 11):

Der triaxiale Kompressionsversuch (Kovari et al. 1983, Pahl 1979) führt zu axialer Stauchung und radialer Querdehnung der Probe (Deformationsrichtung bzw. Spannungsgeometrie Kompression) und bei Überschreiten der materialspezifischen Festigkeit im Sprödbruchbereich in der Regel zu Scherbruchversagen (vgl. Kap. 3), wenn die größte Hauptspannung in Richtung der Zylinderachse wirkt, so dass $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Im triaxialen Extensionsversuch (z. B. Rowe 2001, Brady & Brown 2004, Paterson & Wong 2005) erfolgt eine axiale Längung des Probekörpers und radiale Verkürzung (Extensionsregime), wenn die größte Hauptspannung auf den Kreisumfang wirkt, so dass $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$. Unter Umständen treten dabei Trennbrüche normal zur Längsachse des Prüfzylinders auf. Es werden allerdings auch Scherbrüche beschrieben (s. Kap. 3).

Generell werden triaxiale Extensionsversuche an kreiszylindrischen Proben in der einschlägigen Fachliteratur als mit triaxialen Kompressionsversuchen adäquate und gleichrangige Versuchsmethode beschrieben, doch sind entsprechende Daten für Festgestein kaum veröffentlicht (Kap. 3). Dies ist im Zusammenhang mit einem hohen versuchstechnischen Aufwand und speziellen Schwierigkeiten der Versuchsdurchführung im Lastfall Extension zu sehen (s. d. z. B. Mühlhaus 1980, Lempp & Mühlhaus 1985, Engelder 1999, DeVries et al. 2002, Kolymbas 2005, s.a. Kap. 4.1 bis 4.3).

Der triaxiale Extensionsversuch unterliegt grundsätzlich den gleichen experimentellen Randbedingungen wie der triaxiale Kompressionsversuch, da sich beide lediglich in ihren Spannungsverhältnissen unterscheiden. Die äußerlich einwirkende triaxiale Belastung der geraden kreiszylindrischen Gesteinsprobe im Triaxialversuch gewährleistet unter bestimmten Voraussetzungen (Kovari et al. 1983, Pahl 1979) eine möglichst homogene axial-symmetrische Spannungsverteilung und insofern eine freie Bruchausbildung zwischen den Probenendflächen. Hierin unterscheidet sich diese Versuchstechnik von den oben beschriebenen verschiedensten einaxialen und biaxialen Versuchsanordnungen oder der triaxialen Extension an Hundeknochen-förmigen Versuchskörpern.

4.1 Funktionsschema triaxialer Extensionsversuch

Es ist davon auszugehen, dass für triaxiale Extensionsversuche prinzipiell die gleichen versuchstechnischen Überlegungen resp. Einschränkungen gelten wie im Kompressionsversuch, z. B. hinsichtlich der Spannungsverteilung, der Maßstabeffekte (Diskontinuitäten im Gebirgsmaßstab, Verhältnis Korngröße zur Probengeometrie) oder der Oberflächen- und Volumeneffekte (z. B. Einfluss Endflächenreibung zwischen Prüfkörper und Druckplatten, Spannungskonzentrationen an der Probenoberfläche) oder der Genauigkeit und Ausführung der Probenpräparation (Jaeger & Cook 1979, Pahl 1979, Kovari et al. 1983, Mutschler 2004). Die von außen angelegten, auf die Probe einwirkenden und regel- wie messbaren Drücke gelten im Bereich des Probenmaßstabs (Makrobereich) als äußerlich induzierte Spannungen. Diese verursachen im Gesteinsgefüge in Abhängigkeit der beteiligten Partikel und Hohlräume (Poren, Risse) innere Spannungen im Mikrobereich, die messtechnisch jedoch nicht erfassbar sind. Daher muss zur möglichst allgemeingültigen Auswertbarkeit der Mess- und Versuchsergebnisse ein zumindest äußerlich homogener Spannungszustand gewährleistet werden. Störeinflüsse, die von der Probenoberfläche ausgehen, können beispielsweise durch entsprechende Prüfkörpergeometrie reduziert werden, so dass sich im zentralen Bereich der Probe ein weitgehend ungestörter triaxialer Spannungszustand einstellen kann (z. B. Jaeger & Cook 1979, Kovari et al. 1983, Paterson & Wong 2005).

Daneben sind bei Extensionsdehnung der Proben zusätzliche Fragestellungen zu berücksichtigen. So ist auch bei geringsten axialen Spannungen ein ständiger Kontakt zwischen Druckkolben, Druckplatten und Probe zu gewährleisten, um die Einwirkung von radialer und axialer Spannungskomponente zu isolieren. Weiterhin steht die nötige Ummantelung der Probe zur Trennung von Mantel- und Porenfluiddruck im Konfliktfeld zwischen einerseits genügender Festigkeit gegen Perforation sowie etwaiger Spannungskonzentrationen an der Mantelfläche (vgl. Kap. 3.1) und andererseits möglichst hoher Dehnbarkeit in Axial- und Radialrichtung, um einen Einfluss des Beanspruchungswiderstands des Probenmantels auf die Versuchsergebnisse auszuschließen. Nicht zuletzt ist dies auch eine Frage des Kosten- und Arbeitsaufwandes.

Die zur Durchführung der Extensionsversuche am hiesigen Institut zur Verfügung stehende Triaxialzelle (Abb. 12) erlaubt die Regulierung der Drücke in axialer wie radialer Richtung sowie des Porenfluiddrucks (p_{fluid}) bis zu einem Maximum von jeweils 100 MPa, wobei der Porenfluiddruck die kleinste Hauptspannung nicht übersteigen darf ($p_{\text{fluid}} < \sigma_{\text{axial}}, \sigma_{\text{radial}}$).

Die Zelle ist als sog. Satellitenautoklav ausgelegt, der passiv von einer 5 MN-Prüfmaschine mit genügend großer Steifigkeit eingespannt wird. Mittels PC-Steuerung werden Axial-, Mantel- und Porenfluiddruck elektrohydraulisch eingestellt, wobei die drei Regelkreise wechselseitig von einem gemeinsamen Hydraulikaggregat bedient werden. Die Druckmessung erfolgt separat pro Regelkreis durch Drucksensoren. Mantel- und

Porenfluiddruck werden über einen Medientrenner probenseitig standardmäßig als Wasserdruck aufgebracht. Die Zufuhr des Porenfluids (Wasser) erfolgt über eine Zentralbohrung über die untere Druckplatte (Abb. 12).

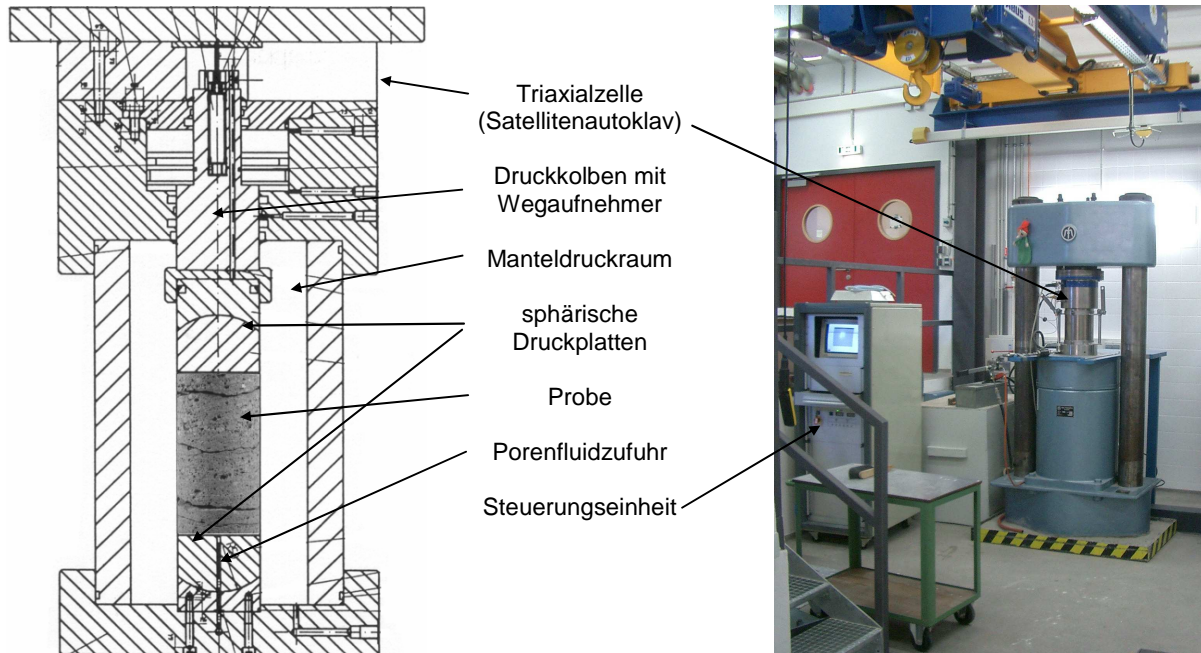


Abb. 12: Verwendete 5 MN-Prüfmaschine mit Triaxialzelle (Satellitenautoklav) für PC-gesteuerte triaxiale Belastung und Porenfluiddrücke bis jeweils 100 MPa:
Der Druckkolben wirkt axial in Richtung der Längsachse des Prüfzylinders (Axialspannung), der Manteldruck radial über die Mantelfläche (Radialspannung). Die Steuerung der drei Regelkreise Kolben-/Axial-, Mantel-/Radial und Porenfluiddruck erfolgt elektrohydraulisch. Die Festgesteinsprüfzylinder besitzen Abmessungen von 70 mm Durchmesser und ca. 140 mm Länge mit dementsprechenden Volumina von ca. 540 cm³. (nähere Erläuterungen zur Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung siehe Text)

Als Ummantelung der Probekörper zur Isolierung von Mantel-, Poren- und Kolbendruck dienten PVC-Schläuche, die an den Übergangsflächen zwischen Probe, Druckplatte und Druckkolben zusätzlich durch Metallmanschetten verstärkt wurden (s. u.). Da die messtechnische Erfassung des Porenfluiddrucks lediglich außerhalb der Proben erfolgen kann, wurden diese im Vorfeld des Versuches gesättigt, um innerhalb der Probe gleichmäßige Verhältnisse sicherzustellen und die eigentliche Versuchszeit zu verkürzen.

Die Messung der Axialdeformation ist mit einem potentiometrischen Wegaufnehmer an den Druckkolben gebunden und erfasst so die Probenverformung über die gesamte Länge der Zylinderachse inklusive einer etwaigen Maschinenverformung. Zur Einschätzung der Systemsteifigkeit bzw. Beurteilung der Maschinenverformung durchführte Referenzversuche an einem Stahlprüfkörper ergaben sowohl innerhalb der Triaxialzelle als auch im Einaxialversuch mit der 5 MN-Prüfmaschine Elastizitätsmoduli in üblicher Größenordnung für vergleichbare Festgesteinsprüfmaschinen.

Die Datenerfassung erfolgt mit automatisch-periodischer Messwertspeicherung von Kolben-, Mantel- und Porenfluiddruck sowie der Axialdeformation. Die PC-Steuerung ermöglicht eine kontinuierliche Probenbelastung bzw. Probendeformation in axialer Richtung alternativ druck- bzw. spannungsgesteuert oder weg- bzw. verformungsgesteuert; Änderungen von Manteldruck und Porenfluiddruck erfolgen sukzessive. Die gewählten, technisch realisierbaren Geschwindigkeiten sind Tab. 1 zu entnehmen.

Die Prüfzylinder haben einen Durchmesser von 70 mm und eine Höhe von etwa 140 mm (Volumen $\sim 540 \text{ cm}^3$). Die Endflächen sind planparallel und geschliffen herzustellen. Zum Ausgleich etwaiger, kleinster Ungenauigkeiten bei der Probenpräparation der planparallelen Endflächen senkrecht zur Mantelfläche wird die axiale Belastung durch sphärische Druckplatten (Kalotten) an beiden Prüfzylinderendflächen eingeleitet, um so eine gleichförmige axialsymmetrische Spannungsverteilung zu gewährleisten.

4.2 Spannungspfade, Versuchsmodi und Bedingungen im Triaxialversuch

Im Triaxialversuch (vgl. Abb. 10 und 11) werden die Proben generell unter gleichmäßiger allseitiger Belastung auf ein Niveau isostatischer Spannungen eingestellt ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Ausgehend von diesem isostatischen Spannungszustand erfolgt bei Lastgeometrie Kompression gewöhnlich die kontinuierliche, quasi-statische spannungs- oder verformungsgesteuerte Steigerung der axialen Spannung bei konstantem Mantel- bzw. Seitendruck ($\sigma_1 \text{ (axial)} > \sigma_2 = \sigma_3 \text{ (radial)}$). Im triaxialen Extensionsversuch wirkt ausgehend von einem beliebigen Niveau isostatischer Spannungen die maximale Spannung in radialer Richtung über die Mantelfläche ($\sigma_1 = \sigma_2 \text{ (radial)} > \sigma_3 \text{ (axial)}$).

Prinzipiell sind demgemäß zwei Belastungspfade im Extensionsregime denkbar – **radiale Belastung** und **axiale Entlastung**. Hinsichtlich der zugrunde liegenden Extensionsversuche sind drei Versuchsmodi (Spannungspfad und Entlastungsart) zu unterscheiden (Abb. 13, 15):

- **Regulär-Modus**
quasi-statische, kontinuierliche alternativ spannungsgesteuerte oder verformungsgesteuerte axiale Entlastung bei konstantem Mantel- und Porenfluiddruck führt zu axialer Extension / Längung
- **Pinching-off-Modus**
quasi-statische, sukzessive radiale Belastung resp. Kompression bei konstantem Kolben- und Porenfluiddruck führt zu axialer Extension / Längung (sukzessiv in Ermangelung kontinuierlicher Steuerungsmöglichkeit)
- **Abrupt-Modus**
wie Regulär-Modus, jedoch mit unregelmäßiger/unregelbarer, abrupt-rapider axialer Entlastung bei konstantem Mantel- und Porenfluiddruck

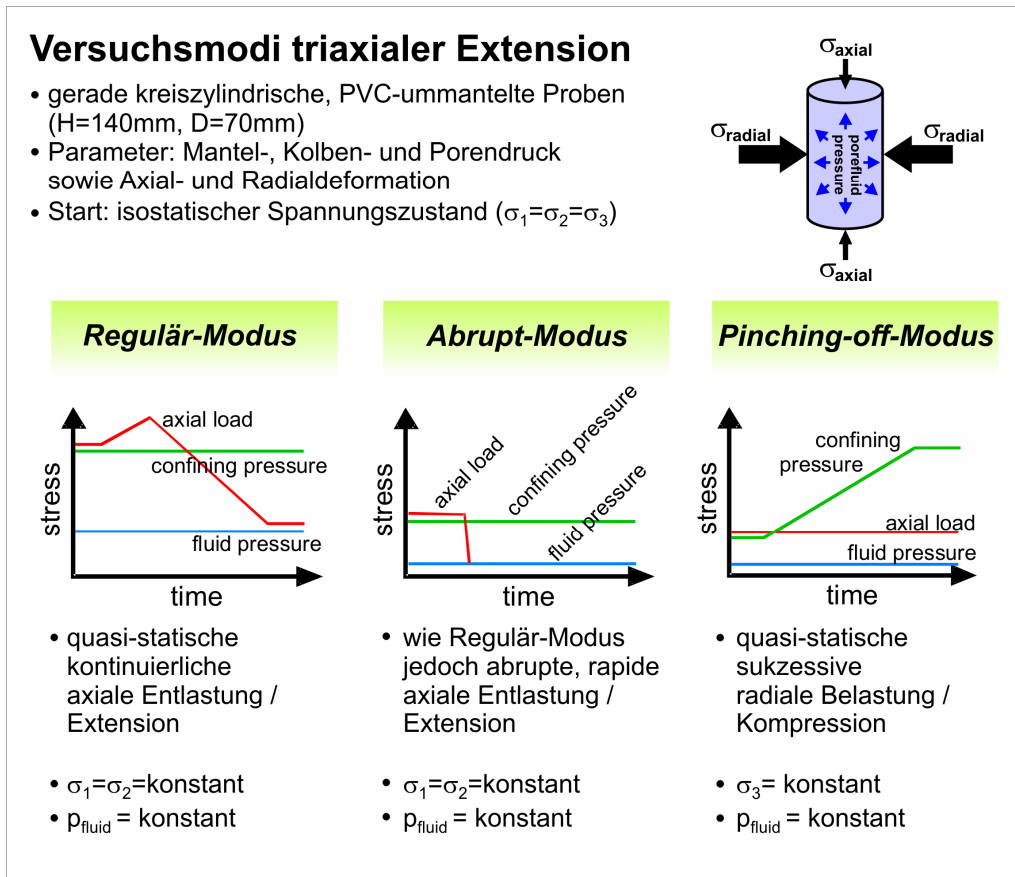


Abb. 13: Prinzipskizze der drei hier entwickelten und angewendeten Versuchsmodi im triaxialen Extensionsversuch ausgehend von den Beanspruchungspfaden Axial-Entlastung und Radial-Belastung: Ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) wirkt im Extensionsregime die maximale Hauptspannung in radialer Richtung (confining pressure) über die Mantelfläche ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$). In Abhängigkeit des Belastungspfades ergeben sich bei axialer Entlastung *Regulär-Modus* und *Abrupt-Modus* sowie bei radialer Belastung *Pinching-off-Modus*. *Regulär-* und *Abrupt-Modus* unterscheiden sich durch die Extrema ihrer Entlastungsgeschwindigkeiten. Der eigentlichen Extensionsphase wurde jeweils eine geringe kompressive Belastung vorangestellt (größte Hauptspannung in axialer Richtung). Die Versuchsdurchführung erfolgte an verschiedenen Gesteinsserien mit unterschiedlichen Spannungs- und Verformungsraten, Durchfeuchtungsgrad, Porenfluiddruck- bzw. Drainagebedingungen.

Den eigentlichen Versuchsmodi im Extensionsregime ($\sigma_{1,2} = \sigma_{\text{radial}}$) wurde prinzipiell eine geringe kompressive Belastung ($\sigma_1 = \sigma_{\text{axial}}$) vorangestellt (Abb. 13), um einen Kontakt zwischen Druckkolben und Probe gewährleisten und überprüfen zu können. Im Anschluss erfolgte die axiale Entlastung oder radiale Belastung entweder bis zum Bruch der Probe oder bis zu einer vorgewählten Belastungsgrenze. Im letzteren Fall wurde die Probe durch Anheben der Minimalspannung auf einen isostatischen Spannungszustand zurückgeführt und die Spannungen schließlich allseitig gleichmäßig abgebaut. Die angegebenen Verformungen beziehen sich dabei auf die eigentliche Extensionsphase.

Tab. 1: Angewendete allgemeine Randbedingungen der hier entwickelten Versuchsmodi im Rahmen der versuchstechnischen Möglichkeiten:
 Innerhalb der entwickelten Versuchsmodi Regulär-, Abrupt und Pinching-off-Modus werden verschiedene Versuchsvarianten ausgehalten, welche die unterschiedlichen Randbedingungen wie Regelungsart und Entlastungsgeschwindigkeit, Sättigungsgrad und Drainagebedingungen separieren (nähere Erläuterungen siehe Kap. 5).

Parameter	Größenordnung
Mantel- bzw. Seitendruck ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_{\text{radial}}$)	5 – 85 (100 ⁽¹⁾) MPa
<p>Regulär-Modus Standardversuch – quasi-statisch: axiale Verformungsrate ($\dot{\epsilon}_{\text{axial}}$) axiale Spannungsrate ($\dot{\sigma}_3$)</p> <p>Regulär-Modus Schnellversuch – schnell, druckgeregelt: axiale Spannungsrate ($\dot{\sigma}_3$)</p> <p>Abrupt-Modus axiale Entlastungsrate ($\dot{\sigma}_3$)</p> <p>Pinching-off-Modus radiale Kompressionsrate ($\dot{\sigma}_1$)</p>	<p>$10^{-7} - 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ $10^{-3} - 10^{-2} \text{ MPa/s}$</p> <p>$\leq 4 \cdot 10^0 \text{ MPa/s}$</p> <p>abrupt, schlagartig ($\gg 10^0 \text{ MPa/s}$)</p> <p>sukzessiv ($\sim 10^{-2} \text{ MPa/s}$)</p>
Durchfeuchtung / Sättigungsgrad der Proben	(ofen)trocken gesättigt (Wasser, effektive Porosität)
Drainage / Porenfluiddruck	drainiert 3 – 85 MPa (separat gesättigte Proben)

⁽¹⁾ Pinching-off-Modus

Die Versuchsmodi axiale Entlastung (**Regulär-Modus**) und radiale Belastung (**Pinching-off-Modus**) wurden in Anlehnung an die oben dargelegten Experimente (Kap. 3.1) eingesetzt, um den Einfluss der Spannungspfade zu analysieren. Für die Geschwindigkeitsregelungen wurden im Standardfall kontinuierliche, quasi-statische spannungs- oder verformungs-gesteuerte Belastungsraten gewählt. Technisch umsetzbar waren dabei Minimal-Geschwindigkeiten von $\dot{\epsilon} \sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ bzw. $\dot{\sigma} \sim 10^{-3} \text{ MPa/s}$ (Tab. 1). Diese ließen sich im Regulär-Modus für axiale Entlastung problemlos einstellen. Die vorhandene Steuerung der Triaxialzelle sieht keine kontinuierliche Regelung für den Manteldruck vor, so dass im Pinching-off-Modus für radiale Kompression die Steigerung des Manteldrucks stufenweise zu erfolgen hat. Hier wurden die Belastungsstufen so abgestimmt, dass eine möglichst gleichmäßige Spannungssteigerung mit ca. $\dot{\sigma}_1 \sim 10^{-2} \text{ MPa/s}$ resultierte.

Da sich aus den Testreihen entsprechende Erkenntnisse ergaben, sollte im Spannungspfad Axialentlastung überdies der Einfluss der Entlastungs- bzw. Extensionsgeschwindigkeit untersucht werden. Eine kontinuierlich gesteuerte Entlastung mit hoher Entlastungsrate

(*Schnellversuch*) war versuchstechnisch nur begrenzt möglich (etwa bis $4 \cdot 10^0$ MPa/s), so dass als Spezialfall der **Abrupt-Modus** ausgehalten wird. Dieser ist durch eine abrupt-rapide axiale Entlastung mit hoher, aber unregelmäßiger resp. unregelmäßiger Geschwindigkeit gekennzeichnet. Derartige Geschwindigkeiten entsprechen zwar nicht dem Normalfall natürlicher Belastung, können allerdings unter bergbaulichen oder ingenieurmäßigen Gesichtspunkten durchaus relevant sein (z. B. Tunnelvortrieb, Bergschlag, Bohrungsinstabilitäten). Hinsichtlich der Geschwindigkeit ist der *Schnellversuch*, eine Versuchsvariante im Regulär-Modus, als Bindeglied zwischen quasi-statischer und abrupter, schlagartiger Axialentlastung zu verstehen.

Die Extensionsexperimente erfolgten bei Raumtemperatur an verschiedenen Gesteinsserien (s. Kap. 4.4) mit unterschiedlichen Kombinationen und Variationen der Spannungs- oder Verformungsrate, des Ausgangswasser- bzw. Feuchtegehalts und des Porenfluiddrucks bzw. Drainage. Diese wurden während eines Tests in der Regel konstant gehalten. Als Durchfeuchtungszustand wurden die Endglieder ofentrocken und bezüglich der effektiven Porosität vollständig wassergesättigt berücksichtigt. Tab. 1 fasst die allgemeinen Randbedingungen der jeweiligen Versuchsmodi und Versuchsvarianten zusammen.

Mit derselben Versuchsanlage und unter adäquaten Randbedingungen erfolgten die triaxialen Kompressionsversuche. Die geomechanische, petrophysikalische und petrografische Charakterisierung der Lithotypen sowie die Gewinnung und Präparation der Prüfkörper sind in Kap. 4.4 dargelegt.

4.3 Versuchsspezifika der Triaxialanlage

Wesensgemäß für Triaxialversuche ist die zu gewährleistende Isolierung des Prüfkörpers vom Manteldruckmedium, die probenseitige Trennung von Mantel- und Porenfluiddruck sowie – insbesondere für Extensionsversuche – von Mantel- und Kolbendruck. Der Schutz der Probe vor der Permeation des Manteldruckmediums in den Porenraum wird gewöhnlich durch eine Ummantelung sicher gestellt, meist in Form mehr oder weniger flexibler Materialien wie Metallbleche oder Kunststoffe. Das hier präferierte flexible Material musste einer Perforation widerstehen, an den Druckplatten dicht abschließen und im Fall der verwendeten doppelten sphärischen Endplatten dem Versuchsaufbau genügend Halt geben, um ein Verkappen während des Einbaus zu verhindern.

Es wurden verschiedene Ummantelungen getestet, und im Ergebnis hat sich schließlich ein handelsüblicher textilverstärkter PVC-Schlauch bewährt. Eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch die Zugfestigkeit des Probenmantels konnte weder beim Vergleich mit dehnbareren, jedoch nicht bis in den Maximaldruckbereich stabilen Ummantelungsvarianten noch infolge von Reibungsminimierung zwischen Probenmantelfläche und Schutzschlauch festgestellt werden.

Damit ein Eindringen des PVC-Probenmantels in die Trennflächen zwischen Probe, Druckplatte und Druckkolben unter der Einwirkung des gegenüber dem Axialdruck höheren Manteldrucks ausbleibt (vgl. Kap. 3.1), mussten diese Bereiche zusätzlich durch Metallmanschetten verstärkt und somit abgeschirmt werden. Eine präzise Positionierung der Manschetten während des Einbaus erlaubt einen möglichst kleinen Zuschnitt dieser Metallstreifen. Mit einer Höhe von ca. 2 cm umschließen sie je ca. 1 cm Höhe der Mantelfläche am oberen und unteren Prüfcylinderende.

Die Funktionsweise der elektrohydraulischen Steuerung mit einem Hydraulikkreis, der die drei Regelkreise axialer Kolbendruck, radialer Manteldruck und Porenfluidruck alternierend versorgt, führte zu versuchstechnischen Problemstellungen. Kritische Versuchsmomente sind vor allem beim Übergang von kompressiver zu extensiver Spannungsgeometrie (Kap. 4.2) und bei Maximallast der Versuchsapparatur zu verzeichnen. Maximallast der elektrohydraulischen Einkreissteuerung herrscht bei stark unterschiedlichen, veränderlichen Drücken, wie z. B. bei maximal zu steigendem Manteldruck und konstantem minimalem Kolbendruck und / oder zusätzlichem drittem Regelkreis. Auch die Wegregelung hat sich als besonders störanfällig erwiesen.

Derartige unplanmäßige Maschinenreaktionen im Extensionsexperiment können u. U. in einem schlagartigen Abheben des Axialkolbens infolge der Steuerungsumschaltung zwischen den Regelkreisen resultieren. Bei kompressiver Versuchsdurchführung erlangen diese Schwierigkeiten der automatischen Steuerung weniger Bedeutung, da der Axialdruck stets oberhalb des Manteldrucks liegt.

4.4 Probenmaterial

Zur Analyse des generellen Trennbruchversagens von Festgesteinen richten die vorliegenden Laboruntersuchungen ihren Fokus vornehmlich auf ein relativ enges lithologisches Spektrum. Unter verschiedenen Aspekten wurden hierzu permokarbone, klastische Rotsedimente der Region favorisiert:

Die Erforschung des Permokarbons in NE-Deutschland hat eine lange Tradition. In ihrer Eigenschaft als Speichergestein für Kohlenwasserstoffe wurden die permokarbonen Sedimentgesteine und ihr Ablagerungsraum intensiv prospektiert, so dass zahlreiche publizierte Daten verfügbar sind. Aufgrund ihres Potentials beispielsweise zur Gewinnung geothermischer Energie oder der Speichermöglichkeiten für CO₂ stehen sie auch aktuell im ökonomischen Interesse (siehe Kap. 2). Hinsichtlich der hydraulischen Stimulation solcher Zielhorizonte kommt dabei geringdurchlässigen Sedimentgesteinen besondere Bedeutung zu.

Darüber hinaus haben die ausgewählten Gesteine den Vorteil geringerer tektonischer Deformation und optimaler Verfügbarkeit in der Region. Bei der Wahl der Probennahmeart

war für die vergleichenden Untersuchungen im Triaxialversuch die Quantität bei gleich bleibender Qualität von entscheidender Bedeutung. Proben aus obertägigen Aufschlüssen zeigen infolge ihrer allmählichen Exhumierung eine wesentlich geringere Gefügeschädigung als Bohrkerne aus Tiefbohrungen, die durch rasche Entlastung und zusätzliche Beanspruchung infolge des Bohrprozesses gekennzeichnet sind.

4.4.1 Lithotypen-Auswahl und petrografische Beschreibung

In Anbetracht der eingeschränkten Vorkenntnisse (vgl. Kap. 3) sollte eine kompositionelle und strukturelle Vergleichbarkeit der verwendeten Gesteinsserien sowohl eine Differenzierung gesteinspezifischer Einflussfaktoren auf die Splitting-Bedingungen als auch eine Übertragbarkeit der erwarteten Erkenntnisse auf ein größeres Spektrum zumindest der klastischen Sedimentgesteine ermöglichen.

Hierzu wurden die Experimente ausdrücklich auf vier komparable klastische Haupt-Lithotypen konzentriert, die in ausreichender Probenmenge gleich bleibender Qualität in regionalen Aufschlüssen verfügbar sind (Tab. 2).

Tab. 2: Verwendete Haupt-Lithotypen – stratigrafische Einordnung und petrografische Charakterisierung:
Die Proben sind in regionalen Steinbrüchen im Raum Bebertal [BE] und Siebigerode [Si] aufgeschlossen und vor Ort meist mittels Nassbohrverfahren mit Kaliber 70 mm entnommen worden.

Lithotyp	Stratigrafische Einordnung	Korngröße	Genese / Korngefüge	Sortierung	Zementtyp	Mineralbestand [%]		
						Qz	GF	Fsp
BE-S	Erleben-Formation Havel-Subgruppe	fein-sandig	äolisch	sehr gut bis gut	Calcit	60-80	20-40	0
BE-K	Oberrotliegend II (Gaitzsch et al. 2004)	fein- bis grobkiesig	fluviatil matrixgestützt	schlecht	Calcit	50-60	30-40	5-10
Si-S	Siebigerode-Formation Mansfeld-Subgruppe	mittel-sandig	fluviatil feldspatreich, z.T. kaolinisiert	gut bis mäßig	Calcit	60-80	5-20	10-20
Si-K	Stefan C (Schneider et al. 2005)	mittel- bis grobkiesig	fluviatil korngestützt, gesteinsfragmentreich	mäßig	Calcit	5-10	80-90	5-10

Qz Quarzanteil
GF Gesteinsfragmentanteil
Fsp Feldspatanteil

Die hauptsächlich verwendeten vier Lithotypen entstammen Permokarbon-Aufschlüssen der Mansfelder Mulde sowie des Flechtinger Höhenzuges und unterteilen sich in zwei Sandsteintypen (BE-S, Si-S) und zwei Konglomerattypen (BE-K, Si-K), wobei jeweils ein Sandstein-Konglomerat-Paar derselben stratigrafischen Schichtenfolge und Aufschluss-

situation entspringt. Stratigrafische Einordnung und fazielle Ausbildung werden z. B. beschrieben von Schneider et al. (2005), Gaitzsch et al. (2004), Gaitzsch et al. (1995), Kleditsch & Kurze (1993).

Sandstein (BE-S) und Konglomerat (BE-K) der Erxleben-Formation (Tab. 2, s. d. Gaitzsch et al. 2004) sind in einem aktiven Werksteinbruch bei Bebertal aufgeschlossen und gehören strukturell zum Flechtinger Höhenzug. Sie werden mit der Parchim-Formation des Norddeutschen Beckens korreliert. In die 10er m-mächtige äolische Sandsteinfolge (BE-S) sind im unteren Teil vereinzelt dm-mächtige fluviatile Konglomeratlagen (BE-K) eingeschaltet. Der mittel- bis großdimensional schräggeschichtete Dünensandstein besitzt demgemäß eine besonders homogene lithologische Ausbildung. Im Gegensatz zu den sehr gut bis gut sortierten Feinsandsteinen weisen die grob- bis feinkiesigen Konglomerate eine schlechte Sortierung und einen hohen Matrixanteil auf. Die Gerölle sind Quarzite, Vulkanite sowie Silt-/Tonsteine mit durchschnittlichen Korngrößen im mm-Bereich, im Aufschlussmaßstab betragen sie vereinzelt mehrere Zentimeter.

Im Sedimentationsraum der Saale-Senke kam die fluviatile Siebigerode-Formation zur Ablagerung, eine Wechsellagerung von Rinnensandsteinen und grobklastischen Schüttungen (s. d. Schneider et al. 2005). Sandstein Si-S und Konglomerat Si-K (Tab. 2) sind in mehreren Metern Mächtigkeit getrennt von einander in zwei nahe gelegenen auflässigen Steinbrüchen im Außenbereich der Ortslage Siebigerode am Westrand der Mansfelder Mulde aufgeschlossen. Charakteristisch für den Si-Sandstein ist sein vergleichsweise hoher, z.T. kaolinisierter Feldspatanteil. Die Mittelsandsteine weisen eine gute bis mäßige Sortierung auf. Die grob- bis mittelkiesigen Si-Konglomerate zeichnen sich durch einen dominierenden Anteil an Gesteinsfragmenten bei mäßiger Sortierung aus.

Den vorgenannten Haupt-Lithotypen ist gemeinsam, dass sie in typischer Rotfazies ausgebildet sind und eine calcitische Bindung besitzen.

Die Untersuchungsergebnisse der vier Haupt-Lithotypen (s. Tab. 2) wurden durch exemplarische triaxiale Extensionsversuche an petrografisch wie geomechanisch deutlich divergierenden Festgesteinen ergänzt. Basierend auf den vorstehend erläuterten Erfahrungen unterschiedlicher Erfolge hydraulischer Stimulationen kristalliner (i. S. magmatischer bzw. metamorpher Tiefengesteine) und sedimentärer Zielhorizonte (vgl. Kap. 2.3) sollten hierzu verschiedene magmatische Gesteine dienen. Gewählt wurden Werksteinproben von Granit, Rhyolith und Basalt.

Darüber hinaus kam eine Probenauswahl einer Festgesteinsbohrung im Unterrotliegend zur Anwendung. Diese Gesteinsproben stehen damit im Kontrast zur übrigen Probengewinnung aus obertägigen Aufschlüssen. Der als Lindau-Sandstein bezeichnete Lithotyp entstammt der

Forschungsbohrung Lindau (Bayern), die Fragen der Wasserfrac-Technik verfolgte (s. d. Tischner 2002, Röckel 2005). Der hämatitgebundene, sehr gut bis gut sortierte Mittelsandstein wurde in 460 m Teufe aufgeschlossen (Helmkamp 2002).

4.4.2 Probennahme und Prüfkörperpräparation

Die Probennahme der Haupt-Lithotypen erfolgte generell im Steinbruch, orientiert zur Schichtung mittels möglichst schonendem Drehbohrverfahren mit Diamantbohrkrone und Wasserspülung. Der Innendurchmesser der Bohrkrone beträgt 70 mm, so dass für die Triaxialversuche die so gewonnenen Bohrkerne im Labor auf Länge zugesägt und die Endflächen normal zur Mantelfläche planparallel auf eine Länge von ca. 140 mm geschliffen wurden (Prüfkörperpräparation gemäß ISRM-Empfehlungen Kovari et al. 1983, Mutschler 2004). Die entsprechend präparierten geraden kreiszylindrischen Prüfkörper besitzen somit ein Schlankheitsmaß von 2 und ein Volumen von ca. 540 cm³.

Die Kerne wurden standardmäßig mit der Längsachse normal zur Schichtung ausgerichtet. Daneben wurden Prüfkörper mit der Schichtung schräg zur Prüfzylinderachse hergestellt, um Anisotropieeffekte berücksichtigen zu können. Falls im Folgenden keine abweichenden Aussagen getroffen werden, beziehen sich die Angaben generell auf den Standardfall einer Ausrichtung der Schichtung senkrecht zur Längsachse. Sofern die gewünschten Orientierungen der Bohrkernachse zur Schichtung aufgrund der Zugänglichkeit im Aufschluss nicht möglich waren, wurden orientierte Blöcke entnommen und die Prüfkörper im Labor unter den ansonsten gleichen Bedingungen erbohrt und weiter präpariert.

Ebenso sind die magmatischen Proben aus Gesteinsblöcken gearbeitet worden. In ähnlicher Weise wurde aus den 100 mm-Kaliber Bohrkernen der Lindau-Forschungsbohrung Probenzylinder mit 70 mm Durchmesser herausgebohrt.

4.4.3 Petrophysikalische und geomechanische Charakterisierung der Lithotypen

Zur Charakterisierung der eingesetzten Lithotypen sowie ihrer gegenseitigen Differenzierung erfolgten begleitend zum Extensionsexperiment petrophysikalische und geomechanische Standard-Untersuchungen (Tab. 3, Abb. 14).

Entsprechend den versuchstechnischen Empfehlungen (Bieniawski & Bernede 1979a, b, Fairhurst & Hudson 1999, Mutschler 2004 und Bieniawski & Hawkes 1978, Pahl 1985) wurden an trockenen, normal zur Achse geschichteten Proben im einaxialen Druckversuch die einaxiale Druckfestigkeit (σ_u), die axiale Bruchdehnung (ϵ_u) und der E-Modul sowie im Brazilian-Test die indirekte einaxiale Zugfestigkeit (σ_t) ermittelt (Tab. 3).

Der E-Modul bezieht sich hier auf die Erstbelastung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Verformungs- oder Erstbelastungs-Modul). Als Indexwert für die „Sprödigkeit“ eines Gesteins wird das Verhältnis zwischen einaxialer Druck- und Zugfestigkeit herangezogen. Des Weiteren sind für die vier Haupt-Lithotypen in Tab. 3 Kohäsion (c) und Reibungswinkel

(ϕ) angegeben, die im triaxialen Kompressionsversuch an trockenen Proben ermittelt wurden (Pahl 1979, Kovari et al. 1983). Die Kompressionsversuche dieser vier Gesteinsserien erfolgten zudem auch an wassergesättigten Prüfkörpern.

Tab. 3: Petrophysikalische und geomechanische Eigenschaften der verwendeten Lithotypen, getrennt nach den vier Haupt-Lithotypen und den vier ergänzenden Probenklassen (kursiv):
Angaben zu den Bestimmungsmethoden siehe Text

Litho- typ	ρ_d [g/cm ³]	Φ [Vol%]	v_p [m/s]	K [mD]	σ_t [MPa]	c [MPa]	ϕ [°]	σ_u [MPa]	σ_u/σ_t	E-Modul [MPa]	ϵ_u [%]
BE-S	2,42	6,9	3450	$2,2 \cdot 10^{-1}$	4,9	19	44	87	17,8	17.500	0,74
BE-K	2,54	4,1	3470	$9,1 \cdot 10^{-3}$	4,4	14	28	48	10,9	9.300	0,85
Si-S	2,35	8,9	3130	$1,5 \cdot 10^{-2}$	3,9	14	36	54	13,8	12.600	0,70
Si-K	2,36	10,0	3310	$1,4 \cdot 10^{-2}$	3,5	7	27	22	6,3	3.800	0,79
<i>Lindau</i>	2,51	3,6	2860	--	3,6	11	46	56	15,6	10.100	0,68
<i>Granit</i>	2,6	--	--	--	7,7	--	--	185	24,0	29.600	0,76
<i>Rhyolith</i>	2,5	--	--	--	9,8	--	--	235	23,9	33.700	0,88
<i>Basalt</i>	3,0	--	--	--	12,3	--	--	335	27,2	47.200	0,81

ρ_d Trockendichte

Φ effektive Porosität (vernetzter Porenraum)

v_p Ultraschallgeschwindigkeit (Longitudinalwellen)

K Permeabilität

σ_t einaxiale indirekte Zugfestigkeit

c Kohäsion

ϕ Reibungswinkel

σ_u einaxiale Druckfestigkeit

σ_u/σ_t Sprödigkeit: Verhältnis von Druck- zu Zugfestigkeit

E-Modul: ... Verformungs- bzw. Erstbelastungsmodul

ϵ_u einaxiale Bruchdehnung

Trockendichte (ρ_d) und Porosität (Φ) wurden entsprechend der ISRM-Empfehlungen ermittelt (Franklin 1979). Die benötigte Trockenmasse der Prüfkörper wird durch Ofentrocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz erreicht. Die Zylinderform der präparierten Proben erlaubt eine Volumenbestimmung sowohl durch Vermessen der Geometrie als auch durch archimedische Tauchwägung. Die Ergebnisse sind mit hinreichender Genauigkeit übereinstimmend. Das Porenvolumen wurde durch die sog. Tränkungs-methode bestimmt, bei welcher der Porenraum durch Vakuumsättigung gleichzeitig mit Wasser gefüllt und die

Porenluft entzogen wird. Bei einer derartigen Porositätsbestimmung werden lediglich die für das Messfluid (hier Wasser) zugänglichen Hohl- oder Zwischenräume (Poren, Mikrorisse) im Sinn eines vernetzten, kommunizierenden Porensystems erreicht (effektive Porosität). Die Ermittlung der Permeabilität (K) erfolgte im Durchströmungsversuch ebenfalls mit Wasser. Die Angaben in Tab. 3 beziehen sich auf eine Durchströmung normal zur Schichtung bei Raumtemperatur und konstantem Druckgradienten unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Viskosität des Messfluids Wasser. Die Ultraschalllaufzeiten der Longitudinalwellen (v_p) wurden mit der Transmissionsmethode (Durchschallung) an ofentrockenen Proben in Richtung der Zylinderachse gemessen und über die Messstrecke und Laufzeitkorrektur die Ultraschallgeschwindigkeit kalkuliert (Rummel & Vanheerden 1978). Es wurde ein magnetostriktiver Signalgeber mit 64 kHz eingesetzt.

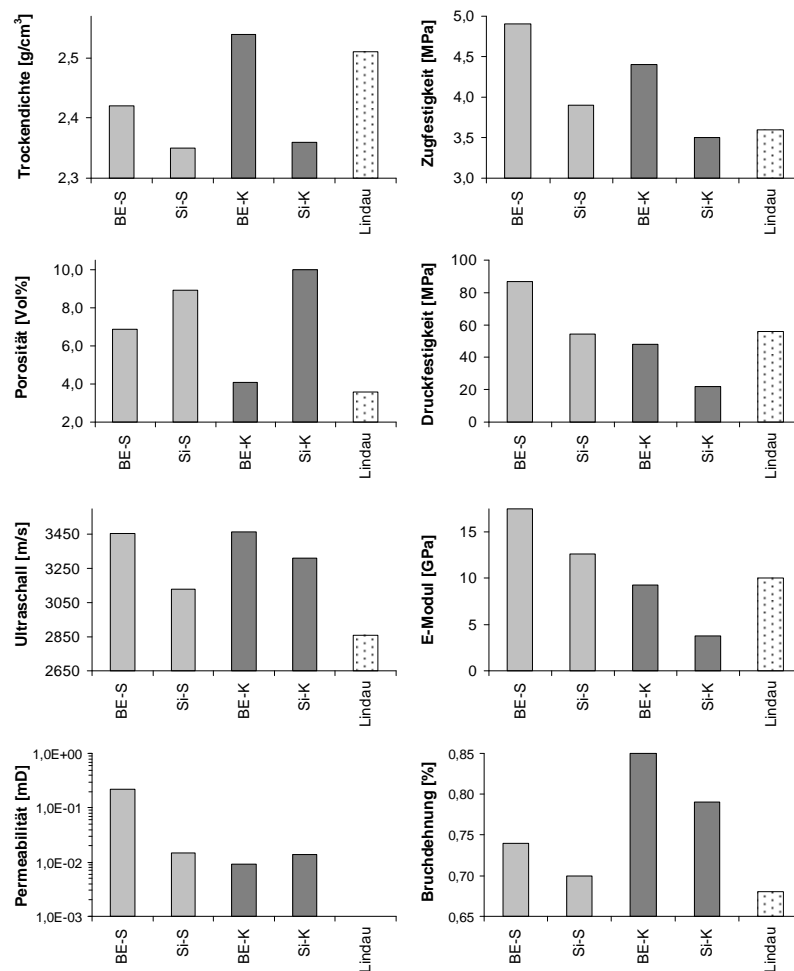


Abb. 14: Spektrum ausgewählter petrophysikalischer und geomechanischer Gesteinsparameter der hier untersuchten klastischen Probenreihen:

Dargestellt sind die Vertreter der Haupt-Lithotypen, die Sandsteine BE-S und Si-S sowie die Konglomerate BE-K und Si-K, sowie der ergänzende Lithotyp Lindau-Sandstein. Zwischen den einzelnen Probenklassen wird vornehmlich anhand der skalaren petrophysikalischen und der geomechanischen Eigenschaften die graduelle Abdeckung eines vergleichsweise engen lithologischen Spektrums ersichtlich.

Die Gegenüberstellung der Haupt-Lithotypen und der ergänzenden magmatischen bzw. klastischen Gesteinsproben lässt erkennen, dass sich die Magmatite erwartungsgemäß signifikant von den Übrigen unterscheiden.

Die magmatischen Proben liegen hinsichtlich ihrer Festigkeitseigenschaften betragsmäßig deutlich über den klastischen Lithotypen, während die Verformungen bzw. Bruchdehnungen im einaxialen Druckversuch vergleichbar sind. Ihr wesensgemäß spröderes Materialverhalten drückt sich zum einen durch die wesentlich höhere Spannungsaufnahme bei ähnlichen Verformungsbeträgen aus. Darüber hinaus liegt ihr Sprödigkeitsindex (Verhältnis zwischen einaxialer Druck- und Zugfestigkeit) mit 24 bis 27 erheblich über den Werten der klastischen Vertreter mit 6 bis 18 (Tab. 3).

Für die Haupt-Lithotypen wurde ein vergleichsweise begrenztes lithologisches Spektrum gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Splitting-Ergebnisse zu erzielen. Die geomechanischen und petrophysikalischen Parameter der klastischen Lithotypen konzentrieren sich daher auf einen relativ engen Wertebereich (Abb. 14).

Die Gegenüberstellung der einzelnen Eigenschaften der klastischen Gesteinsserien lässt beispielsweise eine gute Korrelation zwischen Trockendichte und Porosität erkennen, die allerdings nicht auf die Permeabilität übertragbar ist. Während die Permeabilität in engem Zusammenhang mit der Komplexität des Porenraumes steht, sind die primären Merkmale wie Porosität und Trockendichte skalare Messgrößen. Neben der Richtungsabhängigkeit der Permeabilität nimmt zudem die Wahl der Untersuchungsmethode Einfluss auf die Messung. In Abhängigkeit des Messmediums werden die Eigenschaften des Porensystems unterschiedlich gewichtet.

Entsprechend zeigt der Lithotyp BE-S-Sandstein bei vergleichsweise moderater Trockendichte und Porosität eine um eine Größenordnung höhere Permeabilität gegenüber den anderen klastischen Haupt-Lithotypen. Dies ist auf ein hohes Maß der Vernetzung des Porenraums infolge des engen Korngrößenspektrums dieses äolischen Sandsteins zurückzuführen. Geomechanisch zeigt dieser Sandstein die höchsten Druck- und Zugfestigkeiten und eine vergleichsweise geringe Verformbarkeit.

Das matrixgestützte Konglomerat BE-K besitzt die höchste Bruchdehnung bei mittlerer Druckfestigkeit und damit vermittelndem E-Modul. Seine vergleichsweise hohe Zugfestigkeit schlägt sich jedoch im Verhältnis zur Druckfestigkeit nicht im Sprödigkeitsindex nieder. Abgesehen von der Bruchdehnung weist das gesteinsfragmentreiche Si-K-Konglomerat die niedrigsten geomechanischen Kennwerte auf.

Obwohl bei der Messung der Ultraschallgeschwindigkeit an trockenen Proben den vorhandenen Hohlräumen eine besondere Bedeutung zukommt (aufgrund der extrem geringen Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft), geben diese nur bedingt die Ergebnisse von

Trockendichte und Porosität wieder. Die Kompressionswellen reflektieren auch elastische Eigenschaften des transmittierten Mediums und vermitteln daher zwischen physikalischen und elasto-mechanischen Parametern (vgl. z. B. Hecht et al. 2005).

Insgesamt zeigen innerhalb dieses relativ engen Eigenschaftsspektrums der klastischen Gesteinsserien die geomechanischen Kennwerte eine nahezu gleichmäßige Abstufung zwischen den jeweiligen Lithotypen. Die Relationen zwischen den einzelnen Probeneinheiten können dabei versuchsspezifisch wechseln. Auch die skalaren petrophysikalischen Eigenschaften Trockendichte und Porosität zeigen einen vergleichsweise graduellen Übergang. Indes ist die Permeabilität hiervon ausgenommen. Der Lithotyp BE-S-Sandstein unterscheidet sich hierin deutlich um eine Größenordnung von den nahezu identischen restlichen Proben.

5 Durchführung und Ergebnisse der triaxialen Extensionsversuche

Bei der verwendeten Triaxialapparatur ist als Standardfall der Regulär-Modus vorgesehen. Wie in Kap. 4 beschrieben, ist hier eine kontinuierliche spannungs- oder verformungs-gesteuerte axiale Entlastung bei konstantem Manteldruck ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand möglich, welche zur axialen Längung (Extension) und radialen Verkürzung (Einschnürung) der Probe führt. Im Gegensatz dazu erfolgt im Pinching-off-Modus die axiale Extension des Prüfkörpers durch Steigerung des Manteldrucks (radiale Belastung) bei konstanter Axiallast ebenfalls ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand. Der Abrupt-Modus bildet hinsichtlich seiner extremalen Entlastungs-geschwindigkeit einen Sonderfall der axialen Entlastung und somit des Regulär-Modus (vgl. Kap. 4).

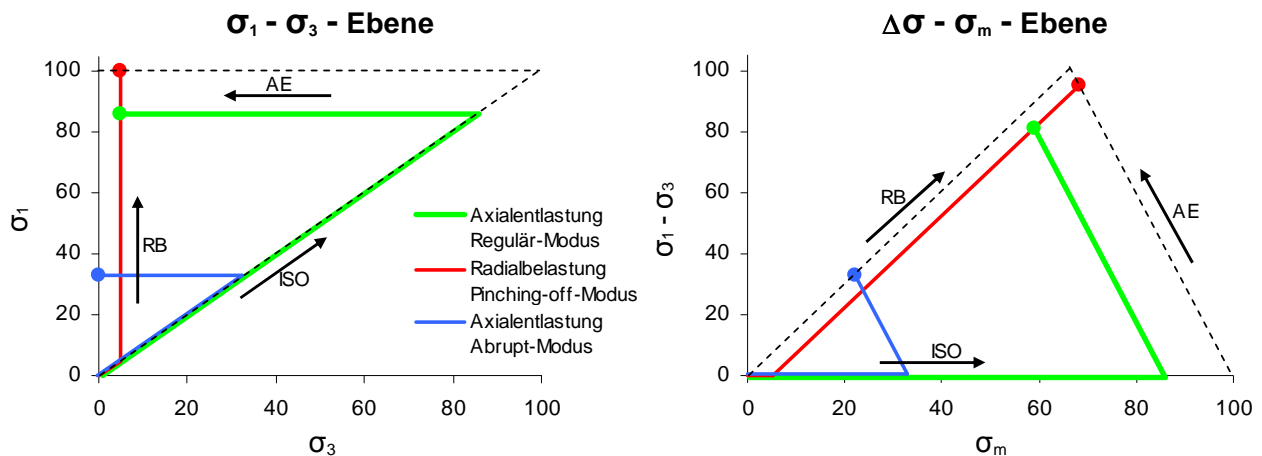


Abb. 15: Spannungspfade im Regulär- und Abrupt-Modus (Axialentlastung, AE) sowie Pinching-off-Modus (Radialbelastung, RB) ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand (ISO):

Die Durchschnitts- bzw. mittlere Spannung $[\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3]$ und der isostatische Spannungsanteil werden im Regulär-Modus mit Reduktion der Axialspannung (σ_3) und konstanter Radialspannung ($\sigma_1 = \sigma_2$) kontinuierlich verringert.

Bei Radialbelastung im Pinching-off-Modus, d. h. Steigerung der Radialspannung ($\sigma_1 = \sigma_2$) bei konstanter Axialspannung (σ_3), erfährt die Durchschnittsspannung eine stetige Zunahme, während der isostatische Spannungsanteil konstant bleibt.

Axialentlastung im Abrupt-Modus erfolgt mit abrupt-rapider, extremaler Geschwindigkeit.

Die Differenzspannung zwischen Radial- und Axialspannung resp. größter und kleinster Hauptspannung ($\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\text{radial}} - \sigma_{\text{axial}}$) steigt generell bis zum Bruchversagen oder Maximum der Prüfmaschinenkapazität an.

Die Modi führen prinzipiell zum gleichen Spannungs-Verformungs-Zustand (Abb. 11) allerdings auf abweichenden Spannungspfaden (Abb. 15). Strebt man mit den beiden konträren Modi den gleichen Spannungsendzustand an, beginnt der Regulär-Modus mit einer maximalen Durchschnittsspannung $[\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3]$ und einem maximalen isostatischen Spannungsanteil, welche während des Versuchsablaufs abfallen. Beim Pinching-

off-Modus erfährt die mittlere Spannung (σ_m) dagegen eine stetige Steigerung und der isostatische Spannungsanteil bleibt konstant. Die Hauptspannungskomponenten sind technisch jeweils auf 100 MPa begrenzt (Kap. 4). Bis zu dieser Grenze kann unabhängig vom Spannungspfad die maximal mögliche Differenzspannung zwischen größter (σ_1) und kleinster (σ_3) Hauptspannung anwachsen ($\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\text{radial}} - \sigma_{\text{axial}}$).

Im Folgenden werden die im Regulär-, Pinching-off- und Abrupt-Modus gewonnenen Versuchsergebnisse entsprechend den ermittelten Trennbruchbedingungen systematisiert nach Lithotyp und Versuchsmodus dargelegt. Diesbezüglich werden die vier Haupt-Lithotypen (Sandsteinserien BE-S und Si-S sowie Konglomeratserien BE-K und Si-K) und die ergänzenden Gesteinsarten (Granit, Rhyolith, Basalt sowie Lindau-Sandstein) unterschieden (vgl. Kap. 4.4).

Im Anhang findet sich eine Auflistung aller durchgeführten Extensionsversuche. Angegeben sind die ermittelten Parameter der Einzelversuche sowie die Bruchergebnisse differenziert nach Bruchtyp, Anzahl, Bruchwinkel und Position (bzgl. einer gleichmäßigen Segmentierung entlang der Prüfkörperlängsachse in fünf Ebenen). Die Tab. 4 bis 10 enthalten zusammenfassende Ergebnisdarstellungen hinsichtlich der verschiedenen Versuchsmodi und Lithotypen.

5.1 Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Regulär- und Pinching-off-Modus

In der Versuchsdurchführung ließen sich versuchstechnisch maximale Radialspannungen von 85 MPa im Regulär-Modus und bis zu 100 MPa im Pinching-off-Modus umsetzen. Mit einer minimalen Axiallast von etwa 5 MPa resultierten die maximal möglichen Differenzspannungen. Unter Berücksichtigung eines Porenfluiddrucks verringerten sich diese entsprechend, da systembedingt Kolben- und Manteldruck betragsmäßig stets über dem Porenfluiddruck liegen müssen. Die Maximalbelastungen, hinsichtlich der Durchschnitts- und Differenzspannungen, ließen sich daher mit Versuchen ohne bzw. mit niedrigem Porenfluiddruck realisieren. Neben der Wirkung des Porenfluiddrucks wurden der Durchfeuchtungszustand (trocken vs. gesättigt) und die Regelungsart (Druck vs. Weg) variiert (siehe Kap. 4). Die entsprechend diesen Randbedingungen ausgehaltenen Versuchsvarianten der beiden Versuchsmodi der Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S sind aus Tab. 4 ersichtlich. Mit Axialentlastung im Regulär-Modus [R] ergeben sich somit die sechs Versuchsvarianten gemäß den beiden Regelungsarten [R-a = $\dot{\sigma}_{\text{axial}}$, R-b = $\dot{\epsilon}_{\text{axial}}$] und den drei Durchfeuchtungs- und Porenfluiddruck-/Drainage-Bedingungen [1 = trocken/drainiert, 2 = gesättigt/drainiert, 3 = gesättigt/ p_{Fluid}] (s. Kap. 5.1.1). Mit Radialbelastung im Pinching-off-Modus [P] (s. Kap. 5.1.2) folgen analog drei spannungsgesteuerte Versuchsvarianten (P1–P3). Die druck- bzw. spannungsgesteuerten Schnellversuche [SV] erfolgten bei konstanter Radialspannung und unterschiedlich schneller Axialentlastung. Hier entsprechen die übrigen Randbedingungen denen des spannungsgeregelten Regulär-Modus.

Zunächst wurden die beiden Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S intensiv untersucht, so dass diese den größeren Anteil der Gesamtversuchsreihen einnehmen. Aus ihnen schöpfte sich der höchste Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Entwicklung der Extensionsexperimente.

Tab. 4: Zusammenfassende Untersuchungsergebnisse der an den Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S durchgeführten Versuchsvarianten im Regulär-Modus (R1–R3, SV) und Pinching-off-Modus (P1–P3):

Angegeben sind die ertragenen Spannungs- und Verformungszustände bei technisch möglicher Maximalbelastung. Die angestrebten Trennbruchergebnisse oder anderweitiges Bruchversagen ließen sich hierbei nicht erzielen.

Es wurden die Randbedingungen *Regelungsart* [R-a = $\dot{\sigma}_{axial}$, R-b = $\dot{\epsilon}_{axial}$, P = $\dot{\sigma}_{radial}$] sowie *Feuchtegehalt und Porenfluiddruck bzw. Drainage* [1 = trocken/drainiert, 2 = gesättigt/drainiert, 3 = gesättigt/ p_{Fluid}] variiert. Zusätzlich erfolgten Versuche mit extrem hohen Entlastungsgeschwindigkeiten in Anlehnung an die sonstigen Randbedingungen der Versuchsvarianten R1–R3 im „Schnellversuch“ [SV].

Nr.	Versuchsvariante	Lithotyp	$\dot{\sigma}_{ax}, \dot{\sigma}_{rad}$ [MPa/s] $\dot{\epsilon}_{axial}$ [s ⁻¹]	σ_1 max (radial) [MPa]	σ_3 min (axial) [MPa]	p_{Fluid} max [MPa]	ϵ_{axial} max [%]	Trennbruch
R1a	Regulär, druckgesteuert: trocken, drainiert	BE-S: Si-S:	$\dot{\sigma}_{ax}: 4 \cdot 10^{-3}$	85	5	drainiert	0,48 0,57	nein nein
R1b	Regulär, weggesteuert: trocken, drainiert	BE-S: Si-S:	$\dot{\epsilon}_{axial}: 3 \cdot 10^{-7}$	85	5	drainiert	-- 0,58	nein nein
R2a	Regulär, druckgesteuert: gesättigt, drainiert	BE-S: Si-S:	$\dot{\sigma}_{ax}: 4 \cdot 10^{-3}$	85	5	drainiert	0,49 0,56	nein nein
R2b	Regulär, weggesteuert: gesättigt, drainiert	BE-S: Si-S:	$\dot{\epsilon}_{axial}: 3 \cdot 10^{-7}$	85	5	drainiert	-- 0,59	nein nein
R3a	Regulär, druckgesteuert: gesättigt, p_{Fluid}	BE-S: Si-S:	$\dot{\sigma}_{ax}: 4 \cdot 10^{-3}$	85	12-45	5-40	0,46-0,32 0,56-0,31	nein nein
R3b	Regulär, weggesteuert: gesättigt, p_{Fluid}	BE-S: Si-S:	$\dot{\epsilon}_{axial}: 3 \cdot 10^{-7}$	85	12-45	5-40	0,50-0,29 0,59-0,30	nein nein
P1	Pinching-off: trocken, drainiert	BE-S: Si-S:	$\dot{\sigma}_{rad}: \sim 10^{-2}$ sukzessiv(+)	100	5	drainiert	-- (1)	nein nein
P2	Pinching-off: gesättigt, drainiert	BE-S: Si-S:	$\dot{\sigma}_{rad}: \sim 10^{-2}$ sukzessiv(+)	100	5	drainiert	-- (1)	nein nein
P3	Pinching-off: gesättigt, p_{Fluid}	BE-S: Si-S:	versuchstechnisch bedingt nicht ausführbar					
SV	Schnellversuch, druckgesteuert	BE-S: Si-S:	$\dot{\sigma}_{ax}: \leq 4 \cdot 10^0$	85	R1–R3	R1–R3	0,50-0,48 0,61-0,27	nein nein

σ_1 (radial) max Radial- bzw. größte Hauptspannung (maximal für diese Versuchsvariante)

σ_3 (axial) min Axial- bzw. kleinste Hauptspannung (minimal für diese Versuchsvariante)

p_{Fluid} max konstanter, geregelter Porenfluiddruck bzw. Drainage (maximale Druckstufe für diese Versuchsvariante)

ϵ_{axial} max Axialdehnung bei Maximalbelastung

$\dot{\sigma}_{ax}, \dot{\sigma}_{rad}, \dot{\epsilon}_{axial}$ Standard-Spannungs- bzw. -Verformungsrate für diese Versuchsvariante; im Regulär-Modus axiale Entlastung ($\sigma_{3=ax}$ – Abnahme), im Pinching-off-Modus radiale Belastung ($\sigma_{1=rad}$ – Zunahme [+])

(1) Bestimmung bei veränderlichem Manteldruck versuchstechnisch nicht möglich

5.1.1 *Regulär-Modus*

Die Sandsteinserien BE-S und Si-S wurden in Kombination mit den verschiedenen, oben aufgeführten Randbedingungen (Durchfeuchtung, Porenfluiddruck) mit quasi-statischer axialer Entlastung bei konstantem Seitendruck in beiden Regelungsarten geprüft. Als Geschwindigkeiten kamen dazu zunächst über die verschiedenen Experimente gleich bleibende, relativ niedrige (quasi-statische) Spannungs- und Verformungsraten zur Anwendung. Die Grenzen des Durchfeuchtungszustandes bildeten trockene und im Hinblick auf die effektive Porosität vollständig wassergesättigte Proben (R1 und R2). Die Experimente erfolgten zum einen drainiert mit beiden Feuchtegehalten bzw. Sättigungsgraden und zum anderen unter Einwirkung eines konstant eingestellten Porenfluiddrucks in verschiedenen Stufen an separat gesättigten Prüfkörpern (R3). Da der Porenfluiddruck systembedingt betragsmäßig unterhalb der kleinsten Hauptspannung liegen muss und sich somit die Minimalspannung erhöht, wurden in der Versuchsvariante R3 maximale Porenfluiddrücke betragsmäßig bis etwa zum halben Manteldruck berücksichtigt. Diese Randbedingungen kamen sowohl mit Druck- bzw. Spannungssteuerung (R-a) als auch mit Weg- bzw. Verformungssteuerung (R-b) zur Anwendung.

Exemplarisch für den Einfluss der Regelungsart auf die Versuchsergebnisse zeigt Abb. 16 eine Gegenüberstellung von zeitlichem und Spannungs-Verformungs-Verlauf für denselben Lithotyp in Spannungs- und in Verformungssteuerung unter sonst identischen Bedingungen und mit gleichem bruchlosen Versuchsausgang. Unterschiede lassen sich im Regelverhalten erkennen:

In Spannungsregelung dominiert eher ein um den Zielwert schwingender Spannungsverlauf. Demgegenüber ist die Steuerung der Verformung durch ein stufenweises Regelverhalten gekennzeichnet. Beiden gemeinsam ist eine veränderliche Steuerungsintensität im zeitlichen Verlauf der kontinuierlichen Axialentlastung, ausgedrückt durch die relativen Änderungsbeträge von Axialspannung bzw. Axialverformung. Beginnend beim Eintritt in die Extensionsphase lässt sich zumeist eine Zunahme der relativen Änderungsbeträge registrieren, die ihr Maximum bei einer axialen Entlastung zwischen ca. 60 % bis 30 % der Radialspannung erreicht. Besonders augenscheinlich wird ein Abklingen der Spannungs-Verformungs-Schwankungen etwa im letzten Drittel der maximal möglichen Differenzspannung.

Im spannungsgesteuerten Versuch kann dieser Übergang insbesondere im Verlauf der Axialverformung markant ausgeprägt sein, ohne dass am Prüfkörper eine makroskopisch sichtbare Bruch- oder Risserscheinungen festzustellen ist. Der spannungsgesteuerte Test zeichnet sich zudem durch etwas größere Schwankungen aus (Abb. 16 unten). Überdies herrscht im Spannungs-Verformungs-Verlauf weitestgehende Übereinstimmung zwischen beiden Regelungsvarianten.

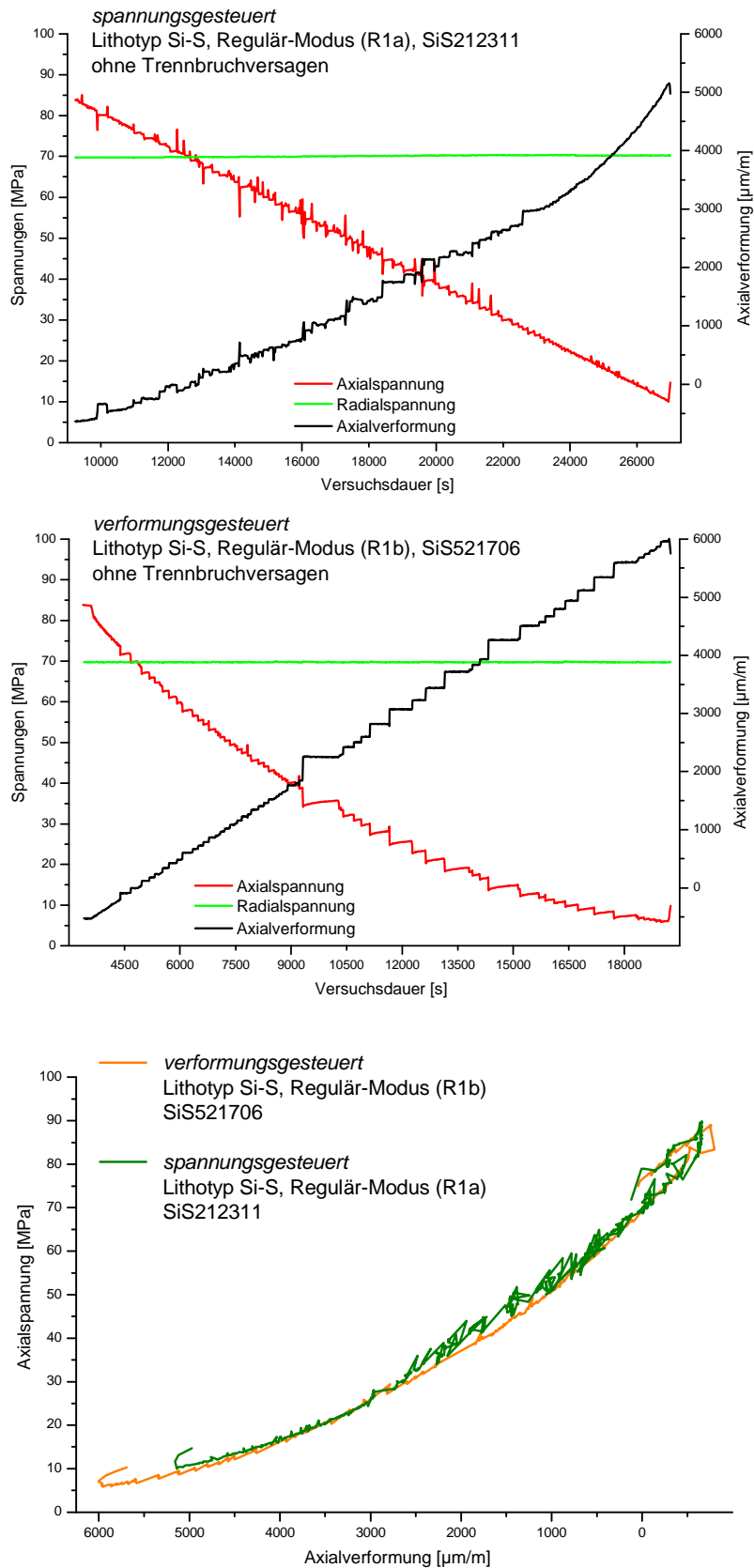


Abb. 16: Gegenüberstellung von zeitlichem Verlauf und Spannungs-Verformungs-Kennlinie für die beiden Regelungsarten Spannungs- bzw. Druck-Steuerung (a) und Verformungs- bzw. Weg-Steuerung (b) im Regulär-Modus beispielhaft am Lithotyp Si-S:

Die beiden Versuche erfolgten unter sonst gleichen Randbedingungen: quasi-statische axiale Entlastung an trockenen Proben drainiert (R1) bei konstanter Radialspannung von 70 MPa.

Das typische, unterschiedliche Regelverhalten schlägt sich kaum im Spannungs-Verformungs-Verlauf nieder. Dieser ist nahezu deckungsgleich für beide Versuchsvarianten bzw. Steuerungsarten.

Die in Tab. 4 beschriebenen Spannungszustände entsprechen insofern einer Maximalbelastung, wie sie die technische Auslegung der Triaxialzelle zulässt. Angesichts einer im Vorfeld der eigentlichen Extension vorangestellten kompressiven Belastungsphase zur Gewährleistung und Überprüfung einer allseitigen Einspannung sowie der über den gesamten Extensionstest konstant zu haltenden seitliche Einspannung ergaben sich maximal realisierbare Radialspannungen von 85 MPa. Zuzüglich einer quasi-statischen axialen Entlastung bis minimal etwa 5 MPa (zur Aufrechterhaltung des Kontakts zwischen Druckstempel und Probe) wurden bei drainierten Versuchen ohne Porenfluiddruck maximale Differenzspannungen von 80 MPa erreicht. Unter Berücksichtigung eines Porenfluiddrucks verminderten sich diese entsprechend ($\min \sigma_{\text{axial}}, \min \sigma_{\text{radial}} \geq p_{\text{Fluid}}$).

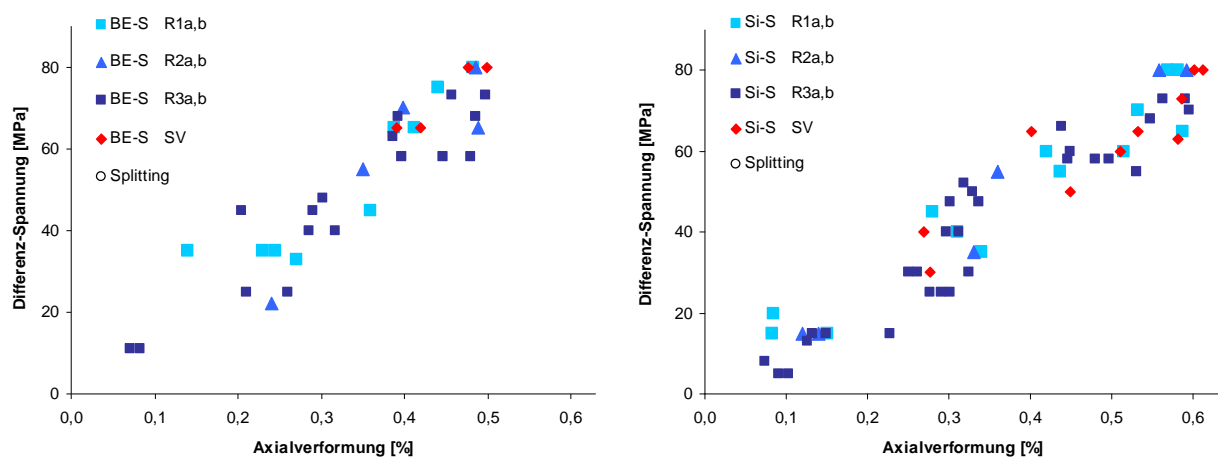


Abb. 17: Axialverformungen aufgetragen gegen die Differenzspannung für die beiden Sandsteinserien BE-S und Si-S im Extensionsversuch getrennt nach den verschiedenen Versuchsvarianten im Regulär-Modus (vgl. Tab. 4):

Ungeachtet von Regelungsart, Durchfeuchtung, Porenfluiddrücken oder Entlastungsrate steigt die axiale Extension mit zunehmender Differenzspannung an. Die Werte streuen dabei etwa um 0,1 % bis 0,2 %. Analog zum Verhalten im Einzelversuch (Abb. 18) weisen die Proben des Lithotyps Si-S geringfügig höhere Verformungen auf. Trennbruchversagen (Splitting) konnte für beide Lithotypen bei axialer Entlastung unter Variation der Randbedingungen Durchfeuchtung (R-1,2), Porenfluiddruck (R-3), Regelungsart (a, b) und Entlastungsgeschwindigkeit (SV) unter den gewählten versuchstechnischen Bedingungen (Kap. 4) nicht stimuliert werden.

Keiner dieser Beanspruchungszustände unter den einbezogenen Randbedingungen gemäß den vorgenannten Versuchsvarianten führte bei den beiden Lithotypen BE-S und Si-S zu bruchhafter Reaktion. Die angestrebte Stimulation von Trennbrüchen war mit diesen Lithotypen und der zur Verfügung stehenden Triaxialanlage inklusive der vorgesehenen Prüfkörpergeometrie (s. Kap. 4) in diesem Versuchsmodus nicht zu erzielen. Beide Gesteinsserien ertragen demnach die mit der eingesetzten Prüfmaschine technisch maximal umsetzbaren Spannungszustände und Maximalverformungen in Form axialer Extension bei Variation der Randbedingungen Durchfeuchtung (R-1,2), Porenfluiddruck (R-3), Regelungsart (a, b) und Entlastungsgeschwindigkeit (SV), ohne ihre Trennbruchfestigkeit hinsichtlich

der Lastgeometrie Extension im Triaxialversuch an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern zu erreichen bzw. zu überschreiten.

Die maximalen Verformungen in Richtung der Prüfzylinderachse korrespondieren weitgehend mit den Differenzspannungen (Abb. 17). Aus den Versuchsergebnissen lässt sich kein Zusammenhang zwischen Verformung und den unterschiedlichen Randbedingungen der einzelnen Versuchsvarianten ableiten, wenngleich eine deutliche Streuung der Maximalverformungen erkennbar wird. Die Streubreite beträgt gleichermaßen für eine wie über alle Versuchsvarianten etwa 0,1 % bis 0,2 % Axialverformung. Hierin sind die beiden Lithotypen kaum zu unterscheiden. Die Verformungen bei Maximalbelastung liegen für die Probenserie Si-S zwischen 0,56 % und 0,59 % und für BE-S zwischen 0,46 % und 0,50 %.

Die generell geringeren maximalen Axialverformungen bei vergleichbarer Belastung in den verschiedenen Tests des Lithotyps BE-S gegenüber Si-S spiegeln sich auch im Einzelversuch wider. In Abb. 18 sind im Spannungs-Verformungs-Diagramm beide Lithotypen in der gleichen Versuchsvariante gegenübergestellt. Der relative Verlauf beider Kurven ist vergleichbar und stimmt mit den obigen Ausführungen zum Regelungsverhalten (Abb. 16) überein.

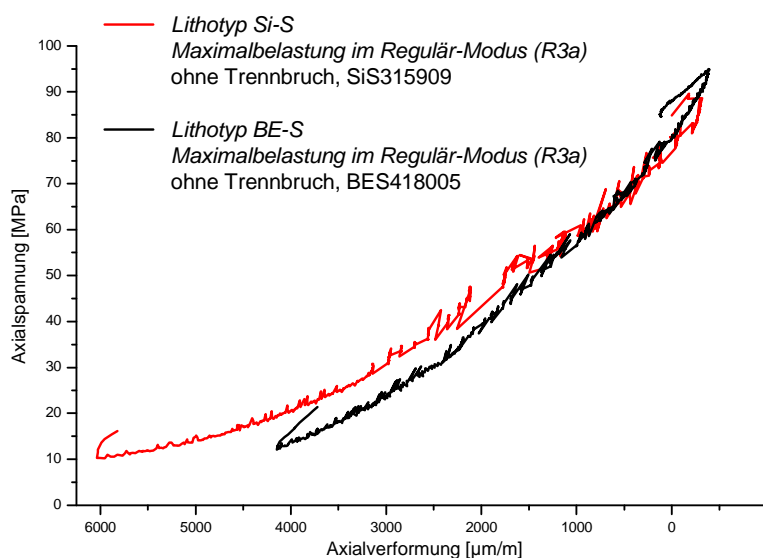


Abb. 18:

Spannungs-Verformungs-Verlauf der beiden Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Regulär-Modus (Versuchsvariante R3a): In den beiden Extensionsversuchen wurden die Prüfkörper ausgehend von einem isotatischen Spannungszustand von 85 MPa und einem Porenfluiddruck von 5 MPa spannungsgesteuert axial entlastet.

Die beiden Tests zeigen exemplarisch den generellen Unterschied zwischen den beiden Sandsteinserien im Spannungs-Verformungs-Verhalten.

Gleichwohl traten vereinzelt bruchhafte Ergebnisse auf, die jedoch entweder auf Leckagen der Probenummantelung oder auf unplanmäßige Reaktionen der Steuerung zurückzuführen sind. Aufgrund ihrer bemerkenswerten Abweichung zum regulären Versuch sollen diese Versuchsergebnisse im Folgenden näher betrachtet werden:

Eine Leckage des Probenhüllschlauchs führt zum hydraulischen Kurzschluss zwischen dem Manteldruckraum außerhalb und dem Porenfluiddruckraum innerhalb der Probenummantelung. Infolge der Permeation des Manteldruckmediums in den Porenraum strebt der Porenfluiddruck innerhalb der Probe diesem Druckniveau des Manteldrucks entgegen. Gleichzeitig ist die Isolierung von Mantel- und Kolbendruck aufgehoben, was das sofortige Abheben des Axialkolbens bedingt. Im Anschluss ist der Prüfkörper allseitig vom Manteldruckmedium belastet (vgl. Abb. 12).

Bei mittleren und höheren Manteldrücken entstanden ungeachtet des Einbau-Sättigungsgrades sowie der unmittelbar vor der Leckage herrschenden Porenfluiddrücke und Differenzspannungen Brüche subnormal zur Zylinderachse. Ausbildung und Orientierung der erzeugten Brüche bescheinigen Trennbruchversagen, woraus gemäß den vorstehenden Annahmen (vgl. Kap. 4) zu schließen ist, dass eine zumindest kurzzeitig spontane axiale Entlastung zum Zeitpunkt des Abhebens des axialen Druckkolbens vorliegt. Somit ist hierfür von einem in Richtung Zylinderlängsachse einspannungsfreien Spannungszustand auszugehen.

Ähnliche Effekte traten vereinzelt beim Übergang von der kompressiven zur extensiven Versuchsphase ein. Bedingt durch die technische Auslegung der Hydrauliksteuerung (vgl. Kap. 4) kam es vereinzelt in dieser Phase des Versuchsablaufs ebenfalls zum plötzlichen, schlagartigen Abheben des Druckkolbens.

Schließlich waren in vereinzelten Versuchen unstetige Druckentlastungsspitzen des Axialdrucks zu verzeichnen. Die Ursache lag in Störungen der PC-gesteuerten kontinuierlichen Entlastung insbesondere bei höheren Manteldrücken und Berücksichtigung von Porenfluiddrücken, bevorzugt in Weg- aber auch in Druck-Regelung. Kennzeichnend für diese sprunghaften Änderungen sind unterschiedliche Spannungs- und Verformungsbeträge in kürzesten Zeitintervallen. Solange dabei ein Abheben des axialen Druckstempels ausblieb, wurden die Versuche automatisch gemäß dem Regulär-Modus fortgeführt. Dennoch traten bei einem Teil dieser Versuche ebenso wie im Leckagefall radiale Trennbrüche auf.

Infolge ihrer auseinander gehenden Bruchergebnisse gestaltete sich ein diesbezügliches Differenzieren der Störeinflüsse zunächst schwierig. Eine Beschreibung und Auswertung dieser Versuche erfolgt gesondert (s. Kap. 5.2 und 6.2). Vorweggenommen ist allgemein davon auszugehen, dass weder Belastungszustand noch Ausgangsbedingungen als Bruchauslöser genügen, da dieselben Lithotypen im Regulär-Modus ohne ausgeprägte Druckspitzen bei den sonst gleichen Bedingungen und sogar höheren Belastungen bruchlos reagierten (Tab. 4). Da sie dennoch teilweise in der Ausbildung von Trennbrüchen resultierten, wurde die Ursache des Unterschieds der Probenreaktion in der Entlastungsart, d. h. ihrer Entlastungsgeschwindigkeit, vermutet.

Zur experimentellen Überprüfung dieser Hypothese sollten Versuche mit deutlich höheren Entlastungsgeschwindigkeiten dienen. Aus regelungstechnischen Gründen war dies am sinnvollsten mittels Drucksteuerung umsetzbar. Unter gleichen Randbedingungen wie in den

zuvor erläuterten Versuchsvarianten R1a, R2a und R3a (Durchfeuchtung, Porenfluiddruck) erfolgten diese „Schnellversuche“ ebenfalls an beiden Lithotypen. Die Grenze einer regelbaren Spannungsrate bzw. Geschwindigkeit ist etwa bei dem Dreifachen der maximalen Differenzspannung pro Minute erreicht ($\leq 4 \cdot 10^0$ MPa/s), was eine bis zu 1.000fache Erhöhung im Vergleich zur Standardregelung bedeutet.

Die gleichen Spannungszustände wie im Regulär-Modus zeigen bei den gewählten extrem hohen Geschwindigkeiten keine wesentlichen Unterschiede ihrer maximalen Axialverformungen (Abb. 17). Es blieb auch mit höchstmöglicher regelbarer Entlastungsrate bei den bruchlosen Resultaten.

Um dennoch die teilweise bruchhaften Ergebnisse der Versuche mit Unregelmäßigkeiten der Steuerung oder Leckagen der Probenummantelung experimentell simulieren zu können, wurde der Abrupt-Modus eingeführt (s. Kap. 5.2).

5.1.2 *Pinching-off-Modus*

Zur Überprüfung eines möglichen Einflusses des Spannungspfades (s. Abb. 15) wurden die beiden Sandstein-Probenklassen BE-S und Si-S im Pinching-off-Modus in radialer Belastung bei möglichst geringer Axiallast (im Hinblick auf höchstmögliche Differenzspannungen) bis zum maximalen Manteldruck von 100 MPa gefahren. Infolge fehlender automatischer Regelungsmöglichkeit des Manteldrucks ist hierzu ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand mit dem Betrag der gewünschten Axialspannung selbige konstant zu halten und der Manteldruck manuell sukzessive zu steigern. Ist ein Porenfluiddruck hinzuziehen, erhöht sich der isostatische Ausgangszustand entsprechend. Die Wahl der Stufen orientierte sich an einer technisch erreichbaren gleichmäßigen Spannungszunahme. Die Randbedingungen Durchfeuchtung und Porenfluiddruck wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit in Übereinstimmung mit dem Regulär-Modus eingestellt und variiert. Daraus ergeben sich die drei Versuchsvarianten P1–P3 (Tab. 4).

Die Auslegung der Triaxialzelle als Satellitenautoklav mit einer Konnexion der axialen Wegmessung an den Druckkolben (Kap. 4.1, Abb. 12) führt zu einem Manteldruck abhängigen Nullpunktbezug der Axialdeformation. Daher waren bei radialer Belastung, d. h. bei veränderlichem Manteldruck – anders als im Regulär-Modus mit konstantem Manteldruck – keine sinnvollen Dehnungsmessungen möglich.

Im Gegensatz zur automatischen Steuerung im Standardfall Regulär-Modus gestaltete sich die Versuchsdurchführung im Pinching-off-Modus um einiges komplexer. Die ausschließlich manuell vorgesehene Steuerung in Form sukzessiver Steigerung des Manteldrucks hat zur Folge, dass in diesen Phasen einzig der Manteldruck-Kreis von der Einkreis-Hydraulik (vgl. Kap. 4) bedient werden kann. Kolbendruck- und Porenfluiddruck-Kreis erfahren während-

dessen keine Regelung. Diese sind lediglich manuell alternierend zwischen den drei Kreisen aktivierbar. Demzufolge war unter den gegebenen Voraussetzungen maximal eine zweikreisige manuelle Steuerung umsetzbar. Auf die Berücksichtigung eines Porenfluid-drucks musste daher im Pinching-off-Modus verzichtet werden. Die so realisierbaren Belastungsgeschwindigkeiten der Radialspannung bei möglichst konstanter Axialspannung sind vergleichsweise hoch. Mit der manuellen Steigerung betragen die durchschnittlichen Spannungsraten der Radialbelastung ($\dot{\sigma}_{1 = \text{radial}}$) zwischen ca. $2 \cdot 10^{-2}$ MPa/s und $8 \cdot 10^{-2}$ MPa/s. Diese liegen um etwa eine Größenordnung höher als die Standard-geschwindigkeit der Axialentlastung im Regulär-Modus ($\dot{\sigma}_{3 = \text{axial}}$).

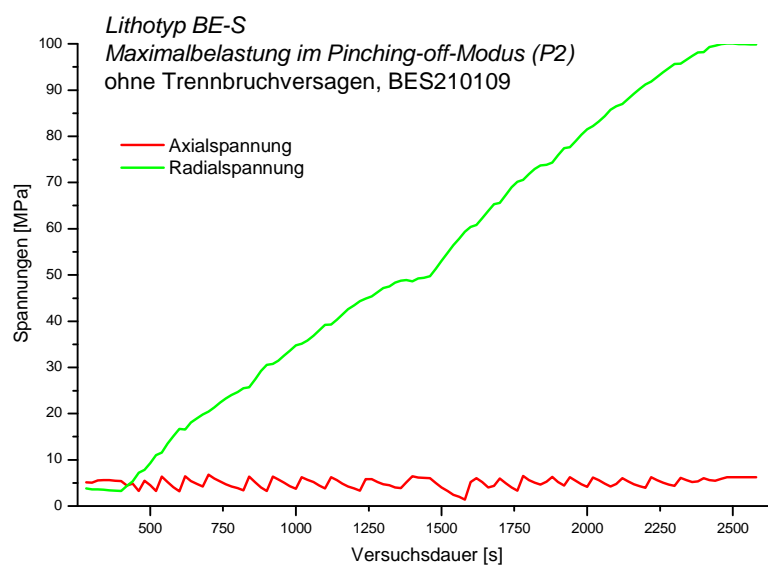


Abb. 19: Maximalbelastung im Pinching-off-Modus: Ausgehend von einem (möglichst niedrigen) isostatischen Spannungsniveau wurde bei konstanter Axialspannung die Radialspannung bis zum Bruch oder Maximalkapazität der Triaxialanlage gesteigert. Das Beispiel des Lithotyps BE-S im gesättigten, drainierten Versuch zeigt die maschinenseitig bedingte manuelle Steuerung, die in sukzessiven Änderungen der Radial- und Axialspannung resultiert. Beide Sandsteinserien blieben bis zur versuchstechnischen Maximal-last ohne Trennbruchversagen.

Die Versuchsergebnisse stimmen mit denen aus dem Regulär-Modus dahingehend überein, dass die technisch maximalen Belastungen von beiden Lithotypen ohne die angestrebte Bildung von Trennbrüchen ertragen wurden (Abb. 19). Mit bis zu 100 MPa Radialspannung und minimaler Axialspannung von ca. 5 MPa liegen die geprüften maximalen Differenzspannungen geringfügig über denen im Regulär-Modus (Tab. 4).

Dahingehend lassen sich keine Unterschiede erkennen, die aus dem veränderlichen Spannungspfad im Pinching-off-Modus gegenüber dem Regulär-Modus bedingt würden. Die Maximalbelastungen wurden in gleicher Weise von trockenen und wassergesättigten Proben beider Gesteinserien bruchlos aufgenommen.

5.2 Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus

Die triaxialen Extensionsversuche der beiden Sandsteinserien BE-S und Si-S haben weder im Regulär-Modus noch im Pinching-off-Modus bei korrektem, planmäßigem Versuchsablauf zu Bruchversagen geführt.

Die oben beschriebene Abweichung von diesen Testergebnissen in Form von Trennbruchversagen bei sprunghafter, plötzlicher Entlastung infolge von Unregelmäßigkeiten in der Versuchssteuerung oder Leckagen der Probenummantelung konnte mit größtmöglichen, noch regelbaren axialen Entlastungsraten im Regulär-Modus (Schnellversuche) experimentell zunächst nicht reproduziert werden (Kap. 5.1.1).

5.2.1 *Erzwungene, unregelte Entlastung im Abrupt-Modus*

Um die technischen Grenzen der eingesetzten Versuchsapparatur zu umgehen, die keine höheren geregelten und damit bestimmten Geschwindigkeiten erlaubt, erfolgte im Abrupt-Modus eine erzwungene abrupte, rapide Axialentlastung bei vorgewähltem, konstantem Manteldruck. Da die Anlage nicht für derartige dynamische Prüfungen ausgelegt ist, sind die Geschwindigkeiten nicht regelbar und messtechnisch nur eingeschränkt erfassbar.

Dennoch ließen sich die Spannungszustände bestimmen und die damit verbundenen Verformungszustände zumindest eingrenzen. Abgesehen von der abrupten, nicht geregelten bzw. regelbaren Entlastungsgeschwindigkeit in Axialrichtung entspricht der Abrupt-Modus prinzipiell dem Regulär-Modus. Demnach wurden auch die dem Regulär-Modus adäquaten Randbedingungen (Durchfeuchtung, Porenfluiddruck) einbezogen (Tab. 5).

Ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand, drainiert an trockenen oder wassergesättigten Prüfkörpern oder mit geregelter Porenfluiddruck, initiiert das Zurückschnellen des Druckkolbens eine abrupte axiale Entlastung unter konstanten Manteldruck- und Porenfluiddruckbedingungen. Isostatisches Spannungsniveau und Randparameter ließen sich hierbei gemäß Tab. 5 als Ausgangsbedingungen variieren. Abweichend zum Regulär-Modus sind maximale Porenfluiddrücke bis zum Betrag der größten Hauptspannung, d. h. dem isostatischen Spannungszustand zu Versuchsbeginn, anwendbar, da das sonst nicht gewünschte „Wegdrücken“ des Druckkolbens in diesem Versuchsmodus hier explizit zu forcieren ist.

Die Versuche wurden durch Änderung des isostatischen Ausgangszustands sowie der verschiedenen Kombinationen mit den einbezogenen Randbedingungen (Versuchsvarianten A1 bis A3, Tab. 5) durchgeführt und die Bruchspannungen sukzessive mit Intervallen von bis zu 5 MPa eingegrenzt.

Bei einer derartigen „Steuerung“ kann der Kolben u. U. vollständig vom Probenaufbau abheben. In dessen Folge wirkt der Manteldruck nicht nur auf die ummantelte Seitenfläche der Probe, sondern auch auf die Kopf- resp. Stirnfläche, weil nach dem Abheben des

Druckkolbens dieser die obere Druckplatte freigibt (siehe Abb. 11). Wie bereits in Kap. 5.1.1 für die leckagierten Versuche erläutert, findet hierbei jedoch kurzzeitig eine einspannungsfreie Entlastung in Axialrichtung statt, wodurch die resultierende Axialspannung mit Null anzusetzen ist. Dies bedeutet, dass die resultierende Differenzspannung allein von der größten Hauptspannung kontrolliert wird.

Tab. 5: Bruchspannungszustände und eingegrenzte maximale Bruchverformungen der verwendeten Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus mit abrupter, rapider Axialentlastung infolge unregelmäßiger schlagartiger Druckentlastung: Hinsichtlich der extremen, unbestimmten Entlastungsraten repräsentiert der Abrupt-Modus einen Spezialfall des Regulär-Modus. Die Versuchsvarianten sind überdies deckungsgleich mit den Randbedingungen im Regulär-Modus (vgl. Kap. 5.1).

Nr.	Versuchsvariante	Lithotyp	$\dot{\sigma}_{ax}$ bzw. $\dot{\epsilon}_{ax}$	σ_1 (radial) [MPa]	σ_3 (axial) [MPa]	p_{Fluid} [MPa]	ϵ_{axial} lim [%]	Trennbruch
A1	Abrupt: trocken, drainiert	BE-S: Si-S:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	25 20	0	drainiert	0,14 0,10-0,83	ja ja
A2	Abrupt: gesättigt, drainiert	BE-S: Si-S:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	25 20	0	drainiert	0,12-0,48 0,46-0,50	ja ja
A3	Abrupt: gesättigt, p_{Fluid}	BE-S: Si-S:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	25 20	0	5-24 5-19	0,18-1,82 0,12-1,51	ja ja

σ_1 (radial) Radial- bzw. größte Hauptspannung beim Bruch
 σ_3 (axial) Axial- bzw. kleinste Hauptspannung beim Bruch (infolge Zurückschnellen des Druckkolbens stets Null)
 p_{Fluid} Porenfluiddruck bzw. Drainage (konstant-geregelt pro Einzelversuch als Ausgangsbedingung)
 ϵ_{axial} lim Axialdehnung beim Bruch (eingegrenzt gemäß minimaler Kolbenstellung nach Entlastung)
 $\dot{\sigma}_{ax} - \dot{\epsilon}_{ax}$ Entlastungsgeschwindigkeit

Das Zurückschnellen des Kolbens hat darüber hinaus Auswirkung auf die Erfassung der Axialdeformation, da diese an die Position des Kolbens gebunden ist (Kap. 4.1, Abb. 12). Der Druckkolben kann infolge der abrupt-rapiden Axialentlastung bis in seine Endlage zurückschnellen oder zwischen Probe und Endlage eine beliebige Position einnehmen. Aus diesem Grund lassen sich für die Dehnungen lediglich obere Grenzen angeben, die der Stellung des Kolbens im Moment der axialen Entlastung gleichkommen (Tab. 5).

Hinreichend schnelle, rapide Entlastung in axialer Richtung der Gesteinszylinder führte hier bei beiden Lithotypen – im Gegensatz zu einer kontinuierlichen axialen Entlastung (Regulär-Modus) oder radialen Belastung (Pinching-off-Modus) – zur Ausbildung von Trennbrüchen subnormal zur Längsachse der Proben. Die mit dieser Dynamik bruchauslösenden Spannungszustände (Tab. 5) sind dabei wesentlich geringer als die Maximalbelastungen bei kontinuierlicher Extension ohne Bruchinitial. Auch die eingegrenzten minimalen Axialverformungen sind zum Teil niedriger (Abb. 20):

Für den Lithotyp BE-S kam es ab einem isostatischen Ausgangsspannungszustand und demzufolge einer Differenzspannung von 25 MPa zu Trennbruchbildung, die bei 20 MPa

nicht zu stimulieren war. Für den Sandsteintyp Si-S genügten bereits Radialspannungen von 20 MPa zur Ausbildung von Trennbrüchen. Für beide Gesteinsarten gelten die ermittelten Trennbruchfestigkeiten sowohl für trockene als auch für wassergesättigte Proben unter drainierten Bedingungen. Auch mit verschiedenen Porenfluiddrücken bis zum Betrag der isostatischen Spannungen ergaben sich innerhalb der gewählten Druckstufen keine Änderungen. Der oben beschriebenen Durchführungsart der unbestimmten, rapiden Axialentlastung im Abrupt-Modus ist geschuldet, dass ein Einfluss unterschiedlicher Differenzspannungen bei der gleichen seitlichen Einspannung (größte Hauptspannung) nicht zu analysieren ist.

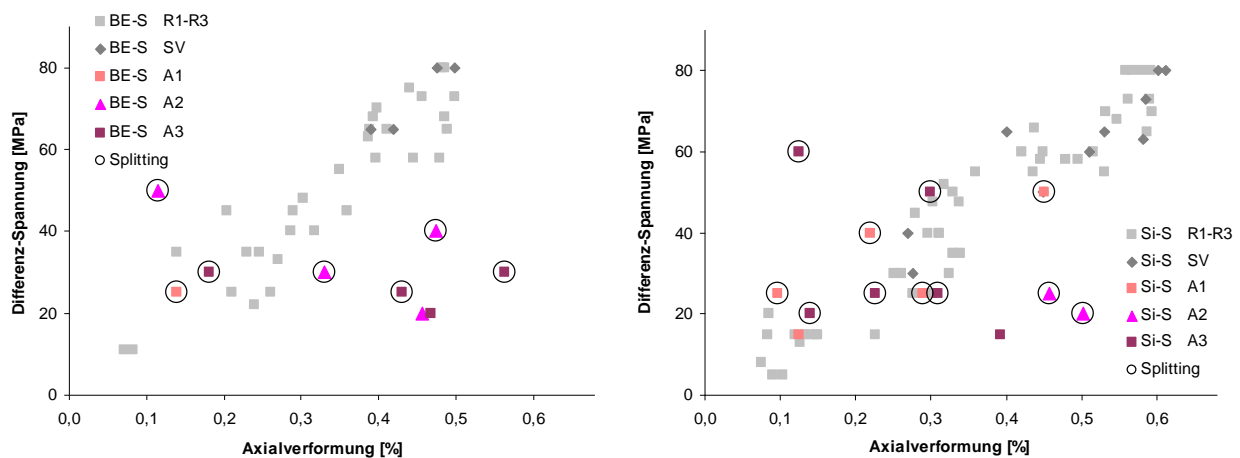


Abb. 20: Versuchsergebnisse der Lithotypen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus (A1–A3) bei abrupt-rapider Axialentlastung im Vergleich zum bruchlosen Regulär-Modus (Abb. 17) bei quasi-statischer Extension (R1–R3) oder extrem schneller, geregelter axialer Entlastung (SV):

Im Gegensatz zur geregelten, kontinuierlichen Extension durch axiale Entlastung oder radiale Belastung ließen sich mit abrupter, unregelmäßiger Axialentlastung beider Lithotypen Trennbrüche stimulieren. Splitting trat dabei ab einer bestimmten, vergleichsweise niedrigen größten Hauptspannung ein, die aufgrund der abrupt-rapiden spannungsfreien axialen Einspannung betragsmäßig der Differenzspannung entspricht. Z.T. genügten hierzu geringere Verformungen als im Regulär-Modus.

Hinsichtlich der Axialverformung ist festzustellen, dass etwa die Hälfte der Versuche mit einer Kolbenendlage infolge vollständigen Abhebens vom Probenaufbau endete. In Abb. 20 sind die eingrenzten Axialverformungen anhand der Minimalstellung des Druckkolbens nach erfolgter Axialentlastung gegen die Radialspannung bzw. Differenzspannung aufgetragen. Die dementsprechend mit ihren oberen Grenzen erfassten Bruchverformungen liegen minimal zwischen 0,1 % bis 0,2 % und lassen keinen Bezug zu ihren Bruchspannungen oder Randbedingungen erkennen. Für beide Lithotypen sind sie vereinzelt geringer als die Maximalverformungen bei gleicher Differenzspannung im Regulär-Modus ohne Bruchversagen.

5.2.2 Abrupte Entlastung im „Extremalversuch“

Die in Kap. 5.1.1 erläuterten Versuche, die durch sprunghafte Änderungen von Spannung und Verformung im regulären Versuchsablauf infolge von Störungen der PC-Regelung gekennzeichnet sind, entsprechen zum Zeitpunkt der plötzlichen Steuerungssprünge und somit Spannungs- und Verformungsspitzen dem Abrupt-Modus. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Druckkolben trotz extremaler Entlastung nicht vollständig abhebt und der Versuch ungeachtet der jeweiligen Änderungssprünge fortläuft, so dass eine ununterbrochene Datenaufzeichnung vorliegt (Abb. 21).

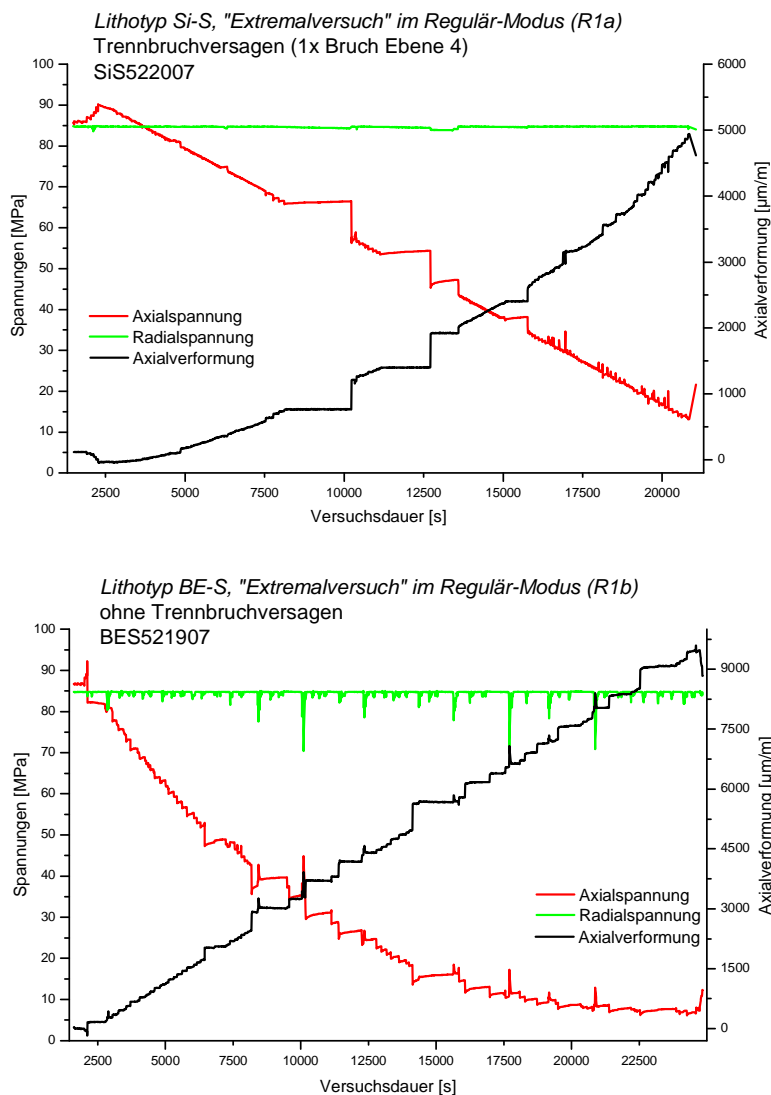


Abb. 21: Durch Störungen der Versuchssteuerung bedingte Schwankungen von Spannung bzw. Verformung im Regulär-Modus:

Im Moment der irregulären, sprunghaften Spannungs-Verformungs-Änderungen entsprechen sie den Bedingungen im Abrupt-Modus. Die un stetigen Änderungsspitzen traten in beiden Regelungsarten auf und führten bei beiden Sandstein-Lithotypen teilweise zur Ausbildung von Trennbrüchen im Gegensatz zum regulären Versuchsablauf.

Der durch derartige Änderungssprünge gekennzeichnete Versuchsablauf schließt die beiden gegensätzlichen Bruchergebnisse mit unterschiedlicher Intensität und Häufigkeit der un stetigen Spannungs-Verformungs-Änderungen ein. Somit sind aus deren Vergleich Erkenntnisse zu ihren Bruchbedingungen ableitbar.

Die bruchhaften Versuchsergebnisse im Abrupt-Modus bei unbestimmter, abrupt-rapider Entlastungsrate stehen den bruchlosen Ergebnissen im Regulär-Modus, einschließlich seiner Versuchsvariante „Schnellversuch“ mit versuchstechnisch maximal regelbarer Entlastungsgeschwindigkeit, konträr gegenüber. Da der durch plötzliche, extremale Axialentlastungsspitzen gekennzeichnete Versuchsablauf der „Extremalversuche“ die beiden gegensätzlichen

Bruchergebnisse mit unterschiedlicher Intensität und Häufigkeit der unstetigen Spannungs-Verformungs-Änderungen einschließt, sind aus deren Vergleich Erkenntnisse zu ihren Bruchbedingungen zu erwarten.

Von den insgesamt 17 heranzuziehenden Extremalversuchen der beiden Lithotypen BE-S und Si-S mit extremalem, sprunghaftem Spannungs-Verformungs-Verlauf ohne Abheben des Axialkolbens, d. h. Zurückschnellen in seine Endlage, endeten 7 Tests mit der Ausbildung von Trennbrüchen (Tab. 6). Bei den übrigen Versuchen kam es nicht zu einem Bruchversagen oder sichtbarer Schädigung der Prüfkörper. Sprunghafte Änderungen traten bei höheren Radialspannungen und bevorzugt aber nicht ausschließlich bei verformungsgesteuerten Experimenten und / oder Porenfluidruck-Regelung auf.

Tab. 6: Extremale Spannungs-Verformungs-Änderungen der schlagartigen Unstetigkeiten im regulären Versuchsablauf infolge von Störungen der Versuchssteuerung im Regulär-Modus der Lithotypen BE-S und Si-S:
Ein Teil dieser Extremalversuche endete mit der Ausbildung von Trennbrüchen im Gegensatz zu den bruchlosen Maximalbelastungen derselben Lithotypen im Regulär- und Pinching-off-Modus.

Litho- typ	σ_1 (radial) [MPa]	ϵ_{axial} [%]	$\dot{\sigma}_{ax}$ [MPa/s]	$\dot{\epsilon}_{axial}$ [s ⁻¹]	$\Delta\epsilon_{axa}$ [%]	$\dot{\epsilon}_{axa}$ [s ⁻¹]	$\dot{\sigma}_{axa}$ [MPa/s]	$\sigma_1 - \sigma_{3a}$ normiert [%]	$\dot{\epsilon}_{axa} / \dot{\epsilon}_{axial}$ $\dot{\sigma}_{axa} / \dot{\sigma}_{ax}$ (1)	Trenn- bruch
BE-S	85,0	0,85		3,0E-07	0,09	9,3E-05	7,5E-01	64,8	312	ja
BE-S	70,0	0,56		3,0E-07	0,09	1,0E-04	8,0E-01	61,7	336	nein
BE-S	70,0	0,41		3,0E-07	0,05	4,5E-05	4,8E-01	73,1	153	nein
BE-S	80,0	0,52	5,0E-03		0,13	1,3E-04	1,9E+00	56,4	379	nein
BE-S	85,0	0,95		4,2E-07	0,06	6,1E-05	4,6E-01	78,2	146	nein
Si-S	80,0	0,75		3,0E-07	0,16	1,7E-04	4,3E-01	85,0	569	ja
Si-S	80,0	0,83		3,0E-07	0,10	9,7E-05	6,5E-01	77,4	327	ja
Si-S	85,0	0,77		4,2E-07	0,05	5,3E-05	4,4E-01	53,6	126	ja
Si-S	85,0	0,66		3,6E-07	0,08	8,1E-05	7,3E-01	70,5	226	ja
Si-S	85,0	0,74	4,2E-03		0,07	6,4E-05	4,6E-01	34,4	110	ja
Si-S	85,0	0,48	4,2E-03		0,05	5,1E-05	8,5E-01	36,2	205	ja
Si-S	70,0	0,45		4,2E-07	0,05	4,9E-05	4,9E-01	67,3	117	nein
Si-S	70,0	0,33		3,0E-07	0,08	7,8E-05	8,5E-01	61,4	262	nein
Si-S	70,0	0,59		3,0E-07	0,04	4,0E-05	4,3E-01	44,4	133	nein
Si-S	78,0	0,44	4,2E-03		0,06	5,3E-05	5,8E-01	42,9	139	nein
Si-S	80,0	0,61	7,5E-03		0,05	4,5E-05	8,6E-01	40,6	115	nein
Si-S	80,0	0,59		3,0E-07	0,07	7,3E-05	6,8E-01	75,0	244	nein

σ_1 (radial) Radial- bzw. größte Hauptspannung

ϵ_{axial} Axialdehnung am Versuchsende

$\dot{\sigma}_{ax}$, $\dot{\epsilon}_{axial}$ geregelte Spannungs- bzw. -Verformungsrate

$\dot{\sigma}_{axa}$, $\dot{\epsilon}_{axa}$ extremale Momentan-Spannungs- bzw. -Verformungsrate

$\Delta\epsilon_{axa}$ extremale Momentan-Verformungsänderung

$\sigma_1 - \sigma_{3a}$ norm. σ_1 -normierte Momentan-Differenzspannung

(1) Verhältnis Momentan-Geschwindigkeit zur Steuerungsrate

Während mit der Versuchsdurchführung im Abrupt-Modus ein axial einspannungsfreier Spannungszustand anzunehmen ist (s. o.), wird hier davon ausgegangen, dass bei den Änderungsspitzen der Extremalversuche ein bestimmter Anteil axialer Einspannung erhalten bleibt. Bei konstanten Radialspannungen lassen sich so jeweils Verformungsänderungen, Differenzspannungen und Änderungsgeschwindigkeiten hinsichtlich ihres Brucherfolgs eingrenzen. Hierzu wurden die Unstetigkeiten hinsichtlich ihrer momentanen extremalen Beträge von Axialspannung, Differenzspannung und Axialverformung sowie der minimalen Entlastungsgeschwindigkeit analysiert. Infolge der periodischen Messwerterfassung sind die mit den Regelsprüngen verbundenen Entlastungsraten allerdings lediglich mit ihrer unteren Grenze erfassbar.

Die Schwankungen bzw. Sprünge lassen sich auf momentane Entlastungsgeschwindigkeiten eingrenzen, die mindestens das 100- bis 600fache der eigentlichen Steuerungsraten zwischen $3 \cdot 10^{-3}$ MPa/s bis $8 \cdot 10^{-3}$ MPa/s bzw. $3 \cdot 10^{-7}$ s⁻¹ bis $4 \cdot 10^{-7}$ s⁻¹ erreichen. Sie sind nahezu über das gesamte Spektrum der im jeweiligen Einzelversuch möglichen Differenzspannungen verteilt (34 % bis 85 % der maximalen Differenzspannung). Die momentanen Verformungsänderungen sind dabei sowohl bei bruchlosem als auch bei bruchhaftem Ergebnis mit 0,04 % bis 0,16 % vergleichsweise gering (Tab. 6).

5.3 Lithotyp „Magmatite“

Die in Kap. 2.3 erläuterten unterschiedlichen Erfahrungen hinsichtlich der hydraulischen Stimulation kristalliner (i. S. magmatischer und metamorpher Tiefengesteine) und sedimentärer Zielhorizonte boten den Anlass, die im Regulär-Modus bruchlosen Versuchsergebnisse der Sandstein-Lithotypen entsprechenden Gegenproben an magmatischen Gesteinen zu unterziehen.

Diese besitzen im Allgemeinen ein im Gegensatz zu klastischen Gesteinen stärker ausgeprägtes Spröbruchverhalten (vgl. Kap. 4.4). Unter dieser Prämisse sind unter dem Lithotyp „Magmatite“ stichprobenhafte Einzelversuche an rhyolithischen, granitischen und basaltischen Werksteinproben zusammengefasst.

Die Versuchsdurchführung des Regulär- und Abrupt-Modus erfolgte analog zu den Darlegungen in Kap. 5.1 und 5.2, wobei sie auf den ofentrockenen Ausgangszustand im spannungsgesteuerten Regulär-Modus und im Abrupt-Modus begrenzt sind.

Diese drei Gesteinsarten konnten die technisch maximal mögliche kontinuierliche, quasi-statische Extensionsbelastung im Regulär-Modus (R1a) mit einer Radialspannung von 85 MPa und einer Differenzspannung von 80 MPa bruchlos aufnehmen. Im Abrupt-Modus (A1) genügte dem exemplarisch getesteten Rhyolith eine größte Hauptspannung von 20 MPa zu Trennbruchversagen bei schlagartiger axialer Entlastung (Tab. 7).

Tab. 7: Spannungs- und Verformungszustände der Magmatit-Lithotypen bei quasi-statischer Maximalbelastung im Regulär-Modus und bei abrupter, rapider Axialentlastung im Abrupt-Modus: Die Tests sind auf den druck- bzw. spannungsgesteuerten Regulär-Modus und den Abrupt-Modus im ofentrockenen Ausgangszustand beschränkt (Versuchsvarianten R1a und A1, vgl. Kap. 5.1 und 5.2).

Nr.	Versuchsvariante	Lithotyp	$\dot{\sigma}_{ax}$ [MPa/s]	σ_1 (radial) [MPa]	σ_3 (axial) [MPa]	p_{Fluid} [MPa]	ϵ_{axial} [%]	Trennbruch
R1a	Regulär, druckgesteuert: trocken, drainiert	Rhyolith:	$\dot{\sigma}_{ax}: 4 \cdot 10^{-3}$	85	5	drainiert	0,38-0,41	nein
		Granit:					0,48	nein
		Basalt:					0,27-0,33	nein
A1	Abrupt: trocken, drainiert	Rhyolith:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	20	0	drainiert	0,62	ja

σ_1 (radial) Radial- bzw. größte Hauptspannung (maximal bzw. Bruch)

σ_3 (axial) Axial- bzw. kleinste Hauptspannung (minimal bzw. Bruch)

p_{Fluid} Porenfluiddruck bzw. Drainage

ϵ_{axial} Axialdehnung (maximal bzw. Bruch)

$\dot{\sigma}_{ax}$ Entlastungsgeschwindigkeit

5.4 Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K

Angesichts der nicht realisierbaren Stimulation von Trennbrüchen im regulären Versuchsaufbau des Regulär- und Pinching-off-Modus sowohl der beiden Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S als auch der spröderen magmatischen Proben waren die beiden laut ihrer geomechanischen Standardcharakterisierung durch geringere Festigkeitseigenschaften gekennzeichneten konglomeratischen Lithotypen BE-K und Si-K (Kap. 4.4) Gegenstand der weiteren Versuchsreihen.

5.4.1 Regulär-Modus

Gleichermaßen wie ihre Sandstein-Pendants wurden diese zunächst im Regulär-Modus analysiert; aufgrund der oben beschriebenen Versuchsspezifika mit Hilfe druck- bzw. spannungsgeregelter, drainierter Extensionsversuche. Die Variation der Randparameter Belastungsgeschwindigkeit und Feuchtegehalt erfolgte übereinstimmend mit den in Kap. 5.1 definierten Versuchsvarianten R1a–R2a.

Grundsätzlich reichte hierbei die Maschinenkapazität unter Standardbedingungen aus, Trennbrüche bzw. Splitting zu erzeugen (Tab. 8). Dabei erwies es sich jedoch als problematisch, den Bruchzeitpunkt direkt in einem Einzelversuch zu identifizieren. Wie die Beispiele in Abb. 22 zeigen, waren zwar teilweise potentielle Messwertreaktionen bei bruchhaftem Versuchsausgang zu beobachten, konnten jedoch in gleicher Weise in Experimenten ohne Bruchbildung oder makroskopisch sichtbare Veränderung der Prüfkörper auftreten (vgl. Kap. 5.1 und Abb. 16).

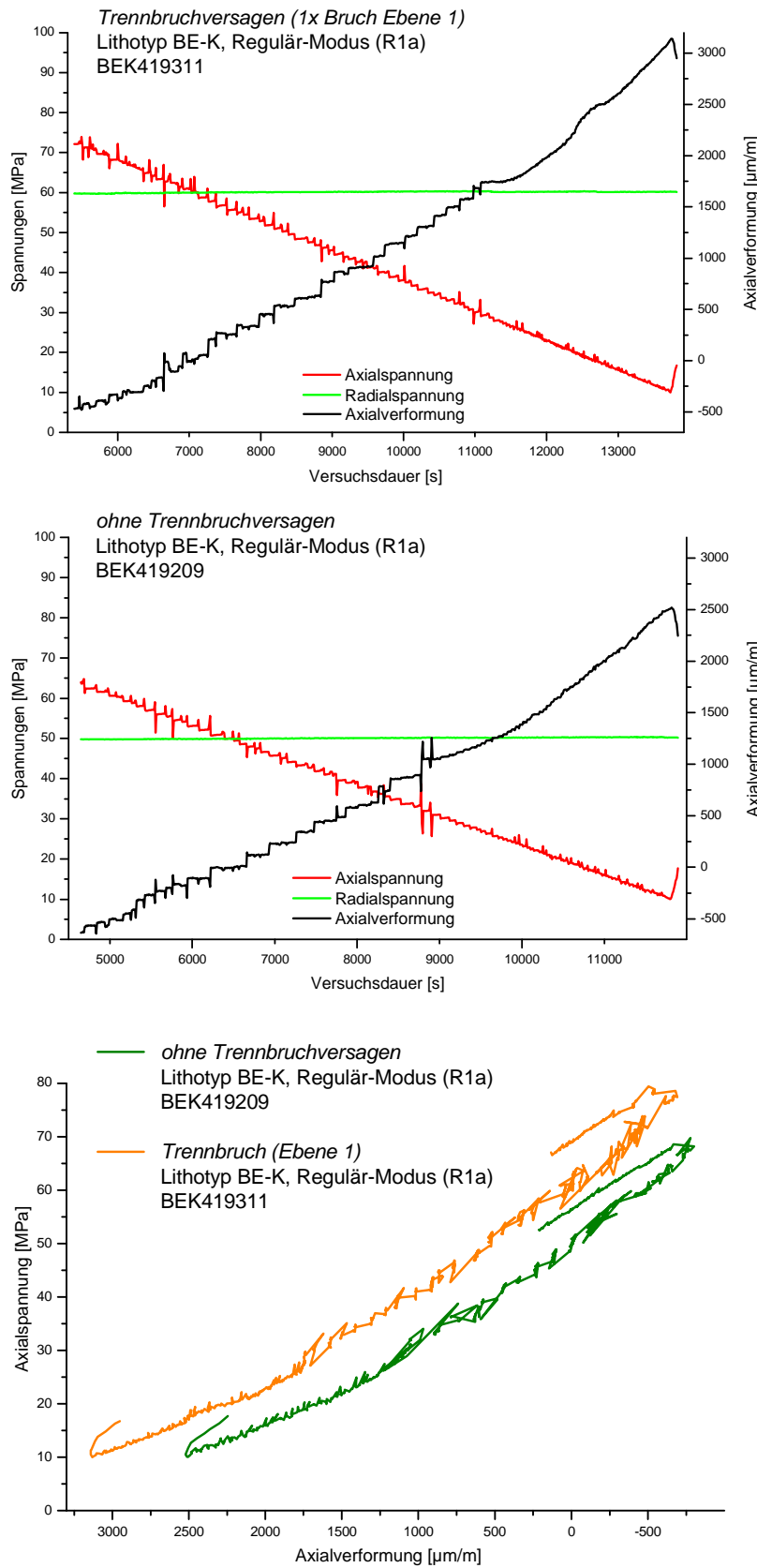


Abb. 22:

Typischer Verlauf von Extensionsexperimenten bei bruchhaftem und bruchlosem Testergebnis im spannungsgesteuerten Regulär-Modus am Beispiel des Lithotyps BE-K:

Bei einer konstanten Radialspannung von 60 MPa und einer minimalen Axialspannung von 10 MPa treten im trockenen drainierten Versuch (R1a) des Lithotyps BE-K Trennbrüche auf (oben), die bei einer Radialspannung von 50 MPa und gleichartiger Entlastung ausbleiben (mittig).

Den divergierenden Bruchresultaten steht jedoch ein ähnlicher Verlauf von Axialspannung und -verformung gegenüber (unten). Vergleichbare markante Änderungen im zeitlichen Verlauf konnten auch bei bruchlosem Versuchsausgang im Regulär-Modus beobachtet werden, ungeachtet der Versuchsvariante oder des Lithotyps (vgl. Abb. 16).

Dahingehend kann der Zeitpunkt des Brucheintritts und damit der eigentliche Bruchspannungs- und -verformungszustand aus der simultanen Messwerterfassung nicht direkt abgelesen werden. Er ist somit durch eingrenzende Wiederholungsversuche zu ermitteln (nähere Erläuterungen siehe Text).

Das dementsprechende Fehlen eindeutiger Anzeichen der Bruchentstehung innerhalb der simultanen Messwertaufzeichnung in Form charakteristischer Spannungs- und / oder Verformungsänderungen unterscheidet sich insofern grundsätzlich von den allgemeinen Erfahrungen aus der Lastgeometrie Kompression.

Ursächlich hierfür könnte sein, dass über die nötigerweise flexible Probenummantelung die Radialspannung auch nach Brucheintritt eine axiale Längung des gesamten Probenaufbaus (Kap. 4, Abb. 12) und ein weiteres kontinuierliches Ansteigen der Differenzspannung bewirkt. Im Moment des Brucheintritts kaschiert mutmaßlich die aktive Regelung die möglicherweise veränderten Spannungs-Verformungs-Bedingungen.

Prinzipiell kann eine unmerklich veränderte Fortsetzung des Spannungs-Verformungs-Verlaufs bei Extension nicht überraschen, da wesensgemäß für Triaxialaufbauten mindestens zwei vorgegebene „Trennbrüche“ normal zur Zylinderachse in Form der Probenendflächen von Beginn an vorhanden und der Wirkung der Radialspannung ausgesetzt sind. Im konkreten Fall der hier verwendeten Triaxialzelle sind es sogar vier Trennflächen aufgrund der beiden verwendeten sphärischen Druckplatten (vgl. Kap. 4.1). Die bereits in Kap. 5.1 erwähnte teils markante Änderung der Steuerungsintensität in der fortgeschrittenen Phase der axialen Entlastung (vgl. Abb. 16 und Abb. 22), besonders in Spannungs- bzw. Drucksteuerung, lässt sich nicht im Zusammenhang mit einer möglichen Probenveränderung sehen, da sie über alle Lithotypen und Versuchsvarianten mit konträren Trennbruchresultaten zu beobachten war. Ihre Ursache kann hier insofern nicht geklärt werden.

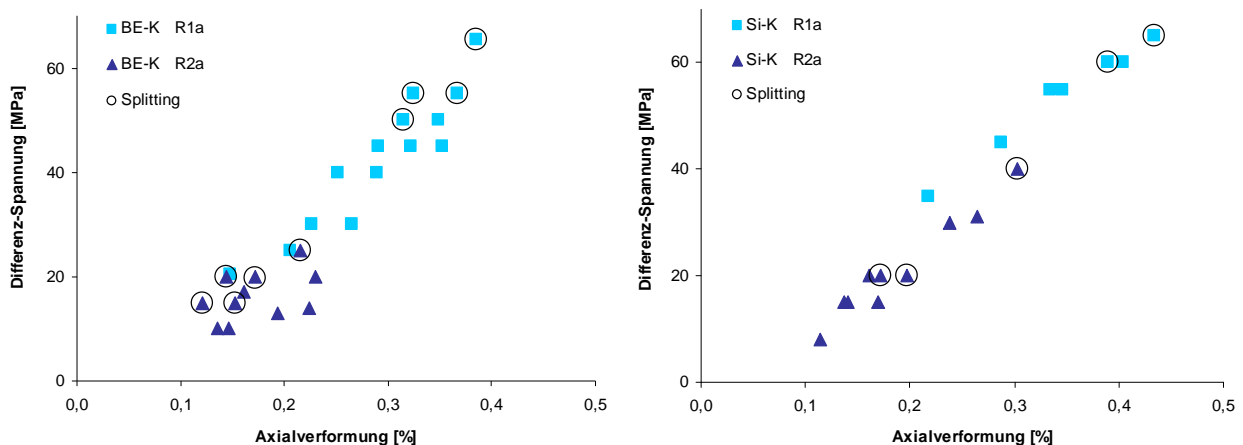


Abb. 23: Vergleich der maximalen Axialverformungen und zugehörigen Differenzspannungen der beiden konglomeratischen Probenklassen BE-K und Si-K:

Für beide Lithotypen ist festzustellen, dass sich ihre Bruchspannungen des Trennbruchversagens (Splitting) deutlich zwischen der Versuchsvariante mit gesättigt-drainierten Bedingungen (R2a) und dem trocken-drainierten Versuch (R1a) unterscheiden. Die im Einzelversuch gemessenen axialen (Bruch-)Verformungen der beiden Lithotypen differieren bezüglich der zugehörigen Differenzspannungen im Gegensatz zu ihren Bruchspannungen nur geringfügig.

Gegen ein Eindringen des Probenmantels in diese Trennflächen infolge der Differenz zwischen Mantel- und Kolbendruck schirmen die entsprechend positionierten Metallmanschetten ab (Kap. 4.3). Lediglich nach Versuchsende und Probenausbau konnte vereinzelt anhand der Innenwand des Probenhüllschlauchs ein geringfügiges Eindringen in die Trennbruchfläche festgestellt werden. Dieses Intrudieren der Prüfkörperummantelung ist allerdings als sekundäres Phänomen, d. h. der Bruchentstehung nachgelagert, zu bewerten, da die Mehrzahl der bruchhaften Ergebnisse keine derartigen Erscheinungen aufwiesen.

Die Konsequenz hieraus ist, dass die Bruchspannungszustände durch Wiederholungsversuche ausgehend von demselben isostatischen Spannungsniveau und einem systematisch geänderten Endzustand der axialen Entlastung zu identifizieren sind. Zunächst sind hierfür Einzelversuche mit jeweils erhöhter Radialspannung bis zur maximal erreichbaren Differenzspannung nötig. Mit einer identifizierten Bruch-Radialspannung muss nun die Ermittlung der „zugehörigen“ Axialspannung durch schrittweises Eingrenzen erfolgen. Diese Prozedur ist mit unterschiedlichen Radialspannungen und Randbedingungen für jeden Lithotyp zu wiederholen. Infolge wiederkehrender technischer Unzulänglichkeiten und einer somit limitierten, effektiven Versuchsanzahl wurden daher eingrenzenden Extensionstests präferiert.

Tab. 8: (Bruch-)Spannungs- und Verformungszustände der triaxialen Extensionsversuche der Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K in den Versuchsvarianten des Regulär-Modus R1a und R2a: Die Randbedingungen *Spannungsgeschwindigkeit* ($\dot{\sigma}_3 = \text{axial}$) und *Durchfeuchtung* (trocken, gesättigt) wurden in Übereinstimmung mit den Versuchen der Sandstein-Lithotypen (Kap. 5.1) gewählt.

Nr.	Versuchsvariante	Lithotyp	$\dot{\sigma}_{ax}$ [MPa/s]	σ_1 (radial) [MPa]	σ_3 (axial) [MPa]	p_{Fluid} [MPa]	ϵ_{axial} [%]	Trennbruch
R1a	Regulär, druckgesteuert: trocken, drainiert	BE-K:	4*10 ⁻³	60	10	drainiert	0,31	ja
				70	5		0,39	ja
				70	30		0,29	nein
		85		30	0,37		ja	
		Si-K:		70	10		0,39	ja
				85	30		0,35	nein
85	20		0,43	ja				
R2a	Regulär, druckgesteuert: gesättigt, drainiert	BE-K:	4*10 ⁻³	25	10	drainiert	0,12	ja
				50	25		0,21	ja
				30	10		0,17	ja
		Si-K:		60	30		0,24	nein
				60	20		0,30	ja

σ_1 (radial) Radial- bzw. größte Hauptspannung (Bruch bzw. maximal)
 σ_3 (axial) Axial- bzw. kleinste Hauptspannung (Bruch bzw. minimal)
 p_{Fluid} Porenfluiddruck bzw. Drainage
 ϵ_{axial} Axialdehnung (Bruch bzw. maximal)
 $\dot{\sigma}_{ax}$ Standard-Spannungsrate

Aus den Versuchsvarianten wird ein gravierender Unterschied der Trennbruchfestigkeiten zwischen den beiden Extremen der Durchfeuchtung erkennbar. Beide konglomeratischen Lithotypen ertrugen unter drainierten Bedingungen bei trockenem Ausgangszustand ein Vielfaches der Differenzspannung als bei maximaler Durchfeuchtung. Während trockene Proben in der Versuchsvariante R1a eine Differenzspannung von 60 MPa (Si-K) bzw. 50 MPa (BE-K) bis zum Eintreten des Trennbruchversagens aufnehmen konnten, genügten bei Wassersättigung in der Versuchsvariante R2a dem Lithotyp Si-K 20 MPa und BE-K 15 MPa zur Ausbildung von Trennbrüchen (Tab. 8).

Die Axialverformungen fügen sich hinsichtlich der zugehörigen Differenzspannungen unabhängig vom Brucherfolg nahezu nahtlos aneinander (Abb. 23). Die gesättigten Versuche des Lithotyps BE-K (R2a) weisen einen etwas größeren Streubereich auf.

5.4.2 *Pinching-off-Modus*

Die Randbedingungen im Pinching-off-Modus der Konglomeratserien wurden grundsätzlich wie im Standardfall Regulär-Modus angewandt (Kap. 5.1). Im Übrigen gelten die Ausführungen in Kap. 5.1.2.

Abweichend zu den bisherigen Ergebnissen der Sandsteinserien lassen sich mit den konglomeratischen Lithotypen ebenso wie im Regulär-Modus auch bei radialer Belastung Trennbrüche stimulieren (Tab. 9).

Im Gegensatz zu den Erfahrungen im Regulär-Modus (vgl. Kap. 5.4.1) wird hierbei das Bruchversagen von einem deutlichen Druckabfall der größten Hauptspannung (Abb. 24) und zumeist einer vernehmbaren Bruchakustik begleitet. Gleichzeitig kann der passiv konstant eingestellte Kolbendruck im Bruchmoment einen Anstieg erfahren, in dessen Folge der Axialkolben in seine Endlage zurückschnellt.

Das Phänomen fehlender Indikatoren für den Moment des Brucheintritts im Regulär-Modus auf der einen Seite und deutlicher Reaktionen im Pinching-off-Modus auf der anderen Seite überrascht zunächst. Vermutlich ist dies auf das Zusammenspiel der Auslegung der Triaxialanlage als hydraulisches Einkreis-System, der nötigerweise manuellen Versuchssteuerung und dem abweichenden Spannungspfad in Form der radialen Belastung zurückzuführen (Kap. 4, 5.1).

Während im Pinching-off-Modus der Manteldruck einen stetigen Anstieg bei konstantem Kolbendruck erfährt, ist bei axialer Entlastung in kontinuierlicher Regelung der Kolbendruck der veränderliche Kreis; Mantel- und Porenfluiddruck bleiben konstant. Im Gegensatz zur manuell alternierenden Aktivierung der Regelkreise bei radialer Belastung übernimmt im Regulär-Modus die PC-Steuerung das wechselseitige Ansteuern der drei Regelkreise nach Bedarf. Im Normalfall, bei planmäßigem Versuchsablauf, ist die Dynamik der Regelkreis-

abfrage eine vielfach höhere als im manuellen Fall. Die aktive, automatische Steuerung des axialen Druckkolbens ermöglicht, unabhängig von der Spannungs- oder Verformungs-Regelung auf das Bruchinitial zu reagieren und dieses zu kaschieren. Bei passivem Konstanthalten der Axialspannung und aktiver Steigerung der Radialspannung verursacht die fehlende Axial-Regelung hingegen zunächst einen Druckanstieg im Moment des Brucheintritts und schließlich das Abheben des Axialstempels. Demzufolge lassen sich die bruchauslösenden Spannungszustände bei radialer Belastung der beiden konglomeratischen Gesteinseinheiten BE-K und Si-K direkt bestimmen.

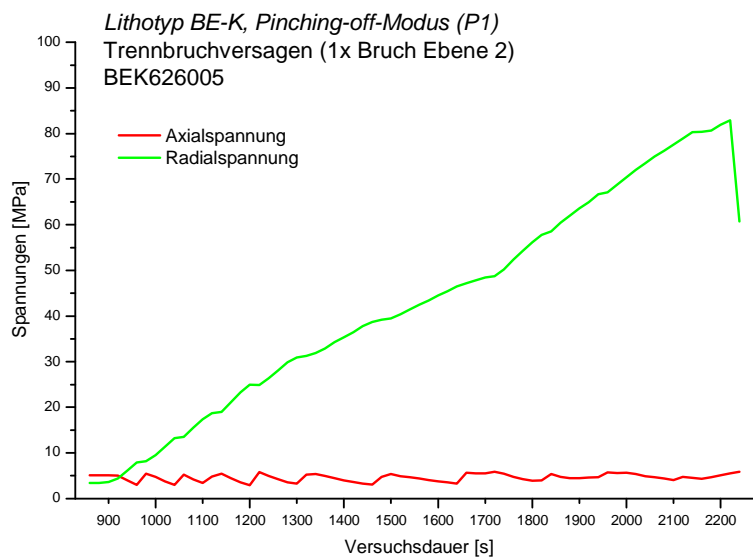


Abb. 24:

Trennbruchversagen im Pinching-off-Modus der konglomeratischen Lithotypen BE-K und Si-K:

Das Beispiel des Lithotyps BE-K unten trocken-drainierten Bedingungen (P1) zeigt, dass bei einer möglichst konstant zu haltenden Axialspannung von etwa 5 MPa die sukzessiv gesteigerte Radialspannung bei 82 MPa ihr Maximum infolge des Trennbruchversagens erreicht.

Mit diesem Spannungsabfall im Moment des Brucheintritts unterscheiden sich die Ergebnisse des Pinching-off-Modus wesentlich von denen des Regulär-Modus.

Diese stellen sich wie folgt dar:

Die Bruchspannungen der beiden Konglomeratserien im Pinching-off-Modus unterscheiden sich kaum zwischen den beiden Durchfeuchtungszuständen. Darüber hinaus liegen die Trennbruchfestigkeiten mit trocken drainierten Ausgangsbedingungen deutlich über jenen bei axialer Entlastung trockener Prüfkörper. Im gesättigt drainierten Versuch erreichen sie das Vier- bis Fünffache des Regulär-Modus. Der messbare Unterschied zwischen den beiden Konglomerattypen ist gering. Im Bereich niedriger Minimalspannungen von 5 MPa waren Radialspannungen von 72 MPa (BE-K, P2) bis 84 MPa (Si-K, P1) zum Erzeugen von Trennbruchversagen nötig. Mit einem höheren isostatischen Ausgangszustand, d. h. mit zunehmender, vorgewählter Minimalspannung, stieg die zur Brucherzeugung benötigte Radialspannung an. Insgesamt erfolgte die Bruchstimulation nahe der Maximalkapazität der Triaxialanlage. Bereits mit geringfügig höheren Axialspannungen von 10 MPa (Si-K) bis 15 MPa (BE-K) wurde die Prüfkapazität der Triaxialapparatur überschritten, d. h. Bruchversagen, auch Trennbruchversagen, blieb unter den angewendeten versuchstechnischen Rahmenbedingungen aus (Tab. 9).

Tab. 9: (Bruch-)Spannungszustände der verwendeten Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K im Pinching-off-Modus entsprechend den Randbedingungen der Versuchsvarianten P1–P2 (vgl. Kap. 5.1):

Nr.	Versuchsvariante	Lithotyp	$\dot{\sigma}_{\text{rad}}$ [MPa/s]	σ_1 (radial) [MPa]	σ_3 (axial) [MPa]	p_{Fluid} [MPa]	ϵ_{axial} [%]	Trennbruch
P1	Pinching-off: trocken, drainiert	BE-K:	$\dot{\sigma}_{\text{rad}}: \sim 10^{-2}$ sukzessiv(+)	82	5	drainiert	-- ⁽¹⁾	ja
				96	7			ja
				100	10			nein
		Si-K:		84	5			ja
				96	7			ja
				100	10			nein
P2	Pinching-off: gesättigt, drainiert	BE-K:	$\dot{\sigma}_{\text{rad}}: \sim 10^{-2}$ sukzessiv(+)	72	5	drainiert	-- ⁽¹⁾	ja
				89	10			ja
				100	15			nein
		Si-K:		78	5			ja
				94	7			ja
				100	10			nein

σ_1 (radial) Radial- bzw. größte Hauptspannung (Bruch bzw. maximal)

σ_3 (axial) Axial- bzw. kleinste Hauptspannung (Bruch bzw. minimal)

p_{Fluid} Porenfluiddruck bzw. Drainage

ϵ_{axial} ⁽¹⁾ Axialdehnung: Bestimmung bei veränderlichem Manteldruck nicht möglich

$\dot{\sigma}_{\text{rad}}$ Spannungsgeschwindigkeit (σ_1 -Zunahme [+])

5.4.3 Abrupt-Modus

Der mit den Sandstein- und Magmatit-Lithotypen identifizierte Unterschied zwischen kontinuierlicher und abrupter Extension im Hinblick auf den Splitting-Erfolg war schließlich auch für die konglomeratischen Gesteinsserien zu prüfen. Die Versuchsmodalitäten und die die unterschiedlichen Randbedingungen repräsentierenden Versuchsvarianten kamen analog zur Anwendung (vgl. Kap. 5.2).

Ab einem isostatischen Spannungszustand von 10 MPa versagten beide Lithotypen bei abrupter, rapider Axialentlastung unabhängig von ihrem Durchfeuchtungsgrad (Versuchsvarianten A1 und A2, Tab 10). Auch in der Versuchsvariante A3, unter Berücksichtigung eines dem isostatischen Ausgangszustand mit 10 MPa entsprechenden maximalen Porenfluiddruck, kam es bei beiden Lithotypen zur Trennbruchbildung. Mit einer geringeren Radialspannung und adäquaten Differenzspannung von 5 MPa ließen sich hingegen mit abrupter axialer Entlastung keine Trennbrüche erzeugen, abgesehen von einer nicht wiederholbaren Ausnahme des Lithotyps BE-K in der Versuchsvariante A2.

Beide Lithotypen sind demnach durch die Bildung von Trennbrüchen sowohl unter trockenen als auch gesättigten Ausgangsbedingungen sowie unter Einwirkung eines Porenfluiddrucks bei abrupt-rapider Axialentlastung bereits ab maximal 10 MPa größter Hauptspannung resp. Differenzspannung gekennzeichnet.

Tab. 10: Bruchspannungszustände und eingegrenzte maximale Bruchverformungen der verwendeten Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K im Abrupt-Modus mit abrupter, rapider Axialentlastung kraft unregelter schlagartiger Druckentlastung

Nr.	Versuchsvariante	Litho- typ	$\dot{\sigma}_{ax}$ bzw. $\dot{\epsilon}_{ax}$	σ_1 (radial) [MPa]	σ_3 (axial) [MPa]	p_{Fluid} [MPa]	ϵ_{axial} lim [%]	Trenn- bruch
A1	Abrupt: trocken, drainiert	BE-K:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	10	0	drainiert	0,18	ja
		Si-K:		10			n.b.	ja
A2	Abrupt: gesättigt, drainiert	BE-K:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	10	0	drainiert	0,41	ja
		Si-K:		5			0,42/0,57	nein/ja
A3	Abrupt: gesättigt, p_{Fluid}	BE-K:	abrupt-rapid $\dot{\sigma}_{ax} \gg 10^0$ MPa/s	10	0	9	0,46-0,63	ja
		Si-K:		10		9	n.b.	ja

σ_1 (radial) Radial- bzw. größte Hauptspannung beim Bruch
 σ_3 (axial) Axial- bzw. kleinste Hauptspannung beim Bruch (infolge Zurückschnellen des Druckkolbens stets Null)
 p_{Fluid} Porenfluiddruck bzw. Drainage (konstant-geregelt pro Einzelversuch als Ausgangsbedingung)
 ϵ_{axial} lim Axialdehnung beim Bruch (eingegrenzt gemäß minimaler Kolbenstellung nach Entlastung)
 $\dot{\sigma}_{ax} - \dot{\epsilon}_{ax}$ Entlastungsgeschwindigkeit

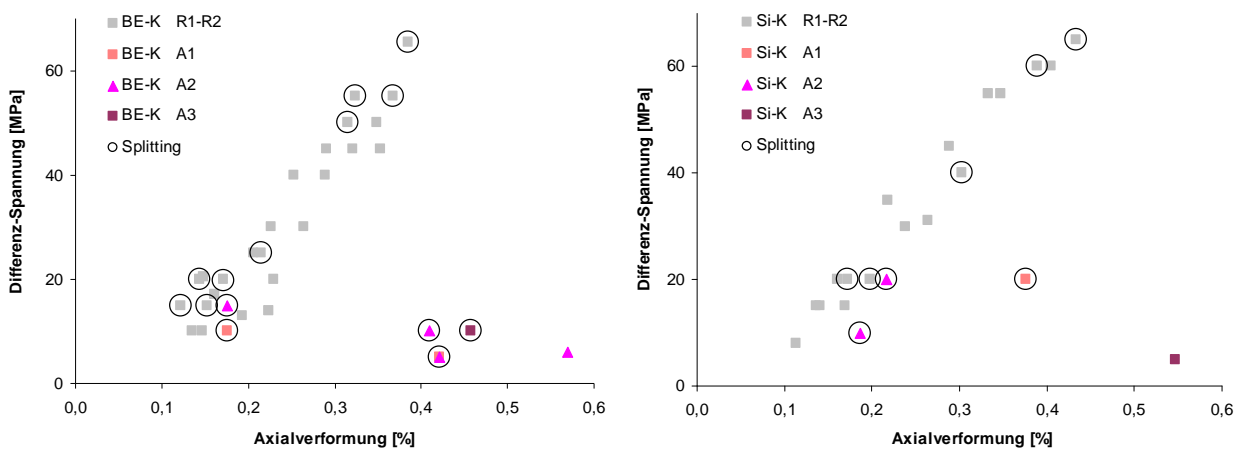


Abb. 25: Maximale Axialverformung vs. Differenzspannung im Abrupt-Modus der Probenklassen BE-K und Si-K bei abrupter, unregelter Axialentlastung:
 Die mit der minimalen Kolbenstellung nach erfolgter rapider Axialentlastung eingegrenzten Maximalverformungen liegen bezüglich ihrer Differenzspannungen ungeachtet der Versuchsvariante (A1–A3) vereinzelt im Bereich des Regulär-Modus meist jedoch deutlich darüber.

Wie in Kap. 5.2 erörtert, besteht die Möglichkeit, dass der Druckkolben im Moment der abrupt-rapiden Axialentlastung bis in seine Endlage zurückschnellt oder zwischen Probe und Endlage eine beliebige Position einnimmt. Da die Erfassung der Axialverformung an den Axialstempel gebunden ist, kann die minimale Kolbenstellung somit lediglich die Obergrenze

der möglichen Axialverformung angeben. Im Abrupt-Modus der Lithotypen BE-K und Si-K betragen diese nach erfolgtem Bruch minimal ca. 0,18 % bzw. 0,19 % (Abb. 25).

5.5 Lithotyp Lindau-Sandstein

Unter Berücksichtigung der auseinander gehenden Resultate der Trennbruchentstehung der vorstehend aufgeführten Lithotypen in den Versuchsmodi und Versuchsvarianten wurde stichprobenhaft ein weiterer sedimentärer Lithotyp einbezogen.

Dazu diene der hämatit-gebundene, fein- bis mittelsandige Lindau-Sandstein des Unterrotliegend, ebenfalls wie die restlichen klastischen Lithotypen in Rotfazies ausgebildet. Er entstammt dem Kernmaterial einer Festgesteinsbohrung.

Die Proben des Lindau-Sandsteins weisen eine akute Wasserempfindlichkeit auf, die sich beispielsweise bei Wasserlagerung oder im Aufsättigungsversuch durch konzentrisches Abschalen der Prüfkörper auszeichnet. Offenbar steht dies im Zusammenhang mit Entspannungseffekten infolge der raschen Exposition aufgrund der Bohrkerngewinnung aus ca. 460 m Teufe. Die geomechanischen Labortests erfolgten ausschließlich an trockenem Gesteinsmaterial und ohne Einwirkung eines Porenfluiddrucks.

Die an den Lindau-Sandsteinen durchgeführten Extensionsversuche im Regulär-Modus der Versuchsvariante R1a (druckgesteuert, trocken-drainiert) endeten im Normalfall auch bei versuchstechnisch maximaler Belastung innerhalb der Prüfmaschinenkapazität und gewählter Prüfkörpergeometrie ohne Bruchbildung.

Zwei Tests weichen hiervon ab. Beide sind durch spontanes, abruptes Abheben des Axialkolbens gekennzeichnet, zum ersten bedingt von Steuerungsschwierigkeiten bei einer Radialspannung von 70 MPa und zum zweiten durch eine Leckage des Probenmantels bei 50 MPa größter Hauptspannung. Somit sind diese Ergebnisse dem Abrupt-Modus gleichzustellen.

Beide Bruchergebnisse unterscheiden sich hinsichtlich ihres Bruchmusters signifikant von den restlichen Lithotypen. Die Prüfkörper zeigen je einen Scherbruch. Dieser ist dabei mit ein oder mehreren Trennbrüchen vergesellschaftet.

6 Trennbruchausbildung und Trennbruchfestigkeit – Einflussfaktoren und Abhängigkeiten des Splittings

Die untersuchten Lithotypen haben in den Testreihen der drei Versuchsmodi mit den zugehörigen, die Bandbreite der Randbedingungen repräsentierenden Versuchsvarianten ein breites Ergebnisspektrum hervorgebracht.

Mit den durchgeführten triaxialen Extensionsversuchen konnten erfolgreich Trennbrüche stimuliert werden. Aus den nach Versuchskonstellation und Probenklasse zu differenzierenden Ergebnissen lassen sich Splitting-Bedingungen und Einflussfaktoren ableiten. Die zugrunde liegenden konzeptionellen Ansätze, Randbedingungen und die jeweiligen Lithotyp- wie Versuchsmodus-spezifischen Experimentaldaten wurden in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich erläutert.

6.1 Deformationsmuster im triaxialen Extensionsversuch



Abb. 26: Deformationsmuster der im triaxialen Extensionsversuch erzeugten Trennbrüche der verschiedenen Lithotypen in den angewendeten Versuchsmodi (s.a. Abb. 27 bis 29):

Infolge der kreiszylindrischen Probengeometrie können sich unter den gleichmäßig axialsymmetrisch aufgebrachten Radial- und Axialspannungen die Brüche frei zwischen den Endflächen der Prüfkörper ausbilden. Die Trennbrüche und Risse sind in der Ebene der größten und mittleren Hauptspannung subnormal zur Längsachse der Prüfszylinder entsprechend der Minimalspannung resp. axialen Extension orientiert. Die Fotos geben exemplarisch das Spektrum der variablen Positionierung und Anzahl der stimulierten Trennbrüche und ihrer partiellen Vergesellschaftung mit subparallelen Rissen wieder.

Gemessen an ihrer Oberflächenbeschaffenheit sind die im Extensionsversuch stimulierten Brüche generell als Trennbrüche einzustufen. Lediglich in zwei Versuchen im Abrupt-Modus des Lithotyps Lindau-Sandstein konnten Anzeichen für Scherdeformation identifiziert werden (vgl. Kap. 6.1.2).

6.1.1 Ausbildung der Trennbrüche

Die Bruchoberflächen der Trennbrüche sind durch eine wellige bis stufige Morphologie mit vergleichsweise hoher Rauigkeit gekennzeichnet. Dabei werden die sedimentären, klastischen Lithotypen von einer bevorzugt intergranularen Bruch- bzw. Rissausbildung dominiert, welche besonders an den konglomeratischen Lithotypen deutlich zu erkennen ist. Dagegen zeigen die rhyolithischen Prüfkörper eine transgranulare Bruchausbreitung. Aus ihrem morphologischen Erscheinungsbild lässt sich eine Beeinflussung weder durch die drei Versuchsmodi noch die unterschiedlichen Randbedingungen ableiten, wobei das komplette Spektrum allein durch die konglomeratischen Gesteinsserien abgedeckt wird (Kap. 5).

Gemäß dem konzeptionellen Ansatz einer freien Bruchentwicklung zwischen den Endflächen der Prüfzylinder sind die Trennbrüche grundsätzlich über den gesamten Prüfkörper verteilt anzutreffen und dabei subnormal zur Längsachse ausgerichtet (Abb. 26). Sie liegen somit erwartungsgemäß subparallel zur Ebene der größten und mittleren Hauptspannung (vgl. Kap. 4).

Bezogen auf eine gleichmäßige Segmentierung der Prüfkörper in fünf Ebenen ist eine Abhängigkeit der Trennbruchanordnung bzw. -positionierung vom Versuchsmodus zu konstatieren (Abb. 27). Im Regulär- und Pinching-off-Modus treten die Trennbrüche bevorzugt im Bereich der Endflächen der Prüfzylinder auf, wobei im Pinching-off-Modus eine leicht erhöhte Trennbruch-Häufigkeit in den Ebenen 2 und 4 im Vergleich zu den Segmenten 1 und 5 zu beobachten ist. Der Regulär-Modus zeigt eine deutliche Präferenz zur Bruchausbildung im obersten Segment (Ebene 5). Die obere Endfläche der Probe ist dem aktiv geregelten axialen Druckkolben zugewandt, der im Fall des Regulär-Modus die kontinuierliche, quasi-statische axiale Entlastung steuert (Kap. 4). Die untere Endfläche ist hingegen der passiven unteren Druckkalotte aufgesetzt.

Eine nahezu gleichmäßige Verteilung über alle 5 Ebenen bringt der Abrupt-Modus hervor, mit leichter Tendenz zu vorzugsweise mittlerer Anordnung. Dahingehend unterscheidet sich der Abrupt-Modus mit rapider axialer Entlastung deutlich von den beiden durch kontinuierliche Extension gekennzeichneten Modi, die kaum zur Trennbruchausbildung im zentralen Bereich der Proben neigen. Eine Abhängigkeit vom Lithotyp ist hierbei nicht zu erkennen, obgleich Trennbrüche im Regulär- und Pinching-off-Modus auf die Konglomeratserien BE-K und Si-K begrenzt bleiben (vgl. Kap. 5).

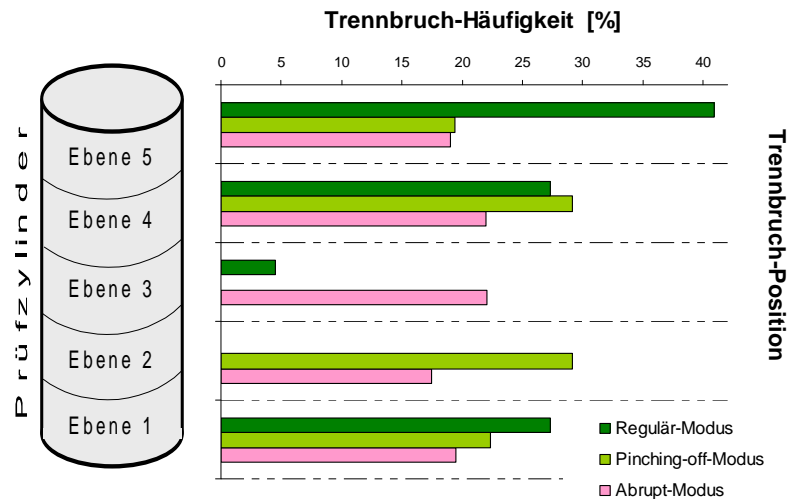
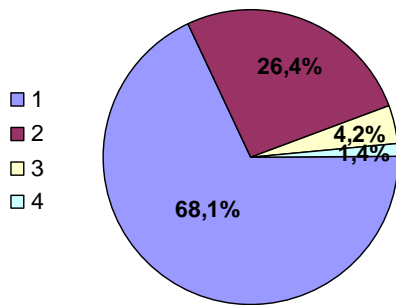


Abb. 27: Anordnung der stimulierten Trennbrüche entlang der Längsachse des Prüfzylinders: Aufgetragen ist die Häufigkeit der Trennbruchposition bezogen auf eine gleichmäßige Unterteilung lateral zur Längsachse in fünf Ebenen. Deutlich erkennbar ist eine bevorzugte Positionierung der Trennbrüche in Richtung der Endflächen in den beiden kontinuierlichen Extensionsmodi Regulär- und Pinching-off-Modus. Bei rapider axialer Entlastung des Abrupt-Modus sind die Trennbrüche gleichmäßiger entlang der Zylinderachse verteilt, mit leichter Tendenz zu erhöhter Häufigkeit in der Probenmitte.

Insbesondere im Regulär-Modus korrespondieren die Trennbrüche teilweise mit dem Bereich der Metallmanschetten, welche den Übergang zwischen den Probenendflächen und den Druckkalotten gegen den Manteldruck abschirmen (s. Kap. 4.3). Es ist denkbar, dass die probenseitige Unterkante der Manschetten somit als Rissinitial dienen und die Bruchausbildung beeinflussen könnte, vergleichbar mit den sog. „intrusion fractures“ (vgl. Kap.3.1). Da eine Kongruenz lediglich anteilmäßig zutrifft und Trennbrüche des Regulär-Modus auch abseits dieses Bereichs auftreten und Pinching-off- wie Abrupt-Modus hiervon anteilig weniger betroffen sind, ist eine nicht auszuschließende Beeinflussung zumindest von untergeordneter Bedeutung.

Die statistische Auswertung aller bruchhaften Ergebnisse der drei Modi zeigt, dass am häufigsten ein einzelner Trennbruch vorkommt (Abb. 28). Der Zerlegungsgrad in Form der Vergesellschaftung mehrerer subparalleler Trennbrüche ist innerhalb des zugrunde liegenden Datensatzes auf eine Anzahl von maximal vier begrenzt, wobei der Anteil mit mehr als zwei Trennbrüchen pro Prüfkörper gering ist. Tendenziell finden sich isolierte Trennbrüche vor allem im Abrupt-Modus, während im Regulär-Modus ein höherer Anteil paarig erzeugter Trennbrüche vorherrscht. Diese sind zumeist jeweils in den beiden Segmenten der Probenendflächen (Ebenen 1 und 5) der Prüfkörper positioniert (Abb. 27).

Häufigkeit der Trennbruchanzahl**Abb. 28:**

Prozentuale Verteilung der Anzahl an stimulierten Trennbrüchen pro Prüfkörper:

Ungeachtet der verschiedenen getesteten Gesteinseinheiten kommt es hauptsächlich zur Entstehung eines einzelnen Trennbruchs. Ein multipler Zerlegungsgrad mit mehr als zwei Trennbrüchen ist selten. Vereinzelt können die generell vollständig durchtrennenden Brüche von subparallelen Rissen begleitet sein. Tendenziell ist eine Erhöhung der Trennbruchanzahl mit dem Regulär-Modus verknüpft.

Die grundsätzlich vollständige Durchtrennung entlang der Bruchflächen kann zudem von einzelnen subparallelen Rissen subnormal zur Probenlängsachse begleitet sein (Abb. 26). In einem einzigen Fall resultierte der Extensionsversuch anstatt in mindestens einem lokalen Trennbruch in zahlreichen, nahezu äquidistanten Querrissen entlang der gesamten Prüfkörperlänge.

Die Ausrichtung der stimulierten Brüche zur Längsachse der Prüfsylinder lässt sich betragsmäßig über den Bruchwinkel, d. h. die Inklination der Bruchflächennormalen zur Minimalspannung, erfassen (Abb. 29). Im Mittel über die geprüften Probenserien und Versuchsmodi ist ein Bruchwinkel von $7,6^\circ$ zu verzeichnen. Bezogen auf die gleichmäßige Unterteilung in die fünf Segmente, ergeben sich maximale Winkel der Trennbruchfläche zur größten Hauptspannung in den Ebenen 2 und 4 von 22° bzw. 17° im Abrupt- bzw. Regulär-Modus. Im Allgemeinen gehen die Maximalwerte nicht über 14° hinaus. Die Minimalwerte liegen zwischen ca. 2° in den Ebenen 1 und 5, 3° in den Ebenen 2 und 4 sowie 5° in der Ebene 3. Unabhängig von Spannungspfad und Entlastungsgeschwindigkeit gemäß den Versuchsmodi deutet sich eine zunehmende Inklination mit Annäherung an das Prüfkörperzentrum an.

Insgesamt erscheint die Abweichung der Trennbruchflächen aus der Ebene der größten und mittleren Hauptspannung angesichts ihrer aufgezeigten Trennbruchgenese mit subnormaler Ausrichtung zur kleinsten Hauptspannung vergleichsweise hoch (vgl. Kap. 3.1).

Zur Berücksichtigung etwaiger Anisotropieeffekte wurden die standardmäßig mit Schichtung senkrecht zur Längsachse eingesetzten Probenzylinder exemplarisch am Lithotyp Si-S durch Bohrkerne schräg zur Schichtung ergänzt (vgl. Kap. 4.4.2). Es wird allgemein davon ausgegangen, dass etwaige Festigkeitsreduzierungen gemäß der jeweilig ursächlichen Relativbewegung bei Trennbruchversagen normal und bei Scherbruchversagen parallel beispielsweise zu Schieferungs- oder Schichtflächen wirksam werden (s. d. z. B. Brady & Brown 2004, Thuro 2002). Bezüglich der experimentellen Trennbrucherzeugung normal zur Prüfsylinderachse entspricht folglich der Standardfall senkrecht orientierter Schichtflächen

einer größtmöglichen vorgezeichneten Festigkeitsreduzierung. Einem potentiellen Scherbruchversagen wird mit der schrägen Ausrichtung der Schichtung, mit analog herabgesetzter Festigkeit, Rechnung getragen.

Das mit der Probenserie Si-S erzeugte Bruchversagen ist in allen Tests unabhängig von der Orientierung der Schichtflächen als Trennbruchmechanismus zu deklarieren. Aus der Oberflächenbeschaffenheit und der Anordnung der Trennbrüche ergeben sich im Vergleich beider Schichtorientierungen keine divergierenden Erkenntnisse.

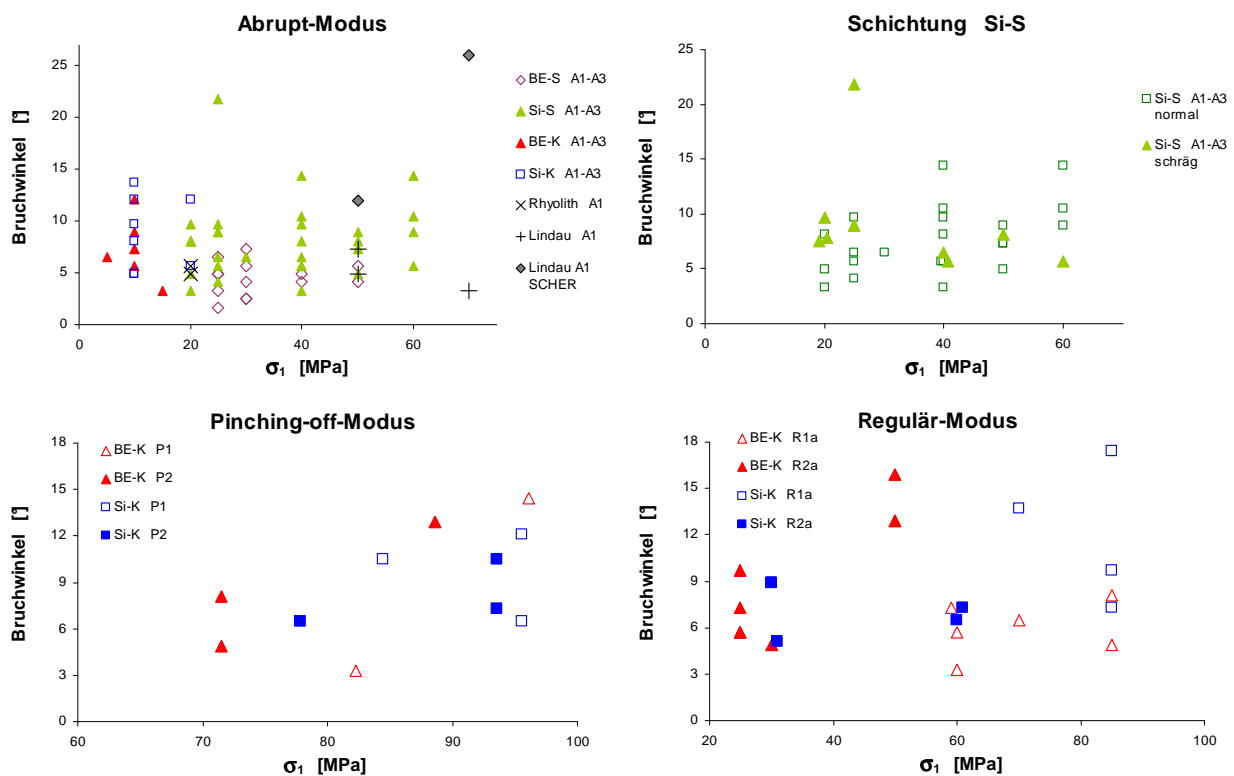


Abb. 29: Gegenüberstellung von Bruchwinkel (Inklination der Bruchfläche zur Richtung der größten Hauptspannung) und der Radialspannung (größte Hauptsspannung) beim Bruch (Differenzierung nach Lithotyp, Versuchsmodus/ -variante und Schichtung bzgl. der Prüfzylinderachse; Erläuterungen siehe Text)

Hingegen ist im Bezug auf die Bruchwinkel (Abb. 29) zum einen herauszustellen, dass der oben aufgeführte Maximalwinkel der Trennbruchfläche zur größten Hauptspannung von 22° auf einen schräg zur Längsachse geschichteten Prüfkörper zurückzuführen ist. Andererseits zeigt die Si-S-Probenserie bei schräger Schichtorientierung – abgesehen von diesem Maximalwert – insgesamt eine geringere Streuung um einen betragsmäßig etwa übereinstimmenden Mittelwert als bei senkrechter Ausrichtung. In dem Fall der maximalen Inklination von 22° besitzen Schichtung und Trennbruch die gleiche Einfallsrichtung, während für die schräg geschichteten Proben zumeist ein entgegengesetztes Einfallen von Bruch- und Schichtfläche charakteristisch ist.

Demnach scheint sich die Anisotropie in Form der Schichtung dergestalt auszuwirken, dass die Riss- bzw. Bruchausbreitung bevorzugt entgegen der Schichtfläche erfolgt. Bei Ausrichtung der Längsachse senkrecht zur Schichtung resultiert dieses Bestreben, offenbar infolge des räumlichen Zusammentreffens von potentieller Bruchfläche und vorhandener Schichtfläche, in einer größeren Streubreite der Bruchwinkel. Gestützt wird diese Ableitung von der Trennbruchausrichtung der BE-S-Probenserie. Der BE-S-Sandstein setzt sich mit einem mittleren Bruchwinkel von 5° und einer Streuung zwischen $1,6^\circ$ und $7,3^\circ$ von den übrigen normal geschichteten Haupt-Lithotypen deutlich ab (Abb. 29). Durch seine lithologische Ausbildung, insbesondere sein vergleichsweise feinkörniges und enggestuftes Korngrößenspektrum, tritt die Dominanz der schichtungsgebunden Anisotropie zurück und erlaubt offensichtlich eine weitgehend von Anisotropieeinflüssen freie Rissausbreitung und Bruchentwicklung. Die größte Bandbreite der Bruchwinkel weisen die konglomeratischen Probenserien unabhängig vom Versuchsmodus auf. Eine Beeinflussung der Bruchfestigkeiten durch die Orientierung der Schichtflächen zur Längsachse lässt sich in diesem Kontext nicht erkennen bzw. im Rahmen der möglichen Messgenauigkeit nicht erfassen.

6.1.2 Abweichende Deformationsformen

Wie eingangs erwähnt, weichen die bruchhaften Ergebnisse der Extensionsversuche am Lithotyp Lindau-Sandstein von den vorstehenden Darstellungen bemerkenswert ab:

Während sich bei kontinuierlicher Extension im Regulär-Modus innerhalb der Prüfmaschinenkapazität mit der Lastgeometrie Extension kein Bruchversagen des Lindau-Sandsteins stimulieren ließ, wurden bei abrupt-rapider Axialentlastung (Abrupt-Modus) jeweils mehrfache Brüche erzeugt (vgl. Kap. 5.5). Neben den Trennbrüchen ist je eine Scherbruchfläche ausgebildet. Dabei handelt es sich um eine isolierte Erscheinung. Das Bruchversagen der übrigen Lithotypen hat in keinem Beanspruchungsfall Anzeichen von Scherbruchdeformation erkennen lassen.

Den bruchlosen Resultaten der Lindau-Sandsteine bei versuchstechnischer Maximalbelastung im Regulär-Modus stehen die bruchhaften Reaktionen bei abrupter Axialentlastung gegenüber. Angesichts dieser konträren Bruchergebnisse bei kontinuierlicher und abrupter Axialentlastung und unter Berücksichtigung der Versuchsabläufe der beiden bruchhaften Tests ist davon auszugehen, dass Trennbruch- und Scherbruchversagen simultan oder zumindest ursächlich unter den gleichen Spannungs-Verformungs-Bedingungen entstanden sind. Die Scherbrüche sind als solche gekennzeichnet durch eine ebene Morphologie und die Abbildung deutlicher Bewegungsmarken parallel zur maximalen Inklination der Bruchfläche. Die Bruchwinkel der Scherbrüche (Abb. 29) betragen 12° und 26° bei Bruchspannungen von 50 MPa bzw. 70 MPa. Die jeweils vergesellschafteten Trennbrüche weisen erheblich geringere Bruchwinkel (zwischen 3° und 7°) und keinerlei Anzeichen von Scherdeformation auf.

6.2 Trennbruchfestigkeit bei kontinuierlicher und abrupter Extension

Über das gesamte lithologische Spektrum der verwendeten Gesteine hinweg ist ein Effekt des Trennbruchversagens gleichermaßen ausgeprägt: Die konträren Ergebnisse zwischen Abrupt-Modus auf der einen Seite und Regulär- wie Pinching-off-Modus auf der anderen Seite deuten daraufhin, dass aus einer abrupt-rapiden Axialentlastung (Abrupt-Modus) generell eine deutliche Festigkeitsreduzierung hinsichtlich des Trennbruchversagens gegenüber quasi-statischer, kontinuierlicher Extension (Regulär- und Pinching-off-Modus) resultiert. Dabei spielt es keine Rolle, ob eine kontinuierliche Extensionsbeanspruchung durch Verringerung der kleinsten Hauptspannung (Regulär-Modus) oder Steigerung der größten Hauptspannung (Pinching-off-Modus) initiiert wird.

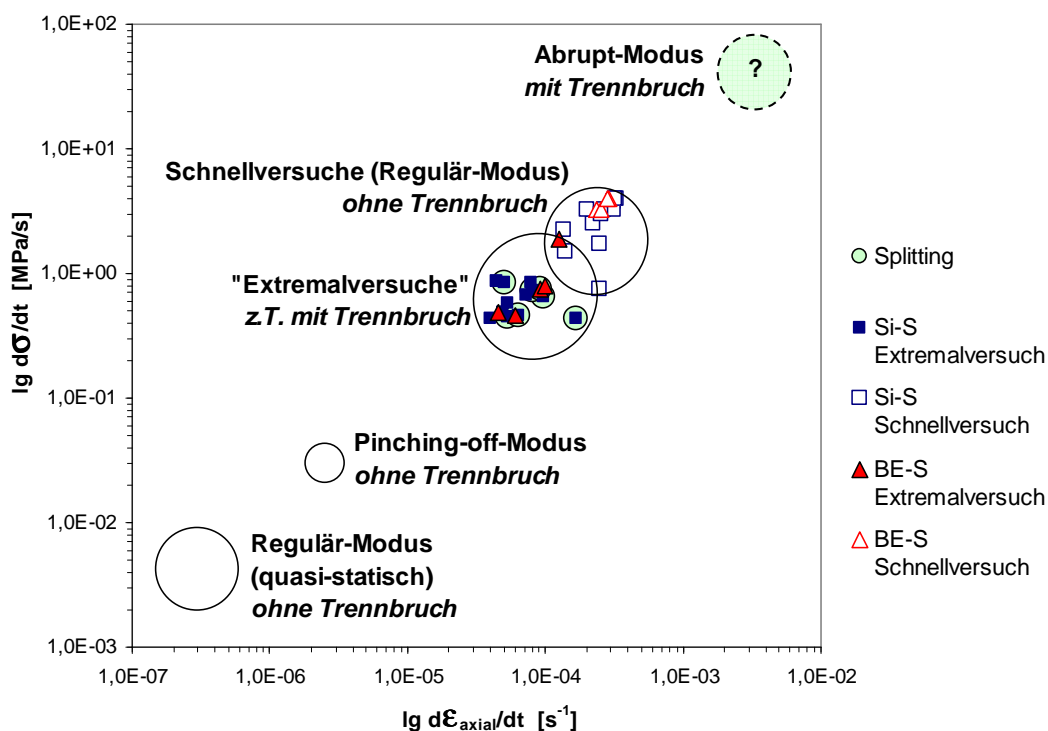


Abb. 30: Vergleichende Größenordnungen von Extensions- bzw. Entlastungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Versuchsmodi und -varianten bezüglich ihrer zugehörigen Bruchergebnisse in der Spannungsgeometrie Extension der Gesteinseinheiten BE-S und Si-S:

Bei kontinuierlicher Extension (quasi-statische Axialentlastung im Regulär-Modus oder Radialbelastung im Pinching-off-Modus) lassen sich für BE-S und Si-S keine Trennbrüche innerhalb der Maximalkapazität der Triaxialapparatur stimulieren. Unterdessen genügt bei schlagartiger Axialentlastung (Abrupt-Modus) mit unbestimmter extremaler Geschwindigkeit ein Bruchteil dieser Beanspruchung zum Trennbruchversagen.

Mit höchstmöglicher, noch regelbarer Geschwindigkeit kontinuierlicher Axialentlastung der „Schnellversuche“ im Regulär-Modus (Kap. 5.1) bleiben die Lithotypen BE-S und Si-S ebenso bruchlos. Die durch Störungen der automatischen Steuerung hervorgerufenen irregulären, sprunghaft-extremalen Änderungen von Spannung und Verformung in den „Extremalversuchen“ der Sandsteintypen BE-S und Si-S (Kap. 5.2) gehen dagegen teilweise mit Splitting einher.

Sowohl die Sandstein-Lithotypen BE-S und Si-S (Kap. 5.1 und 5.2), der Lindau-Sandstein (Kap. 5.5) als auch die Magmatit-Lithotypen (Kap. 5.3) können die technisch höchstmögliche Beanspruchung bei geregelter Axialentlastung wie Radialbelastung ohne Bruchversagen oder makroskopisch sichtbare Schädigungen aufnehmen. Dagegen tritt Splitting mit unregelter resp. unregelbarer Abrupt-Entlastung (Kap. 4) bei wesentlich niedrigeren Spannungen ein. Ebenso besitzen die Konglomerat-Lithotypen BE-K und Si-K die geringsten Bruchspannungen im Abrupt-Modus, obgleich diese auch mit kontinuierlichen Extensionsraten Trennbruchversagen aufweisen (Kap. 5.4). Im Abrupt-Modus genügen im Allgemeinen geringste Axialverformungen von 0,1 % bis 0,2 % zur Bruchbildung.

Fraglich ist, welche Bedingungen ursächlich sind, bei quasi-statischer, kontinuierlicher Extension generell höhere Spannungen und Verformungen ertragen zu können als bei abrupt-rapider Entlastung. Der Abrupt-Modus stellt einen Sonderfall des Regulär-Modus dar. Der Unterschied besteht lediglich in der Entlastungsart in Form der Entlastungs- bzw. Extensionsrate. Während sich Regulär- und Pinching-off-Modus durch definierte, regel- und erfassbare Geschwindigkeiten auszeichnen, ist die abrupte, rapide Axialentlastung des Abrupt-Modus nicht geregelt und zeitlich nicht bestimmt (vgl. Kap. 5.2). Dieser Geschwindigkeitseffekt steht demnach im Zusammenhang mit den erheblich niedrigeren Splittingfestigkeiten im Abrupt-Modus. Dies schematisiert Abb. 30 am Beispiel der Versuchsergebnisse von BE-S und Si-S.

Für die Probenreihen BE-S und Si-S wurde daher versucht, abweichend zu der standardgemäß quasi-statischen spannungs- oder verformungsgesteuerten Axialentlastung des Regulär-Modus, höhere Geschwindigkeiten einzustellen (Kap. 5.1, „Schnellversuch“). Mit versuchstechnisch maximal umsetzbaren Axialentlastungsraten von bis zu $4 \cdot 10^0$ MPa/s sowie konstanter, höchstmöglicher größter Hauptspannung (Radialspannung) von 85 MPa und resultierender Differenzspannung bis ca. 80 MPa ließen sich dennoch keine Bruchreaktionen auslösen (Abb. 30).

Angesichts der wesentlich niedrigeren Bruchspannungen der beiden Lithotypen im Abrupt-Modus von 20 MPa (Si-S) bzw. 25 MPa (BE-S) ist die Größenordnung der mutmaßlichen Zeitabhängigkeit bzw. verantwortlichen Geschwindigkeit von Interesse (Abb. 30). Mit den in Kap. 5.2.2 erläuterten „Extremalversuchen“ ergibt sich die Möglichkeit, dem Phänomen Geschwindigkeitseffekt nachzugehen. Insgesamt lassen sich hierzu 17 Versuche der beiden Sandsteinklassen BE-S und Si-S heranziehen, die durch extreme, sprunghafte Änderungen von Axialspannung und Axialverformung im Versuchsablauf des Regulär-Modus gekennzeichnet sind und zu unterschiedlichen Bruchresultaten führten (Abb. 31).

Aufgrund der bruchlosen Maximalbelastungen dieser Gesteinsreihen bei kontinuierlicher Extension erfolgt die Analyse der Versuche unter der Prämisse, dass lediglich die mit den

unstetigen Änderungen im Zusammenhang stehenden Abweichungen gegenüber dem regulären Versuchsablauf ursächlich für den Brucherfolg sein können.

Die mit der periodischen Messwerterfassung möglichen Auswertungen der extremalen Änderungsspitzen dieser Tests ergeben bis zu 600fach höhere Änderungs-Geschwindigkeiten im Vergleich zu den quasi-statischen Steuerungsrate. Diese liegen betragsmäßig allerdings etwas niedriger als die Entlastungsraten der Schnellversuche (Abb. 30). Im Gegensatz zu den ausnahmslos bruchlosen Resultaten der Schnellversuche, gehen trotz dieser geringeren Geschwindigkeiten aus 6 der 12 Si-S- und aus 1 der 5 BE-S-Versuche Trennbrüche hervor (Kap. 5.2.2).

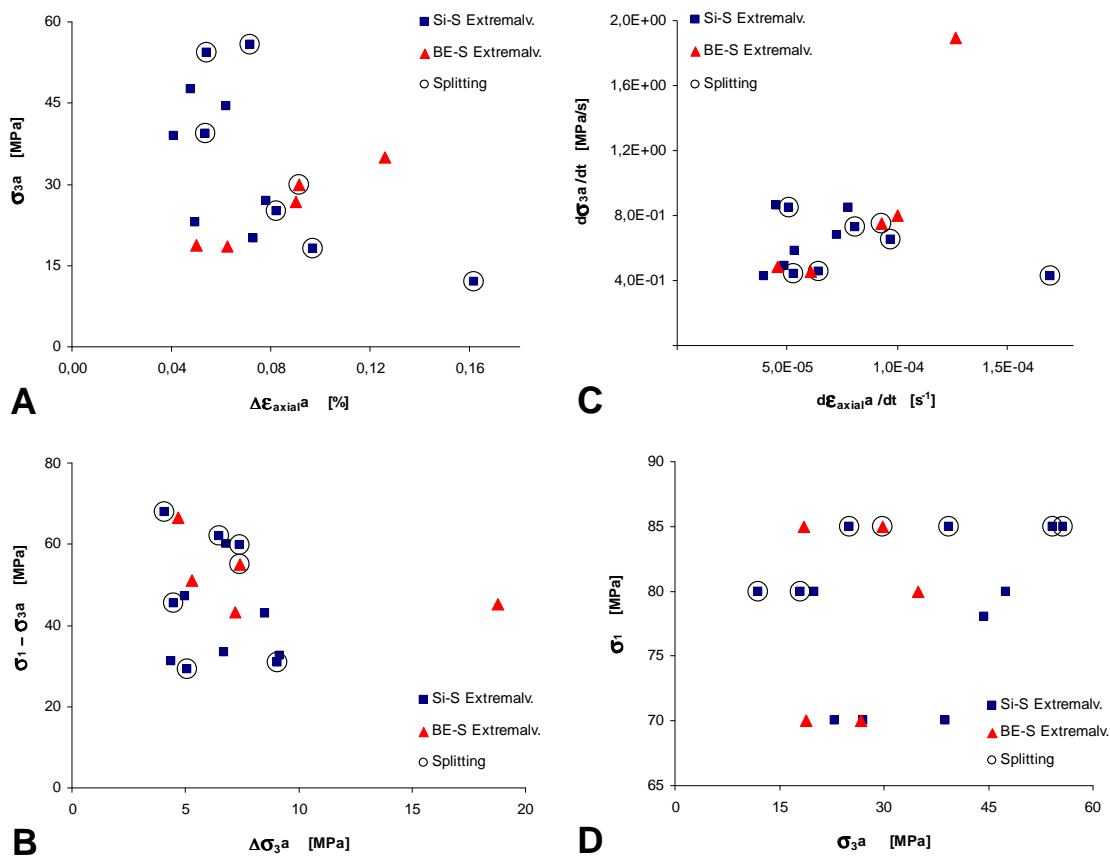


Abb. 31: Aus den sprunghaften Änderungen der „Extremalversuche“ resultierende extreme Momentan-Spannungs- und -Verformungsänderungen der Lithotypen BE-S und Si-S: Extreme Änderungsspitzen der Axialverformung (A) und Axialspannung (B) sind über das von ihnen eingenommene Spannungsspektrum verteilt, ohne einen Zusammenhang hinsichtlich der Trennbruch-Bildung erkennen zu lassen. Ebenso lässt sich allein aus den maximalen momentanen Änderungsgeschwindigkeiten von Axialspannung und Axialverformung (C) keine Bruchbeeinflussung ableiten. Dagegen scheint ein Zusammenhang zwischen Brucherfolg und dem Niveau der größten Hauptspannung zu bestehen (D).

Die Größenordnung der ermittelten momentanen Spannungs- und Verformungsraten isoliert betrachtet, scheint diese nicht ausreichend, die unterschiedlichen Brucherfolge zu erklären, obwohl die Ergebnisse der Abrupt-Entlastung im Vergleich zum Regulär- oder Pinching-off-Modus dies suggerieren (Abb. 30 und 31 C). Störungen der automatischen Steuerung traten

vor allem bei höheren Radialspannungen (nahe der Maximallast der Triaxialanlage) zwischen 70 MPa und 85 MPa auf.

Die extremalen Änderungen sowohl der Axialverformung als auch der Axialspannung beider Lithotypen sind nahezu gleichmäßig über ihr gesamtes Spannungsspektrum ungeachtet der Bruchresultate verteilt (Abb. 31 A-B). Dabei werden die im Abrupt-Modus zum Bruch genügenden Differenzspannungen der beiden Probentypen stets übertroffen. Die momentanen Änderungen der Minimalspannung sind mit 4 MPa bis 10 MPa trotz teilweisem Bruchausgang zumeist deutlich niedriger als im Abrupt-Modus mit 20 MPa bzw. 25 MPa (Abb. 31 B). Die extremalen Axialverformungen liegen überwiegend zwischen 0,04 % und 0,10 % (Abb. 31 A) und damit etwas unterhalb der eingegrenzten Maximalverformungen bei Abrupt-Entlastung zwischen 0,1 % und 0,2 % (Kap. 5.2). Auch die Gegenüberstellung der extremalen momentanen Verformungs- und Spannungsraten ergibt vergleichbare Überschneidungen (Abb. 31 C).

Beschränkt auf den Lithotyp Si-S zeigt sich innerhalb dieser Daten eine Beziehung zwischen der Entstehung von Trennbrüchen und dem Spannungszustand resp. der größten Hauptspannung (Abb. 31 D): Bei 80 MPa radialer Einspannung entstehen ab einer Differenzspannung von 62 MPa Trennbrüche, während mit 85 MPa wesentlich geringere Differenzspannungen bis ca. 30 MPa dennoch Splitting ermöglichen. Mit 70 MPa Radialspannung bleibt der Brucherfolg trotz Differenzspannungen um 50 MPa aus. Einschränkend ist festzuhalten, dass hierfür keine Vertreter niedrigster Axialspannungen vorliegen. Auf den Lithotyp BE-S treffen diese Beobachtungen nicht zu. Dessen 5 Datensätze zeigen einen abweichenden Trend.

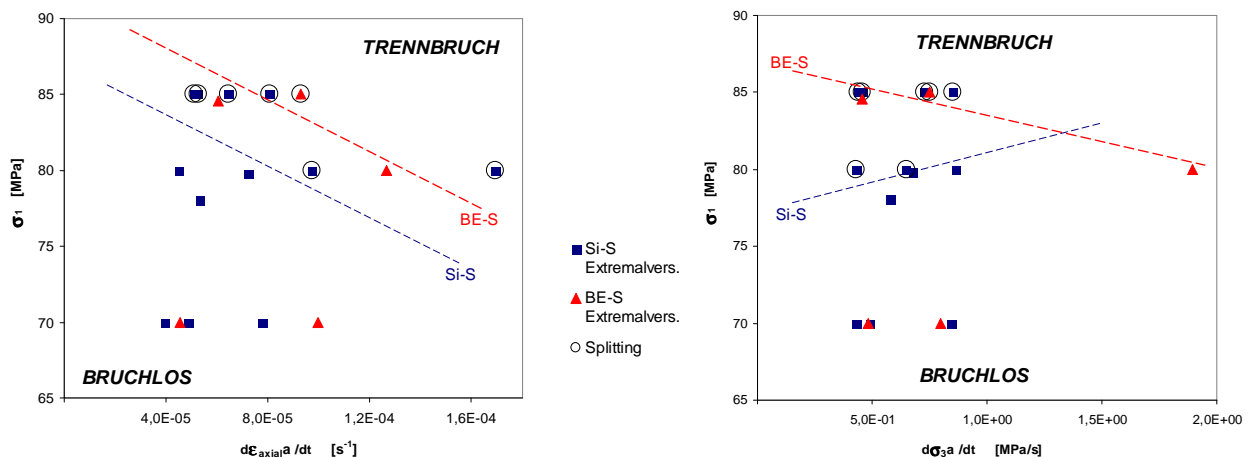


Abb. 32: Zusammenhang zwischen Spannungs- und Verformungsrate, größter Hauptspannung und Splitting der beiden Lithotypen BE-S und Si-S nach den Ergebnissen der „Extremalversuche“: Aufgetragen sind die extremalen momentanen Änderungsgeschwindigkeiten von Axialverformung ($\dot{\epsilon}_{axial}$) und Axialspannung ($\dot{\sigma}_{3a}$) gegen ihr Beanspruchungsniveau in Form der größten Hauptspannung (σ_1). Dargestellt sind zudem die abgeschätzten Lithotyp spezifischen Abgrenzungen zwischen bruchlosen und bruchhaften Spannungszuständen.

Darüber hinaus lässt sich hinsichtlich der Bruchreaktionen ein Zusammenhang zwischen der größten Hauptspannung und den extremalen Änderungsgeschwindigkeiten von Minimalspannung und Axialverformung herstellen (Abb. 32): In der Gegenüberstellung der extremalen Momentan-Axialspannungsrate und der größten Hauptspannung grenzen sich bruchhafte und bruchlose Versuchsergebnisse gegeneinander ab. Beide Lithotypen zeigen allerdings keine übereinstimmende Korrelation. Während für die Gesteinsserie BE-S die 5 Versuche (davon 1 mit Trennbruchversagen) auf eine zunehmende Spannungsrate mit abnehmender größter Hauptspannung verweisen, ergeben die 12 Versuche (davon 6 bruchhaft) von Si-S eine entgegengesetzte Verknüpfung. Letzteres steht im Widerspruch zum Ergebnisvergleich zwischen kontinuierlicher und abrupter Extension.

Betrachtet man allerdings die Beziehung der größten Hauptspannung zur maximalen Axialverformungsrate anstatt der Minimalspannungsrate, so ist bei beiden Lithotypen der gleiche Trend erkennbar, obwohl höhere Verformungsraten prinzipiell mit zunehmenden Spannungsraten einhergehen (vgl. Abb. 31 C). Für alle 17 Versuche gilt, dass mit Verringerung der größten Hauptspannung steigende Extensionsgeschwindigkeiten nötig sind, um Splitting zu erzeugen. Hierbei liegt die „Grenze“ zwischen bruchlosem und bruchhaftem Verhalten des Lithotyps BE-S im Vergleich zu Si-S etwas höher. Dies deckt sich mit seinem höheren Bruchspannungsniveau im Abrupt-Modus.

Auf Basis der „Extremalversuche“ lassen sich die Unterschiede der Trennbruchfestigkeit zwischen kontinuierlicher und abrupter Extension zumindest qualitativ dahingehend interpretieren, dass ein Zusammenhang zwischen Extensionsgeschwindigkeit und Beanspruchungsniveau besteht. Unter Extensionsbeanspruchung ergeben sich mit steigender Verformungsrate geringere Bruchspannungen und umgekehrt, unbeeinflusst von Betrag oder Rate der Spannungsänderung. Danach kann bei einem bestimmten Spannungsniveau eine höhere Beanspruchung bis zum Bruchversagen ertragen werden, sofern die Geschwindigkeit der Verformungsänderung hinreichend klein bleibt.

Bei einer überschlägigen Extrapolation einer solchen Beziehung mit Unterstellung linearer Abhängigkeit (Abb. 32 links) ergibt sich für die Bruchspannungen der beiden Probenreihen BE-S und Si-S im Abrupt-Modus (hier Minimalspannung gleich Null) von 20 MPa (Si-S) bzw. 25 MPa (BE-S) eine Extensionsrate in der Größenordnung von 10^{-3} s^{-1} bis 10^{-2} s^{-1} (Abb. 30). Andererseits folgt daraus für die quasi-statische Extension, dass für die beiden Sandsteine ab einem Niveau der größten Hauptspannung im Bereich von etwa 90 MPa und entsprechenden Differenzspannungen Splitting eintritt.

Die bruchlosen Ergebnisse der beiden Lithotypen im Regulär-Modus mit versuchstechnisch maximaler Radialspannung von 85 MPa und Differenzspannung von etwa 80 MPa gehen hiermit zwar konform. Indes sollte die Beanspruchung des Pinching-off-Modus mit bis zu 100 MPa größter Hauptspannung, anders als die tatsächlichen Versuchsergebnissen zeigen,

zum Trennbruchversagen genügen. Allerdings belegen zumindest die Konglomeratserien, dass die unterschiedlichen Spannungspfade der Versuchsmodi Einfluss auf die Bruchfestigkeit nehmen (vgl. hierzu Kap. 6.3).

Schließlich passt die ausnahmslose Bruchlosigkeit der Schnellversuche nicht in ein solches Konzept. Sowohl ihre Spannungszustände als auch ihre Extensionsraten sind mit denen der „Extremalversuche“ vergleichbar (Abb. 30).

6.3 Einflussfaktoren auf das Trennbruchverhalten

Mittels der eingesetzten Triaxialanlage ließ sich Trennbruchversagen unter kontinuierlicher, quasi-statischer Extension in Form axialer Entlastung im Regulär-Modus oder radialer Belastung im Pinching-off-Modus von den untersuchten Gesteinsserien lediglich für die beiden konglomeratischen Haupt-Lithotypen BE-K und Si-K erzeugen (Kap. 5.4). Die triaxialen Extensionsversuche der übrigen Proben verliefen unter diesen Bedingungen bruchlos und ausschließlich im Abrupt-Modus bei extremer Entlastungsgeschwindigkeit mit Splitting-Erfolg (vgl. Kap. 5 sowie 6.2).

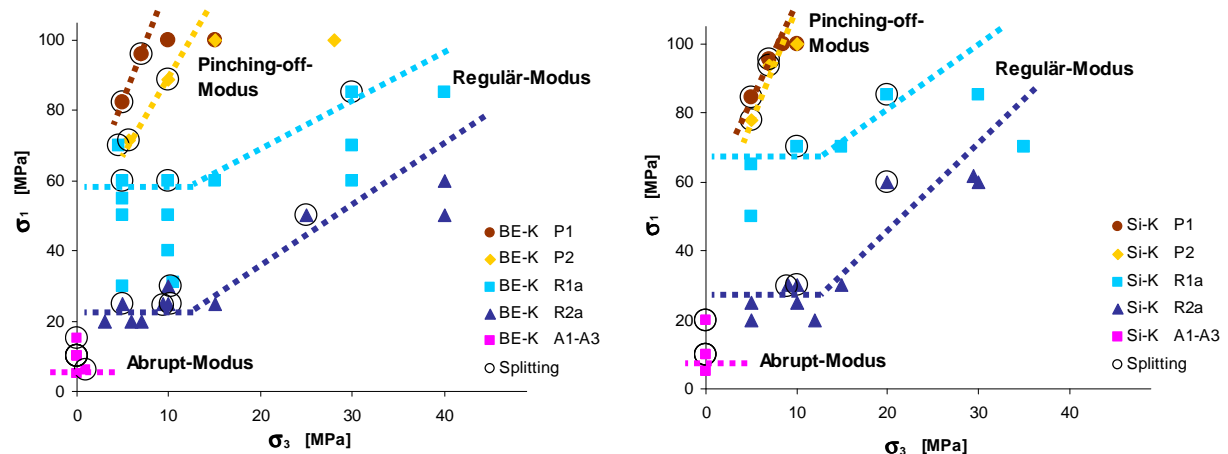


Abb. 33: Versuchsergebnisse der drei Versuchsmodi inklusive der entsprechenden Versuchsvarianten der konglomeratischen Haupt-Lithotypen BE-K und Si-K, dargestellt in der σ_1 - σ_3 -Ebene :
Der Abrupt-Modus (A1–A3) bringt die geringsten und der Pinching-off-Modus (P1–P2) die höchsten Bruchspannungen hervor. Darüber hinaus wird vor allem im Regulär-Modus eine Festigkeitsreduzierung mit steigendem Feuchtegehalt deutlich (R1a vs. R2a). Angegeben ist zudem der abgeschätzte Verlauf der Trennbruch-Grenzbedingungen der drei Versuchsmodi, die sich signifikant unterscheiden.

In Abb. 33 sind für die Konglomerattypen die zugehörigen Spannungszustände der drei Modi entsprechend ihrer Bruchreaktion aufgetragen. Wie in Kap. 5.4 ausführlich erläutert, konnten sowohl im Regulär- als auch im Abrupt-Modus im Gegensatz zum Pinching-off-Modus die Trennbruch ursächlichen Spannungszustände nicht direkt aus dem entsprechend bruchhaften Extensionsversuch bestimmt werden. Vielmehr mussten sie infolge fehlender Identifizierung des eigentlichen Bruchmoments sukzessive durch mehrere Versuche eingegrenzt werden. Die

Abschätzungen der resultierenden Grenzzustände des Trennbruchversagens anhand der Untersuchungsergebnisse sind in Abb. 33 in der Ebene von kleinster und größter Hauptspannung dargestellt.

Neben den aufgezeigten Folgerungen bezüglich der Ausbildung der Trennbrüche (Kap. 6.1) und der Eingrenzung des zeitabhängigen Trennbruchverhaltens am Beispiel der Sandsteine BE-S und Si-S (Kap. 6.2) lassen sich insbesondere aus dem Bruchverhalten der Konglomeratserien in allen drei Versuchsmodi (Abb. 33) folgende weitere Erkenntnisse zum Trennbruchverhalten ableiten:

(1) Zeitabhängigkeit bzw. Einfluss der Extensionsgeschwindigkeit

Gemäß der vorstehend erörterten Geschwindigkeitssensitivität am Beispiel der Sandstein-Haupt-Lithotypen BE-S und Si-S besitzen auch die beiden Konglomeratvertreter ihre geringsten Trennbruchfestigkeiten im Abrupt-Modus mit abrupt-rapider Axialentlastung (vgl. hierzu Kap. 6.2).

(2) Spannungspfad-Abhängigkeit

Die höchsten Beanspruchungen in der Spannungsgeometrie Extension ertragen sowohl BE-K als auch Si-K im Pinching-off-Modus. Die kontinuierliche Steigerung der Radialspannung bei konstanter Minimalspannung führt zu teilweise erheblich höheren Bruchspannungen im Gegensatz zur kontinuierlichen Reduktion der Axialspannung bei konstanter größter Hauptspannung im Regulär-Modus unter sonst identischen Randbedingungen.

Bereits mit Minimalspannungen von 10 MPa (Si-K) bzw. 15 MPa (BE-K) ist bei radialer Belastung (Pinching-off-Modus) bis 100 MPa größter Hauptspannung kein Bruchversagen zu stimulieren, während bei axialer Entlastung (Regulär-Modus) Differenzspannungen beispielsweise für BE-K von 55 MPa bei 30 MPa Minimalspannung zum Splitting ausreichen. Die Bruchspannungen beider Lithotypen divergieren in beiden Modi nur unwesentlich voneinander.

Beide Versuchsmodi unterscheiden sich in erster Linie in der Art ihrer Beanspruchungsänderung, ihrem Spannungspfad. Während im Regulär-Modus ausgehend vom isostatischen Spannungszustand die Probe eine kontinuierliche Absenkung der Durchschnittsspannung kraft Verringerung der Minimalspannung erfährt, wird ein gleicher Spannungszustand im Pinching-off-Modus durch stetiges Anheben der mittleren Spannung infolge Steigerung der größten Hauptspannung erreicht (vgl. Abb. 17). Die höheren Festigkeiten des Spannungspfades Radialbelastung gehen zwar versuchstechnisch bedingt mit einer um etwa eine Größenordnung höheren Geschwindigkeit einher als bei Axialentlastung (s. Kap. 5 und Abb. 30), jedoch weist die erhebliche Festigkeitsreduzierung mit (extremaler) Erhöhung der

Versuchsgeschwindigkeit (Punkt 1) auf eine umgekehrte Verknüpfung hin. Dies legt den Schluss nahe, dass das Splitting vom Spannungspfad beeinflusst wird.

(3) Feuchteinfluss

Den Untersuchungsergebnissen der Lithotypen BE-K und Si-K ist ferner zu entnehmen, dass der Feuchtegehalt bzw. der Sättigungsgrad die Bruchspannungen bei kontinuierlicher Extension unter drainierten Bedingungen beeinflussen kann. Insbesondere im Regulär-Modus sind die Splitting-Festigkeiten trockener Proben höher als bei vollständiger Wassersättigung des vernetzten Porenraumes.

Auch hierbei resultieren aus den beiden Spannungspfaden unterschiedliche Wirkungen. Im Regulär-Modus mit axialer Entlastung unterscheiden sich die beiden untersuchten Grenzzustände der Durchfeuchtung erheblich (trocken vs. gesättigt, s. Kap. 5.4). Die Bruchspannungen gesättigt-drainierter Versuche (R2a) sind im Bereich niedriger Minimalspannungen auf etwa ein Drittel der trocken-drainierten Versuche (R1a) reduziert. Die Festigkeit reduzierende Wirkung scheint sich mit höheren Durchschnittsspannungen bzw. ansteigenden Minimalspannungen zu verringern. Dieser Trend ist deutlicher an den Versuchsvarianten des Lithotyps Si-K abzulesen (vgl. Punkt 4).

Mit radialer Belastung im Pinching-off-Modus ist eine solche Beeinflussung des Trennbruchversagens wesentlich geringer und insbesondere für Lithotyp Si-K kaum feststellbar.

Die Wirkung der unterschiedlichen drainierten Durchfeuchtungszustände wurde auch im Abrupt-Modus der vier Haupt-Lithotypen getestet. Ein Einfluss auf das Splitting ist dabei nicht zu beobachten. Die wesentlich geringeren Festigkeiten bei abrupt-rapider Axialentlastung reagieren innerhalb der hier gewählten Schrittweiten der isostatischen Ausgangsspannung von ca. 5 MPa nicht auf die Variation der Randbedingung Sättigungsgrad (s. Kap. 5).

(4) Beziehung zum Niveau der größten Hauptspannung, Einfluss der Minimalspannung

Die beiden Spannungspfade Axialentlastung und Radialbelastung weichen zudem in der Entwicklung ihrer Bruchspannungen mit steigender Durchschnittsspannung voneinander ab, wobei für beide Konglomeratserien übereinstimmende Relationen zutreffen.

Der Pinching-off-Modus beider Konglomerate ist ungeachtet des Sättigungszustandes durch ein starkes Anwachsen der aufnehmbaren Differenzspannung bereits bei geringer Steigerung der Minimalspannung gekennzeichnet.

Im gleichen Minimalspannungsbereich unterhalb von 10 MPa bis 15 MPa ergeben sich aus den eingegrenzten Bruchspannungszuständen von Si-K und BE-K im Regulär-Modus geringfügig steigende Differenzspannungen mit Verringerung der Minimalspannung. Bei kontinuierlicher, quasi-statischer Axialentlastung muss offenbar zunächst ein bestimmter, materialspezifischer Betrag der größten Hauptspannung überschritten werden, bevor Splitting eintritt. Bereits bei einer um 5 MPa unter diesem kritischen „Schwellenwert“ liegenden größten Hauptspannung bleibt Trennbruchversagen bei gleichen und z.T. höheren Differenzspannungen bei beiden Lithotypen aus.

Diese kritische größte Hauptspannung beträgt im trockenen Zustand etwa das Dreifache des Betrages bei vollständiger Wassersättigung des Porenraumes (vgl. Punkt 3).

Mit Erhöhung der Minimalspannung wächst dieser Betrag der größten Hauptspannung etwa in der Größenordnung der Minimalspannungszunahme an, d. h. ohne oder nur unter geringer Zunahme der Differenzspannung. Gemessen an den Bruchspannungen des Lithotyps Si-K ist das Anwachsen der Differenzspannungen bei maximaler Durchfeuchtung geringfügig stärker als bei ofentrockenen Proben (vgl. Punkt 3).

Beide Lithotypen zeigen demnach im Spannungspfad Axialentlastung des Regulär-Modus von der Minimalspannung unabhängige oder nur geringfügig beeinflusste Trennbruchfestigkeiten. Bei Axialentlastung ist das Trennbruchversagen an ein kritisches, gesteinspezifisches Niveau der größten Hauptspannung gebunden, welches vom Feuchtegehalt abhängig ist. Dies steht im Gegensatz zu ihren Bruchspannungen bei Radialbelastung im Pinching-off-Modus.

(5) Porenfluiddruckwirkung

Die Bewertung eines potentiellen Einflusses des Porenfluiddrucks ist mit den erzielten Experimentaldaten nur eingeschränkt möglich. Aus technischen Gründen ist es lediglich im Abrupt-Modus gelungen, eine zusätzliche Berücksichtigung von Porenfluiddrücken (Versuchsvariante 3) für alle vier Haupt-Lithotypen anzuwenden (s. Kap. 5).

Die spezielle Versuchsdurchführung des Abrupt-Modus erlaubt es im Gegensatz zu den zwei kontinuierlichen Modi, aufgrund einer schlagartigen Axialentlastung ausgehend von einem isostatischen Spannungszustand, beliebige Porenfluiddrücke bis zum Betrag der größten Hauptspannung als Ausgangszustand quantitativ einzustellen (Kap. 5).

Im Moment der abrupt-rapiden Axialentlastung wird die axiale Einspannung vollständig aufgehoben. Es herrscht in diesem Augenblick somit eine Minimalspannung von Null, während die Radialspannung bzw. größte Hauptspannung ebenso wie die Regulierung des Porenfluiddrucks konstant bleiben (Kap. 5.2). Jedoch ist der in diesem Augenblick betragsmäßig wirksame Porenfluiddruck fraglich. In Anbetracht der extremalen, unbestimmten Entlastungsgeschwindigkeit muss von einem mit dem Zustand vor der

Entlastung übereinstimmenden Porenfluiddruck ausgegangen werden. In der Versuchsvariante A3 (gesättigt- p_{Fluid}) ist die effektive Minimalspannung resp. Axialspannung somit faktisch negativ und entspricht dem Betrag des effektiv wirksamen Porenfluiddrucks.

Wie oben ausgeführt, versagen alle sechs untersuchten Lithotypen bei abrupt-rapider Axialentlastung und konstanter radialer Einspannung. Ihre hierbei ermittelten Trennbruchfestigkeiten sind stets deutlich niedriger als ihre Bruchspannungen bzw. bruchlosen Maximalbelastungen bei kontinuierlicher Axialentlastung und Radialbelastung der Spannungsgeometrie Extension. Mit der für alle vier Haupt-Lithotypen geprüften Auswirkung des Porenfluiddrucks lässt sich innerhalb der nötigen sukzessiven Eingrenzung des Abrupt-Modus zeigen, dass dieser weder auf die Bruchspannungen noch auf das Deformationsmuster (Kap. 6.2) einen erkennbaren Einfluss ausübt.

(6) Verformungsbedingungen

Auf Basis der zugrunde liegenden Extensionsversuche ist eine Einschätzung des Verformungsverhaltens an die Erfassung der Axialdeformation in Richtung der Minimalspannung gebunden (s. Kap. 4.3).

Die ermittelten bruchhaften Axialverformungen im Abrupt-Modus sind vereinzelt niedriger als das zugehörige generelle Spannungs-Verformungs-Verhalten der jeweiligen Gesteinsserien im Extensionsversuch (Kap. 5). Die Auswertung in Kap. 6.2 zeigt, dass im Bereich niedrigster Axialdeformationen Trennbrucherfolge bei geringen Spannungsbeträgen bruchlosen Resultaten unter höherer Beanspruchung gegenüberstehen. Die im Regulär-Modus bruchhaft reagierenden konglomeratischen Proben lassen keine Beziehung zwischen Bruchreaktion und Axialverformung erkennen. Unterschiedliche Verformbarkeit lässt sich zwischen den beiden Durchfeuchtungszuständen (vgl. Punkt 3) erkennen. Im gleichen Beanspruchungsniveau sind die Axialverformungen gesättigter Prüfkörper gegenüber trockenen geringfügig erhöht. Vergleichbares ist für die Sandsteinpendants nicht festzustellen. Insofern ergeben sich weder aus dem Verformungsverhalten im Regulär- noch im Abrupt-Modus weitergehende Rückschlüsse auf das Splittingverhalten.

6.4 Splitting im triaxialen Extensionsversuch im Vergleich zum Scherbruchversagen im Kompressionsversuch

Nach dem zugrunde liegenden Konzept (Kap. 4) lassen sich mit der Anwendung von Triaxialversuchen die experimentellen Ergebnisse der Trennbruch-Stimulation im Spannungsregime Extension mit Resultaten kompressiver Beanspruchung vergleichen. Kompressionsversuch und Extensionsversuch unterliegen weitestgehend analogen versuchstechnischen und geometrischen Randbedingungen. Die Richtungen der einwirkenden Spannungen stimmen überein, obgleich die betragsmäßig unterschiedlichen Spannungs-

verhältnisse die konträren Lastgeometrien verkörpern (Abb. 10 und 11). Infolge der Rotationssymmetrie ist die mittlere Hauptspannung betragsmäßig entweder mit der größten oder der kleinsten Hauptspannung identisch, so dass der Beschreibung der jeweiligen Spannungszustände die größte und kleinste Hauptspannung dienen können (Abb. 33 und 34).

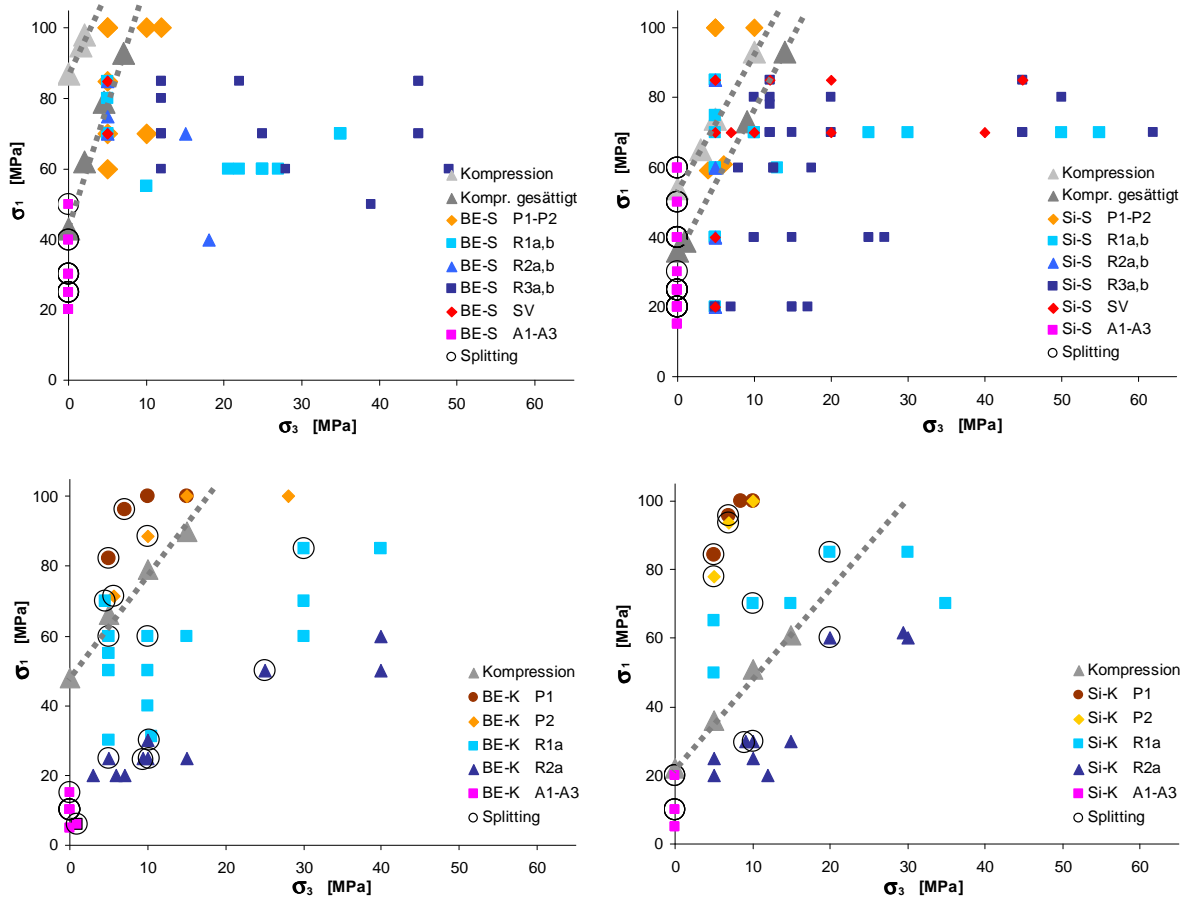


Abb. 34: Gegenüberstellung der Bruch- bzw. maximalen Spannungszustände der Deformationsrichtungen Extension und Kompression in der σ_1 - σ_3 -Ebene anhand der vier Haupt-Lithotypen: Die Spannungszustände unter Extensionsbeanspruchung entstammen den unterschiedlichen Versuchsvarianten der drei Versuchsmodi (vgl. Kap. 5). Die Spannungsgeometrie Kompression wird durch die Bruchspannungen im einaxialen und triaxialen Kompressionsversuch an trockenen und gesättigten Proben repräsentiert.

Die untersuchten Lithotypen weisen, abgesehen von den Magmatitproben, im Spannungsregime Kompression Druckfestigkeiten unterhalb der versuchstechnischen Maximallast der Prüfapparatur auf (Kap. 4.4), wengleich für die Probenserie BE-S Bruchspannungszustände im triaxialen Kompressionsversuch lediglich mit geringen Radial- bzw. Minimalspannungen realisierbar sind (vgl. Abb. 34). Insofern stellt, hinsichtlich der Probenauswahl unter Berücksichtigung der allgemeinen Annahmen zum Verhältnis der Bruchspannungen zwischen Scherbruch- und Trennbruchversagen (vgl. Kap. 3 und 4.4), die zum Splitting der drei Sandstein-Lithotypen nicht ausreichende Lastkapazität der Triaxialanlage unter quasi-

statischer, kontinuierlicher Extension ein unerwartetes Ergebnis der experimentellen Untersuchungen dar (s. Erläuterungen Kap. 5).

Anhand der vier Haupt-Lithotypen werden in Abb. 34 die Spannungszustände der drei Extensionsmodi inklusive ihrer Bruchreaktionen (Kap. 5) den linear angenäherten Bruchspannungen im Kompressionsversuch (Kap. 4.4) in der σ_1 - σ_3 -Ebene gegenübergestellt. Die Diagrammanordnung folgt dabei einer absteigenden Sortierung im Bezug auf ihre Kompressionsfestigkeiten von Sandstein BE-S zu Konglomerat Si-K. Zudem sind die Abweichungen zwischen trockenen und gesättigt-drainierten Kompressionsversuchen ausgehalten, soweit existent.

Die Relationen zwischen den Haupt-Lithotypen bezüglich ihrer Bruchspannungszustände mit Scherbruchversagen in Deformationsrichtung Kompression bestätigen sich unter Extensionsbeanspruchung nicht. Dies gilt sowohl für ihre relativen Trennbruchfestigkeiten als auch deren Einflussfaktoren (vgl. Kap. 6.1 bis 6.3).

So stehen beispielsweise der nur wenig geringeren Scherbruchfestigkeit des Konglomerats BE-K im Vergleich zum Sandstein Si-S z.T. erheblich niedrigere Trennbruchfestigkeiten gegenüber. Hingegen stimmen die beiden Konglomerate sowohl relativ als auch betragsmäßig in ihrem Spannungspfad und Feuchtegehalt abhängigen Trennbruchverhalten (Kap. 6.3, Abb. 33) gut überein, obwohl ihr Kompressionsverhalten divergiert. Trotz einer deutlich niedrigeren Festigkeit im Lastfall Kompression liegen die für Extension ermittelten Splitting-Festigkeiten von Si-K im Bereich jener von BE-K bzw. teilweise darüber.

Neben diesen Lithotyp spezifischen Aspekten ist aus dem Vergleich der beiden Versuchsarten auf signifikant auseinander gehende Wesensmerkmale von Kompressions- und Extensionsverhalten zu schließen. Über die andersartigen Bruchmuster (Kap. 6.1) hinaus manifestiert sich dies z. B. in der hier eruierten Spannungspfad-Abhängigkeit der Trennbruchfestigkeiten (Kap. 6.3, Punkt 2). Im Allgemeinen wird, insbesondere bezogen auf Kompressionsbedingungen, von einer Spannungspfad unabhängigen Bruchfestigkeit ausgegangen (s. d. z. B. Brady & Brown 2004).

Es lassen sich für Trennbruch- und Scherbruchversagen allerdings auch gleiche Einflussfaktoren feststellen. Dabei müssen jedoch die Wirkungsrichtungen oder gesteinspezifischen Reaktionen nicht zwingend übereinstimmen.

Beispielsweise kann mit zunehmendem Feuchtegehalt die Bruchfestigkeit sowohl im Extensions- als auch im Kompressionsversuch eine Reduzierung unterschiedlichen Ausmaßes erfahren (für Kompression s. d. z. B. Stavrogin & Tarasov 2001). Im Vergleich von trockenen und vollständig wassergesättigten drainierten Bedingungen zeigt sich im Kompressionsversuch ein entsprechender Feuchteinfluss für die beiden Sandsteintypen BE-S und Si-S.

Dieser ist indessen für die Konglomerate nicht nachweisbar (Abb. 34). Im Extensionsversuch besitzen dahingegen beide konglomeratische Proben eine beträchtliche Feuchteabhängigkeit ihrer Trennbruchfestigkeiten bei kontinuierlicher Axialentlastung (Kap. 6.3, Punkt 3). Mit Spannungspfad Radialbelastung sind die Abweichungen der Bruchspannungen der betreffenden Durchfeuchtungszustände wesentlich geringer, im Abrupt-Modus nicht feststellbar. Die ausnahmslos bruchlosen Ergebnisse der Sandsteine im Regulär- und Pinching-off-Modus lassen eine derartige Beeinflussung ungeachtet ihrer versuchstechnischen Maximalbelastung nicht erkennen.

Des Weiteren ist auch das zeitabhängige Verhalten in Form der signifikanten Festigkeitsunterschiede zwischen kontinuierlicher, quasi-statischer und abrupt-rapider Axialentlastung herauszustellen. Während für vergleichbare Gesteinsarten eine dynamische kompressive Beanspruchung gemeinhin zu moderat erhöhten Bruchspannungen führt (s. d. z. B. Paterson & Wong 2005), bewirkt dies im Extensionsregime eine teilweise enorme Festigkeitsreduzierung. Die experimentelle Bestimmung der ursächlichen Geschwindigkeit ist hier bisher jedoch nicht gelungen, dennoch ist eine indirekte Abschätzung der Größenordnung möglich (vgl. Kap. 6.2, Abb. 30).

Vergleicht man die Bruchspannungen beider Versagensmechanismen lässt sich bezogen auf die σ_1 - σ_3 -Ebene ausführen, dass die klastischen Gesteinsserien im Extensionsfall bruchlose Spannungszustände teilweise oberhalb ihrer Kompressionsfestigkeiten aufnehmen können (Abb. 34). Hierin sind die gesteinspezifischen Auswirkungen der Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Für die Versuchsergebnisse des Lithotyps BE-S ist dieser Befund auf einen gesättigten Ausgangszustand begrenzt, sehr wahrscheinlich allein infolge der versuchstechnischen Prüfkapazität. Das Konglomerat BE-K erreicht höhere Trennbruchfestigkeiten im Vergleich zur Kompression lediglich im Pinching-off-Modus.

Das Trennbruchversagen bei abrupt-rapider Axialentlastung im Abrupt-Modus erfolgt für alle Probenklassen mit Bruchspannungen deutlich unterhalb der einaxialen Druckfestigkeit, wenn auch in unterschiedlichem Maß.

Scherbruchversagen der betrachteten Gesteinstypen ist grundsätzlich durch stetig steigende Differenzspannungen mit Anwachsen der Minimalspannung gekennzeichnet (Abb. 34; s. d. z. B. Paterson & Wong 2005). Im Regulär-Modus hingegen ist zunächst im Bereich niedriger Minimalspannungen eine kritische größte Hauptspannung zu überwinden, woraus mit zunehmender Durchschnittsspannung anfangs fallende Differenzspannungen resultieren (vgl. Kap. 6.3). Dies kehrt sich mit höheren Minimalspannungen in konstante bis leicht steigende Differenzspannungen um. Mit dem Spannungspfad Radialbelastung ist eine solche unstete Beziehung zur Minimalspannung (vgl. Punkt 4 Kap. 6.3) nicht zu finden. Die Beträge der

Bruchspannungen sind größer und ihr Anwachsen ist stärker als bei Axialentlastung desselben Lithotyps.

Berücksichtigt man hingegen für die rotationssymmetrischen Spannungsverhältnisse der beiden Deformationsrichtungen Kompression und Extension gemäß dem dreiaxigen Zustand die mittlere Hauptspannung (σ_2), sind die aufnehmbaren Differenzspannungen bei gleicher Durchschnittsspannung (σ_m) im Spannungsregime Extension wesensgemäß zumeist um einiges geringer.

Eine Ausnahme hiervon bildet das Konglomerat Si-K. Angesichts seiner niedrigen Kompressionsfestigkeiten erreichen die bruchlosen Spannungszustände des Spannungspfades Axialentlastung im Bereich niedriger Minimalspannungen der trocken-drainierten Versuchsvariante (R1a) adäquate Differenzspannungen. Ebenso korrelieren die Bruchspannungen des Spannungspfades Radialbelastung im Extensionsregime mit denen der Lastgeometrie Kompression bei identischen Durchschnittsspannungen.

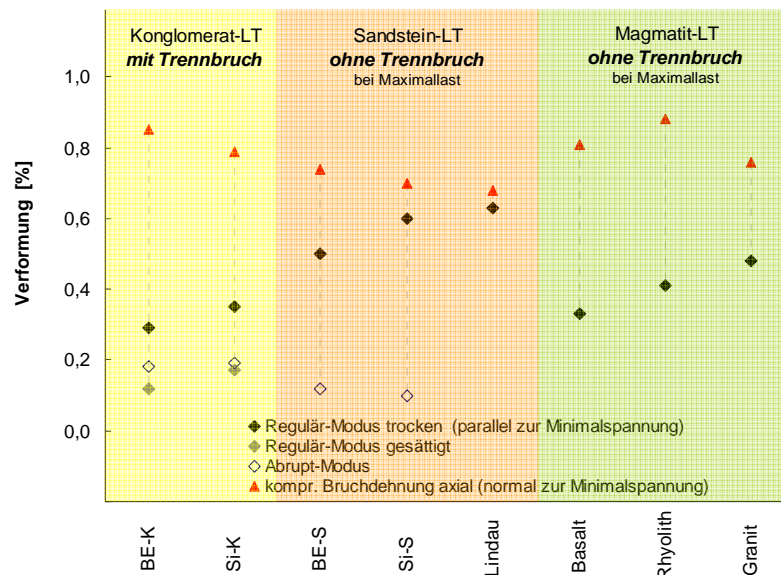


Abb. 35: Vergleich der Verformungen im Extensions- und Kompressionsregime der untersuchten klastischen und magmatischen Lithotypen (LT):

Als Messgrößenvergleich steht lediglich die Axialverformung zur Verfügung. Diese ist im Extensionsversuch (mit Bruch oder Maximalbelastung) parallel und im Kompressionsversuch normal zur Minimalspannung mit gegensätzlichem Vorzeichen gerichtet.

Dem klastischen Lithotyp mit der höchsten kompressiven Bruchdeformation BE-K genügt die geringste Axialdehnung bei kontinuierlicher Extension zur Ausbildung von Trennbrüchen. Die größten Verformungen ertragen die Sandstein-Lithotypen im Regulär-Modus bei versuchstechnisch höchstmöglicher Belastung (betragsmäßig 68 % bis 93 % ihrer axialen kompressiven Bruchdehnung). Dennoch bleibt hier ebenso wie für die Magmatit-Vertreter ein Bruchversagen aus.

Die Verformung ist in den hier gegenständlichen Triaxialversuchen anhand der gemessenen Axialdeformationen zu beurteilen. Diese sind im Extensionsversuch parallel und im Kompressionsversuch normal zur Minimalspannung mit entgegengesetztem Vorzeichen

gerichtet. Eine Gegenüberstellung der Axialverformungen beider Deformationsrichtungen soll einer vergleichenden Einordnung der Extensionsergebnisse dienen (Abb. 35).

Für Trennbruchversagen bei abrupt-rapider Axialentlastung genügen geringste Axialverformungen. Gemessen an ihrer Kompressionsdeformation erreichen diese Beträge im Extensionsregime lediglich ca. ein Siebentel (14 % Si-S) bis etwa ein Viertel (24 % Si-K) der axialen Bruchstauchung im einaxialen Kompressionsversuch. In dem gleichen Bereich geringster Dehnungen sind die bruchhaften gesättigt-drainierten Versuche des Regulär-Modus der Konglomeratserien zu finden. Zum Splitting im trocken-drainierten Regulär-Modus benötigen die Konglomerate betragsmäßig Extensionsdehnungen zwischen etwa einem Drittel (34 % BE-K) bis weniger als die Hälfte (44 % Si-K) ihrer kompressiven Bruchverformungen.

Dem entgegen stehen die maximalen Extensionsbeanspruchungen unter kontinuierlicher, quasi-statischer Axialentlastung der Sandstein-Lithotypen. Ohne Trennbruchversagen oder Anzeichen von makroskopischer Schädigung ertragen diese Axialverformungen in Richtung der Minimalspannung, die zwischen 68 % (BE-S) und 93 % (Lindau) ihrer Deformationsbeträge in Richtung der größten Hauptspannung im Kompressionsfall entsprechen. Das Niveau und die Relationen der Verformungen der Magmatit-Vertreter im Extensions- und Kompressionsregime sind mit jenen der Konglomeratserien vergleichbar, ohne jedoch – im Gegensatz zum Kompressionsfall – im quasi-statischen triaxialen Extensionsversuch Bruchversagen unter den getesteten Beanspruchungen hervorzubringen.

7 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellten Untersuchungen zum Trennbruchversagen von Festgesteinen erfolgten mit Hilfe von triaxialen Extensionsversuchen unter allseitigen Druckspannungen an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern. Dazu wurden insgesamt fünf klastische und drei magmatische Gesteine herangezogen und ihr Extensionsverhalten mit dem Verhalten im Kompressionsversuch unter identischen geometrischen und versuchtechnischen Rahmenbedingungen verglichen.

7.1 Zusammenhang zwischen Spannungsgeometrie und Bruchmechanismus

Für die Durchführung von Kompressionsversuchen liegen entsprechende nationale und internationale Standardisierungen vor, die in analoger Weise für die Extensionsversuche Anwendung fanden (Kap. 4.1). Insofern unterscheiden sich die Randbedingungen der Triaxialversuche lediglich in ihrer Spannungsgeometrie und ihrem Deformationspfad. Die magmatischen Proben besitzen einaxiale Druckfestigkeiten oberhalb der Prüfkapazität der Triaxialzelle, so dass sich die triaxialen Kompressionsversuche auf die klastischen Serien beschränkten. Die triaxialen Extensionsversuche wurden mit zwei Spannungspfaden (Axialentlastung und Radialbelastung) und sowohl unter kontinuierlicher Extension als auch extremaler Entlastungsgeschwindigkeit im Spannungspfad Axialentlastung (Abb. 13) durchgeführt (Kap. 5).

Dem Scherbruchversagen der drei Sandsteinvertreter BE-S, Si-S und Lindau-Sandstein im einaxialen und triaxialen Kompressionsversuch stehen ihre bruchlosen Ergebnisse im Extensionsregime bei kontinuierlicher Extension bis zur versuchstechnischen Maximallast der selben Triaxialapparatur gegenüber. Dagegen versagen die beiden Konglomeratvertreter in beiden Spannungspfaden des kontinuierlichen Extensionsfalls ausnahmslos unter Ausbildung von Trennbrüchen. Bei abrupt-rapider Axialentlastung genügte die maximale Prüfkapazität, für alle Lithotypen generell Splitting zu erzeugen (Kap. 5 und 6).

Das anhand der durchgeführten Extensionsversuche festgestellte grundsätzliche Trennbruchversagen im Extensionsregime wurde in zwei Ausnahmefällen der Probenklasse Lindau-Sandstein bei abrupt-rapider Axialentlastung von Scherbruchversagen begleitet. In offensichtlich synchroner Entstehung und somit vermeintlich kausaler Verknüpfung wurden gemeinsam Trenn- und Scherbrüche erzeugt (Kap. 6.1).

Zumindest für die untersuchten Lithotypen und angewendeten Randbedingungen (vgl. Kap. 4 und 5) gilt, dass generell im einaxialen und triaxialen Kompressionsversuch beim Überschreiten der Bruchfestigkeit Scherbruchversagen und im triaxialen Extensionsversuch Trennbruchversagen eintritt. Insofern bestätigt sich hiermit im Laborexperiment die der

Arbeit zugrunde liegende These (vgl. Kap. 4), dass unter allseitiger Einspannung Splitting und Scherbruchversagen trotz ihrer abweichenden Deformationsmuster nebeneinander auftreten können und sie sich getrennt voneinander im Triaxialversuch als Funktion der Lastgeometrie stimulieren lassen. Ungeachtet dessen können in beiden Spannungsregimen grundsätzlich beide Bruchtypen in Erscheinung treten, wie beispielsweise das *axial splitting* im Kompressionsversuch (vgl. Kap. 3) und die hier festgestellten Scherbrüche des Lithotyps Lindau-Sandstein im Extensionsfall belegen.

Das unter variierten Bedingungen an unterschiedlichen Gesteinsarten beobachtete Trennbruchversagen erstreckt sich über einen (positiven) Minimalspannungsbereich bis 30 MPa bei kontinuierlicher Extension (BE-K, Kap. 6.3) und bis 55 MPa mit extremaler Extensionsgeschwindigkeit (Si-S, Kap. 6.2) jeweils bis 85 MPa größter Hauptspannung. Diese Spannweite steht im Widerspruch zur allgemeinen Ansicht, dass Splitting im Bereich allseitiger Druckspannungen bereits bei einem geringen isostatischen Spannungsanteil unterdrückt wird und es zur Ausbildung von Scherbrüchen kommt (s. d. z. B. Jaeger & Cook 1979, Andreev 1995, Mandl 2000, Paterson & Wong 2005, vgl. Kap. 3). Diese Erkenntnis beruht auf experimentellen Erfahrungen mit verschiedenen Festgesteinen vornehmlich im Kompressionsregime (s. Kap. 3) und ist angesichts der hier vorliegenden Ergebnisse nicht auf die Spannungsgeometrie Extension übertragbar.

Die Kompressions- und Extensionsversuche unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer bevorzugten makroskopischen Deformationsmuster, es sind neben abweichenden Beträgen der Bruchspannungen auch unterschiedliche Einflussfaktoren und verschiedenartige Auswirkungen derselben auf die Scherbruch- und Trennbruchfestigkeiten festzustellen (Kap. 6). Für das Trennbruchversagen kommt dabei dem Einfluss der Extensionsgeschwindigkeit, der Spannungspfadabhängigkeit und der Belastungsart abhängigen Wirkung der Minimalspannung besondere Bedeutung zu.

Axialentlastung mit extremaler Geschwindigkeit geht für alle getesteten Gesteinsserien mit erheblicher Festigkeitsreduzierung gegenüber kontinuierlicher, quasi-statischer Extension einher. Zudem unterscheiden sich beide Beanspruchungsarten (quasi-statisch vs. abrupt-rapid) in der Anordnung der erzeugten Trennbrüche. Die bei kontinuierlicher Extension versagenden Konglomeratvertreter lassen eine bemerkenswerte Spannungspfadabhängigkeit des Trennbruchversagens im triaxialen Extensionsversuch erkennen. Bei radialer Belastung sind erhöhte Bruchspannungen und eine Festigkeit erhöhende Wirkung der Minimalspannung zu beobachten. Die Trennbruchfestigkeit bei kontinuierlicher Axialentlastung wird dagegen kaum vom isostatischen Spannungsanteil beeinflusst. Allerdings ist hier im Gegensatz zur Radialbelastung eine deutliche Festigkeitsreduzierung mit steigendem Feuchtegehalt festzustellen. Der Unterschied der Ausbildung der Trennbrüche zwischen beiden Spannungspfaden ist im Vergleich zur abrupt-rapiden Extension weniger markant.

7.2 Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den theoretischen Lösungsansätzen

Es existiert ein vergleichsweise gesicherter Kenntnisstand zur kompressiven Beanspruchung und entsprechender praktikabler Festigkeitshypothesen des Scherbruchversagens von Festgesteinen (vgl. Kap. 3). Dem stehen die offenen Fragen im Bezug auf das Trennbruchverhalten im triaxialen Spannungszustand und dessen hinreichend zutreffende Prognose gegenüber, die angesichts der in Kap. 2 exemplarisch aufgezeigten aktuellen Problemstellungen im ingenieurmäßigen wie bergmännischen Untertagebau von enormer praktischer Relevanz sind. Diesem Aspekt widmen sich beispielsweise die in Kap. 3.2 erläuterten Konzepte von Brown & Trollope (1967), Stacey (1981) oder Lempp & Mühlhaus (1985).

Nach Brown & Trollope (1967) bestimmen aus der äußeren Beanspruchung resultierende lokale Inter-Partikel-Spannungen das Bruchverhalten von Gesteinsmaterialien. Sie konstatieren, dass insbesondere im Hinblick auf Trennbruchversagen prognostizierte Grenzspannungszustände auf Basis der Elastizitätstheorie oder anderer kontinuumsmechanischer Ansätze diesem Umstand nicht hinreichend Rechnung tragen. Mit ihrer Theorie der tatsächlich wirksamen Zugspannungen zeigen sie die Korrelation der versuchstechnisch bedingten Unterschiede zwischen mittels verschiedener Experimentalmethoden ermittelten Zugfestigkeiten. Gemäß ihrem Ansatz entstehen tatsächlich wirksame, lokale Zugspannungen auch unter allseitiger Druckbeanspruchung (s. Kap. 3.2).

Als Beispiel führen sie Axialsplitting in einaxialen Kompressionsversuchen an, die mit möglichst eliminierter Endflächenreibung durchgeführt wurden. Die aus dem Vergleich der gemessenen Trennbruchfestigkeit mit Ergebnissen von Ringtests und Brazilian-Versuchen kalkulierten Werte für ν' gemäß Formel (1) (Kap. 3.2) von 0,208 bzw. 0,23 stimmen gut mit der Poissonzahl ihres Probenmaterials von 0,24 überein. Somit sind die verschiedenen gemessenen Bruchfestigkeiten auf identische lokal wirksame Inter-Partikel-Zugspannungen zurückzuführen.

Die hier vorgestellten Ergebnisse (Kap. 5 und Kap. 6) sind angesichts der Ausbildung von Trennbrüchen im triaxialen Extensionsversuch unter allseitiger Einspannung mit der modellhaften Grundvorstellung dieses Konzepts vereinbar. Die Trennbrüche sind subnormal zur Minimalspannung orientiert, die mit der Richtung der betragsmäßig größten lokal wirksamen Inter-Partikel-Zugspannung gemäß Formel (1) übereinstimmt. Mit Berücksichtigung der Spannungsgeometrie im triaxialen Extensionsversuch wird nach Formel (1) σ_3' kleiner Null, d. h. zur tatsächlich wirksamen Zugspannung, wenn folgendes Spannungsverhältnis gilt:

$\sigma_3' < 0$, wenn :

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} < 2 \nu' \leq 1 \quad (5)$$

mit :

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = \text{Hauptspannungen (mit } \sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3 \text{)}$

$\sigma_3' = \text{"effective tensile stress", Inter-Partikel-Spannung}$

Aus Formel (5) folgt, dass sich rechnerisch mit steigenden ν' für eine zunehmende Anzahl möglicher Spannungsverhältnisse lokal wirksame Zugspannungen ergeben. Die geringsten ν' genügen demnach Spannungszuständen, die durch geringe Minimalspannungen und / oder hohe Differenzspannungen gekennzeichnet sind. Für die hier untersuchten Beanspruchungen trifft dies ungeachtet des Lithotyps oder des Brucherfolgs sowohl für den Pinching-off-Modus ($\nu' \approx 0,05$ bei Bruch oder Maximallast) und den Abrupt-Modus zu. Aufgrund der aufgehobenen axialen Einspannung (Minimalspannung gleich Null) folgt für letzteren ein Mindestwert von $\nu' > 0$. Für die Konglomerate resultieren im Regulär-Modus für die niedrigen Trennbruchfestigkeiten der gesättigt-drainierten Versuchsvariante die höchsten Mindestwerte von ν' mit 0,25 für Lithotyp BE-K bzw. 0,17 für Si-K.

Durch Substitution der jeweiligen Inter-Partikel-Zugspannungen gemäß Formel (1) wird eine Korrelationsanalyse zwischen den Messergebnissen zweier Versuchstechniken möglich (s. d. Brown & Trollope 1967). Diese Vorgehensweise wurde auf die Ergebnisse der drei Versuchsmodi beispielhaft am Lithotyp BE-K übertragen. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse von Abrupt- und Regulär-Modus gut korrelieren. Die unterschiedlichen Festigkeiten lassen sich auf gemeinsame ν' -Werte zwischen 0,1 und 0,3 zurückführen, die mit üblichen Poissonzahlen harmonieren. Im Gegensatz dazu ergeben sich keine schlüssigen Beziehungen zum Pinching-off-Modus. Nach dem Ansatz von Brown & Trollope (1967) errechnen sich weder aus dem Vergleich mit dem Abrupt- noch mit dem Regulär-Modus plausible Beträge für ν' .

Bezieht man die unterschiedlichen Trennbruchfestigkeiten eines Lithotyps auf eine gemeinsame Inter-Partikel-Spannung entsprechend der Formel (1), resultieren für die Konglomeratserien beispielsweise mit ν' -Werten von 0,25 lokale Zugspannungen zwischen 30 MPa und 40 MPa für die Trennbruchfestigkeiten der trocken-drainierten Versuche des Regulär- sowie des Pinching-off-Modus. Die Trennbruchfestigkeiten der gesättigt-drainierten Versuche ergeben dabei allerdings Inter-Partikel-Zugspannungen wenig kleiner Null (s. o.). Mit dem rechnerischen Ansatz der gleichen ν' -Werte liegen in diesem Bereich zudem die bruchlosen Spannungszustände des Pinching-off-Modus der beiden Konglomeratreihen.

Insgesamt betrachtet, lassen sich mit Hilfe des Konzepts der „effective tensile stresses“ von Brown & Trollope (1967) sowohl im Hinblick auf die Bruchspannungszustände des Abrupt- als auch des Regulär-Modus plausible Werte für v' bemessen. Dahingehend ließe sich das Einsetzen des Trennbruchversagens begründen. Allerdings weisen die bruchlosen Spannungszustände zum Teil höhere effektive Zugspannungen auf. Insbesondere hohe Differenzspannungen lassen sich mit dem betreffenden theoretischen Ansatz nicht erfassen. Darüber hinaus bietet dieses Konzept keine Erklärung dafür, warum unter sonst gleichen geometrischen Bedingungen im Kompressions- wie Extensionsversuch sowohl Trennbruch- als auch Scherbruchversagen auftreten können.

Angesichts von Bruchversagen parallel zur Richtung der größten Hauptspannung unterhalb prognostizierter Bruchfestigkeiten gemäß der Mohr-Coulombschen Festigkeitshypothese postuliert Stacey (1981) das Konzept einer kritischen Extensionsdehnung (Kap. 3.2). Die entstehenden Brüche bilden sich demnach normal zur Richtung der Extensionsdehnung aus, die der Richtung der Minimalspannung entspricht. Für linear-elastisches Materialverhalten gilt Formel (3) (Kap. 3.2) analog zu Brown & Trollope (1967), wonach bereits unter allseitiger Einspannung eine Extensionsdehnung vorliegen kann. Die gesteinspezifische kritische Extensionsdehnung zielt dabei auf das Initial des Bruchversagens ab. Stacey (1981) zeigt, dass im Kompressionsversuch mit Einsetzen der Bruch- bzw. Rissbildung parallel zur größten Hauptspannung eine Zunahme der Querverformung im Vergleich zur Axialdeformation verbunden ist. Die Verformung in Richtung Minimalspannung an diesem Punkt entspricht der kritischen Extensionsdehnung, die im Bereich niedriger Minimalspannungen von dieser unabhängige, gesteinspezifische Werte einnimmt.

Stacey (1981) zielt damit ebenso wie der Ansatz eines kritischen Dilatanzwinkels (Lempp & Mühlhaus 1985, Kap. 3.2) auf die mit der Rissbildung und ihrer fortschreitenden Ausbreitung einhergehende Volumendeformation im triaxialen Spannungszustand ab. Somit bilden nicht die Bruchspannungen sondern das Verformungsverhalten vor dem eigentlichen Eintritt des Makrobruchs die Grundlage der Bruchkriterien.

Die zur Rissinitiierung nötige Verformung im Kompressionsversuch, auf die sich Stacey (1981) bezieht, lässt keine Aussage über den einsetzenden Bruchmechanismus zu. Dagegen erfolgt nach Lempp & Mühlhaus (1985) Splitting subparallel zur freien Oberfläche bei Überschreiten eines Dilatanzwinkels in Abhängigkeit des Spannungsregimes. Der Dilatanzwinkel ist im Extensionsregime kleiner als im Kompressionsregime, was erklärt, warum Splitting bevorzugt in der Spannungsgeometrie Extension und untergeordnet in Kompression erfolgt.

Angaben gesteinspezifischer kritischer Extensionsdehnungen finden sich beispielsweise in Stacey (1981), Stacey & Page (1986) sowie Alber & Heiland (2001b). Diese liegen zwischen

0,007 % und 0,03 % für sedimentäre bis magmatische Gesteine. Vergleicht man diesen Wertebereich mit den hier im Extensionsversuch gemessenen Dehnungen in Richtung der Minimalspannung, wird deutlich, dass die entsprechenden Axialverformungen sowohl der quasi-statischen als auch abrupt-rapiden Axialentlastung zwischen ca. 0,1 % bis ca. 0,6 % ungeachtet ihrer Bruchresultate etwa eine bis zwei Größenordnungen höher liegen (Kap. 5 und Kap. 6.3, Abb. 35). Herauszustellen sind insbesondere die bruchlosen Maximalbelastungen der Sandstein-Lithotypen mit Axialverformungen zwischen 0,5 % (BE-S) und 0,63 % (Lindau) sowie der magmatischen Proben zwischen 0,33 % (Basalt) bis 0,48 % (Granit).

Daher ist anhand der hier vorgestellten Ergebnisse zu folgern, dass ein in der Spannungsgeometrie Extension vorliegendes Überschreiten der im Kompressionsversuch bestimmten kritischen Extensionsdehnung nicht zwingend mit Bruchversagen einhergeht.

7.3 Notwendigkeit mikromechanischer Lösungsansätze

Die anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse aufgezeigte grundlegende Unterscheidung des bruchmechanischen Verhaltens der untersuchten Festgesteine im Triaxialversuch unter Extensions- und Kompressionsbeanspruchung stützt die Forderung nach Bruchtyp spezifischen Modellvorstellungen bzw. Bruchkriterien zur optimierten Beschreibung der Bruchfestigkeit (vgl. Kap. 3.2).

Die Ergebnisse zeigen, dass ein (kontinuierlicher) Übergang zwischen Trennbruch- und Scherbruchversagen mit steigendem isostatischen Spannungsanteil im Sinne der Unterdrückung induzierter (lokaler) Zugspannungen, wie er allgemein angenommen wird (vgl. Kap. 3) – zumindest im betrachteten Spannungsbereich – nicht festzustellen ist und zwischen beiden Deformationstypen wesentliche Unterschiede der Wesensmerkmale ihres Festigkeitsverhaltens vorliegen (vgl. Kap. 6.4 und 7.1).

Wie in Kap. 7.2 ausgeführt, genügen die heute vorliegenden Konzepte zum Trennbruchversagen nicht, um das im triaxialen Extensionsversuch ermittelte Spektrum des Sprödbbruchverhaltens hinreichend zu beschreiben. Daher lassen sich angesichts der hier zugrunde liegenden experimentellen Ergebnisse eine Reihe offener Fragen insbesondere zur Relation zwischen Trenn- und Scherbruchversagen ableiten, z. B.:

- Wie ist das gemeinsame Auftreten von Splitting und Scherbruchversagen zu erklären?
- Welche Bedingungen kontrollieren das einerseits räumliche Nebeneinander in synchroner Entstehung als auch das andererseits isolierte Auftreten der beiden verschiedenartigen makroskopischen Brucherscheinungen sowohl im Laborexperiment als auch in-situ?

- Existieren Übergangs- oder Mischformen von Deformationsmuster und Bruchmechanismus, möglicherweise in Abhängigkeit von der Spannungsgeometrie?
- Welche Parameter lassen sich zur mathematischen Beschreibung dieser Versagensmechanismen auf Basis welcher laborativen Versuchstechniken heranziehen?

Die durchgeführten Extensionsversuche zeigen zudem beachtliche Unterschiede des Trennbruchverhaltens der vier klastischen Haupt-Lithotypen innerhalb ihres vergleichsweise engen lithologischen Spektrums. Entsprechend den Ausführungen in Kap. 6 wird deutlich, dass sich die beiden Sandsteine in ihrem Splittingverhalten sowie ihren Trennbruch-Festigkeiten unter kontinuierlicher, quasi-statischer Extension deutlich von den Konglomeratvertretern abgrenzen. Dem gegenüber steht ein vergleichsweise gradueller Übergang ihrer geo-mechanischen Standardkennwerte und skalaren petrophysikalischen Eigenschaften (vgl. Kap. 4.4 und Kap. 6.4).

Aus der Zusammenstellung der Festigkeiten im einaxialen indirekten Zugversuch und im einaxialen Kompressionsversuch geht der entsprechend begrenzte Wertebereich aller klastischen Probenserien hervor (Abb. 36). Vornehmlich die beiden Lithotypen Si-S- und Lindau-Sandstein sowie das Konglomerat BE-K liegen in diesem Sinn eng beieinander, d. h. diese drei Lithotypen unterscheiden sich untereinander kaum in ihren einaxialen Druck- resp. Zugfestigkeiten.

Das Verhältnis zwischen einaxialer Druckfestigkeit und einaxialer indirekter Zugfestigkeit wird als Maß der Sprödigkeit herangezogen. Demzufolge setzen sich die Magmatit-Vertreter nicht nur durch ihre höheren Festigkeitsbeträge von den klastischen Serien deutlich ab, sondern auch durch ihr wesentlich spröderes Bruchverhalten.

Trotz Axialverformungen im Extensionsregime von bis zu 93 % der maximalen kompressiven Bruchdehnungen (vgl. Kap. 6.4) ist Splitting unter kontinuierlicher Extension ausschließlich für die grobkörnigen Konglomerate zu stimulieren. Sandstein- und Magmatit-Vertreter können die versuchstechnische maximale Beanspruchung kontinuierlicher, quasi-statischer Axialentlastung wie Radialbelastung bruchlos aufnehmen und versagen lediglich unter abrupt-rapider Axialentlastung gewöhnlich unter Ausbildung von Trennbrüchen – Lindau-Sandstein mit gemeinsamem Trennbruch- und Scherbruchversagen.

Dahingehend schlagen sich die erheblichen Unterschiede zwischen den klastischen Gesteinen und den Magmatitproben hinsichtlich ihrer Druck- und Zugfestigkeiten sowie ihrer Sprödigkeit nicht in den hier zugrunde liegenden triaxialen Extensionsversuchen nieder (Abb. 36). In Anbetracht der ausdrücklich beachteten lithologischen Komparabilität der vier Haupt-Lithotypen (s. Kap. 4.4) ist vielmehr aus dem Vergleich der deutlich divergenten Reaktionen der Sandsteinvertreter gegenüber den Konglomeratserien ein mikrostruktureller Zusammenhang in Form der Korngrößenzusammensetzung abzuleiten.

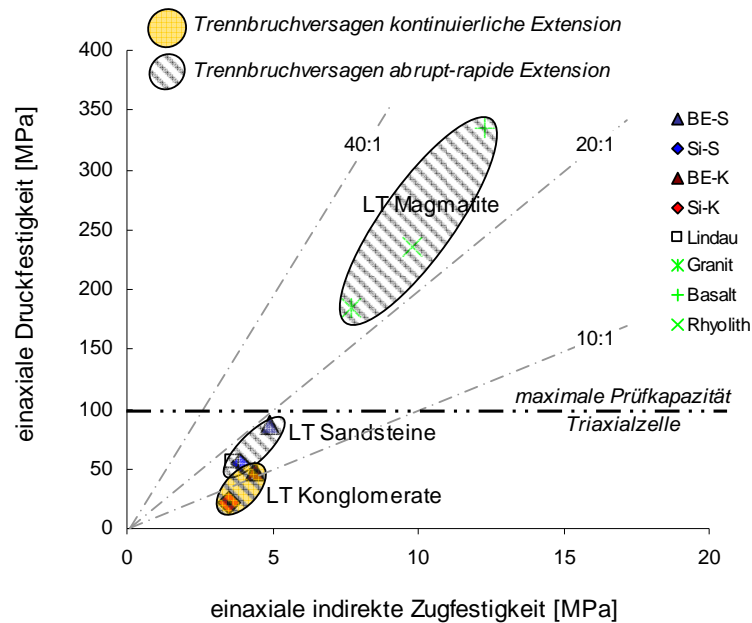


Abb. 36: Gegenüberstellung der Festigkeiten der verwendeten Lithotypen (LT) im einaxialen Kompressionsversuch sowie im einaxialen indirekten Zugversuch (Sprödigkeitsindex) und ihres zugehörigen Trennbruchverhaltens innerhalb der verfügbaren Prüfkapazität der eingesetzten Triaxialzelle: Unter abrupt-rapider Axialentlastung lässt sich ungeachtet ihrer unterschiedlichen Kompressions- und Zugfestigkeiten (besonders der Magmatite und Sedimentgesteine) für alle Lithotypen Splitting stimulieren.

Im Gegensatz dazu weisen bei kontinuierlicher, quasi-statischer Extension (Axialentlastung wie Radialbelastung) trotz vergleichbarer Druck- bzw. Zugfestigkeiten innerhalb der klastischen Lithotypen (besonders Si-S, Lindau und BE-K) lediglich die beiden Konglomerate BE-K und Si-K Trennbruchversagen auf.

Lindau-Sandstein versagte bei abrupt-rapider Axialentlastung unter gleichzeitiger Ausbildung von Trenn- und Scherbrüchen.

Ähnliche Beispiele lithologischer resp. Korngrößen-Effekte beschreiben Wawersik & Fairhurst (1970) für Splitting im einaxialen Kompressionsversuch. Nach ihren Untersuchungen verringert sich die Tendenz zum Trennbruchversagen mit zunehmender Homogenität feinkörniger Materialien.

Bei experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der mittleren Hauptspannung auf die Bruchfestigkeit von Festgesteinen mit Hilfe echter Triaxialversuche wurden außerdem wesentliche Unterschiede des Festigkeitsverhaltens und der Deformationsmuster zwischen besonders feinkörnigen und grobkörnigeren metamorphen und magmatischen Proben festgestellt (Haimson 2006).

In diesem Zusammenhang fehlender allgemeingültiger Übertragbarkeit des Bruch- bzw. Festigkeitsverhaltens auf das komplette Spektrum spröder Gesteine sind zudem die auseinander gehenden Ergebnisse hinsichtlich der Bruchmechanismen von Ramsey & Chester (2004) sowie Hunsche (1993) aufzuführen (vgl. Kap. 3.1). Mit der gleichen Versuchstechnik von Extensionsversuchen an Hundeknochen-förmigen Prüfkörpern beobachteten Ramsey & Chester (2004) einen Übergang von Trenn- zu Scherbrüchen mit abnehmenden Zug-

spannungen an Marmorproben, während Hunsche (1993) selbst bei positiven Minimalspannungen an Salzgesteinen ausschließlich Trennbruchversagen erzeugen konnte.

Schließlich sind, wie in Kap. 2 dargelegt, die beim Tunnelvortrieb der AlpTransit-Basistunnel Lötschberg und Gotthard aufgetretenen Bergschläge, die im Zusammenhang mit Trennbruchversagen stehen, bevorzugt in Streckenabschnitten in mittel- bis grobkörnigen Gneisen und Graniten im Gegensatz zu Tunnelpassagen in feinkörnigerem Umgebungsgestein erfolgt (z. B. Rehbock-Sander & Gerdes 2005, sBfV 2005, ATG-AG 2004).

Vornehmlich aus Untersuchungen im Kompressionsversuch ist bekannt, dass die Mikrostruktur das Festigkeits- und Verformungsverhalten beeinflusst (s. d. z. B. Paterson & Wong 2005, Stavrogin & Tarasov 2001; Kap. 3). Unter Berücksichtigung von Überlagerungen mit anderen Gefügeeigenschaften geht im Allgemeinen eine abnehmende Korngröße mit steigenden Bruchspannungen einher.

Nach Eberhardt et al. (1999, 1998) ist im Kompressionsregime die reduzierte Bruchfestigkeit infolge von Korngrößeneffekten weniger auf ein geringeres Spannungsniveau bei Rissinitiiierung als vielmehr auf vermehrtes Risswachstum in den anschließenden Stadien der Mikrorissentwicklung zurückzuführen. Eine potentiell höhere Rissdichte bei homogeneren, feinkörnigeren Proben wirkt eher hindernd auf die Rissausbreitung („crack arrest“).

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird insgesamt ein komplexer Zusammenhang zwischen Bruchmechanismus und Festigkeit sowie Lithologie (vornehmlich i. S. Mikrostruktur) deutlich, der in den gebräuchlichsten Festigkeitshypothesen nicht genügend Berücksichtigung findet (vgl. Kap. 3.2).

Die vorstehenden Ausführungen belegen exemplarisch, dass u. a. im Hinblick auf die Beantwortung der obigen Fragen der Schlüssel zur Deutung von Bruchversagen und Bruchfestigkeit in der vorangehenden mikromechanischen Entwicklung liegt. Wie vorstehend dargelegt, verfolgen diesen Ansatz mit besonderem Focus auf die Differenzierung von Trennbruch und Scherbruchversagen beispielsweise die Konzepte von Stacey (1981) oder Lempp & Mühlhaus (1985). Auch wenn bis heute ein befriedigendes, allgemeingültiges mikromechanisches Modell zur Erklärung der Bruchphänomene von Festgesteinen vermisst wird (s. d. z. B. Paterson & Wong 2005, Bahat et al. 2005, Mandl 2000), ist die Verknüpfung von Makrobruchausbildung und vorausseilender Mikrorissentwicklung gemeinhin anerkannt.

In der Fachliteratur werden zahlreiche mikromechanische Prozesse diskutiert, welche die innere Spannungsverteilung unter der äußeren Beanspruchung beeinflussen oder kontrollieren. Den Interaktionen zwischen den verschiedenen Gesteinskonstituenten (Partikel, Poren, Risse) während des Deformationsprozesses auf dem Weg zur maximalen Lastaufnahme und schließlich zum makroskopischen Bruchversagen kommt dabei offensichtlich besondere Bedeutung zu (vgl. Kap. 3).

Angesichts akustischer Emissionen im Kompressionsversuch wird davon ausgegangen, dass die dem Scherbruchversagen zugrunde liegende Mikrorissausbreitung zu entscheidenden Anteilen von Mikrozugrissen parallel zur größten Hauptspannung geprägt wird und Mikroscherrisse erst im Endstadium an Intensität gewinnen (Stanchitis et al. 2006, Manthei 2005, Diederichs 2003, etc.). In gleicher Weise kann die Formierung von Trennbrüchen neben Mikrozugrissen auch von Mikroscherrissen begleitet sein (z. B. Backers et al. 2005). Kawakata & Shimada (2000) und Sahouryeh et al. (2002) verweisen beispielsweise auf den Einfluss der mittleren Spannung auf das Risswachstum.

Bezieht man sich auf die beiden im Triaxialversuch an zylindrischen Prüfkörpern möglichen Spannungsverhältnisse, gilt für das Extensionsregime $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ und für den Kompressionsfall $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Im echten, polyaxialen Spannungszustand kann die mittlere Hauptspannung (theoretisch) beliebige Werte zwischen der größten und kleinsten Hauptspannung einnehmen. Aus dem Vergleich der hier vorgestellten Ergebnisse mit Literaturangaben (s. o.) zeigt sich, dass für alle derartigen Versuchstechniken und demgemäßen Spannungsverhältnisse sowohl Scherbruch- als auch Trennbruchversagen möglich ist. Wie die vorliegenden Untersuchungen bestätigen, lässt sich dabei ein genereller Übergang von Splitting zu Scherbruchversagen mit steigendem isostatischen Spannungsanteil nicht belegen.

Nach obigen Ausführungen erfolgt initiales Risswachstum (sub-)normal zur Minimalspannung, d. h. in der Ebene σ_1 - σ_2 . Diese ist im Extensionsfall des Triaxialversuchs (zumindest hinsichtlich der aufgetragenen Beanspruchung) lagefest normal zur Achse des Prüfzylinders orientiert, während sie im einaxialen wie triaxialen Kompressionsversuch an Prüfzylindern rotationssymmetrisch um die Längsachse variiert. Die anisotrope Rissentwicklung könnte somit entscheidend vom Belastungsregime geprägt sein, insbesondere im Hinblick auf die mikrostrukturelle, innere inhomogene Verteilung der Interpartikel-Spannungen.

Hieraus lässt sich die mit den vorgestellten triaxialen Extensionsversuchen unter allseitiger, rotationssymmetrischer Druckbeanspruchung eruierte Präferenz des Trennbruchversagens in der Spannungsgeometrie Extension und die erhebliche lithologisch-mikrostrukturelle Sensitivität in Form des Korngrößeneinflusses begründen.

Die Korrelation zwischen den auseinander gehenden Bruchphänomenen und mit diesen verknüpften Bruchfestigkeiten besteht demnach in ihrer vorauseilenden Mikrorissentwicklung. Somit erscheint es nicht zielführend, Problemstellungen unter Beteiligung von Trennbruchversagen mit Festigkeitshypothesen auf Basis von Scherbruchversagen beurteilen zu wollen. Schließlich wird zudem die besondere Schwierigkeit einer Übertragung der experimentell-laborativen Ergebnisse auf das in-situ zu erwartende Gebirgsverhalten unter polyaxialen (echten triaxialen) Spannungsbedingungen deutlich.

8 Fazit

Auf der Basis der durchgeführten triaxialen Extensionsversuche an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern in einer sog. Triaxialzelle unter allseitiger Druckbeanspruchung lassen sich zusammenfassend nachstehende Folgerungen ableiten:

1. Derartige triaxiale Extensionsversuche sind generell geeignet, Trennbrüche zu stimulieren. Die Bruchflächen entstehen dabei subnormal zur Längsachse der Prüfzylinder, d. h. subnormal zur Richtung der Minimalspannung (Kap. 6.1). Die Inklination der Trennbruchfläche zur größten Hauptspannung beträgt hier durchschnittlich 7° und kann im Einzelfall bis zu 14° erreichen. Die Oberflächen der Trennbrüche zeigen keinerlei Anzeichen von Scherdeformation bzw. Relativbewegung parallel zur Bruchfläche. Die Trennbrüche können sich frei zwischen den Endflächen der Probenkörper ausbilden, sind jedoch bei kontinuierlicher, quasi-statischer Extension bevorzugt in der Nähe der Zylinderendflächen positioniert. Bei abrupt-rapider Axialentlastung sind die Trennbrüche relativ gleichmäßig entlang der Längsachse der Prüfkörper verteilt.

2. In Anbetracht der vorliegenden Versuchsergebnisse wird deutlich, dass grundsätzlich Trennbruchversagen mit der Spannungsgeometrie Extension im Triaxialversuch verknüpft ist. Allerdings können untergeordnet auch Scherbrüche auftreten. Die durchgeführten Extensionstests zeigen, dass grundsätzlich Trennbruch- und Scherbruchversagen räumlich und zeitlich nebeneinander erfolgen können (Kap. 6). Analog sind im ein- und triaxialen Kompressionsversuch Trennbrüche möglich, obgleich bevorzugt Scherbruchversagen mit Kompressionsbeanspruchung einhergeht. Während gemeinhin Splitting unter allseitiger Druckbeanspruchung ausschließlich auf den Bereich niedrigster Minimalspannungen eingeschränkt wird (Kap. 3), treten die hier im triaxialen Extensionsversuch stimulierten Trennbrüche auch bei höheren Minimalspannungen auf. Da die triaxialen Extensions- und Kompressionsversuche unter identischen versuchstechnischen Randbedingungen durchgeführt wurden, unterscheiden sich beide lediglich in dem Verhältnis ihrer drei Hauptspannungskomponenten, d. h. der Spannungsgeometrie bzw. Deformationsrichtung Extension vs. Kompression (Kap. 4). Insofern ist hierin die Ursache für den Standardbruchtypus des jeweiligen Beanspruchungsregimes zu suchen (Kap. 7).

3. Aus den Resultaten der Laborexperimente im Extensionsregime können eine Reihe von Faktoren, die das Trennbruchverhalten der untersuchten Gesteinsserien beeinflussen, abgeleitet werden (Kap. 6). Die unterschiedlichen Wesensmerkmale von Trennbruch- und Scherbruchverhalten werden neben ihren abweichenden Deformationsmustern besonders in Form der Spannungspfadabhängigkeit der Trennbruchfestigkeit und des unterschiedlichen

Minimalspannungseinflusses deutlich. Des Weiteren ist die erhebliche Festigkeit reduzierende Wirkung der Extensionsgeschwindigkeit des Trennbruchversagens zu nennen. Eine mögliche Festigkeitsreduzierung mit steigendem Feuchtegehalt ist für beide Bruchmechanismen festzustellen. Allerdings sind dabei die materialspezifischen Auswirkungen nicht zwangsläufig zwischen beiden Lastgeometrien übereinstimmend.

4. Innerhalb eines engen lithologischen Spektrums klastischer Gesteine sind signifikante Differenzen ihres Trennbruchverhaltens zu konstatieren. Der vergleichsweise graduelle Übergang der skalaren petrophysikalischen Eigenschaften und geomechanischen Standardkennwerte in einem begrenzten Wertebereich der vier Haupt-Lithotypen schlägt sich nicht in ihren Trennbruchfestigkeiten nieder (Kap. 4.4, 6.4 und 7.3). Sowohl im Hinblick auf die Festigkeit reduzierende Wirkung der abrupt-rapiden Axialentlastung als auch der kontinuierlichen, quasi-statischen Extension unterscheiden sich die Trennbruchfestigkeiten der Sandstein-Lithotypen deutlich von den konglomeratischen Probenserien. Offensichtlich gehen zunehmende Heterogenität und Korngröße mit abnehmenden Trennbruchfestigkeiten einher. Dies lässt sich mit Erfahrungen im Tunnelbau in Einklang bringen, wonach beispielsweise Strecken in grobkörnigen Kristallingesteinen mit vermehrten Abschalungen und Bergschlägen einhergehen im Vergleich zu feinkörnigeren (vgl. Kap. 2).

5. Die in Kap. 3.2 erläuterten theoretischen Ansätze zur Beschreibung der Splitting-Phänomene sind in der Lage, die Entstehung von Trennbrüchen unter allseitigen Druckspannungen prinzipiell zu erklären. So gehen die triaxialen Spannungszustände der Trennbruchbildung in der Spannungsgeometrie Extension tendenziell mit dem Vorhandensein von tatsächlich wirksamen, lokalen Zugspannungen oder kritischen Extensionsdehnungen konform (Kap. 7.2). Die Diversität der ermittelten Bruchspannungen bzw. bruchlosen Maximalbelastungen und Verformungen des Trennbruchverhaltens bzw. des Extensionsregimes der untersuchten Probenserien lässt sich mit ihnen jedoch nicht erfassen. Ein weiteres Defizit dieser Konzepte besteht in der fehlenden Aussagefähigkeit zum Zusammenhang von Spannungsgeometrie bzw. Versuchstechnik und bevorzugtem Bruchtypus.

Dagegen lässt sich ein komplexer Zusammenhang zwischen Makrobruchmechanismus und Mikrorissentwicklung in Abhängigkeit der Spannungsgeometrie ableiten. Die anisotrope Mikrorissinitiierung und -entwicklung, bevorzugt in der Ebene der größten und mittleren Hauptspannung, und die betragsmäßige Übereinstimmung dieser beiden Spannungsrichtungen im Extensionsfall des Triaxialversuchs werden als ursächlich für die hier festgestellte generelle Ausbildung von Trennbrüchen in diesem Beanspruchungsregime erachtet. Darüber hinaus ist zu schließen, dass hierin die Ursache für die erheblichen Unterschiede der Trennbruchfestigkeiten zwischen Sandstein- und Konglomeratvertretern im Gegensatz zu ihrem Kompressionsverhalten im Triaxialversuch liegt.

9 Literatur

- Alber, M. & Heiland, J. (2001a): Investigation of a limestone pillar failure - Part 1: Geology, laboratory testing and numerical modeling.- *Rock Mech. Rock Eng.* 34(3): 167-186.
- Alber, M. & Heiland, J. (2001b): Investigation of a limestone pillar failure - Part 2: Stress history and application of fracture mechanics approach.- *Rock Mech. Rock Eng.* 34(3): 187-199.
- Andreev, G. (1995): Brittle failure of rock materials: Test results and constitutive models.- Balkema, Rotterdam.
- ATG-AG (2004): Geschäftsbericht AlpTransit Gotthard AG.- AlpTransit Gotthard AG.
- Backers, T., Stanchits, S. & Dresen, G. (2005): Tensile fracture propagation and acoustic emission activity in sandstone: The effect of loading rate.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 42: 1094-1101.
- Bahat, D., Rabinovitch, A. & Frid, V. (2001): Fracture characterization of chalk in uniaxial and triaxial tests by rock mechanics, fractographic and electromagnetic radiation methods.- *J. Struc. Geol.* 23(10): 1531-1547.
- Bahat, D., Frid, V., Rabinovitch, A. & Palchik, V. (2002): Exploration via electromagnetic radiation and fractographic methods of fracture properties induced by compression in glass-ceramic.- *Int. J. Frac.* 116(2): 179-194.
- Bahat, D., Rabinovitch, A. & Frid, V. (2005): Tensile fracturing in rocks.- Springer, Berlin.
- Baria, R., Baumgärtner, J., Rummel, F., Pine, R. & Sato, Y. (1999): HDR / HWR reservoirs: concepts, understanding and creation.- *Geothermics* 28(4-5): 533-552.
- Bauch, E. (2005): Experimente zur Entstehung von Trennbrüchen im Festgestein.- In: Moser, M. (Ed.): 15. Tagg. Ingenieurgeol., 6. bis 9. April 2005, Erlangen: 13-18.
- Bauch, E. & Lempp, C. (2004): Rock splitting in the surrounds of underground openings: An experimental approach using triaxial extension tests.- In: Hack, R., Azzam, R. & Charlier, R. (Eds.): Engineering geology for Infrastructure planning in Europe.- LNES 104, Springer: 244-254.
- Baumgärtner, J. & Jung, R. (1999): Nutzung der Energie des tieferen Untergrundes - Nutzung trockener Formationen.- In: Kaltschmitt, M. et al. (Eds.): Energie aus Erdwärme.- Verl. Grundstoffind.: 155-174.
- Behrmann, L. & Elbel, J. (1991): Effect of perforations on fracture initiation.- *J. Petrol. Tech.* 5: 608-615.
- Bell, J. (1996): In situ stresses in sedimentary rocks - Measurement techniques.- *Geoscience Canada* 23(2): 85-100.
- Berghofer, K. (1998): Development and trends in hydraulic fracture stimulation of german Rotliegend gas wells.- *Europ. Petroleum Conf.*, 20-22.10.1998, Netherlands.
- Bieniawski, Z. & Hawkes, I. (1978): Suggested methods for determining tensile-strength of rock materials.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 15(3): 99-103.
- Bieniawski, Z. & Bernede, M. (1979a): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials - 1. Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 16(2): 137-138.
- Bieniawski, Z. & Bernede, M. (1979b): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials - 2. Suggested method for

- determining deformability of rock materials in uniaxial compression.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 16(2): 138-140.
- Blümel, M. (2000): Neue Laborversuchstechniken für felsmechanische Versuche.- DGGT (Ed.): *Proc. Eurock'2000 Symp.*, 27-31.03.2000, Aachen: 573-578.
- Borm, G. (2004): CO₂-Speicherung im Untergrund.- Kolloquium-Vortrag 29.11.04, Inst. Geolog. Wiss. Univ. Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- Borm, G., Lempp, C., Natau, O. & Röckel, T. (1989): Instabilities of borehole and drillcores in crystalline drillings, with examples from the ktb pilot hole.- *Scientific Drilling* 1(3): 105-114.
- Brace, W. (1964): Brittle fracture of rocks.- In: Judd, W. (Ed.): *State of the stress in the earth's crust.- Proc. Inter. Conf.*, Santa Monica (USA), 1963: 111-178.
- Brace, W., Paulding, B. & Scholz, C. (1966): Dilatancy in fracture of crystalline rocks.- *J. Geophys. Res.* 71(16): 3939-3953.
- Brady, B., Elbel, J., Mack, M., Morales, H., Nolte, K. & Poe, B. (1992): Cracking rock: Progress in fracture treatment design.- *Oilfield Review* 4(4): 4-17.
- Brady, B. & Brown, E. (2004): *Rock mechanics for underground mining.*- Kluwer, Dordrecht.
- Braun, R. & Jahns, E. (1998): Cracking and compaction behavior of sandstone.- *Proc. Eurock'98 Symp.*, Trondheim.
- Bräuner, G. (1991): *Gebirgsdruck und Gebirgsschläge.*- Glückauf Verl., Essen.
- Bridgman, P. (1912): Breaking tests under hydrostatic pressure and conditions of rupture.- *Phil. Mag.* 24: 63-80.
- Brown, E. & Trollope, D. (1967): The failure of linear brittle materials under effective tensile stress.- *Felsmechanik* 1: 229-241.
- Brückner, D., Lindert, A. & Wiedemann, M. (2004): Die Testkaverne Bernburg - eine Modellstudie zum Verschluss solegefüllter Kavernen.- In: Heinrich, F. & Klapperich, H. (Eds.): *Veröff. Inst. Geotechn. TU Freiberg*: 161-176.
- Brudy, M. & Zoback, M. (1999): Drilling-induced tensile wall-fractures: Implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36(2): 191-215.
- Burgert, W. & Lippmann, H. (1981): Models of translatory rock bursting in coal.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 18: 285-294.
- Cai, M. & Kaiser, P. (2005): Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model.- *Tunnelling and Underground Space Tech.* 20(4): 301-310.
- Cho, N., Martin, C. & Christiansson, R. (2002): Suppressing fracture growth around underground openings.- In: Hammah, R. (Ed.): *Proc. 5th North Am. Rock Mech. Symp. and 17th Tunnelling Ass. Canada Conf.*, NARMS-TAC 2002, Toronto, Canada, July 7-10, 2002: 130-138.
- Clark, J. (1949): A hydraulic process for increasing the productivity of wells.- *Transactions AIME* 186: 1-8.
- Conoco (1995): *Erdgas aus Kohlelagerstätten.*- Conoco Mineraloel GmbH, Hamburg.
- Cook, N., Hoek, E., Pretorius, J., Ortlepp, W. & Salamon, M. (1966): Rock Mechanics Applied To Study Of Rockbursts.- *J. South African Inst. Min. Metall.* 66(10): 436-528.
- Cook, P. (2006): Geoscience, society, energy and greenhouse.- *Z. dt. Ges. Geowiss.* 157(1): 9-16.
- Critescu, N. & Hunsche, U. (1998): *Time effects in rock mechanics.*- John Wiley & Sons, Chichester.

- Cuss, R., Rutter, E. & Holloway, R. (2003): Experimental observations of the mechanics of borehole failure in porous sandstone.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40(5): 747-761.
- Daemen, J. & Fairhurst, C. (1970): Influence of inelastic rock properties on stability of a wellbore.- *J. Petroleum Tech.* 22: 1053-1059.
- Davision, J., Freund, P. & Smith, A. (2001): Putting carbon back into the ground.- IEA Greenhouse Gas.
- de Beer, W. & Mendecki, A. (1998): Rockburst prediction - case studies using a kinematics of failure approach.- *J. South African Inst. Min. Metall.* 98(2): 65-73.
- DeVries, K., Mellegard, K. & Callahan, G. (2002): Salt damage criterion - Proof-of-concept research.- Final Report - Nat. Energy Techn. Labor., US Department of Energy.
- Diederichs, M. (2003): Rock fracture and collapse under low confinement conditions.- *Rock Mech. Rock Eng.* 36(5): 339-381.
- Diederichs, M., Kaiser, P. & Eberhardt, E. (2004): Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41(5): 785-812.
- Düsterloh, U. & Lux, K. (2007): Geomechanical investigations on the integrity of geological barriers with special regard to laboratory tests.- In: Wallner, M. et al. (Eds.): *The mechanical behavior of salt - Understanding of THMC processes in salt.*-Taylor & Francis: 3-8.
- Eberhardt E., Stead D., Stimpson B. & Lajtai E. (1998): The effect of neighbouring cracks on elliptical crack initiation and propagation in uniaxial and triaxial stress fields.- *Eng. Frac. Mech.* 59(2): 103-115.
- Eberhardt, E., Stimpson, B. & Stead, D. (1999): Effects of grain size on the initiation and propagation - Thresholds of stress-induced brittle fractures. *Rock Mech. Rock Eng.* 32(2): 81-99.
- Ehrl, E. & Schueler, S. (2000): Simulation of a tight gas reservoir with horizontal multifracted wells.- *SPE Europ. Petrol. Conf.*, 24-25.10.2000, Paris, France: 53-60.
- Eisbacher, G. (1996): Einführung in die Tektonik.- Enke, Stuttgart.
- Engelder, T. (1999): Transitional-tensile fracture propagation: A status report.- *J. Struc. Geol.* 21(8-9): 1049-1055.
- Engeser, B. (1996): Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland.- KTB Report, 95-3, NLFb, Hannover.
- Evans, K., Scholz, C. & Engelder, T. (1988): An analysis of horizontal fracture initiation during hydrofrac stress measurements in granite at North-Conway, New-Hampshire.- *Geophys. J. Oxford* 93(2): 251-264.
- Ewy, R. & Cook, N. (1990a): Deformation and fracture around cylindrical openings in rock - 1. Observations and analysis of deformations.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 27(5): 387-407.
- Ewy, R. & Cook, N. (1990b): Deformation and fracture around cylindrical openings in rock - 2. Initiation, growth and interaction of fractures.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 27(5): 409-427.
- Fairhurst, C. & Cook, N. (1966): The phenomenon of rock splitting parallel to a free surface under compressive stress.- *Proc. 1st Int. Congr. ISRM, Lisbon, LNEC* 1: 687-692.
- Fairhurst, C. & Hudson, J. (1999): Suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36(3): 281-289.

- Feit, G., Malinnikova, O., Zykov, V. & Rudakov, V. (2002): Prediction of rockburst and sudden outburst hazard on the basis of estimate of rock-mass energy.- J. Min. Sci. 38(1): 61-63.
- Fischedick, M. (2005): Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz.- Zwischenbericht Forschungsvorhaben BMU, Wuppertal.
- Fleischer, T., Grünwald, R., Oertel, D. & Paschen, H. (2000): Elemente einer Strategie für eine nachhaltige Energieversorgung.- TAB- Arbeitsbericht Nr. 69, ITAS, Karlsruhe.
- Franklin, J. (1979): Suggested methods for determining water-content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties - 1. Suggested methods for determining water-content, porosity, density, absorption and related properties.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 16(2): 143-151.
- Friedel, T., Behr, A., Voigt, H., Mtshedlishvili, G. & Häffner, F. (2002): Simulation des Produktionsverhaltens gefracrter Bohrungen in geringpermeablen Gaslagerstätten.- Tagungsbericht DGMK-Frühjahrstagung, 22-23.04.2002, Celle: 37-48.
- Fumagalli, E. (1966): Stability of arch dam rock abutments.- Proc. 1st Int. Congr. Rock Mech. 1: 503.
- Gaitzsch, B., Ellenberg, J., Lützner, H. & Benek, R. (1995): Stratigrafie des Rotliegend in Oberflächenaufschlüssen.- Plein, E. (Ed.): Norddeutsches Rotliegendbecken - Rotliegend-Monografie Teil II.- Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg 183: 84-96.
- Gaitzsch, B., Geissler, M., Göthel, M., Kopp, J. & Legler, B. (2004): Karbon und Rotliegend der Flechting-Roßlau-Scholle.- Schriftenreihe DGG 35: 150-164.
- Gaupp, R., Liermann, N. & Pusch, G. (2005): Adding value through integrated research to unlock the tight gas potential in the Rotliegendes formation of Northern Germany.- SPE Europ/EAGE Annual Conf., 13-16.06.2005, Madrid, Spain.
- Gimm, W. & Pforr, H. (1961): Gebirgsschläge im Kalibergbau unter Berücksichtigung von Erfahrungen des Kohle- und Erzbergbaus.- Freib. Forsch. H. A 173.
- Gramberg, J. (1965): The axial cleavage fracture - A significant process in mining and geology.- Eng. Geol. 1: 31.
- Grosse, K., Rummel, F. & Wagner, H. (2004): The Prometheus Project for geothermal heat supply of the Ruhr University Bochum.- Zeitsch. Angew. Geol. 2: 37-42.
- Gudehus, G. (1974): Einige gemeinsame Merkmale von Bruchvorgängen in überkonsolidierten Böden und Sedimentgesteinen.- In: Fecker, E. et al. (Eds.): Festschrift Leopold Müller-Salzburg zum 65. Geburtstag.- Karlsruhe: 57-65.
- Gudehus, G. (1996): Bodenmechanik.- In: Mehlhorn, G. (Ed.): Der Ingenieurbau - Grundwissen in 9 Bänden.- Bd. 2, Ernst & Sohn Verl.: 215-398.
- Guserle, S. & Lippmann, H. (1999): Künstlich erregte Schwingungen in Kohleflözen als Maßnahme zur Reduzierung der Gebirgsschlaggefahr.- Zeitsch. Angew. Math. Mech. 79(2): 501-502.
- Haimson, B. (1997): Borehole breakouts an core diskings as tools for estimating in situ stress in deep holes.- In: Sugawara, K. & Obara, Y. (Eds.): Rock stress.- Proc. Int. Symp., Kumamoto, Japan, 7-10.10.1997, Balkema: 35-42.
- Haimson, B. (2006): True triaxial stresses and the brittle fracture of rock.- Pure Appl. Geophys., 163: 1101-1130.
- Haimson, B. & Fairhurst, C. (1968): Hydraulic fracturing and its potential for determining in situ stresses at great depths.- Transactions - American Geophys. Union 49(1): 302

- Haimson, B. & Cornet, F. (2003): Suggested methods for rock stress estimation - Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and / or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF).- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 40(7-8): 1011-1020.
- Hallbauer, D., Wagner, H. & Cook, N. (1973): Some observations concerning microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 10(6): 713-726.
- Hecht, C. (2006): Bohrlochinstabilitäten, Ursachen und Wirkungen.- Vortragsreihe „Beiträge zur Geotechnik“, 25.01.2006, Inst. Geolog. Wiss. Univ. Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- Hecht, C., Boensch, C. & Bauch, E. (2005): Relations of rock structure and composition to petrophysical and geomechanical rock properties: Examples from Permian carboniferous red-beds.- Rock Mech. Rock Eng. 38(3): 197-216.
- Heiland, J. (2003): Permeability of triaxially compressed sandstone: Influence of deformation and strain-rate on permeability.- Pure and Applied Geophys. 160(5-6): 889-908.
- Heiland, J. & Raab, S. (2001): Experimental investigation of the influence of differential stress on permeability of a Lower Permian (Rotliegend) sandstone deformed in the brittle deformation field.- Physics and Chemistry of the Earth, Part a - Solid Earth and Geodesy 26(1-2): 33-38.
- Helmkamp, K. (2002): Schichtenverzeichnis Forschungsbohrung Lindau, 15.02.02.- unveröff. Bericht Fa. Piewak & Partner, Bayreuth.
- Hoek, E. (2000): Rock Engineering - Course notes by Evert Hoek.- www.rocscience.com
- Holditch, S. & Tschirhart, N. (2005): Optimal stimulation treatments in tight gas sands.- SPE Ann. Tech. Conf., 09-12.10.2005, Dallas, Texas.
- Holt, R. (1990): Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field.- SPE Formation Evaluation 5(4): 444-448.
- Holzhausen, G.R. & Johnson, A.M. (1979): Analyses of longitudinal splitting of uniaxially compressed rock cylinders.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 16(3): 163-177.
- Hoppe, M., Pusch, G., Blendinger, W., Meyn, R. & Sattler, C. (2003): Geologische und petrophysikalische Grenzparameter zur Definition der Produzierbarkeit geringpermeabler Gaslagerstätten.- Tagungsbericht DGMK-Frühjahrstagung, 28-29.04.2003, Celle: 67-76.
- Horii, H. & Nemat-Nasser, S. (1985): Compression-induced microcrack growth in brittle solids - Axial splitting and shear failure.- J. Geophys. Res. - Solid Earth and Planets 90(NB4): 3105-3125.
- Howard, G. & Fast, C. (1970): Hydraulic fracturing.- Monograph Series, SPE, Richardson.
- Hunsche, U. (1993): Strength of rock salt at low mean stress.- In: Wittke, W. (Ed.): Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech., Aachen, Germany, Sept. 1991: 163-166.
- Ishida, T. & Saito, T. (1995): Observation of core discing and in-situ stress measurements - Stress criteria causing core discing.- Rock Mech. Rock Eng. 28(3): 167-182.
- Jaeger, J. (1963): Extension failures in rocks subject to fluid pressure.- J. Geophys. Res. 68(21): 6066-6067.
- Jaeger, J. & Cook, N. (1963): Pinching-off and diking of rocks.- J. Geophys. Res. 68(6): 1759-1765.
- Jaeger, J. & Hoskins, E. (1966a): Rock failure under confined brazilian test.- J. Geophys. Res. 71(10): 2651-2659.

- Jaeger, J. & Hoskins, E. (1966b): Stresses and failure in rings of rock loaded in diametral tension or compression.- *Brit. J. Applied Phys.* 17(5): 685-692.
- Jaeger, J. & Cook, N. (1979): *Fundamentals of rock mechanics.*- Halsted, New York.
- Jung, R., Jatho, R. & Kehrer, P., Orzol, J. (2004): Das Geothermieprojekt GeneSys - Ergebnisse von massiven Wasserfrac-Tests im Buntsandstein des Norddeutschen Beckens.- *Tagungsbericht DGMK-Frühjahrstagung, 29.-30.04.2004, Celle:* 421-429.
- Junker, M. et al. (2006): *Gebirgsbeherrschung von Flözstrecken.*- Glückauf Verl., Essen.
- Kaga, N., Matsuki, K. & Sakaguchi, K. (2003): The in situ stress states associated with core discing estimated by analysis of principal tensile stress.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40(5): 653-665.
- Kaiser, P. & Tannant, D. (1999): Lessons learned for deep tunneling from rockburst experiences in minning.- Löw, S. & Wyss, R. (Eds.): *Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg.*- Balkema: 325-337.
- Kawakata, H. & Shimada, M. (2000): Theoretical approach to dependence of crack growth mechanism on confining pressure.- *Earth Planets and Space* 52(5): 315-320.
- Klaetsch, A. & Haimson, B. (2001): Grain bonding and its effect on borehole breakout formation and final shape.- Elsworth, D., Tinucci, J. & Heasley, K. (Eds.): *Rock mechanics in the national interest - 38th U.S. Rock Mech. Symp. Washington D.C., July 7-10 2001,* Balkema: 53-58.
- Kleditsch, O. & Kurze, M. (1993): Ergebnisse petrografischer Untersuchungen an Sandsteinen des tieferen Oberrotliegenden im Raum Altmark/ Westmecklenburg.- *Geol. Jb. A* 131: 141-178.
- Kolymbas, D. (2005): *Tunnelling and tunnel mechanics - A rational approach to tunnelling.*- Springer, Berlin.
- Kong, Y. (2000): *Mechanik des Bohrens in dreiaxig vorgespanntes brüchiges Material.*- VDI-Verl., Düsseldorf.
- Kovari, K., Tisa, A., Einstein, H. & Franklin, J. (1983): Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression - Revised version.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 20(6): 283-290.
- Kutter, H. & Rehse, H. (1996): Laboratory investigation of factors affecting borehole breakouts.- In: Barla, G. (Ed.) *Prediction and performance in rock mechanics and rock engineering.*- Proc. Eurock'96 Symp., Torino, Italy, Balkema: 751-758.
- Legarth, B., Huenges, E. & Zimmermann, G. (2005): Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 42(7-8): 1028-1041.
- Lempp, C. (1994): *Experimentelle Untersuchungen zur geomechanischen Wirkung von Gesteinsfluiden.*- Veröff. Inst. Bodenmech. & Felsmech. Univ. Karlsruhe 135.
- Lempp, C. & Mühlhaus, H. (1985): Splitting and core discing in deep boreholes.- 2nd Int. Symp. on Observation of the Continental Crust through Drilling: 94.
- Lempp, C. & Röckel, T. (1999): Bohrloch- und Bohrkern-Instabilitäten als Indikatoren des regionalen Spannungszustandes.- In: Lempp, C. & Reik, G. (Eds.): 12. Tagg. Ingenieurgeol., 12. bis 16. April 1999, Halle: 94-104.
- Lempp, C., Hecht, C., Röckel, T. (2007): Bohrlochstabilität als Schlüsselfaktor bei der Erschließung geothermischer Ressourcen.- In: Otto, F. (Ed.): 16. Tagg. Ingenieurgeol., 7. bis 10. März 2006, Bochum: 363-374.

- Lockner, D. (1995): Rock failure: In: Ahrens, T. (Ed.) Rock physics & phase relations - A handbook of physical constants.- AGU, Washington D.C.: 127-147.
- Lomo-Appeyh, G., Eberth, S. Lux, K. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen.- Gutachten im Auftrag des AkEnd (www.akend.de/aktuell/berichte/pdf/lux_b.pdf).
- Mandl, G. (2000) Faulting in brittle rocks - An introduction to the mechanics of tectonic faults.- Springer, Berlin.
- Manthei, G. (2005): Characterization of acoustic emission sources in a rock salt specimen under triaxial compression.- Bull. Seism. Soc. Am. 95(5): 1674-1700.
- Marschall, P., Horseman, S. & Gimmi, T. (2005): Characterisation of gas transport properties of the Opalinus Clay, a potential host rock formation for radioactive waste disposal.- Oil & Gas Sci. Techn. 60 (1): 121-139.
- Martin, C. (1997): Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on the brittle rock strength.- Can. Geotech. J., 34: 698-725.
- Martin, C. & Chandler, N. (1994): The progressive fracture of Lac du Bonnet granite.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31(6): 643-659.
- Mattauer, M. (1993): Strukturgeologie.- Enke, Stuttgart.
- May, F., Brune, S., Gerling, P. & Krull, P. (2003): Möglichkeiten zur untertägigen Speicherung von CO₂ in Deutschland - eine Bestandsaufnahme.- Glückauf Forsch. Hefte 64(4): 138-146.
- Mazurek, M, Pearson, F. Volckaert, G. & Bock, H. (2003): Features, events and processes evaluation catalogue for argillaceous media.- OECD NEA (www.nea.fr/html/rwm/clayclub.html)
- Mühlhaus, H. (1980): Berechnung von Gleichgewichtsverzweigungen kristalliner Gesteinskörper.- Veröff. Inst. Bodenmech. & Felsmech. Univ. Karlsruhe 85.
- Müller, W. (1990): Entspannungsverhalten triaxial belasteter Steinkohleproben beim Anbohren.- Glückauf Forsch. Hefte 51: 76-85.
- Mutschler, T. (2004): Nr. 1: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern.- Bautechnik 81(10): 825-834.
- Natau, O. (1995): Felsmechanik.- In: Mehlhorn, G. (Ed.): Der Ingenieurbau - Grundwissen in 9 Bänden.- Bd. 2, Ernst & Sohn Verl.: 521-563.
- Nemat-Nasser, S. & Horii, H. (1982): Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst.- J. Geophys. Res. 87(NB8): 6805-6821.
- Nicolas, A. (1986): Principles of rock deformation - Petrology and structural geology.- Kluwer, Dordrecht.
- Obert, L. & Stephenson, D. (1965): Stress conditions under which core discing occurs.- Soc. Min. Eng. Trans. 232: 227-235.
- Ortlepp, W. & Stacey, T. (1994): Rockburst mechanisms in tunnels and shafts.- Tunnelling and Underground Space Tech. 9(1): 59-65.
- Orzol, J., Jatho, R. & Jung, R., Kehrer, P., Tischner, T. (2004): The GeneSys Project - Development of concept for the extraction of heat from tight sedimentary rocks.- Zeitsch. Angew. Geol. 2: 17-23.
- Pahl, A. (1979): Nr. 2: Dreiaxiale Druckversuche an Gesteinsproben.- Bautechnik 56(7): 221-224

- Pahl, A. (1985): Nr. 10: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben - Spaltzugversuch.- Bautechnik 62(6): 197-199.
- Paschen, H., Oertel, D. & Grünwald, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland.- TAB - Arbeitsbericht Nr. 84, ITAS, Karlsruhe.
- Paterson, M. & Wong, T. (2005): Experimental rock deformation - The brittle field.- Springer, Berlin.
- Pinto da Cunha, A. (1993): Scale effects in rock masses 93.- Proc. Eurock'93 Symp., Lisbon.
- Plinninger, R., Wolski, K., Spaun, G., Thomée, B. & Schikora, K. (2003): Experimental and model studies on the modified tension test (MTT) - A new and simple testing method for direct tension tests.- Natau, O., Fecker, E. & Pimentel, E. (Eds.): Proc. Int. Symp. on Geotechn. Measurements and Modelling, 23-25.09.2003, Karlsruhe: 361-366.
- Popp, T., Kern, H. & Schulze, O. (2001): Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation.- J. Geophys. Res. 106(B3): 4061-4078.
- Popp, T., Wiedemann, M., Kansy, A. & Pusch, G. (2007): Gas transport in dry rock salt - implications from laboratory investigations and field studies.- In: Wallner, M. et al. (Eds.): The mechanical behavior of salt - Understanding of THMC processes in salt.- Taylor & Francis: 17-26.
- Rabinovitch, A., Frid, V., Bahat, D. & Goldbaum, J. (2003): Decay mechanism of fracture induced electromagnetic pulses.- J. Applied Phys. 93(9): 5085-5090.
- Ramsey, J. & Chester, F. (2004): Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture.- Nature 428(6978): 63-66.
- Reches, Z. & Lockner, D. (1994): Nucleation and growth of faults in brittle rocks.- J. Geophys. Res. - Solid Earth 99(B9): 18159-18173.
- Rehbock-Sander, M. & Gerdes, A. (2005): Gotthard Base Tunnel: Flat high-speed rail line through the Alps.- Tunneldagarna 29.-30.09.2005, Göteborg: 1-17.
- Röckel, T. (1996): Der Spannungszustand in der Erdkruste am Beispiel der Tiefbohrungen des KTB-Programms.- Veröff. Inst. Bodenmech. & Felsmech. Univ. Karlsruhe 137.
- Röckel, T. (2005): Auswertung von ausgewählten Bohrlochmessungen der Forschungsbohrung "Lindau" Oberfränkischer Buntsandsteinhorst.- Mitt. GLA Bayern: 1-43.
- Röckel, T. & Lempp, C. (2003): Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken.- Erdöl Erdgas Kohle 119(2): 73-80.
- Rowe, R. (2001): Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook.- Kluwer, Boston.
- Rummel, F. & Vanheerden, W. (1978): Suggested methods for determining sound-velocity.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 15(2): 53-58.
- Saarberg-AG (1994): Gasgewinnung im Saarland.- Saarbergwerke AG, Saarbrücken.
- Sahouryeh, E., Dyskin, A. & Germanovich, L. (2002): Crack growth under biaxial compression.- Eng. Frac. Mech. 69(18): 2187-2198.
- sBfV (2005): NEAT - Neue Eisenbahn-Alpentransversale.- Standbericht Nr. 18, Schweiz. Bundesamt f. Verkehr.
- Schlager, B. (2003): Frac-Stimulationen: Neueste technologische Fortschritte verdoppelten Erfolgsrate in Österreich.- Tagungsbericht DGMK-Frühjahrstagung, 28-29.04.2003, Celle: 395-402.

- Schmitt, D. & Zoback, M. (1992): Diminished pore pressure in low-porosity crystalline rock under tensional failure - Apparent strengthening by dilatancy.- J. Geophys. Res. - Solid Earth 97(B1): 273-288.
- Schneider, J., Rössler, R., Gaitzsch, B., Gebhardt, U., Kampe, A. & Breitzkreuz, C. (2005): Saale-Senke.- Stratigrafie von Deutschland V - Das Oberkarbon.- Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg 254: 419-440.
- Schonfel, H. & Fairhurst, C. (1970): Field experiments on hydraulic fracturing.- J. Petroleum Tech. 22: 1053
- Schulze, O. & Popp, T. (2002): Untersuchungen zum Dilatanzkriterium und zum Laugendruckkriterium für die Beurteilung der Integrität eines Endlagerbergwerks in einer Steinsalzformation.- Zeitsch. Angew. Geol. 2: 16-22
- Sieber, D. (2005): Tight Gas - Producing gas from extremely low permeable reservoirs.- Akad. Geowiss. Hannover Veröff.: 25: 63-65.
- Stacey, T. (1981): A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 18(6): 469-474.
- Stacey, T. (1982): Contribution to the mechanism of core dinking.- J. South African Inst. Min. and Metall. 82(9): 269-274.
- Stacey, T. & Jongh, C. (1977): Stress fracturing around a deep-level bored tunnel.- J. South African Inst. Min. and Metall. 78(5): 124-133.
- Stacey, T. & Page, C. (1986): Practical handbook for underground rock mechanics.- Trans Tech Publ., Clausthal-Zellerfeld.
- Stanchitis, S., Vinciguerra, S. & Dresen, G. (2006): Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite.- J. Pure and Applied Geophys. 163(5-6): 975-994.
- Stavrogin, A. & Tarasov, B. (2001): Experimental physics and rock mechanics - Results of laboratory studies.- Balkema.
- Tapponnier, P. & Brace, W. (1976): Development of stress-induced microcracks in westerly granite.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 13(4): 103-112.
- Tenzer, H. (2001): Development of Hot Dry Rock technology.- In: Popovski, K. & Scanner, B. (Eds.): Int. Geothermal Days, 21-22.09.2001, Bad Urach: 213-226.
- Tenzer, H. et al. (2004): Weiterentwicklung, Nachweis und Demonstration standort-unabhängiger HDR-Konzeptionen zur Strom- und Wärmegegewinnung aus heißen Tiefengesteinen unter Berücksichtigung geologischer, hydraulischer, technischer und wirtschaftlicher Verfahrens- und Anlagenparameter für Basisdaten einer HDR-Pilotanlage.- Forschungsbericht ZIP (BMU/PTJ 0327500).
- Thielemann, T. (2002): Kohleflözgas in Deutschland.- Commodity Top News 17: 1-4.
- Thomas, D. & Benson, S. (2005): Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations - Geologic storage with monitoring and verification.- Elsevier.
- Thuro, K. (2002): Geologisch- felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau.- Münch. Geolog. Hefte, Reihe B 18.
- Tischner, T. (2002): Forschungsbohrung Lindau: Stimulationsexperimente für die Erdwärmenutzung.- Zeitsch. Angew. Geol. 3: 20-21.
- Trautwein, U. & Huenges, E. (2005): Poroelastic behaviour of physical properties in Rotliegend sandstones under uniaxial strain.- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 42(7-8): 924-932.

- Vardoulakis, I. & Mühlhaus, H. (1986): Local rock surface instabilities.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 23(5): 379-383.
- Veatch, R. (1989): An overview of hydraulic fracturing.- *Recent advances in hydraulic fracturing*, Monograph Series, SPE, Richardson.
- Venet, V., Henry, J. & Fourmaintraux, D. (1993): Contribution to the optimizing of core drilling by modeling the initiation of discing.- *Revue De L Institut Francais Du Petrole* 48(1): 15-42.
- Vuilleumier, F. & Aeschbauch, M. (2004): The Lötschberg Base Tunnel - Lessons learned from the construction of the tunnel.- 1st Congr. Brasil. Tüneis e Estruturas Subterraneas, Soa Paulo, 1.-3.03.2004: 1-8.
- Vuilleumier, F. & Seingre, G. (2005): The example of AlpTransit Project Loetschberg base tunnel.- *ITA/AITES - Training Course Tunnel Engineering* 6.05.2005, Istanbul: 1-40.
- Wawersik, W. & Fairhurst, C. (1970): A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments.- *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 7: 561-575.
- Weidler, R. (2001): Hydraulic stimulation and seismic observation - The key for energy extraction from hot rocks.- In: Popovski, K. & Scanner, B. (Eds.): *Int. geothermal Days*, 21-22.09.2001, Bad Urach.
- Wong, R., Tang, C., Chau, K. & Lin, P. (2002): Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression.- *Eng. Frac. Mech.* 69(17): 1853-1871.
- Yi, X., Ong, S. & Russell, J. (2006): Quantifying the effect of rock strength criteria on minimum drilling mud weight prediction using polyaxial rock strength test data.- *Int. J. Geomech.*, 6 (4): 260-268
- Zhu, W. & Wong, T. (1997): The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Permeability evolution.- *J. Geophys. Res. - Solid Earth* 102(B2): 3027-3041.
- Zhu, W., Montesi, L. & Wong, T. (1997): Shear-enhanced compaction and permeability reduction: Triaxial extension tests on porous sandstone.- *Mech. Mat.* 25(3): 199-214.
- Zoback, M., Moos, D., Mastin, L. & Anderson, R. (1985): Well bore breakouts and in situ stress.- *J. Geophys. Res.* 90 (B7): 5523-5530.

Anhang

