

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Postaer Sandstein bei Zugbeanspruchung

The Strength and Deformation Behaviour of Posta Sandstone with Tensile Load

Lars Baumgarten¹

¹ Dipl.-Ing. Lars Baumgarten, Bad Salzungen, Geotechnik@Lars-Baumgarten.de

Zusammenfassung

Zur Lösung zahlreicher geotechnischer Problemstellungen werden Festigkeitskennwerte von Gesteinen benötigt. Für die Kennwertermittlung werden im Labor standardgemäß neben ein- und dreiaxialen Druckversuchen auch Untersuchungen zur Ermittlung der Zugfestigkeit vorgenommen. Aus versuchstechnischer Sicht ist die Durchführung direkter einaxialer Zugversuche vergleichsweise aufwendig, sodass indirekte Prüfverfahren, wie z. B. der Spalt- oder Biegezugversuch, häufigere Anwendung finden. Nachteilig hingegen ist, dass für das gleiche Gestein mit indirekten Zugprüfverfahren wesentlich größere Festigkeitswerte als im direkten Zugversuch ermittelt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden die im Rahmen eines Forschungsvorhabens an einem Sandstein der Sächsischen Schweiz gewonnenen Untersuchungsergebnisse direkter und indirekter Zugversuche vorgestellt. Die aus einaxialen Zug- und Druckversuchen abgeleiteten Verformungsmoduli werden miteinander verglichen. Das Problem der Zug-Druck-Steifigkeitsanisotropie von Gesteinen im Hinblick auf die im direkten und indirekten Versuch ermittelten Zugfestigkeiten wird diskutiert.

Schlüsselworte: Zugfestigkeit, Spannungs-Verformungs-Verhalten, Sandstein

Abstract

If geotechnical problems are supposed to be solved, specific strength values of rocks are required. In the laboratory uniaxial and triaxial as well as tensile tests are conducted along with standard experiments concerning the determination of rock strength. From an empirical point of view conducting direct uniaxial tensile tests is comparatively complex so that indirect test procedures as e.g. the Brazil test and the bending test are applied more frequently. It is, however, disadvantageous that considerably higher strength values could be gained for the same rocks by indirect tensile tests rather than by applying direct tensile tests. Without special knowledge of the qualities of the rocks examined a transmission of the specific strength values gained by means of tensile tests on the direct tensile strength turns out to be complicated.

Within the scope of a research project in the article submitted here the research results of direct and indirect tensile tests at a sandstone of the region of the Sächsische Schweiz (Saxony) are presented. During the direct tensile tests the stress axial strain behaviour was logged by means of strain gauges and LVDTs applied to the test specimens. The moduli of deformation derived from uniaxial tensile and compression are compared with each other. The problem of tensile-compression-rigidity anisotropy of rocks is discussed with regard to the tensile strength gained from direct and indirect tests.

Keywords: Tensile Strength, Stress-Strain-Behaviour, Sandstone

1 Beschreibung des Untersuchungsgesteins

Für die gesteinsmechanischen Untersuchungen wurde ein Postaer Sandstein (Oberturon, Schrammsteinschichten, Stufe C3 nach SLfUG 1993) aus der Elbtalzone Sachsens verwendet. Kriterien für die Auswahl dieses Gesteins waren dessen augenscheinliche Homogenität sowie die Verfügbarkeit dieses Sandsteins in ausreichender Menge. Die untersuchten Sandsteinproben stammen aus den Steinbrüchen Mühlleite nördlich der Ortslage Lohmen und Alte Poste zwischen den Ortslagen Mockethal und Dorf Wehlen. Der Sandstein aus dem Steinbruch Mühlleite wurde dem Lagerhorizont Bildhauerbank in Form eines einzelnen Großblockes entnommen. Die im Steinbruch Alte Poste gewon-

nenen Proben stammen aus verschiedenen Bereichen der ersten (obersten) im Steinbruch aufgeschlossenen Lagerbank.

Der *Bildhauersandstein* ist ein fein- bis mittelkörniger Quarzsandstein mit grauer bis gelblicher Grundfärbung. Mitunter weist der Sandstein vorzugsweise \pm parallel zum Lager verlaufende hellbraun gefärbte diffuse Bänder und Schlieren auf. Das Korngefüge des Sandsteins ist sehr gleichmäßig ausgebildet und lässt eine Schichtung nicht erkennen. Der *Sandstein der 1. Bank* ist ein mittelkörniger, schwach grobkörniger Quarzsandstein. Er weist eine gelbgraue bis hellbraune mitunter auch rostbraune Färbung sowie überwiegend parallel zum Lager verlaufende braun gefärbte Bänder und Schlieren auf. Zuweilen ist eine



Schichtung des Sandsteins durch eine vereinzelt auftretende Graduierung der Korngrößen erkennbar (siehe auch GRUNERT 1983). Die chemische Zusammensetzung ist mithilfe einer Röntgenphasenanalyse bestimmt worden. Die Sandsteine bestehen zu einem Massenanteil von etwa 97 % aus Quarz. Nachrangig treten in Porenräumen Kaolinit mit ca. 2 % und Ankerit mit ca. 1 % auf. Zur Klärung genetischer Fragestellungen wurde am Dünnschliff eine mikroskopische Kathodolumineszenzanalyse durchgeführt. Die Körner des Sandsteins bestehen zum großen Anteil aus

plutonischen Quarzen. Untergeordnet treten auch tektonisch überprägte Quarze auf. Die Körner sind stark miteinander verwachsen. Vielfach sind die Körner miteinander verzahnt, angelöst und durchdringen sich gegenseitig. Des Weiteren konnten authigene Quarze in Form von Anwachsäumen an den Körnern und versiegelten Porenräumen festgestellt werden. Bruchbahnen über mehrere Körner und Kornzertrümmerungen deuten auf eine offensichtlich tektonische Überprägung des Sandsteins hin.

Tab. 1: Belastungsfälle für die Festigkeitsprüfungen.

Tab. 1: Load Cases for the Strength Tests.

Einax. Druckversuch		Direkter Zugversuch		Spaltzugversuch		
ED1	ED2	DZ1	DZ2	SPZ1	SPZ2	SPZ3

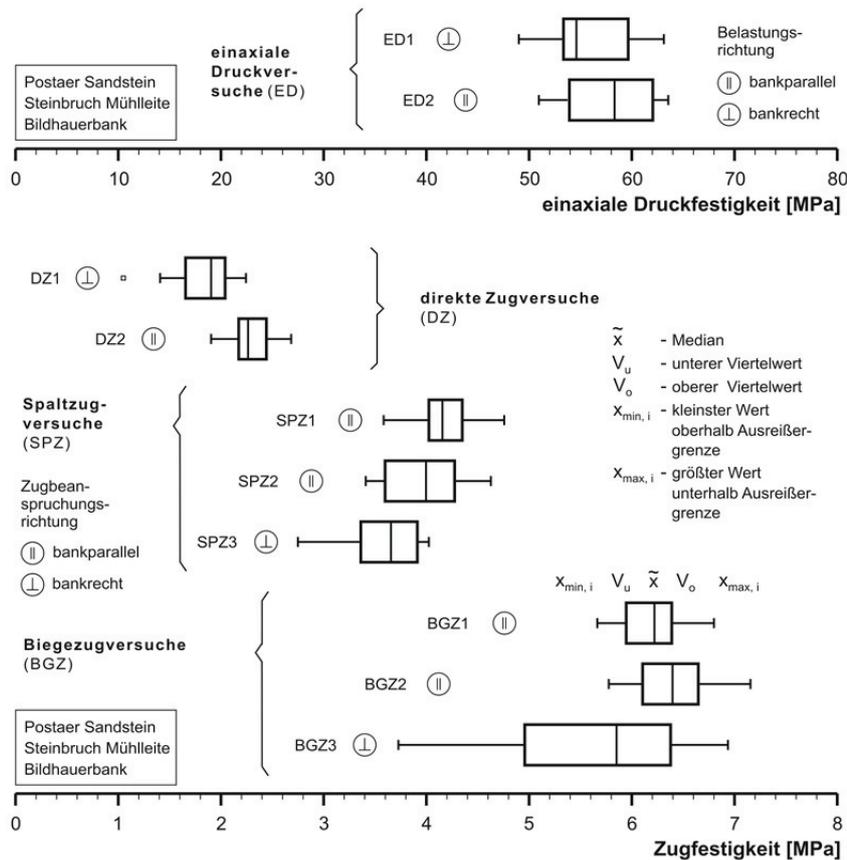
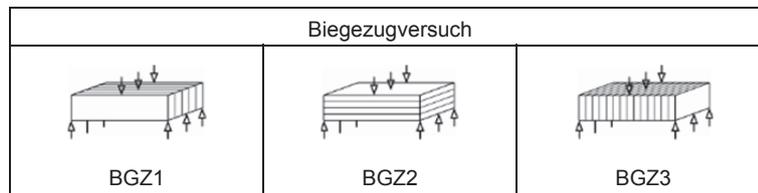


Abb. 1: Festigkeiten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsrichtung (Postaer Sandstein, Bildhauerbank).

Fig.1: Tensile Strengths depending on direction of load (Postaer Sandstone, Sculptor Layer).

2 Gegenüberstellung ermittelter Zugfestigkeitswerte

Die direkten Zugversuche wurden in Anlehnung an die ASTM D 2936-08 (2008) und die Empfehlung der ISRM (1978) durchgeführt. Als indirekte Zugprüfverfahren kamen Spaltzugversuche und Biegezugversuche zur Anwendung. Die Spaltzugversuche wurden entsprechend der Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 3.3- Versuchstechnik Fels der DGGT e. V. (2008) vorgenommen. Die Biegezugfestigkeiten wurden in Anlehnung an die DIN EN 12372 (2007) im Dreipunkt-Biegezugversuch bestimmt.

Aus den in Steinbrüchen gewonnenen Sandsteinblöcken wurden mittels wassergekühlter Diamantwerkzeuge Probekörper orientiert zur \pm horizontalen Lagerung der Bänke ausgebohrt und geschnitten. Die Festigkeit des Sandsteins ist in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung zur natürlichen Lagerung bestimmt worden. Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen sind in Form von Box-Plots in der Abb. 1 zusammengestellt.

Bei den Zugprüfungen wird eine Belastungsrichtung und eine Zugbeanspruchungsrichtung unterschieden. Die Belastungsrichtung beschreibt die Orientierung der von außen durch die Prüfvorrichtung in den Probekörper eingeleiteten Kraft. Die Zugbeanspruchungsrichtung gibt die Ausrichtung der im Probekörper während des Versuches entstehenden und zum Bruch führenden Zugspannung an. Beim direkten Zugversuch sind die Belastungsrichtung und die Zugbeanspruchungsrichtung identisch. Hingegen werden bei den indirekten Zugversuchen (Spalt- und Biegezugversuchen) die Probekörper senkrecht zur Belastungsrichtung bzw. senkrecht zur Belastungsebene durch eine Zugspannung beansprucht. Bei den Zugprüfungen sind die in der Tabelle 1 dargestellten Lastfälle unterschieden worden.

Direkte Zugversuche (DZ)

- DZ 1 – Belastungs- und Zugbeanspruchungsrichtung senkrecht zur Lagerung
- DZ 2 – Belastungs- und Zugbeanspruchungsrichtung parallel zur Lagerung

Spaltzug- und Biegezugversuche (SPZ, BGZ)

- SPZ 1, BGZ 1 – Belastungsrichtung und Zugbeanspruchungsrichtung parallel zur Lagerung
- SPZ 2, BGZ 2 – Belastungsrichtung senkrecht und Zugbeanspruchungsrichtung parallel zur Lagerung
- SPZ 3, BGZ 3 – Belastungsrichtung parallel und Zugbeanspruchungsrichtung senkrecht zur Lagerung

In der Abb. 1 sind für die beschriebenen Lastfälle die ermittelten Festigkeitswerte des Bildhauersandsteins zusammengestellt. Bei den Spalt- und Biegezugprüfungen konnten jeweils für die Lastfälle SPZ 1 und SPZ 2 sowie BGZ 1 und BGZ 2 keine deutlichen Unterschiede im Festigkeitsverhalten des Bildhauersandsteins festgestellt werden (Konfidenzniveau 95 %). Es bestehen keine signifikanten Abweichungen zwischen den Mittelwerten der Spaltzugfestigkeiten für die Lastfälle SPZ 1 und SPZ 2 (Zwei-Stichproben-t-Test, P-Wert: 0,09). Auch lassen die Stichproben-Standardabweichungen der Spaltzugfestigkeiten für diese

beiden Lastfälle keine signifikanten Unterschiede erkennen (F-Test, P-Wert: 0,31). Gleiches gilt für die Mittelwerte und Standardabweichungen der Biegezugfestigkeiten für die Lastfälle BGZ 1 und BGZ 2 (P-Wert für Zwei-Stichproben-t-Test: 0,07, P-Wert für F-Test: 0,36). Aus diesem Grund können die ermittelten Festigkeiten für die Lastfälle SPZ 1 und SPZ 2 sowie BGZ 1 und BGZ 2 mit Zugbeanspruchungsrichtungen parallel zur natürlichen Lagerung zusammengefasst werden.

Der Bildhauersandstein weist deutlich kleinere Festigkeiten für eine Zugbeanspruchungsrichtung senkrecht zur Lagerung als parallel dazu auf (vgl. Abb. 1). Bei den Spalt- und Biegezugversuchen bestehen unter Zugrundelegung eines Konfidenzniveaus von 95 % jeweils statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Festigkeitsmittelwerten für eine senkrecht (Lastfälle SPZ 3 und BGZ 3) und eine parallel (Lastfälle SPZ 1+2 und BGZ 1+2) zur Lagerung orientierte Zugbeanspruchung (Zwei-Stichproben-t-Tests, P-Wert für Spaltzugversuche: $< 0,01$, P-Wert für Biegezugversuche: 0,03). Weiterhin unterscheiden sich die Mediane der direkten Zugfestigkeiten für Beanspruchungsrichtungen senkrecht (Lastfall DZ 1) und parallel (Lastfall DZ 2) zur Lagerung signifikant voneinander (Mann-Whitney-(Wilcoxon)-Test, P-Wert $< 0,01$). Bei den direkten Zugversuchen konnte der t-Signifikanz-Test zum Vergleich der Mittelwerte nicht verwendet werden, da die für eine Beanspruchungsrichtung senkrecht zur Lagerung (Lastfall DZ 1) bestimmten Zugfestigkeitsmesswerte nicht normalverteilt sind. Aus diesem Grund wurde der nichtparametrische bzw. verteilungsfreie Mann-Whitney-(Wilcoxon)-Test zum Vergleich der Mediane herangezogen.

Die kleinsten Festigkeitswerte wurden für den untersuchten Bildhauersandstein im direkten einaxialen Zugversuch bestimmt. Die mittlere Spaltzugfestigkeit ist etwa zweimal größer als die mittlere direkte Zugfestigkeit. Die mittlere Biegezugfestigkeit beträgt ca. 300 % der durchschnittlichen, mittels direktem Zugversuch bestimmten Festigkeit (vgl. Abb. 1). Mit Ausnahme der im direkten Zugversuch senkrecht zur Lagerung bestimmten Festigkeitswerte sind die Messwerte für alle übrigen Zugprüfungen normalverteilt (P-Werte für Shapiro-Wilk-Tests: $\geq 0,22$ und standardisierte Schiefe und Wölbung der Stichprobendaten im Bereich -2 bis +2). Die größten Streuungen der Zugfestigkeiten treten bei einer Beanspruchungsrichtung senkrecht zur Lagerung auf.

3 Direkte einaxiale Zugversuche - Abgeleitete Verformungskenngrößen

Ausgewählte Axialspannungs-Längsdehnungs-Kennlinien des im direkten einaxialen Zugversuch untersuchten Sandsteins sind in den Abb. 2.1 bis 2.3 dargestellt. Zur Ermittlung der Längsdehnungen sind auf den Probekörpern Dehnungsmessstreifen (DMS) und ein LVDT-Wegaufnehmer (LVDT = Linear Variable Differential Transducer) befestigt worden. Für die Messung der Längsdehnungen mittels DMS wurden je Probekörper zwei aktive Messstreifen verwendet und mit zwei Widerständen zu einer Wheatstoneschen-Messbrücke ergänzt. Die Messstreifen sind jeweils in halber Probekörperhöhe und in einem (innerhalb der Probekörper-Querschnittsfläche gemessenen) Winkel von 180° zueinan-



der versetzt angeordnet worden. Der LVDT-Wegaufnehmer erfasste die Längenänderungen des Probekörpers nur entlang einer Messstrecke. Die aus den Messungen mit DMS und LVDT-Wegaufnehmer abgeleiteten Spannungs-Längsdehnungs-Kurven weisen Unterschiede auf. Die LVDT-Kurven sind durch einen sehr unruhigen Verlauf gekennzeichnet (vgl. Abb. 2.2). Offensichtlich haben sich die Vibrationen der Prüfmaschine auf den Wegaufnehmer übertragen und beeinflussten das Messsignal. Die Messwerte der DMS sind frei von solchen Einflüssen. Beim gleichzeitigen Einsatz beider Längenänderungs-Messsysteme am selben Probekörper sind mithilfe der DMS größere Anstiege der Spannungs-Dehnungs-Kurven als mit dem LVDT-Wegaufnehmer ermittelt worden (vgl. Abb. 2.2). Die Ursache hierfür wird in der besseren Ankopplung der DMS an den Probekörper gesehen. Für die Bestimmung der Verformungs- und Elastizitätsmoduli bei Zugbeanspruchung wurden die mittels DMS gemessenen Längsdehnungen verwendet.

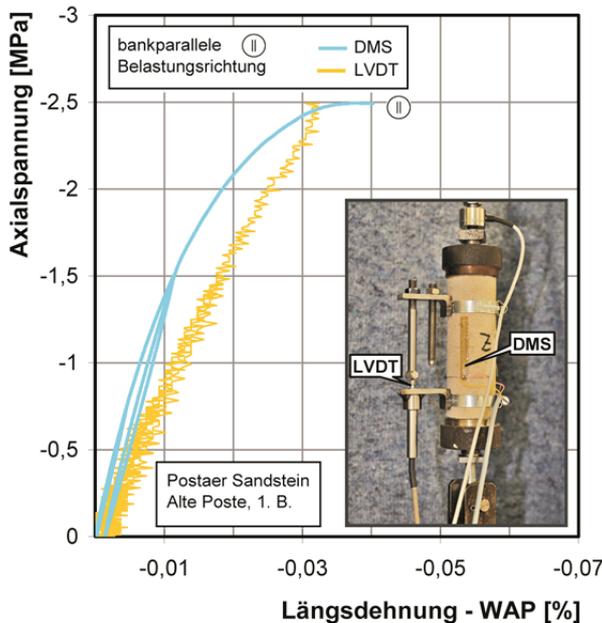


Abb. 2.2: Direkte Zugversuche – Axialspannungs-Längsdehnungs-Diagramme (Postaer Sandstein, 1. Bank).

Eine Zusammenstellung der aus den direkten Zugversuchen abgeleiteten Verformungs- und Elastizitätsmoduli enthält die Abb. 2.4. Die in den Versuchen vorgenommene zyklische Be- und Entlastung der Probekörper diente der Ermittlung der elastischen Eigenschaften. Aus den Sekantenanstiegen des Erstbelastungsastes der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie sind die Verformungsmoduli V in Spannungsbereichen von 40 - 60 % (V_{40-60}) bzw. 60 - 80 % (V_{60-80}) der Zugfestigkeit bestimmt worden. Die Elastizitätsmoduli E wurden als Sekantenmoduli im mittleren Bereich der Entlastungskurven der Ent- und Wiederbelastungszyklen mit einer Spannungsobergrenze von ca. 45 - 60 % ($E^{45...60}$) und ≥ 85 % ($E^{\geq 85}$) der Zugfestigkeit ermittelt (vgl. Abb. 2.1 und 2.3).

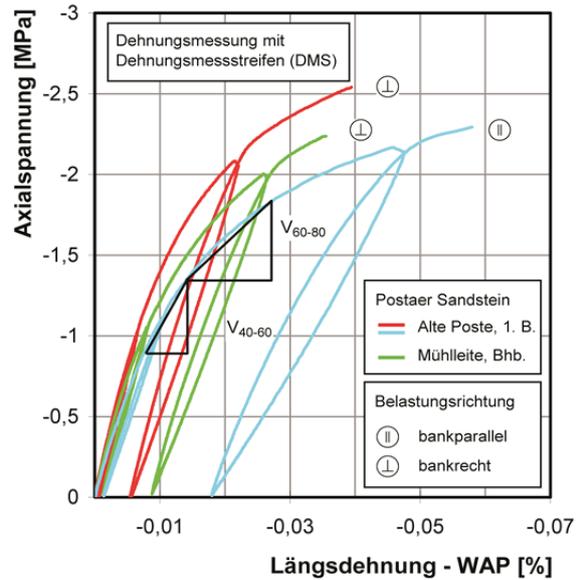


Abb. 2.1: Direkte Zugversuche – Axialspannungs-Längsdehnungs-Diagramme (Postaer Sandstein, 1. Bank und Bildhauerbank).

Der im Zugversuch senkrecht zur Lagerung bestimmte mittlere Verformungsmodul V_{40-60} beträgt für den Sandstein der 1. Bank 9,8 GPa. Bei einer Zugbeanspruchung des Sandsteins parallel zur Lagerung wurde ein im Mittel kleinerer Verformungsmodul V_{40-60} von 8,1 GPa abgeleitet. Mithilfe eines Zwei-Stichproben-t-Tests konnte für ein Konfidenzniveau von 95 % kein signifikanter Unterschied zwischen diesen Mittelwerten festgestellt werden (P-Wert: 0,06).

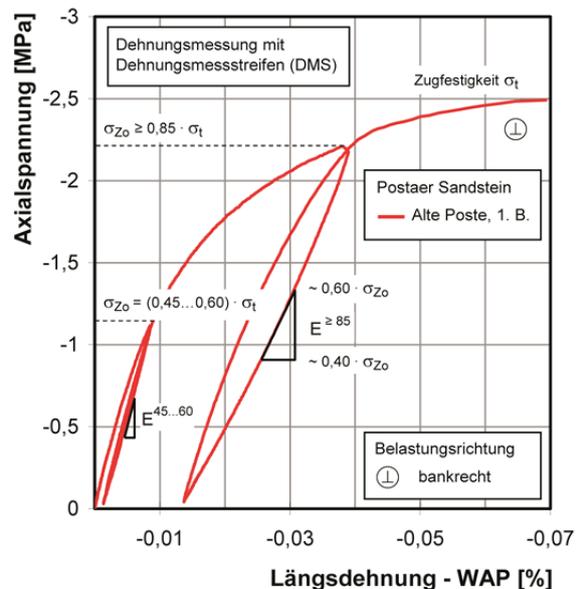


Abb. 2.3: Direkte Zugversuche – Axialspannungs-Längsdehnungs-Diagramme (Postaer Sandstein, 1. Bank).

Fig. 2.1-2.3: Direct Tension Tests – Axial Stress- Axial Strain – Diagrams (Posta Sandstone, First Layer and Sculptor Layer).

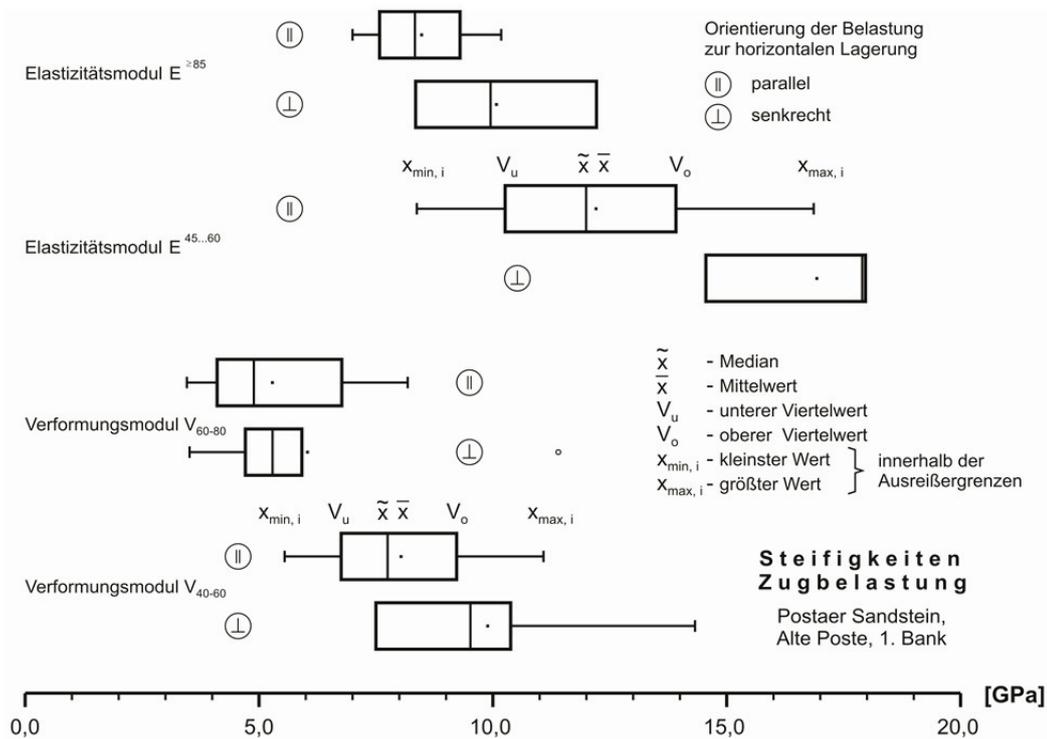


Abb. 2.4: Box-Plots für die Verformungs- und Elastizitätsmoduli bei Zugbeanspruchung (Postaer Sandstein, 1. Bank).

Fig. 2.4: Box-Plots for the Moduli of Deformation and Moduli of Elasticity in Tension (Posta Sandstone, First Layer).

Der mittlere Zug-Elastizitätsmodul $E^{45...60}$ des Sandsteins der 1. Bank beträgt senkrecht zur Lagerung 16,8 GPa. Parallel zur Lagerung wurde ein deutlich kleinerer mittlerer Zug-Elastizitätsmodul $E^{45...60}$ von 12,2 GPa bestimmt.

Mit Medianwerten $V_{60-80} = 5,3$ GPa und $E^{\geq 85} = 9,9$ GPa für eine Zugbelastung senkrecht zur Lagerung sowie $V_{60-80} = 4,9$ GPa und $E^{\geq 85} = 8,3$ GPa für eine Zugbelastung parallel zur Lagerung weist der Sandstein der 1. Bank keine signifikante Steifigkeitsanisotropie auf (P-Werte für Mann-Whitney-(Wilcoxon)-Tests $\geq 0,38$). Da die geforderte Bedingung der Normalverteilung des Untersuchungsmerkmals für die Modulwerte V_{60-80} und $E^{\geq 85}$ nicht gegeben ist sowie die betrachteten Stichprobenumfänge sehr klein sind, konnte der t-Test zum Vergleich der Stichprobenmittelwerte nicht angewandt werden. Aus diesem Grund wurde der nichtparametrische bzw. verteilungsfreie Mann-Whitney-(Wilcoxon)-Test zum Vergleich der Mediane herangezogen.

4 Gegenüberstellung der Verformungsmoduli für eine Zug- und Druckbelastung – das bimodulare Verhalten

Eine Gegenüberstellung ausgewählter Arbeitskurven direkter einaxialer Zug- und einaxialer Druckversuche enthält die Abb. 3.1. Die in der Abb. 3.1 dargestellten Kennlinien wurden für eine Belastungsrichtung senkrecht zur natürlichen Lagerung bestimmt. Im direkten einaxialen Zugversuch nimmt der Tangentenmodul für die Erstbelastung von Versuchsbeginn bis zum Bruch des Probekörpers kontinuierlich ab. Im einaxialen Druckversuch zeigt der Sandstein zu-

nächst bis ca. 40 % der einaxialen Druckfestigkeit eine Zunahme der am Erstbelastungsast bestimmten Tangentenmoduli danach aber eine Abnahme der Modulwerte bis zum Wert Null im Bereich des Spannungsmaximums. Unter Zugrundelegung gleichgroßer Dehnungsbeträge wurde das Verhältnis der Verformungsmoduli für eine Zug- und Druckbeanspruchung bestimmt (vgl. Abb. 3.2). Der Sandstein weist mit zunehmenden Längsdehnungsbeträgen kleinere Zug-Druck-Verformungsmodul-Verhältnisse auf. Die Kurve im Modulverhältnis-Längsdehnungs-Diagramm ist durch einen hyperbelförmigen Verlauf gekennzeichnet. Für kleine Längsdehnungsbeträge bis ca. $5 \cdot 10^{-3}$ % ist das Modul-Verhältnis ≥ 1 . Es nimmt mit steigenden Dehnungsbeträgen bis 0,05 % auf einen Wert von ca. $6 \cdot 10^{-2}$ ab. Für Längsdehnungen mit Beträgen $\leq 5 \cdot 10^{-3}$ % ist der im Zugversuch ermittelte Verformungsmodul größer als der Verformungsmodul bei Druckbelastung (Modul-Verhältnis > 1). Sehr wahrscheinlich ist dieses Ergebnis durch die im Zug- und Druckversuch verwendeten unterschiedlichen Längenänderungsmesssysteme bedingt. Während bei den direkten Zugversuchen die Längsdehnungen mittels auf dem Probekörpermantel aufgeklebter Dehnungsmessstreifen erfasst wurden, kamen bei den einaxialen Druckversuchen je Probekörper zwei mechanisch auf den Mantel geklemmte Längenänderungsmesssysteme zum Einsatz. Offensichtlich bewirkt der Kleber zur Befestigung der Dehnungsmessstreifen eine Vergütung der Probekörperoberfläche, welche sich besonders für kleine Längsdehnungsbeträge in einem unverhältnismäßig großen Zugverformungsmodul äußert.

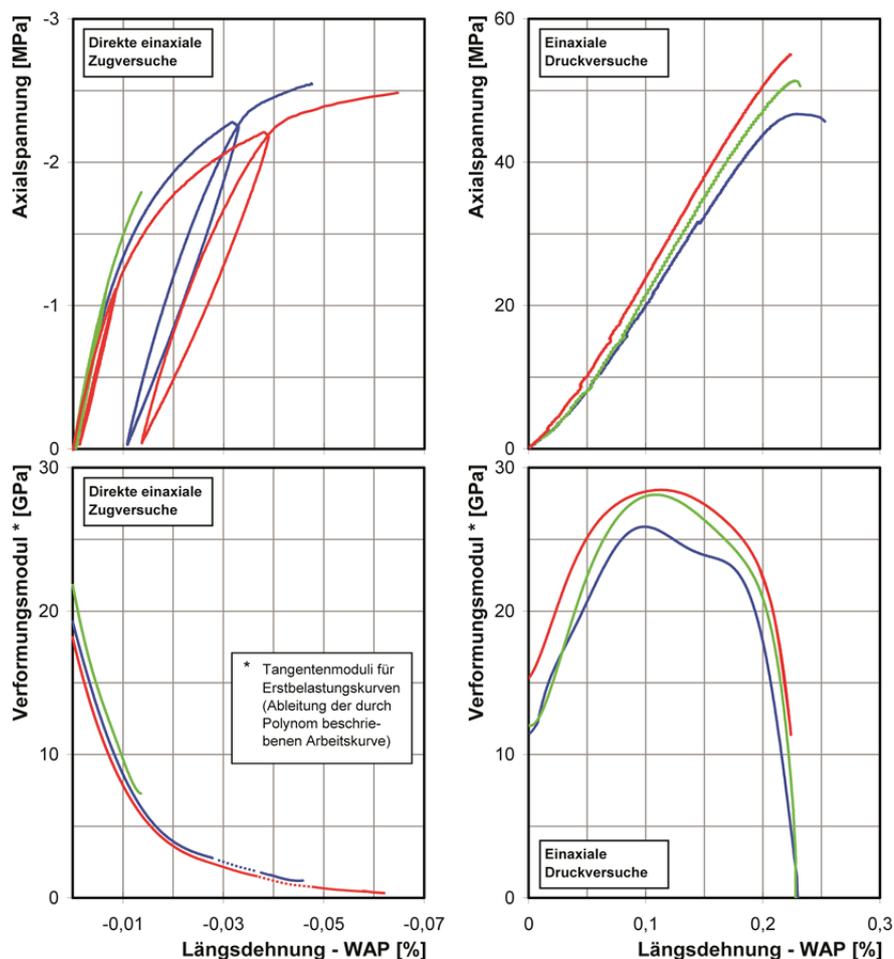


Abb. 3.1: Einaxiale Zug- und Druckversuche (Postaer Sandstein, 1. Bank, bankrechte Belastung) – Ausgewählte Spannungs-Dehnungs-Kennlinien, Verformungsmoduli in Abhängigkeit der Längsdehnung.

Fig. 3.1: Uniaxial Tension and Compression Tests (Posta Sandstone, First Layer, Load perpendicular to Layer) – Selected Stress-Strain-Curves, Moduli of Deformation depending on Axial Strain.

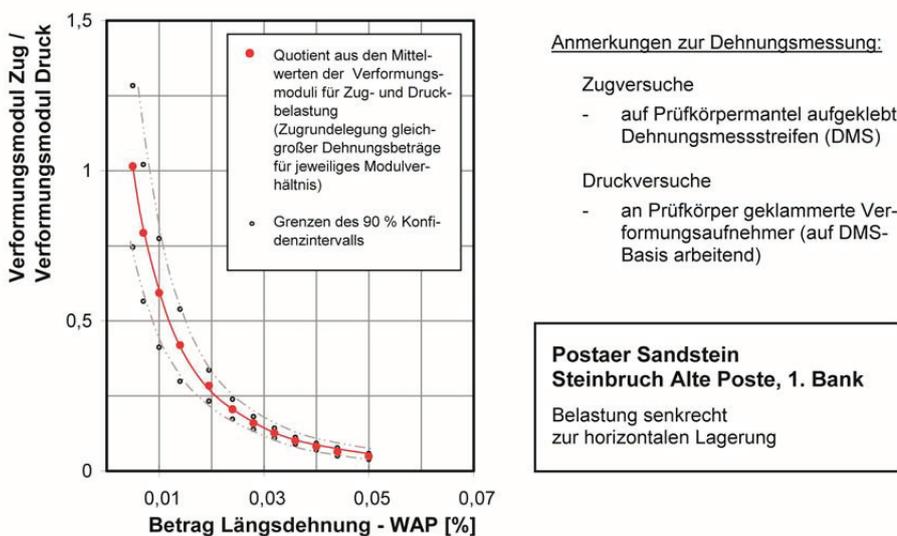


Abb. 3.2: Einaxiale Zug- und Druckversuche (Postaer Sandstein, 1. Bank, bankrechte Belastung) – Änderung des Verhältnisses zwischen Zug- und Druckmodul in Abhängigkeit der Längsdehnung.

Fig. 3.2: Uniaxial Tension and Compression Tests (Posta Sandstone, First Layer, Load perpendicular to Layer) – Change of Ratio between Tension and Compression Modulus depending on Axial Strain.

5 Ursachen für die Abweichung der mit verschiedenen Prüfverfahren ermittelten Zugfestigkeitswerte

CHEN & STIMPSON (1993) untersuchten den Einfluss einer Zug-Druck-Steifigkeitsanisotropie auf die mittels indirekter Prüfverfahren ermittelte Zugfestigkeit. Mit Hilfe analytischer und numerischer Berechnungen bestimmten sie in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Zug- und Druck-Elastizitätsmodul die im Spaltzugversuch in der Belastungsebene und im Biegezugversuch an der Unterseite der Probekörper auftretenden Zugspannungen. Die Ergebnisse werden in der Abb. 4 wiedergegeben.

Für abnehmende Zug-Druck-Modulverhältnisse k werden kleinere Zugspannungsbeträge $\sigma_{\text{norm.}}$ (normiert auf Zugspannungen für ein Modulverhältnis $k = 1$) ermittelt. Die standardgemäß im Spalt- und Biegezugversuch zur Bestimmung der Zugfestigkeit in Ansatz gebrachten Beziehungen gehen aber von gleichgroßen Elastizitätsmoduli für eine Zug- und Druckbeanspruchung aus. Für Gesteine mit einem Modulverhältnis $k < 1$ wird daher die Zugfestigkeit bei Verwendung der herkömmlichen in den entsprechenden Prüfvorschriften mitgeteilten Beziehungen überschätzt. Bei einem Zug-Druck-Modulverhältnis von $k = 0,5$ ist die wahre Zugfestigkeit ca. 15 % geringer, bei einem Verhältnis $k = 0,25$ beträgt der Fehler etwa 25 % (vgl. Abb. 4). Der untersuchte Postaer Sandstein weist eine Zug-Druck-Steifigkeitsanisotropie auf. Mit zunehmenden Längsdehnungsbeträgen wurden kleinere Zug-Druck-Verformungsmodul-Verhältnisse bestimmt.

Durch die Steifigkeitsanisotropie des Sandsteins allein kann aber der Unterschied zwischen den Festigkeitswerten direkter und indirekter Zugprüfverfahren nicht erklärt werden.

Im direkten einaxialen Zugversuch bildet sich der Bruch gewöhnlich an der Stelle aus, welche die geringste Zug-

festigkeit aufweist. Ausnahmen treten auf, wenn die Probekörperenden in Matrizen eingeklebt und dadurch die Zugspannungen nicht nur über die Stirnseiten sondern darüber hinaus auch noch über Bereiche der Mantelfläche in die Probekörper eingeleitet werden. Dies führt zu Kerbspannungen am Übergang Kleber-Probekörpermantel und sehr häufig zur Ausbildung von Zwangsbruchflächen im Bereich der Probekörperenden. Aus diesem Grund sind den Empfehlungen der ASTM D 2936-08 (2008) und der ISRM (1978) folgend nur die Stirnseiten der Probekörper mit den Stahlzugstücken verklebt worden. Hierdurch konnten sich die Brüche frei ausbilden und die Stellen mit den geringsten Zugfestigkeiten wurden erfasst.

Im Gegensatz zum direkten Zugversuch entstehen die Bruchflächen in Spalt- und Biegezugversuchen innerhalb (durch die Belastung der Probekörper) vorgegebener Bereiche und stellen somit Zwangsbruchflächen dar. Aus diesem Grund werden mittels Spalt- und Biegezugversuchen nicht vorrangig die Bereiche mit der geringsten Festigkeit erfasst, sodass in der Regel mit diesen Verfahren im Vergleich zum direkten Zugversuch höhere Festigkeitswerte ermittelt werden.

Im Rahmen der am Postaer Sandstein durchgeführten Zugversuche wurden für die Biegezugprüfungen bedingt durch die vergleichsweise geringe Querschnittsfläche der Probekörper von ca. 400 mm² die größten Festigkeitswerte erwartet. Allerdings zeigen Spaltzugversuche an Probekörpern mit verschiedenen großen Belastungs- bzw. Bruchflächen, dass beim Postaer Sandstein der Größeneffekt nicht sehr stark ausgeprägt ist. Deshalb kann die im Vergleich zur Spaltzugfestigkeit größere Biegezugfestigkeit des Sandsteins allein durch die relativ kleinen Querschnittsflächen der in den Biegezugversuchen verwendeten Probekörper nicht erklärt werden.

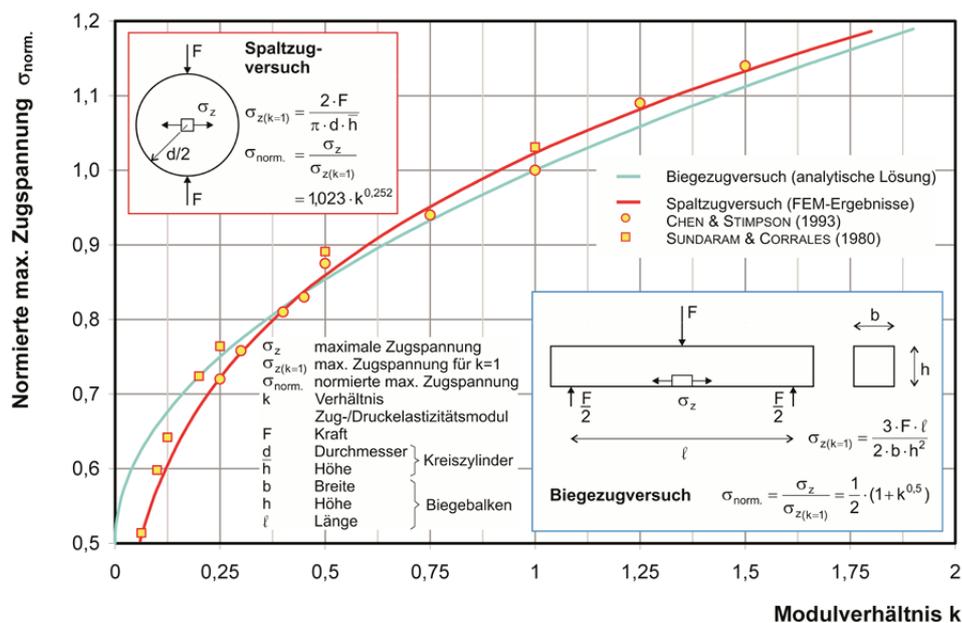


Abb. 4: Spalt- und Biegezugversuch – Beziehungen zwischen den Zugspannungen und dem Zug-Druck-Elastizitätsmodul-Verhältnis (Chen & Stimpson 1993)

Fig. 4: Brazil and Bending Test - Relations between Tensile Stresses and Tension-Compression-Modulus-Ratio (Chen & Stimpson 1993)



Im Allgemeinen sind die Unterschiede zwischen dem wirklich vorhandenen und dem nach technischer Biegelehre in Ansatz gebrachten Spannungszustand sehr gering. Lediglich wenn die Länge des Balkens klein im Verhältnis zu seiner Höhe ist, ergeben sich größere Unterschiede. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Biegezugversuche wurden Sandsteinprobekörper mit einem geringen Höhen-Längen-Verhältnis von 1/5 verwendet. Deshalb wird zunächst davon ausgegangen, dass zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit die theoretischen Lösungen der technischen Biegelehre angewendet werden können.

Eine vollständige Erklärung für den Unterschied zwischen den ermittelten Festigkeitswerten im Spaltzugversuch und im Biegezugversuch ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht möglich. Aus diesem Grund sollte die Übertragbarkeit der zur Ermittlung der Zugfestigkeit herangezogenen theoretischen Lösungen auf Gesteine kritisch überprüft werden.

Literatur

- CHEN, R. & STIMPSON, B. (1993): Interpretation of Indirect Tensile Strength Tests when Moduli of Deformation in Compression and in Tension are Different. - *Rock Mechanics & Rock Engineering*, **26/2**: 183-189.
- GRUNERT, S. (1983): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz als Naturressource, seine Eigenschaften, seine Gewinnung und Verwendung in der Vergangenheit und Gegenwart. 424 S. Dresden (TU, Habil.).
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE – SLfUG (1993): Geologische Karte der Sächsischen Schweiz. Geologische Regionalkarte Nr. 1, Maßstab 1:50.000.
- SUNDARAM, P. N. & CORRALES, J. M. (1980): Brazilian Tensile Strength of Rocks with Different Elastic Properties in Tension and Compression. - *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **17**: 131-133.