

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Mittelbach, Livia; Konietzky, Heinz; Baumgarten, Lars
Ultraschallmessungen bei Triaxialversuchen -
Laborversuche und numerische Simulation

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102561>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Mittelbach, Livia; Konietzky, Heinz; Baumgarten, Lars (2012): Ultraschallmessungen bei Triaxialversuchen - Laborversuche und numerische Simulation. In: BAWMitteilungen 95. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 71-78.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Ultraschallmessungen bei Triaxialversuchen – Laborversuche und numerische Simulation

Ultrasonic Wave Measurements during Triaxial Tests – Laboratory Tests and Numerical Simulation

Dipl.-Ing. Livia Mittelbach, Bundesanstalt für Wasserbau;

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky, Dipl.-Ing. Lars Baumgarten, TU Bergakademie Freiberg

Anhand einer Reihe von Einstufen- und Mehrstufen-Triaxialversuchen an Prüfkörpern aus Postaer Sandstein wurde die Aussagefähigkeit von Ultraschalllaufzeitmessungen hinsichtlich des Risszustandes im Gestein in dreiaxialen Kompressionsversuchen untersucht. Es zeigte sich, dass die Technik der Durchschallung mit P- und S-Wellen zur Beurteilung der zunehmenden Entfestigung des Prüfkörpers im Versuchsverlauf insbesondere bei der Durchführung von Mehrstufen-Triaxialversuchen nützlich ist. Die numerische Simulation der Ultraschalllaufzeitmessungen erfolgte an einem synthetischen Prüfkörpermodell mit dem Programm PFC3D. Die charakteristische Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeiten während eines Triaxialversuches aus dem Labor konnte durch die Simulationsergebnisse bestätigt werden.

A series of single stage and multistage triaxial tests was performed on specimens of Posta sandstone to investigate whether the results of ultrasonic transit time measurements carried out during such tests provide meaningful information on the extent of microcracking in rock. It was shown that the technique of performing ultrasonic scans with P and S waves is useful for assessing the progressive weakening of the specimens during the tests, in particular during multistage triaxial tests. The numerical simulation of the ultrasonic transit time was performed on a synthetic model of a specimen with the PFC3D software. The results of the simulation confirmed the characteristic development of the ultrasonic velocities measured during triaxial tests in the laboratory.

1 Einleitung *Introduction*

Der dreiaxiale Kompressionsversuch oder auch Triaxialversuch ist ein wichtiger Standardversuch zur Bestimmung von Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von Gesteinen. Bei der konventionellen Versuchsdurchführung wird ein zylinderförmiger Prüfkörper, der von einem konstanten Manteldruck umgeben ist, in Richtung seiner Längsachse durch eine vertikale Last bis zum Bruch belastet. Somit wird die Höchstfestigkeit des Gesteins in Abhängigkeit des seitlichen Begrenzungsdruckes bestimmt.

Neben der klassischen Versuchsvariante mit einer Manteldruckstufe entwickelten Kovári und Tisa Mitte der 1970er Jahre eine alternative Ausführungsvariante, bei der der Manteldruck auf den Prüfkörper kurz vor Eintreten des Bruches im Verlauf des Versuches mehrfach erhöht wird (Kovári und Tisa, 1975). Sie prägten dafür den Begriff der Triaxialversuche mit mehrfachen Bruchzuständen bzw. Mehrstufen-Triaxialversuche. Eine wesentliche Fragestellung bei dieser Versuchsmethode ist die zunehmende Entfestigung des Gesteinsmaterials mit steigender Anzahl an Versuchsstufen.

Da Ultraschallwellen empfindlich auf Risse, Hohlräume und Auflockerungen im Gestein reagieren, war es Ziel dieser Arbeit zu untersuchen, inwieweit die Technik der Ultraschalllaufzeitmessungen daher als Mittel zur Beurteilung des voranschreitenden Schädigungsprozesses im Gestein während eines Mehrstufen-Triaxialversuches geeignet ist.

Weiterhin wurde die numerische Simulation der Durchschallung mit Ultraschallwellen an einem Computermodell eines Prüfkörpers mit dem Programm PFC3D durchgeführt.

2 Mehrstufentriaxialversuchstechnik *Multistage triaxial test method*

Größter Vorteil der Mehrstufentriaxialversuchstechnik ist die Tatsache, dass ein einziger Versuch die Ergebnisse liefert, die sonst in mehreren Einzelversuchen an verschiedenen Prüfkörpern bestimmt werden müssten. Die Mohr'sche Bruchhüllkurve kann somit theoretisch mit nur einem Prüfkörper annähernd bestimmt werden. Dies hat eine geringere Anzahl an notwendigen Prüfkörpern zur Folge, was besonders dann wichtig ist, wenn zur Verfügung stehende Prüfkörperanzahl und Zeit oder Budget für das Versuchsprogramm begrenzt sind. Zudem vermeidet man das Problem der Parameterschwankungen durch die Verwendung mehrerer Prüfkörper.

Diesem Vorteil gegenüber stehen die erhöhten Anforderungen, die eine derartige Testmethode an die Versuchsdurchführung stellt. Im Wesentlichen lassen sich die Problemstellungen, die sich bei der Durchführung und Auswertung ergeben, in zwei Aspekte gliedern (Baumgarten 2006):

- **Abbruchpunkt:** Der Bruchprozess darf in der jeweiligen Versuchsstufe nur eingeleitet werden, es muss ein Totalversagen des Prüfkörpers verhindert werden. Daraus ergibt sich die Frage nach dem optimalen Abbruchpunkt, bei dem die aktuell laufende Versuchsstufe abgebrochen und mit der nächsten Versuchsstufe unter neuen Bedingungen fortgeführt wird.
- **Einfluss Entfestigung:** Der Prüfkörper erfährt mit steigender Anzahl an Versuchsstufen und damit mehreren eingeleiteten Bruchprozessen eine zu-

nehmende Entfestigung. Es ist unklar, inwiefern dadurch die Höchstfestigkeit beeinflusst wird bzw. ob die ermittelten Ergebnisse die Höchstfestigkeit des Gesteins für die jeweilige Manteldruckstufe noch repräsentieren.

Hinsichtlich der Durchführung von Mehrstufen-Triaxialversuchen existieren aktuell zwei Richtlinien. Es handelt sich dabei um die Empfehlung der „International Society for Rock Mechanics“ (ISRM 1983) und um die Empfehlung Nr. 12 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (heute Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., DGGT 1987). In diesen beiden Richtlinien werden unterschiedliche Spannungspfade für die Durchführung empfohlen.

Einerseits ist es möglich, den Manteldruck bei konstant gehaltener Axialspannung auf die nächste Stufe zu erhöhen (Variante ISRM, siehe Bild 1a). Andererseits kann nach Erreichen des Bruchzustandes eine Entlastungsphase zurück auf den ursprünglichen Manteldruck vorgenommen werden, um in der anschließenden isostatischen Phase Manteldruck und Axialspannung gleichmäßig auf die nächste Laststufe zu erhöhen (Variante DGGT, siehe Bild 1b). Daneben existieren noch weitere Abwandlungen mit konstanter Deviatorspannung (siehe Bild 1c), „sägezahnförmigem“ Spannungspfad (siehe Bild 1d) und absteigenden Manteldruckstufen.

Weiterhin gibt es zur Feststellung des Abbruchpunktes verschiedene Kriterien hinsichtlich der axialen, radialen oder volumetrischen Dehnung des Prüfkörpers. Die Durchführbarkeit und Aussagefähigkeit von Mehrstufen-Triaxialversuchen erweist sich in Abhängigkeit der untersuchten Gesteinsart dennoch meist als schwierig.

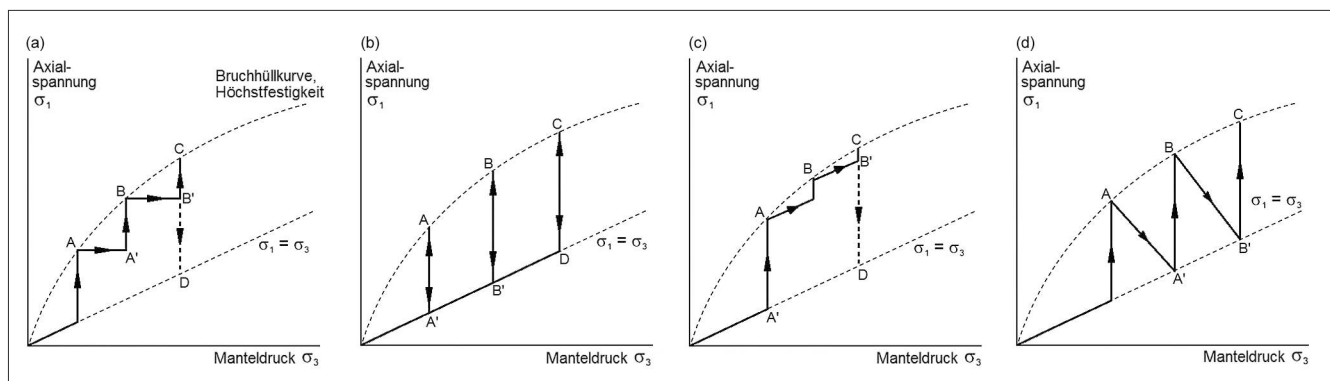


Bild 1: Varianten Spannungspfade (verändert nach ISRM 1983, Cain et al. 1987, Baumgarten 2006)

Figure 1: Different types of stress path (based on ISRM 1983, Cain et al. 1987, Baumgarten 2006)

3 Laborversuche *Laboratory tests*

Als Laborversuche wurden sowohl Einstufen- als auch Mehrstufen-Triaxialversuche an zylinderförmigen Prüfkörpern durchgeführt. Zur Untersuchung wurde Postaer Sandstein aus der Elbtalzone Sachsens verwendet. Dabei handelt es sich um ein sprödes Material mit 97% Quarzanteil, einer Rohdichte von $2,08 \text{ g/cm}^3$ und einem Porenanteil von 22% (Baumgarten 2006).

Die Ultraschallmessungen (Bestimmung der Wellenlaufzeit der P- und S-Welle) in Prüfkörperlängsrichtung erfolgten im Minutentakt. Außerdem wurden während der Versuche Axiallast, Manteldruck und Längs- und Querverformung am Prüfkörper registriert. Bild 2a zeigt einen in die Triaxialprüfzelle eingebauten Prüfkörper vor dem Versuch und einen Prüfkörper mit typischem Scherbruch nach einem Triaxialversuch.

Bei den Mehrstufenversuchen kamen die Spannungspfade nach ISRM und DGGT sowie der sägezahnförmige Spannungspfad zur Anwendung. Der Abbruchpunkt zum Übergang auf die nächstfolgende Manteldruckstufe wurde anhand der Prüfkörperquerdehnung bestimmt.

4 Numerische Simulation *Numerical simulation*

Die numerische Simulation der Ultraschalllaufzeitmessungen wurde mit dem Programm PFC3D durchgeführt (Itasca 2005).

Am Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau, wurden von Herrn Dipl.-Ing. Baumgarten und Prof. Dr.-Ing. habil. Konietzky verschiedene Computermodelle eines zylindrischen Sandstein-

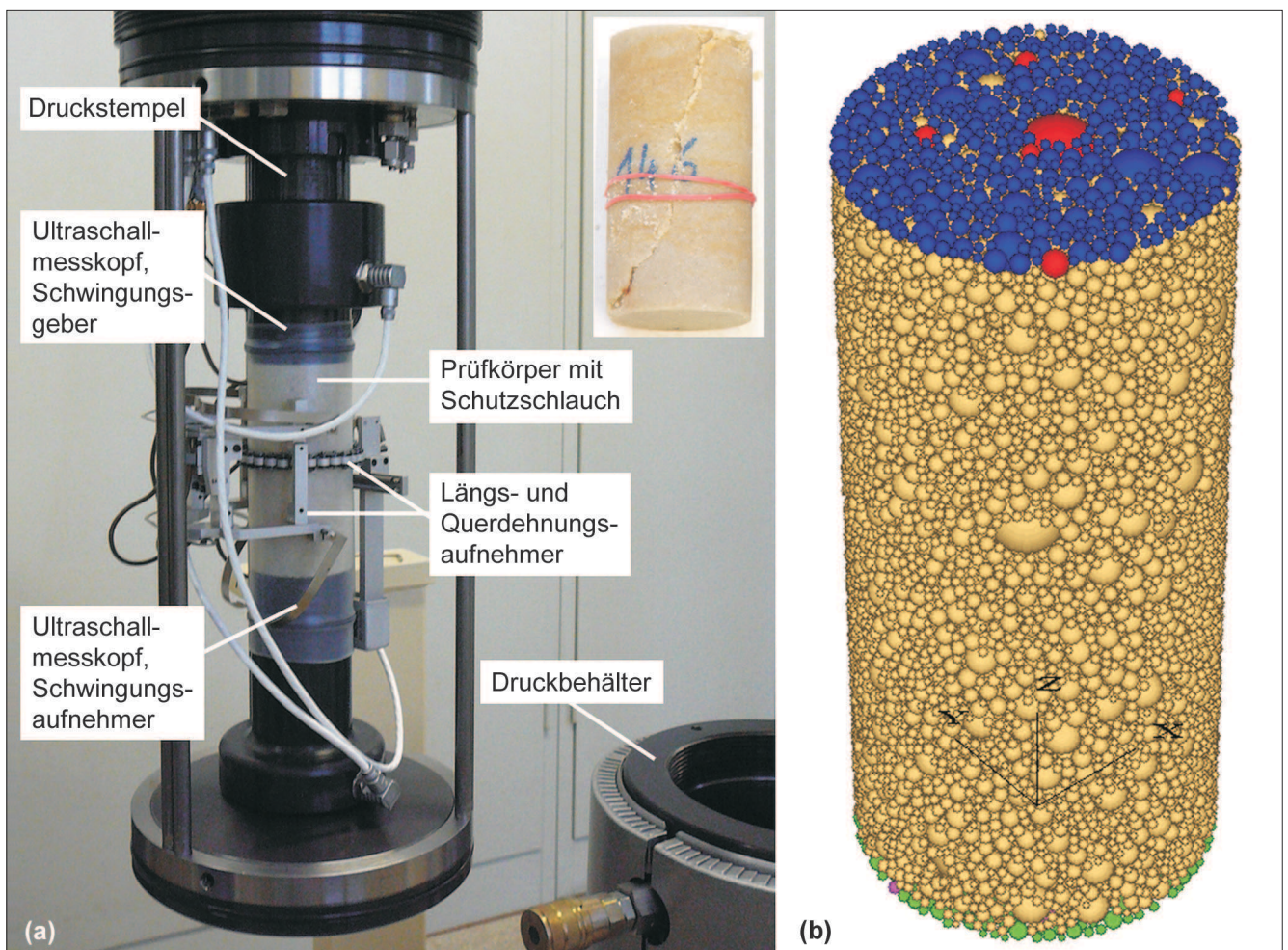


Bild 2: Triaxialprüfzelle mit Prüfkörper, Prüfkörper mit Scherbruch, Prüfkörpermodell PFC3D
Figure 2: Triaxial test cell with specimen, specimen with shear fracture and PFC3D specimen model

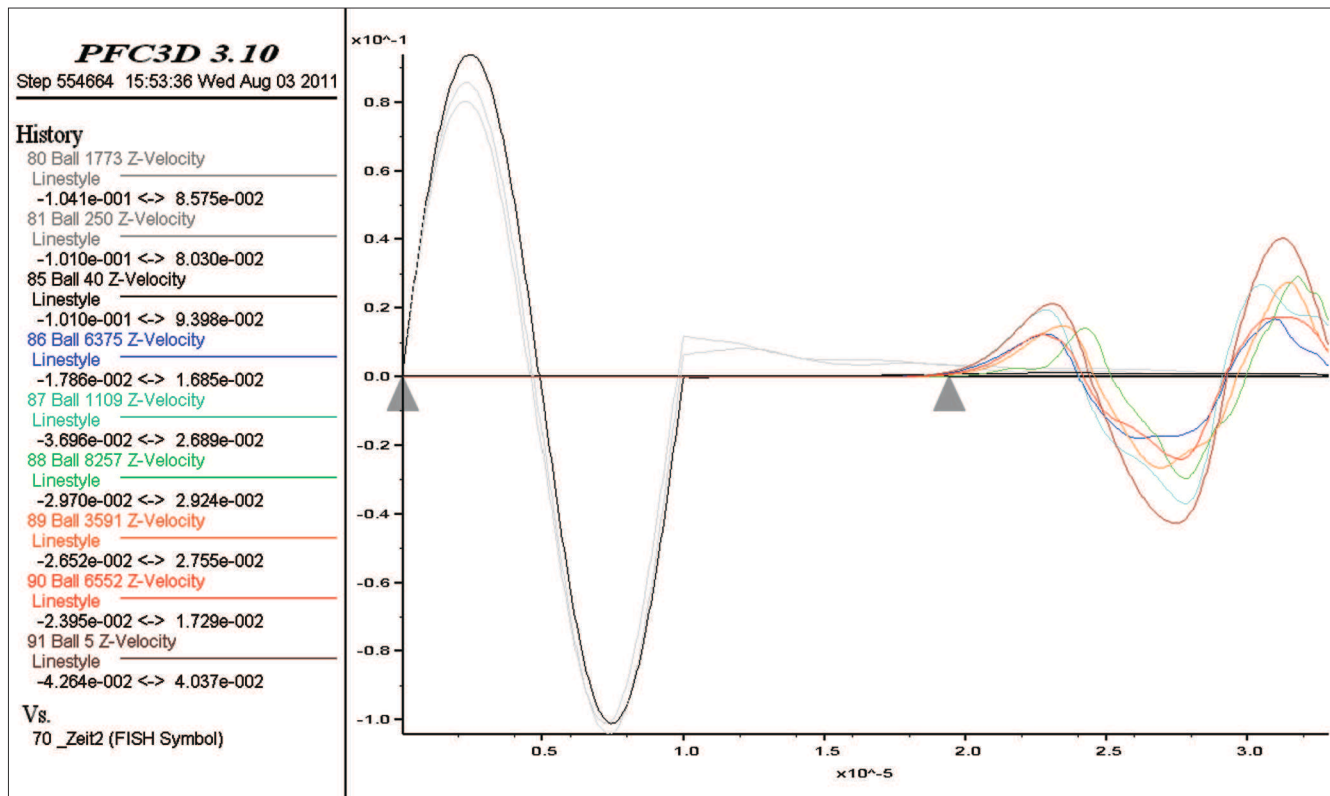


Bild 3: Wellenbild PFC3D (Bsp. P-Welle, Versuch bei 40 MPa)
 Figure 3: PFC3D wave pattern (example: P wave, test performed at 40 MPa)

prüfkörpers zur numerischen Simulation von dreiaxialen Druckversuchen entwickelt (Baumgarten und Konietzky 2010). An den verschiedenen synthetischen Prüfkörpern wurden Einstufen-Triaxialversuche bei Manteldrücken von 10, 20, 30 und 40 MPa simuliert.

Das Modell des Prüfkörpers wurde entsprechend den Eigenschaften des Postaer Sandsteins erstellt. So entspricht die Verteilung der Partikelgröße im Modell der realen Korngrößenverteilung, allerdings mit in einen größeren Bereich verschobenen Durchmessern, um den Rechenaufwand zu verringern.

Die einzelnen Partikel werden zur Übertragung von Kräften an den jeweiligen Kontaktpunkten miteinander verbunden. Das Kontakt-Modell, welches dazu in diesem Fall gewählt wurde, sind sogenannte „parallel bonds“. Die Materialeigenschaften des Sandsteins wie Festigkeit und Steifigkeit (E-Modul) werden über die entsprechende Wahl der Modellparameter für Partikel und Partikelkontakte umgesetzt. Eine genaue Beschreibung der entwickelten Prüfkörpermodelle findet sich in Baumgarten (2006) und Baumgarten und Konietzky (2010).

Ein Modell aus kugelförmigen Einzelpartikeln („Ball-Modell“) bildete die Grundlage für die durchgeführte numerische Simulation der Ultraschalllaufzeitmessungen (siehe Bild 2b). Dazu wurde für verschiedene gespeicherte Zwischenzustände des Einstufen-Triaxialversuches an den Partikeln im oberen Bereich des Prüfkörpermodells (blau bzw. rot markiert) eine Schwingung aufgegeben, die sich im Modell ausbreitet. Zur Simulation der P-Welle wurde die Schwingung in z-Richtung angeregt, zur Simulation der S-Welle in x-Richtung. An den Partikeln im unteren Bereich des Modells (grün markiert) wird das Einsetzen der Schwingung registriert. So kann im aufgezeichneten Wellenbild anhand des Abstandes von aufgegebener Schwingung oben zum Ersteinsatz der Welle unten die Wellenlaufzeit abgelesen werden (siehe Bild 3). Zusammen mit der Prüfkörperlänge wird daraus die Wellengeschwindigkeit errechnet. Die Stauchung des Prüfkörpers im Verlauf des Versuches wurde wie auch bei den Laborversuchen berücksichtigt.

5 Ergebnisse Results

Um den Zusammenhang zwischen Ultraschalllaufzeiten und dem jeweiligen aktuellen Belastungszustand im Prüfkörper zu verdeutlichen, werden diese zusammen mit der Spannungs-Dehnungs-Linie des Prüfkörpers dargestellt. Die registrierten Laufzeiten werden dazu in P- bzw. S-Wellengeschwindigkeiten umgerechnet und die prozentuale Änderung der Wellengeschwindigkeit bezogen auf den Beginn der deviatorischen Phase über der axialen Dehnung aufgetragen.

Die Wellenlaufzeiten zeigten sowohl bei den Einstufenversuchen (siehe Bild 4) als auch im Verlauf der einzelnen Versuchsstufen der Mehrstufenversuche (siehe Bild 5) einen charakteristischen Verlauf.

In der isostatischen und anfänglichen deviatorischen Phase werden im Gestein vorhandene Mikrorisse und Poren in allen Richtungen elastisch zusammengedrückt und geschlossen, was einen gleichmäßigen Anstieg beider Wellengeschwindigkeiten zur Folge hat. Bei weiterer Steigerung der Axiallasten erreichen zunächst die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der S-Welle und dann die der P-Welle ihr Maximum und nehmen danach

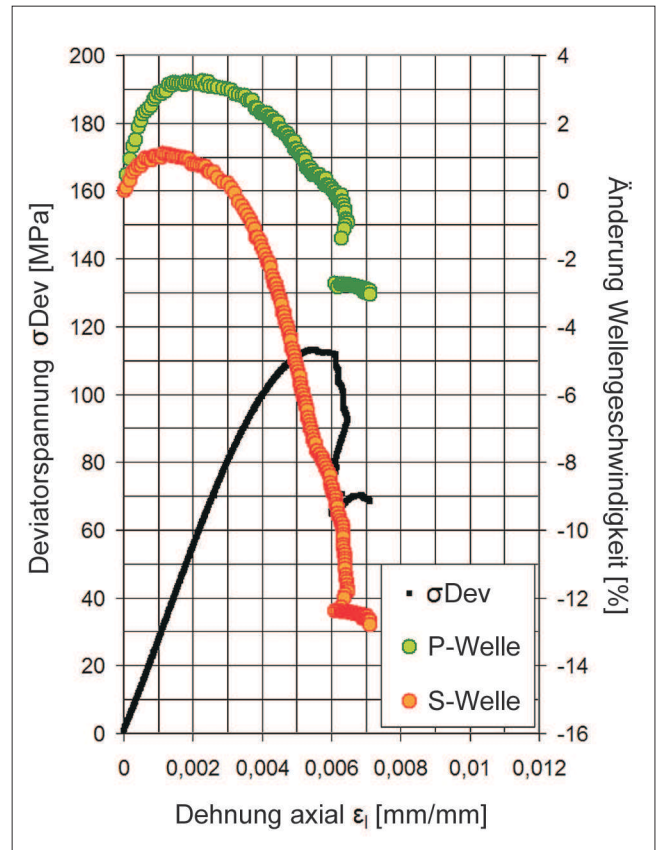


Bild 4: Verlauf der P- und S-Wellengeschwindigkeit, Einstufen-Triaxialversuch bei 10 MPa

Figure 4: Changes in the velocity of P and S waves, single stage triaxial test performed at 10 MPa

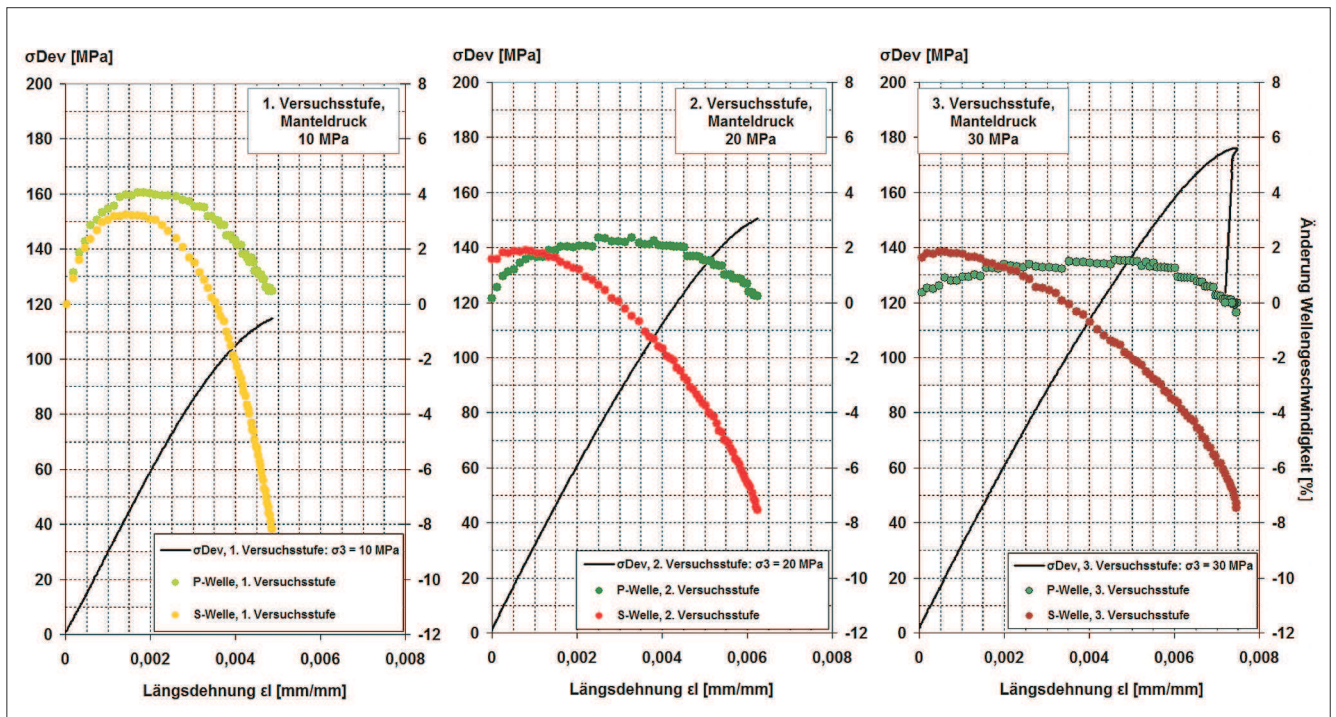


Bild 5: Verlauf der P- und S-Wellengeschwindigkeit, Mehrstufen-Triaxialversuch

Figure 5: Changes in the velocity of P and S waves, multistage triaxial test

bis zum Ende des Versuches bzw. der Versuchsstufe wieder gleichmäßig ab, während die Spannungs-Dehnungs-Linie noch einen linearen Verlauf zeigt. Dies ist ein Anzeichen der Neubildung und Vereinigung von Mikrorissen im Prüfkörper durch die steigende Spannungsdifferenz lange vor dem Erreichen der maximalen Festigkeit.

Der unterschiedliche Verlauf der P- und S-Welle lässt Rückschlüsse auf die Orientierung der Mikrorisse im Gestein zu. Die P-Welle reagiert hauptsächlich auf Risse senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung, die S-Welle ist dagegen empfindlich gegenüber Rissen, die parallel zu ihrer Ausbreitungsrichtung stehen. Die Prüfkörper wurden in den hier durchgeführten Versuchen entlang ihrer Längsachse durchschallt, d. h. die Entwicklung der P-Welle fungiert in diesem Fall als Indikator für Risse in radialer Richtung (horizontal, senkrecht zur Prüfkörperlängsachse), die S-Welle hauptsächlich als Indikator für Risse in axialer Richtung (vertikal, parallel zur Prüfkörperlängsachse). Ein stärkerer Anstieg der P-Wellengeschwindigkeit zu Beginn einer Versuchsstufe zeugt dabei von einer stärkeren Zusammendrückung der bestehenden Mikrorisse senkrecht zur Richtung der maximalen Druckspannung (siehe Bild 6a). Ein steilerer Abfall der S-Wellengeschwindigkeit in der Phase der Mikrorissbildung und -ausbreitung weist wiederum darauf hin, dass sich Risse hauptsächlich in Richtung der maximalen Druckspannung, also senkrecht, ausbreiten (siehe Bild 6b).

Bei den Mehrstufen-Triaxialversuchen ließ sich eine bestehende Vorschädigung des Prüfkörpers durch vorangegangene Versuchsstufen anhand der Ultraschalllaufzeitmessungen nachweisen, indem sich die beginnende Abnahme der S-Wellengeschwindigkeit bei den letzteren Versuchsstufen deutlich weiter nach vorn verlagert.

Hinsichtlich des Einflusses des Spannungspfades konnten keine eindeutigen Rückschlüsse aus den Ultraschallgeschwindigkeiten gezogen werden. Trotz unterschiedlicher gewählter Spannungspfade war der Verlauf der Wellengeschwindigkeiten in den einzelnen Versuchsphasen der Mehrstufen-Triaxialversuche immer gleichartig.

Die Ableitung eines Abbruchkriteriums für die Mehrstufen-Triaxialversuche aus den Ultraschalllaufzeitmes-

sungen war ebenfalls nicht möglich, da die tendenzielle Entwicklung beider Geschwindigkeiten zwar immer ähnlich ist, sich die Ergebnisse in konkreten Anhaltspunkten (z.B. Erreichen des Maximums bezogen auf maximale Spannung, Betrag der prozentualen Zunahme oder Abnahme) jedoch stark unterscheiden.

Bei der numerischen Simulation der Ultraschalllaufzeitmessungen zeigt sich, wie in Bild 7 zu sehen ist, die gleiche Tendenz wie bei den Laborversuchen: eine Zunahme am Beginn der deviatorischen Phase – wenn auch sehr gering – und anschließende Abnahme der Wellengeschwindigkeit durch im Prüfkörper entstehende Schädigungen.

Die Absolutwerte für die ermittelten Ultraschalllaufzeiten in der numerischen Simulation liegen jedoch unter den Ergebnissen der Laborversuche. Dies ist besonders deutlich am Beispiel der S-Welle zu sehen (siehe Tabelle 1). Die Wellenausbreitung findet demzufolge im Computermodell des Prüfkörpers viel schneller statt als im realen Sandsteinprüfkörper.

Diese Unterschiede sind zum Teil vermutlich durch die Gegebenheiten des Modells zu begründen. So sind bspw. die Partikel im Modell ideal kugelförmig, Reibungskoeffizient und Steifigkeiten der Partikelkontakte sind konstant. Außerdem wurde die Kornverteilungskurve des Computermodells in einen Bereich mit größeren Durchmessern verschoben. Dadurch besteht das Modell aus erheblich weniger Einzelpartikeln, als ein vergleichbarer realer Sandsteinprüfkörper. Bei einem mittleren Partikeldurchmesser von 1,57 mm und einer

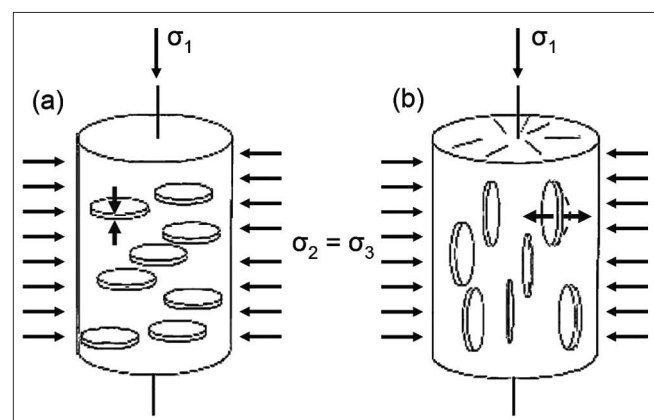


Bild 6: Schließen und Öffnen von Rissen im Verlauf eines Triaxialversuches

Figure 6: Closing and opening of microcracks during a triaxial test

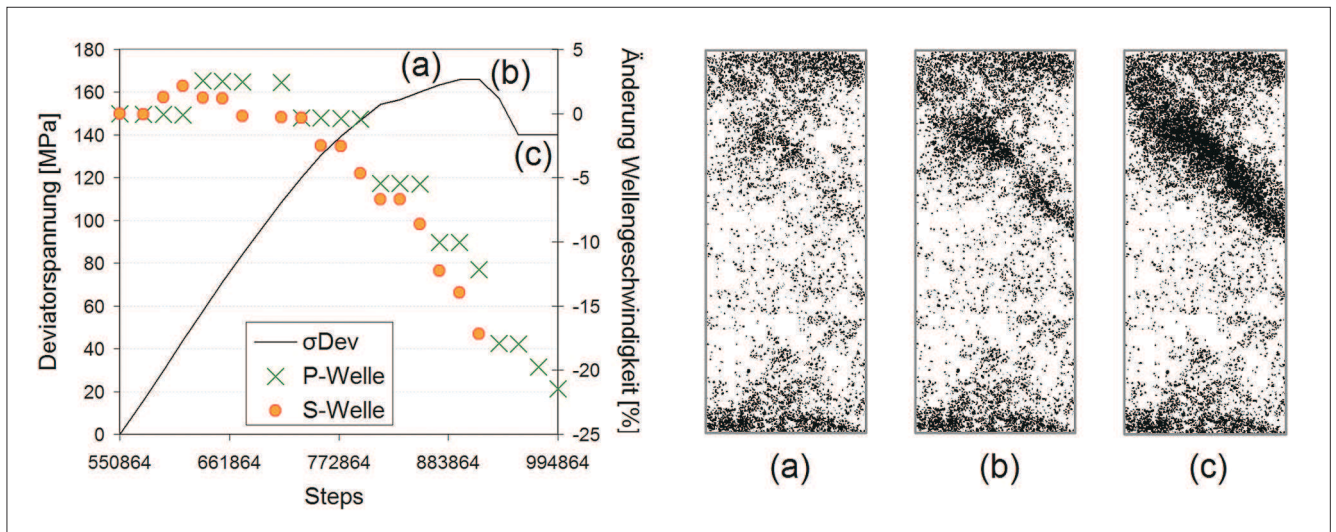


Bild 7: Modell PFC3D: Entwicklung der P- und S-Wellengeschwindigkeit, Bruchmuster
 Figure 7: PFC3D model: Changes in the velocity of P and S waves, fracture pattern

		Laborversuche	Numerische Simulation
Laufzeit [μs]	P-Welle	24,5...28,7	18,5...25,0
	S-Welle	40,7...48,2	22,0...29,0
Geschwindigkeit [m/s]	P-Welle	3500,0...4133,6	3901,2...5306,7
	S-Welle	2070,7...2481,4	3622,0...4462,3

Tabelle 1: Vergleich Ultraschalllaufzeiten Labor und numerische Simulation

Table 1: Comparison of ultrasonic transit times in laboratory tests and numerical simulations

Prüfkörperhöhe von 98 mm befinden sich im Mittel nur rund 62 Partikel übereinander, die bei Anregung der Schwingung durchlaufen werden. Diese sind durch eine Art „Federverbindung“ untereinander verbunden. Daher reagiert das Computermodell insgesamt besser auf die eingetragene Schwingung als der Laborprüfkörper in der Realität.

Eine detaillierte Auswertung der durchgeführten Triaxialversuche und der numerischen Simulation findet sich in Mittelbach (2011).

6 Zusammenfassung Summary

Die Vermutung der zunehmenden Entfestigung des Prüfkörpers im Mehrstufen-Triaxialversuch bei steigender Anzahl der durchlaufenen Versuchsstufen konnte durch die getätigten Ultraschalllaufzeitmessungen und daraus ermittelten Geschwindigkeitsverläufe bestätigt werden. Daher erweist sich die Messung der P- und S-Wellengeschwindigkeit während eines Triaxialversuches und im speziellen im Verlauf eines Mehrstufen-Triaxialversuches durchaus als hilfreich, da sich aus deren Tendenz Hinweise bezüglich des Entfestigungsverhaltens und der zunehmenden Schädigung des Prüfkörpers ableiten lassen.

Die zum Vergleich durchgeführte numerische Simulation zeigte die gleiche Entwicklung der Ultraschalllaufzeiten im Versuchsverlauf.

Neben den Ultraschallmessungen wurde aber festgestellt, dass die durch Schädigung des Prüfkörpers vorhandenen Abweichungen zwischen Einstufen- und Mehrstufen-Triaxialversuchen bei der Ermittlung der Festigkeitswerte c und ϕ und bei der Ableitung der Bruchhüllkurve nur einen geringen Einfluss hatten. Die Mehrstufen-Triaxialversuche können in diesem Fall als gute Annäherung an die Einstufen-Triaxialversuche betrachtet werden.

7 Literatur *References*

Baumgarten, L. (2006): Untersuchungen zum Bruchverhalten von Gesteinen im dreiaxialen Kompressionsversuch – Konzeptionelle Forschungsansätze. Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Beiträge zur Boden- und Felsmechanik, Heft Nr. 5.

Baumgarten, L., Konietzky, H. (2010): Numerical Investigations about Damage and Fracture of Sandstone under 3-axial Compression. Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Tagungsbeitrag 18th European Conference on Fracture (30. August – 3. September 2010), Dresden.

Cain P., Yuen C. M. K., Le Bel G. R., Crawford A. M., Lau D. H. C. (1987): Triaxial Testing of Brittle Sandstone Using a Multiple Failure State Method. Geotechnical Testing Journal, Vol. 10 Nr. 4, S. 213-217.

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), AK 3.3 (1987): Empfehlung Nr. 12 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Erd und Grundbau e.V.: Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen. Redaktionelle Bearbeitung L. Wichter. Bautechnik 64, Heft 11, S. 382-385.

International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests (1983): Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression, Revised Version. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 20 Nr. 6, S. 285-290.

Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota, USA (2005): PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) Version 3.10. User's Guide.

Kovári, K., Tisa, A. (1975): Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 7 Nr. 1, S. 17-33.

Mittelbach, L. (2011): Ultraschalllaufzeitmessungen an Gesteinsproben im dreiaxialen Kompressionsversuch – Laborversuche und numerische Simulation mit PFC3D. TU Bergakademie Freiberg, Fachbereich Geotechnik, Diplomarbeit.