



Experimentelle Erfahrungen und Modellstudien zum Modified Tension Test (MTT) – einem neuen und einfachen Versuchsverfahren zur Untersuchung der direkten Zugfestigkeit

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Ralf J. Plinninger, IFB Eigenschenk Geotechnik und Umweltschutz GmbH, Deggendorf, Dipl.-Geol. Kolja Wolski, Baugeologisches Büro Bauer, Garching, Professor Dr.phil. Georg Spaun, TU München, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Dipl.-Ing. Bernd Thomée und Professor Dr.-Ing. Karl Schikora, TU München, Fachgebiet Baustatik

Die Zugfestigkeit stellt neben ein- und dreiaxialer Druckfestigkeit und Verformungsverhalten einen der wesentlichen Kennwerte für die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften eines Gesteins oder Baustoffs dar. Die direkte Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeit ist dabei in versuchstechnischer Hinsicht mit zahlreichen Problemen behaftet, zum Beispiel punktuelle Lasteinleitung bei mechanischen Einspannvorrichtungen, hohe Anforderungen an die Zugfestigkeit eventuell eingesetzter Klebstoffe oder komplexe Biegezugbeanspruchungen im Bruchpunkt, die Folge einseitiger Rissbildung in der Probe sind. Für direkte Zugversuche einsetzbare Versuchsanlagen sind zudem

weit weniger verbreitet als Druckprüfanlagen, die als Standardausstattung von Baustoff- und Natursteinprüflaboratorien gelten können. Direkte Zugversuche haben daher national und international keine weite Verbreitung gefunden (FECKER/REIK, 1996, PRINZ, 1997).

Häufigere Anwendung zur Beurteilung von Zugfestigkeitseigenschaften finden indirekte Versuchsverfahren, wie der Spaltzug- oder Brazilian-Versuch, Biegezugversuch oder Punktlastversuch. Die meisten dieser Versuche und daraus ermittelten Kennwerte haben in Ingenieurgeologie und Felsmechanik weite Verbreitung gefunden und sind durch zahlreiche nationale und internationale Normen und Prüfeempfehlungen reglementiert (DIN 1048, DGE, 1985, ISRM, 1978a). Problematisch bleibt dennoch eine Übertragung auf die direkte Zugfestigkeit, die nur über empirische Korrekturfaktoren möglich ist.

Der vorliegende Beitrag fasst die Erkenntnisse aus einer am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München bearbeiteten Diplomarbeit (WOLSKI, 2002) sowie FE-Modellrechnungen zusammen, die im Zusammenhang mit einer Dissertation am Fachgebiet für Baustatik der TU München durchgeführt wurden (THOMÉE, in Bearb.).

Versuchsbeschreibung des MTT

Der in diesem Beitrag behandelte „Modified Tension Test“ (MTT) basiert auf einer Entwicklung am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der

Der an der TU Graz entwickelte „Modified Tension Test“ (MTT) (BLÜMEL, 2000) stellt einen neuen und innovativen Versuch zur Laboruntersuchung der direkten einaxialen Gesteinszugfestigkeit dar. Durch eine spezielle Prüfkörperformatierung wird bei Druckbeanspruchung eine gleichmäßige, ringförmige Zugbeanspruchung im Probenkörper erzeugt, weswegen der Versuch in jeder herkömmlichen Druckprüfanlage durchgeführt werden kann. Der Beitrag präsentiert Ergebnisse eines Untersuchungsprogramms an der TU München, die zeigen, dass der MTT ein praxistaugliches und effektives Versuchsverfahren darstellt. Die Ergebnisse weisen auf ein gutes Verhältnis zwischen Prüfaufwand und Formatierung einerseits und der Qualität der gewonnenen Versuchsergebnisse andererseits hin. Aus den praktischen Erfahrungen mit dem Versuch werden darüber hinaus Empfehlungen zur Probenbearbeitung, Versuchsdurchführung, Dokumentation und Versuchsauswertung gegeben.

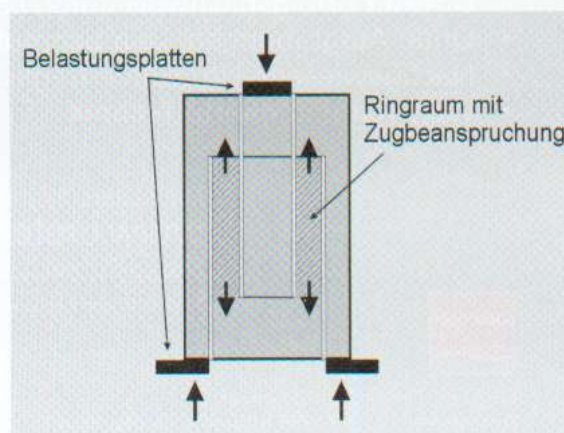


Bild 1. Versuchsschema und Prüfkörperbearbeitung beim Modified Tension Test.

TU Graz. Grundsätzliches zu Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung wurde von BLÜMEL (2000) dargestellt. Als Versuchskörper wird eine zylindrische Probe verwendet, die von oben und unten mit zentrischen Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers überbohrt wird (Bild 1). Nach Positionierung eines Belastungsringes (unten) und einer Belastungsscheibe (oben) wird über eine herkömmliche Druckprüfanlage die Spannung in der Probe solange erhöht, bis im Ringraum zwischen den beiden Bohrungen ein Versagen durch Überschreiten der axialen Zugfestigkeit eintritt.

Aus der Bruchlast F und den Radien r_1 und r_2 der beiden Bohrungen wird die Zugfestigkeit σ_{MTT} nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\sigma_{\text{MTT}} = \frac{F_{\text{max}}}{A_{\text{Ringraum}}} = \frac{F_{\text{max}}}{r_1^2 \cdot \pi - r_2^2 \cdot \pi} \quad [1]$$

Mit:

σ_{MTT} MTT-Zugfestigkeit [MPa],
 F_{max} Bruchkraft [N],
 A_{Ringraum} Fläche des Ringraums [mm²],
 r_1 Radius der größeren Bohrung [mm],
 r_2 Radius der kleineren Bohrung [mm].

Als geometrische Kriterien für die Formatierung der Probe werden von BLÜMEL (2000) Probendurchmesser von > 100 mm, Längendurchmesser-Verhältnisse von rund 1,5:1 und eine den Reglementierungen des einaxialen Druckversuchs entsprechende Endflächenformatierung vorgeschlagen.

Vergleichende Untersuchungen zu verschiedenen Zugversuchen

Als Beispiele für die Streubreite von Zugfestigkeitswerten, die mit unterschiedlichen Versuchsv erfahren ermittelt werden können, sollen hier die Ergebnisse von Versuchsreihen eines homogen-isotropen Oberhofer Quarzporphyrs (Rennsteig-Tunnel/Thüringen) (WOLSKI, 2002) vorgestellt werden (Bild 2 und Tabelle 1). Bei diesem Gestein handelt es sich um einen fein- bis mittelkörnigen Rhyolith mit hypidiomorphen Feldspatkristallen und xenomorphen Quarzkristallen, die unregelmäßig in eine entglaste, feinkörnige Matrix eingebettet sind.

Es wird davon ausgegangen, dass die aus dem MTT ermittelten Festigkeitswerte der direkten Zugfestigkeit sehr nahe kommen. Bezogen auf die Ergebnisse der vorliegenden Versuchsreihe liegen die Ergebnisse aus dem Spaltzugversuch (Brazilian Test) um rund 90 %, die Ergebnisse des Point-

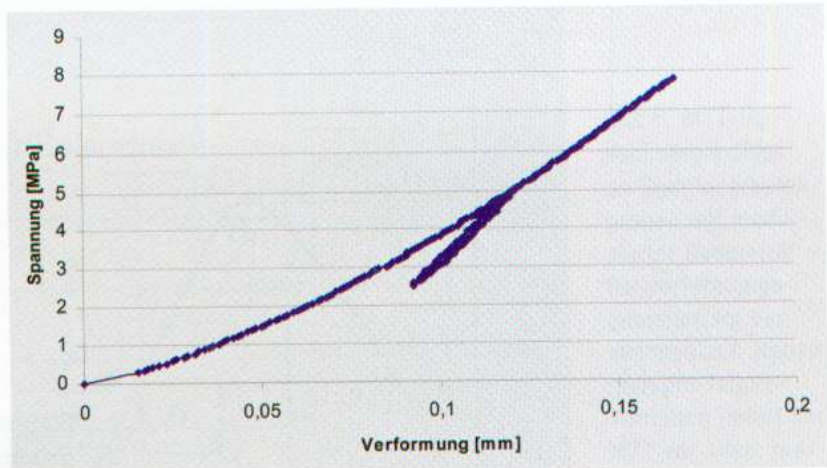


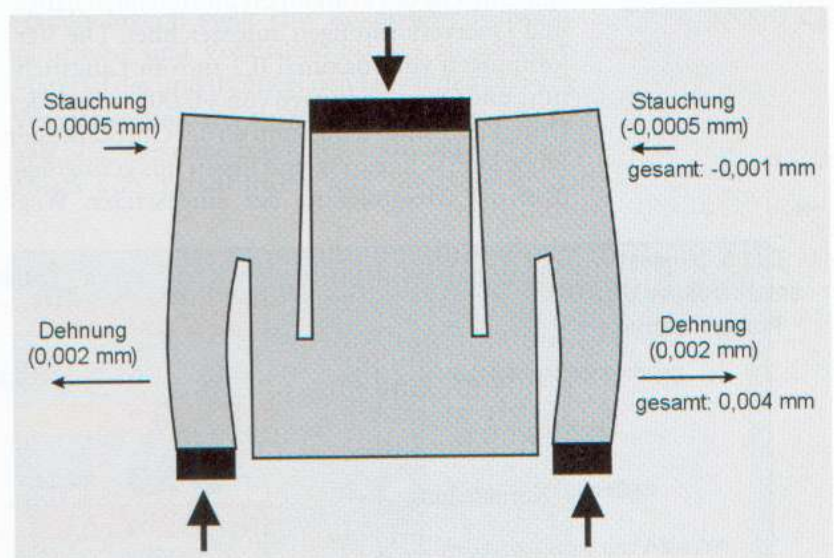
Bild 2. Beispielhaftes Spannungs-/Verformungsdiagramm eines MTT-Versuchs an einer Rhyolithprobe (spannungsgesteuerter Versuchsablauf mit Entlastung-Wiederbelastungsschleife).

Tabelle 1. Ergebnisse einer Probenreihe als Beispiel für die unterschiedlichen Zugfestigkeitsergebnisse verschiedener Versuchsv erfahren.

Zugfestigkeit MTT	$3,8 \pm 0,97$	MPa
Zugfestigkeit Brazilian Test (DGE 1985, ISRM 1978)	$7,2 \pm 1,6$	MPa
Zugfestigkeit Pointload-Test (DGE 1982, ISRM 1985)	$8,0 \pm 1$	MPa
Zugfestigkeit Biegezugversuch (DIN 1048)	$13,5 \pm 1,5$	MPa
Einaxiale Druckfestigkeit (ISRM 1978b)	$102,3 \pm 9,1$	MPa
V-Modul	$25,8 \pm 2,1$	GPa

Load-Verfahrens um rund 110 % und die aus Biegezugversuchen ermittelten Festigkeitswerte gar um rund 260 % über der tatsächlichen einaxialen Zugfestigkeit des Materials.

Bild 3. Prüfkörper unter Belastung (Querdehnung um den Faktor 300 verstärkt).



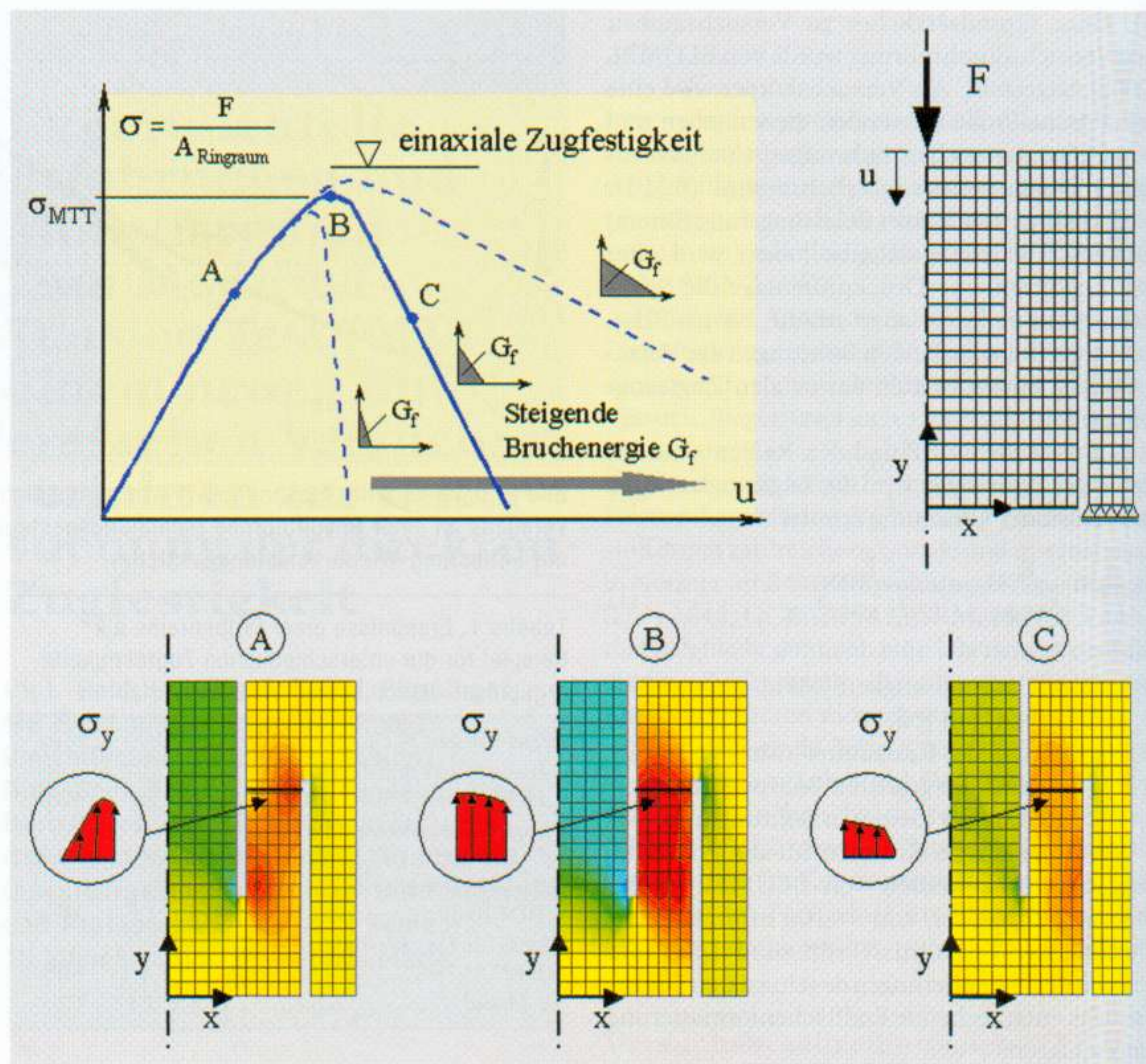


Bild 4. Statisches System und Ergebnisse der Finite-Elemente-Untersuchung.

Verformungsverhalten beim MTT

Während des Versuchsablaufs wurden die an der Außenfläche des Prüfkörpers auftretenden Längs- und Querverformungen aufgezeichnet. Die Verformungen von maximal 0,2 mm in Längsrichtung und Querdehnungen von +0,004 mm an der Unterkante und -0,001 mm an der Oberkante der Probe sind sehr gering und liegen nur geringfügig über der Messtoleranz des eingesetzten Weg-

messsystems (Bild 3). Die Ermittlung dieser realen Verformungsmesswerte war insbesondere für die Verifizierung des nachfolgend vorgestellten FE-Modells von Bedeutung.

Ergebnisse der FE-Berechnungen

Um genauen Aufschluss über den Spannungs- und Zustand im Probenkörper zu erhalten und somit qualitative Aussagen über die Versuchsergebnisse

Bild 5. Mindestanforderungen an Probenmaterial.

Veränderlichkeit in Wasser	stark veränderlich veränderlich mäßig veränderlich nicht veränderlich						
Trennflächenabstand [cm]	< 0,6	0,6-2	2-6	6-20	20-60	60-200	> 200
Kornbindung	entfestigt mürbe schlecht mäßig gut sehr gut						
Gesteinsfestigkeit	sehr niedrig niedrig mittel hoch sehr hoch extrem hoch						
Chancen zur Gewinnung einer prüffähigen Probe	0%						

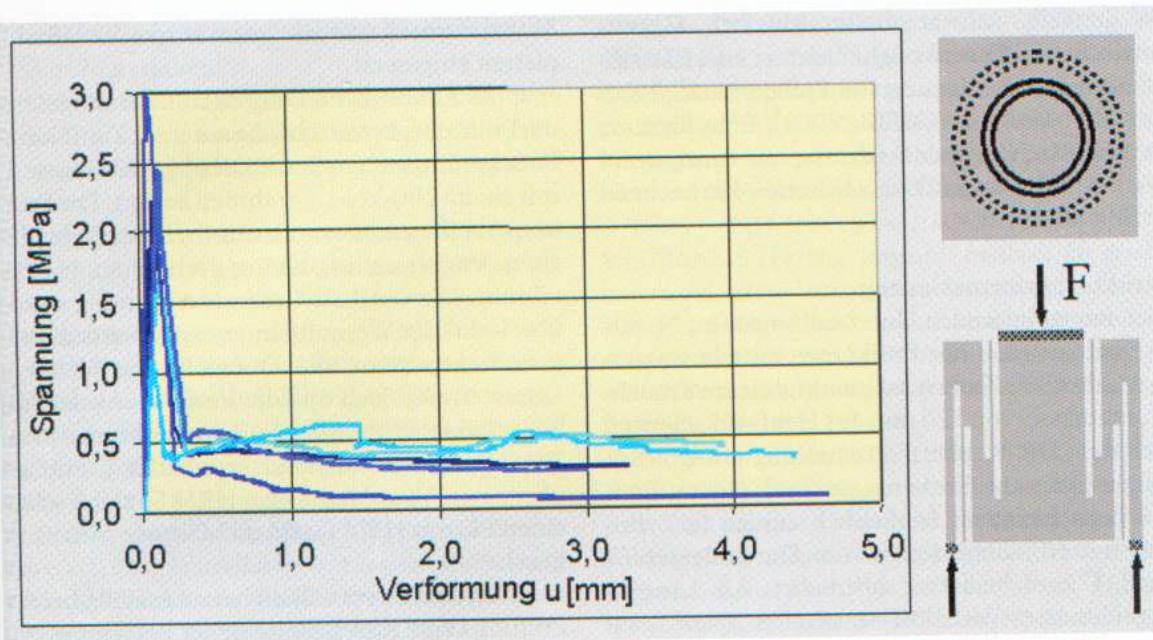


Bild 6. MTT-Versuchsergebnisse an Stahlfaserbetonproben mit modifizierter Geometrie bei verformungs-gesteuertem Versuchsablauf. Neben dem pre-failure-Verhalten liefert der MTT vor allem realistische Kennwerte für die Beurteilung des post-failure-Verhaltens duktiler Materialien.

machen zu können, wurde der MTT am Fachgebiet für Baustatik der TU München mit einer materiell nichtlinearen Finite-Elemente-Berechnung simuliert. Für die Diskretisierung des Systems (Bild 4) wurden vierknotige Scheibenelemente mit einem rotationssymmetrischem Spannungszustand verwendet.

Das verwendete Materialgesetz basiert auf der inkrementellen Fließtheorie im Rahmen der Plastizitätstheorie und wurde für die Berechnung von Beton- und Stahlfaserbetonstrukturen entwickelt. Die Fließfläche setzt sich aus zwei Teilfließflächen zusammen, um ein unterschiedliches Materialverhalten im Zug- und Druckbereich erfassen zu können. Das Zugversagen wird durch das Rankine-Fließkriterium mit linearer, isotroper Entfestigung und einem Bruchenergiekonzept beschrieben. Für den Druckbereich wird das Drucker-Prager Fließkriterium mit isotroper Ver- und Entfestigung verwendet.

Die qualitativen Ergebnisse der FE-Berechnung sind in Bild 4 zusammengestellt. Das Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der mittleren Zugspannung σ_m , die sich aus der Prüflast F geteilt durch die Ringraum- beziehungsweise Rissfläche A_{Ringraum} ergibt, und der Verschiebung u .

Im unteren Teil von Bild 4 ist die Verteilung der σ_y -Spannungen im Probenkörper vor dem Bruch (A), bei Erreichen der Maximallast (B) und im Nachbruchbereich (C) abgebildet. Der lineare Spannungsverlauf mit einer Spannungsspitze auf der rechten Stegseite vor dem Bruch (A) wird durch Umlagerung ausgeglichen, und es stellt sich ein annähernd konstanter Spannungsverlauf bei Erreichen der Maximallast (B) ein. Die Umlagerungsmöglichkeiten sind hierbei stark von der Duktilität des Materials abhängig.

Die maximale mittlere Zugspannung σ_{MTT} ist etwas kleiner als die in der Berechnung zu Grunde gelegte einaxiale Zugfestigkeit und von der Duktilität, gekennzeichnet durch die Zugbruchenergie

des Materials, abhängig. Mit zunehmender Duktilität nähert sich aufgrund der oben bereits erwähnten, verbesserten Umlagerungsmöglichkeit der Spannungsspitzen im Umlenkbereich die maximale mittlere Spannung der einaxialen Zugfestigkeit an.

Zusammenfassend ist mit den Ergebnissen der Modellierung der rechnerische Nachweis erbracht, dass die im MTT ermittelte Zugspannung σ_{MTT} im Rahmen der natürlichen Materialstreuung der einachsigen Zugfestigkeit des Materials gleichzusetzen ist.

Erfahrungen und Empfehlungen

Anforderungen an das Probenmaterial

Das insgesamt zwei- bis dreifache Überbohren einer MTT-Probe mit einem wassergekühlten Standbohrgerät stellt eine nennenswerte Beanspruchung und Vorauslese für das zu testende Material dar und limitiert den Einsatzbereich des Versuchsverfahrens auf wenig geklüftete, dauerhaft feste Gesteine mit guter Kornbindung. Aufgrund von Erfahrungen mit Buntsandstein,

Wellenkalk, Schwarzphyllit, Rhyolith, Granitmylonit und Quarzkonglomerat ist eine Klassifizierung für die Eignung von Probenmaterial aufgestellt worden (WOLSKI, 2002). Eine Eignung besteht nach eigener Erfahrung nur dann, wenn die in Bild 5 angeführten Kriterien hinreichend erfüllt sind.

Prüfkörperformatierung

Bei den vorliegenden Untersuchungen an Natursteinen wurden die Prüfkörper mittels wassergekühlter Standbohrmaschine und einem Kronendurchmesser von 120 mm aus Haufwerksblöcken gebohrt. Die weitere Formatierung erfolgte mit einer Diamant-Gesteinssäge und einem Endflächenschleifgerät. Schließlich wurden die Zylinder mit Hohlbohrkronen vom Durchmesser 79 und 47 mm beidseitig überbohrt. Als Längen-Durchmesser-Verhältnisse wurden Werte zwischen 0,5 und 1,4 getestet.

Im Gegensatz zu den hier verwendeten Durchmessern wird bei grobkörnigen Natursteinen (zum Beispiel Konglomerate, Brekzien, grobkörnige Granite) sowie Beton- und Stahlfaserbetonproben empfohlen, einen Außendurchmesser von 200 mm nicht zu unterschreiten. Durchmesser dieser Größenordnung sind für eine ausreichende und dem Größtkorn der Materialien angepasste Dimension des Ringraums unerlässlich.

Als problematisch erwies sich zunächst die Einhaltung der Zentrität und Winkelmaßhaltigkeit beim Überbohrvorgang. Hier konnten mit einer passgenau angefertigten Bohrschablone gute Erfolge erzielt werden.

Modifizierung der Prüfkörpergeometrie

Zur Bestimmung der Materialparameter von Stahlfaserbeton ist ein homogener Spannungszustand im Steg auch in der Vor- und Nachbruchphase erforderlich, und ein Versagen der Probe im Umlenkbereich muss vermieden werden. Dies kann durch das Überbohren des Probenkörpers mit zwei weiteren Kernbohrungen erreicht werden (Bild 6). Durch die Kernbohrungen wird der Mittelbereich des Stegs (in dem ein homogener Spannungszustand vorliegt) geschwächt und ein Versagen in diesem Bereich gewährleistet. Mit dem auf diese Weise veränderten MTT-Versuchen an Stahlfaserbetonproben wurden sehr gute Ergebnisse erzielt. Zudem ist es durch die Verwendung des MTT möglich, realitätsnahe Kennwerte des Nachbruchverhaltens, gekennzeichnet durch das Faserauszugsverhalten des Stahlfaserbetons, zu ermitteln.

Versuchsdurchführung und -steuerung

Die Versuche wurden in Anlehnung an die Empfehlungen für die Durchführung einaxialer Druckversuche (ISRM, 1978b) durchgeführt. Die Proben wurden stetig mit einer Laststeigerungsrate von 0,05 MPa/s bis zum Bruch belastet. Zur

Krafteinleitung wurden 5 mm starke V2A-Stahlplatten eingesetzt.

Gute Erfahrungen wurden mit der eingesetzten Prüftechnik gemacht, die auf einer ToniNorm-Druckprüfmaschine nach DIN 51 223, Klasse 1, mit einem 200-kN-Lastrahmen basiert. Die Prüfkörperverformung wurde mit drei unterschiedlichen Verfahren unabhängig voneinander bestimmt. Die vertikale Gesamtverformung wurde über induktive Wegaufnehmer zwischen den Lastplatten gemessen, die Querdehnung über ein Querdehnungsjoch und die Verformung der Außenseite der Probe über ein Längsdehnungsjoch. Die Datenerfassung und -auswertung erfolgte über einen Messdatenlogger HBM Spider 8 sowie einen PC mit HBM CatMan 2.0 sowie Microsoft Excel.

Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, bei der Prüfung keine Kugelkalotte in der Belastungseinrichtung einzusetzen, da andernfalls ein einseitig initiiertes Zugriss weiter propagiert wird, was im ungünstigsten Fall zu einem Schrägstellen des inneren Zylinders führen kann.

Versuchsauswertung

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden die Versuche über die beschriebene Messeinrichtung als Kraft-Gesamtlängsverformungs-Diagramme aufgezeichnet. Die Ermittlung von σ_{MTT} erfolgt aus der Bruchlast und Probengeometrie analog Gleichung [1].

Die Ermittlung von Verformungsmoduln aus dem Diagramm erscheint nicht sinnvoll, da umfangreiche Lastumleitungsphänomene und differenzierte Verformungen in verschiedenen Bereichen der Probe die Ermittlung eines aussagekräftigen Moduls aus Sicht der Autoren nicht ermöglichen.

Bei ausgeprägt duktilen Materialien, wie es der getestete Stahlfaserbeton darstellt, ist zudem die Ermittlung einer Restzugfestigkeit aus den Kraft-Verformungsaufzeichnungen sinnvoll.

Zusammenfassung

Auf Basis der hier präsentierten Ergebnisse handelt es sich beim Modified Tension Test um einen innovativen Ansatz zur Bestimmung der direkten Zugfestigkeit von Natursteinen und Baustoffen. Das Verhältnis zwischen apparativen und zeitlichem Aufwand einerseits und Qualität der Versuchsergebnisse spricht aus Sicht der Autoren klar für dieses neue Versuchsverfahren.

Folgende Gesichtspunkte zeichnen das Versuchsverfahren dabei aus:

- ✧ Die im Modified Tension Test ermittelte Zugfestigkeit kommt der realen Zugfestigkeit eines Natursteins oder Baustoffs sehr nahe beziehungsweise ist mit dieser gleichzusetzen.
- ✧ Der MTT erlaubt eine ausgezeichnete Beobachtung und Aufzeichnung von Materialeigen-

schaften im post-failure-Bereich ausgeprägt duktiler Materialien.

- ⇒ Der Versuch erfordert im Vergleich zum herkömmlichen einaxialen Druckversuch keinen oder nur geringen apparativen Mehraufwand.
- ⇒ Das Verfahren ist insbesondere auch für Festgesteine mit hohen Festigkeiten geeignet.

Quellennachweis

BLÜMEL, M. (2000): *Neue Laborversuchstechniken für felsmechanische Versuche (Improved Procedures for Laboratory Rock testing)*. DGGT (ed.): Proceedings of the EUROCK 2000 Symposium, Aachen, 27.-31. März 2000, S. 573-578. Essen: Verlag Glückauf.

DGEG – Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (1982): *Empfehlung Nr. 5 des Arbeitskreises 19 Versuchstechnik Fels der DGEG: Punktlastversuche an Gesteinsproben*. In: Bautechnik, Nr. 1, S. 13-15.

DGEG – Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (1985): *Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 19 Versuchstechnik Fels der DGEG: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben – Spaltzugversuch*. In: Bautechnik, Nr. 6, S. 197-199.

DIN 1048, Teil 5 (1991): *Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probenkörper*. Berlin: Beuth.

FECKER, E.; REIK, G. (1996): *Baugeologie*. Stuttgart: Enke.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978a): *Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*. In: International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, No. 15, S. 99-103.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978b): *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*. In: International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, No. 16, S. 135-140.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1985): *Suggested method for determining point load strength. Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test method*. In: International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, No. 22, S. 51-60.

PRINZ, H. (1997): *Abriss der Ingenieurgeologie*. Stuttgart: Enke.

THOMÉE, B. (in Bearb.): *Strukturmechanische Modellierung von Stahlfaserbeton (Arbeitstitel)*. Dissertation, TU München.

WOLSKI, K. (2002): *Der Modified Tension Test – Aussagekraft und Durchführbarkeit eines neuen Zugversuchs*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie der TU München. Unveröffentlicht.