

# Ansätze für eine einheitliche Definition der Zähigkeit zur verbesserten Penetrationsprognose bei TBM-Vortrieben

Towards a uniform toughness definition for penetration prediction in TBM-tunneling

Lisa Wilfing<sup>1</sup>, Heiko Käsling<sup>2</sup>, Kurosch Thuro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc Lisa Wilfing, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, lisa.wilfing@tum.de

<sup>2</sup> Dr. Heiko Käsling, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, heiko.kaesling@tum.de

<sup>3</sup> Prof. Dr. Kurosch Thuro, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, thuro@tum.de

## Zusammenfassung

Die Prognose der Vortriebsleistung spielt im maschinellen Tunnelbau vor allem für die Kalkulation der Vortriebskosten und der Bauzeit eine entscheidende Rolle. Allerdings können diese Prognosen nur so genau sein wie die geologisch-geotechnischen Eingangsparameter, die dem Model zugrunde liegen. Neben der Gesteinsfestigkeit und Einflüsse der Trennflächen hat die Zähigkeit der durchörterten Gesteine einen maßgeblichen Einfluss auf die Penetration und damit auf die Nettovortriebsgeschwindigkeit. Um diesen Parameter sinnvoll in ein Prognosemodell einzuarbeiten, bedarf es einer objektiven Definition der Zähigkeit; am Besten anhand von Standardlaborversuchen (Einaxialer Druckversuch, Spaltzugversuch etc.). Hierfür wurden an verschiedenen Gesteinen das Verhältnis der Druck- zur Zugfestigkeit sowie der plastischen und elastischen Verformung, die Bruchenergie, die Zerstörungsarbeit sowie der Post-Failure-Bereich untersucht. Für einen ersten Eindruck der Gesteinszähigkeit erwiesen sich der Post-Failure-Bereich sowie das Verhältnis von plastischer und elastischer Verformung als geeignet, da sie schnell visuell aus der Spannungs-Verformungs-Kurve abgeleitet werden können. Für eine weitere Definition eignet sich das Verhältnis der Zerstörungsarbeit zur Bruchenergie sowie das Verhältnis Druck- zur Zugfestigkeit, jedoch sollte hier die bereits existierende Klassifikationseinteilung erweitert bzw. abgeändert werden.

**Schlüsselworte:** Zähigkeit, Tunnelbohrmaschinen, Penetrationsprognose, Rissausbreitung

## Abstract

A major issue in TBM-tunnelling is performance prediction since calculated excavation costs and construction time of a tunnel project are based on it. These predictions are dependent on the accuracy of the geological and geotechnical input parameters. Besides rock strength the toughness of the excavated rock has a significant influence on penetration and cutting efficiency as increasing toughness requires greater energy to induce complete failure. To incorporate rock toughness in a TBM performance prediction model, we used standard laboratory tests including UCS-test or BTS-test to develop and provide definition and classification systems. Based on this test data we analysed several factors that could characterize the toughness like the ratio of compressive to tensile strength, ratio of plastic to elastic strain rate, specific fracture energy, destruction work or post-failure-modulus. The post-failure behavior as well as the ratio of plastic to elastic strain rate is suitable for a first definition of toughness as they can be easily detected out of stress-strain curves into relative pre- and post-failure energy requirements. We expect future analyses to focus on inclusion of the compressive to tensile strength ratio, the failure energy and destruction work as initial analyses show these have a promising empirical correlation to rock toughness.

**Keywords:** toughness, tbm tunnelling, penetration prediction model, fracture propagation

## 1 Einleitung

Im Tunnelbau ist die Prognose der Vortriebsleistung ein unverzichtbares Mittel, um die Kosten sowie die Bauzeit eines Tunnelprojekts kalkulieren zu können. Die Forschungsgruppe ABROCK beschäftigt sich deshalb mit der Verbesserung existierender Prognosemodelle sowie der Entwicklung eines neuen, angepassten Modells (SCHNEIDER et al. 2012). Die Leistung einer Tunnelbohrmaschine (TBM) hängt im Festgestein unter anderem vom Werkzeugverschleiß und von der Penetration ab.

Die Vortriebsleistung einer TBM wird neben der Einaxialen Druckfestigkeit maßgeblich durch die Zähigkeit des

durchörterten Gesteins beeinflusst (BECKER & LEMMES 1984, GEHRING 1995). Je zäher sich ein Gestein verhält, desto langsamer erfolgt die Rissausbreitung und desto mehr Energie muss aufgewendet werden, um ein Chipping und somit eine energetisch sinnvolle Gebirgslösung zu erreichen. Problematisch ist hierbei, dass bislang keine allgemein gültige Definition existiert, durch die die Zähigkeit in einem signifikanten Maße charakterisiert wird und eine Einarbeitung in das Prognosemodell ermöglicht wird.

Ziel der Arbeit ist es daher, eine Methode zu entwickeln, die Zähigkeit eines Gesteins so zu beschreiben, dass sie eine weitverbreitete Anwendung und Implementierung in Leistungsprognosemodelle ermöglicht.



## 2 Stand der Forschung

Im Zuge von Stabilitätsanalysen im Hohlraumbau wurde die Sprödigkeit von Gesteinen bereits detaillierten Untersuchungen unterzogen. Die Zähigkeit von Gesteinen war im Gegensatz dazu bislang von geringerem Interesse, weshalb hierfür keine weltweit anerkannte Definition existiert. SCHIMAZEK & KNATZ (1976) sowie BECKER & LEMMES (1984) beschrieben in ihren Untersuchungen bereits eine Definition der Zähigkeit über das *Verhältnis Z* der Druck- zur Zugfestigkeit, die in der Folgezeit weit verbreitet Anwendung findet. Anhand ihrer Ergebnisse legten sie die Grenze von spröden ( $Z > 10$ ) zu zähen ( $Z < 10$ ) Gesteinen bei  $Z = 10$  fest. THURO (1996) erweiterte diese Einteilung um die Klassen sehr spröde ( $Z > 20$ ) sowie sehr zäh ( $Z < 5$ ).

HUGHES (1972) charakterisierte die Steifigkeit eines Gesteins dagegen über die *spezifische Energie*  $e_s$ , die benötigt wird, um einem Gesteinsprüfkörper bis zum Bruch zu belasten (Abb. 1). Dieser Gedanke wurde von GEHRING (1995) unter dem Begriff *spezifische Bruchenergie*  $w_f$  wieder aufgegriffen und in sein Prognosemodell eingearbeitet, da er bei verschiedenen Tunnelvortrieben hiermit eine gute Korrelation mit der Penetration erkannte. Die *spezifische Bruchenergie*  $w_f$  kann man durch eine Normierung der aufgewendeten *Bruchenergie*  $W_f$  durch die Einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_u$  zwischen verschiedenen Gesteinen bzw. Projekten vergleichen. THURO (1996) erweiterte die Methoden der Energieaufwendung um den wichtigen Bereich nach dem Bruch des Prüfkörpers, dem Post-Failure-Bereich. Dieser Bereich ist bei zähen Gesteinen stark ausgeprägt und bei spröden kaum bis gar nicht vorhanden. Die *Zerstörungsarbeit*  $W_z$  berechnet sich somit aus der gesamten Fläche (Pre- und Post-Failure-Bereich, Abb. 1) unterhalb der Spannungs-Verformungs-Kurve und zeigt damit klare Unterschiede bei spröden und zähen Gesteinen auf.

Der Post-Failure-Bereich wurde bereits von WAWERSIK & FAIRHURST (1970) näher beschrieben. Sie stellten bei ihren Laborversuchen zwei unterschiedliche Ausbildungen des Nachbruchverhaltens fest, die sie allerdings nicht auf zähe bzw. spröde Gesteine bezogen. Eine Charakterisierung dieses Bereiches ist über das *Post-Failure-Modul*  $P_f$  möglich, das mit Hilfe einer Regressionsgeraden im Nachbruchbereich berechnet werden kann (THURO 1996).

Eine weitere Eigenschaft von zähen Gesteinen ist ein hoher Anteil an *plastischer Verformung*  $\epsilon_{pl}$  vor dem Bruch. Spröde Gesteine werden dagegen vorwiegend linear und elastisch verformt. Daher kann das Verhältnis von elastischer  $\epsilon_{el}$  bzw. plastischer Verformung  $\epsilon_{pl}$  zur Verformung bis zum Bruch Aufschluss über das Bruchverhalten eines Gesteins liefern (THURO 1996). Die Festlegung der Proportionalitätsgrenze  $\sigma_p$  (Übergang elastischer zu plastischer Verformung, Abb. 1) wird meist subjektiv bestimmt, daher sind alle darauf basierenden Berechnung fehlerbehaftet.

## 3 Methodik

Um eine einheitliche und weitverbreitete Definition zu erlangen, werden die Basisuntersuchungen vorerst anhand von Standardlaborversuchen wie dem Einaxialen Druckversuch sowie dem Spaltzugversuch durchgeführt.

Um die Zähigkeit eines Gesteins zu charakterisieren und die unter Kapitel 2 beschriebenen Parameter auf ihre Plausibilität zu prüfen, werden folgende Faktoren analysiert (Abb. 1):

- Verhältnis Druck- zu Zugfestigkeit ( $\sigma_u / \sigma_t$ )
- Bruchenergie  $W_B$
- Zerstörungsarbeit  $W_z$
- Post-Failure-Modul  $P_f$
- Verhältnis plastische zu elastische Verformung ( $\epsilon_{pl} / \epsilon_{el}$ )

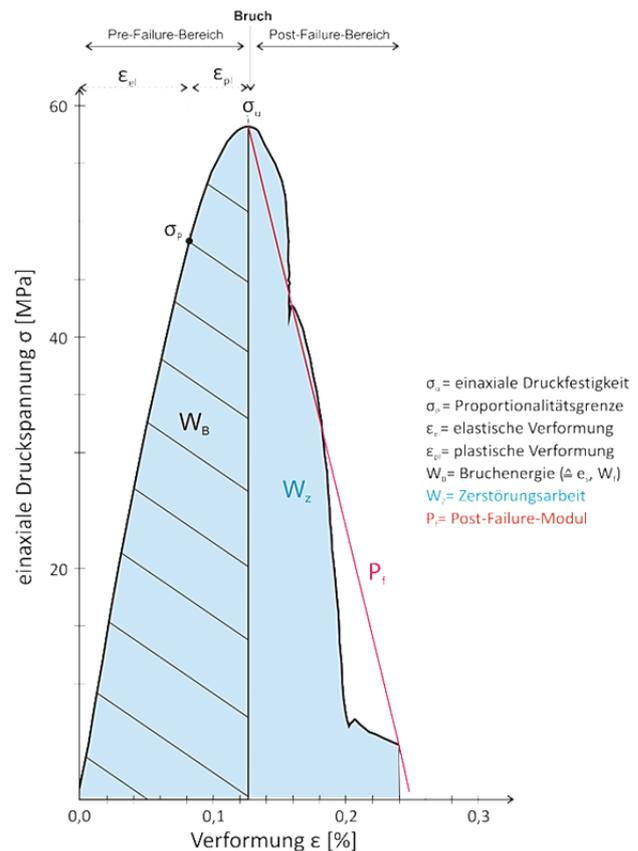


Abb. 1: schematische Spannungs-Verformungs-Kurve eines Einaxialen Druckversuchs mit den die Zähigkeit beeinflussenden Parametern.

Fig. 1: schematic stress-strain curve of a uniaxial compression test with the toughness defining parameters.

Dem Ansatz von GEHRING (1995) folgend ist es sinnvoll, Parameter, deren Größe unmittelbar durch die Höhe der Druckfestigkeit beeinflusst wird (Bruchenergie  $W_B$ , Zerstörungsarbeit  $W_z$ ), durch eine Division mit  $\sigma_u$  zu normieren. Ohne diesen Vorgang kann man beispielsweise bei einer hohen Zerstörungsarbeit nicht automatisch auf einen ausgeprägten Post-Failure-Bereich schließen, da der hohe Wert ebenso durch eine hohe Druckfestigkeit bei gleichzeitigem Fehlen eines Post-Failure-Bereiches verursacht werden kann. Die mit der Einaxialen Druckfestigkeit normierten Parameter werden im Weiteren *spezifische Bruchenergie*  $sW_b$  bzw. *spezifische Zerstörungsarbeit*  $sW_z$  genannt und ermöglichen einen Vergleich von verschiedenen Gesteinen mit unterschiedlich hohen Druckfestigkeiten.

Im weiteren Verlauf der Arbeit soll mit Hilfe von Schall-emissionsanalysen an den Prüfkörpern während der Versuchsdurchführung untersucht werden, ob bei spröden bzw. zähen Gesteinen Unterschiede im Zeitpunkt sowie der Geschwindigkeit der Rissausbreitung auftreten. EBERHARDT (1998) untersuchte diese Faktoren bereits für Gesteine mit einem spröden Materialverhalten. Er ist zu erwarten, dass an der Proportionalitätsgrenze  $\sigma_p$ , d.h. zu Beginn der plastischen Verformung, eine deutliche Zunahme der akustischen Signale auftritt. Um eine Korrelation zur Brechbarkeit der geprüften Gesteine (beispielsweise im Steinbruchbetrieb) zu untersuchen, wurde das Laborprogramm um LCPC-Versuche erweitert. Mit diesen soll geprüft werden, ob die als zäh geltenden Gesteine eine Tendenz zu einer geringeren, d.h. schlechteren Brechbarkeit besitzen als spröde Gesteine.

Um die grundlegende Theorie für die Definition der Zähigkeit zu entwickeln, wurde vorerst darauf geachtet, die Versuche an homogenen, isotropen Gesteinen durchzuführen. Die Proben werden so ausgewählt, dass sowohl als landläufig spröde sowie als zäh geltende Gesteine verwendet werden. Bislang wurde Basalt (spröde), Diorit, Amphibolit sowie Anhydrit (zäh) getestet. Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen auch anisotrope Gesteine folgen sowie Gesteine aus vorhergegangenen Untersuchungskampagnen im Hinblick auf die Zähigkeit ausgewertet werden.

#### 4 Ergebnisse und Diskussion

Die ersten Ergebnisse der vier untersuchten Gesteine bestätigten die Vermutung, dass Basalt ein sprödes und Anhydrit ein zähes Bruchverhalten aufweist.

Abb. 2 (links) zeigt die Spannungs-Verformungs-Kurve eines Basalts aus dem Steinbruch Pechbrunn in der Oberpfalz. Das Gestein besitzt nach ISRM (1978) mit ca. 470 MPa eine extrem hohe Druckfestigkeit sowie nach THURO (1996) eine extrem hohe Zerstörungsarbeit ( $939 \text{ kJ/m}^3$ ). Im Gegensatz dazu zeigt der Anhydrit aus dem alpinen Haselgebirge (Abb. 2 rechts) eine Einaxiale Druckfestigkeit von 60 MPa und dementsprechend auch nur eine mittelhohe Zerstörungsarbeit von  $100 \text{ kJ/m}^3$ .

Betrachtet man jedoch den Kurvenverlauf näher, ist zu erkennen, dass Anhydrit mit einer wesentlich geringeren Zerstörungsarbeit ein deutlich ausgeprägten Post-Failure-Bereich und somit zäheres Bruchverhalten aufweist. Der Basalt besitzt ein typisch sprödes Bruchverhalten, was durch das Fehlen des Post-Failure-Bereichs gekennzeichnet ist. Somit entspricht bei spröden Gesteinen die *Zerstörungsarbeit*  $W_Z$  in etwa der *Bruchenergie*  $W_B$ . Dieser Vergleich verdeutlicht, dass die Zerstörungsarbeit allein nicht als Parameter für die Zähigkeit ausreicht und die in Kapitel 3 beschriebene Normierung nötig ist. Allerdings lieferte die Normierung der Zerstörungsarbeit  $sW_Z = W_Z / \sigma_u$  bzw. der Bruchenergie  $sW_B = W_B / \sigma_u$  wie sie von GEHRING (1995) beschrieben wurde, bislang keine klar erkennbaren Erkenntnisse, anhand derer man zähe Gesteine von spröden differenzieren könnte. Theoretisch müsste bei zähen Gesteinen im Gegensatz zu spröden eine verhältnismäßig hohe spezifische Zerstörungsarbeit erreicht werden. Dieser Trend traf jedoch nicht bei allen Proben zu. Demnach ist zu überlegen, die Formel zur Berechnung der Normierung dementsprechend zu verändern. Zusätzlich sollen weitere Versuche zur Problemlösung beitragen.

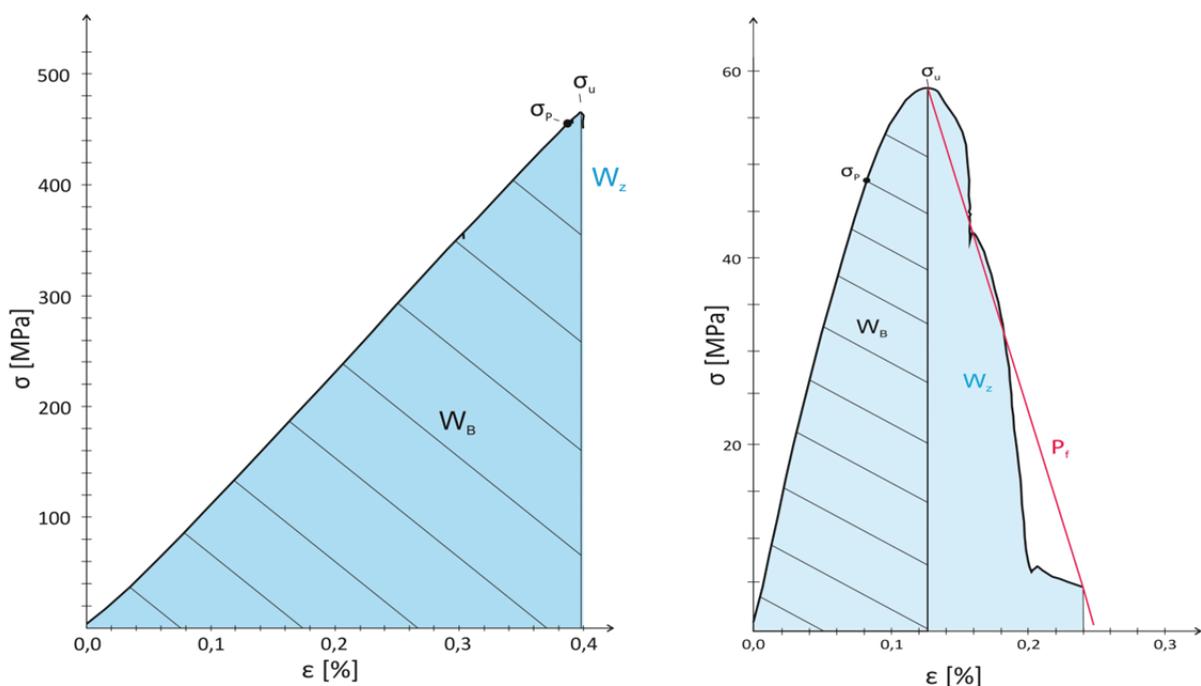


Abb. 2: Spannungs-Verformungs-Kurven eines Basalts (links) sowie eines Anhydrits (rechts) als Beispiele für ein typisch sprödes (Basalt) sowie zähes (Anhydrit) Bruchverhalten.

Fig. 2: Stress-strain curve of Basalt (left) and Anhydrite (right) as typical examples of a brittle (Basalt) respectively tough (Anhydrite) rock failure mechanism.



Der Post-Failure-Bereich sowie der Anteil der plastischen bzw. elastischen Verformung sind als erste Charakteristika der Zähigkeit sinnvoll, da sie rein optisch schnell aus der Spannungs-Verformungs-Kurve gewonnen werden können. Bei den untersuchten Gesteinen wurden  $\epsilon_{pl} / \epsilon_{el}$  Werte von 0,05 (Basalt) bis 0,71 (Anhydrit) verzeichnet. Allerdings erweist sich die rein visuelle Festlegung der Proportionalitätsgrenze  $\sigma_p$  aus der Spannungs-Verformungs-Kurve als ungenau, wodurch die Berechnung des Verhältnisses von plastischer  $\epsilon_{pl}$  zu elastischer Verformung  $\epsilon_{el}$  erschwert wird. Die Ergebnisse sind daher sehr subjektiv und vorerst nicht für die Verwendung in Prognosemodellen geeignet. Möglicherweise können die geplanten Schallemissionsanalysen zur Problemlösung beitragen.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse der bisher untersuchten Gesteine (Basalt, Diorit, Amphibolit & Anhydrit) mit ihren Einaxialen Druckfestigkeiten sowie den dazugehörigen Zugfestigkeiten dargestellt. Das Diagramm zeigt im Weiteren die Ergebnisse aus rund 110 Druck- bzw. Spaltzugversuchen, die in der Gesteinsdatenbank des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie der TUM (MENSCHIK 2013) enthalten sind. Zusätzlich wurde die Klassifikation nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976) erweitert nach THURO (1996) farblich hinterlegt.

Der Basalt mit einem Zähigkeits-Attribut  $Z$  von bis zu 28 kann als sehr spröde bezeichnet werden. Diese Einteilung entspricht dem Bruchverhalten beim Einaxialen Druckversuch und den Analysen der Spannungs-Verformungs-Kurven (Abb. 2). Auch bei den zwei weiteren untersuchten Gesteinen, Diorit und Amphibolit, kann die bisher existierende Klassifikation als spröde bis sehr spröde anhand des Prüfkörperversagens nachvollzogen werden.

Allerdings ist zu erkennen, dass keines der aktuell untersuchten Gesteine ein Verhältnis  $Z < 10$  besitzt und somit nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976) allesamt nicht im zähen Bereich zu liegen kommen. Der Anhydrit zeigte beim Einaxialen Druckversuch ganz klar ein zähes Bruchverhalten mit einem ausgeprägtem Post-Failure-Bereich (Abb. 2), wird mit  $Z$ -Werten von 13 bzw. 14 jedoch als spröde bezeichnet (Abb. 3).

Diese Beobachtung führt zur Annahme, dass die bestehende Klassifikation nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976), erweitert von THURO (1996) vollständig überarbeitet und ausgeweitet werden muss. Zudem wäre es für die Klassifikation sinnvoll, einen Übergangsbereich für Gesteine zu schaffen, die weder ein zähes oder ein klar sprödes Bruchverhalten aufzeigen.

Um diese Arbeitshypothese zu überprüfen, wurden zusätzlich 110 Datenpaare aus vorherigen Druck- und Spaltzugversuchen der Gesteinsdatenbank geplottet (Abb. 3). Auch hier lässt sich der klare Trend zu einem  $Z$ -Wert größer 10 und somit einer spröden Klassifikation erkennen.

Einige wenige Datenpunkte kommen im zähen Bereich zu liegen. Bei den Gesteinen handelt es sich vorwiegend um Kalksteine mit einem erhöhten Mergelanteil, der die vergleichsweise geringe Druckfestigkeit zur Zugfestigkeit und das zähe Bruchverhalten hervorrufen könnte. Bei diesen Proben wurde zusätzlich die Spaltzugfestigkeit mit einem

größeren Durchmesser (80 mm) ermittelt. Dies wirft wiederum die Frage auf, in wie weit der Prüfkörperdurchmesser die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit beeinflusst. Diese Beeinflussung würde sich dementsprechend auch in der Berechnung des Zähigkeitsfaktors  $Z$  durch das direkte Eingehen der Spaltzugfestigkeit widerspiegeln. Um dies zu überprüfen, sind weitere Versuche mit unterschiedlichen Durchmessern geplant.

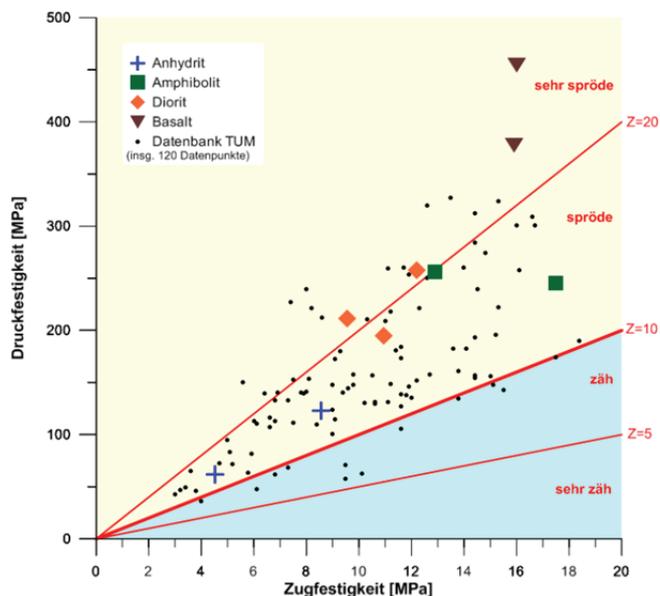


Abb. 3: Verhältnis  $Z$  der Druck- zur Zugfestigkeit der vier untersuchten Gesteine sowie der Gesteine aus der TUM Gesteinsdatenbank; eingetragen in die existierende Klassifikation nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976), erweitert nach THURO (1996).

Fig. 3: Ratio  $Z$  (uniaxial compressive strength / tensile strength) of the four analyzed rock types as well as results from the TUM rock data base. Results are plotted with the existing classification system of SCHIMAZEK & KNATZ (1976), extended after THURO (1996).

Nachdem die Ausbildung eines Post-Failure-Bereichs als eine wesentliche Charakteristik zäher Gesteine gilt, soll dieser anhand der im Einaxialen Druckversuch ermittelten Parameter näher gefasst werden. Da die Analyse über die spezifische Zerstörungsarbeit  $sW_Z$  bislang keine eindeutigen Ergebnisse lieferte, wurde nun das Verhältnis der Zerstörungsarbeit  $W_Z$  zur Bruchenergie  $W_B$  untersucht (Abb.4).

Bei spröden Gesteinen sollte dieses Verhältnis aufgrund eines sehr kleinen bis gar nicht vorhandenen Post-Failure-Bereichs nahe dem Wert 1 liegen, da  $W_Z$  in etwa  $W_B$  entspricht (s. Abb. 2 links). Zähe Gesteine sollten dagegen Werte deutlich über 1 besitzen, da die Zerstörungsarbeit  $W_Z$  sichtbar größer ist als die Bruchenergie  $W_B$ .

In Abb.4 sind die bisher gewonnenen Ergebnisse der untersuchten Gesteine mit ihren  $Z$ -Werten gegen das Verhältnis  $W_Z/W_B$  aufgetragen. Das Diagramm zeigt einen klaren Trend von hohen  $W_Z/W_B$ -Werten bei geringeren  $Z$ -Werten. Der Anhydrit, der als einziges der vier ausgewählten Gesteine beim Einaxialen Druckversuch eine zähe Spannungs-Verformungs-Kurve aufweist, besitzt ein  $W_Z/W_B$ -Verhältnis von 1,35 bis 1,65. Dagegen weist der Basalt nur Werte von 1,03 auf. Somit ist ein Unterschied zwischen sehr zäh und sehr spröde reagierenden Gesteinen deutlich erkennbar.

Allerdings ist diese Differenzierung bei Gesteinen, die an der Grenze zwischen zäh und spröde liegen nicht so deutlich ausgeprägt. Hierbei wäre es, wie auch bei Einteilung des  $Z$ -Wertes, sinnvoll, ein Übergangsbereich zu definieren. Um ein aussagekräftiges Klassifikationsschema für das Verhältnis  $W_Z/W_B$  zu entwerfen, muss das Diagramm durch weitere Versuche erweitert und verifiziert werden.

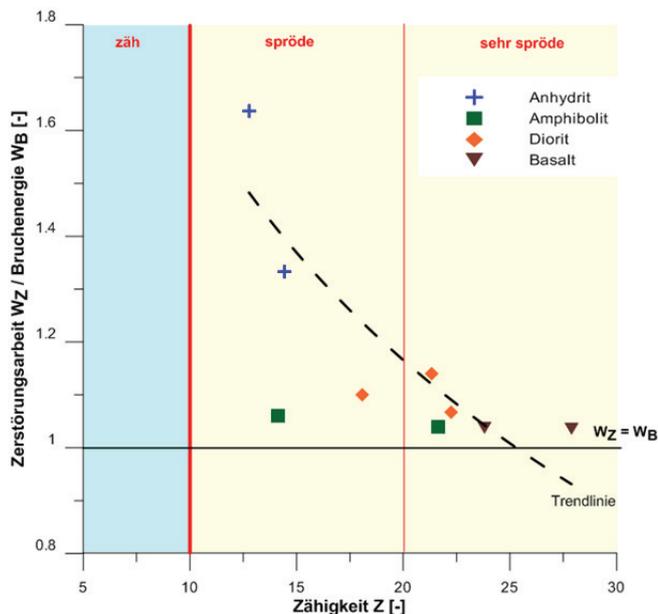


Abb. 4: Faktor  $Z$  der untersuchten Gesteine gegen das Verhältnis der Zerstörungsarbeit zur Bruchenergie. Gestrichelt wird eine Trendlinie angedeutet, farbige hinterlegt ist die Klassifikation für  $Z$  nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976), erweitert nach THURO (1996).

Fig. 4:  $Z$  value of the analyzed rock samples plotted against the ratio of destruction work to specific energy. Dotted line symbolizes a trend, coloured parts show the classification system of SCHIMAZEK & KNATZ (1976), extended after THURO (1996).

## 5 Schlussfolgerung

In den vorhergegangenen Kapiteln wurden Ausschnitte der Arbeit aus der Forschungsgruppe ABROCK erläutert, die weiterführend die Gesteinszähigkeit hinsichtlich ihres Einflusses auf die Leistung im maschinellen Tunnelbau untersucht. Jedoch hat das Thema nicht nur im Tunnelbau einen erheblichen Stellenwert. Die Vorgänge beim Chipping, also bei der Gebirgslösung durch überrollende Disken beim TBM-Vortrieb, können äquivalent auch auf die Brechbarkeit von Gesteinen im Steinbruchbetrieb übertragen werden. Somit ist die Untersuchung der Zähigkeit auch für die Industrie, z.B. im Hinblick auf den Energieverbrauch bei der Herstellung von Schotter oder Betonzuschlag, von großem Interesse. Des Weiteren bestimmt die Zähigkeit auch die Geschwindigkeit und Art der Rissausbreitung in einem Gestein, weswegen die Untersuchungen auch zur Klärung der mechanischen Bruchvorgänge bei Berg- bzw. Felsstürzen beitragen kann.

Die Untersuchungen zeigen, dass für eine Charakterisierung der Zähigkeit vor allem der Post-Failure-Bereich von Bedeutung ist. Für einen ersten Eindruck ist es ausreichend, die Spannungs-Verformungs-Kurve visuell zu betrachten. Um eine einheitliche Klassifikation zu schaffen, sollte dieser Bereich jedoch in Zahlen gefasst werden. Hierfür zeigt

das Verhältnis der Zerstörungsarbeit  $W_Z$  zur Bruchenergie  $W_B$  sinnvolle Ergebnisse, die jedoch noch ausgebaut werden müssen. Die Beschreibung der Zähigkeit über die spezifische Zerstörungsarbeit  $sW_Z$  bzw. die spezifische Bruchenergie  $sW_B$  zeigt bisher keinen klaren Trend und muss anhand zusätzlicher Versuche und Berechnungsmöglichkeiten verbessert werden. Des Weiteren könnte eine Unterscheidung durch die Betrachtung des Post-Failure-Bereichs und Berechnung des Post-Failure-Moduls  $P_f$  erfolgen. Eine einheitliche Vorgehensweise fehlt hierfür bislang und muss erst näher untersucht werden.

Die allgemein anerkannte Definition der Zähigkeit über das Verhältnis  $Z$  der Druck- zur Zugfestigkeit erweist sich als praktikabel, allerdings muss die Einteilung der Klassifikation nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976) sowie THURO (1996) modifiziert bzw. angepasst werden. Um die bisherigen Arbeitshypothesen zu belegen, sollen Druck- und Spaltzugversuche an weiteren Gesteinen durchgeführt werden sowie bereits vorhandene Laboruntersuchungen ausgewertet und im Hinblick auf die ausgewählten Parameter untersucht werden.

Darüber hinaus ist ein erweitertes Laborprogramm mit Schallemissionsanalysen geplant, die Aufschluss über die Rissausbreitung und somit auch über die Festlegung der Proportionalitätsgrenze liefern sollen. Dieser Parameter würde helfen, das Verhältnis von elastischer bzw. plastischer Verformung zur Gesamtverformung fehlerfrei berechnen zu können, was wiederum eine wesentliche Charakteristik zäher Gesteine darstellt.

Zudem sind vergleichende Untersuchungen mit existierenden Versuchen zur Bestimmung der Sprödigkeit geplant. Hierbei soll der Brittleness-Value  $S_{20}$  mittels Brittleness-Test nach DAHL et al. (2012) sowie der Brittleness Index  $BI_m$  mittels Punch-Penetration-Test (YAGIZ 2009, GERTSCH 2000) untersucht und mit den bisherigen Erkenntnissen verglichen werden. Um die Gesteine nicht nur hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften auf Zähigkeit zu überprüfen, sind zudem Dünnschliff- sowie Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop geplant. Diese sollen den geologisch-mineralogischen Ursprung von zähem Bruchverhalten beleuchten und untersuchen, welche petrographischen Faktoren (z.B. Kornbindung) ein Gestein zäh oder spröde reagieren lassen.

## Literatur

- BECKER, H. & LEMMES, F. (1984): Gesteinsphysikalische Untersuchungen im Streckenvortrieb.– Tunnel, 2: 71–76.
- DAHL, F., BRULAND, A., JAKOBSEN, P., NILSEN, B. & GROV, E. (2012): Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. – Tunnelling and Underground Space Technology, 28: 150-158.
- EBERHARDT, E. (1998): Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression.– unveröff. Dissertation, Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, 334 S.; Saskatchewan.
- GEHRING, K. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. – Felsbau, 13-6: 439-448.



- GERTSCH, R. (2000): Rock toughness and disc cutting.– unveröff. Dissertation, University of Missouri-Rolla, 255 S.; Missouri.
- HUGHES, H. M. (1972): Some aspects of machining.– *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, **9**: 205–211.
- ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses.– Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Document No. 4, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, **15**: 319-368.
- MENSCHIK, F. (2013): Vorstellung einer Datenbank zur Dokumentation und Analyse von Labordaten sowie im Feld gewonnen Kennwerten. – 19. Tagung für Ingenieurgeologie: in press.
- SCHIMAZEK, J. & KNATZ, H. (1976): Die Beurteilungen der Bearbeitbarkeit von Gesteinen durch Schneid- und Rollenbohrwerkzeuge.– *Erzmetall*, **29**: 113-119.
- SCHNEIDER, E., THURO, K. & GALLER, R. (2012): Forecasting penetration and wear for TBM drives in hard rock – Results from the ABROCK research project. – *Geomechanics and Tunnelling*, **5**: 537-546.
- THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb.– *Münchener Geologische Hefte*, 145 S.; München.
- WAWERSIK, W. R. & FAIRHURST, C. (1970): A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments.– *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, **7**: 561–575.
- YAGIZ, S. (2009): Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test.– *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**: 66–74.