

Zur Vorhersage von Vortriebsleistungen von Tunnelfräsmaschinen

von J.P. Jenni⁺)

1. Einleitung

Der immer häufigere Einsatz von Fräsmaschinen im Tunnelbau bringt es mit sich, daß sich auch der beratende Geologe mit der Problematik des mechanischen Tunnelvortriebs auseinandersetzen muß. Drei Fragen stehen dabei im Vordergrund:

- 1) Die Bohrbarkeit eines gegebenen Gesteins
- 2) Die theoretisch mögliche Vortriebsgeschwindigkeit in diesem Gestein
- 3) Die geotechnischen Verhältnisse vor Ort (Felsstabilität, Wasseranfall, Tragfestigkeit des Bodens).

Alle drei Punkte sind natürlich auch beim konventionellen Vortrieb von großer Bedeutung, doch liegt die Gewichtung anders. Infolge der hohen Investitions- und Betriebskosten einer Fräsmaschine, ist der Unternehmer gezwungen, hohe Leistungsdaten zu erbringen. Solche können leicht dadurch vereitelt werden, daß der Fels wesentlich schlechter bohrbar ist als erwartet (zu langsamer Vortrieb), oder zu abrasiv ist (kostenungünstiger Meißelverschleiß). Andererseits mag z.B. ein im Vergleich zum Sprengvortrieb teurerer mechanischer Vortrieb von Vorteil sein, weil die Bauzeit infolge der höheren täglichen Vortriebsleistung kürzer wird. All diese Fragen stehen naturgemäß in einem bestimmten Zusammenhang mit dem zu durchbohrenden Material - dem Fels - und dadurch wird auch der Geologe angesprochen.

Was kann dieser nun zur Lösung dieser Fragen beitragen? Da ist sicher einmal die Klassifizierung des zu durchzufahrenden Gesteins zu erwähnen, nicht nur in petrographischer Hinsicht, sondern auch bezüglich seiner grundsätzlichen Bohrbarkeit (Basisbohrbarkeit). Zum zweiten wären dann die Daten beizutragen, die erlauben, die mittlere Schneidgeschwindigkeit für gegebene Gebirge zu ermitteln (die theoretisch mögliche maximale Vortriebsgeschwindigkeit) sowie die speziellen Schwierigkeiten zu definieren, die den mechanischen Vortrieb behindern bzw. die theoretische Vortriebsgeschwindigkeit reduzieren werden (Störzone, Stabilitätsprobleme, Wasseranfall). Letzterer Fall ist nicht ein spezifisches Problem des mechanischen Vortriebs, es ist genauso wichtig beim Sprengvortrieb und soll deshalb hier nicht diskutiert werden. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich somit auf die Klassifizierung der Gesteine bezüglich ihrer Bohrbarkeit sowie auf die Möglichkeit der Vorhersage der Schneidgeschwindigkeit.

⁺) Anschrift des Verfassers: Dr. J.P. Jenni, c/o MOTOR-COLUMBUS Ingenieurunternehmung AG, Parkstraße 27, CH-5401 Baden

2. Bohrbarkeitsklassifizierung

Davon ausgehend, daß Analysenmethoden, die zur Klassifizierung der Gesteine bezüglich ihrer Bohrbarkeit führen, schnell, einfach und billig sein sollten, ist ein Testverfahren entwickelt worden, das auf folgenden Parametern beruht:

- der Prellhärte H_R , bestimmt mit einem Schmidt'schen Prüfhammer (dimensionslos),
- der Druckfestigkeit bei punktförmiger Belastung, dem sog. Point-Load Strength Index I_s gemäß ISRM-Norm (in N/mm^2),
- einem Abrasionstest, dem sog. Los Angeles Abrasion Test ASTM-Norm L-131 (A, in %),
- der Ermittlung des Bestandes an Mineralien, die gleich oder härter als Quarz sind (qtz, in %); der Mineralbestand kann röntgenographisch, chemisch oder anhand von Dünnschliffen ermittelt werden.

Auf empirischem Weg ist folgende Beziehung abgeleitet und als Basis-Bohrbarkeitsindex b_q definiert worden:

$$b_q = \frac{I_s \cdot \sqrt{H_R}}{A \cdot (1+qtz)}$$

Dieser stellt eine Materialcharakteristik des Gesteins und nicht etwa des Felses dar, da er keine Rücksicht auf die geotechnischen Verhältnisse vor Ort (Stabilität, Wasser, Klüftung) nimmt.

Aufgrund seines Index b_q läßt sich ein Gestein in eine der folgenden 4 Bohrbarkeitsklassen einteilen:

- (1) $b_q > 100.0$; extrem harte und/oder abrasive Gesteine, sehr ungünstig für den Fräsbetrieb
- (2) $b_q = 99.9-10.0$; ziemlich harte und/oder abrasive Gesteine, nicht ideal für den Fräsbetrieb
- (3) $b_q = 9.9-0.1$; wenig harte und/oder abrasive Gesteine, günstigste Klasse für den Fräsbetrieb
- (4) $b_q < 0.1$; sehr weiche kohäsionslose Gesteine, ungünstig für Hartgesteinsmaschinen

Diese Klassifizierung gilt streng genommen nur für Vollschnitt-Fräsmaschinen mit Disken- bzw. Rollenmeißel vom Typ Wirth oder Robbins, sollte sich aber unter Verschiebung der Grenzwerte auch auf andere Maschinentypen bzw. auf einzelne Fabrikate anwenden lassen.

In Figur 1 ist das hier besprochene Klassifizierungsdiagramm dargestellt. Es ist daraus ersichtlich, daß die 3 Sandsteinwerte in den Grenzbereich des Feldes 1 und 2 fallen, die meisten übrigen Werte (Kalke, Dolomite, Kalkbrekzien, Anhydrit etc.) dagegen in das günstige Feld 3. Diese Klassifizierung wurde später beim effektiven Tunnelausbruch weitgehend bestätigt, doch hat sich dann öfters sehr schön bestätigt, daß man nicht direkt vom Gestein (Handstücke) auf den Fels schließen

darf, wenn nicht auch noch andere Parameter berücksichtigt werden. So wurde z.B. in einem Sandstein eine Schneidleistung von 2.5 m/h erbracht, trotz dessen hoher Druckfestigkeit (130 N/mm^2) und einem Quarzgehalt von 30%. Andererseits wurden im Dolomit des Feldes 2 nur 1.55 m/h geschnitten, was für normale Dolomite viel zu niedrig ist. In beiden Fällen läßt sich die anormale Schneidleistung durch die Gesteinstextur erklären.

3. Vorhersage der Vortriebsleistung

Die laufenden Untersuchungen haben schnell gezeigt, daß die Vortriebsleistung einer Fräsmaschine nicht nur vom Basisbohrbarkeitsindex abhängt, sondern ebenso stark von der Textur des Felses und dem Anpreßdruck der Maschine. Nur wenn man diese beiden Parameter ebenfalls berücksichtigt, läßt sich eine Beziehung zwischen Felseigenschaften und Vortriebsleistung ermitteln.

Es hat sich gezeigt, daß das Vorhandensein von Trennflächen einen enormen Einfluß auf die Vortriebsleistung hat. Im Prinzip läßt sich sagen, daß die Leistung umso höher ist, je mehr Trennflächen vorhanden sind, sofern die Stabilität des Tunnels nicht gefährdet ist. So wurde im oben erwähnten Beispiel die gute Fräsleistung im Sandstein dadurch erreicht, daß derselbige sehr gut in dm-Abstände geschichtet war; der Dolomit dagegen war ausgesprochen massig und wies über Distanzen von mehreren Metern überhaupt keine Klüfte auf.

Auf empirischem Wege sind zahlreiche mögliche Beziehungen zwischen Bohrbarkeitsindex b_q , Klüftung und Vortriebsleistung geprüft worden und es hat sich schlußendlich gezeigt, daß die Einführung des Faktors k/b_q die besten Resultate ergab. k ist die Klüftfrequenz bzw. die Anzahl Trennflächen pro Laufmeter in Bohrrichtung. Die räumliche Orientierung der Trennflächen ist nicht berücksichtigt.

Trägt man die Vortriebsgeschwindigkeit in cm pro Maschinenstunde und Bruttoanpreßdruck gegen die Bohrbarkeit k/b_q auf, so liegen die entsprechenden Werte bei Verwendung logarithmischer Skalen angenähert auf einer Geraden (Figur 2). Die bis anhin ermittelten 9 Werte lassen noch keine exakte Formel ableiten, doch stimmen die bisherigen Resultate optimistisch. Es scheint erwiesen zu sein, daß man mit Hilfe 5 einfach zu bestimmender Parameter, 4 längst eingeführter, schneller und billiger Versuche sowie der ebenfalls leicht zu ermittelnden Klüftfrequenz die Vortriebsleistung einer Fräsmaschine für Hartgestein vom Typ Wirth oder Robbins recht genau voraussagen kann. Allerdings berücksichtigt diese Beziehung zusätzliche leistungsmindernde Einflüsse wie Sicherungsarbeiten und Wasseranfall nicht. Diese müssen gesondert ermittelt werden. Die errechnete Vortriebsleistung entspricht deshalb der theoretisch möglichen Maximalleistung der Maschine für ein gegebenes Gebirge.

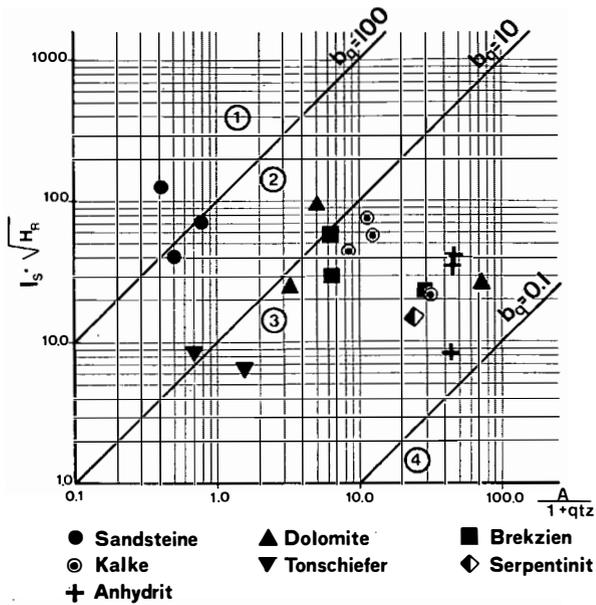


Fig. 1: Klassifizierungsdiagramm

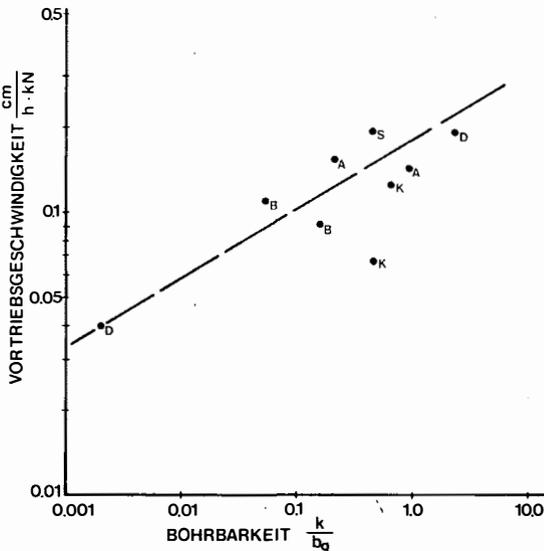


Fig. 2: Zusammenhang zwischen Vortriebsgeschwindigkeit und Bohrbarkeit, d.h. Kluftfrequenz (k) und Basisvohrbarkeitsindex (b_q). A = Anhydrit, B = Kalkbrekzie, D = Dolomit, K = Kalke, S = Sandstein.