

Einflussgrößen des Diskenmeißelverschleißes bei TBM-Vortrieben am Beispiel des Gotthard-Basistunnels

Marcus Kizaoui¹ and Edmund a Wax²

Disc Bit Abrasion Parameters in TBM Tunnelling regarded exemplarily for the Gotthard Base Tunnel

In this article the author presents Amund Bruland's empirical approach to determine the disc bit abrasion of TBMs (Tunnel Boring Machines), transforms the respective empirical dependencies into approximated mathematical relations and verifies them exemplarily for the currently constructed Gotthard Base Tunnel.

Key words: Disc Bit Abrasion, TBM, Tunnel Boring Machine, Tunnelling, Gotthard Base Tunnel.

Berechnung des Diskenmeißelverschleißes für Tunnelbohrmaschinen-Vortriebe im Festgestein

Für den Einstieg in das empirische Modell von Amund Bruland [2] [3] zur Berechnung des Diskenmeißelverschleißes bei Tunnelbohrmaschinen gibt Tabelle 1 zunächst einen Überblick über die nachfolgend verwendeten mathematischen Symbole:

Tab. 1. Übersichtslegende verwendeter mathematischer Symbole
Tab. 1. Legend of used mathematical symbols

Mathematische Symbole -	Bedeutung	[Einheit]
CLI	Cutter Life Index	
D _{AUSBR}	Tunnelausbruchsdurchmesser (= Bohrkopfdurchmesser)	[m]
H ₀	Basis-Diskensmeißel-Lebensdauer	[h]
H _f	Durchschnittliche Diskensmeißel-Lebensdauer in Ausgebrochenen Kubikmetern	[m ³]
H _h	Durchschnittliche Diskensmeißel-Lebensdauer in Maschinenstunden	[h]
H _m	Durchschnittliche Diskensmeißel-Lebensdauer in Vortriebsmetern	[m]
k _D	Bohrkopfdurchmesser-Faktor	
k _N	Diskensmeißelanzahl-Faktor	
k _{rpm}	Bohrkopfdrehzahl-Faktor	
k _Q	Quarzanteil-Faktor	
k _{Q,allg}	Quarzanteil-Faktor (allgemeine Funktion)	
k _{Q,spez}	Quarzanteil-Faktor (spezielle Funktion)	
N ₀	Modell-Theoretische Diskensmeißel-Anzahl	
N _{tbm}	Faktische Diskensmeißel-Anzahl	
QUZ	Quarzanteil	[%]
r _{durch}	„Durchschnittliche Meißelposition“ (Durchschnittlicher Radius)	[m]
U	Bohrkopfdrehzahl	[min ⁻¹]

Die Berechnung des Diskenmeißelverschleißes bzw. der durchschnittlichen Diskensmeißel-Lebensdauer erfolgt auf der Basis des so genannten „Cutter Life Index“ CLI, der mittels zweier Testwerte bestimmt wird: Dem „Siever's J-Value SJ“ und dem so genannten „Abrasion Value Steel AVS“. Der „Siever's J-Value SJ“ ergibt sich aus einer Versuchsanordnung, bei welcher ein sehr kleines Rotationsbohrwerkzeug in den Probesteinskörper eindringt und dessen Eindringtiefe nach 200 Umdrehungen in Zehntel Millimetern gemessen wird. Zur Bestimmung des „Abrasion Value Steel AVS“ wird zerkleinertes Gestein, dessen Korngröße maximal 1 mm beträgt, auf eine sich drehende Stahlscheibe aufgebracht und ein Probe-Stahlmeißel mit einem Gewicht von 10 kg auf diese Scheibe gepresst. Der AVS bezeichnet hierbei den Gewichtsverlust des Probe-Stahlmeißels in mg nach fünf Minuten bzw. 100 Umdrehungen der Scheibe. Der CLI errechnet sich dann wie folgt: [3] [4]

$$\text{CLI} = 13,84 \cdot \text{SJ}^{0,3847} \cdot \text{AVS}^{-0,3847} \quad (1)$$

mit CLI : „Cutter Life Index“

Bruland hat den CLI für eine Reihe von Gesteinsarten empirisch ermittelt (siehe Bild 1 (oben)) und auf dieser Basis für den Diskensmeißelverschleiß ein Berechnungsmodell mit praktischem Wert entwickelt:

¹ Dipl.-Wirtsch.-Ing. Marcus Kizaoui, CSAGT International GmbH, Am Tiergarten 1, D-66386 St.Ingbert, Deutschland

² prof. Dr.-Ing. PhD., Saarlouis, Industrie strasse 4, Deutschland
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 19. 10. 2005)

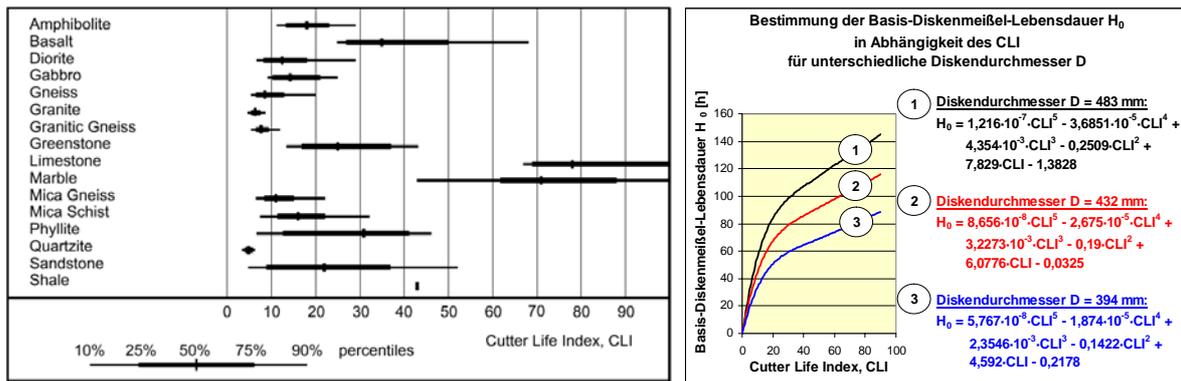


Bild 1. Oben: Empirisch ermittelte spezifische CLI-Werte für verschiedene Gesteine [2]; Unten: Kurvenverlauf zur Bestimmung der Basis-Diskemeißel-Lebensdauer H_0 in Abhängigkeit des CLI für verschiedene Diskendurchmesser D [2] sowie die Kurvenverläufe annähernde Polynom-Funktionen (vom Autor bestimmt)

Fig. 1. Above: Empirically determined specific CLI values for different rock types [2]; Below: Curve progression for determining the base disc bit lifetime H_0 in dependence of the CLI for different disc diameters D [2] as well as polynomial functions approximating the curve progressions (functions determined by the author)

Der CLI-Wert des jeweiligen Gesteins wird zur Bestimmung einer Basis-Diskemeißel-Lebensdauer H_0 gemäß Bild 1 (unten) herangezogen, wobei sich die gezeigten Kurvenverläufe in Abhängigkeit des Diskendurchmessers D durch folgende Beziehungen mathematisch annähern lassen:

$$H_{0,D=483} = 1,216 \cdot 10^{-7} \cdot \text{CLI}^5 - 3,6851 \cdot 10^{-5} \cdot \text{CLI}^4 + 4,354 \cdot 10^{-3} \cdot \text{CLI}^3 - 0,2509 \cdot \text{CLI}^2 + 7,829 \cdot \text{CLI} - 1,3828 \quad (2)$$

($D = 483$ mm)

$$H_{0,D=432} = 8,656 \cdot 10^{-8} \cdot \text{CLI}^5 - 2,675 \cdot 10^{-5} \cdot \text{CLI}^4 + 3,2273 \cdot 10^{-3} \cdot \text{CLI}^3 - 0,19 \cdot \text{CLI}^2 + 6,0776 \cdot \text{CLI} - 0,0325 \quad (3)$$

($D = 432$ mm)

$$H_{0,D=394} = 5,767 \cdot 10^{-8} \cdot \text{CLI}^5 - 1,874 \cdot 10^{-5} \cdot \text{CLI}^4 + 2,3546 \cdot 10^{-3} \cdot \text{CLI}^3 - 0,1422 \cdot \text{CLI}^2 + 4,592 \cdot \text{CLI} - 0,2178 \quad (4)$$

($D = 394$ mm)

mit H_0 : Basis- Diskemeißel-Lebensdauer [h]

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Brustmeißeln relativ einem geringeren Verschleiß unterliegen als Zentrumsmeißeln (Mehrfachmeißeln auf einer Rolle) und Kalibermeißeln (rascher asymmetrischer Verschleiß bedingt durch extrem schräge Anordnung am Bohrkopfrand). Bei zunehmendem Bohrkopfdurchmesser sinkt jedoch das Verhältnis zwischen Zentrums- und Kalibermeißeln einerseits und Brustmeißeln andererseits, so dass ein entsprechender Bohrkopfdurchmesser-Faktor k_D zu bestimmen ist. Bild 2 zeigt den entsprechenden Kurvenverlauf, der näherungsweise durch folgenden Term darstellbar ist:

$$k_D = 0,618 \cdot \ln(D_{\text{AUSBR}}) + 0,2131 \quad (5)$$

mit k_D : Bohrkopfdurchmesser-Faktor

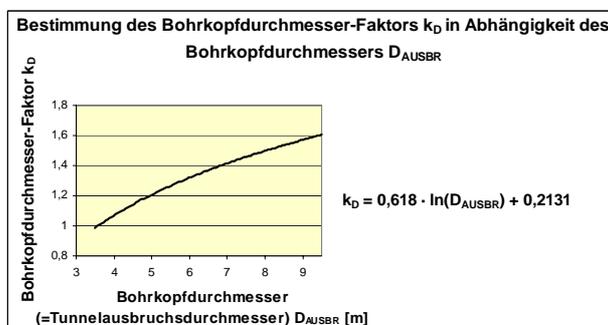


Bild 2. Kurvenverlauf zur Bestimmung des Bohrkopfdurchmesserfaktors k_D in Abhängigkeit des Bohrkopfdurchmessers D_{AUSBR} [2] sowie den Kurvenverlauf annähernde logarithmische Funktion (vom Autor bestimmt)

Fig. 2. Curve progression for determining the drill head diameter D_{AUSBR} [2] as well as logarithmic function approximating the curve progression (function determined by the author)

Bruland legt eine Modell-Theoretische (vermeintlich optimale) Diskemeißel-Anzahl N_0 in Abhängigkeit von Bohrkopfdurchmesser D_{AUSBR} und Diskendurchmesser D zu Grunde. Die betreffenden Kurvenverläufe von N_0 (D_{AUSBR}) gemäß Bild 3 (oben) schlagen sich in nachstehenden Näherungsbeziehungen nieder:

$$N_{0,D}=394 = 40,397 \ln(D_{AUSBR}) - 24,805 \quad (D = 394 \text{ mm}) \quad (6)$$

$$N_{0,D}=432 = 36,391 \ln(D_{AUSBR}) - 20,869 \quad (D = 432 \text{ mm}) \quad (7)$$

$$N_{0,D}=483 = 33,407 \ln(D_{AUSBR}) - 17,937 \quad (D = 483 \text{ mm}) \quad (8)$$

mit N_0 : Modell-Theoretische Diskenmeißel-Anzahl

Es ist anzumerken, dass hierbei die **Bruland**'schen Kurvenverläufe für $D = 394 \text{ mm}$ und 483 mm durch den Verfasser um einen angenäherten Verlauf für $D = 432 \text{ mm}$ gemäß Gleichung (38) ergänzt wurden:

$$N_{0,D}=432 (D_{AUSBR}) = N_{0,D}=394 (D_{AUSBR}) - (432-394)4(483-394) / (N_{0,D}=394 (D_{AUSBR}) - N_{0,D}=483 (D_{AUSBR})) \quad (9)$$

Hieraus resultiert der Diskenmeißelanzahl-Faktor k_N , der die faktische Diskenmeißel-Anzahl $N_{t\text{b}\text{m}}$ zu N_0 ins Verhältnis setzt:

$$k_N = N_{t\text{b}\text{m}} \cdot N_0^{-1} \quad (10)$$

mit $N_{t\text{b}\text{m}}$: Faktische Diskenmeißel-Anzahl

Auch die Gesteinhärte muss in die Berechnung der Meißel-Lebensdauer einfließen. Dies wird in Form des Quarzgehalts QUZ des jeweiligen Gesteins realisiert, gemäß Bild 3 (unten). Die dunklere Kurve repräsentiert hierbei den allgemeinen Zusammenhang zwischen QUZ und dem entsprechenden Quarzanteil-Faktor k_Q . Die hellere Kurve steht für einen speziellen abweichenden Verlauf der Funktion k_Q (QUZ) bezüglich der angegebenen Gesteine, der allerdings nur Anwendung findet, wenn der Quarzgehalt eines dieser Gesteine unter 30 % liegt. Die Näherungsfunktionen für k_Q (QUZ) lauten wie folgt:

$$k_{Q,\text{allg}} = 9,0909 \cdot 10^{-5} \cdot \text{QUZ}^2 - 1,9265 \cdot 10^{-2} \cdot \text{QUZ} + 1,7107 \quad (11)$$

$$k_{Q,\text{spez}} = 2,8750 \cdot 10^{-7} \cdot \text{QUZ}^5 - 2,1803 \cdot 10^{-5} \cdot \text{QUZ}^4 + 5,0976 \cdot 10^{-4} \cdot \text{QUZ}^3 - 3,1465 \cdot 10^{-3} \cdot \text{QUZ}^2 + 1,2139 \cdot 10^{-2} \cdot \text{QUZ} + 0,5891 \quad (12)$$

mit $k_{Q,\text{allg}}$: Quarzanteil-Faktor k_Q (allgemeine Funktion)

$k_{Q,\text{spez}}$: Quarzanteil-Faktor k_Q (spezielle Funktion)

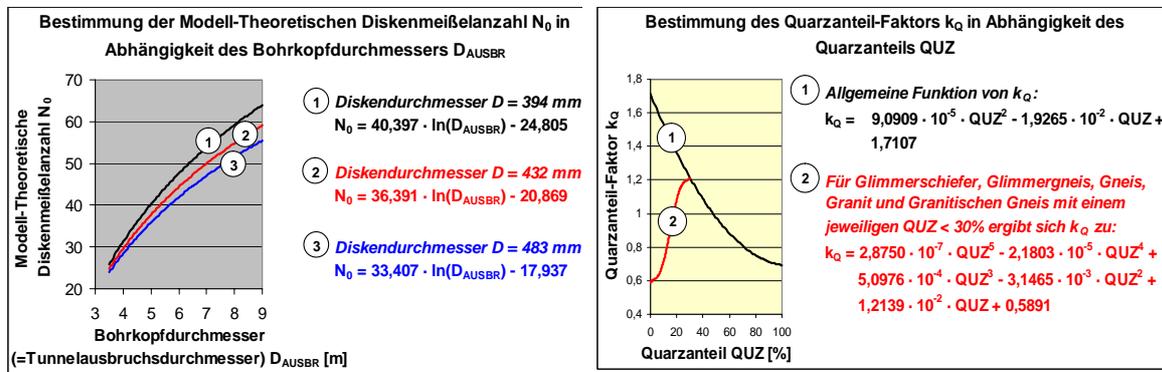


Bild 3. Oben: Kurvenverläufe zur Bestimmung der Modell-Theoretischen Diskenmeißelanzahl N_0 in Abhängigkeit des Bohrkopfdurchmessers D_{AUSBR} [2] sowie die Kurvenverläufe annähernde logarithmische Funktionen (vom Autor bestimmt); Unten: Kurvenverläufe zur Bestimmung des Quarzanteil-Faktors k_Q in Abhängigkeit des Quarzanteils QUZ [2] sowie die Kurvenverläufe annähernde Polynom-Funktionen (vom Autor bestimmt)

Fig. 3. Above: Curve progressions for determining the model-based theoretic number of discBits N_0 in dependence of the drill head diameter D_{AUSBR} [2] as well as logarithmic functions approximating the curve progressions (functions determined by the author); Below: Curve progressions for determining the Quartz content factor k_Q in dependence of the Quartz content QUZ [2] as well as polynomial functions approximating the curve progressions (functions determined by the author)

Schließlich besteht eine umgekehrte Proportionalität der Diskenmeißel-Lebensdauer zur Bohrkopfdrehzahl U , die laut **Bruland** in dem Bohrkopfdrehzahl-Faktor k_{rpm} Ausdruck findet:

$$k_{rpm} = 50 \cdot D_{AUSBR}^{-1} \cdot U^{-1} \quad (13)$$

Damit sind alle Eingangsgrößen der durchschnittlichen Diskenmeißel-Lebensdauer („Meißel in durchschnittlicher Position“) definiert, die sich gemäß den Gleichungen (14), (15) und (16) ergibt:

$$H_h = H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{rpm} \quad [h] \quad (14)$$

$$H_m = H_h \cdot I_{NETTO} \quad [m] \quad (15)$$

$$H_f = H_m \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D_{AUSBR}^2 \quad [m^3] \quad (16)$$

mit H_h : Durchschnittliche Diskenmeißel-Lebensdauer in Maschinenstunden [h]
 mit H_m : Durchschnittliche Diskenmeißel-Lebensdauer in Vortriebsmetern [m]
 mit H_f : Durchschnittliche Diskenmeißel-Lebensdauer in Ausgebrochenen Kubikmetern [m³]
 mit I_{NETTO} : Netto-Vortriebsleistung [m · h⁻¹]

Bezüglich der Netto-Vortriebsleistung ist anzumerken, dass diese den durchschnittlich - bei gegebenen Gebirgs-, Gesteins- und maschinellen Parametern - theoretisch pro Stunde auffahrbaren Vortriebsmetern entspricht, wenn keine Vortriebsunterbrechungen stattfinden würden. Die effektive bzw. tatsächliche Vortriebsleistung ergibt sich dann durch Multiplikation der Netto-Vortriebsleistung mit der verfügbaren Nutzbarkeit (=Effektive Bohrzeit pro Tag in %). Auch zur Berechnung der Netto-Vortriebsleistung hat Bruland einen empirischen Ansatz entwickelt, auf den an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen wird (Für Näheres zu diesem Ansatz vgl. [2], [3] und [5]).

Weiterhin möchte der Autor noch darauf hinweisen, dass sich die „durchschnittliche Meißelposition“ r_{durch} (durchschnittlicher Radius) bei 4 Kalibermeißeln wie folgt errechnet:

$$r_{durch} = (1 + \dots + (N_{tbn} - 1) + 4) \cdot N_{tbn}^{-1} \cdot 0,5 \cdot D_{AUSBR} \quad [m] \quad (17)$$

mit r_{durch} : „Durchschnittliche Meißelposition“ (durchschnittlicher Radius) [m]

Überprüfung der Berechnungsansätze am Beispiel eines realen Gripper-TBM-Vortriebs

Nachfolgend werden die oben dargestellten mathematischen Zusammenhänge zur Berechnung des Diskenmeißelverschleißes am Beispiel des neu entstehenden Gotthard-Basistunnels in der Schweiz verifiziert, der nach Fertigstellung eine Gesamtlänge von ca. 57 km umfassen wird. Die Berechnungen beziehen sich hierbei auf den Teilabschnitt zwischen Amsteg und Sedrun. Dieser umfasst die Auffahrung zweier paralleler Tunnelabschnitte von jeweils 11,35 km mittels Gripper-Tunnelbohrmaschinen, wobei die für das Gesamtprojekt verantwortliche AlpTransit Gotthard AG und die den genannten Teilabschnitt ausführende Arbeitsgemeinschaft Murer-Strabag es dankenswerterweise dem Verfasser gestattet haben, die vor Ort ablaufenden Prozesse zu beobachten und zu analysieren. Tabelle 2 listet die für die nachfolgenden Berechnungen als gegeben anzusehenden Größen auf:

Tab. 2. Gegebene Berechnungsgrößen
 Tab. 2. Given calculation parameters

Gegebene qualitative und quantitative Größen bezüglich des Vortriebs zwischen Amsteg und Sedrun / Schweiz (Gotthard-Basistunnel)		
Größen	Ausprägung	Bemerkungen
Hauptgesteinsarten	Granit, Gneis	Vor-Ort-Information
Durchschnittlicher Wert von CLI für Granitgesteine	6,1	vgl. Bild 1, oben
Durchschnittlicher Wert von CLI für Gneisgesteine	8,4	vgl. Bild 1, oben
Geschätzter durchschnittlicher Quarzgehalt QUZ relativ harter Granitgesteine wie dem „Aare-Granit“	ca. 40%	Aare-Granit (vgl. [1])
Geschätzter durchschnittlicher Quarzgehalt QUZ relativ harter Gneisgesteine wie dem „Erstfelder Gneis“	ca. 50%	Erstfelder Gneis (vgl. [1])
Diskendurchmesser der eingesetzten Diskenmeißeln (D)	17" (432 mm)	Vor-Ort-Information
Bohrkopfdurchmesser (= Tunnelausbruchsdurchmesser) (D _{AUSBR})	9580 mm	Vor-Ort-Information
Anzahl der Diskenmeißeln am Bohrkopf (N _{tbn})	62	4 Kalibermeißeln, 58 Zentrums- und Brustmeißeln (Vor-Ort-Information)
Durchschnittliche Anzahl der Bohrkopfumdrehungen pro Minute (U)	ca. 5 · min ⁻¹	U ist zwischen 0-6 min ⁻¹ stufenlos variierbar (Vor-Ort-Information)

Die Überprüfung der Berechnungsansätze erfolgt in den beiden Schritten „Berechnung der durchschnittlichen Diskenmeißel-Lebensdauer“ und „Relativierung der errechneten an der real erzielten Diskenmeißel-Lebensdauer“:

a) Berechnung der durchschnittlichen Diskenmeißel-Lebensdauer

a1) Bestimmung der Basis-Diskenmeißel-Lebensdauer H_0 :

Einfließende Formel:

- (3) $H_{0,D=432} \sim 8,656 \cdot 10^{-8} \cdot \text{CLI}^5 - 2,675 \cdot 10^{-5} \cdot \text{CLI}^4 + 3,2273 \cdot 10^{-3} \cdot \text{CLI}^3 - 0,19 \cdot \text{CLI}^2 + 6,0776 \cdot \text{CLI} - 0,0325$ (D = 432 mm)
- a1.1) Berechnung der Basis-Diskensmeißel-Lebensdauer H_0 für *Granit*:
 H_0 (*Granit*) wird für den durchschnittlichen CLI-Wert 6,1 von Granitgesteinen näherungsweise errechnet zu $H_{0,D=432}$ (CLI = 6,1) $\sim 30,670$
- a1.2) Berechnung der Basis-Diskensmeißel-Lebensdauer H_0 für *Gneis*:
 H_0 (*Gneis*) wird für den durchschnittlichen CLI-Wert 8,4 von Gneisgesteinen näherungsweise errechnet zu $H_{0,D=432}$ (CLI = 8,4) $\sim 39,396$
- a2) Bestimmung des Bohrkopfdurchmesser-Faktors k_D :
 Einfließende Formel:
 (5) $k_D \sim 0,618 \cdot \ln(D_{\text{AUSBR}}) + 0,2131$
 k_D (D_{AUSBR} = 9,580 m) $\sim 1,610$
- a3) Bestimmung der Modell-Theoretischen Diskensmeißel-Anzahl N_0 :
 Einfließende Formel:
 (7) $N_{0,D=432} = 36,391 \cdot \ln(D_{\text{AUSBR}}) - 20,869$ (D = 432 mm)
 N_0 (D_{AUSBR} = 9,580 m) $\sim 61,363$
- a4) Bestimmung des Diskensmeißelanzahl-Faktors k_N :
 Einfließende Formel:
 (10) $k_N = N_{\text{tbm}} \cdot N_0^{-1}$
 $k_N \sim 62 \cdot (1461,363) = 1,010$
- a5) Bestimmung des Quarzanteil-Faktors k_Q :
 Einfließende Formel:
 (11) $k_{Q,\text{allg}} = 9,0909 \cdot 10^{-5} \cdot \text{QUZ}^2 - 1,9265 \cdot 10^{-2} \cdot \text{QUZ} + 1,7107$
- a5.1) Berechnung des Quarzanteil-Faktors k_Q für *Granit*:
 $k_{Q,\text{allg}}$ (*Granit*) wird für einen geschätzten durchschnittlichen Quarzanteil QUZ von 40 % („Aare-Granit“ ist ein verhältnismäßig harter Granit) näherungsweise errechnet zu k_Q (QUZ = 40 %) $\sim 1,086$
- a5.2) Berechnung des Quarzanteil-Faktors k_Q für *Gneis*:
 $k_{Q,\text{allg}}$ (*Gneis*) wird für einen geschätzten durchschnittlichen Quarzanteil QUZ von 50 % („Erstfelder Gneis“ ist ein verhältnismäßig harter Gneis) näherungsweise errechnet zu k_Q (QUZ = 50 %) $\sim 0,975$
- a6) Bestimmung des Bohrkopfdrehzahl-Faktors k_{rpm} :
 Einfließende Formel:
 (13) $k_{\text{rpm}} = 50 \cdot D_{\text{AUSBR}}^{-1} \cdot U^{-1}$
 $k_{\text{rpm}} \sim 50 \cdot (149,580) \cdot (145) = 1,044$
- a7) Berechnung der durchschnittlichen Diskensmeißel-Lebensdauer H_h / H_m :
 Einfließende Formeln:
 (14) $H_h = H_0 \cdot k_D \cdot k_N \cdot k_Q \cdot k_{\text{rpm}}$ [h]
 (15) $H_m = H_h \cdot I_{\text{NETTO}}$ [m]
- a7.1) Berechnung von H_h / H_m für *Granit*:
 H_h (*Granit*) $\sim 30,67 \cdot 1,61 \cdot 1,01 \cdot 1,086 \cdot 1,044$ h = 56,545 h
 H_m (*Granit*) $\sim 56,545 \cdot 1,695$ m = 95,844 m ***
- a7.2) Berechnung von H_h / H_m für *Gneis*:
 H_h (*Gneis*) $\sim 39,396 \cdot 1,61 \cdot 1,01 \cdot 0,975 \cdot 1,044$ h = 65,209 h
 H_m (*Gneis*) $\sim 65,209 \cdot 1,767$ m = 115,224 m ***

*** Die mittleren Netto-Vortriebsleistungen $1,695 \text{ m h}^{-1}$ und $1,767 \text{ m h}^{-1}$ hat der Autor im Rahmen der Anwendung des oben bereits genannten empirischen Ansatzes von Bruland zur Berechnung der Netto-Vortriebsleistung auf den gleichen Vortrieb ermittelt. Da diese ermittelten Werte durch deren Multiplikation mit der vor Ort beobachteten mittleren verfügbaren Nutzbarkeit im Ergebnis nahe bei den tatsächlichen effektiven Vortriebsleistungen lagen, lässt der Autor sie hier einfließen (Für Näheres zu diesen Berechnungen vgl. [5]).

b) Relativierung der errechneten an der real erzielten Diskensmeißel-Lebensdauer:

Die real erzielte durchschnittliche Diskensmeißel-Lebensdauer beträgt nach Vor-Ort-Informationen ca. 100 m. Da laut der obigen Berechnungen die durchschnittliche Diskensmeißel-Lebensdauer zwischen 95,844 m und 115,224 m liegen müsste (Um einen genauen Wert zu errechnen, müsste das Verhältnis Granit / Gneis entlang des gesamten Tunnelabschnitts bekannt sein), ergeben sich somit offenbar auch für die durchschnittliche Diskensmeißel-Lebensdauer gute Annäherungen.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Artikels hat der Autor zunächst Amund Bruland's empirisches Modell zur Bestimmung des Diskenmeißelverschleißes bei TBM-Festgesteinsvortrieben vorgestellt, die betreffenden empirischen Abhängigkeiten in mathematische Näherungsbeziehungen überführt und schließlich letztere anhand des derzeit im Bau befindlichen Gotthard-Basistunnels bzw. des im Gripper-TBM-Vortrieb aufgefahrenen Teilabschnitts zwischen Amsteg und Sedrun mit positivem Ergebnis praktisch verifiziert. Die dort gewonnene Erkenntnis, dass die Diskenmeißelverschleißkosten einen entscheidenden Wirtschaftlichkeitsfaktor für maschinelle Festgesteinsvortriebe darstellen, ist hierbei als Anlass für die eingehende Auseinandersetzung des Autors mit den Diskenmeißelverschleiß-Einflussgrößen zu sehen, da eine fortwährende gezielte Reduktion der Diskenmeißelverschleißkosten nur mittels praktisch anwendbarer und vielfach abgesicherter Erkenntnisse bezüglich der entsprechenden Abhängigkeiten möglich erscheint.

Literatur - References

- [1] AGN Amsteg Los 252 (Murer-Strabag AG): <http://www.agn-amsteg.ch>, Amsteg / Schweiz, 2005.
- [2] Bruland, A.: Hard Rock Tunnel Boring – Advance Rate and Cutter Wear, *Trondheim, 1998*.
- [3] Bruland, A.: Hard Rock Tunnel Boring – Drillability Test Methods, *Trondheim, 1998*.
- [4] Blindheim, O., T., Bruland, A.: Boreability Testing, in: Norwegian TBM Tunnelling - 30 Years of Experience with TBMs in Norwegian Tunnelling, *Oslo, 1998*.
- [5] Kizaoui, M.: Ökonomische Bedeutung der ISO-Normen für Qualitäts- und Umweltmanagementsysteme für Berg und Tunnelbau und Geotechnik, *Košice, 2005*.