

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

*Marcus Kizaoui<sup>1</sup> and Edmund a Wax<sup>2</sup>*

### *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 <sub>AUSBR</sub>	Tunnelausbruchsdurchmesser (= Bohrkopfdurchmesser)	[m]
H <sub>0</sub>	Basis-Diskemeißel-Lebensdauer	[h]
H <sub>f</sub>	Durchschnittliche Diskemeißel-Lebensdauer in Ausgebrochenen Kubikmetern	[m <sup>3</sup> ]
H <sub>h</sub>	Durchschnittliche Diskemeißel-Lebensdauer in Maschinenstunden	[h]
H <sub>m</sub>	Durchschnittliche Diskemeißel-Lebensdauer in Vortriebsmetern	[m]
k <sub>D</sub>	Bohrkopfdurchmesser-Faktor	
k <sub>N</sub>	Diskemeißelanzahl-Faktor	
k <sub>rpm</sub>	Bohrkopfdrehzahl-Faktor	
k <sub>Q</sub>	Quarzanteil-Faktor	
k <sub>Q,allg</sub>	Quarzanteil-Faktor (allgemeine Funktion)	
k <sub>Q,spez</sub>	Quarzanteil-Faktor (spezielle Funktion)	
N <sub>0</sub>	Modell-Theoretische Diskemeißel-Anzahl	
N <sub>tbm</sub>	Faktische Diskemeißel-Anzahl	
QUZ	Quarzanteil	[%]
r <sub>durch</sub>	„Durchschnittliche Meißelposition“ (Durchschnittlicher Radius)	[m]
U	Bohrkopfdrehzahl	[min <sup>-1</sup> ]

Die Berechnung des Diskenmeißelverschleißes bzw. der durchschnittlichen Diskemeißel-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 Diskemeißelverschleiß ein Berechnungsmodell mit praktischem Wert entwickelt:

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

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

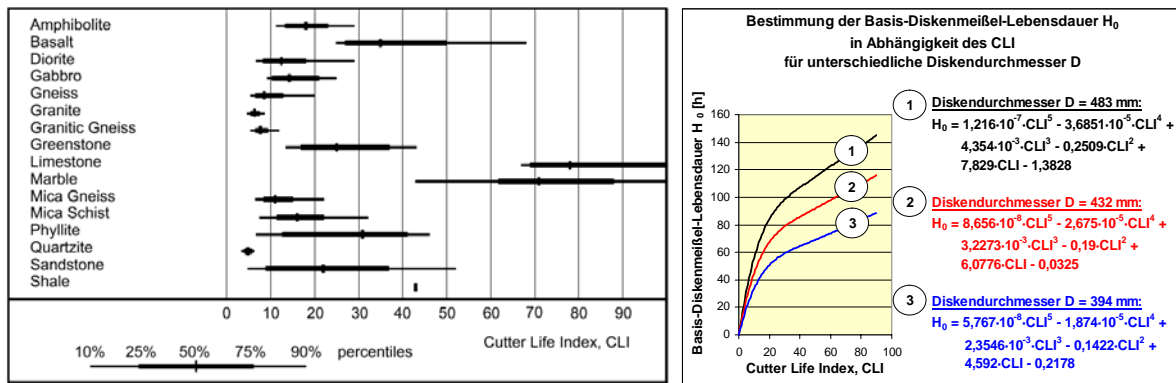


Bild 1. Oben: Empirisch ermittelte spezifische CLI-Werte für verschiedene Gesteine [2]; Unten: Kurvenverlauf zur Bestimmung der Basis-Diskemeißel-Lebensdauer  $H_0$  in Abhängigkeit des CLI für verschiedene Diskendurchmesser D [2] sowie die Kurvenverläufe annähernde Polynom-Funktionen (vom Autor bestimmt)

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:

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

(D = 483 mm)

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

(D = 432 mm)

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

(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:

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

mit  $k_D$  : Bohrkopfdurchmesser-Faktor

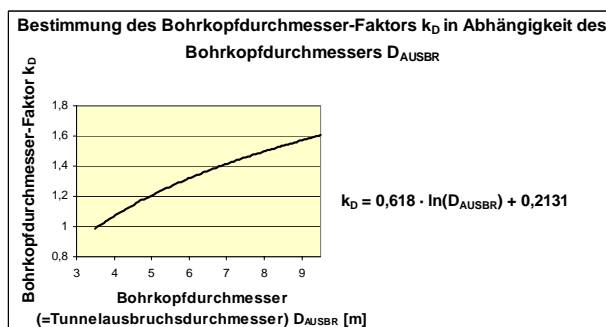


Bild 2. Kurvenverlauf zur Bestimmung des Bohrkopfdurchmesserfaktors  $k_D$  in Abhängigkeit des Bohrkopfdurchmessers  $D_{AUSBR}$  [2] sowie den Kurvenverlauf annähernde logarithmische Funktion (vom Autor bestimmt)

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  $483 \text{ mm}$  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  $N_{t\text{b}m}$  zu  $N_0$  ins Verhältnis setzt:

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

mit  $N_{t\text{b}m}$ : 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)

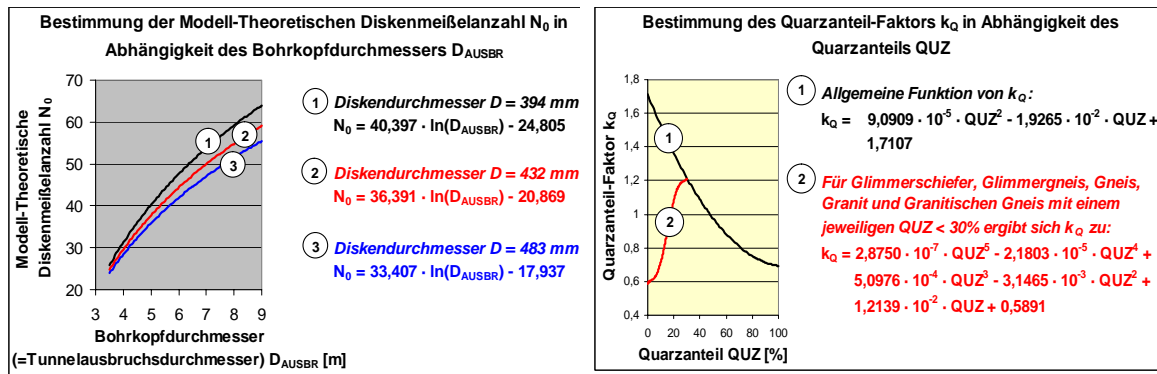


Bild 3. Oben: Kurvenverläufe zur Bestimmung der Modell-Theoretischen Diskenmeißelanzahl  $N_0$  in Abhängigkeit des Bohrkopfdurchmessers  $D_{AUSBR}$  [2] sowie die Kurvenverläufe annähernde logarithmische Funktionen (vom Autor bestimmt); Unten: Kurvenverläufe zur Bestimmung des Quarzanteil-Faktors  $k_Q$  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 [m<sup>3</sup>]  
 mit  $I_{NETTO}$ : Netto-Vortriebsleistung [m · h<sup>-1</sup>]

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 <sub>AUSBR</sub> )	9580 mm	Vor-Ort-Information
Anzahl der Diskenmeißeln am Bohrkopf (N <sub>tbn</sub> )	62	4 Kalibermeißeln, 58 Zentrums- und Brustmeißeln (Vor-Ort-Information)
Durchschnittliche Anzahl der Bohrkopfumdrehungen pro Minute (U)	ca. 5 · min <sup>-1</sup>	U ist zwischen 0-6 min <sup>-1</sup> 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-Diskenmeißel-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-Diskenmeißel-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<sub>AUSBR</sub> = 9,580 m)  $\sim 1,610$
- a3) Bestimmung der Modell-Theoretischen Diskenmeißel-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<sub>AUSBR</sub> = 9,580 m)  $\sim 61,363$
- a4) Bestimmung des Diskenmeißelanzahl-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  $k_{\text{rpm}}$ :  
 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 Diskenmeißel-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 Diskenmeißel-Lebensdauer:

Die real erzielte durchschnittliche Diskenmeißel-Lebensdauer beträgt nach Vor-Ort-Informationen ca. 100 m. Da laut der obigen Berechnungen die durchschnittliche Diskenmeißel-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 Diskenmeißel-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*.