

13 Diskussion zur Prognose des Diskenverschleißes beim TBM-Vortrieb

Von Markus Spiegel

13.1 Einleitung

Neben der Prognose der Penetration bzw. der erzielbaren Vortriebsleistung spielt der Diskenverschleiß aus wirtschaftlicher Sicht beim TBM-Vortrieb eine gewichtige Rolle. Bei Verkehrstunnelbauten mit 9–10m Durchmesser kann der Zusammenhang:

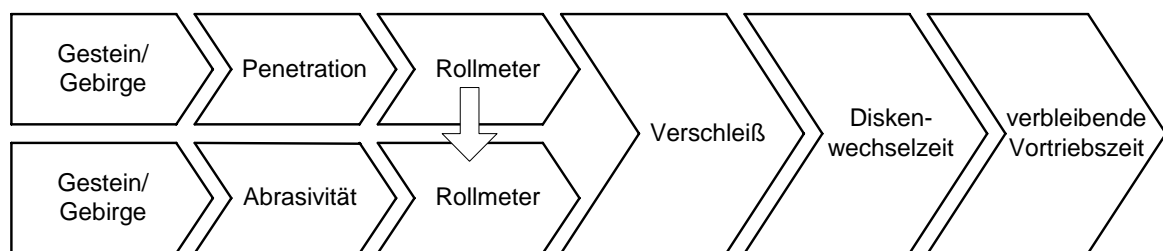


Abbildung 100: Zusammenhang Penetration – Abrasivität – Verschleiß - Vortriebszeit

die erzielbare tägliche Vortriebsleistung auch ohne umfangreichen Stützmitteleinbau stark limitieren. Wobei die Diskenrollmeter pro Bohrkopfumdrehung [9]:

- mit dem Durchmesser der TBM quadratisch ansteigen
- näherungsweise linear mit UCS zunehmen (GEHRING [1])

und der Verschleiß

- stark überproportional mit steigendem CAI-Wert (Cerchar-Abrasivitäts-Index) zunimmt (im Detail siehe weiter unten)

Die Anzahl der dadurch notwendigen Diskenwechsel bzw. die dafür erforderliche Zeit kann unter bestimmten ungünstigen Randbedingungen (Gebirge/Gestein, TBM-Ø) die geplante Wartungsschicht überschreiten und reduziert in Folge die mögliche Vortriebszeit.

Dies führt zu wesentlich geringeren täglichen Vortriebsleistungen. Die Wirtschaftlichkeit von TBM-Vortrieben kann bei unzutreffender Prognose (Gesteinskennwerte (AG), Diskenverschleiß (AN)) in Frage gestellt sein.

Die praktische Penetrationsleistung einer TBM wird nicht nur durch z.B. die einachsige Gesteinsdruckfestigkeit (UCS)[1], sondern noch von maschinentechnischen, geologisch/geotechnisch/felsmechanischen und baubetrieblichen Einflüssen bestimmt. Darauf wird im nachfolgenden Beitrag nicht eingegangen. Die Bohrkopfgestaltung zur Minimierung der Diskenwechselzeit wird ebenfalls nicht behandelt.

Verwendete Abkürzungen:

C	Cutter (Diske)
TM	Tunnelmeter
RM	Rollmeter (einer Diske)
UCS	einachsige Gesteinsdruckfestigkeit

13.2 Problemstellung

Die gebräuchlichen Verfahren zur Prognose des Diskenverschleißes gehen teilweise von unterschiedlichen Eingangsparametern aus und führen zu stark abweichenden Verschleißprognosen [1][2][3][4][5][6][7][8].

Nachfolgender Beitrag soll einen Denkanstoß für die Notwendigkeit weitergehender Grundlagenuntersuchungen liefern.

Einflüsse auf den Verschleiß:

Der eigentliche Diskenverschleiß durch den „Kontakt“ mit dem Gestein/Gebirge/Bohrklein hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Abrasivität des Gesteins → schleifscharfe Minerale z.B. Reinquarz, Quarzäquivalent → häufig charakterisiert durch den CAI-Wert
- Verhältnisse Kaliber- und Zentrumsdisken zur Gesamtdiskenzahl am Bohrkopf
- Bohrkopfschutz, Abweiserkeile vor den Disken
- Gewaltschäden mit Baugrundbezug (Blockigkeit der Ortsbrust)
- Gewaltschäden aus Fehlbedienung (Intervalle der Diskeninspektionen, usw.)

Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) :

In Mitteleuropa wird in Ausschreibungen für TBM-Lose meist der Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) und der Quarzgehalt (evt. Quarzäquivalent) als Maß für die Abrasivität des zu lösenden Gesteins angegeben. Die anderen der oben angeführten Einflüsse sind primär im Verantwortungsbereich des Unternehmers (Bohrkopfdesign, Mannschaft usw.).

13.3 Prognoseverfahren

Zur gedanklichen Aktualisierung werden die gängigen Verfahren hier kurz wiederholt.

GEHRING

Das Verfahren nach GEHRING [1][2] liefert für beide Basiswerte (Penetration, Diskenverschleiß) ein integriertes Berechnungsverfahren. Aufgrund seiner praktischen Anwendbarkeit - mit den meist zum Kalkulationszeitpunkt zur Verfügung stehenden Informationen - wird es häufig angewandt.

Die Penetration ist bei GEHRING linear reziprok von UCS abhängig. Die pro Tunnelmeter (TM) erforderlichen Umdrehungen des Bohrkopfes sind damit linear von UCS abhängig. Mittels Korrekturfaktoren kann die Penetration an die örtlichen Verhältnisse angepasst werden [8][9].

$P \text{ [mm/U]} = \frac{K \times \bar{F}_N}{UCS^z}$	P [mm/U]	.....	Penetration = Eindringtiefe pro Bohrkopfumdrehung
	\bar{F}_N [kN]	.....	Mittlere Andruckkraft pro Cutter
vereinfacht:	K	.....	Vorschlag GEHRING für K = 4 bei $F_N = 200\text{kN}$
	UCS[N/mm ²]	.....	einachsige Gesteinsdruckfestigkeit
$P \text{ [mm/U]} = \frac{4 \times 200}{UCS}$	z	.....	Wertebereich für z nach Auswertung GEHRING 1995) ¹ : 0,98 bis 1,29 Vorschlag GEHRING 1995 z = 1,0 (Vorschlag FUKUI et.al. 1996 z = 1,0 [13] Vorschlag BÜCHI 1998 z = 1,1 [3])
	$K \times \bar{F}_N$	.....	Wertebereich für K x F_N nach Auswertung GEHRING 1995: 700 bis 3500 Vorschlag GEHRING 1995: K x $F_N = 4 \times 200 = 800$

Tabelle 7: Formeln und zugehörige Variablen bzw. Konstanten nach GEHRING (ohne Korrekturfaktoren) [1][2]

¹ Auswertung durch GEHRING aus Daten aus BÜCHI 1983 und anderen Quellen

Das Verfahren nach GEHRING zur Ermittlung des Diskenverschleißes stützt sich auf den CAI-Wert und gibt den Gewichtsverlust der Diske v_S in mg/RM an.

$$v_S [mg / RM] = 0,73 \times CAI^{1,93}$$

Dieser Zusammenhang zur Ermittlung des Diskenverschleißes basiert auf eigenen Auswertungen von GEHRING [1]. GEHRING schlägt 1995 [1] für zukünftig höhere Materialqualitäten eine Reduktion des Faktors 0,73 ohne Angabe einer Größenordnung vor. In Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein von MAIDL B., SCHMID L., RITZ W., HERRENKNECHT M. [10, S. 44] wird für die Formel nach GEHRING eine Reduktion des Faktors auf 0,65 als der aktuellen Realität entsprechend postuliert.

$$v_S [mg / RM] = 0,65 \times CAI^{1,93}$$

Im Vortrieb kann der Verschleiß praktisch nicht als Gewichtsverlust, sondern nur als Radiusverringern gemessen werden.

Die Umrechnung für eine 17“ Diske kann näherungsweise mit der linearen Beziehung 24 mm Radiusverringern / 5.000g erfolgen (vgl. Bild 16, GEHRING 1995 [1]). Die Radiusverringern V_S ergibt sich daraus wie folgt:

$$V_S [mm / RM] = v_S [mg / RM] \times \frac{24}{5'000'000}$$

Das praktische Verschleißlimit für den Diskenwechsel stellt einen vom Unternehmer anzustrebenden Mittelwert dar. In der Serviceschicht wird regelmäßig der Verschleißzustand sämtlicher Disken gemessen. Ausgehend von diesen Messergebnissen wird entschieden, welche Disken gewechselt werden müssen.

Der formelmäßige Zusammenhang kann mit der linear reziproken Penetrationsformel nach GEHRING wie folgt zusammengefasst werden:

$$C / TM = \frac{1'000 \times \sum RM \times V_S}{P \times \text{Verschleißlimit}}$$

BRULAND/NTNU

Das Verfahren nach BRULAND/NTNU [5][6][7] geht für die Ermittlung der Penetration und des Verschleißes von vollkommen anderen Eingangswerten aus, als diese üblicherweise bei der Ausschreibung von TBM-Losen in Mitteleuropa angegeben werden. Nach BRULAND/NTNU hängt die Penetration von Fels- und Maschinenparametern ab (zB. Drilling Rate Index - DRI)². BRULAND/NTNU vertritt zudem den Standpunkt, dass UCS nicht ausreichend signifikant für die Penetrationsermittlung ist.

Für den Diskenverschleiß verwendet BRULAND/NTNU den Cutter-Life-Index (CLI). Über ein von BRULAND/NTNU publiziertes Diagramm wird der CLI in eine „Basis-Diskendanzzeit H0“ [hr] übergeführt, welche mittels Korrekturfaktoren an die Baustellenverhältnisse (TBM, Gebirge) angepasst werden kann.

Der H0-Verlauf selbst ist abhängig vom Diskendurchmesser. Für alle Diskendurchmesser zeigt der Verlauf im Bereich DLI < 40 einen verflachenden Anstieg und ab DLI > 40 einen linear steigenden Verlauf.

Der CLI wird in unseren Breiten im Tunnelbau i.A. nicht verwendet. Die Ermittlung von CLI ist nur über sehr aufwendige Tests möglich.

BRULAND/NTNU gibt in einem Diagramm (vgl. Abbildung 102) einen sehr breit gestreuten Zusammenhang zwischen CLI und CAI an, womit eine Umrechnung zu Vergleichszwecken angestellt werden kann [6].

² Die Umrechnung zwischen UCS und DRI ist möglich, aber mit einer großen Unschärfe behaftet

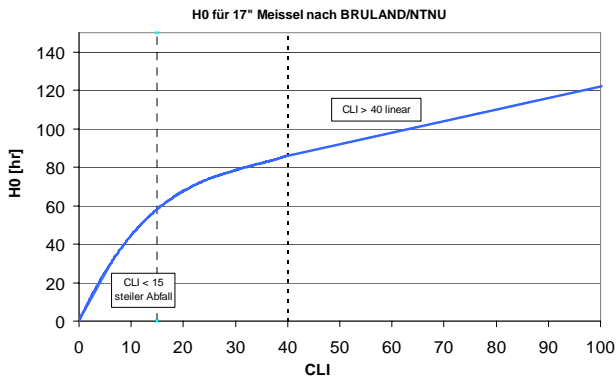


Abbildung 101: Basis-Diskenzstandzeit H0 [hr] nach BRULAND A. 1998 [5]

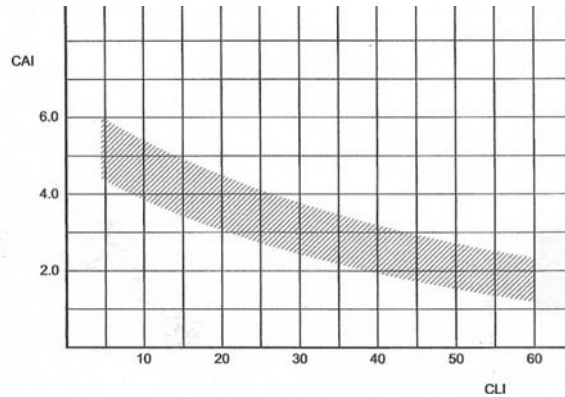


Abbildung 102: Zusammenhang zwischen CLI und CAI aus BRULAND/NTNU 1998 [6]

BÜCHI

Die Untersuchung von BÜCHI [3][7] stellt die Abhängigkeit der Penetration von UCS nach folgendem allgemeinen Zusammenhang dar:

$$P [\text{mm/U}] = K_B \cdot \frac{1}{UCS^{1,1}}$$

Demnach hat UCS einen überproportionalen Einfluss auf die Penetration und damit auf die Diskenrollmeter. Beim Diskenverschleiß beruft sich BÜCHI auf die Prognoseformel nach CSM mit einem linearen Zusammenhang zu CAI (siehe unten).

COLORADO SCHOOL OF MINES (CSM)

CSM geht von einem linearen Zusammenhang zwischen CAI und Diskenverschleiß aus [3][7][11][12]. Dem Autor wurde auf Anfrage bei CSM mitgeteilt, dass das Verfahren von einem linearen Zusammenhang zwischen CAI und Diskenverschleiß ausgeht, das zugehörige aktuelle Verfahren jedoch patentrechtlich geschützt ist und daher nicht publiziert wird („proprietary and unfortunately, we do not publish it“).

In einem Vortragsmanuskript von C. FRENZEL (Fa. Herrenknecht) [4] wird mit Hinweis auf CSM nachfolgender Zusammenhang für den Abrollweg [CL] einer Diske mit Durchmesser D_C angegeben.

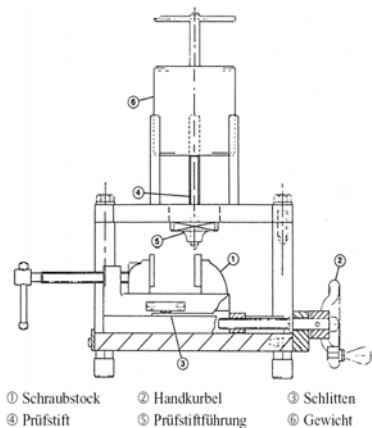
$$CL [\text{m}] = \frac{2057}{CAI} \cdot \frac{D_C [\text{mm}]}{432}$$

Eine Überleitung des Abrollweges über mittlerer Spurlänge der Disken, Penetration, Spacing und Bohrkopfdurchmesser führt zur Standzeit einer Diske [m^3/C]. Daraus lässt sich ein linear reziproker Zusammenhang zur CAI herstellen, welcher für eine 17“ Diske mit 10cm Spacing mit nachfolgender Näherung approximiert werden kann:

$$H_f [\text{m}^3/\text{C}] \approx \frac{1026}{CAI}$$

13.4 Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) – Versuchsdurchführung

Der CAI-Wert aus der Versuchsdurchführung kann auch in einen Volumenverlust der Versuchsspitze überleitet werden → entspricht iP. dem Diskenverschleiß nach GEHRING = Gewichtsverlust (= Volumen x spez. Gewicht).



a, normaler Verschleiß	b, asymmetrischer Verschleiß:	c, sehr unregelmäßige, rauhe Stiftoberfläche:
Versuch ok	Bildung eines Mittelwertes zwischen beiden Seiten	Messung ungenau, Versuch wiederholen

Abbildung 103 (oben): Verschleißformen der Versuchsspitzen
 $CAI = d [mm] \times 10$

Abbildung 104 (links): CAI-Testgerät

13.5 Zusammenhang CAI und Diskenverschleiß nach GEHRING

Der Spitzenabrieb ergibt sich als $VSP = K \times CAI^3$. Daraus folgt, dass bei einer Verdoppelung des CAI-Wertes der Volumenverlust der Spitze um den Faktor 8 steigt.

Unter der Annahme, dass dieser Zusammenhang qualitativ auf die Abnutzung (Volumenverlust respektive Gewichtsverlust) der Disken übertragen werden kann, ergibt sich folgende qualitative Gegenüberstellung:

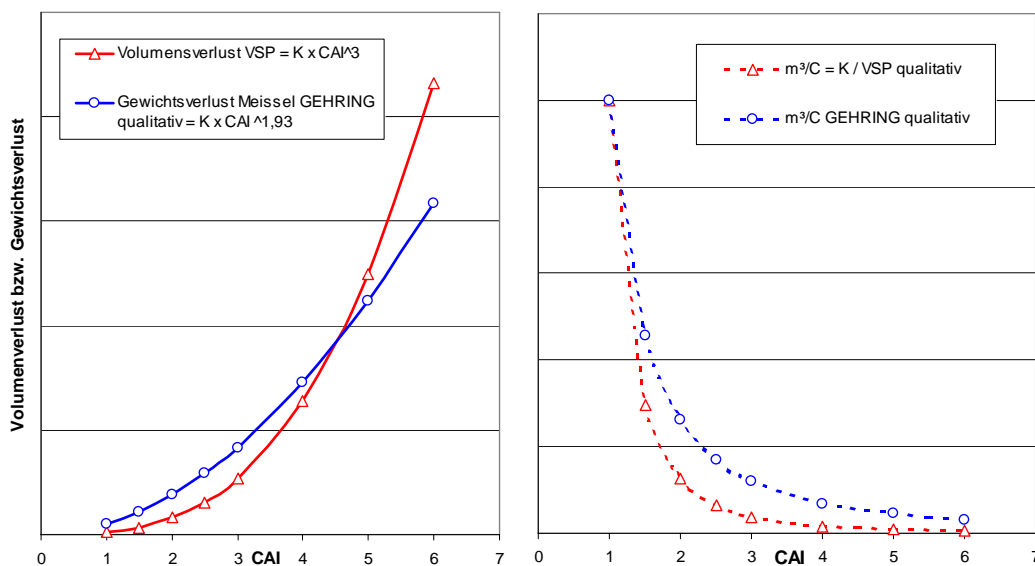


Abbildung 105: Qualitativer Vergleich zwischen „Standzeit Versuchsspitze“ aus Versuchsspitzenabtrag CAI-Versuch (Volumenverlust) und „Standzeit Disk“ nach GEHRING. Der Gewichtsverlust entspricht qualitativ dem Volumenverlust, mit dem spezifischen Gewicht verschoben.

Der formelmäßige Zusammenhang zwischen dem CAI-Versuch bzw. dem mit der Versuchsdurchführung verbundenen Versuchsspitzenabtrag (=Volumenverlust) und der Diskenverschleißberechnung nach GEHRING zeigt eine hohe Übereinstimmung. Ein anderes Ergebnis würde die Relevanz des CAI-Wertes aus Sicht des Autors insgesamt in Frage stellen.

13.6 Zusammenhang CAI (CLI) und Diskenverschleiß nach BRULAND/NTNU

Nachdem das Verfahren nach BRULAND/NTNU vom Cutter-Life-Index (CLI) ausgeht, muss eine Überleitung zu CAI nach dem von BRULAND/NTNU veröffentlichten Zusammenhang (vgl. Abbildung 102) vorgenommen werden.

Für die Modellrechnung wird die Mitte des Streubereiches herangezogen, welche mit dem folgenden Zusammenhang approximiert werden kann: $CLI = 2,681 \times CAI^2 - 34,319 \times CAI + 111,09$

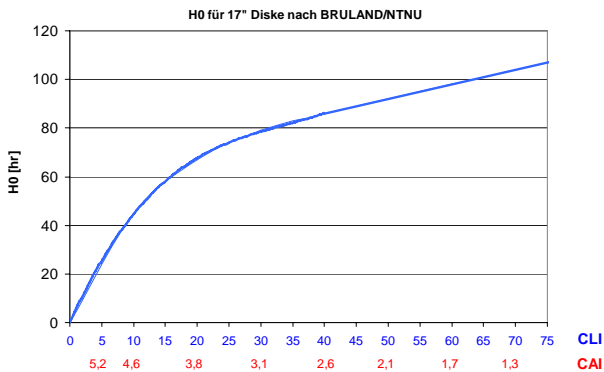


Abbildung 106: Basis-Diskendzeit H0 [hr] für 17'' Diske nach BRULAND A. 1998a, ergänzt um CAI auf der Abszisse

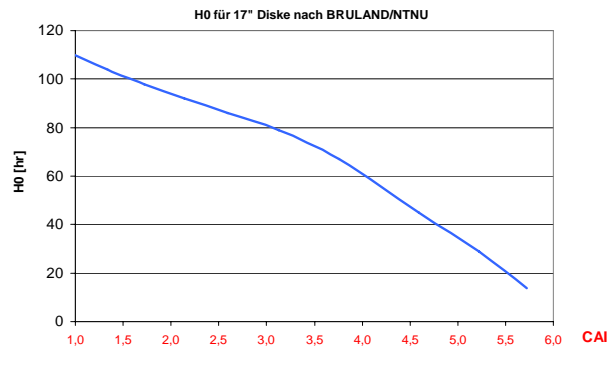


Abbildung 107: Basis-Diskendzeit H0 [hr] für 17'' Diske nach BRULAND A. 1998a aufgetragen über linearer CAI-Skala auf der Abszisse

13.7 Vergleichsrechnung für den Diskenverschleiß nach GEHRING versus BRULAND/NTNU

Die Gegenüberstellung der Verschleißprognoseverläufe nach GEHRING (Geh) und BRULAND/NTNU (NTNU) zeigt interessanterweise einen gegenläufigen Verlauf. Diese grundsätzliche Diskrepanz zeigt den erforderlichen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet deutlich auf.

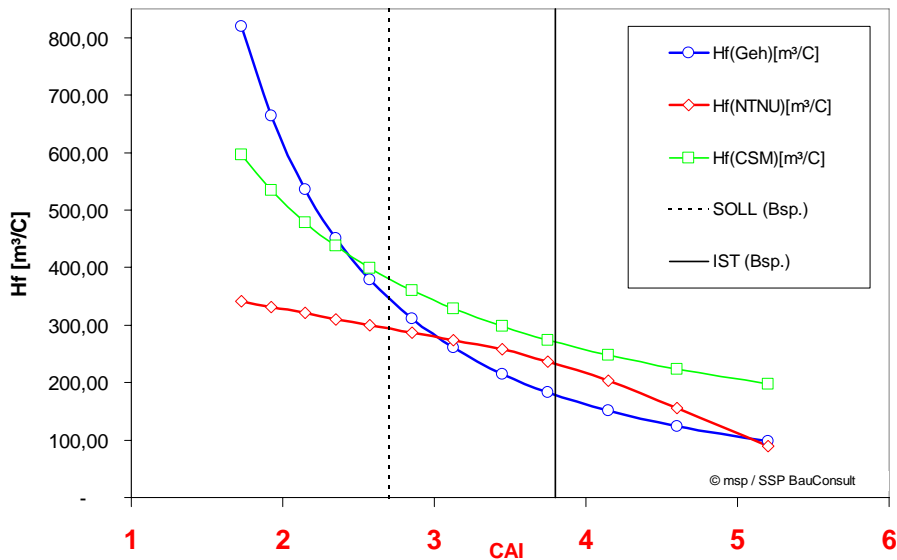


Abbildung 108: Gegenüberstellung der „Standzeit Hf“ in m³/C nach GEHRING, CSM und BRULAND/NTNU

Im Folgenden soll diese Diskrepanz näher beleuchtet werden. Anhand einer Vergleichsrechnung für den Diskenverschleiß sollen Unterschiede zwischen dem Ergebnis nach GEHRING und BRULAND/NTNU qualitativ diskutiert werden.

Zur Vereinheitlichung und Vereinfachung wurden für beide Verfahren dieselben Penetrationswerte (nach GEHRING) verwendet. Die Differenz resultiert somit vereinfacht allein aus den unterschiedlichen Prognoseergebnissen für den Diskenverschleiß der Verfahren GEHRING versus BRULAND/NTNU.

Basisdaten Beispiel:

TBM D = 9,5 [m]; 62 Disken 17“ Disken; U = 5,5 [U/min]; P = 6,0 [mm/U]

Für ein gegebenes SOLL (Vertragsgeologie; CAI im Mittel ca. 2,7) ergibt sich nach dem Verfahren BRULAND/NTNU ein um ca. 15% höherer Diskenverschleiß gegenüber dem Verfahren GEHRING. Im IST wurde eine Verschiebung von CAI auf ca. 3,8 dokumentiert. Rechnerisch führte dies im Verfahren BRULAND/NTNU zu einer Zunahme des Diskenverschleißes gegenüber GEHRING von ca. 120%! Das Verfahren nach CSM wurde für diesen Fall nicht durchgerechnet.

	SOLL	IST
CAI (längengewichtet)	2,7	3,8
GEHRING	Basis = 100%	Basis = 100%
BRULAND/NTNU	+15% = 115%	+120% = 220%

Tabelle 8: Gegenüberstellung Ergebnisse der Vergleichsrechnung GEHRING versus BRULAND/NTNU

Die vertikalen Linien in Abbildung 108 zeigen den Bereich der Verschiebung der **längengewichteten Mittelwerte** für CAI (SOLL 2,7, IST 3,8). In diesem Wertebereich von CAI sinkt die „Standzeit“ in m³/C bei GEHRING stärker als bei BRULAND. Zu erwarten wäre somit, dass der Diskenverschleiß bei GEHRING stärker zunimmt. Trotzdem kam es in der Beispielrechnung bei BRULAND/NTNU zu einem stärkeren Anstieg des Meißelverschleißes.

Der Hauptteil der Verschleißdifferenz in der Vergleichsrechnung kommt aus einem Vortriebsabschnitt (Länge ca. 30% der Versuchsstrecke mit grobkörnigem Granit mit CAI-Werten >5).

In diesem Wertebereich ist der Zusammenhang zwischen CAI und CLI sehr unsicher und das Ergebnis daher wenig zuverlässig. Dies ist insofern bedeutungsvoll, weil gerade im korrespondierenden Wertebereich CLI <20 (entspricht CAI >3,8) die Basis-Diskendzeit H₀ nach BRULAND/NTNU von 70 [hr] praktisch linear auf 0 [hr] abfällt.

Der rapide Abfall in Kombination mit dem unscharfen Zusammenhang CAI zu CLI im Wertebereich CAI >3,8 bewirkt in der Vergleichsrechnung für diese 30% der Versuchsstrecke, dass die Anzahl der erforderlichen Diskenwechsel gegenüber dem Verfahren GEHRING geradezu explodiert.

Aus Sicht des Unterzeichners ist es daher nicht sinnvoll, von den in der Ausschreibung angegebenen CAI-Werten eine Überleitung zum Verfahren BRULAND/NTNU zu machen, insbesondere nicht für die Wertebereiche CAI >5. Zum einen ist die Überleitung von CAI zu CLI in dem betreffenden Wertebereich CAI >5 ausgesprochen unsicher und zweitens ist durch den linearen Abfall im korrespondierenden Wertebereich CLI <20 damit eine noch höhere Unschärfe verbunden.

13.8 Zusammenfassung

Die Prognosemodelle nach GEHRING und CSM folgen in der Krümmung der Kurve dem Versuchspitzenabtrag beim CAI-Test. Das Prognosemodell nach BRULAND/NTNU zeigt einen gegenläufigen Verlauf. Aus Sicht des Unterzeichners ist es daher nicht sinnvoll, von in der Ausschreibung angegebenen CAI-Werten eine Überleitung zum Verfahren BRULAND/NTNU zu machen, insbesondere nicht für die Wertebereiche CAI >5.

Diese grundsätzliche Diskrepanz zeigt den erforderlichen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet deutlich auf. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung für zukünftige TBM-Vortriebe mit großem Durchmesser (zB. Brenner-Basistunnel, Koralmtunnel) sollte dieser Thematik von Auftraggeber- und Auftragnehmerseite mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Dzt. wird diese Thematik primär von den Maschinen- bzw. Diskenlieferanten verfolgt.

Dem Einsatz von 19“ Disken mit höherer Andruckkraft [kN/C] und entsprechend höherer Penetration bei weniger Diskenwechsel sollte trotz höherem Gewicht aufgrund der oben beschriebenen Thematik wieder mehr Beachtung geschenkt werden.

13.9 Literaturnachweise

- [1] GEHRING K.H. 1995:
Leistungs- und Verschleißprognose im maschinellen Tunnelbau. Felsbau 13, Nr. 6, 1995
- [2] GEHRING K.H. 1997:
Classification of Drillability, Cuttability, Borability and Abrasivity in Tunneling. Felsbau 15, Nr. 3, 1997
- [3] BÜCHI E. 1998:
TBM tunneling – Contracts with increased potential for claims? Balkema Rotterdam 1998
- [4] FRENZEL C. 2005:
Maschinelle Tunnelvortriebe im Hartgestein. Leistungs- und Verschleißprognosen. Vortrag an der TU München
- [5] BRULAND A. 1998a:
Hard rock tunnel boring – Advance Rate and Cutter Wear. Project report 1B-98, NTNU, 1998
- [6] BRULAND A. 1998c:
Hard rock tunnel boring – Geology and Site Investigation. Project report 1D-98, NTNU, 1998
- [7] BÜCHI E., MATHIER J.-F., WYSS CH. 1995:
Gesteinsabrasivität – ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein., Tunnel 5, 1995
- [8] LEITNER W., SCHNEIDER E. 2003:
Penetration Prediction Models for Hard Rock Tunnel Boring Machines. Felsbau 21, Nr. 6, 2003
- [9] FELLNER D., SPIEGL M., SCHNEIDER E., GRANDORI R., LEITNER W. 2003:
Brenner Basistunnel – Geotechnische Prognose und Konzept für den TBM-Einsatz. Felsbau 21, Nr. 5 2003
- [10] MAIDL B., SCHMID L., RITZ W., HERRENKNECHT M. 2001:
Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein. Ernst & Sohn, 2001
- [11] OZDEMIR L., NILSEN B.:
Recommended Laboratory Rock Testing for TBM projects.
- [12] ROSTAMI J., OZDEMIR L., NILSON B. 1996:
Comparison between CSM and NTH hard Rock TBM performance prediction models. ISDT Las Vegas 1996
- [13] FUKUI et.al. 1996:
<http://www.mmij-kyushu.com/rock/abst&recw/abstract-96/96-tokyo2.htm>

13.10 Autor

Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Spiegl

SSP BauConsult GmbH
o.Univ.Prof. DI Schneider, Dr. Spiegl & Partner
Ingenieurbüro für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Technikerstr. 32
A-6020 Innsbruck
Österreich

Email: m.spiegl@sspbauconsult.at