

Leistungs- und Verschleißprognose in der Praxis am Beispiel des CSM-Modells

Christian Frenzel

Colorado School of Mines

Einführung

Da sich die Leistungs- und Verschleißprognose in der Praxis häufig schwieriger gestaltet, als diese aufgrund der verfügbaren Modelle zu erwarten wäre, zeigt dieser Beitrag auf, wie ein solches Modell anzuwenden ist. Es kommt dabei das Modell der Colorado School of Mines (CSM-Modell) zum Einsatz, das sich im vielfachen Einsatz bewährt hat. Dieses Modell erlaubt die Prognose der Schneidkräfte an Rollenmeißeln in Abhängigkeit von maschinentechnischen Parametern und Gesteinseigenschaften. Darüber hinaus erlaubt es die Prognose der mittleren Standzeit von Rollenmeißeln.

Hintergrund des CSM-Modells

An der Colorado School of Mines wurde im Jahr 1974 das Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute (EMI) gegründet. Dessen Labor umfasst Geräte, die geeignet sind, um großmaßstäbliche Laborversuche zum Schneiden von Gestein mit Rollenmeißeln, Rundschaftmeißeln und anderen Werkzeugen durchzuführen. Drei Jahre später wurde die erste Version des Penetrationsprognosemodells veröffentlicht Ozdemir et al. (1977). Diese Version des Modells basierte noch auf den seinerzeit üblichen keilförmigen Schneidringen, die später durch sogenannte „Constant Cross Section“ Schneidringe ersetzt wurden.

Diese Änderung wurde im Rahmen der Arbeit von Rostami (1997) berücksichtigt. Ebenso wurde die Datenaufnahme verbessert und das Modell in dimensionstreue Gleichungen überführt. Das Modell für die Verschleißprognose ist erst bei Rostami et al. (2005) veröffentlicht worden. Neben der Penetrationsprognose für Schneidrollen sind auch Modelle für Rundschaftmeißel entwickelt worden (Neil et al. 1994).

Im Rahmen meiner Tätigkeit bei der Fa. Herrenknecht hatte ich die Möglichkeit, mich intensiv mit dem Thema Werkzeugverschleiß zu beschäftigen. Daraus ist eine Doktorarbeit entstanden, die von Prof. Thuro betreut wurde (Frenzel 2010). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Prognose der Werkzeugkosten, welche stark durch die Lebensdauer der einzelnen Komponenten der Rollenmeißel und nicht nur jene des Schneidrings beeinflusst wird.

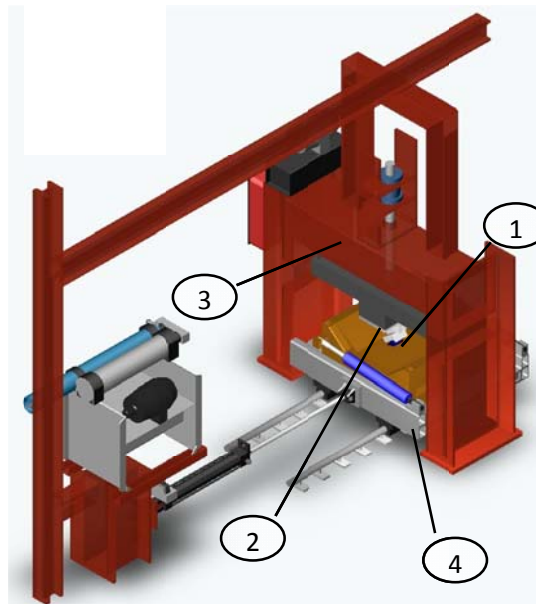


Abbildung 1: Linear-Versuchsstand an der CSM

Grundlage für das Modell der Colorado School of Mines sind Schneidversuche, die an einem Linear-Versuchsstand durchgeführt worden sind und anhand von Datenaufzeichnungen von Tunnelvortrieben validiert wurden. Der Versuchsstand ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Rollenmeißel (1) ist an einer 3D-Kraftmesszelle (2) befestigt, die auf dem Rahmen (3) des Versuchsstandes montiert ist. Der Schlitten (4) nimmt die Gesteinsprobe auf, die etwa 80 cm mal 80 cm groß ist. Während des Versuchs wird der Schlitten mit einer definierten Geschwindigkeit unter dem Werkzeug hindurchgeschoben. Für jeden weiteren Schnitt wird der Schlitten seitlich verschoben, so dass unterschiedliche Schneidspurabstände simuliert werden können. Zum Einsatz kommen Rollenmeißel und Rundschaftmeißel in allen üblichen Größen und Formen.

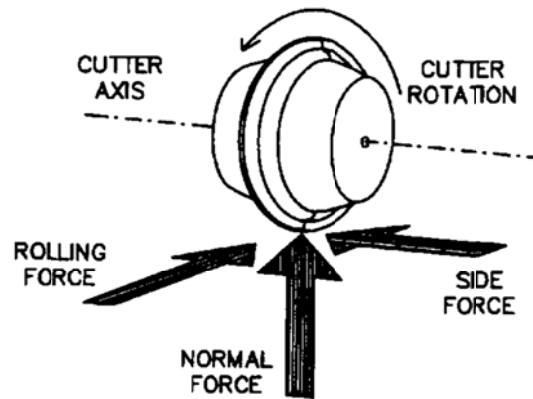


Abbildung 2: Schneidkräfte an einem Rollenmeißel (aus: Rostami 1997)

Schneidkräfte

Während des Schneidvorgangs treten an einer Schneidrolle als Reaktion auf Gebirgs- und Maschinenparameter unterschiedliche Kräfte auf. Diese werden, wie in Abbildung 2 dargestellt, in Normal-, Roll- und Seitenkräfte unterteilt. Das Verhältnis zwischen Rollkraft $F_R [kN]$ und Normalkraft $F_N [kN]$ wird als Schneidkonstante $C_c [-]$ bezeichnet:

$$C_c = \frac{F_R}{F_N}$$

Diese Unterscheidung ist für die Praxis relevant, weil die Summe der Normalkraft aller Rollenmeißel auf dem Bohrkopf der Netto-Vorschubkraft entspricht. Wenn noch die Reibung zwischen Schild und Gebirge berücksichtigt wird, erhält man die Brutto-Vortriebskraft der Tunnelbohrmaschine.

Tabelle 1: Maximale Schneidkraft für Rollenmeißel

Durchmesser des Rollenmeißels	Maximale Schneidkraft
17" (432 mm)	267 kN
19" (483 mm)	315 kN

Die maximale Schneidkraft eines Rollenmeißels ist begrenzt und hängt vom Durchmesser des Rollenmeißels ab. In der Praxis werden die in Tabelle 1 dargestellten Maximalwerte verwendet.

Neben der Begrenzung der Schneidkraft ist auch das maximale Drehmoment, das durch den Bohrkopftrieb überwunden werden kann, zu berücksichtigen. Das Summenprodukt aus Rollkraft F_R [kN] und Radius r [m] der Rollenmeißelpositionen ergibt das erforderliche Drehmoment des Antriebs M [kNm] zu:

$$M = \sum F_R \times r \approx n_c \times 0.6 \times \frac{D_c}{2} \times F_R$$

Als Näherungslösung kann der zweite Teil der Gleichung verwendet werden, indem die Anzahl der Rollenmeißel auf dem Bohrkopf n_c [–] und der Bohrkopfdurchmesser D_c [m] verwendet werden. Insbesondere wenn die Geometrie des Bohrkopfes noch nicht bekannt ist, hilft diese Näherung weiter.

Als dritte Begrenzung ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der Geometrie der Schneidringe diese nicht beliebig hohe Penetrationen schneiden können. Während unverschlossene Schneidringe einen sehr großen Abstand zur breiteren Basis des Schneidrings haben, vermindert sich dieser mit zunehmendem Verschleiß. Bei Schneidringen mit 17 Zoll (432 mm) Durchmesser wird die Grenze in der Regel bei 18–20 mm gesetzt, auch wenn bei Tunnelvortrieben in der Süßwassermolasse durchaus höhere Penetrationen erzielt worden sind.

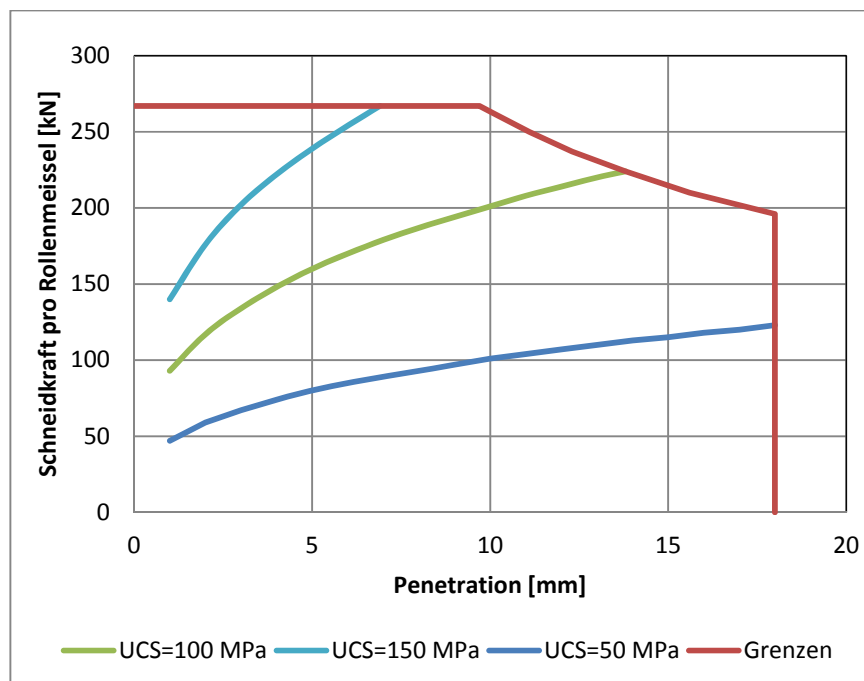


Abbildung 3: Begrenzung der Penetration, verändert nach Frenzel et al. 2008

Zusammenfassend lassen sich diese Grenzen der erzielbaren Penetration in Abbildung 3 zeigen: Auf der Ordinate ist die Penetration abgetragen und auf der Abszisse die zugehörige Normalkraft pro Rollenmeißel. In Abhängigkeit von den Gesteinseigenschaften lassen sich nun Penetrationskurven darstellen. Diese zeigen, wie mit wachsender Penetration auch die Normalkraft ansteigt. Je geringer die Bohrbarkeit des Gesteins ist, desto steiler steigt die Penetrationskurve an. Die maximal erreichbare Penetration ist durch Normalkraft (horizontale Linie), Drehmoment (Kurve) oder Geometrie des Schneidrings (vertikale Linie) gegeben.

Penetrationsprognose

Zunächst sind die Eingabeparameter zu ermitteln, welche in Tabelle 2 zusammengefasst sind. Dabei ist zu beachten, dass in das CSM-Modell nur Gesteinsparameter Eingang finden, so dass immer vom ungünstigsten Fall des massigen Gebirges ausgegangen wird.

Tabelle 2: Eingabeparameter des CSM-Modells

Gesteinseigenschaften	Zeichen	Einheit	Maschinenparameter	Zeichen	Einheit
Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit	σ_c	MPa	Ausbruchdurchmesser	D_c	m
Spaltzugfestigkeit	σ_t	MPa	Schneidringradius	R	mm
Cerchar-Abrasivitätsindex	CAI		Mittlerer Spurabstand	S	mm
			Schneidringbreite	T	mm
			Anzahl der Schneidspuren	n_c	
			Drehzahl	n	min^{-1}

Sinnvollerweise wird der aufzufahrende Tunnel in Homogenbereiche unterteilt, wobei diese im Hinblick auf die Penetrations- und Verschleißprognose möglicherweise anders gewählt werden sollten,

als dies im Sinne des Gebirgsverhaltens sinnvoll ist. Dies spiegelt sich unter anderem in der Unterscheidung zwischen Bohr- und Ausbauklasse wieder. Das Kriterium für die Einteilung in Homogenbereiche soll für die Penetrations- und Verschleißprognose sein, dass sich die Ergebnisse zwischen den einzelnen Bereichen stärker unterscheiden, als innerhalb eines Abschnitts. Da dies a-priori nicht eindeutig festzustellen ist, werden Bereiche mit ähnlichen Gesteinsparametern zusammengefasst und es wird eher ein Bereich zu viel als zu wenig gewählt.

Es sollte im Allgemeinen mit Mittelwerten gerechnet werden, da die Kombination von Maximalwerten unrealistisch konservative Ergebnisse erzielt. Wenn ein höheres Genauigkeitsniveau erforderlich ist, bietet sich an, die Gesteinsparameter als Zufallsgrößen aufzufassen, die einer statistischen Verteilung unterliegen. Mit dieser Annahme lässt sich dann eine Monte-Carlo-Simulation durchführen, die die statistische Verteilung der zu erwartenden Penetration und Werkzeugstandzeit als Resultat hat. Eine detaillierte Beschreibung ist bei (Frenzel 2010) zu finden.

Die Anwendung des CSM-Modells erfolgt iterativ, so dass die Benutzung eines Tabellenkalkulationsprogramms, wie z.B. Excel®, zweckmäßig ist. Zunächst wird die Penetration geschätzt, welche in diesem Beispiel zu $p = 10 \text{ mm}$ angenommen wird. Daraufhin kann mit Hilfe des Schneidringdurchmessers der Winkel der Kontaktfläche bestimmt werden:

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{R - p}{R}$$

Der Winkel der Kontaktfläche φ muss im Bogenmaß bestimmt werden, da die Gleichungen dies im weiteren Verlauf der Berechnung erfordern. Bei 17-Zoll-Rollenmeißeln ist der Radius des Schneidrings $R = 216 \text{ mm}$, so dass sich $\varphi = 0,31$ ergibt.

Unter der Annahme einer einaxialen Gesteinsdruckfestigkeit von $\sigma_c = 120 \text{ MPa}$, einer indirekten Zugfestigkeit $\sigma_t = 10 \text{ MPa}$, einem mittleren Schneidspurabstand von $S = 90 \text{ mm}$ und einer Schneidringbreite von $T = 19 \text{ mm}$, kann die durchschnittliche Kontaktflächenspannung durch

$$P^* = 2,12 \times \sqrt[3]{\frac{\sigma_c^2 \times \sigma_t \times S}{\varphi \times \sqrt{R \times T}}}$$

zu $P^* = 193 \text{ MPa}$ bestimmt werden. Daraus ergibt sich eine Schneidkraft von

$$F = P^* \times R \times \varphi \times T$$

wobei hier der Radius des Schneidrings R und die Schneidringbreite T in Meter eingesetzt werden müssen, um $F = 0,242 \text{ MN}$ zu erhalten.

Das erforderliche Drehmoment ergibt sich unter Verwendung des bereits weiter oben eingeführten Zusammenhangs zu

$$M = n_c \times 0.6 \times \frac{D_c}{2} \times F \times \sin \frac{\varphi}{2}$$

Unter Annahme eines Bohrdurchmessers von $D_c = 8 \text{ m}$ und einer Anzahl von Rollenmeisseln $n_c = 52$ ergibt das ein erforderliches Drehmoment von $M = 4.59 \text{ MNm}$. Falls nur die Antriebsleistung des Bohrkopfes bekannt ist, kann daraus mit Hilfe der Drehzahl die erforderliche Leistung zu

$$P = \frac{\pi}{30} \times n \times M$$

bestimmt werden. Bei einer Drehzahl von $n = 6 \text{ min}^{-1}$ ergibt sich die erforderliche Leistung zu $P = 2,30 \text{ MW}$. Diese Abschätzung berücksichtigt keinen Effizienzfaktor und ist daher als untere Grenze des erforderlichen Bohrkopfantriebes zu verstehen.

Um die maximal mögliche Penetration zu berechnen, werden die oben genannten Rechenschritte mit einer veränderten Penetration solange wiederholt, bis entweder die maximale Schneidkraft, das maximale Drehmoment bzw. die maximale Antriebsleistung oder das geometrische Limit des Schneidrings erreicht sind. Gegebenenfalls kann dann die Maschinenauslegung angepasst werden, um höhere Penetrationen zu erzielen.

Verschleißprognose

Zunächst wird der maximale Schneidweg eines Schneidrings CL infolge Primärverschleißes zu

$$CL = \frac{2057}{CAI} \times \frac{R}{216}$$

bestimmt. Bei einem Cerchar-Abrasivitätsindex von $CAI = 3.0$ ergibt sich ein Schneidweg von $CL = 686 \text{ km}$. Unter Berücksichtigung der mittleren Spurlänge eines Rollenmeißels auf dem Bohrkopf von

$$\bar{s}_r = D_c \times 0,6 \times \pi$$

kann die Anzahl der Umdrehungen, die der Bohrkopf bis zum Wechsel eines Rollenmeißels ausführen kann zu

$$U_c = \frac{CL \times \bar{k}}{\bar{s}_r}$$

bestimmt werden. Mit $\bar{s}_r = 15,1 \text{ m}$ ergibt sich die Anzahl der Bohrkopfumdrehungen zwischen zwei zu wechselnden Rollenmeißeln zu $U_c = 30465$. Dabei ist zu beachten, dass die Längeneinheiten gleich gewählt werden (also m oder km). Der Abminderungsfaktor kann vereinfacht mit $\bar{k} = 67\%$ angenommen werden. Falls die Bohrkopfgeometrie bekannt ist, kann dieser nach (Frenzel 2010) genauer bestimmt werden. Dieser Abminderungsfaktor berücksichtigt die Tatsache, dass nicht alle Schneidrollen wegen Primärverschleißes gewechselt werden, sondern andere Versagensarten bereits zu einem früheren Wechsel führen (z.B. Blockierer).

Die mittlere Netto-Standzeit eines Rollenmeißels ergibt sich zu

$$V_c = \frac{D_c^2}{4} \times \pi \times U_c \times p \times \frac{2 \times S}{D_c}$$

Unter Benutzung einer Penetration von $p = 10 \text{ mm}$ ergibt sich die Netto-Standzeit zu $V_c = 344 \text{ m}^3$. Diese kann benutzt werden, um die Anzahl der Rollenmeißelwechsel in einem Tunnelabschnitt oder im Laufe eines Vortriebstages zu prognostizieren. Weitere Informationen dazu sind bei (Frenzel 2010) enthalten.

Zusammenfassung

Die Penetrationsprognose mit dem CSM-Modell erlaubt eine Abschätzung der Schneidkräfte an einem Rollenmeißel. Das Modell basiert auf umfangreichen Schneidversuchen, die an einem Linear-Versuchsstand mit Rollenmeißeln im Maßstab 1:1 durchgeführt wurden. Wegen der begrenzten Abmessungen der Gesteinsproben sind nur massige Gesteine in die Modellbildung eingeflossen.

Die maximale Penetration ist durch einen oder mehrere folgender Faktoren begrenzt:

- Maximale Schneidkraft (Belastung des Rollenmeißels)
- Maximales Drehmoment bzw. Antriebsleistung des Bohrkopfes
- Geometrie der Schneidringe

Die Prognose der Penetration erfolgt daher iterativ, indem eingangs eine Penetration gewählt wird und diese solange verändert wird bis alle drei Bedingungen eingehalten sind.

Zur Verschleißprognose wird unter Nutzung der Proportionalität zwischen Abrieb des Schneidrings und dem Rollweg zunächst der maximale Schneidweg in Abhängigkeit der Abrasivität des Gesteins bestimmt. Da dieser Zusammenhang nur den Primärverschleiß berücksichtigt, wird dieser abgemindert und auf die Bohrkopfgeometrie bezogen, um die mittlere Netto-Standzeit zu erhalten.

Literaturverzeichnis

Frenzel, Christian (2010): Verschleißkostenprognose für Schneidrollen bei maschinellen Tunnelvortrieben in Festgesteinen. Ingenieurgeologie Hydrogeologie Geothermie. München: Dr. Friedrich Pfeil (Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B).

Frenzel, Christian; Käsling, Heiko; Thuro, Kuroschi (2008): Factors influencing disc cutter wear. In Geomechanik und Tunnelbau 1 (1), S. 55–60.

Neil, David M.; Rostami, Jamal; Ozdemir, Levent; Gertsch, Richard (1994): Production estimating techniques for underground mining using roadheaders. In : SME annual meeting. Albuquerque, New Mexico, February 14 - 17, 1994 ; [preprints]. Annual meeting of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). Littleton, Colo: SME (Preprint / Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 94,1/94,279).

Ozdemir, Levent; Miller, Russell; Wang, Fun-Den (1977): Mechanical tunnel boring prediction and machine design. Annual report ; Colorado School of Mines, Golden. Washington, DC: National Science Foundation.

Rostami, Jamal (1997): Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure. PhD thesis. Colorado School of Mines, Golden.

Rostami, Jamal; Ozdemir, Levent; Bruland, Amund; Dahl, Filip (2005): Review of issues related to cerchar abrasivity testing and their implications on geotechnical investigations and cutter cost estimates. In Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (Ed.): RETC 2005 proceedings. With assistance of John D. Hutton. Littleton, Colo: Society for Mining Metallurgy and Exploration, S. 738–751.