



Nordwest-Umfahrung Meran – Untersuchungen zu Gebirgslösung und Verschleiß in der Festgesteinsstrecke

Nordwest-Umfahrung Meran – research on underground excavation and wear in the solid rock section

Carola Wieser¹, Bernhard Lempe², Heiko Käsling³, Kurosch Thuro⁴

¹ M.Sc. Carola Wieser, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, carola.wieser@tum.de

² Dr. Bernhard Lempe, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, lempe@tum.de

³ Dr. Heiko Käsling, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, heiko.kaesling@tum.de

⁴ Prof. Dr. Kurosch Thuro, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, thuro@tum.de

Zusammenfassung

Im diesem Beitrag wird ein Vorschlag zur am besten geeigneten Vortriebsmethode für die Nordwest-Umfahrung Meran (Südtirol/ Italien) erarbeitet. Es wird diskutiert, ob im Festgesteinsabschnitt der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine (TBM) möglich ist oder ob ein konventioneller Bohr- und Sprengvortrieb möglicherweise besser geeignet wäre. Der Tunnel wird die Störungszone der Periadriatischen Naht durchqueren, die ostalpine Gneise von südalpinen Brixner Quarzphylliten abgrenzt. Anhand von Feld- und Laboruntersuchungen wurden Penetrations- und Verschleißprognosen als auch Prognosen zu Bohrgeschwindigkeit und zum Bohr-kronenverschleiß durchgeführt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die prognostizierte Nettovortriebsgeschwindigkeit beim TBM-Vortrieb höher ist als beim Bohr- und Sprengvortrieb. Im vorliegenden Beitrag werden weitere Vor- und Nachteile beider Methoden diskutiert. Trotz der höheren Vortriebsleistung einer TBM wird der konventionelle Vortrieb als geeignetere Vortriebsweise betrachtet. Entscheidend sind dabei Standsicherheitsprobleme beim Vortrieb schleifend zur Periadriatischen Naht und deren Begleitstörungen sowie die deutlich geringeren Investitionskosten bei einer kurzen Tunnellänge.

Schlüsselworte: Festgestein, Penetrationsprognose, Verschleißprognose, Vortriebsgeschwindigkeit, Meran

Abstract

In this paper we develop a suggestion for the most practical construction method for the Nordwest-Umfahrung Meran (South Tyrol/ Italy). We discuss whether the operation of a tunnel boring machine (TBM) or advance by conventional drilling and blasting would be more efficient in the solid rock section. The first contract section in loose rock has already been finished, while the planning of the second contract section in solid rock is still in progress. The tunnel is going to cross the Periadriatic fault zone which borders Eastern Alpine gneisses and Southern Alpine Brixner quartz phyllites. TBM penetration and disc cutter wear predictions are compared with drilling speed and wear of drill bits for conventional heading using data derived from field and laboratory investigations. Our results indicate that the predicted net excavation progress using a TBM is higher than for conventional drilling and blasting. Finally, we discuss further advantages and disadvantages of both methods. Although the performance is considered to be lower, drilling and blasting is regarded as the more practical construction method in this case. The decisive factors for this are stability problems associated with the advance running parallel to the Periadriatic line and further geological faults along the route. Additionally, investment costs are considerably lower given the short tunnel length.

Keywords: solid rock, penetration prediction, wear prediction, advance rate, Merano

1 Einleitung

Die stark befahrenen Straßen im Stadtgebiet von Meran (Südtirol/Italien) sollen durch einen Umfahrungstunnel entlastet werden. Deshalb wurde die 3,2 km lange „Nordwest-Umfahrung Meran“ geplant, die den Verkehr aus dem Passeiertal und der Innenstadt von Meran an die Schnellstraße Meran-Bozen (MeBo) weiterleiten soll. Die Planungen für das Baulos 2 aus dem Jahr 2007 sehen einen Vortrieb mit Hydroschild-Maschine vor, die am Übergang vom Lockergestein zum Festgestein des Küchelbergs in eine Festgesteins-TBM mit Schild umgebaut werden soll.

Erste Untersuchungen ließen hohe Gesteinsfestigkeiten, hohe Abrasivitäten und teilweise gestörtes Gebirge erwarten. Deshalb wurde in einer Masterarbeit (WIESER 2012) untersucht, ob ein Bohr- und Sprengvortrieb möglicherweise die wirtschaftlichere Ausbruchsmethode darstellen könnte. Mit den Ergebnissen aus Gelände- und Laboruntersuchungen wurden Vortriebsprognosen für den konventionellen und den TBM-Vortrieb durchgeführt. Im vorliegenden Beitrag wird die Anwendung der Prognosemodelle von THURO (1996), GEHRING (1995) und die Formel der Colorado School of Mines (OZDEMIR et al. 1977, ROSTAMI 1997, FRENZEL 2010) vorgestellt.

2 Geologischer Überblick

Im Festgesteinsabschnitt der Nordwest-Umfahrung Meran werden Gesteine des Ostalpins und des Südalpins durchörtert, die von der Periadriatischen Naht (PN) voneinander abgegrenzt werden (Abb. 1). Der westliche Abschnitt des Küchelbergs wird von der Marlinger Schuppe aufgebaut, die zum ostalpinen Grundgebirge gehört. Es handelt sich dabei um quarzreichen Paragneis, der tektonisch stark beansprucht wurde und teilweise Einschaltungen von Glimmerschiefer enthält (ISPRA 2010).



Abb. 1: Geologische Detailkarte der Festgesteinsstrecke der Nordwest-Umfahrung Meran (nach PGNWM 2007).

Fig. 1: Detailed geological map of the solid rock section of the Nordwest-Umfahrung Meran (after PGNWM 2007).

Das Südalpin wird aus dem variszisch metamorphen Grundgebirge, der sog. „Brixen-Einheit“, und dem permischen Intrusivkörper des Ifinger Granodiorits gebildet. Bei der Brixen-Einheit handelt es sich um Quarzphyllit, der im Nahbereich zur Intrusion kontaktmetamorph überprägt wurde und als Hornfels vorliegt. Im Bereich der PN tritt zudem eine schmale Tonalit-Lamelle auf, die während eines spätalpidischen Magmatismus entlang der Störungzone intrudiert ist (ISPRA 2010).

3 Methodik

3.1 Geländeaufnahme

3.1.1 Trennflächengefüge

Die Lösbarkeit des Gebirges wird wesentlich vom Trennflächengefüge beeinflusst. So hängt die Vortriebsleistung laut THURO (1996) stark von der Orientierung der Schieferung und den Kluftabständen ab. Die Schieferung fällt im gesamten Projektgebiet mit einem durchschnittlichen Winkel von ca. 60° nach NW ein und fällt somit teils aus der Ortsbrust heraus, teils verläuft sie spitzwinklig zur Vortriebsrichtung. Im Gneis herrscht eine dicht- bis mittelständige Klüftung vor und der Quarzphyllit weist ein engständiges, teilweise dicht- oder mittelständiges Trennflächengefüge auf. In der Nähe des Ostportals ist die PN als etwa zwei Meter breite Zone aufgeschlossen, in der die Gesteine stark zerschert sind. Darin treten cm- bis dm-große Scherkörper auf. Im Bereich der Tunneltrasse sind außerdem zahlreiche Begleitstörungen parallel zur PN aufgeschlossen.

3.2 Laborversuche

3.2.1 Gesteinsfestigkeit

Die Gesteinsfestigkeit wurde mit Hilfe des einaxialen Druckversuchs und des Punktlastversuchs bestimmt. Nach der Klassifizierung gemäß ISRM (1978) ergab sich für die getesteten Gesteine bei beiden Versuchen eine „hohe“ bis „sehr hohe“ einaxiale Druckfestigkeit, wobei in einzelnen Punktlastversuchen auch „mittlere“ und „extrem hohe“ Druckfestigkeiten ermittelt wurden.

3.2.2 Abrasivität

Zur Untersuchung der Abrasivität wurde sowohl der Cerchar-Abrasivitätsversuch als auch der LCPC-Abrasivitätsversuch durchgeführt. Demnach werden Gneis und Quarzphyllit als „sehr abrasiv“ eingestuft, genauso wie der Tonalit und ein Ganggestein, das im Projektgebiet geringmächtig auftritt. Der Ifinger Granodiorit und eine erbohrte Störungsbekzie im Südalpin werden nach den Ergebnissen des CAI sogar als „extrem abrasiv“ klassifiziert.

Aus Röntgendiffraktometrie-Aufnahmen wurde außerdem der äquivalente Quarzgehalt (ÄQu) der Proben bestimmt. Nach dem Klassifikationsschema von PLINNINGER (2002) werden Gneis, Quarzphyllit, Tonalit, Ifinger Granodiorit und Ganggestein als „abrasiv“ bezeichnet. Nur die Störungsbekzie kann mit einem ÄQu von 58 % als „sehr abrasiv“ klassifiziert werden, wohingegen eine Ultramylonit-Probe als „schwach abrasiv“ gilt.

4 Vortriebsprognose

Der Zeitbedarf für den Gebirgslösevorgang und den Wechsel des Abbauwerkzeugs hat einen wesentlichen Einfluss auf die Vortriebsleistung und kann mit Hilfe von Leistungs- und Verschleißprognosen abgeschätzt werden.

4.1 Prognose der Bohrgeschwindigkeit

Laut THURO (1996) kann die Bohrbarkeit für den konventionellen Bohr- und Sprengvortrieb mit Hilfe folgender felsmechanischer und petrographischer Parameter beschrieben werden:

- Einaxiale Druckfestigkeit
- Zerstörungsarbeit
- Spaltzugfestigkeit
- Durchtrennungsgrad
- Anisotropie
- Äquivalenter Quarzgehalt

Die Bohrgeschwindigkeit wird genauer als Netto-Bohrgeschwindigkeit prognostiziert und ergibt sich aus der Länge des gebohrten Sprenglochs und der dafür benötigten Bohrzeit. In Abb. 2 und 3 sind die Korrelationsdiagramme von THURO (1996), ergänzt mit den ermittelten Kennwerten aus einaxialer Druckfestigkeit und Zerstörungsarbeit, für einen 20-kW-Bohrhammer dargestellt. Da die Druckfestigkeiten des Originaldiagramms maximal 140 MPa erreichen, wurde die Regressionskurve der einaxialen Druckfestigkeit verlängert dargestellt. Als Datenpunkte wurden jeweils die maßgebenden Minimal-, Maximal- und Mittelwerte von Gneis



und Quarzphyllit hinzugefügt. Daraus ergeben sich mittlere bis geringe Bohrgeschwindigkeiten, die beim Gneis im Mittel 2 m/min und im Quarzphyllit 1,9 m/min betragen.

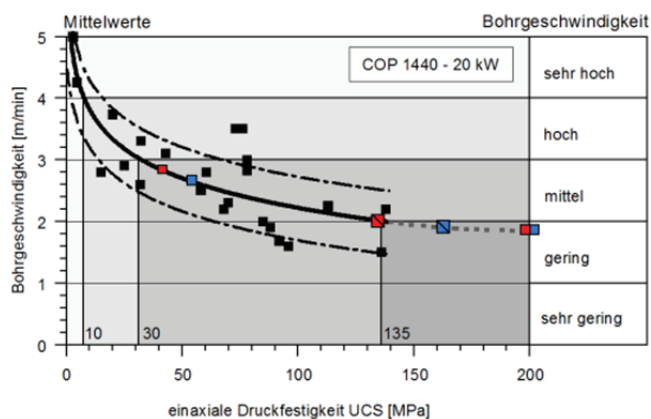


Abb. 2: Prognose der Bohrgeschwindigkeit in Gneis (rot) und Quarzphyllit (blau) aus der einaxialen Druckfestigkeit (nach THURO 1996).

Fig. 2: Prediction of the drilling speed in gneiss (red) and quartz phyllite (blue) by uniaxial compressive strength (after THURO 1996)

Die Zerstörungsarbeit konnte nur an einer Gneisprobe ermittelt werden, weshalb der Wert mit einer großen Unsicherheit behaftet ist und eher als minimaler Wert betrachtet werden sollte. Beim Quarzphyllit ergibt sich aus dem maßgeblichen Mittelwert der Zerstörungsarbeit eine mittlere Bohrgeschwindigkeit von 1,9 m/min.

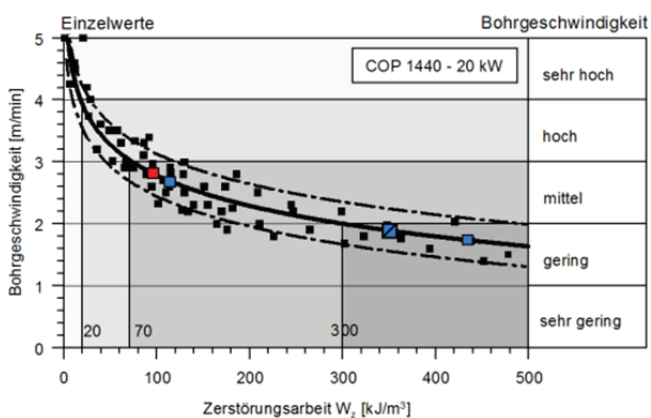


Abb. 3: Prognose der Bohrgeschwindigkeit in Gneis (rot) und Quarzphyllit (blau) aus der Zerstörungsarbeit (nach Thuro 1996).

Fig. 3: Prediction of the drilling speed in gneiss (red) and quartz phyllite (blue) by destruction work (after THURO 1996).

Neben Festigkeit und Zerstörungsarbeit hängt die Bohrgeschwindigkeit vom Durchtrennungsgrad des Gebirges ab. Laut THURO (1996) wirkt sich dieser erst aber einer dichtständigen Klüftung aus. Ab einer engständigen Klüftung muss demnach eine Korrektur der Bohrgeschwindigkeit vorgenommen werden. Bei der dicht- bis weitständige Klüftung des Gneises wurde die Bohrgeschwindigkeit deshalb mit 100 bis 125 % des ermittelten Wertes angesetzt. Für den Quarzphyllit wurde sie ebenfalls um maximal 25 % erhöht.

Die Anisotropie von geschieferten Gesteinen wirkt sich ebenfalls auf den Bohrfortschritt aus. So werden nach THURO (1996) bei einer Bohrrichtung rechtwinklig zur Schieferung höhere Bohrgeschwindigkeiten erreicht als beim Bohren parallel zur Anisotropie. Aufgrund des gekrümmten Trassenverlaufs variiert der Winkel zur Schieferung sehr stark. Im Gneis wird mit einem Winkel von ca. 40 bis 60° zur Schieferung gebohrt, im Quarzphyllit zwischen ca. 2 und 30°, was eine deutlichere Abminderung der Bohrgeschwindigkeit zur Folge hat. Nach der Korrektur der Werte wurde für den Gneis eine mittlere bis hohe Bohrgeschwindigkeit von 2,4 bis 3,5 m/min ermittelt und beim Quarzphyllit ergibt sich letztlich eine mittlere bis geringe Bohrgeschwindigkeit von 1,7 bis 2,7 m/min (vgl. Abb. 4).

4.2 Prognose des Bohrkronenschleisses

Der quantitative Bohrkronenschleiss wird mit Hilfe der Standlänge beurteilt, die als Länge nach der die Bohrkronen gewechselt werden muss, definiert ist. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 95 % hat sich der äquivalente Quarzgehalt als hochsignifikanter Kennwert zur Beurteilung des Bohrkronenschleisses erwiesen. Der Vergleich der eigenen Werte mit den Referenzwerten von THURO (1996) ergibt für den Gneis einen mittleren bis hohen und für den Quarzphyllit einen hohen Verschleiss. In Abb. 4 ist das Klassifikationsschema von THURO für die Bohrbarkeit dargestellt. Bohrgeschwindigkeiten und Verschleiss deuten beim Gneis auf eine schwere Bohrbarkeit hin. Der Quarzphyllit wird als schwer bis sehr schwer bohrbar eingestuft.

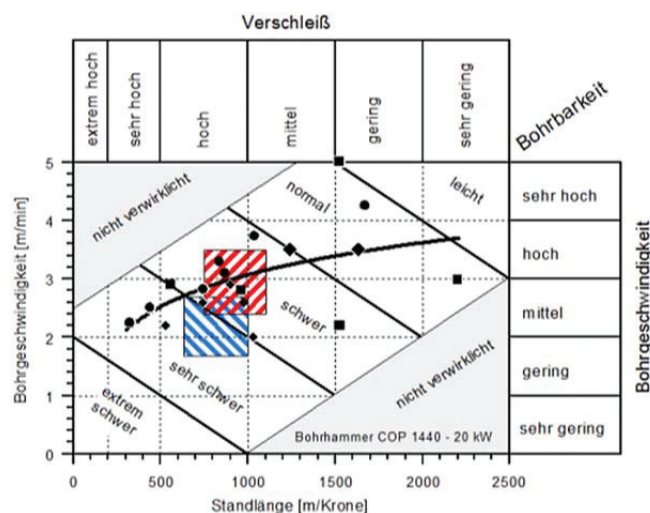


Abb. 4: Klassifikationsschema von THURO (1996) mit den Ergebnissen der Bohrbarkeit für Gneis (rot) und Quarzphyllit (blau).

Fig. 4: Classification scheme from THURO (1996) with the results for the borability of gneiss (red) and quartz pyhllite (blue).

4.3 Penetrationsprognose

Beim maschinellen Tunnelvortrieb mit TBM wird die Vortriebsgeschwindigkeit von der Penetration des Bohrkopfes und vom Verschleiss an den Abbaugeräten beeinflusst. Für die Prognosen lagen aus dem Projekt keine Maschinenparameter vor. Deshalb wurden Kennwerte verwendet, die typisch für Festgesteins-TBM mit großem Durchmesser sind (Tab. 1). Der Tunnelquerschnitt war mit 12,4 m als einzige Größe festgelegt.

Tab. 1: Typische Kennwerte für TBM im Festgestein.

Tab. 1: Typical parameters for TBM in solid rock.

Maschinenparameter	verwendete Kennwerte	Einheit
Schneidringdurchmesser	17 bzw. 19	Zoll (")
Schneidrollenabstand	85	mm
Schneidringbreite	19	mm
Max.Schneidkraft pro Disk	267 bzw. 315	kN
Drehzahl des Bohrkopfs	3 bzw. 4	U/min

4.3.1 Prognosemodell von GEHRING

Bei dem von GEHRING (1995) entwickelten Verfahren zur Penetrationsprognose handelt es sich um ein empirisches Modell, das anhand von Daten aus vier Tunnelvortrieben in Südafrika und Korea aufgestellt wurde. Es basiert auf der Annahme, dass sich die Penetration direkt proportional zur mittleren Anpresskraft der Disken \bar{F} und indirekt proportional zur einaxialen Druckfestigkeit σ_u verhält (Formel 1). In die Formel gehen Korrekturfaktoren k_i für Gesteins- und Maschinenparameter ein.

$$(1) \quad p = \frac{4 \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5) \cdot \bar{F}}{\sigma_u}$$

Mit den Korrekturfaktoren werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- spezifische Bruchenergie
- Gebirgsgefüge
- Spannungszustand
- Schneidringdurchmesser
- Schneidspurabstand

Aufgrund mangelnder Daten konnten die Faktoren Spannungszustand und Bruchenergie bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden.

4.3.2 Prognosemodell der CSM

Das Penetrationsmodell der Colorado School of Mines (CSM) wurde in OZDEMIR et al. (1977) zum ersten Mal veröffentlicht und von ROSTAMI (1997) überarbeitet. Es handelt sich dabei um ein halbanalytisches Modell, das sowohl auf Ergebnissen aus Schneidversuchen als auch auf felsmechanischen Überlegungen basiert. An der CSM wurden dazu mit einer Linear Cutting Machine (LCM) Schneidversuche mit Disken im Maßstab 1:1 durchgeführt.

Das Modell der CSM wird iterativ angewandt, so dass die Penetration zunächst vorgegeben wird. Daraus können dann die Schneidkraft pro Disk \bar{F} , das erforderliche Drehmoment M und die notwendige Leistung der Maschine P berechnet werden (Formeln 2 bis 4).

$$(2) \quad \bar{F} = 2,12 \cdot T \cdot R \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_u^2 \cdot \sigma_z \cdot S}{\varphi \cdot \sqrt{R \cdot T}}}$$

$$(3) \quad M = n_c \cdot 0,6 \cdot \frac{D_c}{2} \cdot \bar{F} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$(4) \quad P = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot M$$

T: Schneidringbreite [mm] R: Radius des Schneidrings [mm]
 φ : Winkel der Kontaktfläche [-] σ_u : einaxiale Druckfestigkeit [MPa]
 σ_z : Spaltzugfestigkeit [MPa] S: Schneidspurabstand [mm]
 n_c : Anzahl der Schneidspuren [-] D_c : Bohrdurchmesser [m]
 n: Drehzahl [U/min]

4.3.3 Diskussion der Prognoseverfahren

Die Ergebnisse der beiden Berechnungsmodelle sind in Abb. 5 gegenübergestellt. Die höchsten Penetrationsraten ergeben sich demnach aus der CSM-Formel bei einer Drehzahl von 3 U/min, die niedrigsten werden nach GEHRING ohne Korrekturfaktoren berechnet.

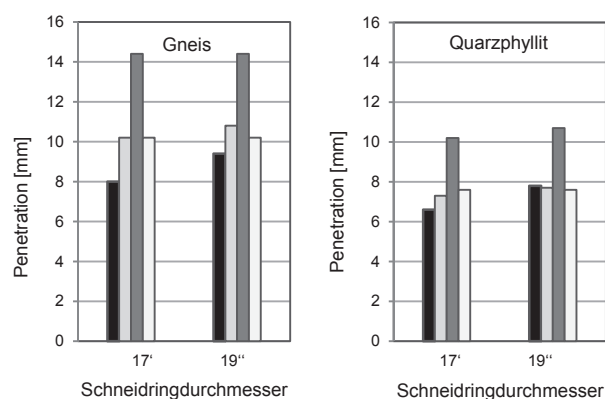


Abb. 5: Penetration, ermittelt aus dem Modell von GEHRING ohne (schwarz) und mit Korrekturfaktoren (hellgrau) und dem Modell der CSM bei einer Drehzahl von 3 (dunkelgrau) und 4 U/min (weiß).

Fig. 5: Penetration rate determined using the formula of GEHRING without (black) and with correction factor (light grey) and with the formula of the CSM with a rotational speed of 3 (dark grey) and 4 rpm (white).

Das Modell von GEHRING ist kritisch zu betrachten, da laut FRENZEL (2010) eine direkt proportionale Abhängigkeit von Penetration und Anpresskraft in der Praxis nicht bestätigt werden konnte. Außerdem wurde das Modell nur auf Grundlage von Daten aus nichtalpinem Raum aufgestellt. Deshalb stellt sich die Frage, inwieweit das Modell auf die geologisch-geotechnischen Verhältnisse in den Alpen übertragbar ist. Der Vorteil des Prognosemodells ist, dass die Penetration auch bei weitgehend unbekannter Bohrkopfgeometrie überschlägig ermittelt werden kann sowie dessen einfache Anwendbarkeit mit Hilfe weniger Standardkennwerte. Eine genauere Analyse ist allerdings aufgrund der fehlenden Maschinen-Eingangsparameter nicht möglich. Im Gegensatz zu GEHRING werden beim CSM-Modell sowohl zahlreiche Maschinenparameter als auch Gesteinseigenschaften berücksichtigt. Allerdings fehlt in der Prognose eine Einschätzung des Trennflächengefüges.

Eine weitere Ungenauigkeit der Prognose ergibt sich dadurch, dass bei der Berechnung grundsätzlich von neuen Disken ausgegangen wird. Da der Verschleiß je nach Position der Schneidrollen variiert, kann keine gleichmäßig hohe Schneidleistung erzielt werden. Der Vorteil des Prognosemodells der CSM ist, dass für eine bestimmte Maschine



durch Variation der Eingangsparameter sowohl die Penetrationsrate ermittelt, als auch die Anforderungen an die Maschine definiert werden können. Mit dem Modell ist außerdem eine Optimierung der Bohrkopfgeometrie möglich.

4.4 Prognose des Diskenverschleißes

Mit den Ergebnissen der Penetrationsprognose konnte außerdem eine Verschleißprognose der Schneidwerkzeuge durchgeführt werden. Derzeit kommen überwiegend 17- und 19-Zoll-Diskens zum Einsatz, bei stark abrasivem Gestein werden inzwischen aber auch 20-Zoll-Diskens verwendet (FRENZEL 2010).

4.4.1 Verschleißprognose nach GEHRING

Das Prognosemodell von GEHRING für den Diskenverschleiß basiert auf der Grundannahme, dass der Verschleiß umgekehrt proportional zum Rollweg der Schneidringe ist, und wurde auf Grundlage von Daten aufgestellt, die beim TBM-Vortrieb des Dong-Hae-Tunnels in Korea gewonnen wurden. Mit der Prognoseformel wird das Standvolumen eines Schneidrings über den maximalen Gewichtsverlust ΔG_{zul} , die mittlere Anpresskraft \bar{F}_N , den Bohrdurchmesser der TBM D_c , den mittleren Schneidspurdurchmesser \bar{D} , den spezifischen Gewichtsverlust v_s , die einaxiale Druckfestigkeit σ_u und die Anzahl der Diskens n_c , berechnet (Formel 5).

$$(5) \quad V_c = \frac{\Delta G_{zul} \cdot \bar{F}_N \cdot (k_1 \cdot \dots \cdot k_i) \cdot D_c^2}{4 \cdot \bar{D} \cdot v_s \cdot \sigma_u \cdot n_c}$$

In die Formel gehen dieselben Korrekturfaktoren ein, wie beim Penetrationsmodell. Der spezifische Gewichtsverlust kann mit Hilfe des CAI nach Formel 6 ermittelt werden.

$$(6) \quad v_s = 0,74 \cdot CAI^{1,93}$$

4.4.2 Verschleißprognose der CSM

Von der Colorado School of Mines wurde ebenfalls ein Modell zur Verschleißprognose entwickelt, das in FRENZEL (2010) detailliert beschrieben und erweitert wird. Es basiert, wie bei GEHRING, auf der Annahme, dass der Diskenrollweg umgekehrt proportional zum CAI ist. Nach der Formel berechnet sich der maximale Rollweg CL aus dem CAI und dem Schneidringdurchmesser d (Formel 7).

$$(7) \quad CL = \frac{2057}{CAI} \cdot \frac{d}{432}$$

Aus dem maximalen Rollweg und der mittleren Spurlänge, die sich aus dem Bohrdurchmesser D_c ergibt, kann die Anzahl der Bohrkopfumdrehungen U_c bis zum Wechsel des Schneidringes ermittelt werden (Formel 8).

$$(8) \quad U_c = \frac{CL}{D_c \cdot 0,6 \cdot \pi}$$

Mit der Anzahl der Schneidspuren und der mittleren Penetration lässt sich mit Formel 9 schließlich die Volumenstandzeit eines Schneidrings berechnen.

$$(9) \quad V_c = \frac{U_c}{n_c} \cdot \frac{D_c^2}{4} \cdot \pi \cdot p$$

FRENZEL führt in seiner Dissertation einen Korrekturfaktor ein, mit dem der vorzeitige Austausch der Schneidrollen berücksichtigt wird. Damit wird der tatsächliche Abrieb quantifiziert und die Standlänge der Schneidrollen abgemindert.

4.4.3 Diskussion der Prognosemodelle

In Abb. 6 sind die Ergebnisse für die Standvolumina beim Vortrieb im Gneis und im Quarzphyllit dargestellt. Angegeben sind jeweils das Ergebnis aus der Berechnung nach GEHRING ohne und mit Korrekturfaktoren sowie die Ergebnisse aus der CSM-Formel ohne und mit dem Abminderungsfaktor. Der geringste Verschleiß wird demnach mit dem Prognosemodell der CSM berechnet, wenn ein vorzeitiger Wechsel der Schneidringe nicht berücksichtigt wird. Da die Schneidringe in der Praxis aber üblicherweise vor Erreichen der Verschleißgrenze ausgetauscht werden, sind diese Standvolumina als zu hoch einzuschätzen.

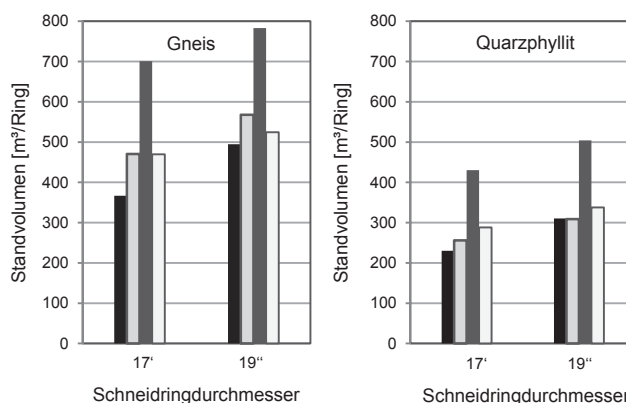


Abb. 6: Standvolumen, ermittelt mit dem Modell von GEHRING ohne (schwarz) und mit Korrekturfaktoren (hellgrau) und dem Modell der CSM ohne (dunkelgrau) und mit Abminderungsfaktor (weiß).

Fig. 6: Cutting volume determined using the formula of GEHRING without (black) and with correction factor (light grey) and using the formula of the CSM without (dark grey) and with the reduction factor (white).

Im Gegensatz dazu können die Ergebnisse aus dem Modell von GEHRING ohne Berücksichtigung der Korrekturfaktoren als zu konservativ betrachtet werden, da aufgrund des Trennflächengefüges vermutlich höhere Penetrationen erreicht werden können und damit ein längerer Rollweg der Schneidringe möglich ist. Insgesamt zeigen die Ergebnisse nach GEHRING mit Korrekturfaktoren und nach dem Modell der CSM mit Abminderungsfaktor eine gute Übereinstimmung. Ähnlich wie bei der Penetrationsprognose kann das Modell von GEHRING kritisch betrachtet werden, weil es nur anhand der Daten aus Korea entwickelt wurde und keine Validierung des tatsächlichen Verschleißes unter anderen Bedingungen durchgeführt wurde. Weiterhin ist der Diskenverschleiß stark von der Härte des eingesetzten Werkzeugs abhängig, die nicht in die Formel eingeht. Bei der CSM geht die Qualität des Schneidrollenmaterials ebenso wenig in das Modell ein. Außerdem wird erst in der Arbeit von FRENZEL (2010) ein vorzeitiger Austausch der Schneidringe mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt.

In beide Berechnungen geht die mittlere Penetration in die Formel ein, weshalb die Verschleißprognose stark von der Genauigkeit der Penetrationsprognose abhängig ist. Für das Modell von GEHRING gilt, dass es für eine überschlägige Vorhersage des Standvolumens gut geeignet ist. Für eine genaue Prognose des Werkzeugverschleißes ist das Modell der CSM besser geeignet.

4.5 Vergleich der Vortriebsleistungen

Beim Bohr- und Sprengvortrieb ist die Vortriebsleistung nicht nur von der Bohrgeschwindigkeit, sondern auch von der Abschlagslänge, von der Netto- und der Brutto Bohrzeit pro Bohrloch abhängig. Für eine Leistungsprognose muss außerdem der Zeitbedarf für alle weiteren Arbeitszyklen betrachtet werden. Eine Prognose des gesamten Arbeitsablaufes konnte im Rahmen der Arbeit nicht durchgeführt werden, weshalb ein direkter Leistungsvergleich mit dem TBM-Vortrieb nicht möglich ist.

Beim maschinellen Vortrieb mit TBM ergibt sich die Brutto-Vortriebsleistung aus der Netto-Vortriebsleistung, dem Ausnutzungsgrad der Maschine und der effektiven Tagesarbeitszeit. Bei der Annahme einer effektiven Tagesarbeitszeit von 18 Stunden und einem Ausnutzungsgrad von 40 % kann die Vortriebsleistung überschlägig bestimmt werden. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Bohr- und Sprengvortrieb geringere Vortriebsleistungen erzielt werden als beim TBM-Vortrieb.

5 Schlussfolgerung

Für einen Vorschlag der am besten geeigneten Vortriebsmethode müssen die Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen werden. Obwohl bei einem TBM-Vortrieb theoretisch höhere Vortriebsleistungen erzielt werden können, wird eine Zeit- und Kosteneinsparung durch die unklaren geologischen Verhältnisse im Bereich der PN wieder relativiert. Es ist davon auszugehen, dass während des Vortriebs umfangreiche Vorerkundungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen, die bei einem Maschinenvortrieb einen entsprechenden Zeitverlust generieren würden. Zusätzliche Kosten und ein hoher Zeitbedarf werden außerdem durch die kurzen Standlängen der Schneidrollen aufgrund der hohen Abrasivität verursacht. Weiterhin müsste der Kreisquerschnitt für Nothaltebuchten und Abbiegespur nachträglich aufgeweitet werden, was zusätzlich zu den hohen Investitionskosten einer TBM weitere Kosten verursachen würde.

Nach Abwägung aller Einflussfaktoren, wird ein konventioneller Bohr- und Sprengvortrieb bei den vorliegenden Gegebenheiten als günstigste Vortriebsmethode eingeschätzt. Beim Bohr- und Sprengvortrieb werden nachträgliche Aufweitungen minimiert, da der Querschnitt schon während des Vortriebs angepasst werden kann. Die Bohrgeräte können beispielsweise auch für das Herstellen der Notausgänge verwendet werden. Weiterhin kann bei einem Sprengvortrieb flexibler auf die unklaren geologischen Verhältnisse entlang der PN reagiert werden, auch wenn dabei nur vergleichsweise geringe Vortriebsleistungen möglich sind. Bei

schlechten Gebirgsverhältnissen können die Sicherungsmittel außerdem früher und flexibler eingebaut werden. Den wahrscheinlich wichtigsten Faktor stellen die deutlich geringeren Investitionskosten bei diesem Verfahren dar.

Obwohl die geologischen Bedingungen vermutlich mit beiden Verfahren bewältigt werden könnte, dürften letztlich die Baukosten entscheidend für die Wahl der Vortriebsmethode sein.

Danksagung

Für die Unterstützung und Zusammenarbeit bei der Anfertigung der Masterarbeit sei dem Amt für Geologie und Baustoffprüfung in Bozen, dem Büro Bodennah und dem Ingenieurteam Bergmeister herzlichst gedankt.

Literatur

- FRENZEL, C. (2010): Verschleißkostenprognose für Schneidrollen bei maschinellen Tunnelvortrieben in Festgesteinen. – Diss., Münchner Geowiss. Abh. B **15**, 64 S., München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil).
- GEHRING, K.-H. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. – Felsbau **13/6**: 439-448, Essen (Verlag Glückauf).
- ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2010): Erläuterungen zur geologischen Karte von Italien im Maßstab 1:50 000, Blatt 013 Meran. – Servizio geologico d'Italia, 319 S., Rom.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics (1978): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. - Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. **16**: 135-140.
- OZDEMIR, L., MILLER, R. & WANG, F.-D. (1977): Mechanical tunnel boring prediction and machine design. – Annual Report, Washington D.C. (National Science Foundation).
- PGNWM (2007): Planungsgruppe Nord-West-Umfahrung von Meran, 2. Baulos. Geologisch-geotechnischer Bericht. – 46 S., Bozen.
- PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. – Diss., Münchner Geol. Hefte B **17**, 146 S., München.
- ROSTAMI, J. (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, Dept. of Mining Engineering, Colorado School of Mines.
- THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. – Diss., Münchner Geol. Hefte B **1**, 145 S., München.
- WIESER, C. (2012): Nordwest-Umfahrung Meran – Untersuchungen zu Gebirgslösung und Verschleiß in der Festgesteinsstrecke. – unveröff. Masterarbeit, Technische Universität München, 119 S.