

Grundlagen der Penetrations- und Verschleißprognose beim TBM-Vortrieb im Fels

Kurosch THURO & Heiko KÄSLING, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München

1 Leistungs- und Verschleißkriterien beim TBM-Vortrieb im Fels

1.1 Grundlegende Einflussfaktoren

Als Oberbegriff zur Leistungs- und Verschleißprognose beim TBM-Vortrieb lässt sich der Begriff „*Gebirgslösung*“ definieren. Im Allgemeinen wird darunter der mechanische Ausbruchvorgang von Locker- und Festgestein bzw. Gebirge für bautechnische Zwecke verstanden. Dieser Begriff wird dabei für das Baggern, Reißen, Abschieben über Tage z.B. in einer Baugrube oder an einer Böschung genauso gebraucht wie für das Bohren, Sprengen, Fräsen oder (TBM-) Schneiden mit entsprechenden Vortriebsgeräten unter Tage z.B. in einem Tunnel oder in einer Kaverne.

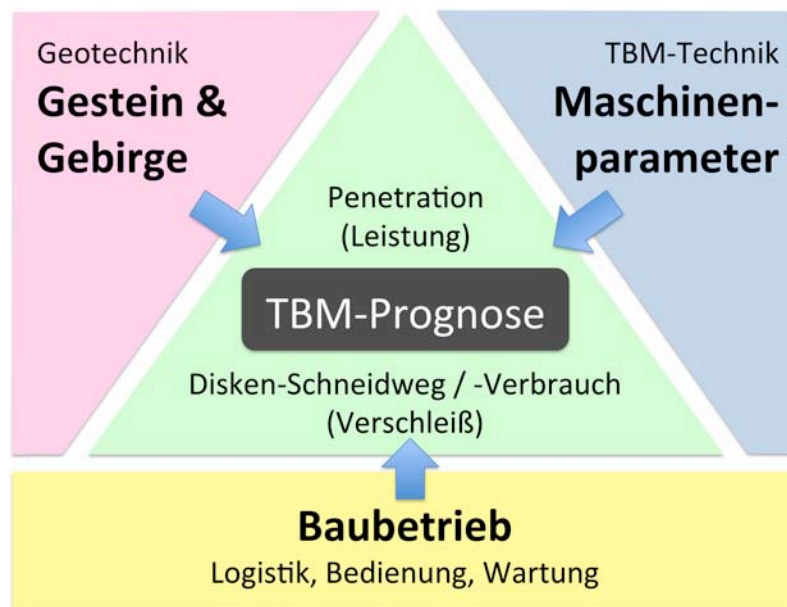


Abb. 1: Übersicht der drei Haupteinflussfaktoren Gebirge - Maschine - Baubetrieb auf die TBM-Prognose (SCHNEIDER & THURO 2007, verändert).

Es lassen sich drei Haupteinflussfaktoren unterscheiden, welche die Gebirgslösung mit einer Tunnelbohrmaschine steuern (Abb. 1):

1. Gestein und Gebirge mit ihrer Ausbildung und den geologisch-petrographischen und felsmechanischen Parametern, hier zusammenfassend als „Geotechnik“ bezeichnet.
2. Die TBM-Technik bzw. die Maschinenparameter, mit denen der Ausbruch durchgeführt wird.
3. Der Baubetrieb und die Baulogistik, als ineinandergreifende Bauabfolgen und letztlich die Mannschaft, welche die Geräte bedient und wartet.

Die erzielbare Vortriebsgeschwindigkeit und ebenso der Diskenverbrauch und der Verschleiß der Geräte ist zunächst von der verwendeten Ausrüstung abhängig: von System und Leistung der Tunnelbohrmaschine, und von Materialgüte und Bauform des Diskenmeißels. Die Auswahl der TBM und Werkzeuge wird entscheidend von den geologischen Gegebenheiten beeinflusst.

Gestein und Gebirge bestimmen durch ihre geologisch-geotechnischen Materialeigenschaften (Mineralzusammensetzung, felsmechanische Eigenschaften, Ausbildung des Gesteins im Gebirgsgefüge) entscheidend die Vortriebsleistung, den Verschleiß und eventuelle Probleme beim TBM-Vortrieb.

Der dritte Faktor ist der Baubetrieb und Bauablauf, dem bei der Leistungs- und Verschleißprognose oft zu wenig Beachtung zukommt. Ohne eine entsprechende Planung der Logistik und eine eingespielte Mannschaft können trotz modernster und effektivster technischer Verfahren keine hohen Vortriebsleistungen erzielt werden.

Bei der Gebirgslösung mit einer TBM können zwei Leitparameter verwendet werden (GEHRING 1997, THURO 2002):

1. Die Bohrkopf-Penetration, definiert als mittleres Eindringen in ein Gestein oder Gebirge bei einer einzigen Umdrehung des Bohrkopfes, gilt allgemein als Maß für den Bohrfortschritt (Schneidbarkeit). Das Verhältnis der Bohrkopf-Penetration zur Eindringkraft wird als spezifische Penetration bezeichnet und gilt als Vergleichsmaß für TBMs verschiedener Durchmesser und Bohrkopfauslegung.
2. Der Verschleiß der Diskenmeißel wird als Schneidweg oder Rollstrecke einer Diske in Kilometern erfasst oder als Verbrauch von (Disken-) Meißeln pro Festkubikmeter gelösten Fels (spezifischer Diskenverbrauch). Durch die üblicherweise langen Rollstrecken und Anordnungsgeometrien am Schneidrad sind die Verschleißwerte wegen der zu geringen Auflösung meist jedoch nicht zur Charakterisierung von kurzfristig wechselnden Gebirgsverhältnissen verwendbar. Analog wird auch der quantitative Verschleiß beurteilt.

1.2 Parameter für die Prognose von Leistungs- und Verschleißparametern

Für die TBM-Vortriebsprognose muss zwischen der gesteinsbedingten „Basis-Gebirgslösbarkeit“ und deren Beeinflussung durch den Gebirgscharakter unterschieden werden, welcher vor allem durch das Trennflächengefüge bestimmt wird. Bei einem möglichst homogenen und isotropen Gebirge können über die felsmechanischen Kennwerte und entsprechende Prognoseformeln direkt Leistungsparameter berechnet werden. Gleiches gilt analog für die Verwendung von petrographischen (Äquivalenter Quarzgehalt, THURO 2002) oder Indexparametern (LCPC- und Cerchar Abrasivitäts Index, THURO & KÄSLING 2009) zur Berechnung von Verschleißparametern. Meist existieren zur Einbeziehung der Gebirgsparameter nur eingeschränkt gültige Prognoseinstrumente.

Die unten aufgeführten felsmechanischen bzw. petrografischen Parameter haben sich zur Korrelation mit den Leistungs- und Verschleißparametern als besonders geeignet erwiesen (Thuro 2002) und dienen als Eingangsgrößen für Prognosemodelle:

Die *Einaxiale Druckfestigkeit* (Uniaxial Compressive Strength UCS) hat sich als hochsignifikanter Parameter bezüglich der Penetration erwiesen. Kommt der Einaxiale Druckversuch z.B. wegen niedriger Bohrkernqualität nicht in Frage, so können Druckfestigkeitswerte über den Punktlastversuch (Punktlastindex) abgeschätzt werden (THURO 2010). Die *spezifische Zerstörungsarbeit* (specific Destruction Work) hat sich zwar ebenfalls als signifikanter Parameter bezüglich der Penetration erwiesen (THURO 2002), wird aber nur selten im Zuge von Voruntersuchungen ermittelt und kann häufig nicht mit der gleichen Genauigkeit (oft Prüfmaschinen- oder Proben-bedingt) ermittelt werden.

Die indirekte Zugfestigkeit (*Spaltzugfestigkeit*, Brazilian Tensile Strength BTS) hat sich ebenfalls als signifikanter Parameter bezüglich der oben genannten Leistungsparameter erwiesen. Grundsätzlich gibt es keinen Unterschied zum Signifikanzniveau der Einaxialen Druckfestigkeit. Die Spaltzugfestigkeit kann aber häufig nicht mit der gleichen Genauigkeit wie die Druckfestigkeit ermittelt werden.

Geotechnische Verschleißindices wie der *Äquivalente Quarzgehalt*, der *LCPC-* und der *Cerchar Abrasivitäts Index* (vgl. Übersicht in THURO & KÄSLING 2009) haben sich als hochsignifikante Parameter für die Ermittlung der Gesteinsabrasivität erwiesen. Für die Prognose des Diskenschneidwegs oder des Diskenverbrauchs wird ganz überwiegend der Cerchar Abrasivitäts Index CAI verwendet. Die NTNU Verschleißversuche kommen in Mitteleuropa wenig zum Einsatz, werden aber von den TBM-Herstellern oft parallel im Hinblick auf eine alternative Prognose beauftragt (vgl. Abschnitt 2).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die felsmechanischen Parameter, insbesondere die Einaxiale Druckfestigkeit, zwar sehr gute Korrelationen mit Leistungsparametern ergeben, die Voraussetzung - homogenes Gebirge möglichst ohne störende geologische Einflüsse - jedoch in der Baupraxis nur selten anzutreffen ist.

1.3 Abhängigkeit der Gebirgslösbarkeit von geologischen Faktoren

Stellvertretend für die vielfältigen geologischen Einflussgrößen (vgl. THURO & PLINNINGER 2007) soll hier nur kurz auf das Trennflächengefüge und die Anisotropie eingegangen werden.

1.3.1 Einfluss des Trennflächengefüges

Das Gebirge wird in Festgesteinen insbesondere durch das Vorhandensein von Diskontinuitäten oder Trennflächen gekennzeichnet. Unter Diskontinuitäten oder Trennflächen werden hier Schichtflächen, die als Bankung auftreten, Schieferungs- und Kluffflächen sowie Störungszonen bezeichnet, die den Gebirgsverband durchtrennen und in einem mehr oder weniger gleichartig aufgebauten Bereich – einem sog. Homogenbereich – eine geregelte Raumstellung ihrer Scharen und Verteilung ihrer Häufigkeiten aufweisen. Die räumliche Anordnung, Ausbildung, Verteilung und die daraus resultierenden Abstände aller Trennflächen stellen das Trennflächengefüge dar. Das Trennflächengefüge bestimmt in den meisten Fällen das Festigkeitsverhalten des Gebirges entscheidend (THURO 2007). Durch das Trennflächengefüge werden Kluffkörper unterschiedlicher Form und Größe begrenzt, die im Gebirge völlig oder nur teilweise von den benachbarten Kluffkörpern getrennt sind. Als Indiz für den räumlichen Durchtrennungsgrad des Gebirges wird im Folgenden der mittlere Kluffabstand als semiquantitativ ermittelter Leitparameter für die Korrelation ausgewählt: Dieser lässt sich zum einen selbst an der Tunnelortsbrust kartieren, kann aber auch durch Auswertung einer baugelologischen Dokumentation mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Das Diagramm (Abb. 2) zeigt die spezifische Penetration in Abhängigkeit der Trennflächenabstände beim Projekt Erkundungsstollen Schönbergtunnel, Österreich. Die spez. Penetrationsraten stiegen mit zunehmendem Durchtrennungsgrad und entsprechender Zunahme von Makro- und Mikrorissen im Gestein bis ca. 5 cm Trennflächenabstand an. Danach fiel die spezifische Penetration stark ab.

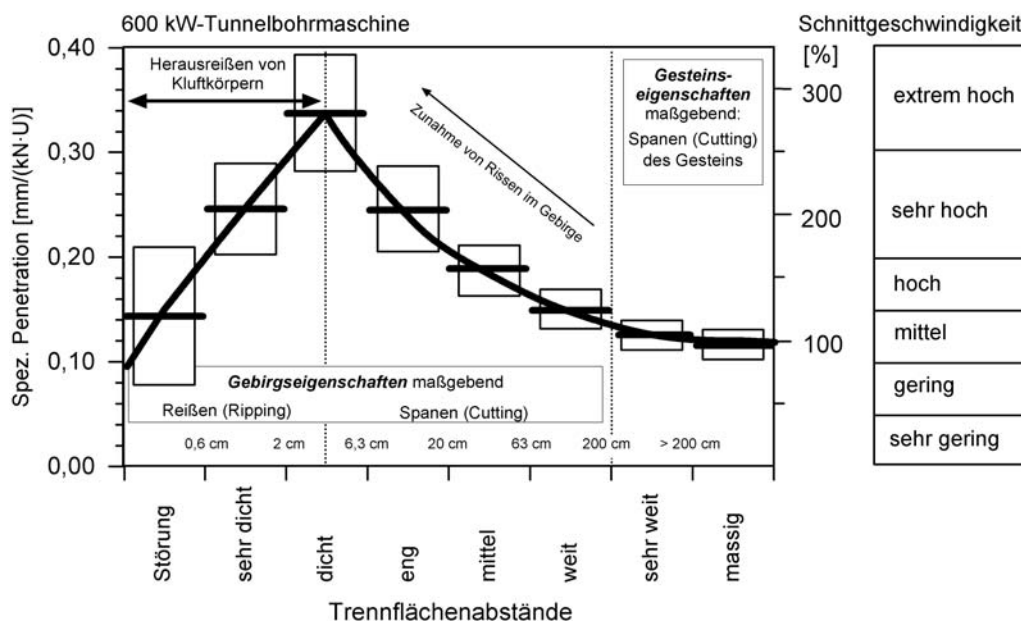


Abb. 2: Spezifische Penetration beim TBM-Vortrieb und Kluffabstand. Balken: Standardabweichung vom Mittelwert (THURO 2002, 2007).

Beim Schneiden finden zwei Prozesse der Gebirgslösung statt: Solange das Gebirge massig ist, dominiert das Schneiden von Material. Die Energie, die benötigt wird um das Gestein zu zerspannen sinkt dabei mit der „Vorzerkleinerung“ des Gebirgs durch die näher rückenden Trennflächen. Sind die Trennflächenabstände kleiner als der Schneidspurabstand (hier 80 mm), so werden beim Eindringen der Diskenrollen ganze Kluffkörper herausgerissen. Die Folge wäre eigentlich eine wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeit – wenn das Material schnell genug abgefördert werden könnte. Ist die Abförderung z.B. durch nicht großzügig genug dimensionierte Räumslitze dazu nicht in der Lage, so kommt es zum Zermahlen des Schnittgutes durch das Schneidrad und die weitere Penetration ist behindert. Das Ergebnis dieses Effekts ist abhängig zum einen von der Quantität des anfallenden Materials, zum anderen auch von seiner Qualität – vor allem der Festigkeit.

Da es sich in vorliegendem Fall um Phyllite (Schwarzphyllite & Serizitphyllite) und Quarzphyllite relativ geringer Festigkeit handelte, kam es zu einem deutlichen Abfall der Schneidleistung durch ein Verschmieren des Schneidrads. Die Konsequenz kann jedoch noch weit schwerwiegender ausfallen – beispielsweise bei spröden Graniten, Gneisen oder Quarziten hoher bis extrem hoher Festigkeit: Bei mehreren großen Bauprojekten sind Fälle bekannt, in denen durch ein Blockieren der Diskenrollen durch Verkeilen von Kluffkörpern in den Rollengehäusen innerhalb kürzester Zeit Disken extrem asymmetrisch verschleifen, wodurch nicht nur der Vortrieb fast schlagartig auf Null sinkt sondern auch ein entsprechend großer Teil der Diskenmeißel ausgetauscht werden muss. Auf die möglicherweise hinzukommenden Stabilitätsprobleme, die bis hin zum Blockieren der TBM im bereits ausgebrochenen, aber instabilen Hohlraum führen können, sei hier nur hingewiesen.

Obwohl die Nettoschneidleistungen in stark durchtrenntem Gebirge meistens deutlich ansteigen, steigt die Zeit für den Einbau der benötigten Sicherungsmittel i.d.R. überproportional an, so dass die tägliche Vortriebsleistung stark abfallen kann.

1.3.2 Einfluss der Anisotropie

Der Einfluss der Anisotropie auf die Penetration ist am deutlichsten in stark geschieferten Gesteinen zu erkennen. Im nachfolgenden Beispiel wird die Winkelabhängigkeit von der Orientierung der Schieferung in phyllitischen Gesteinen vorgestellt (THURO 2002). Um die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Orientierung der Schieferung zu erhalten, muss die Schieferung zwischen den Grenzfällen „parallel“ und „rechtwinklig“ durchrotiert werden. Die Werte zwischen diesen Grenzfällen sind als Scherfestigkeiten entlang einer erzwungenen Scherfläche zu werten. Allerdings entspricht diese Versuchsanordnung am ehesten der Beanspruchung im Gebirge unter einer Diskenrolle.

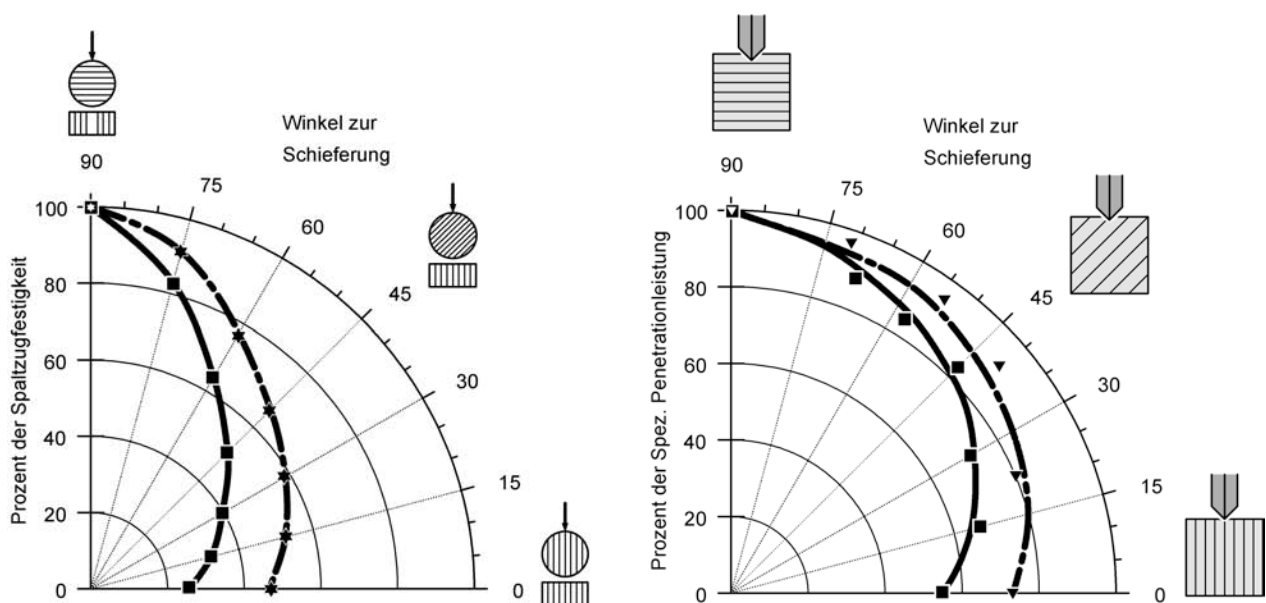


Abb. 3: Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von der Einfallsrichtung und der spezifischen Penetration von der Orientierung der Vortriebsrichtung zur Schieferung. Durchgehende Linie: Phyllite. Gestrichelte Linie: Phyllit-Karbonatschiefer-Wechselfolge (THURO 2002, 2007).

Im linken Diagramm der Abb. 3 ist die Spaltzugfestigkeit (bzw. Scherfestigkeit) gegen den Winkel der Einfallrichtung der Schieferung aufgetragen. Dabei wird eine stetige Abnahme der Zugfestigkeit (bzw. Scherfestigkeit) deutlich. Die geringsten Festigkeiten treten erwartungsgemäß rechtwinklig zur Schieferung (90°) auf. Die Penetration zeigt im rechten Diagramm ein umgekehrtes, aber letztlich analoges Verhalten zur Spaltzugfestigkeit: Die hohe Penetration korrespondiert mit einer niedrigen Spaltzugfestigkeit bei Beanspruchung rechtwinklig zur Schieferung (hohe Penetration bei 90° / niedrige Zugfestigkeit bei 0°), die niedrige Penetration mit der hohen Spaltzugfestigkeit parallel zu ihr (niedrige Penetration bei 0° / hohe Zugfestigkeiten bei 90°).

Die Schneidleistungen sind also senkrecht zur Schieferung am höchsten und sinken mit schräg zur Vortriebsrichtung verlaufender Schieferung deutlich bis auf etwa 55% (Phyllite) bzw. 75% (Phyllit-Karbonatschiefer-Wechselfolge) ab. Liegt die Schieferung in Tunnelachse - gleich ob bei senkrechter oder horizontaler Lagerung - so sind die Schneidleistungen entsprechend am geringsten. Dieser Einfluss der Anisotropie auf die TBM-Schneidleistung wurde beim Vortrieb des Erkundungsstollens zum Schönbergtunnel Umfahrung Schwarzach im Salzburger Land beobachtet.

Diese Beobachtungen werden von den Ergebnissen numerischer Simulationen unterstützt, die mithilfe des Particle Flow Codes (PFC 2D, Itasca) durchgeführt wurden (THURO & SCHORMAIR 2008). Abb. 4 zeigt, dass die Chip-Größe deutlich vom Winkel der Schieferung in Bezug auf die Eindringrichtung abhängt. Bei 0° bildet sich der Chip mit der geringsten, bei 90° mit der maximalsten Größe.

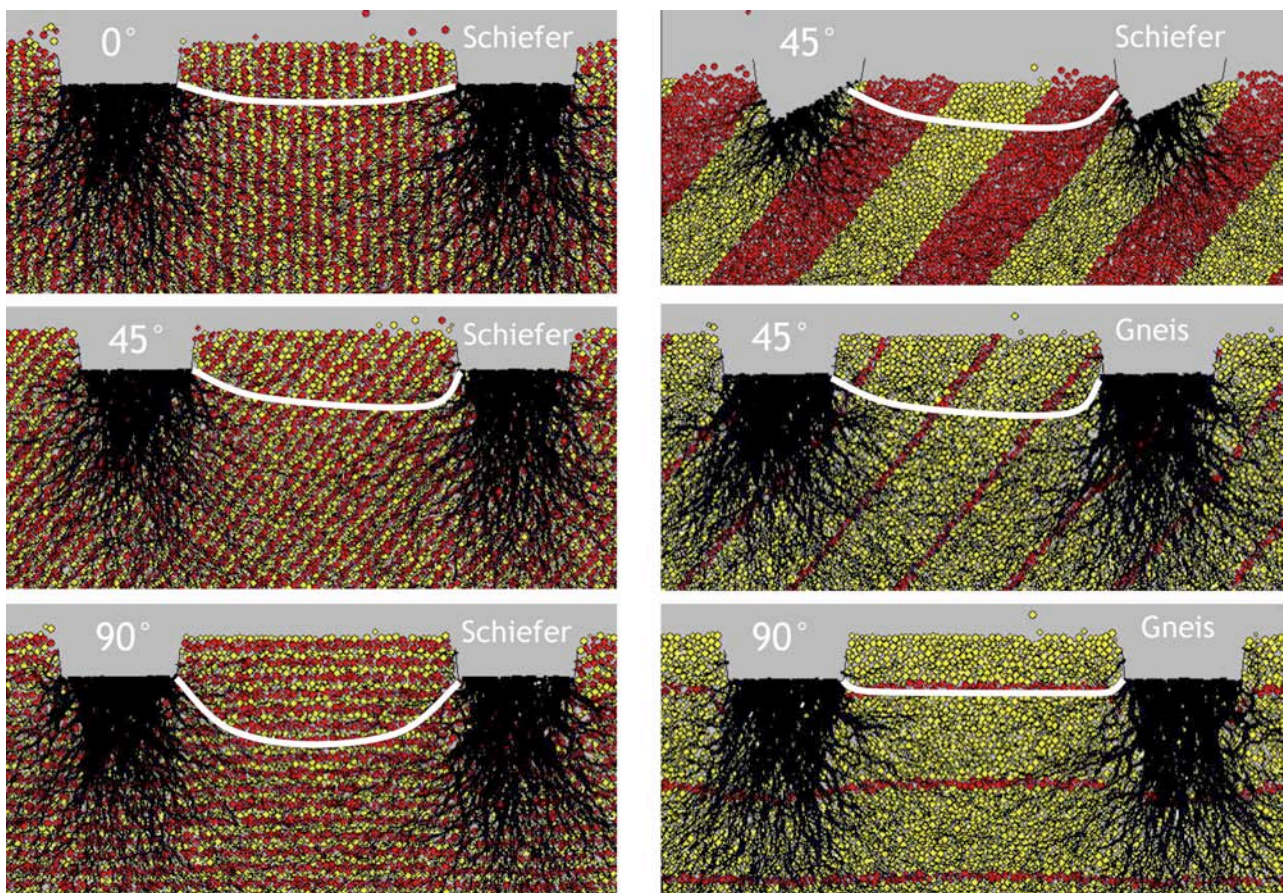


Abb. 4: Bild der Mikrorisse beim Eindringen einer Diske in geschieferte Gesteine bei unterschiedlicher Orientierung der Schieferung bezüglich der Tunnelachse (aus THURO & SCHORMAIR 2008, verändert).

2 Vorhersagemodelle für Penetration und Verschleiß im Festgestein

Für die Leistungs- und Verschleißprognose beim Einsatz von Tunnelbohrmaschinen im Festgestein gibt es zahlreiche Prognosemodelle (vgl. LEITNER 2006, FRENZEL 2010), von denen im Folgenden einige der gebräuchlichsten näher erläutert werden. Die Vorhersage des Werkzeugverschleißes ist bis auf wenige Ausnahmen immer mit der Prognose der Penetration verknüpft bzw. geschieht im Nachgang hierzu. Die Vorhersage der Penetration und des Verschleißes geschieht bei diesen Prognosemodellen auf unterschiedliche Art und Weise. Grundsätzlich lassen sich hierbei drei Methoden unterscheiden, die in der Praxis durchaus auch in verschiedenen Kombinationen genutzt werden.

- empirische Modelle auf Basis von Tunnelvortriebsdaten
- Modelle auf Basis von Schneidversuchen im Labor
- Modelle auf Basis von Gebirgsklassifizierungssystemen

2.1 Prognosemodelle für die Penetration

2.1.1 Empirische Modelle auf Basis von Tunnelvortriebsdaten

Aus den Daten verschiedenster Tunnelvortriebe werden sog. empirische Penetrationsmodelle abgeleitet. Hierbei werden unter Berücksichtigung der geologisch-geotechnischen Verhältnisse die erreichten Penetrationen dokumentiert und schlussendlich ein Modell entwickelt.

Es muss klar sein, dass ein solches Modell nur in den geologisch-geotechnischen Gegebenheiten gilt, die als Datengrundlage zur Verfügung standen bzw. über spätere Rückrechnungen abgesichert werden konnten. Problematisch ist dabei, dass die in der Realität auftretenden Störeinflüsse durch den Maschinenbetrieb bzw. baubetriebliche Einflüsse oder geologisch-geotechnische Varianzen des Baugrundes eliminiert werden müssen. Dies kann nur durch eine sehr aufwändige und lückenlose Dokumentation sowie die anschließende Datenanalyse erreicht werden. Adaptionen dieser Prognosemodelle bei Vortrieben unter veränderten geologisch-geotechnischen Rahmenbedingungen sind sehr problematisch und führen zwangsweise zu ungenauen oder grob falschen Prognosen. Dies kann z.B. bei Vortrieben in bislang nicht erfassten Spannungsverhältnissen oder schlechten Gebirgsverhältnissen der Fall sein. Die Beurteilung der Anwendbarkeit eines Modells ist für den Anwender jedoch oftmals sehr schwierig, da diese Informationen nur bei ausreichender Kenntnis des jeweiligen Modells und der zugrundeliegenden Daten möglich ist. Zudem werden von den Autoren der Modelle diese oftmals als allumfassend und überall einsetzbar beschrieben.

Des Weiteren sind die erreichten Leistungen bzw. Penetrationen nur für den eingesetzten Maschinentyp und das eingesetzte Lösewerkzeug gültig. Die stetige Weiterentwicklung in der Maschinenteknik macht daher Adaptionen der Modelle und eine Validierung immer wieder erforderlich. Als Beispiel sei hier die Entwicklung der Disken bzw. Schneidrollen einer TBM genannt, deren Größe um 1990 etwa bei 14-16 Zoll lag und derzeit je nach Einsatzgebiet 17-19 Zoll, in Ausnahmefällen bis 20 Zoll beträgt. Die von diesen Disken, die aus qualitativ hochwertigem, hochlegiertem Warmarbeitsstahl hergestellt werden, aufgebrachten Anpressdrücke können bauartbedingt wesentlich größer sein als bei kleineren Schneidrollen. Die hierdurch erreichten Penetrationen stehen jedoch in keinem linearen Zusammenhang mit den Anpresskräften.

Vorteil dieser Modelle ist, unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte, meist eine realistische Einschätzung der Penetration bzw. Vortriebsleistung und der Kosten. Durch die Auswertung der unter realen Bedingungen während verschiedener Baumaßnahmen erreichten Leistungen stehen die Prognosemodelle meist auf der sicheren und konservativen Seite.

Erste Beurteilungen lassen sich zudem recht leicht über den Vergleich von Standardkennwerten, wie z.B. der Einaxialen Druckfestigkeit sowie der Zugfestigkeit des Gesteins, und der über verschiedene Gebirgsklassifizierungen erfassbaren Gebirgsverhältnisse durchführen.

Weitere Prognosemodelle, wie z.B. nach RUTSCHMANN (1974), MIKURA (1980) und STEVENSON (1999), sind in FRENZEL (2010) kurz erläutert.

2.1.1.1 Prognosemodell nach Gehring

Von GEHRING (1995) wird ein Prognosemodell für die Penetration und den Werkzeugverschleiß vorgestellt, das auf Grundlage weniger Tunnelprojekte erstellt wurde. Dabei wird jedoch angenommen, dass, wie oben bereits kritisch besprochen, die erreichte Penetration proportional zur aufgebracht Anpresskraft pro Schneidring ist.

Gleichung 1: Prognoseformel für die Penetration nach GEHRING (1995).

$$p = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot F_N}{\sigma_c}$$

mit: p	Penetration	[mm]
F_N	Anpresskraft pro Schneidring	[kN]
σ_c	Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins	[MPa]
k_i	Korrekturfaktoren für	
	Spezifische Bruchenergie	
	Gebirgsgefüge	
	Primärspannungen	
	Schneidringdurchmesser ($k_4=430/d$, d ist der Schneidringdurchmesser)	
	Schneidspurabstand	

Lediglich für k_4 und k_5 werden Korrekturfaktoren angegeben, da das benutzte Datenmaterial aus nur vier Tunnelprojekten keine ausreichende Bandbreite für die weiteren Parameter aufwies.

2.1.1.2 ABROCK Alpine Modell

Zur Zeit wird im Forschungsverband ABROCK (www.uibk.ac.at/abrock) das Prognosemodell von Gehring eingehend überprüft und überarbeitet. Besonders sollen die Korrekturfaktoren, die von Gehring nur teilweise quantifiziert werden konnten, über Auswertungen aktueller Vortriebsdaten näher bestimmt werden. Ebenso findet eine Adaption des Modells an aktuell gängige Tunnelbohrmaschinen und deren Betriebsparameter (Schneidringdurchmesser, Schneidringqualität, Bohrkopfdrehzahl, etc.) statt.

2.1.1.3 Prognosemodell der NTNU

An der Norwegischen Technischen Hochschule Trondheim (NTNU) ist ein Prognosemodell entwickelt worden, das u. a. in LISLERUD (1988) und überarbeitet von BRULAND (2000) veröffentlicht wurde. Es basiert auf Daten von rund 35 Tunnelprojekten, die meist ausschließlich in Norwegen und damit in meist unverwitterten, wenig geklüfteten, metamorphen Gesteinen liegen. Anhand von Penetrationsversuchen wurde der in Abb. 5 dargestellte Zusammenhang zwischen Anpresskraft einer Diske und erreichte Penetration ermittelt und ein Prognosemodell aufgestellt, das folgende Eingangsparameter berücksichtigt.

Geologisch-geotechnische Parameter:

- Trennflächenabstand und Orientierung (in Bezug zur Tunnelachse)
- Drilling Rate Index (Indexwert aus dem Sievers J-Wert und dem Sprödigkeitsindex S_{20})
- Porosität

Maschinentechnische Parameter:

- Normalkraft je Schneidring
- Mittlerer Schneidspurabstand
- Durchmesser der Schneidringe

Aufgrund der speziellen Versuchstechnik mit dem Brittleness Test und dem Siever's Miniature Drill Test zur Bestimmung des Drilling Rate Index (Abb. 6) wird das Prognosemodell weitestgehend nur in Skandinavien eingesetzt. Vergleiche mit dem Prognosemodell der Colorado School of Mines in ROSTA-

MI et al. (1996) zeigen jedoch unter den betrachteten geologisch-geotechnischen Verhältnissen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Modelle.

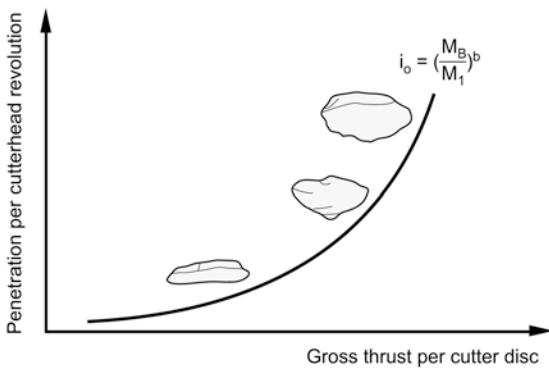


Abb. 5: Nicht linearer Zusammenhang der Penetration und der Anpresskraft pro Diske (BRULAND 2000).

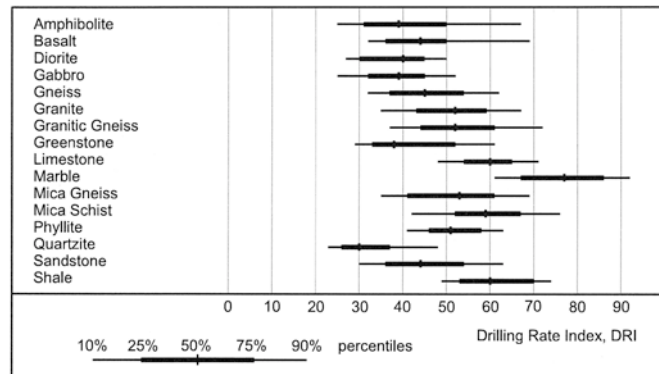


Abb. 6 Typische Werte des Drilling Rate Index (DRI) für verschiedene Gesteine (BRULAND 1998).

2.1.1.4 Prognosemöglichkeit über die spezifische Zerstörungsarbeit

Bei der Auswertung eines Tunnelvortriebes in Phylliten und Karbonatschiefern konnte THURO (2002) eine gute Korrelation der spezifischen Penetration mit der spezifischen Zerstörungsarbeit beim Einaxialen Druckversuch nachweisen (Abb. 7). Die Untersuchungen von THURO & BRODBECK (1998) stützen sich dabei jedoch nur auf einen Tunnelvortrieb mit kleinem Durchmesser und weitestgehend homogenen Gebirgsverhältnissen. Einflüsse des Gebirges (Trennflächen bzw. andere Anisotropieeffekte) und maschinentechnische Einflüsse (Durchmesser der Schneidringe oder der TBM) sind dabei nicht direkt quantifizierbar. Ähnliche Ansätze verfolgt auch GEHRING (1995) mit der Betrachtung der spezifischen Bruchenergie in Abhängigkeit von der erreichten Penetration.

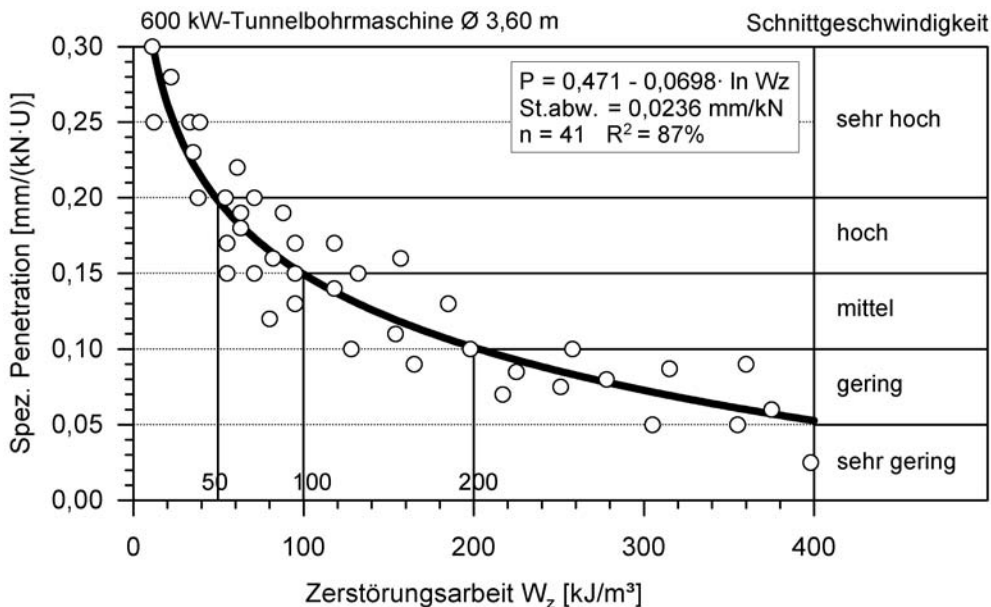


Abb. 7: Spezifische Penetration einer TBM aufgetragen gegen die Zerstörungsarbeit beim Einaxialen Druckversuch (THURO 2002).

2.1.2 Modelle auf Basis von Schneidversuchen im Labor

Eine wichtige Gruppe von Prognosemodellen basiert auf Erkenntnissen aus Schneidversuchen im Labor. Hierbei werden zum einen Anordnungen benutzt bei denen Schneidrollen im Maßstab 1:1 eingesetzt werden, die unter möglichst realen Bedingungen über eine Gesteinsprobe bewegt werden (Abb. 8). Zum anderen werden auch Modellversuche mit miniaturisierten Schneidrollen eingesetzt, deren Erkenntnisse mit Hilfe der Modellgesetze dann in die Realität übertragen werden (FRENZEL 2010).

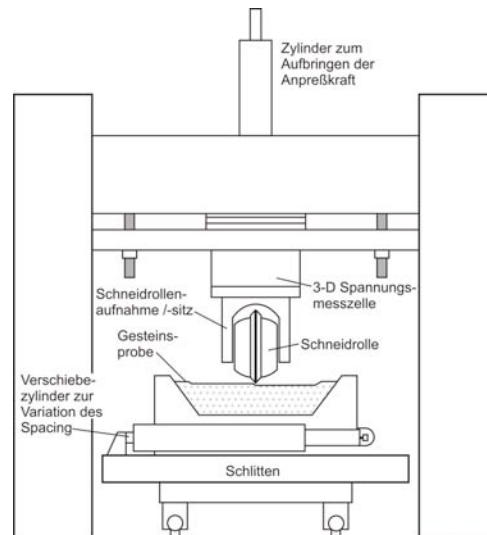


Abb. 8: Schneidversuchsstand (Linear Cutting Machine) an der Colorado School of Mines (nach Rostami 1997).

2.1.2.1 Prognosemodell der Colorado School of Mines (CSM)

Das Prognosemodell der Colorado School of Mines (CSM) beruht auf einer von ROXBOROUGH & PHILIPS (1975) entwickelten Formel zur Ermittlung der Vortriebsleistung und wurde von OZDEMIR et al. (1977) weiterentwickelt. Die aktuellste Version geht auf ROSTAMI et al. (1996) bzw. ROSTAMI (1997) zurück. Bei dem Modell handelt es sich um ein halbanalytisches Modell, das sowohl auf felsmechanischen Überlegungen als auch auf Ergebnissen aus Schneidversuchen beruht. Hierzu wurde an der CSM ein Schneidversuchsstand (Linear Cutting Machine: LCM) gebaut mit der Schneidversuche mit Schneidrollen im Maßstab 1:1 durchgeführt werden können. Da die dabei verwendeten Gesteinsproben lediglich eine Größe von $0,5 \text{ m}^3$ haben, musste man sich bei den Versuchen auf intakten Fels beschränken. Das Modell erlaubt daher keine Aussage zum Einfluss von Trennflächen auf die Penetration. Das CSM-Modell wird im Beitrag von Christian FRENZEL (a.a.O.) näher erläutert.

2.1.2.2 Ausweitung des CSM-Modells durch Büchi

Auf Basis der ursprünglichen Version des CSM-Modells (OZDEMIR et al. 1977) hat BÜCHI (1984) anhand von Tunnelvortrieben die Einflüsse der Gesteinsanisotropie näher untersucht. Hieraus konnte er für die Klufthäufigkeit und die Schieferungsrichtung in Abhängigkeit von der Tunnelachse Korrekturformeln für die Penetration ermitteln. Damit ließe sich, wenn denn alle Parameter in seiner Arbeit veröffentlicht wären, die Penetration unter Annahme von massigem Gebirge wie in OZDEMIR et al. (1977) angenommen korrigieren.

Weitere Informationen, auch über die Modelle von SANIO (1983) und WIJK (1992), sind in FRENZEL (2010) sowie LEITNER (2006) detailliert dargestellt.

2.1.3 Modelle auf Basis von Gebirgsklassifizierungssystemen

Eine weitere Gruppe von Prognosemodellen stützt sich auf teils weltweit verbreitete und angewandte Gebirgsklassifizierungen von denen hier nur zwei beispielhaft erläutert werden sollen. Hierbei wird nicht explizit zwischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften unterschieden sondern versucht, diese in einem Parameter zusammen zu fassen (FRENZEL 2010).

2.1.3.1 Prognosemodell nach Alber

ALBER (1999) schließt auf Grundlage des Klassifizierungssystems von BIENIAWSKI (1989) und unter Berücksichtigung der Daten aus 51 km Tunnelvortrieben mit überwiegend kleinen Durchmessern (< 4 m) über empirische Diagramme auf die spezifische Penetration. Zudem verknüpft er den Ausnutzungsgrad der TBM mit dem Standsicherheitsbeiwert der Tunnelfirste.

2.1.3.2 Q_{TBM} von Barton

BARTON (2000) benutzt sein modifiziertes aus dem konventionellen Vortrieb stammendes Klassifizierungsmodell zur Leistungsprognose bei TBM-Vortrieben. Zusätzlich zu den im ursprünglichen Klassifizierungssystem beinhalteten Kennziffern sind weitere Kennwerte erforderlich. Diese sind die Gebirgsdruckfestigkeit, die Normal- bzw. Anpresskraft einer Schneidrolle, der Cutter-Life-Index nach BRULAND (2000), der Quarzgehalt des Gesteins und die zweidimensionale Spannung an der Ortsbrust.

2.2 Prognosemodelle für den Werkzeugverschleiß

2.2.1 Prognosemodell nach Schimazek bzw. Ewendt

Bereits in SCHIMAZEK & KNATZ (1970) bzw. SCHIMAZEK & KNATZ (1976) ist ein erstes Modell zur Prognose des Diskenverschleißes von Tunnelbohrmaschinen veröffentlicht. Aufbauend aus Erfahrungen aus dem Steinkohlebergbau und den dafür typischen Gesteinen basiert dieses Modell auf Versuchen mit einem Schleifteller sowie Modellversuchen mit Minidisketten im Labor. Aus dem Gehalt an schleifscharfen Mineralen, der mittleren Korngröße des Quarzkorns und der Zugfestigkeit errechnet sich der Verschleißkoeffizient F , der in linearem Zusammenhang mit dem gemessenen Gewichtsverlust steht. Eine Korrelation mit dem in der Realität auftretenden Verschleiß der Schneidringe wird jedoch nicht angegeben.

Aufbauend auf dem Penetrationsmodell von SANIO (1983) entwickelte EWENDT (1989) ein Modell zur Prognose des Diskenverschleißes. Neben Modellversuchen mit Minidisketten setzte er auch Schneidrollen im Maßstab 1:1 ein. In seine Prognoseformel zur Bestimmung der Verschleißrate v_s [mg/m] geht neben dem Punktlastindex (als Kenngröße der Gesteinsdruckfestigkeit) und dem Quarzgehalt auch der Durchmesser der Quarzkörner ein. Maschinentechnische Variablen sind bei der Berechnung des modifizierten Verschleißkoeffizienten F nach SCHIMAZEK & KNATZ (1976) dabei die Anpresskraft pro Schneidring, der Spurabstand und der Schneidringdurchmesser.

2.2.2 Verschleißprognose nach Gehring

Anhand der Daten aus elf Messungen beim Dong-Hae-Tunnel in Korea hat GEHRING (1995) ein Prognosemodell zum Diskenverschleiß aufgestellt. Vorüberlegungen zu seinem Modell zeigen, dass der Schneidringverschleiß proportional zum Rollweg der Disketten ist. Der spezifische Gewichtsverlust des Schneidringes v_s errechnet sich dabei nach Gleichung 2. Über eine Kombination mit der Prognoseformel für die Penetration ist die Standzeit V_c eines Schneidringes in m^3 nach Gleichung 3 zu berechnen.

Gleichung 2: Berechnung des spezifischen Gewichtsverlustes eines Schneidringes nach GEHRING (1995).

$$v_s = 0,74 \cdot CAI^{1,93}$$

mit: v_s spezifische Gewichtsverlust eines Schneidringes [mg/m]
 CAI Cerchar-Abrasivitäts-Index []

Gleichung 3: Berechnung der Standzeit eines Schneidringes nach GEHRING (1995).

$$V_c = \frac{\Delta G_{zul} \cdot F_N \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i) \cdot D_c}{4 \cdot D \cdot v_s \cdot \sigma_c \cdot n_c}$$

mit: V_c Standzeit eines Schneidringes [m³]
 ΔG_{zul} maximal zulässiger Gewichtsverlust einer Diske [g]
 F_N Anpresskraft pro Schneidring [kN]
 D_c Bohrkopfdurchmesser der TBM [m]
 D mittlere Schneidspurdurchmesser [m]
 σ_c Einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins [MPa]
 n_c Anzahl der Schneidrollen am Bohrkopf []
 k_i Korrekturfaktoren (siehe Gleichung 1)

In Abb. 9 ist ein Zusammenhang zwischen Cerchar-Abrasivitäts-Index und spezifischem Schneidringverschleiß gegeben.

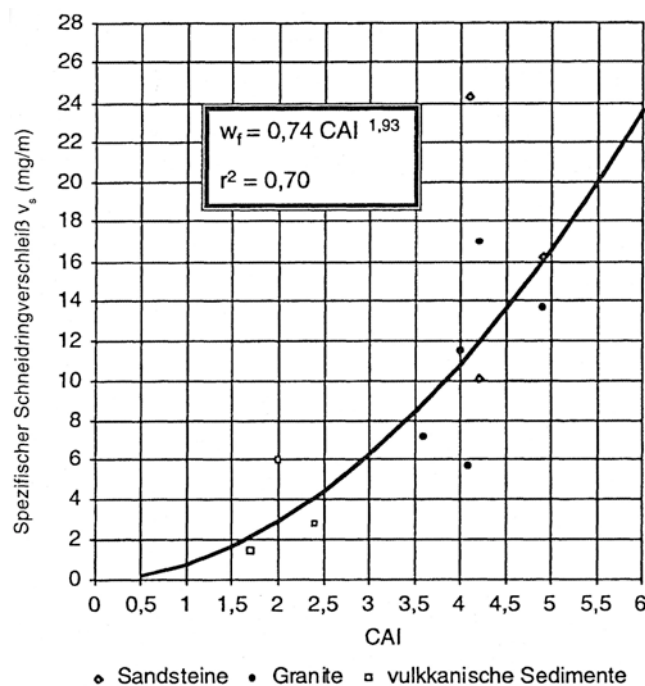


Abb. 9: Korrelation des spezifischen Schneidringverschleißes v_s mit dem Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) (GEHRING 1995: 448).

2.2.3 Modell zur Verschleißprognose der NTNU

BRULAND (2000) stellt in seiner umfassenden Arbeit auch ein Modell zur Verschleißprognose vor. Er geht ebenso davon aus, dass der Verschleiß am Schneidring proportional zu seinem Rollweg ist. Die Volumenstandzeit ergibt sich demnach aus den verschiedenen Korrekturfaktoren und der mittleren Bohrgeschwindigkeit, die im Vorfeld bestimmt werden muss (Gleichung 4).

Gleichung 4: Bestimmung der Volumenstandzeit nach Bruland (2000).

$$V_c = \frac{H_0 \cdot k_D \cdot k_Q \cdot k_{rpm} \cdot k_N}{n_c} \cdot I \cdot \frac{D_c^2}{4} \cdot \pi$$

mit: V_c	Volumenstandzeit	[m ³]
H_0	Basisstandzeit abgeleitet aus dem CLI	[h]
I	mittlere Bohrgeschwindigkeit (zuvor zu ermitteln)	[m/h]
D_c	Bohrkopfdurchmesser der TBM (ergibt Korrekturfaktor k_D)	[m]
k_Q	Korrekturfaktor für den Quarzgehalt	
k_{rpm}	Korrekturfaktor für die Bohrkopfdrehzahl	
n_c	Anzahl der Schneidrollen am Bohrkopf [] (ergibt Korrekturfaktor k_N)	

Dabei berechnet sich der Cutter Life Index über Gleichung 5. Die Abrasivitätszahl *AVS* (Abrasion Value Steel) wird mit dem Abrasionsversuch der NTNU (NILSEN et al. 2006) ermittelt. Der Sievers *J-Wert* wird über den Siever's Miniature Drill Test (PLINNINGER 2002: 66) bestimmt. Aufgrund des versuchs-technischen Aufwandes und der nur begrenzten Verbreitung der Versuchsgeräte wird der *CLI* nur von der Norwegischen Technischen Hochschule Trondheim (NTNU) bzw. dem Labor SINTEF durchgeführt. In BRULAND (2000) sind für verschiedene Gesteinsarten ermittelte Cutter Life Indizes dargestellt (Abb. 10).

Gleichung 5: Berechnung des Cutter-Life-Index.

$$CLI = 13,84 \cdot \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0,3847}$$

mit: CLI	Cutter Life Index	[]
SJ	Sievers J-Value	[]
AVS	Abrasion Value Steel	[]

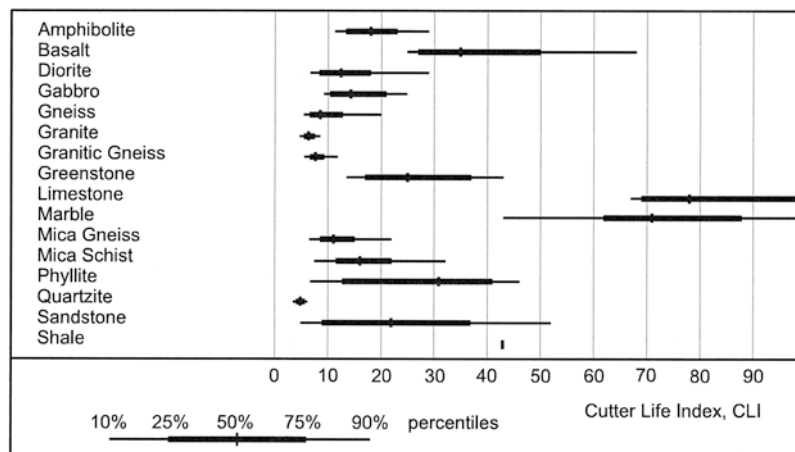


Abb. 10: Typische Werte des Cutter Life Index (CLI) für verschiedene Gesteine (Bruland 1998: 9).

2.2.4 Verschleißprognose nach dem Modell der Colorado School of Mines

Das Modell zur Verschleißprognose der Colorado School of Mines wurde erst durch ROSTAMI et al. (2005) das erste Mal in Teilen veröffentlicht. Wesentliche Basis für das Modell ist die Annahme, dass der Rollweg eines Meißels s_r umgekehrt proportional zum Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) ist. Aus dem Rollweg lässt sich dann ohne Weiteres aus den Maschinen- und Vortriebsdaten die Volumenstandzeit V_c errechnen (FRENZEL 2010).

Gleichung 6: Berechnung des maximalen Rollweges eines Schneidringes über das CSM-Modell.

$$s_r = \frac{6,75 \cdot d}{17 \cdot CAI}$$

mit: s_r Rollweg eines Schneidringes [10⁶ ft]
 d Durchmesser des Schneidringes [Zoll]
 CAI Cerchar-Abrasivitäts-Index []

2.2.5 Diskussion der Prognosemodelle

Auf die Repräsentativität der in die Modellentwicklung eingegangenen Daten und Tunnelbauprojekte für die möglichst universelle Anwendung eines Modells wurde bereits eingegangen. Besonders die Vielfalt der angetroffenen geologischen Verhältnisse sowie der verwendeten Maschinentypen ist bei der Modellentwicklung wichtig. Bei sehr eng definierten Verhältnissen lassen sich dagegen auch mit einfachen Überlegungen wie von THURO & BRODBECK (1998) in Abb. 7 dargelegt Korrelationen von geologisch-geotechnischen Kennwerten zu Maschinendaten aufzeigen. Hilfreich sind diese dann aber nur bei der Analyse von Detailproblemen eines Vortriebes, um z.B. geringe Vortriebsgeschwindigkeiten in einem Tunnelabschnitt zu begründen. Für die Prognose von Vortriebsleistungen und des Werkzeugverschleiß im Vorfeld einer Baumaßnahme sind solche Überlegungen nicht ausreichend.

Gerade die mathematisch begründeten Modelle werden hinsichtlich ihrer Annahmen oftmals als nicht korrekt bezeichnet. So zeigten die Untersuchungen von ROSTAMI (1997) und BRULAND (2000) sowie Erfahrungen von FRENZEL (2010) dass die Penetration nicht linear proportional zur Anpresskraft ist. Auswertungen von Penetrationsversuchen (KÄSLING 2011) und Daten von GERTSCH et al. (2007) stützen diese Annahme hingegen.

Die in ein Modell einfließenden Kennwerte sollten während einer Erkundungsmaßnahme gut erfassbar, die entsprechenden Laborversuche über Prüfeempfehlungen oder Normen geregelt sein und eine weite Verbreitung haben. Dies ist besonders bei den Versuchen zur Bestimmung des Drilling Rate Index bzw. des Cutter Life Index nach BRULAND (2000) kritisch zu betrachten. Es ist nicht vertretbar, wenn für ein Modell benötigte Eingangsparameter abgeschätzt werden oder über nur mäßig bestimmte Korrelationen aus anderen Kennwerten ermittelt werden.

Mangelnde Genauigkeit bei den Eingangsparametern spiegelt sich unmittelbar in der Prognosegenauigkeit der einzelnen Modelle wider. Obwohl alle geologisch-geotechnischen Parameter in der Praxis z. T. hohe Streubreiten aufweisen und damit die beurteilte Penetration bzw. der Verschleiß ebenso unscharf ermittelt werden können, wird diese Problematik bisher kaum betrachtet. Erste Anregungen hierzu gibt FRENZEL (2010) mit der Betrachtung der Prognosegenauigkeit über eine stochastische Modellierung der Eingangsparameter unter Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation. Durch die oft einer schiefen Normalverteilung gehorchenden geotechnischen Parameter sind reine Betrachtungen aus den arithmetischen Mittelwerten hinsichtlich der Prognose nicht besonders hilfreich.

Die Frage, wie genau ein Modell unter sehr genau definierten Bedingungen die tatsächliche Penetration oder den Verschleiß vorhersagen kann, ist ein weiteres bislang nur untergeordnet betrachtetes Problem. Lediglich in ROSTAMI et al. 1996) wird das Prognosemodell der Colorado School of Mines mit dem der NTNU in Trondheim hinsichtlich der Penetrationsprognose verglichen und eine recht gute Übereinstimmung gefunden.

Einige geologisch-geotechnische Rahmenbedingungen werden in den meisten Modellen jedoch noch weitestgehend nicht berücksichtigt oder konnten in ihrer quantitativen Auswirkung auf Penetration und Verschleiß noch nicht vollständig geklärt werden. Auch wenn die Einflüsse des durchörterten Gesteins (etwa über die Gesteinsdruckfestigkeit) oft recht gut gefasst sind, werden Einflüsse des Gebirges (Trennflächengefüge, Spannungen, etc.) bislang weitestgehend ausgelassen. Hierauf beruhen dann oftmals unzutreffende Angaben zur Penetration und über die Rückkopplung des Diskenverschleißes über den Rollweg schlussendlich auch fehlerhafte Prognosen des Schneidringverschleißes.

Es ist die Grundaufgabe des Forschungsverbundes ABROCK die Zusammenhänge zwischen Gestein und Gebirge einerseits und die TBM-Parameter andererseits besser zu fassen und ein verbessertes Prognosemodell zu erstellen (Schneider & Thuro 2007, www.uibk.ac.at/abrock).

3 Literatur

- ALBER, M. (1999): Geotechnische Aspekte einer TBM-Vertragsklassifikation. – Dissertation, Techn. Univ. Berlin, 116 S., Berlin (Mensch-und-Buch).
- BARTON, N. (2000): TBM tunnelling in jointed and faulted rock. – 184 S., Rotterdam (A.A. Balkema).
- BIENIAWSKI, Z. T. (1989): Engineering Rock Mass Classifications - A complete Manual for Engineers and geologists in Mining, Civil and petroleum Engineering. – 251 S., New York (Wiley).
- BRULAND, A. (2000): Hard Rock Tunnel Boring. Vol 1: Background and Discussion. – Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 49 S., Trondheim.
- BÜCHI, E. (1984): Einfluß geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine. – Inauguraldissertation, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern, 136 S., Bern.
- EWENDT, G. (1989): Erfassung der Gesteinsabrasivität und Prognosen des Werkzeugverschleißes beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Diskenmeißeln. – 88 S., Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten, Bochum (Ruhr Universität).
- FRENZEL, C. (2010). Kostenprognose für Schneidrollen bei maschinellen Tunnelvortrieben in Festgesteinen. Cost prediction for disc cutters in hard rock TBM tunnelling. – Dissertation, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, (B) 15, München (Dr. Friedrich Pfeil).
- GEHRING, K.-H. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. – Felsbau, 13: 6, 439-448.
- GEHRING, K. (1997): Classification of drillability, cuttability, borability and abrasivity in tunnelling. – Felsbau, 15, 183-191
- GERTSCH, R. E., GERTSCH, L. & ROSTAMI, J. (2007): Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 44, 238-246.
- KÄSLING, H. (im Druck). Bestimmung der Gesteinsabrasivität - Grundlagen, Anwendung und Einsatzgrenzen bei maschinellen Tunnelvortrieben. Determination of rock abrasiveness - principles, application and limitation of use in TBM tunnelling. – Dissertation, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, (B) 18, München (Dr. Friedrich Pfeil).
- LEITNER, W. (2006): Baubetriebliche Modellierung der Prozesse maschineller Tunnelvortriebe im Festgestein - Von der Penetration zur Vortriebsgeschwindigkeit. – Dissertation, Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Fakultät für Bauingenieurwesen, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 207 S., Norderstedt (Books on Demand).
- LISLERUD, A. (1988): Hard Rock Tunnel Boring: Prognosis and Costs. – Tunnels and Underground Space Technology, 3: 1, 9-17.
- MIKURA, E. (1980): Schnelle und verlässliche Verfahren zur Prognostizierung der Fräsleistung. – Rock Mechanics and Rock Engineering, 12, 221-230.
- NILSEN, B., DAHL, F., HOLZHÄUSER, J. & RALEIGH, P. (2006): Abrasivity testing for rock and soils. – Tunnels & Tunnelling International, 38: 4, 47-49.
- OZDEMIR, L., MILLER, R. & WANG, F.-D. (1977): Mechanical tunnel boring prediction and machine design. – Annual Report, Washington D.C. (National Science Foundation).
- PLINNINGER, R. J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein. – Dissertation, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, TU

- München, 146 S., Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B17, München (Hieronymus).
- 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. – Thesis (Ph D), Dept. of Mining Engineering, Colorado School of Mines, 382 S., Golden, Colorado.
- ROSTAMI, J., OZDEMIR, L. & NILSEN, B. (1996): Comparison between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. – In: ISDT (Hrsg.): Proc. 16th Annual Techn. Meeting of the Inst. of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, Colorado School of Mines., 11 S.
- ROXBOROUGH, F. F. & PHILIPS, H. R. (1975): Rock excavation by disc cutter. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12, 361-366.
- RUTSCHMANN, W. (1974): Vorschlag für ein System der Gebirgsklassifizierung für mechanischen Vortrieb. – Schweizerische Bauzeitung, 92: 18, 429-436.
- SANIO, H.-P. (1983): Nettovortriebsprognose für Einsätze von Vollschnittmaschinen in anisotropen Gesteinen. – 147 S., Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten, Bd. 11, Bochum (Ruhr-Universität).
- SCHIMAZEK, J. & KNATZ, H. (1970): Der Einfluß des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meißelverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. - Glückauf, 106, 274-278.
- SCHIMAZEK, J. & KNATZ, H. (1976): Die Beurteilung der Bearbeitbarkeit von Gesteinen durch Schneid- und Rollenwerkzeuge. – Erzmetall, 29, 113-119.
- SCHNEIDER, E. & THURO, K. (2007): Forschungsprojekt ABROCK – Prognose von Penetration und Verschleiß für TBM-Vortriebe im Festgestein. – Felsbau magazin 25 (6), 44-47.
- STEVENSON, G. W. (1999): Empirical estimates of TBM performance in hard rock.- In: D. E. HILTON & K. SAMUELSON (Hrsg.): Proceedings of the 1999 Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) in Orlando, Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 993-1009.
- THURO, K. (2002): Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau. – 160 S., Münchner Geologische Hefte: Reihe B: Angewandte Geologie, B18, München (Eigenverlag).
- THURO, K. (2007): Geologische Gesichtspunkte bei der Klassifizierung des Gebirges. - In: EICHLER, K.: Fels- und Tunnelbau II. Verfahren und Kenngrößen, Technologie und Umwelt, Vortrieb und Sicherung, Baustoffe und Eigenschaften – 314 S., 251 Abb., 64 Tab., Kontakt und Studium, Band 684, Renningen-Malmsheim (Expert), 50-111.
- Thuro, K. (2010): Empfehlung Nr. 5 "Punktlastversuche an Gesteinsproben" des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. – Bautechnik 87/6: 322-330.
- THURO, K. & BRODBECK, F. (1998): Auswertung von TBM-Vortriebsdaten - Erfahrungen aus dem Erkundungsstollen Schwarzach. – Felsbau, 16, 8-17.
- THURO, K. & KÄSLING, H. (2009): Classification of the abrasiveness of soil and rock. Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels. – Geomechanics & Tunnelling - Geomechanik & Tunnelbau 2: 179-188.
- THURO, K. & PLINNINGER, R. (2007): Geologisch-geotechnische Grundlagen der Gebirgslösung im Fels. – In: EICHLER, K.: Fels- und Tunnelbau II. Verfahren und Kenngrößen, Technologie und Umwelt, Vortrieb und Sicherung, Baustoffe und Eigenschaften – 314 S., 251 Abb., 64 Tab., Kontakt und Studium, Band 684, Renningen-Malmsheim (Expert), 112-160.
- THURO, K. & SCHORMAIR, N. (2008): Fracture propagation in anisotropic rock during drilling and cutting. – Geomechanik & Tunnelbau 1 (1): 8-17.