

Geologisch-geotechnische Grenzfälle beim Einsatz von Teilschnittmaschinen

Von Kuroschi Thuro & Ralf J. Plinninger

Geological and geotechnical limits during roadheader operation

The prediction of tunnel stability is usually the main subject in preliminary site investigations prior to tunnelling projects. During the last few years in mechanical excavation, problems have occurred also connected with the accurate prediction of excavation rates in hard rock. Every now and again problems have been encountered leading to high bit consumption and low cutting performance of roadheaders. In this paper the connection between some geological features, cutting performance and bit wear are presented by means of four German case histories in different geological settings.

Based on the presented case studies, five general observations may be concluded:

1) Survey of the hardest layer

Especially in rock material of heterogeneous composition - such as conglomerates with hard components, sandstones with hard calcareous layers or slate-quartzite-interstratification not the mean value but the "hardest inclusion" dominates the cutting performance and the tool wear. Especially the average performance follows the maximum values of the UCS, bit consumption is unfavourably affected by a combination of hard and soft layers leading to abundant bit breakage.

2) Survey of the softest layer

Sometimes the "delicate link" causes problems - especially together with water. Soft clay-rich sandstone forms mud with a distinct amount of water and cannot be removed by the roadheader's haulage system. In fact, the cutting performance is ruined by mucking problems. But just in these conditions roadheaders should have the best excavation rates!

3) Representative sampling

Strange to mention - but always right: An insufficient sample rate and an insufficient number of rock tests may

give an incomplete rendering of the facts. Representative sampling should contain the average and the maximum values. Sometimes it is necessary to search for the hardest components or layers and test them with field methods such as the point load test.

4) Size effect

When regarding problems in tunnel excavation, size effects are of crucial importance. Site investigations in view of rock fragmentation - dealing with problems in the range of several centimeters - must be completely different from that concerning tunnel stability - dealing with ranges of about 10 - 20 meters.

5) Geological diversity

Investigations should be attended by an experienced geologist and should focus on geological conditions and problems. A geological phenomenon may cause much more trouble in excavation than "just" higher rock strength values. Both geological-petrographical and geotechnical aspects should be taken into consideration to raise the level of geological contribution to underground construction.

Bei den geotechnischen Voruntersuchungen zu großen Tunnelprojekten steht üblicherweise die Vorhersage der Stabilität des auszubrechenden Hohlraums im Vordergrund. In den letzten Jahren haben sich beim Vortrieb mit Teilschnittmaschinen in Fels allerdings auch vermehrt Probleme bei der Prognose der Fräs- bzw. Schneidleistungen in den verschiedenen Gesteinen ergeben. Hierbei sind vor allem niedrige Vortriebsleistungen und hoher Werkzeugverschleiß zu nennen. In den folgenden Ausführungen soll anhand von vier Fallbeispielen auf die geologischen Verhältnisse und die Zusammenhänge zwischen geomechanischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften und den vortriebsrelevanten Parametern eingegangen werden.

Die Weiterentwicklung der Teilschnittmaschinenteknik hat dem Tunnel- und Stollenbau ein immer effektiver werdendes Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dem Ziel auch in Fels den - in Bezug auf Vortriebsleistung, Minimierung der Gebirgsauflockerung oder Immissionsschutz - steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Gerade der vermehrte Einsatz dieses Vortriebsverfahrens zeigt jedoch immer wieder Grenzen und Probleme auf. Der richtigen Einschätzung der geomechanischen Eigenschaften des zu lösenden Gebirges im Vorfeld der Planung kommt daher vor allem beim Einsatz von Teilschnittmaschinen zur Beurteilung der Schneidleistung und Werkzeugkosten eine entscheidende Bedeutung zu.

Bei den geotechnischen Voruntersuchungen zu großen Tunnelprojekten steht üblicherweise die Vorhersage der

Stabilität des auszubrechenden Hohlraums im Vordergrund. Probleme der Gebirgslösung, also des Ausbruchs oder der Gewinnung, fristen demgegenüber eher ein Schattendasein. Während der Wahl der wirtschaftlichen Vortriebsmethode in einem Gebirge bei der Planung meistens noch eine gewisse Priorität eingeräumt wird, werden spezielle Untersuchungen zur erzielbaren Schneidleistung und zum Verschleiß der Werkzeuge momentan nur selten durchgeführt. Dies scheint eine Ursache dafür zu sein, daß die bei der Gebirgslösung auftretenden Probleme meist erst während der Vortriebsarbeiten, statt in der Planungsphase gelöst werden müssen.

Beim Vortrieb mit einer Teilschnittmaschine erfolgt der Vortrieb zyklisch in den aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten Gebirgslösung (Fräsen/Schneiden) -

Schuttern des gelösten Materials - Einbau der Sicherung (Bild 1). Dabei bestimmt jeder einzelne dieser Arbeitsschritte die Leistungsfähigkeit des Gesamtvortriebs. Unter Aussparung des Arbeitsgangs der „Sicherung“ ergeben sich daher für die Teilschnittmaschine die in Tabelle 1 dargestellten, spezifischen Probleme.

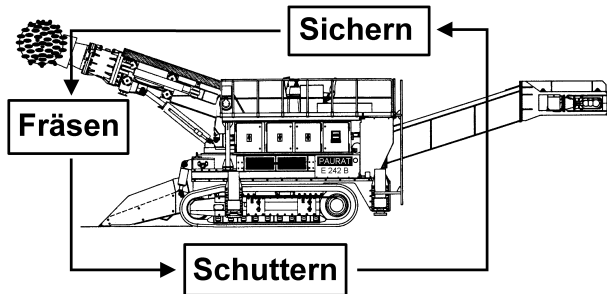


Bild 1 Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs beim TSM-Vortrieb. Probleme bei einem Arbeitsschritt wirken sich immer negativ auf den Gesamtvortrieb aus.

Fig. 1 Illustration of the working process in roadheader excavation. A problem in only one process can ruin the whole excavation performance.

Tabelle 1 Einige Hauptprobleme im Zusammenhang mit der Gebirgslösung mittels Teilschnittmaschine
Table 1 Main Problems in roadheader excavation.

Arbeitsgang	Mögliche Probleme
Fräsen (Schneiden)	niedrige Schneidleistung
	hoher Werkzeugverschleiß
	kein Eindringen in die Ortsbrust (Penetration), da Verschmieren des Schneidkopfes
Schuttern	Fördern erschwert aufgrund flüssiger bis breiiger Konsistenz des Schneidgutes
	Fördern erschwert aufgrund zu großer Blöcke im Haufwerk

Ebenso wie beim konventionellen Bohr- und Sprengvortrieb kommt beim Fräsvortrieb dem „Lösen und Zerkleinern von Fels“ eine erhebliche Bedeutung zu. Bestimmend für den Erfolg des Vortriebs ist neben der Schneidleistung auch der Werkzeugverschleiß, respektive der Verbrauch von Rundschaftmeißeln und der Ersatz anderer Verschleißteile. Da die Einschätzung der prognostizierten Gesteine bezüglich ihres Verhaltens bei der Gebirgslösung ein beträchtliches Kostenrisiko in der Kalkulation darstellt, ist eine möglichst sichere Prognose der Schneidleistung sowie des Meißelverschleißes in den vorgegebenen Gesteinen vorteilhaft.

Während die geologischen Einflüsse auf das Bohren von Sprenglöchern im Bohr- und Sprengvortrieb schon seit einiger Zeit in ausgewerter Form vorliegen (1, 2, 3), sollen nun diese Betrachtungen nach Möglichkeit auch auf den Vortrieb mit Teilschnittmaschinen übertragen werden. Als allgemeine Regel scheint es sich herauszukristallisieren, daß die Vortriebsleistung vor allem von „makroskopischen Eigenschaften“ von Gestein und Gebirge gesteuert wird (1 - 6) wie der einaxialen Druckfestigkeit, Zähigkeit bzw. Zerstörungsarbeit, Orientierung der Schieferung bzw. Anisotropie, Durchtrennungsgrad oder Verwitterungs- bzw. Verän-

derungsgrad des Gebirges. Dagegen ist der Werkzeugverschleiß hauptsächlich eine Folge der Abrasivität der Gesteine und damit abhängig von mikroskopischen Eigenschaften wie äquivalenter Quarzgehalt und Verzahnungsgrad der Minerale im Gestein. Neben der üblichen Gesteinsparameter können besondere Gesteinseigenschaften den Vortriebsprozeß unangenehm beeinflussen. Beispielsweise können in scheinbar guten Untergrundverhältnissen mit leicht fräsbaren Sand- und Tonschluffsteinen bereits geringe Wasserzuflüsse zu einem extremen Einbruch der Vortriebsgeschwindigkeit führen: In einem Fall wurde der Fräskopf durch den sich bildenden steifen Ton ständig verklebt und zugeschmiert, in einem anderen Fall war das mechanisierte Abfördern des durch das zutretende Wasser entstandenen Schlammes praktisch unmöglich.

In den letzten Jahren wurden mehrere Baustellen intensiv betreut und untersucht, um den Zusammenhang zwischen geologischen Einflußfaktoren und geotechnischen Parametern auf der einen Seite und technischen Parametern wie Fräsleistung, Vortriebsgeschwindigkeit und Werkzeugverschleiß auf der anderen Seite zu dokumentieren. Anhand von Fallstudien (Altenbergtunnel Idar-Oberstein, Meisterntunnel Umfahrung Bad Wildbad, Abwasserstollen Zeulenroda, U-Bahn Nürnberg) soll beispielhaft auf die geologischen Verhältnisse und die Zusammenhänge zwischen geomechanischen und geologischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften einerseits und vortriebsrelevanten Parametern (Fräsbarkeit, Werkzeugverschleiß, Förderbarkeit) andererseits eingegangen werden.

Projektstudien

Altenbergtunnel/Idar-Oberstein

Projekt und geologische Situation

Der im Jahre 1990 gebaute Altenbergtunnel (320 m) stellt einen Teilabschnitt des Streckenausbaus der Bundesstraße B 41 nach Bad Kreuznach dar und begradigt die Strecke im Bereich der am östlichen Ortsausgang gelegenen Naheschleife mit einem Durchstichtunnel. Im gesamten Bereich der bergmännischen Bauweise stehen hier Quarzit-Fanglomerate des Oberrotliegenden (Waderner Schichten, Perm) an, die die in Bild 2 illustrierte mittlere Zusammensetzung aufweisen.

Unter einem Fanglomerat wird hier ein klastisches Sedimentgestein verstanden, welches in der Regel unter wüstenhaften Bedingungen in großen Schuttfächern entstanden ist. Typischerweise ist es chaotisch zusammengesetzt: Es wird von Korngrößen von Tonschluffgröße bis in den Blockbereich (bis Ø 1,2 m) hinein aufgebaut. Als verfestigter Abtragungsschutt des umliegenden Gebirges besteht es aus ganz unterschiedlichen Komponenten: grauen Quarziten (bis Ø 50 cm), milchig-weißen Gangquarzen (bis Ø 30 cm), roten bis blauvioletten Porphyren, Basalten und anderen Vulkaniten sowie schwarzen bis lederbraunen Schieferbruchstücken. Die Quarzite (aus dem angrenzenden Hunsrück) waren gut gerundet und erwiesen sich beim Anschlagen als äußerst hart und zäh.

Die vulkanitischen Komponenten des Fanglomerats waren zum Teil stark verwittert und entfestigt und haben das ursprüngliche Gesteinsverhalten völlig verändert. Charakteristisch war ein weißlich-gelber, toniger Saum, der viele Komponenten umgab. Zu einem großen Teil sind diese Komponenten bei Wasserzutritt zu einem tonschluffreichen Grus zerfallen. Es ergibt sich daraus ein Nebeneinander von extrem harten und weichen Komponenten im Fanglomerat, was beim Vortrieb spezifische Probleme beim Bohren und Besetzen der Sprenglöcher verursachte (1).

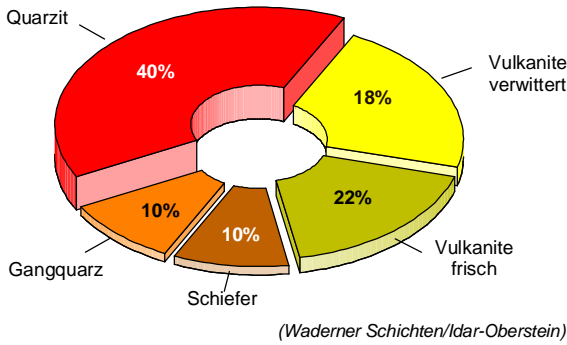


Bild 2 Gesteinszusammensetzung des permischen Fanglomerats, Idar Oberstein.
Fig. 2 Composition of the permian fanglomerate, Idar Oberstein.

Auftretende Probleme: Schneidleistung und Werkzeugverschleiß

Um eine wirtschaftliches Ausbruchverfahren zu wählen, wurde bei Beginn des Tunnelvortriebs ein Fräsversuch mit einer Teilschnittmaschine mit 300 kW Schneidleistung und Querschneidkopf unternommen. Das Ergebnis ist in Bild 3 zu sehen: Nach kürzester Fräsdauer in den quarzreichen Fanglomeraten waren die Außenmeißel des Fräskopfes abgenutzt - bei gleichzeitiger äußerst unbefriedigender Fräsleistung. Daraufhin wurde die Teilschnittmaschine von der Baustelle abgezogen und der Vortrieb mußte - wie ausgeschrieben - konventionell mit Bohren und Sprengen erfolgen. Die spezifischen Probleme, die bei dieser Vortriebsmethode auftraten, sind in (1) beschrieben.



Bild 3 Typischer asymmetrischer Verschleiß (Verschleißklasse 3, Tabelle 2) der abgenutzten Außenmeißel am Querschneidkopf der Teilschnittmaschine (300 kW Altenbergtunnel).
Fig. 3 Typical asymmetric wear (Wear type 3, Table 2) of the outer cutter head bits of the used roadheader (300 kW Altenberg tunnel).

Ursachen

In Bild 4 sind die einaxialen Druckfestigkeiten des Gesteins und der Komponenten aufgetragen. Die Druckfestigkeit des Fanglomerats (breiter grauer Balken) liegt im Bereich zwischen 20 und 80 MPa und das Gestein hätte damit laut Leistungsangabe des Maschinenherstellers gut fräsbar sein müssen. Die hohen Festigkeiten von einzelnen Komponenten in dem Fanglomeraten mit bis zu 230 MPa wirkten jedoch „wie ein Nagel im Brett unter einem Sägeblatt“. Die TSM hat sich an den hochfesten Quarziterollen im wahrsten Sinne des Wortes „die Zähne ausgebissen“. Bei den Voruntersuchungen waren nur Felstests der Fanglomerate, nicht jedoch der einzelnen Komponenten durchgeführt worden.

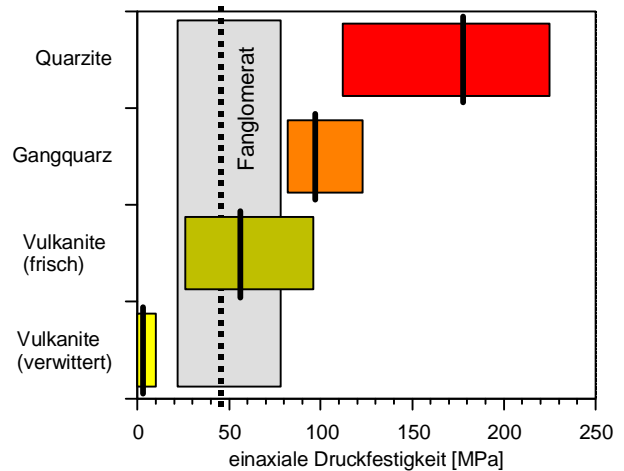


Bild 4 Einaxiale Druckfestigkeiten des Fanglomerats und seiner Komponenten (Punktlastfestigkeiten). Die Quarzite erreichen Festigkeiten bis 230 MPa!
Fig. 4 Compressive strength of the fanglomerate and its components (by point load tests). Quartzites reach up to 230 MPa!

Das Leistungsdiagramm einer Teilschnittmaschine mit 300kW installierter Leistung, d.h. die Schneid- oder Fräsleistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit ist in Bild 5 gegeben. Je nach Ausbildung des Gebirges, vor allem der Trennflächen, können ganz unterschiedliche Fräsleistungen erzielt werden (unterschiedliche Kurven in Bild 5).

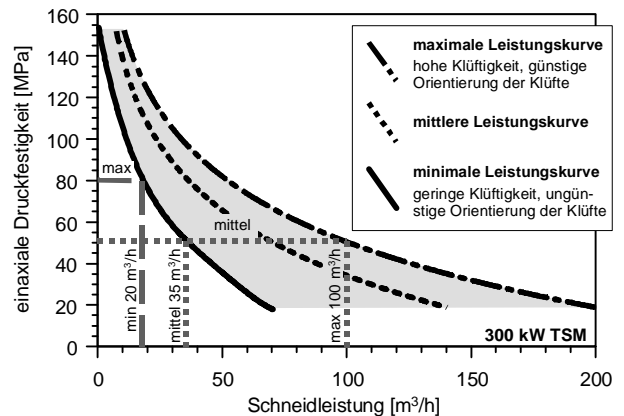


Bild 5 Schneidleistungsdiagramm einer Teilschnittmaschine mit 300 kW installierter, elektrischer Leistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit. Auf den gestrichelten Linien: Schätzwerte für die Druckfestigkeit des Fanglomerats.
Fig. 5 Cutting performance of the 300 kW roadheader versus compressive strength. On dashed grey lines: estimation for the UCS of the fanglomerate.

Das Gebirge im Altenbergtunnel war - und das dürfte ein ganz wesentlicher Punkt sein - weitestgehend frei von mechanisch wirksamen Trennflächen. Für einen Mittelwert von 50 MPa wäre die Schneidleistung wirtschaftlich gewesen, nicht jedoch für die Höchstwerte von mehr als 200 MPa. Da Fanglomerate und Konglomerate im Perm und Buntsandstein sehr häufig massig (bis massig gebankt) auftreten, dürfte dies auch bei zukünftigen Projekten ein beachtenswertes Kriterium sein.

Meisterntunnel, Bad Wildbad

Projekt und geologische Situation

Von 1994 bis 1996 wurde als innerstädtische Teilortsumfahrung der Kurstadt Bad Wildbad im Schwarzwald der 1684 m lange „Meisterntunnel“ realisiert. Der überwiegend in bergmännischer Bauweise erstellte Straßentunnel kam auf seiner gesamten Länge in klastischen Sedimenten (Fanglomeraten, Sandsteinen, Ton-Schluffsteinen) des Oberen Perm (Oberes Rotliegend, Zechstein, Bild 6) zu liegen (7, 8).

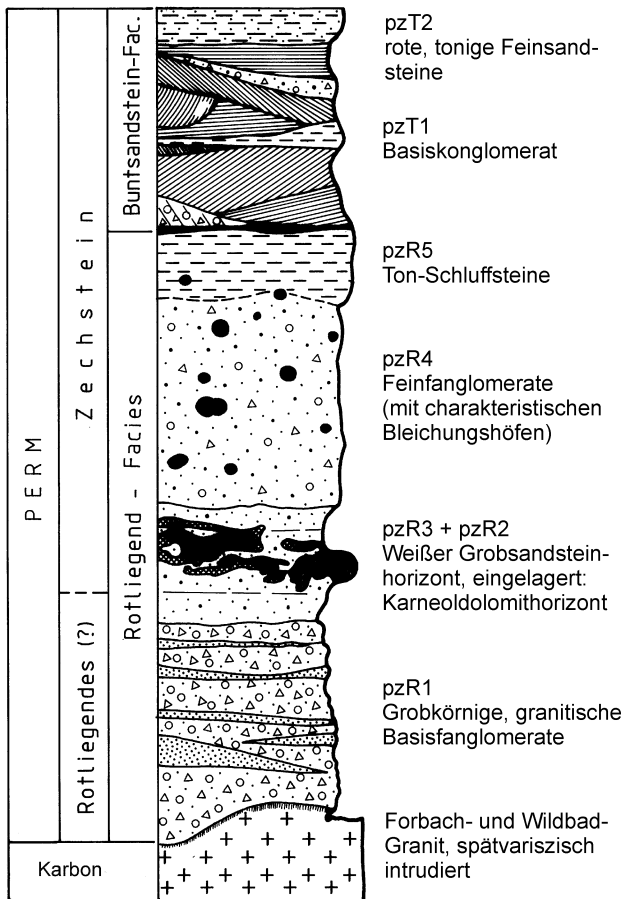


Bild 6 Schematische Schichtsäule der während der Vortriebsarbeiten des Meisterntunnels angetroffenen Schichtfolge.
 Fig. 6 Generalised scheme of the Permian rocks, encountered during the excavation works for the Meisterntunnel.

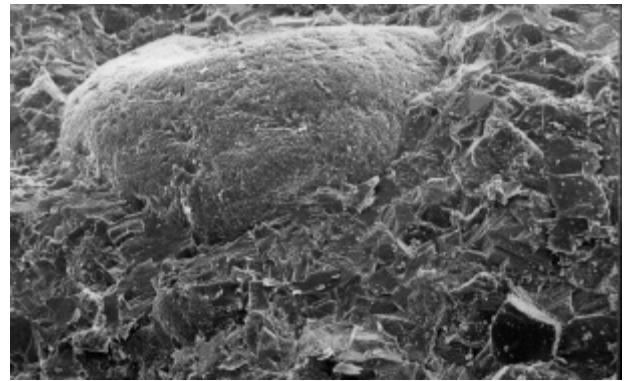


Bild 7 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Probe aus dem Karneoldolomithorizont. Eine relativ große, gerundete Quarzklaste ist in der extrem dichten, überwiegend dolomitischen Matrix eingebettet. Bildbreite etwa 1,6 mm.
 Fig. 7 Dolomitic calccrete - within the very dense dolomitic binder few rounded grains of quartz are visible. Photograph by scanning electron microscope, picture's width app. 1,6 mm.

Unerwarteterweise wurde bei den Vortriebsarbeiten ein sog. „Karneoldolomithorizont“ angefahren, dessen Vorkommen im Projektgebiet bis dahin unbekannt war. Dieser Horizont setzte sich aus zahlreichen, bis zu mehreren Dezimetern mächtigen Konkretionslagen zusammen, in denen sowohl dolomitisches, als auch calzitisches und silikatisches Bindemittel nachgewiesen werden konnte. Der namensgebende, porzellanfarbige „Karneol“ (kryptokristalliner Quarz) trat eher selten in mm-dünnen Schlieren auf. Das REM-Photo einer Probe aus dem Karneoldolomithorizont (Bild 7) gibt einen Eindruck von dem extrem dichten Gefüge, das zu einaxialen Druckfestigkeiten von bis zu 150 MPa führte.

Auftretendes Problem: Schneidleistung

Während der gesamten Bauarbeiten für den Umfahrungstunnel mußte der Kurbetrieb in den unmittelbar benachbarten Einrichtungen auch weiterhin in gewohnter Weise abgewickelt werden. Bei der Wahl des geeigneten Vortriebsverfahrens floß daher - neben der Vortriebsleistung - auch der bestmögliche Immissionschutz in die Überlegungen mit ein. Ein Vortrieb mit Teilschnittmaschine schien unter den gegebenen Umständen am geeignetsten, so daß von der bauausführenden ARGE eine Teilschnittmaschine vom Typ Paurat E 242 B mit 300 kW installierter Schneidleistung für den Einsatz vorgesehen wurde. Nach der Endmontage vor Ort wurden im Dezember 1994 mehrere untertägige Fräsversuche durchgeführt, die jedoch - selbst nach Verbesserungen am Längsschneidkopf - nur geringe Schneidleistungen von rund 13 m³ (fest) pro Stunde ergaben. Die Teilschnittmaschine wurde daraufhin aus dem Vortrieb genommen und statt dessen ein konventioneller Bohr- und Sprengvortrieb durchgeführt (7, 8).

Ursachen

Obwohl die durchschnittlichen Druckfestigkeiten in den hier dargestellten Sandsteinen und Fanglomeraten bei etwa 59 MPa liegen, ergaben die Untersuchungen, daß in weiten Bereichen (in denen auch die Fräsversuche durchgeführt worden waren) tatsächlich Druckfestigkeiten von rd. 90 bis 150 MPa auftraten (Bild 8).

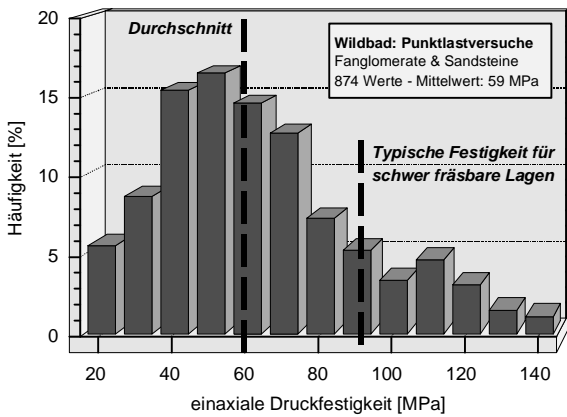


Bild 8 Häufigkeitsdiagramm von Punktlastversuche in permischen Fanglomeraten und Sandsteinen des Meisterertunnels.
 Fig. 8 Frequency of Point Load Test (UCS) values in Permian conglomerates and sandstones of the Meisterertunnel.

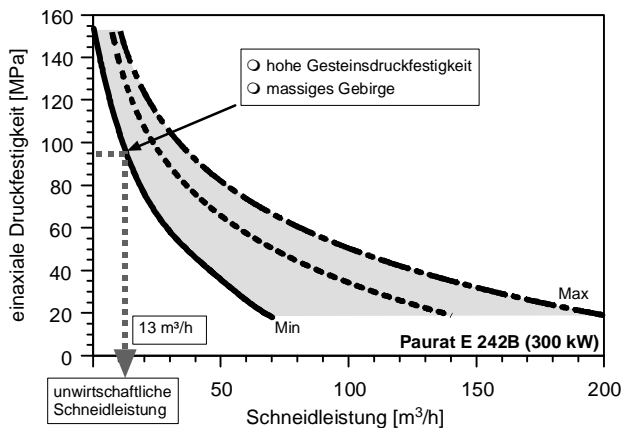


Bild 9 Schneidleistungsdiagramm der Teilschnittmaschine Paurat E-242B (300 kW) in Abhängigkeit von der einaxialen Druckfestigkeit. Als gestrichelte Linie ist die beim Vortrieb tatsächlich erreichte Schneidleistung (13 m³/h) eingetragen.
 Fig. 9 Cutting performance of Paurat E-242B (300kW) roadheader versus compressive strength. Actual cutting performance plotted in dashed line (13 m³/h).

Nach Auswertung der vorliegenden Ergebnisse wurde deutlich, daß das ungünstige Zusammenspiel von hohen bis sehr hohen Gesteinsdruckfestigkeiten (bis 150 MPa im Karneoldolomithorizont, bis 90 MPa in pzR4-Feinanglomeraten und pzR5 Ton-Schluffsteinen) und einem nahezu ungeklüfteten und ungeschichteten Gebirgsverband den Einsatz der Teilschnittmaschine hatte unwirtschaftlich werden lassen (siehe Schneidleistungsdiagramm in Bild 9).

Abwasserstollen Zeulenroda
Projekt und geologische Situation

Zwischen 1994 und 1995 wurde bei Zeulenroda ein 2,4 km langer Abwassertunnel gebaut. Im Verlauf des Vortriebs wurden Tonschiefer und Quarzite des Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirges durchörtert (Phycodenschiefer, Griffelschiefer und Lederschiefer des Ordoviziums). Die monotonen, häufig glimmerführenden Schiefer waren meist von typisch schwarzer bis grauer Farbe und traten gebändert bis massig, z.T. verfälscht und immer stark geklüftet auf.

Die Schiefer traten z.T. in kleinräumiger Wechselagerung mit harten, grauen Quarziten auf, welche sehr hohe einaxiale Druckfestigkeiten aufwiesen. Während

der Vortriebsarbeiten wurde eine große Störungszone gequert - die Weißendorfer Störung - welche aus typischem zerbrochenen und zerscherten Schiefen und Quarziten sowie bänderartig durchziehenden, tonig-schluffigen Störungsmyloniten bestand.

Auftretende Probleme:
Schneidleistung und Werkzeugverschleiß

Trotz des geringen Profilquerschnitts von nur 11 m², kam eine Teilschnittmaschine mit 132 kW Schneidleistung zum Einsatz (Atlas Copco Eickhoff ET 120). Die ersten 800 m waren überwiegend in Quarziten aufzufahren, so daß die Schneidleistung von 22 m³/h stellenweise auf 5 m³/h abfiel.

Zunächst mußte der Längsschneidkopf der Fräse gegen einen stabileren Querschneidkopf ausgetauscht werden. Trotzdem mußte der Querschneidkopf mehrmals repariert werden, da wegen der ungewöhnlich hohen Belastung immer wieder Lagerschäden auftraten. Der Meißelverschleiß war z.T. extrem hoch und erreichte nach anfänglich 0,1 Meißel pro m³ Spitzenwerte von über 5 Meißel pro m³ (Extremfall: 150 Meißel für 11 m³ = 15 Meißel pro m³).

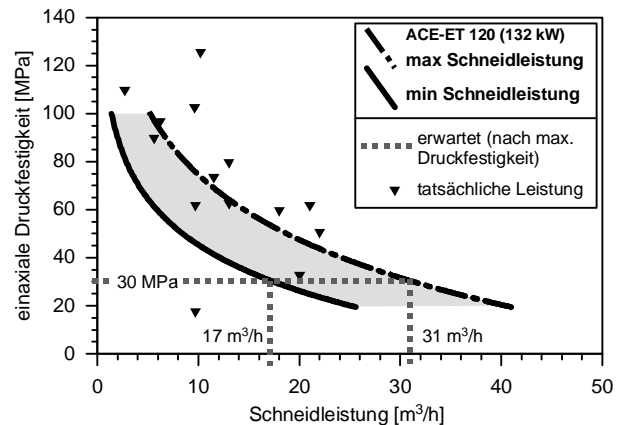


Bild 10 Schneidleistungen der Teilschnittmaschine Atlas Copco Eickhoff ET 120 (132 kW) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit (Punktlastversuche). Erwartete (gestrichelte Linien) und tatsächlich erreichte Schneidleistungen (Punkte) im Abwasserstollen Zeulenroda.
 Fig. 10 Cutting performance of the Atlas Copco Eickhoff ET 120 (132 kW) roadheader versus compressive strength (Point-Load-Tests). Expected (dashed lines) and actual performance (markers) in the Zeulenroda sewage tunnel.

Ursachen

Die Druckfestigkeiten lagen wesentlich über den nach den Voruntersuchungen zu erwartenden Werten. Die erwartete Schneidleistung nach den angegebenen Maximalwerten von 30 MPa lag bei 17 - 31 m³/h. Die tatsächlich erreichten Druckfestigkeitswerte rangierten zwischen 10 MPa (Schiefer) und 120 MPa (Quarzite) und haben die erwähnten niedrigen Schneidleistungen verursacht.

Auch war der Quarzgehalt der Schiefer wesentlich höher als erwartet und auch die Quarzite traten gegenüber den Schiefen stärker in den Vordergrund. Um den Einfluß der Quarzite auf die Gebirgslösung zu nachzuweisen, wurde eine Klassifizierung der Verschleißklassen der verbrauchten Rundschäftmeißel nach Tabelle 2 durchgeführt. Diese „Verschleißlehre“ basiert auf zahlreichen Fallstudien aus Deutschland

und Österreich. Die daraus gewonnene Verschleißcharakteristik (Bild 11) kann wie ein Fingerabdruck dazu benutzt werden, um die Abrasivität der Gesteine zu beurteilen und aufgetretene Fräsprobleme zu erkennen.

Wie in dem Tortendiagramm zu erkennen ist, waren asymmetrischer Verschleiß [2], Sprödbrüche des Hartmetalls [4], Totalausbruch von Hartmetallstiften [5] und Totalverschleiß [6] am meisten verbreitet. Die Verschleißcharakteristik belegt nicht nur die hohe Abrasivität der überwiegend quarzitäen Gesteine sondern auch die ruckartig-schlagende Bewegung des Schneidkopfes an der Ortsbrust, die für hohe Gesteinsfestigkeiten typisch ist. Zudem führt das Fräsen der harten und festen Gesteinsoberfläche zu hohen Temperaturen, was ungünstige Auswirkungen auf das Hartmetall und den Werkzeugstahl hat: Die Härte von Wolframcarbid sinkt rapide mit steigender Temperatur, so daß Quarz zwischen 600°C und 800°C deutlich härter ist als Wolframcarbid (9, 10). Deshalb sinkt der Widerstand gegen den Verschleiß mit steigender Temperatur.

Offensichtlich war im Falle der Voruntersuchungen zum Abwasserstollen Zeulenroda das Hauptproblem eine unzureichende, nicht repräsentative Probennahme aus den Aufschlußbohrungen und eine nicht ausreichende Anzahl von Festigkeitsuntersuchungen. Das Problem der Festigkeitsanisotropie in den Schiefen war ebensowenig berücksichtigt worden wie das Problem, daß die getesteten Prüfkörper sehr heterogen zusammengesetzt waren und deshalb niemals die festesten Partien (z.B. mit dem Punktlastversuch) erfaßt worden sind.

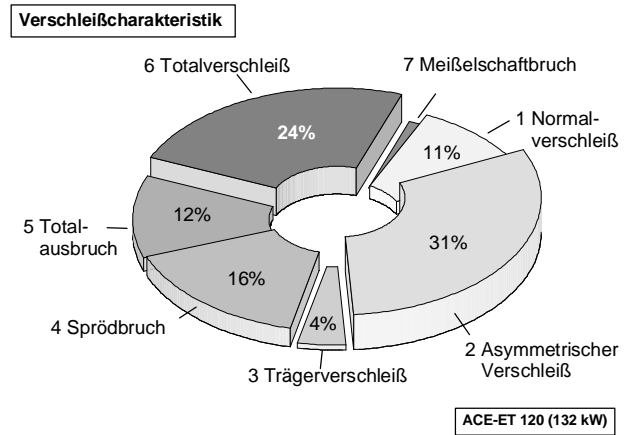


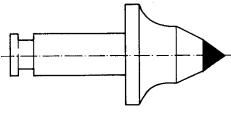
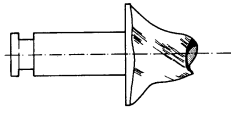
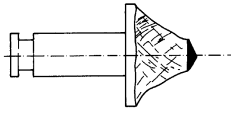
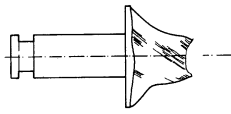
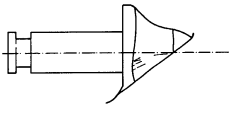
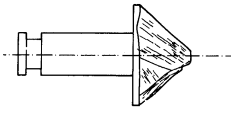
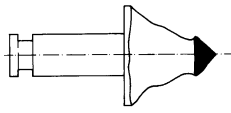
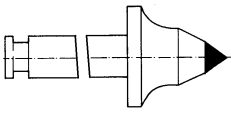
Bild 11 Verschleißcharakteristik von 274 verbrauchten TSM-Rundschaftmeißeln des Abwasserstollens Zeulenroda. Fig. 11 Bit wear characteristic of 274 used bits (chisels, picks) of the Zeulenroda sewage tunnel.

Einfluß der Kluftabstände und des Materials der Störungszone

Der weitere Vortrieb wurde von einer mächtigen Störungszone (Weißendorfer Störung) bestimmt, in der die Sicherungsarbeiten die Vortriebsgeschwindigkeit bestimmte. Die Nettofräseleistungen stiegen mit sinkenden Trennflächenabständen (Klüftung und Schieferung) deutlich an.

Bild 12 verdeutlicht, daß mindestens zwei Prozesse bei der Gebirgslösung stattfinden: Solange das Gebirge massig ist, dominiert das Fräsen und Schneiden von Material. Es wird relativ viel Energie benötigt, das Gestein zu zerspannen, was nur eine relativ geringe Schneidleistung ergibt. Rücken die Trennflächenabstände zusammen, ist der Fräskopf in der Lage, ganze Klufkörper oder zumindest größere Stücke herauszureißen, die bereits durch die begleitenden Kleinstklüfte und Risse im Gebirge vorzerlegt sind. Dieser Prozeß

Tabelle 2 Verschleißbilder von TSM-Rundschaftmeißeln. Es können sieben Verschleißklassen unterschieden werden. Table 2 Bit wear characteristics of roadheader bits. Seven wear types can be distinguished.

Verschleißklasse	Verschleißklasse
Neuer, unversehrter Rundschaftmeißel mit Hartmetallspitze 	4 Sprödbruch: Sprödbruch des Hartmetalleinsatzes infolge zu hoher Scherspannung 
1 Normaler Verschleiß: Symmetrische Abnutzung der Hartmetallspitze und des Trägermaterials 	5 Totalausbruch: Der ganze Hartmetalleinsatz ist aus dem Werkzeugträger herausgerissen 
2 Asymmetrischer Verschleiß: Meißel, die einseitig abgenutzt sind. Beschädigung der Meißelhalter möglich! 	6 Totalverschleiß: Der Meißel wurde bis über die Basis des Hartmetalls hinaus abgenutzt 
3 Trägerverschleiß: Kaliberverschleiß des Werkzeugträgers als Folge des Zerkleinerungsprozesses 	7 Meißelschaftbruch: Der Meißel wurde unterhalb des Trägerkegels am Schaft und damit oberhalb des Meißelhalters abgebrochen 

benötigt wesentlich weniger Energie pro Volumeneinheit und die Schneidleistung steigt entsprechend an. Die Gesteinseigenschaften sind dann nicht mehr maßgebend für die Löseleistung.

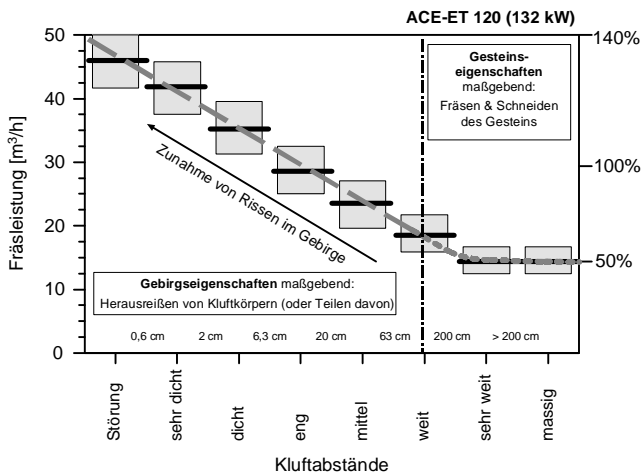


Bild 12 Schneidleistungen der AC-ET 120 in Abhängigkeit der Trennflächenabstände in Tonschiefern des Abwasserstollens Zeulenroda.

Fig. 12: Cutting performance of the AC-ET 120 versus joint spacing in argillaceous slates of the Zeulenroda sewage tunnel.

Ähnliche Beobachtungen wurden beispielsweise beim Fräsen von Leitungsgräben (9, 10) gemacht. Durch diesen Effekt wurden bei gleicher Druckfestigkeit des Gesteins - jedoch unterschiedlichem Durchtrennungsgrad - in Zeulenroda Fräseleistungen zwischen 15 m³/h und 50 m³/h bei einem Mittelwert von 30 m³/h erreicht. Obwohl die Nettoschneidleistungen in der Störungszone gut waren, stieg die Zeit für den Einbau der benötigten Sicherungsmittel wesentlich stärker an, so daß die tägliche Vortriebsleistung stark abfiel.

U-Bahn Nürnberg

Projekt und geologische Situation

Um eine bessere Anbindung des Flughafens an das bereits bestehende U-Bahn-Netz der Stadt Nürnberg zu gewährleisten, wurde im Jahre 1995 mit den Baumaßnahmen für die Verlängerung der Linie U2 Nord begonnen. Kernstück der Maßnahme sind die insgesamt 3,3 km langen, untertägigen U-Bahn-Tunnel mit 30 m² bzw. 35 m² Querschnitt (11). Die Vortriebsarbeiten wurden auf allen Baulosen Mitte 1998 abgeschlossen.

Die Hohlräume waren in Sandsteinen und Ton-Schluffsteinen des Keuper (Obere Trias, Bild 13) zu erstellen, in denen - ähnlich wie im Meisterntunnel - auch konkretionäre, dolomitisch-silikatische Horizonte, sogenannte „Quacken“ oder „Steinmergellagen“ auftreten.

Auf mehreren Baulosen wurden Teilschnittmaschinen des Typs Atlas Copco Eickhoff ET 380 L/Q (200 kW Leistung, 105 t Gesamtgewicht) eingesetzt. Obwohl die Vortriebsmethode insgesamt brauchbare Ergebnisse brachte, traten in einigen Abschnitten Probleme beim Schuttern oder so hoher Werkzeugverschleiß auf, daß die Maschinen an die Grenzen ihrer Wirtschaftlichkeit stießen.

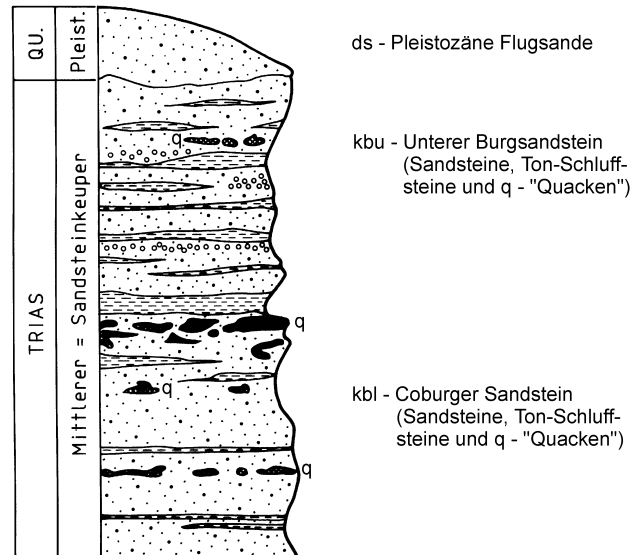


Bild 13 Schematische Schichtsäule der während der Vortriebsarbeiten für die Erweiterung der U-Bahn-Linie U2 Nürnberg angebroffenen Schichtfolge.

Fig. 13 Generalised scheme of the Keuper sediments encountered during the excavation works for the new underground system in Nuremberg.

Auftretendes Problem: Schuttern

In einem Baulos blieb die Vortriebsleistung deutlich hinter den kalkulierten Werten zurück. Es stellte sich bald heraus, daß es sich hierbei nicht etwa um ein Problem von zu geringer Schneidleistung am Schneidkopf handelte, sondern vielmehr ein Problem mit dem Schutternsystem vorlag: Aufgrund der breiigen Konsistenz des Schneidgutes war es für den Ladetisch der TSM unmöglich, die geschnittene Kubatur abzuführen. In regelmäßigen Abständen mußte daher der Schneidvorgang unterbrochen werden, um der Vortriebsmannschaft Gelegenheit zu geben, den sich bildenden „Matsch“ händisch auf den Kettenförderer zu schaufeln.

Ursachen

Die durchgeführten Untersuchungen ergaben, daß zwischen Häufigkeit und Dauer der vortriebsverzögernden Maschinenstillstände und dem Feinkorngehalt im angebroffenen Gebirge ein klarer Zusammenhang bestand. Bild 14 zeigt, wie die Vortriebsleistungen (Netto und Brutto) in Abhängigkeit des Ton- Schluffgehalts steil absinken. Der rekonstruierte Gebirgslösungsvorgang erläutert diesen Zusammenhang: Die an der Ortsbrust in festem und trockenem Zustand vorliegenden Ton-Schluffsteinlagen wurden beim Schneidvorgang in kleine Partikel zerfräst, die auf die Sohle rieselten. Dabei vermischte sich das Fräsgut mit dem Sand aus den Sandsteinlagen, der - ungünstigerweise - eine hohe Wasserdurchlässigkeit besaß. Dieses Gemisch war nun in der Lage sich mit dem in Mengen von 2-5 l/sec anfallenden Bergwasser innerhalb kürzester Zeit zu einen wassergesättigten Schlamm zu vermischen, der vom Ladetisch der TSM nicht mehr aufgenommen werden konnte.

Das vorgestellte Modell kann ebenso die Kurvenverflachung erklären, die in Bild 14 bei höheren Feinkorngehalten beobachtbar wird: Mit steigendem Gehalt

an Ton und Schluff im Schneidgut nimmt umgekehrt der Anteil an Sand ab, wodurch die Wasserwegsamkeit im Schneidgut reduziert wird. Als Effekt dieser Reduzierung benötigt die Mischung länger, um sich mit Wasser aufzusättigen.

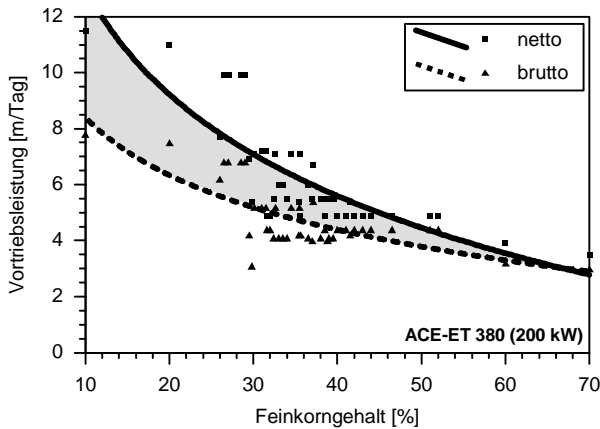


Bild 14 Netto- und Bruttovortriebsleistung in Abhängigkeit vom Ton- und Schluffgehalt in den Keuperformationen des U-Bahn-Vortriebes Nürnberg.

Fig. 14 Net and gross excavation rates versus average amount of clay and silt in the Keuper formation ("sandstones") of the Underground Nuremberg.

Auftretendes Problem: Werkzeugverschleiß

Ein völlig anders geartetes Problem trat während der Vortriebsarbeiten für ein benachbartes Baulos auf: Der Werkzeugverschleiß an den Rundschafftmeißeln des Schneidkopfes betrug bereichsweise 508 Meißel/Tag. Bezogen auf die ausgebrochene Kubatur bedeutet dies einen spezifischen Meißelverschleiß von maximal rd. 4 Meißel/m³(fest).

Ursachen

Die Begutachtung von etwa 100 verschlissenen Meißeln zeigte bald, daß in den überwiegenden Fällen der Hartmetallstift gebrochen oder gar aus dem Trägermaterial herausgerissen worden war (Verschleißklassen 4 und 5). Diese Tatsache allein wies bereits auf hochgradig abrasive Gesteine mit hohen einaxialen Druckfestigkeiten als Hauptursache des hohen Meißelverbrauchs hin. Die Untersuchungen bestätigten dies: Zwischen enorm hohem Verschleiß und dem Auftreten dickerer Quackenlagen bestand ein eindeutiger Zusammenhang. Die höchsten Verschleißraten wurden dabei in einem Abschnitt erzielt, in dem zwei 0,5 m und 0,9 m mächtige, massige Konkretionshorizonte angetroffen wurden.

Obwohl mit den Untersuchungen in den Quacken hohe Quarzanteile (bis zu 60 %) und einaxiale Gesteinsdruckfestigkeiten von bis zu 180 MPa nachgewiesen werden konnten, geben die Verschleißformen zu der Vermutung Anlaß, daß der immense Verschleiß an Rundschafftmeißeln nicht durch die Abrasivität der Konkretionen allein verursacht wurde: Es ist anzunehmen, daß die häufigen Ausbrüche des Hartmetalleinsatzes vor allem auf die Wechsellagerung von wenig festen Sandsteinen und sehr harten karbonatischen Konkretionen zurückzuführen sind.

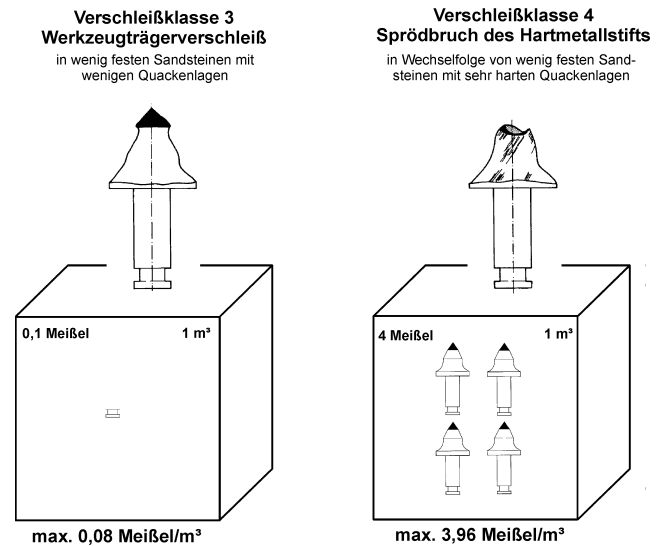


Bild 15 Gegenüberstellung des spezifischen Meißelverbrauchs in Verhältnissen mit nur wenigen, geringmächtigen Quackenhorizonten (linker Würfel, Verschleißklasse 3) und in Verhältnissen mit zahlreichen, bis zu knapp 1,0 m mächtigen Lagen (rechter Würfel, Verschleißklassen 4 und 5).

Fig. 15 Bit consumption per cubic meter in conditions with only few calcrete layers (left cube, steel wear) and with some thick, hard "quacken"-layers (right cube, tip damage & tip removal).

Die Ursache liegt an der Konstruktion der Rundschafftmeißel selbst: Während die aus Wolframcarbid hergestellten Hartmetallstifte zwar relativ widerstandsfähig gegenüber schleifender Beanspruchung sind, machen ihre relativ spröden mechanischen Eigenschaften sie um so anfälliger gegenüber Schlagbeanspruchung. Gerade solchen - von der Seite her angreifenden - Schlägen waren die Meißel aber immer dann ausgesetzt, wenn der Schneidkopf aus einer Sandsteinlage heraus in eine Quackenlage eindrang. Die primäre Folge waren Brüche und Ausbrüche der Hartmetallstifte, die in der Folge jedoch auch einen frühzeitigen Ausfall des gesamten Meißels bedingten, da der fehlende Hartmetallstift nun nicht mehr in der Lage war, den Werkzeugträger effektiv vor Abnutzung - auch durch die Quarzsandsteine - zu schützen. Bild 15 stellt beispielhaft die beiden Nachbarbaulose mit ihren unterschiedlichen Werkzeugverschleißraten und charakteristischen Verschleißformen gegenüber.

Schlußfolgerungen

Aus den bisherigen Betrachtungen der Fallstudien können einige Beobachtungen verallgemeinert werden.

Erfassung der „härtesten Partien“

Insbesondere in Gesteinen, die sehr heterogen zusammengesetzt sind, wie beispielsweise in Fanglomeraten mit sehr harten und festen Komponenten (Altenbergtunnel), Sandsteinen mit harten Karneoldolomit- oder Quackenlagen (Meisterntunnel Bad Wildbad, U-Bahn Nürnberg) oder Tonschiefer-Quarzit-Wechselfolgen (Abwasserstollen Zeulenroda) ist nicht der Mittelwert der geotechnischen Kennwerte maßgebend. In diesen Fällen hat es sich gezeigt, daß sowohl die durchschnittliche Schneidleistung als auch der Meißelverbrauch von den Maximalwerten bzw. den „hardest inclusions“ gesteuert wird. Der Verbrauch an Rundschafftmeißeln wurde dabei besonders von der Kombi-

nation von harten neben weichen Partien oder Lagen im Gebirge bestimmt, was typischerweise zu einer Erhöhung der Meißelbrüche (vgl. Verschleißklassen) führt.

Erfassung der „weichesten Partien“

Manchmal verursacht das „schwächste Glied der Kette“ ebenfalls Probleme - vor allem in Kombination mit Wasser (U-Bahn Nürnberg). Mürbe, sehr tonreiche Sandsteine bzw. Sandstein-Tonschluffstein-Wechselfolgen können bei der Gebirgslösung zusammen mit geringen Wassermengen einen schwer förderbaren Schlamm ergeben. Der erzeugte Schlamm kann durch herkömmliche Ladeeinrichtungen nur schwer gefördert und abtransportiert werden, insbesondere dann, wenn die Verhältnisse nicht vorhergesehen sind und ein Umbau der TSM vor Ort nicht mehr möglich ist. Die in solchen Untergrundverhältnissen üblicherweise hervorragenden Nettoschneidleistungen werden durch die Schutterprobleme de facto zunichte gemacht.

Repräsentative Probennahme

Scheinbar eine Binsenweisheit - aber trotzdem immer noch der häufigste Fehler bei den Voruntersuchungen: Eine nicht repräsentative Probennahme zusammen mit einer zu geringen Anzahl von Felstests kann ein verzerrtes oder gar falsches Bild der tatsächlichen geotechnischen Situation wiedergeben. In einem Untersuchungsprogramm sollten immer für jeden notwendigen Parameter sowohl der durchschnittliche Kennwert als auch Minimal- und Maximalwerte angegeben sein. In jedem Fall ist es notwendig, die härtesten und weichsten Lagen oder Komponenten zu suchen und - so irgend möglich - sowohl mit einfachen Feldmethoden (auch der Hammerschlag ist ein wirksamer „Feldtest“) als auch mit Labormethoden - Kennwerte zu ihrer Charakterisierung zu ermitteln (z.B. Altenbergtunnel, Meisterntunnel Bad Wildbad, U-Bahn Nürnberg). Beispielsweise kann im Labor der oft zu unrecht abgelehnte Punktlastversuch auch dann Anhaltspunkte für Druckfestigkeiten liefern, wenn es nicht möglich ist, prüffähige Kerne herzustellen (z.B. Komponenten in Fanglomeraten, Dolomit-, Quacken- und Quarztlagen, heterogen zusammengesetzte Sandsteine).

Maßstabseffekt

Bei der Gebirgslösung spielt der Maßstabseffekt eine ganz besondere Rolle. Die Voruntersuchungen zum Zwecke der Gebirgslösung (Lösen und Zerkleinern von Fels), wo der Betrachtungsmaßstab in der Größenordnung von Zentimetern bis Dezimetern liegt, müssen einen anderen Schwerpunkt haben als Voruntersuchungen für die Stabilitätsabschätzung in einem auszubrechenden Hohlraum, bei denen Größenordnungen von einigen Metern bis Zehnermetern im Vordergrund stehen.

Geologische Diversität

Ein Untersuchungsprogramm sollte von einem erfahrenen Ingenieur-Geologen betreut werden und sollte sich auf die geologischen Bedingungen des Projektareals und dessen besonderen Problem konzentrieren. Der Einfluß der Phänomene des Gebirges auf das Lösen und

Zerkleinern von Fels kann ungleich größer sein als der der felsmechanischen Kennwerte des Gesteins. Geologische Probleme können die Wirtschaftlichkeit eines Vortriebs sehr schnell in Frage stellen, insbesondere dann, wenn es sich herausstellt, daß für die vorliegenden (nicht vorhergesehenen) Untergrundverhältnisse ein ungeeignetes Vortriebsverfahren gewählt worden ist. Deshalb sollte in einem Vorerkundungsprogramm der Untersuchung der geologisch-petrographischen Aspekte das gleiche Gewicht beigemessen werden wie der Ermittlung der geotechnischen Kennwerte des zu durchörternden Gebirges.

Quellennachweis

1. Thuro, K.: Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. *Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie*, B1, 1996.
2. Thuro, K.; Spaun, G.: Drillability in hard rock drill and blast tunnelling. In: *Felsbau* 14 (1996), Nr. 2, S.103-109.
3. Thuro, K.; Spaun, G.: Geologisch-felsmechanische Parameter zur Erfassung der Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. *Tunnelbau Taschenbuch 1997*, S. 63-106, Essen: Glückauf, 1996.
4. Gehring K.: Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. In: *Felsbau* 13 (1995), Nr. 6, S. 439-448.
5. Gehring K.: Classification of drillability, cuttability, borability and abrasivity in tunnelling. In: *Felsbau* 15 (1997), Nr. 3, S. 183-191.
6. Verhoef, P.N.W.: *Wear of Rock Cutting Tools - Implication for the site investigation of rock dredging projects*. Rotterdam, Brookfield: Balkema, 1997.
7. Thuro, K.; Plinninger, R.J.: Geotechnische Auswirkungen klastischer Sedimentgesteine auf den Tunnelvortrieb. *Berichte 11. Nationale Tagung Ingenieurgeologie, Würzburg*, 1997, S. 298-312. Sonderheft Geotechnik, Essen: Glückauf, 1998.
8. Plinninger, R.J.: Meisterntunnel Bad Wildbad/Schwarzwald: Regionalgeologische und ingenieurgeologische Erkenntnisse im Zuge der Auffahrung des Innerstädtischen Entlastungstunnels. - 130 S., Dipl.Arb. und Dipl.Kart. TU München, 1997.
9. Deketh, H.J.R., Giezen, M., Alvarez Grima, M. & den Hartog, M.H.: Performance of rock cutting trenchers at different sites. In: Aubertin, Hassani & Mitri (eds) *2nd North American Rock Mechanics Symposium. Rock Mechanics. Tools and Techniques*, S. 669-675. Rotterdam: Balkema, 1996.
10. Deketh, H.J.R.: *The wear of rock cutting tools. Laboratory Experiments on the abrasivity of rock*. Rotterdam: Balkema, 1995.
11. Groß, G.: Schwere Teilschnittmaschinen im Einsatz U-Bahntunnelvortrieben in den Städten Nürnberg und Fürth. In: Messe München International (ed) *Berichte 5. Int. Tunnelbausymposium, München 1998*. S. 101-106. Rotterdam: Balkema, 1998.

Autoren

Dipl.-Geol. Dr. Kurosch Thuro und Dipl.-Geol. Ralf J. Plinninger, Technische Universität München, Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie, Lichtenbergstraße 4, 85747 Garching, Deutschland; thuro@geo.tu-muenchen.de / plinning@geo.tu-muenchen.de