

Geotechnische Auswirkungen klastischer Sedimentgesteine auf den Tunnelvortrieb

Kurosch Thuro & Ralf J. Plinninger

Zusammenfassung

Bei den Voruntersuchungen zu großen Tunnelprojekten steht üblicherweise die Vorhersage der Stabilität des auszubrechenden Hohlraums im Vordergrund. Häufig ergeben sich allerdings auch Probleme bei der Wahl einer wirtschaftlichen Vortriebsmethode. Der richtigen Einschätzung der geomechanischen Eigenschaften von klastischen Sedimentgesteinen (Ton-Schluff-Steine, Sandsteine, Fan- und Konglomerate) kommt dabei - nicht zuletzt auch aufgrund der weiten Verbreitung im Untergrund Deutschlands - eine entscheidende Bedeutung zu.

Anhand von Fallstudien wird beispielhaft auf die geologischen Verhältnisse und die Zusammenhänge zwischen geomechanischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften und vortriebsrelevanten Parametern (Bohrgeschwindigkeit, Fräsbarkeit und Werkzeugverschleiß) eingegangen.

Abstract

Usually the main subject in preliminary site investigations prior to major tunnelling projects is the prediction of tunnel stability. Frequently, problems connected with the choice of an economic tunnelling method have been encountered. The accurate assessment of the geomechanical properties of clastic sedimentary rocks (clay-siltstones, sandstones, fanglomerates and conglomerates) may be of great importance - especially because they are wide-spread in the German underground.

With the help of case studies, the geological conditions and the correlation between geomechanical rock and rock mass behaviour on the one side and tunnelling parameters on the other will be discussed.

1 Einführung

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. In Tab. 1 sind die Problemstellungen und deren Einflußfaktoren im Zuge der Planung zusammengestellt. Während der Wahl der wirtschaftlichen Vortriebsmethode in einem Gebirge bei der Planung meistens noch eine gewisse Priorität eingeräumt wird, werden spezielle Untersuchungen zum erzielbaren Bohr- oder Fräsfortschritt und zum Verschleiß der Werkzeuge momentan nur selten durchgeführt. Eine positive und mustergültige Ausnahme bilden die im Jahr 1995/96 durchgeführten Voruntersuchungen zum Schönbergtunnel/Umfahrung Schwarzach im angrenzenden Österreich (Salzburger Land).

Bei der Wahl der wirtschaftlichen Vortriebsmethode stehen naturgemäß technische Faktoren des Bauablaufs und der Rentabilität - insbesondere bei kurzen Tunneln - im Vordergrund. Beispielsweise werden für die vergleichsweise immer relativ kurzen innerstädtischen Umfahrungstunnel selten Tunnelbohrmaschinen eingesetzt. Aber auch Gebirgs- und Gesteinseigenschaften bestimmen maßgebend die Wirtschaftlichkeit der Vortriebsmethode.

Zur Abschätzung der Vortriebsgeschwindigkeit gehören neben dem Baubetrieb vor allem das geomechanische Gebirgsverhalten, welches die Art und den Umfang der Sicherungsmaßnahmen bestimmt. Über die Ermittlung von Nettowerten (Bohr-, Fräs-, Schneidgeschwindigkeit) können Abschlagszeiten oder Vortriebsleistungen abgeschätzt werden. Dazu sind sowohl eine

Reihe von technischen Faktoren erforderlich als auch die Gesteins- und Gebirgseigenschaften. Die Prognose des Verschleißes ist eine weitere Problemstellung, die im wesentlichen auf die Ermittlung der mineralogischen Zusammensetzung, den Verzahnungsgrad des Mikrogefüges, die Art des Bindemittels und die Qualität der Kornbindung sowie der Porosität zurückgeht. Neben Verschleißindices (z.B. dem Cerchar Abrasivitäts Index CAI) ist der äquivalente Quarzgehalt beispielsweise ein wichtiger Indikator (GEHRING 1995, THURO & SPAUN 1996).

Anhand von zwei Projekten, dem Altenbergtunnel bei Idar-Oberstein und dem Meisterntunnel in Bad Wildbad, soll beispielhaft auf die geologischen Verhältnisse und die Zusammenhänge zwischen geomechanischen Gesteins- und Gebirgseigenschaften und vortriebsrelevanten Parametern wie Bohrgeschwindigkeit, Fräsbarkeit und Werkzeugverschleiß eingegangen werden. Den Hintergrund bilden Projektdaten aus dem Schönrainntunnel, Nantenbacher Kurve bei Würzburg (POSCHER 1994, THURO 1996) und Achbergtunnel, Umfahrung Unken (LAABMAYR & EDER 1994, THURO 1996). Allen Projekten ist gemeinsam, daß sie ganz oder überwiegend in klastischen Sedimentgesteinen (Ton-Schluff-Steinen, Sandsteinen, Fanglomeraten und Konglomeraten) aus dem Perm und dem Buntsandstein liegen. Diesem Gesteinstyp kommt im Untergrund Deutschlands aufgrund seiner weiten Verbreitung eine wichtige Bedeutung zu. Die richtige Einschätzung der geomechanischen Eigenschaften dieser Gesteine könnte damit bei künftigen Projekten helfen, Probleme der Gebirgslösung (d.h. Probleme des Ausbruchs bzw. der Gewinnung) besser zu bewältigen.

Tab. 1: Übersicht über die Problemstellungen bei der Gebirgslösung im Zuge der Planung von Tunnelprojekten.

	Problemstellung	Faktoren
Methode	Wahl einer wirtschaftlichen Vortriebsmethode	Technische Faktoren Tunnellänge, Ausbruchsquerschnitt etc. Gebirge Gebirgs- & Gesteinseigenschaften (wie unten aufgeführt)
Bau- fortschritt	Abschätzung der Vortriebsgeschwindigkeit	Baubetrieb & Logistik Gebirge & Gebirgsverhalten (Stabilität) Art und Umfang der Sicherungsmaßnahmen
	Abschätzung von Nettowerten wie ○ Netto-Bohrgeschwindigkeit (Bohren & Sprengen), ○ Fräsleistung (Teilschnittmaschine), ○ Penetration (Tunnelbohrmaschine)	Technische Faktoren: Leistung der Maschinen, Art der Energieübertragung, Art und Anordnung der Werkzeuge Gesteinseigenschaften: Zähigkeit → Zerstörungsarbeit (THURO 1996), Einaxiale Druckfestigkeit, Art des Bindemittels und Qualität der Kornbindung, Porosität / Porenvolumen (Trockenrohddichte) Gebirgseigenschaften: Abstand und Orientierung der Trennflächen, Anzahl der Trennflächenscharen, Verwitterung, Besonderheiten wie hydrothermale Zersetzung, Quellfähigkeit etc.
Verschleiß	○ Lebensdauer und Verbrauch von Bohrkronen, Rundschaftmeißel, Diskenmeißel (direkt an der Ortsbrust) ○ Verschleiß an Material wie Bohrstangen, Meißelhalter, Lager, Hydraulik- und Antriebsaggregate und andere verschleißrelevanten Maschinenteilen	Gesteinseigenschaften Mineralzusammensetzung, Verzahnungsgrad & Bindemittel (s.o.), Gesteinsabrasivität Gebirgseigenschaften Trennflächengefüge, Verwitterung, Besonderheiten (s.o.)

2 Altenbergtunnel / Idar-Oberstein

Die Problematik der Wahl der richtigen Vortriebsmethode soll am Beispiel des Altenbergtunnels, eines nur 320 m kurzen Straßentunnels erläutert werden.

2.1 Projektbeschreibung und geologische Verhältnisse

Der Altenbergtunnel (320 m) stellt einen Teilabschnitt des Streckenausbaus der Bundesstraße B 41 nach Bad Kreuznach dar und begründet die Strecke im Bereich der am östlichen Ortsausgang gelegenen Naheschleife mit einem Durchstichtunnel. Die Streckenführung beginnt im Westen mit einer neuen innerstädtischen Straßentrasse und führt über eine Brücke direkt in den Altenbergtunnel. Die schwach gekrümmte Tunnelachse verläuft in etwa West-Ost und mündet am Ostportal in einem Brückenbauwerk, das in einer langen Rampe auf das ursprüngliche Straßenniveau absinkt. Als Besonderheit ist zu erwähnen, daß annähernd parallel zur geplanten Trasse im Abstand zwischen 25 m im SW und 100 m im NE ein bereits Ende des letzten Jahrhunderts gebauter Eisenbahntunnel verläuft.

Der Altenberg bei Idar-Oberstein, östlich des Stadtteils Struth gelegen, ist ein schmaler, etwa Nord - Süd streichender, ca. 340 m hoher Felsrücken, der im Westen, Süden und Osten von der Nahe umflossen wird. An der Westseite des Altenbergs wurden in der Vergangenheit die Felswände durch die Erosion der Nahe unterschritten und es kam zu größeren Felsstürzen. Der frühere Namen des Tunnels „Gefallener Felsen“ ist auf einen großen Bergsturzblock zurückzuführen, der im Bereich des Westportals lag und vor dem Tunnelanschlag entfernt werden mußte. Auf dieser Seite existieren noch Steilwände mit einer mittleren Neigung von 60°, während die Ostflanke mit einer mittleren Neigung von 30° flacher ausgebildet ist.

Der Altenbergtunnel befindet sich nur wenig südlich des Hunsrücks, im nördlichen Teil des mit klastischen Rotliegend-Sedimenten und -Vulkaniten gefüllten Saar-Nahe-Troges. An der Oberfläche stehen hier überwiegend Fanglomerate an, die im allgemeinen ein Streichen von NE - SW aufweisen.

Tab. 2: Wichtige Projektdaten des Altenbergtunnels in Kurzform.

Übersicht	Altenbergtunnel/Idar-Oberstein
Zweck	Begradigung der B 41 (Naheschleife)
Länge	319,5 m, davon 299 m bergmännisch, 72 m max. Überlagerung
Ausbruchsquerschnitt	Kalotte ca. 50m ² , gesamt max. 92 m ²
Bauzeit (Vortrieb)	Februar 1989 bis Juli 1989
Bauherr	Bundesrepublik Deutschland, Straßenbauverwaltung Rheinland-Pfalz Straßenneubauamt Bad Kreuznach

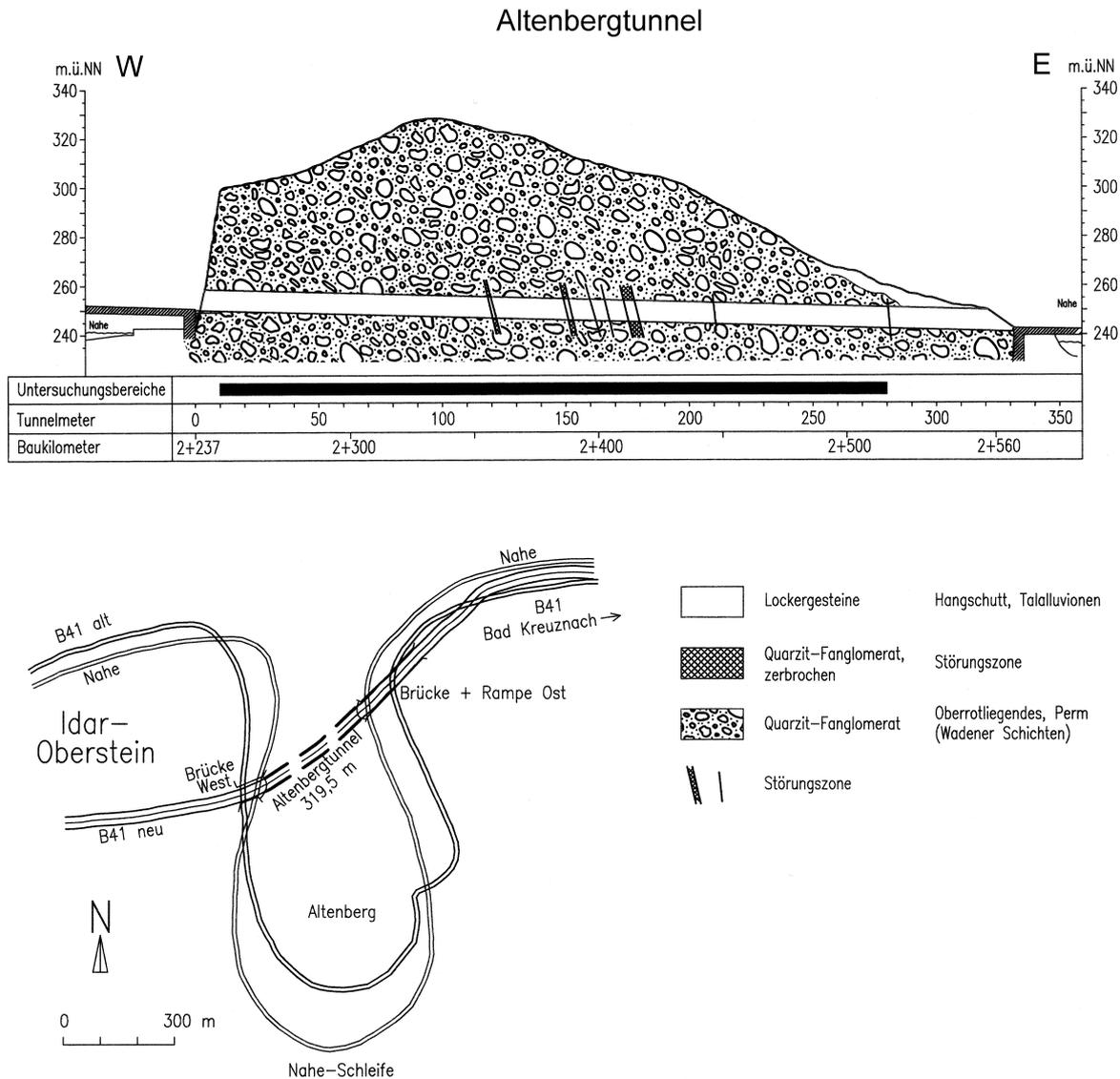


Abb. 1: Geologisches Übersichtsprofil des Altenbergtunnels mit Lageskizze.

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 Ton-Schluffgröße bis in den Blockbereich hinein aufgebaut. Und als fossil gewordener Abtragungsschutt des umliegenden Gebirges besteht es aus ganz unterschiedlichen Komponenten: Quarziten, Gangquarzen, Porphyren, Basalten und anderen Vulkaniten sowie Schieferbruchstücken (Abb. 2).

2.2 Wahl einer wirtschaftlichen Vortriebsmethode

Zur Wahl des wirtschaftlichen Ausbruchverfahrens wurde zu Beginn des Tunnelvortriebs ein Fräsversuch mit einer Teilschnittmaschine mit 300 kW Schneidleistung und Querschneidkopf unternommen. Das Ergebnis ist in Abb. 3 zu sehen: Nach kürzester Zeit waren die Außenmeißel des Fräskopfes abgenutzt - bei gleichzeitiger äußerst unbefriedigender Fräsleistung.

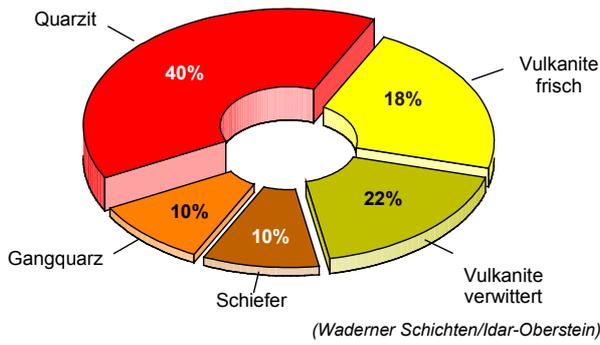


Abb. 2: Gesteinszusammensetzung des Fanglomerats (Rotliegendes der Waderner Schichten).

In Abb. 4 sind die einaxialen Druckfestigkeiten des Gesteins und der Komponenten aufgetragen. Die Druckfestigkeit des Gesteins (großer grauer Balken) liegt im mittleren Bereich und das Gestein hätte damit laut Leistungsangabe des Maschinenherstellers gut fräsbar sein müssen. Die hohen Festigkeiten von einzelnen Komponenten jedoch wirkten „wie ein Nagel im Brett unter einem Sägeblatt“. Die Maschine hat sich an den hochfesten Quarzitgeröllen im wahrsten Sinne des Wortes „die Zähne ausgebissen“.



Abb. 3: Abgenutzte Außenmeißel am Querschnittkopf der Teilschnittmaschine (300 kW Schneidleistung). Fräsversuch in Fanglomeraten der Waderner Schichten.

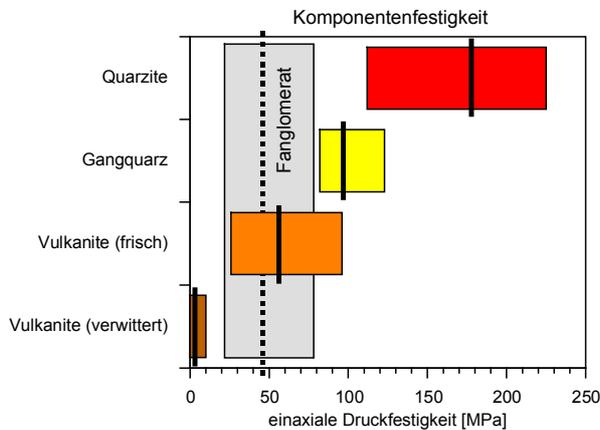


Abb. 4: Einaxiale Druckfestigkeiten des Fanglomerats und seiner Komponenten (Rotliegendes der Waderner Schichten).

Das Leistungsdiagramm einer Teilschnittmaschine mit 300kW installierter Leistung, d.h. die Schneid- oder Fräsleistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit ist in Abb. 5 gegeben. Je nach Ausbildung des Gebirges, vor allem der Trennflächen, können ganz unterschiedliche Fräsleistungen erzielt werden. Das Gebirge im Altenbergtunnel war - und das dürfte ein ganz wesentlicher Punkt sein - weitestgehend frei von mechanisch wirksamen Trennflächen. In Abb. 6 ist der Einfluß des Trennflächengefüges genauer dargestellt. Bei gleicher Druckfestigkeit des Gesteins werden Fräsleistungen von bis zu 100% Spannweite erreicht. Maßgebend für hohe Fräsleistungen sind dabei Trennflächenabstände in der Größenordnung des Fräskopfes - also kleiner als etwa 60 cm. Erst dann ist die Maschine in der Lage, ganze Klüftkörper aus dem Gebirgsverband zu lösen und die Leistung steigt fast linear an. Die Gesteinseigenschaften sind dann nicht mehr maßgebend für die Löseleistung. 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.

Im Falle des Altenbergtunnels mußte der Vortrieb konventionell mit Bohren und Sprengen erfolgen. Die spezifischen Probleme, die bei dieser Vortriebsmethode auftraten, sind in THURO (1997) beschrieben.

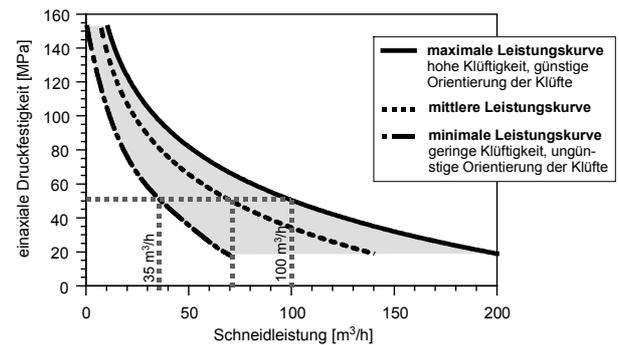


Abb. 5: Schneidleistungsdiagramm einer Teilschnittmaschine mit 300 kW installierter, elektrischer Leistung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit. Nach Angaben des Maschinenherstellers PAURAT (1995), umgezeichnet.

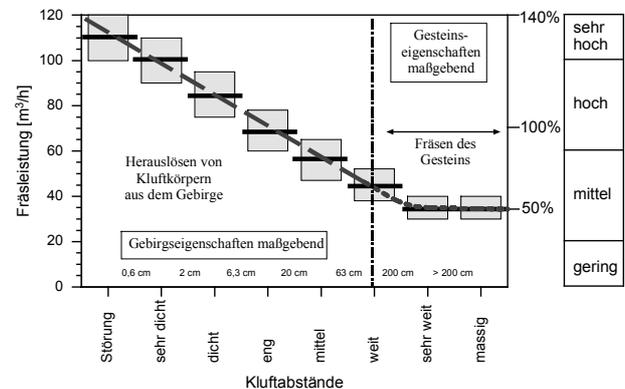


Abb. 6: Fräsleistung in Abhängigkeit des Durchtrennungsgrades (Abstand der Klüfte).

2.3 Verschleißcharakteristik von Fanglomeraten und Sandsteinen

Welche Auswirkungen können nun die Gesteinseigenschaften auf den Verschleiß der Werkzeuge haben? Es stellt sich beispielsweise die Frage, ob diese groben Fanglomerate nur wie grobkörnige Sandsteine einzuschätzen sind, oder ob sie eine eigenständige Gesteinsgruppe mit eigenen felsmechanischen und technischen Eigenschaften darstellen.

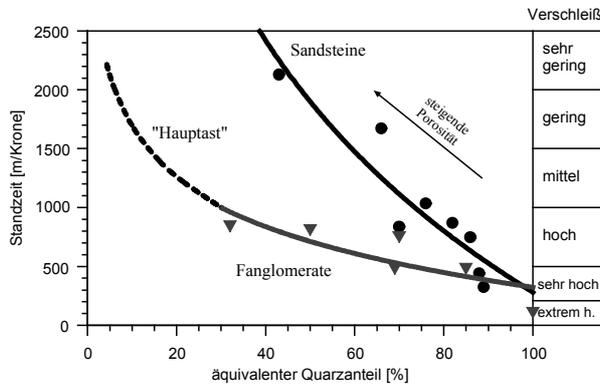


Abb. 7: Bohrkronenverschleiß (als Gesamtstandlänge, d.h. Standzeit) in Abhängigkeit des äquivalenten Quarzanteils in Sandsteinen und Fanglomeraten. Gestrichelt dargestellt ist der gesamte Hauptast (Fortsetzung der Kurve bei anderen Gesteinen).

In Abb. 7 ist der Bohrkronenverschleiß gegen den äquivalenten Quarzanteil aufgetragen. Der Bohrkronenverschleiß wird als mittlere Gesamtstandlänge (Standzeit) einer Bohrkronen in einem bestimmten Gestein (Gebirge) gemessen. Es sind zwei unterschiedliche Äste in dem Diagramm abgebildet: einer für die Fanglomerate und den Hauptast aller Gesteine sowie ein zweiter für die Sandsteine. Obwohl beide Gesteinsfamilien sich prinzipiell nur in der Korngröße unterscheiden, liegt der Verschleiß bei den Fanglomeraten wesentlich höher - ausgedrückt durch eine wesentlich niedrigere Standzeit der Bohrkronen. Vergleicht man die Verschleißcharakteristik (vgl. Tab. 4) beider Gesteinsfamilien, so wird der Unterschied deutlich: Während bei den Sandsteinen der Verschleiß des Trägermaterials der Bohrkronen (Kaliberverschleiß) durch die scheuernde Wirkung des Quarzsandes überwiegt, stehen bei den Fanglomeraten Brüche der Hartmetallstifte im Vordergrund.

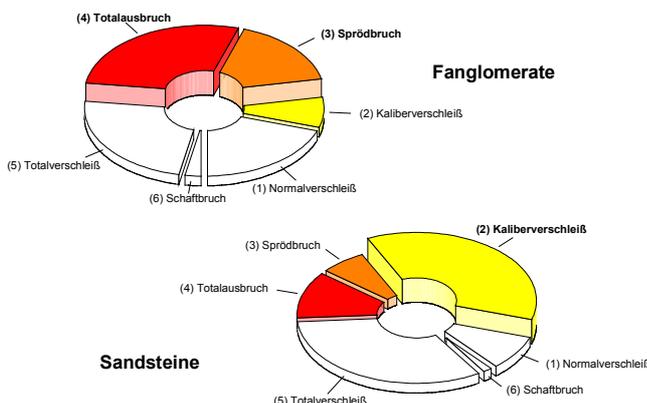


Abb. 8: Verschleißcharakteristik von Bohrkronen in Fanglomeraten und Sandsteinen. Verschleißarten Tab. 4.

Auch hier kommt also der Maßstabeffekt voll zur Wirkung:

- Die Komponenten in einem Fanglomerat sind in der gleichen Größenordnung wie das bearbeitende Werkzeug und führen zu einem vorzeitigen Verschleiß durch Kronenbrüche.
- Die Körner in einem Sandstein sind klein gegen das bearbeitende Werkzeug und führen zu einer schleifenden Abnutzung der Krone.

Die groben Komponenten in den Fanglomeraten steuern also die Eigenschaften bezüglich der Gebirgslösung. Daneben ist offensichtlich die Porosität des Gesteins von ausschlaggebender Bedeutung. Dieser Parameter wird im letzten Abschnitt noch eigens diskutiert.

3 Meisterntunnel / Bad Wildbad

3.1 Projektbeschreibung und geologische Verhältnisse

Der Heilkurort Bad Wildbad im Schwarzwald, der auf eine über 600 Jahre alte Kurtradition zurückblicken kann, liegt im Herzen des Nordschwarzwaldes, etwa eine halbe Autostunde südlich von Pforzheim (Baden-Württemberg). Die Enge des rund 300 m tief eingeschnittenen Tales der Großen Enz führt dazu, daß im Ort selbst die Interessen von Individualverkehr und ruhesuchendem Kurgast auf engstem Raum kollidieren. Zur Verbesserung des Kurambientes wurde bereits in den frühen 60er Jahren das Konzept einer immissionsverringenden Teilortsumfahrung geboren. Im September 1994 wurde mit dem NÖT-Vortrieb des 1338 m langen, bergmännischen Abschnitts des innerstädtischen Entlastungstunnels begonnen. Der Mitte 1997 dem Verkehr übergebene Meisterntunnel umfährt heute den Kurort in einer insgesamt 1684 m langen Schleife.

Die dabei angetroffenen klastischen Sedimente sind zeitlich ins Perm (Oberes Rotliegend - Zechstein) zu stellen und stellen den Abtragungsschutt des darunterliegenden variszischen Grundgebirges dar. Die äußerst wechselhaften geomechanischen Eigenschaften der einzelnen Schichtglieder sind dabei ursächlich mit deren Genese verknüpft: Es handelt sich - wie schon beim Altenbergtunnel - um terrestrische Bildungen, die unter wüstenhaften Bedingungen in Schuttfächern („alluvial fans“) abgelagert wurden. Die dabei ständig wechselnden und sehr kleinräumigen Ablagerungsverhältnisse führten dazu, daß sich in nur wenigen Metern mächtigen Lagen mürbe, tonig gebundene Fanglomerate mit festen Ton-Schluff-Steinen und unterschiedlich gut zementierten Sandsteinen abwechseln. Das granitische Ausgangsmaterial dieser Schichten bedingte dabei Quarzgehalte von bis über 75%. Zusätzlich wurden in der Abfolge konkretionäre Lagen von äußerst kompaktem, sehr hartem Dolomit sowie darin eingelagertem kryptokristallinem Quarz („Karneol“) angetroffen. Auch dieser Karneoldolomithorizont ist unter wüstenhaften Bedingungen als Kalkkruste an der Oberfläche gebildet worden. Bei der Dokumentation zeigte sich, daß das Gebirge über weite Bereich frei von ausgeprägten Klüftflächen war.

Tab. 3: Wichtige Projektdaten des Meisterntunnels in Kurzform.

Übersicht	Meisterntunnel/Bad Wildbad
Zweck	Ortsumfahrung der L 350
Länge	1684 m, davon 1338 m bergmännisch
Ausbruchsquerschnitt	Kalotte ca. 45 m ² , Größter Gesamtquerschnitt (Lüfterkaverne) bis 140 m ²
Bauzeit (Vortrieb)	September 1994 bis Oktober 1996
Bauherr	Stadt Bad Wildbad

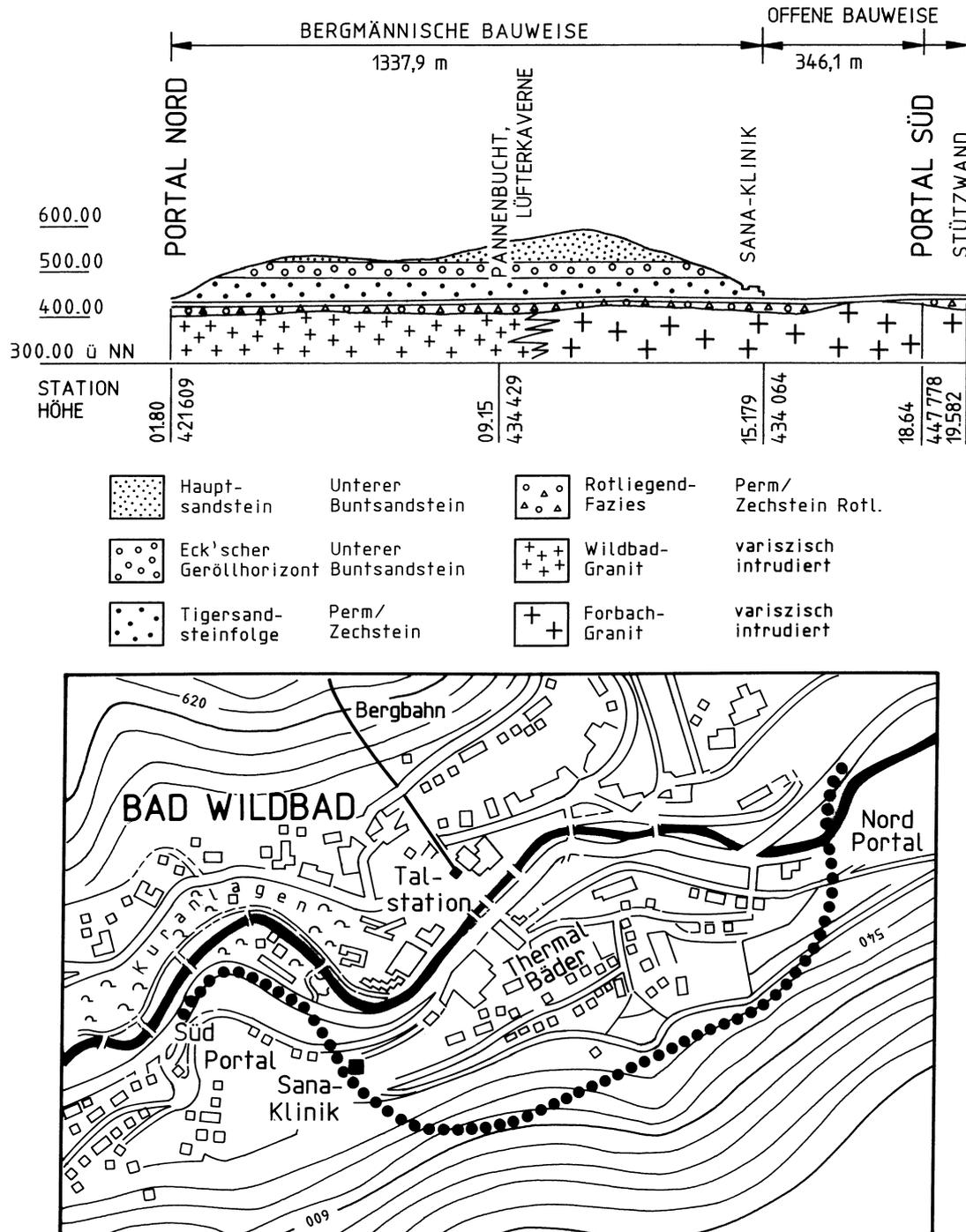


Abb. 9: Geologisches Übersichtsprofil des Meisterntunnels mit Lageskizze

3.2 Einflüsse auf die Wahl des Vortriebsverfahrens

Zunächst war vorgesehen, den Vortrieb mit einer 300 kW starken Teilschnittmaschine Paurat E242B mit Längsschneidkopf (Abb. 10) durchzuführen. Nach zwei kurzen Probeabschnitten, die geringe Bruttoschneidleistungen von rund 13 m³/h ergeben hatten, ließ man dieses Vortriebskonzept jedoch fallen und stellte auf einen konventionellen Bohr- und Sprengvortrieb um. Wie bereits in der Einleitung dargestellt, führt das massige, weitgehend ungeklüftetes Gebirge dazu, daß sich die Schneidleistungen der Teilschnittmaschine an der „Minimum“-Kurve des in Abb. 11 dargestellten Schneidleistungsdigrammes orientieren. Die zusätzlich in Wildbad noch horizontbeständig auftretenden Lagen von bis zu 150 MPa festem Karneoldolomit und bis 90 MPa festen Ton-Schluff-Steinen bildeten Hindernisse, aufgrund derer die Schneidleistung der Teilschnittmaschine unter die Grenze der Wirtschaftlichkeit rutschte.

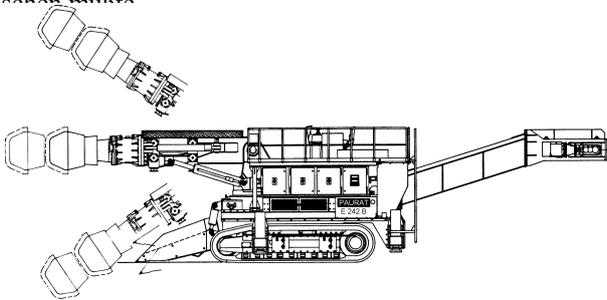


Abb. 10: Ansicht der Teilschnittmaschine Paurat E 242B (nach PAURAT 1995).

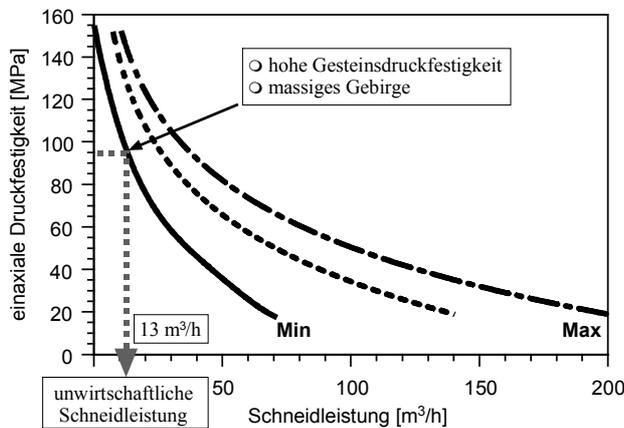


Abb. 11: Schneidleistungsdigramm der Teilschnittmaschine E 242B. Die geomechanischen Eigenschaften des angetroffenen Gebirges führten zu einer nicht wirtschaftlichen Fräseleistung von rd. 13m³/h.

3.3 Einfluß auf den Bohr- und Sprengvortrieb

Nachdem man auf einen konventionellen Vortrieb umgestellt hatte, verlief der weitere Vortrieb problemlos. Zum Einsatz kam ein Bohrwagen vom Typ Atlas-Copco Rocket Boomer 352 mit zwei Bohrlafetten, die mit jeweils einem Bohrhämmer COP 1440 T05 bestückt waren. Auch den hohen Anforderungen, die die Unterfahrung einer in Betrieb befindlichen Kurklinik

bei einer äußerst geringen Felsüberlagerung von nur etwa 15 m stellte, wurde diese Vortriebsweise dank sprengtechnischer Maßnahmen und ständiger Überwachung gerecht (Einen ausführlichen Bericht hierzu bringt ARNOLD 1995). Die weiterhin baubegleitend durchgeführte ingenurgeologische Baudokumentation erbrachte jedoch zahlreiche Ergebnisse, die nicht in das bekannte Schema zu passen schienen.

Bohrgeschwindigkeit

Üblicherweise besteht zwischen der Bohrgeschwindigkeit, die ein Bohrgerät erreicht und den geomechanischen Gesteinseigenschaften ein enger Zusammenhang. Die Zerstörungsarbeit (nach THURO 1996) stellt dabei ein hochsignifikantes Maß für die zu erwartende Bohrleistung dar (Abb. 12). Im Falle des Meisterntunnel-Vortriebes liegen die ermittelten Punkte jedoch so weit außerhalb der Norm, daß weder die natürliche Wertestreuung, noch Meßfehler eine Erklärung liefern konnten. Ein ebenfalls ungewöhnliches Phänomen war die stark differierende Bohrgeschwindigkeit zweier baugleicher, jedoch unterschiedlich stark abgenutzter Bohrkronen, die auf identischen Bohrhämmern eingesetzt wurden. Entgegen der Erwartungen erzielten Bohrkronen, die bereits seit mehreren Abschlagen eingesetzt wurden, erheblich höhere Bohrgeschwindigkeiten als fabrikneue Kronen.

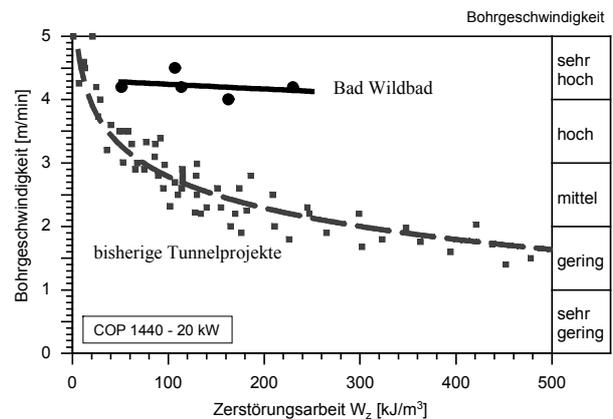


Abb. 12: Zusammenhang von Bohrgeschwindigkeit und Zerstörungsarbeit für bisher untersuchte Tunnelprojekte (gestrichelt) und das Projekt Meistertunnel/Bad Wildbad (schwarz).

Bohrkronenverschleiß

Auch bei der Begutachtung der Verschleißform der Stiftbohrkronen stellten sich ungewöhnliche Formen des Werkzeugverschleißes heraus: Generell handelte es sich um einen für weniger harte Sandsteine typischen Verschleiß des Werkzeugträgermaterials (Verschleißtyp 2, siehe Tab. 4). Das Ungewöhnliche bei diesem Projekt war jedoch eine trompetenförmige Erweiterung der an der Stirnseite der Krone austretenden Spüllöcher (Typ 2b). Wie die Schnitte (Abb. 13) zeigen, ging dies bei 8-Stift-Kronen bis hin zur völligen Abtragung des Kronenzentrums (Typ 2c). Bei allen Kronen führte dieser Effekt sehr frühzeitig zum Verlust der zentralen Hartmetallstifte.

Verschleißcharakteristik von Stiftbohrkronen		
1	Normaler Verschleiß	Verschleiß der Hartmetallstifte - Abstumpfung
2	Kaliberverschleiß + Sonderformen	2 a) Verschleiß des Trägermaterials (v.a. Schaft) 2 b) trompetenartige Erweiterung der Spüllöcher 2 c) Verlust der Mittelstifte (Trompetenbildung)
3	Sprödbbruch	Bruch von Stiften aufgrund hoher Scherbelastung
4	Totalausbruch	Herausreißen von Stiften aus dem Trägermaterial
5	Totalverschleiß	Abnutzung der Bohrkronen bis zur Basis der Stifte
6	Kronenschaftbruch	Bruch des Schafts unterhalb des Stiftbereichs

Tab. 4: Verschleißcharakteristik von Bohrkronen - incl. Sonderformen 2 b) und 2 c).

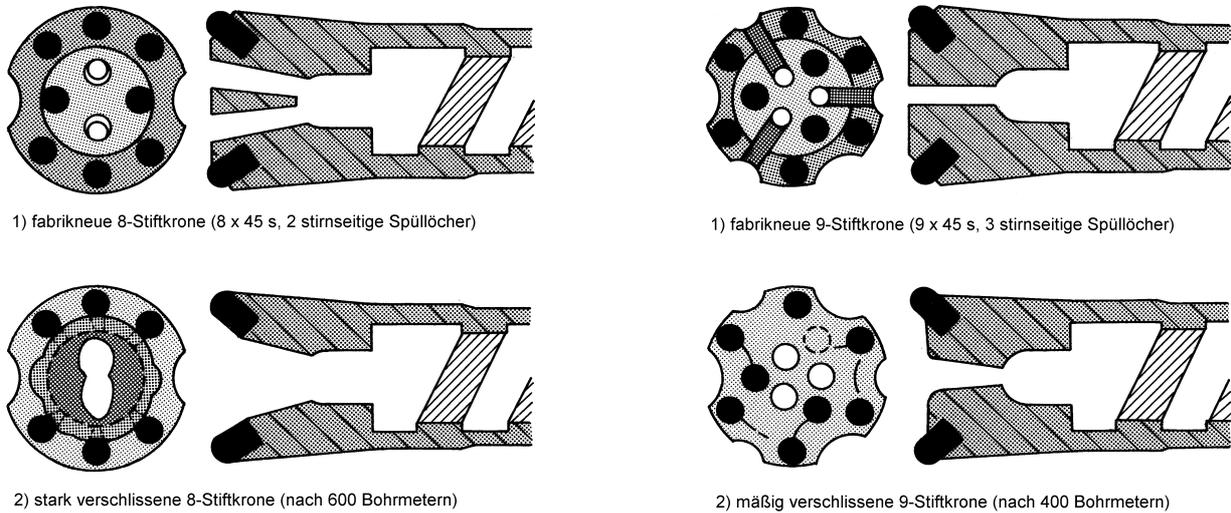


Abb. 13: Typische Verschleißformen von Stiftbohrkronen Ø 45mm aus dem Meisterntunnel-Vortrieb. Vor allem bei der 8-Stift-Krone (links) wird die trompetenförmige Erweiterung der zentralen Spülöffnungen deutlich.

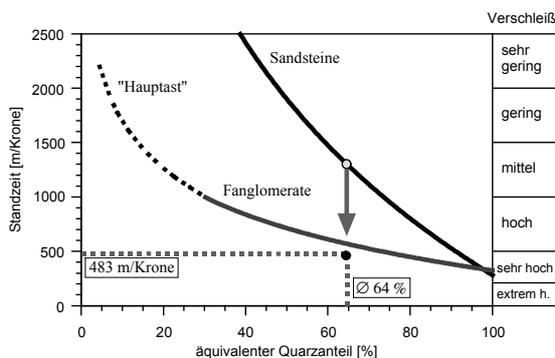


Abb. 14: Bohrkroneverschleiß (als Gesamtstandlänge, d.h. Standzeit) in Abhängigkeit des äquivalenten Quarzanteils in Sandsteinen und Fanglomeraten. Der in den Gesteinen des Meisterntunnels ermittelte äquivalente Quarzanteil ist als schwarzer Punkt eingetragen (Sandsteine), der für diese Gesteine charakteristische Schätzwert als grauer Punkt auf dem Sandstein-Ast.

Dieser - bisher tatsächlich nur am Meisterntunnel beobachtete Effekt - bot aber auch eine Erklärung für all die bisher beschriebenen Phänomene. Heute sind wir der Ansicht, daß diese „von innen angreifende“ Abrasion der Spüllöcher durch feinstkörnige Quarzpartikel verursacht wurde, die im Spülwasser mitgeführt wurden. Als Spülwasser wurde beim Vortrieb ausschließlich Tunnelsickerwasser verwendet, das in offenen Gerinnen abgeleitet wurde. Hier konnte sich feiner Quarzstaub niederschlagen, der z.B. beim Sprengen entstanden war und durch den Fahrzeugverkehr ständig wiederaufgewirbelt wurde. Durch die Erweiterung der Spülöffnungen könnte sich das Spülsystem soweit verbessert haben, daß sich in den überwiegend tonig gebundenen Sedimenten tatsächlich verbesserte Bohrleistungen ergaben. Als negative Folge dieses nicht nur von der Gebirgsseite, sondern zusätzlich auch von Innen heraus angreifenden Verschleißvorgangs sank jedoch auch die Standzeit der Einzelbohrkronen auf knapp 500 m/Krone.

Für das Projekt „Meistertunnel Bad Wildbad“ läßt sich also zusammenfassend aussagen, daß in diesem speziellen Fall die Bohrgeschwindigkeit höher und weniger von den geomechanischen Gesteinseigenschaften gesteuert wurde, als dies die Laboruntersuchungen erwarten ließen. Der bisher unseres Erachtens unterschätzte Einfluß des Spülsystems wird u.a. durch die Verschleißform und deren Auswirkung deutlich.

4 Einfluß der Porosität

Aus dem vorangegangenen Abschnitt könnte nun der Eindruck entstehen, daß es wohl doch eher technische denn geologische Gründe sind, die Bohrgeschwindigkeit und Verschleiß steuern. Es ist zwar sicher so, daß technische und geologische Parameter eng ineinander greifen. Aber der primäre Grund, weshalb die Fanglomerate und mürben Sandsteine des Wildbader Vortriebs durch den verstärkten Wasserstrahl zusätzlich gelöst werden konnten, ist ihr überwiegend toniges Bindemittel.

Auffällig bei der Gesteinsansprache der Sandsteine war die wechselnde Porosität und die ganz offensichtlich davon abhängige Festigkeit, die schon mit den Händen bzw. dem Geologenhammer getestet werden konnte. Daher wurde bei allen Projekten neben den üblichen felsmechanischen Kennwerten das Porenvolumen (Porenraum) über den Wasseraufnahmeversuch und die Trockenrohddichte bestimmt. Zusätzlich wurden die Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet, um einen räumlichen Eindruck der Porosität und der Zusammensetzung des Bindemittels zu gewinnen.

Der Unterschied zwischen geringer und großer Porosität wird in den Rasterelektronenmikroskop-Fotos der Abb. 15 bis 18 deutlich. Beim Ton-Schluff-Stein der Abb. 15 besteht die Matrix zwar nur aus Tonmineralen, jedoch ist das Porenvolumen durch die extrem dichte Lagerung sehr gering. Möglicher Grund dürfte die ehemals hohe Überlagerung von bis zu 1,3 km mesozoischer Sedimentgesteine sein. In Abb. 16 ist eine kompakte, dolomitische Konkretion des Karneoldolomithorizontes mit einem sehr dichten Gefügeverband aus überwiegend Dolomit, Tonen bzw. Glimmer und wenigen eingebetteten, großen Quarzsandkörnern zu sehen. Bei Abb. 17 ist ein insgesamt lockeres Gefüge mit einem überwiegend tonigen, untergeordnet silikatischen Bindemittel sichtbar (Feinsandstein). Die höchste Porosität ist in Abb. 18 zu erkennen. Das lockere Gefüge entsteht durch groben Granitbruchstücke und das dazwischen auftretende, überwiegend tonige, untergeordnet silikatische Bindemittel.

Die Abhängigkeit der technischen Kennwerte Bohrgeschwindigkeit und Bohrkronenstandzeit vom Porenvolumen wird in den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 19 und Abb. 20) deutlich. Die Trockenrohddichte, die in etwa dem nutzbaren Porenvolumen entspricht, wurde als zweite x-Achse aufgetragen. Sowohl die Standzeit der Bohrkronen als auch die Bohrgeschwindigkeit steigen mit zunehmender Porosität. Die angegebenen Regressionskurven sind allerdings wegen der geringen Anzahl der Werte nur als generelle Trends zu werten, nicht als statistisch gesicherte Gesetzmäßigkeiten.

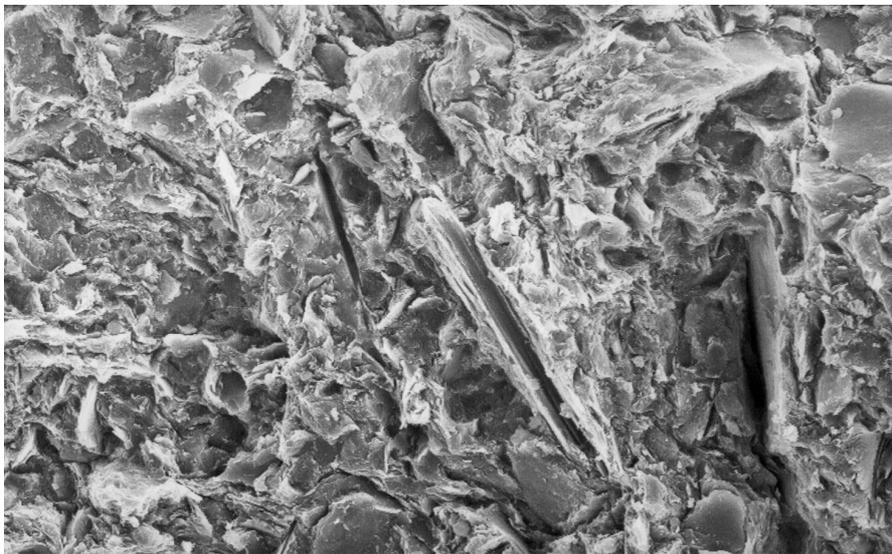


Abb. 15: **Ton-Schluffstein ro5.** Tonstein, in dem die extrem dichte Matrix nur aus Tonmineralen besteht. Geringe Porosität. Untere Bildkante 0,3 mm.

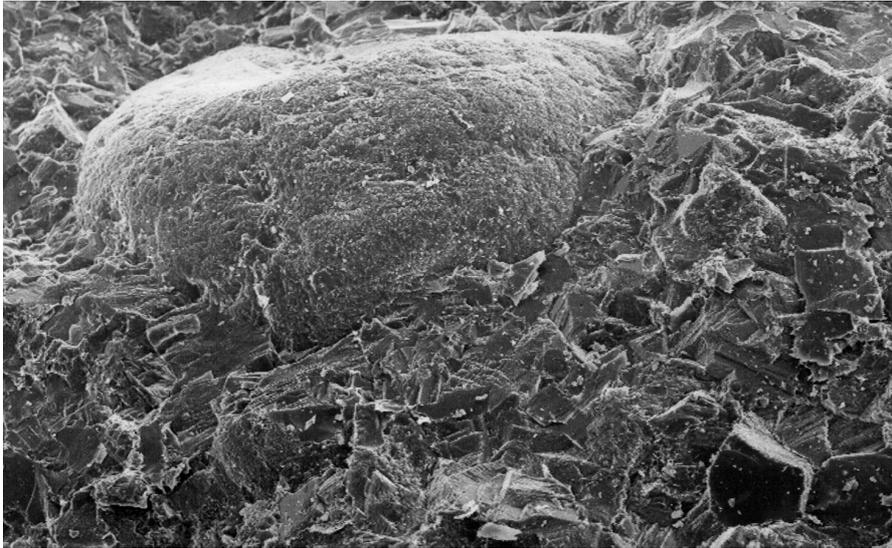


Abb. 16: **Karneol-Dolomit ro2.** Sehr dichter Gefügeverband aus überwiegend Dolomit, Tonen bzw. Glimmer und wenigen eingebetteten, großen Quarzsandkörnern (Bildmitte). Geringe Porosität. Untere Bildkante 1,6 mm.

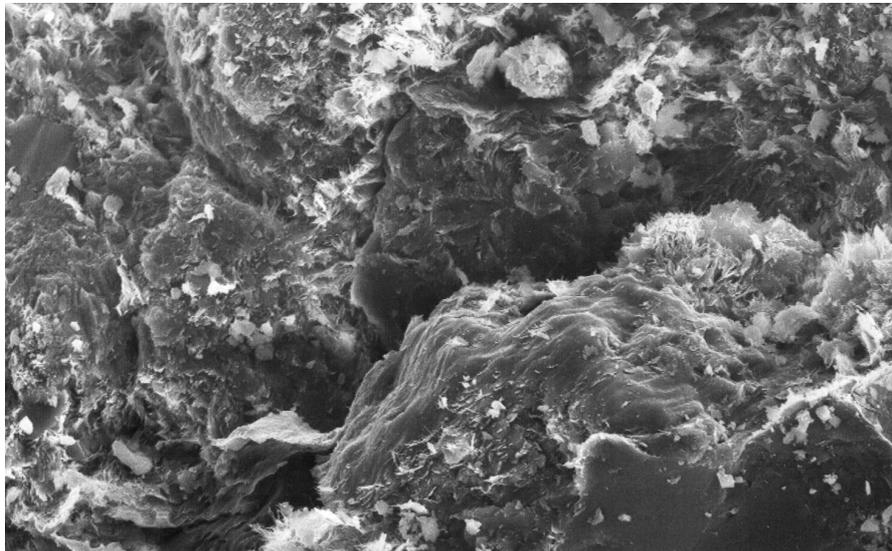


Abb. 17: **Feinsandstein su2.** Quarzsandstein mit tonigem Bindemittel in mitteldichtem Gefügeverband. Mittlere Porosität. Untere Bildkante 0,3 mm

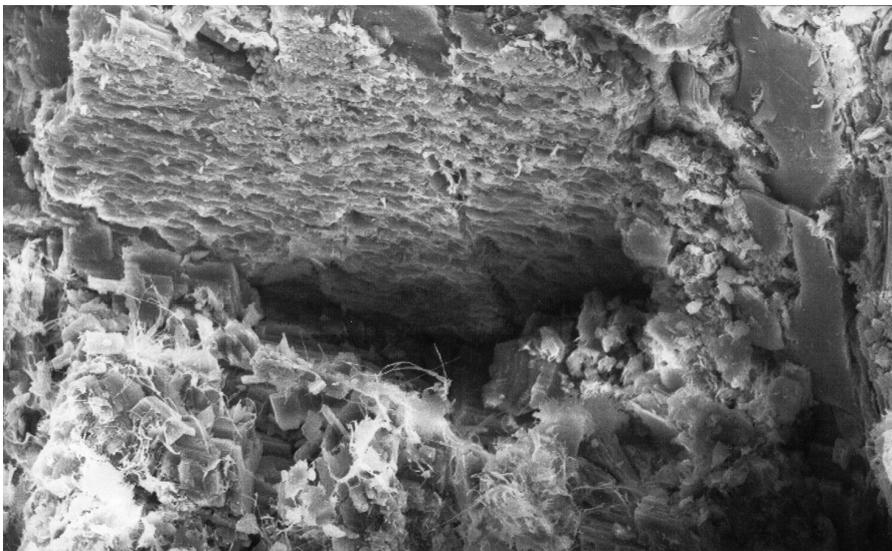


Abb. 18: **Granitfanglomerat ro1.** Überwiegend toniges, untergeordnet silikatisches Bindemittel mit insgesamt lockerem Gefüge. Hohe Porosität. Untere Bildkante 0,4 mm.

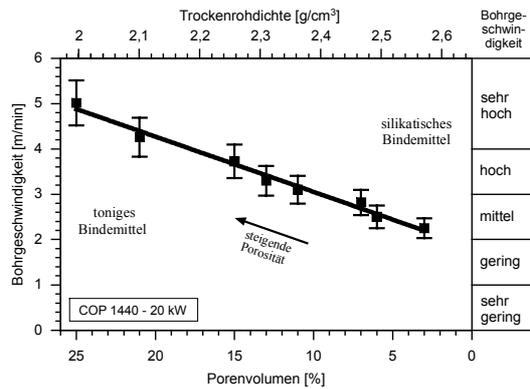


Abb. 19: Einfluß der Porosität auf die Bohrgeschwindigkeit.

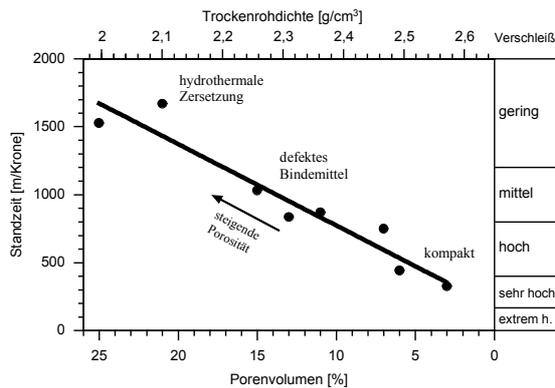


Abb. 20: Einfluß der Porosität auf den Bohrkronenverschleiß (die Standzeit).

5 Ausblick

Wir hoffen, daß durch unsere Ausführungen vor allem die folgenden drei Punkte zu erkennen waren:

1. Maßstabeffekt: Bei der Betrachtung von Phänomenen im Tunnelvortrieb kommt dem Maßstabeffekt eine außerordentliche Bedeutung zu. Die Größenordnung der Phänomene spielt für die Charakterisierung des Problems eine wesentliche Rolle.
2. Diversität: Ein Voruntersuchungsprogramm im Hinblick auf die Gebirgslösung muß völlig anders angelegt sein als eines zur Beurteilung der Gebirgsstabilität. Durch den Einfluß des Maßstabeffekts ist es unmöglich, mit dem gleichen Voruntersuchungsprogramm, das für eine Prognose der Gebirgsstabilität (im 10er-Meter-Bereich) ausgelegt ist, die Prognose für die Gebirgslösung (im Meter- und Zentimeterbereich) nebenbei mit zu erledigen.
3. Geologischer Schwerpunkt: Ein Untersuchungsprogramm für die Gebirgslösung muß sowohl geotechnisch-felsmechanische, vor allem aber geologisch-petrographische Aspekte berücksichtigen. Der Einfluß der Phänomene des Gebirges kann ungleich größer sein als der der felsmechanischen Kennwerte des Gesteins.

Unserer Erfahrung nach werden die meisten Probleme im Zuge der Gebirgslösung durch eine Fehleinschätzung der geologischen Parameter bzw. Umstände verursacht. Zunächst müssen die geologischen Grundlagen

der Gebirgslösung untersucht und verstanden werden, bevor geotechnische Kennwerte erhoben und interpretiert werden können.

6 LITERATUR

- ARNOLD, K. (1995): Sprengvortrieb eines Verkehrstunnels bei extremen Bedingungen für den Immissionsschutz. - Nobel Hefte, 3, 100-111.
- GEHRING, K. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. - Felsbau, 13, 439-448.
- LAABMAYR, F. & EDER, M. (1994): Achbergtunnel - ein Tunnelbau in einer großen Störungszone der nördlichen Kalkalpen. - Tunnel, 2, 44-50.
- PAURAT (1995): Tunnelvortriebsmaschine mit teleskopierbarem Schneidausleger für große Querschnitte E 242. Datenblatt. Schneidleistungstabelle. - 3 S., Paurat GmbH, Nordstraße 73, D-46562 Voerde.
- PLINNINGER, R. J. (1997): Meisterntunnel Bad Wildbad/Schwarzwald: Regionalgeologische und ingenieurgeologische Erkenntnisse im Zuge der Auffahrung des Innerstädtischen Entlastungstunnels. - 130 S., Dipl.Arb. und Dipl.Kart. TU München (unveröff.).
- POSCHER, G. (1994): Tunnelvortrieb in einem Grabenbruchsystem bei hohen horizontalen Primärspannungen. - Felsbau, 12, 269-274.
- STADT BAD WILDBAD (1997): Meistern-Tunnel: Chronik-Dokumentation-Perspektiven 1994-1997, Bad Wildbad (Hrsg. Stadtverwaltung Bad Wildbad), 1997
- THURO, K. & SPAUN, G. (1996): Geologisch-felsmechanische Parameter zur Erfassung der Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. - in: Taschenbuch für den Tunnelbau 1997, 21., Dt. Ges. für Geotechnik e.V., Essen (Glückauf), 63-106.
- THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. - Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B1, I-XII, 1-145.
- THURO, K. (1997): Prediction of drillability in hard rock tunnelling by drilling and blasting. - in: GOLSER, J., HINKEL, W.J., SCHUBERT, W. (eds): World Tunnel Congress '97, Vienna, Austria. Tunnels for People. Tunnels für Menschen. Vol. 1 - 854 S., Rotterdam, Brookfield (Balkema) 103-108.