

**3. EUROPÄISCHES SYMPOSIUM FÜR TUNNELBAU
21./22. MÄRZ 1996, KURSAAL-BERN**

**Felsmechanische Aspekte bei
Spreng- und maschinellem Vortrieb**

(Seiten 24-28)

Dr Ing. Giovanni LOMBARDI

Felsmechanische Aspekte bei Spreng- und maschinellem Vortrieb



Dr. Ing. G. Lombardi

1. Einleitung

Bei der Projektierung und der Bauausführung von Untertagebauten und insbesondere von Tunnels stellt sich häufig die Frage, ob eine Tunnelbohrmaschine oder ein Sprengvortrieb gewählt werden soll. Wir wollen nun den Fall einer Vollschnittmaschine betrachten, d.h. die Teilschnittmaschine soll beiseite gelassen werden.

Die Umstände, die bei der Wahl des Vortriebssystems eine Rolle spielen, sind sehr zahlreich und selbstredend verschiedenartiger Natur. Im folgenden sollen aber nur jene Aspekte behandelt werden, welche die Felsmechanik direkt oder indirekt anbetreffen.

Viele der fraglichen Punkte sind zum Teil wohlbekannt und für den Tunnelbauer sogar banal, andere werden hingegen übersehen. Sie mögen wohl häufig zweitrangiger Bedeutung sein, können aber unter Umständen den Ausschlag geben oder müssen, in einzelnen Fällen, zumindest gebührend mitberücksichtigt werden.

Es würde sicher den Rahmen des vorliegenden Aufsatzes sprengen, würde man alle Aspekte, die überhaupt eine Rolle spielen könnten, ausführlich behandeln wollen. Aus verständlichen Gründen werden sie hier im folgenden einfach aufgelistet, wobei zu den weniger bekannten einige kurze Hinweise hinzugefügt werden.

Es steht einmal fest, dass alle jene Aspekte und Argumente, die wir erwähnen werden, je nach Felsbeschaffenheit und nach dem Typ der zur Diskussion stehenden Tunnelbohrmaschine ein grösseres oder kleineres Gewicht erlangen werden oder sogar zur Bedeutungslosigkeit verfallen können.

Ferner muss selbstverständlich hinzugefügt werden, dass die Entwicklung der Tunnelbohrmaschinen bei weitem nicht abgeschlossen ist, so dass man, sogar in der näheren Zukunft, Verschiebungen in der Bewertung der einzelnen Faktoren in Rechnung wird stellen müssen. So würden wahrscheinlich zahlreiche Argumente sehr viel an Bedeutung verlieren, sollten die Tunnelbohrmaschinen einmal so weit verbessert worden sein, dass sie in jeder beliebigen abwechslungsreichen Situation, d.h. bei verschiedenartigen oder «allen» geologischen, hydrogeologischen und felsmechanischen Bedingungen, gleich gut arbeiten können. Trotz der zahlreichen und einschneidenden Fortschritte, die in den letzten Jahrzehnten gemacht worden sind, sind wir bekanntlich noch nicht soweit. Wir halten indessen fest, dass die Kriterien, die anschliessend erwähnt werden, sich wandeln werden und dass sie jedenfalls für die verschiedenartigen bereits bestehenden Tunnelbohrmaschinen jeweils ein anderes Gewicht einnehmen.

2. Anwendungsbereiche der Vortriebsmethoden

Wenden wir uns nun den Anwendungsbereichen der verschiedenen Vortriebsmethoden zu. Wir können vorerst Grenzfälle unterscheiden.

In unseren wirtschaftlichen Verhältnissen steht heute fest, dass, wenn ein langer Tunnel mit konstantem, kreisförmigem Querschnitt im standfesten Gestein unter geologisch bekannten, günstigen und homogenen Bedingungen ausgehoben werden muss, wenn dazu kurze Bauzeiten vorgeschrieben werden und zuletzt eine Tunnelbohrmaschine geeigneten Durchmessers mit ausgebildetem Personal zur Verfügung steht, dann zweifelsohne jene Tunnelbohrmaschine zum Einsatz kommen wird. Dabei müsste unter anderem noch definiert werden, was als genügend langer Tunnel verstanden wird, und einige Umstände müssten näher präzisiert werden. Die Bedingung des kreisrunden Tunnelquerschnitts ist dabei nicht unbedingt zwingend, wie ein Beispiel in Neuenburg vor wenigen Jahren gezeigt hat.

Sind hingegen Hohlräume unregelmässiger Form und kurzer Länge unter sehr verschiedenen ungünstigen geologischen Bedingungen auszubrechen, so wird zweifelsohne zu einem Sprengvortrieb, einem sogenannten konventionellen Vortrieb, Zuflucht genommen werden müssen.

Zwischen diesen zwei idealisierten Extremfällen gibt es ja nun eine breite graue Zone – die in *Tabelle 1* dargestellt ist –, wo sich Fragen wie die folgenden stellen können: Soll bei sonst anscheinend günstigen geologischen Bedingungen eine Tunnelbohrmaschine zum Einsatz kommen, wenn das Risiko besteht, dass nicht vorhergesehene oder vorhersehbare geologisch schwierige Zonen zum Einhalt des Vortriebs führen könnten, derart, dass unter Umständen die programm- und kostenmässigen Vorteile des Einsatzes der Tunnelbohrmaschine verlorengehen?

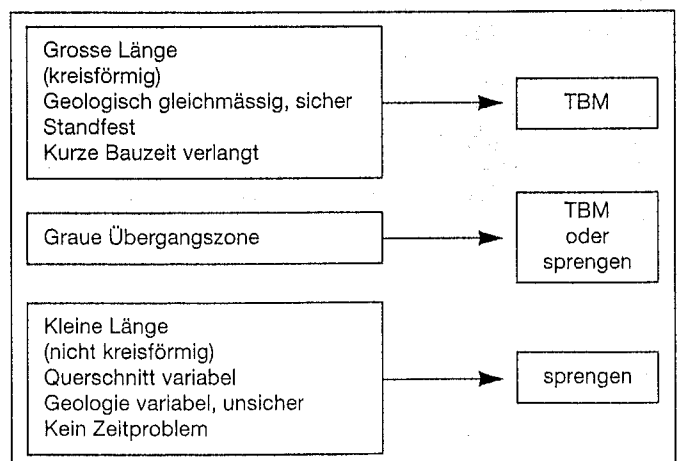


Tabelle 1:
Klare Grenzfälle und Grauzone bei der Wahl der Ausbruch-Methode

Und soll trotzdem bei einem nicht auf dem kritischen Weg liegenden kurzen Tunnelabschnitt eine Tunnelbohrmaschine eingesetzt werden, wenn hohe Installationskosten und vielleicht eine schwierige Zugänglichkeit in Kauf genommen werden müssen?

Im einen Fall stehen eher technische, im anderen eher wirtschaftliche Überlegungen an erster Stelle.

Neben den ausgezeichneten Leistungen, die bei günstigen Bedingungen in den letzten Jahren registriert werden durften – so wurden z.B. bei wasserführenden Stollen Monat für Monat Leistungen von über einem Kilometer erbracht –, müssen wir doch immer wieder feststellen, dass leider in vielen Fällen der effektive Vortrieb um einiges unter dem erhofften und häufig hinter dem von den Bauausführenden Erwarteten und Versprochenen liegt.

Es darf die Vermutung aufgestellt werden, dass neben andern zufälligen Schwierigkeiten, wie z.B. Bruch von Maschinenelementen, einigen felsmechanischen Aspekten nicht immer die ihnen zukommende Bedeutung beigemessen worden ist oder im voraus hat beigemessen werden können. Daraus ergibt sich, dass neben verschiedenen Faktoren anderer Natur auch einzelne felsmechanische Aspekte in diesem Graubereich von Bedeutung sein können.

3. Wohlbekannte Aspekte

Eine Reihe von wohlbekannten Aspekten, die für die Tunnelbauer als Selbstverständlichkeit gelten dürften und die eigentlich zur klassischen Lehre des Tunnelbohrvortriebes gehören, kann aufgeführt werden, wobei es klar ist, dass von Maschinentyp zu Maschinentyp Abweichungen eintreten können. Sie sind in *Tabelle 2* aufgelistet.

Klassische Kriterien für den Bohrvortrieb

- Bohrbarkeit
- Grippereinspannung
- Veränderlichkeit des Einbaus
- Zeitabhängige Konvergenz
- Blockiger Fels
- Abstützung der Brust
- Abstützung des Hohlraumes

Tabelle 2: Klassische Aspekte im Vergleich Bohr- und Sprengvortrieb

Die Bohrbarkeit des Felsens mittels der jeweiligen Maschine samt der Abgrenzung gegen Hart- und Weichgestein – also gegen zu «hartes» oder zu «weiches» Gestein – braucht hier nur erwähnt zu werden.

Ebenso selbstverständlich ist die Notwendigkeit, wiederum maschinenabhängig, sich durch Gripper festklemmen zu können, ansonsten zur Abstützung der Bohrmaschinen auf einen Tübbingausbau übergegangen werden muss, wobei eine teure und starre Bauart gewählt wird, die im ungünstigen Fall nur streckenweise wirklich berechtigt sein könnte.

Die Veränderlichkeit entlang der Tunnelachse des veranschlagten oder zuletzt notwendigen Felsausbaus erlangt eine grosse Bedeutung in Anbetracht der Notwendigkeit, entsprechende Versetzeinrichtungen vorzusehen und in der Tunnelbohrmaschine einzubauen, um die Möglichkeit der Anpassung an variable Situationen zu gewährleisten.

Ein zeitabhängiges – eigentliches viskoses – Verhalten der Felsmasse, das zu grösseren nachträglichen Konvergenzbewegungen führen kann – und daher die Gefahr des Verklemmens der Bohrmaschine mit sich bringt – muss berücksichtig

werden. Dabei sind die Verhältnisse anders zu beurteilen, je nachdem ob auf der ganzen Tunnellänge oder nur auf kurzen Streckenabschnitten ein solches Verhalten auftritt, das selbstverständlich eine Anpassung des endgültigen Ausbaus verlangt.

Nicht selten hat ein blockiger Fels hoher Festigkeit zu Schwierigkeiten am Bohrkopf geführt, wobei in der Regel Gegenmassnahmen haben ergriffen werden können.

Eine bedeutende Frage ist die Grösse der allenfalls nötigen Kraft zur Abstützung der Brust, um Einbrüche zu verhindern, samt derjenigen der Entwicklung dieser Kraft bei Stillstand und beim Werkzeugwechsel. Möglicherweise wird dadurch der Einsatz einer Bohrmaschine verunmöglicht.

Die Frage des nötigen Einbaus, um Niederbrüche im Bereich der Maschine zu verhindern, die einen ganzen Fragenkomplex geologischer und felsmechanischer Art einschliesst, braucht hier sicher nicht näher aufgeführt zu werden.

4. Rückwirkungen der Ausbruchmethoden

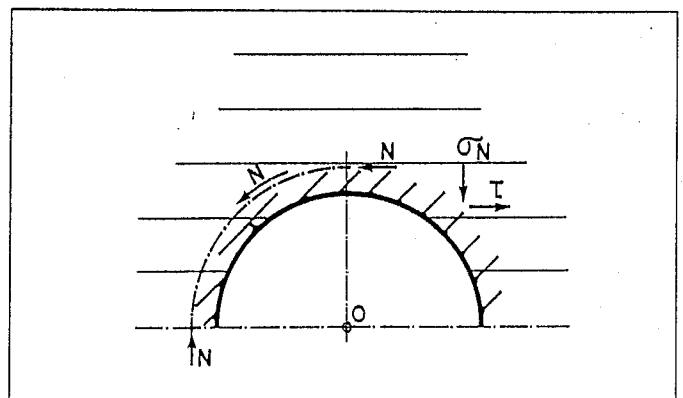
Ob ein Spreng- oder ein Bohrvortrieb gewählt wurde, mag Rückwirkungen auf das Verhalten der Felsmasse gemäss *Tabelle 3* haben, die nicht immer richtig in Betracht gezogen worden sind, die aber je nach Felsverhältnissen nicht vernachlässigbare Konsequenzen haben können.

Spezielle Aspekte

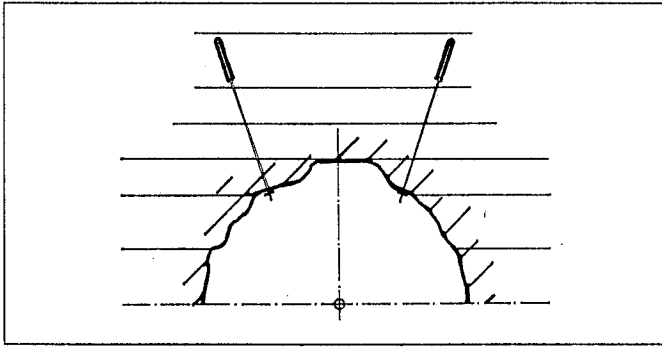
- Dynamische Beanspruchung
- Bergschlag
- Grösse der Konvergenz
- Durchlässigkeit um Hohlraum
- Profilform
- Wirkung Einbau

Tabelle 3: Spezielle Aspekte im Vergleich Bohr- und Sprengvortrieb

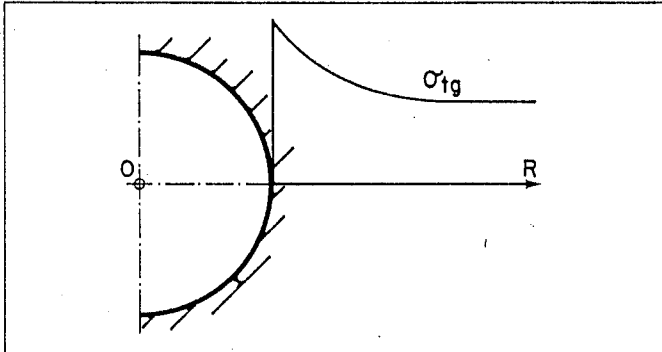
Die dynamische Beanspruchung der Felsmasse sowie die etwas unregelmässige Aushubform beim Sprengvortrieb können z.B. eine Ankerung in kurzem Abstand von der Brust, wenn nicht überhaupt, notwendig machen. Dabei kann sich etwa eine horizontale Lagerung oder Schichtung der Felsmasse im First ungünstig auswirken (*Figuren 1 und 2*). In Einzelfällen kann die Sprengerschütterung als Test der Einsturzgefährdung gewertet werden. Ob diese Annahme zutrifft, ist nicht unbedingt gesichert.



Figur 1: Der Bohrvortrieb schont eher den Felsverband. Scherspannungen entstehen dennoch.

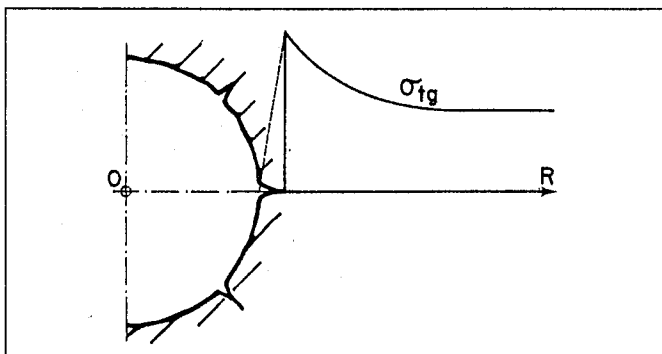


Figur 2: Der Sprengvortrieb mag die Versetzung von Felsankern nötig machen.



Figur 3: Beim Bohrvortrieb können hohe Spannungsspitzen entstehen, die allenfalls zu Bergschlägen führen.

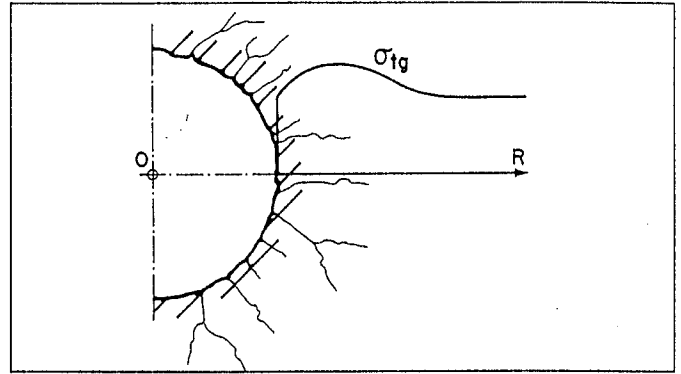
Beim Sprengvortrieb entsteht indessen unweigerlich um den Tunnel herum eine gestörte, wenn nicht gar aufgelockerte Zone, so dass hohe Ringspannungskonzentrationen eher vermieden werden als bei einem Bohrvortrieb. Bei diesem können bei einer massiven Felsmasse sehr hohe elastische Spannungsspitzen entstehen, welche die Gefahr von Bergschlag mit sich bringen können (Figur 3). Diese Tatsache hat auch zum theoretischen Vorschlag geführt, solche Spannungsspitzen durch eingefräste Längsrillen oder -Schlitze abzubauen. Es ist jedoch nicht bekannt, ob bis heute dieser Vorschlag eine praktische Anwendung gefunden hat oder noch nicht (Figur 4).



Figur 4: Vorschlag von P. Duffaut zur Verminderung oder Ausschaltung der Bergschlaggefahr im gebohrten Tunnel durch Verminderung der Ringspannungen mittels Längsschlitzungen.

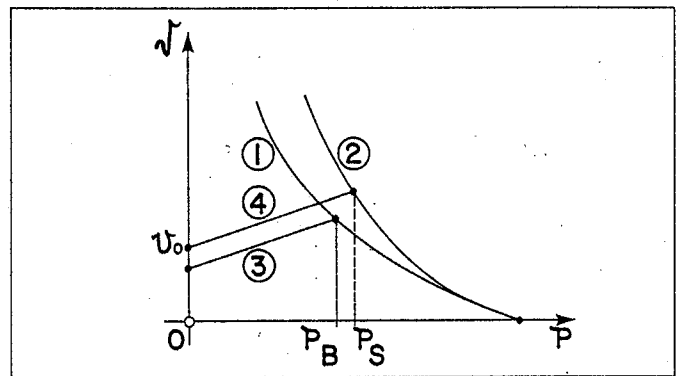
Der Sprengvortrieb führt hingegen in der Regel dazu, dass im Bereich der Sprengung und auch teilweise als Folge der dynamischen Beanspruchungen durch die Spannungsumlagerung verursachte Schubkräfte bis zu einer gewissen Distanz vom Hohlraum abgebaut werden. Im wesentlichen handelt es sich um eine Verminderung der wirksamen Kohäsion oder, anders ausgedrückt, um die Zerstörung der Haft-

reibung in einem bestimmten Bereich, wo nur noch die Gleitreibung zum Tragen kommt (Figur 5 im Vergleich zu Figur 3).



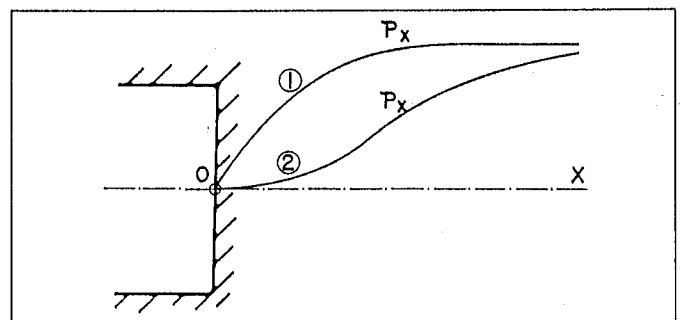
Figur 5: Sprengrisse flachen Spannungsspitzen am Rand des Hohlraumes ab, durch Verminderung oder Ausschaltung der Haftspannung, d.h. der Kohäsion.

Durch diese zweite Spannungsumlagerung ergibt sich beim Sprengvortrieb eine grössere Konvergenz, die den Gleichgewichtspunkt zwischen der Kennlinie des Gebirges und derjenigen des Ausbaus verändern kann. Es können sich je nach Art des Einbaus unterschiedlich wirksame sogenannte «Gebirgsdrücke» – in der Tat «Stabilisierungsdrücke» – ergeben (Figur 6).



Figur 6: Kennlinien bei Bohr- und Sprengvortrieb
 ① Fels beim Bohren ③ Einbau beim Bohren
 ② Fels beim Sprengen ④ Einbau beim Sprengen

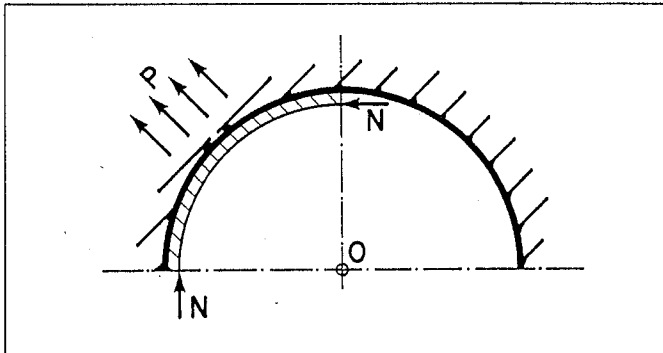
Die erwähnten Sprengrisse führen in der Regel auch auf eine grössere Durchlässigkeit des Gebirges rund um den Hohlraum. Bei Vorhandensein von Bergwasser kann sich zwar die zufließende Wassermenge um eine Kleinigkeit erhöhen, vor allem aber wird der Druckabbau gegen den Hohlraum hin deutlich abgeflacht.



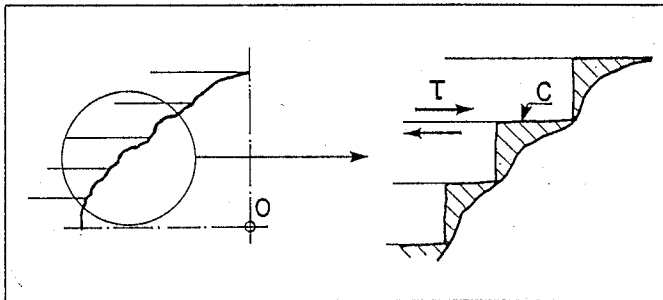
Figur 7: Abbau des hydraulischen Gefälles an der Brust durch die erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerzone.
 ① Gleichmässige Durchlässigkeit
 ② Erhöhte Durchlässigkeit in der Nähe der Brust

Strömungsdrücke – insbesondere in der Brust, aber nicht nur dort – können in der Nähe des Hohlraumes reduziert werden, was zu einer Erhöhung der Standfestigkeit der Brust führen kann (Figur 7). Wohlbemerkt kann der Abbau des Strömungsdruckes etwa auch durch Vorbohrungen erreicht werden.

Dass die genaue Form des Aushubs auf die Wirkungsweise der Einbaumassnahmen einen grossen Einfluss haben kann, liegt auf der Hand. Bei einem regelmässigen gebohrten Profil wirkt z.B. selbst eine dünne Spritzbetonlage vorwiegend als Tragbogen (Figur 8), während bei einer unregelmässig gesprengten Querschnittfläche diese Spritzbetonlage eher zur Erhöhung der Scherfestigkeit (oder der Kohäsion) im hohlraumnahen Felsbereich beiträgt (Figur 9).

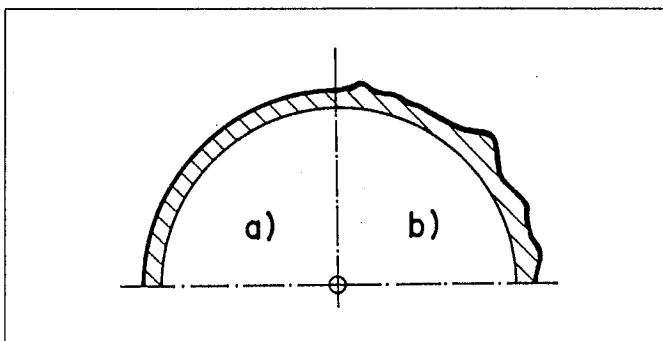


Figur 8: Wirkungsweise einer Spritzbetonschicht: Bei einem gebohrten Tunnel ergibt sich eher eine Bogenwirkung.



Figur 9: Bei einem gesprengten Tunnel bedingt eine Spritzbetonschicht eher eine Erhöhung der Kohäsion des Felsens im Randbereich.

Sinngemäss können Unterschiede auch bei andern Einbausystemen erwartet werden, gar nicht zu sprechen von der unregelmässigeren und im Mittel etwas stärkeren Dicke einer Betonauskleidung, die bei Sprengvortrieb unweigerlich entsteht (Figur 10).



Figur 10: Betonauskleidung
a) bei gebohrtem Tunnel
b) bei gesprengtem Tunnel

5. Felsmechanische Parameter

All die Probleme, die aufgeführt worden sind, können an sich durch felsmechanische Berechnungen und Untersuchungen abgeklärt oder zumindest vertieft werden.

Dabei soll aber nicht vergessen werden, dass jede Theorie und somit auch die felsmechanischen Berechnungen in Tat und Wahrheit nur ein grob vereinfachtes Modell der Wirklichkeit wiederzugeben imstande sind; dies wohlbemerkt mit einigen wenigen lobenswerten Ausnahmen. Die Wirklichkeit ist ja um einiges komplexer und vor allem viel weniger gut bekannt, als wir es gerne haben möchten.

Dazu kommt, dass Methoden nicht, oder noch nicht, existieren oder allenfalls aus wirtschaftlichen Gründen nicht zum Einsatz kommen können, welche gestatten würden, mit äusserster Genauigkeit alle zu einer felsmechanischen Untersuchung nötigen Parameter und ihre Veränderlichkeiten zu bestimmen.

Immer wieder muss man sich mit einer bestimmten Streubreite der Reibungswinkel oder der Verformungsmoduli und selbstverständlich nicht zuletzt mit der Beschaffenheit der geologischen Struktur des Gebirges zufriedengeben.

Dabei mögen solche Unschärfen in einzelnen Fällen keine Wirkung zeitigen, in andern jedoch nicht unbedeutende Folgen haben.

So bedauerlich diese Unschärfen in den felsmechanischen Untersuchungen sein können, sind die Verhältnisse eigentlich nicht wesensverschieden von denjenigen, die man bei jeder anderen menschlichen Tätigkeit und jedem praktischen Deutungsversuch immer wieder antrifft.

6. Abwägung der felsmechanischen Faktoren

Die optimale Abwägung all der erwähnten felsmechanischen Aspekte ist sicher keine einfache Angelegenheit, zumal auch ganz andere Gesichtspunkte in Betracht gezogen werden müssen, so dass keine einfache, mathematisch wohldefinierte Zielfunktion vorgegeben werden kann, die es einfach zu lösen gäbe.

Mit wenigen – an sich sehr erfreulichen – Ausnahmen können die geologischen, hydrogeologischen und demzufolge felsmechanischen Gebirgsbedingungen entlang der geplanten Tunnelachse nur innerhalb von bestimmten, manchmal ziemlich weiten Grenzen vorausgesagt werden.

Diese mindestens bis heute noch unvermeidlichen Unsicherheiten spielen anscheinend im erwähnten Graubereich eher eine grössere Rolle als bei den entsprechenden Grenzfällen. Es scheint somit, dass man bei der Abwägung subjektive Elemente nicht völlig ausschliessen kann und dass man in der Logik der Entscheidung eine bestimmte Unschärfe in Kauf nehmen muss. Solche Unschärfen summieren sich zu denjenigen hinzu, die auch bei den andern, insbesondere den wirtschaftlichen Aspekten immer noch bestehen.

Sicherlich kann man zu verschiedenen Hilfsmitteln Zuflucht nehmen, wie zu wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen oder zu andern mathematischen Methoden. Eine endgültige strenge Lösung ist aber nicht zu erwarten, und eine bestimmte Streuung in den Endergebnissen wird auch in Zukunft nicht auszuschliessen sein.

Es bleibt somit am Ende ein gewisses Restrisiko, das nicht ausgeschaltet werden kann und das in irgendeiner Form – am besten einer gerechten – unter den Beteiligten aufgeteilt werden muss.

7. Schlussfolgerungen

Aus dem Gesagten geht hervor, dass

- noch viel Arbeit zu leisten ist, um ganz zuverlässige Modelle der Wirklichkeit im Untertagebau aufzustellen, insbesondere im erwähnten Graubereich;
- andererseits, im Zusammenhang mit Tunnelbohrmaschinen, sicher weitere grosse Anstrengungen unternommen werden müssen, um zu erreichen, dass sie auf solche Unsicherheiten weniger empfindlich reagieren, als dies heute der Fall ist, d.h. damit sie in die Lage gebracht wer-

- den, erfolgreich einen weiten Bereich der anzutreffenden Verhältnisse zu decken, und zuletzt
- trotz allem – und als Folge der besprochenen Unschärfen in den Daten – eine teilweise subjektive Beurteilung der Verhältnisse weiterhin unweigerlich in Kauf genommen werden muss.

Daraus ergibt sich, dass, mindestens vorderhand, bei der Wahl zwischen Spreng- und Bohrvortrieb im definierten «Graubereich» alle Beteiligten den Mut aufbringen müssen, ein Risiko, oder mindestens ein bestimmtes Restrisiko, zu übernehmen.