

Pioramulde: Pioniertat der Tunnelbauer Mit einem Versuchsprogramm von der Theorie zur Praxis

Von Markus Weidmann*

Gerade weil die Pioramulde einem Tunnelvortrieb keinen Widerstand bietet, ist sie für den Bau des geplanten Gotthardbasistunnels die Pièce de résistance schlechthin. Durch eine technische Vorbehandlung sollen ihre felsmechanischen Eigenschaften so verbessert werden, dass eine Durchquerung möglich wird. Mit einem speziellen Versuchsprogramm soll nun abgeklärt werden, wie das Hindernis Pioramulde überwunden werden kann.

Die Durchquerung der gefürchteten Pioramulde stellt die Tunnelbauer am Gotthard vor grosse Probleme, denn die Gesteine der Pioramulde gelten als äusserst problematisch. Besonders der zuckerartige Dolomit macht den Ingenieuren zu schaffen, da er wegen seiner Lockerheit nur mit aussergewöhnlichen Tunnelbautechniken durchquert werden kann. Eine Schwierigkeit stellt insbesondere der enorme Wasserdruck von 130 bar – dies entspricht 1300 Tonnen pro Quadratmeter – dar. Gefragt ist also eine technische Pionierleistung.

Mehrfähriges Versuchsprogramm

Die Abklärungsarbeiten laufen bereits auf Hochtouren: Im Juli 1997 werden seismische Untersuchungen aus zwei 400 Meter tiefen Vertikalbohrungen erste Hinweise auf die Ausdehnung der Pioramulde auf dem geplanten Tunnelniveau geben; voraussichtlich im nächsten Herbst wird zudem eine rund 700 Meter lange Schrägbohrung in die Pioramulde abgeschlossen sein. Die Kombination der Ergebnisse aus den seismischen Untersuchungen und der Schrägbohrung soll relativ zuverlässige Informationen über die Geometrie der Pioramulde auf dem geplanten Tunnelniveau ergeben.

Ab Herbst 1997 wird dann vom bereits bestehenden Sondierstollen aus ein 300 Meter tiefer Schacht auf das vorgesehene Tunnelniveau abgeteuft und von dort aus anschliessend ein Annäherungsstollen zur Pioramulde vorgetrieben. Anfang 1999 will man für den Beginn der eigentlichen Durchquerung bereit sein. Bis es soweit ist, soll die Zeit für ein Versuchsprogramm genutzt werden. Zu diesem Zweck wird gegenwärtig ein spezieller Versuchsstollen auf dem Niveau des bestehenden Sondierstollens mit mehreren Versuchsammern gebaut. Ab Herbst 1997 wird man von diesen Kammern aus Versuche in der Pioramulde durchführen. Diese Versuche haben – ähnlich wie die Arbeiten der Nagra im Felslabor Grimsel – zum Teil wissenschaftlichen Charakter. Ziel der Versuche ist, alle für die Durchquerung möglichen Techniken im Massstab 1:1 auszuprobieren. Der Höhepunkt des Versuchsprogramms ist ein Versuchsvortrieb in die Pioramulde. Dabei soll ein Stollen von 5 Metern Durchmesser und noch unbestimmter Länge gebaut werden.

Nach Angaben des Leiters des Projekts Gotthardbasistunnel, Stefan Flury, sollten die Erkundungsarbeiten – also das Versuchsprogramm und der Versuchsstollen – bis Anfang 1999 abgeschlossen sein. Er geht davon aus, dass zu diesem Zeitpunkt die Geometrie der Pioramulde bekannt sein wird und die Projektleitung über die nötigen Grundlagen verfügt, um zu entscheiden, mit welchem Verfahren die Pioramulde durchquert werden soll. Was aber ist, wenn der Versuchsstollen Anfang 1999 noch nicht befriedigend abgeschlossen sein sollte? Für die Projektleitung ist klar,

dass man erst dann mit der eigentlichen Durchquerung beginnt, wenn man über genügend Informationen aus den Versuchsammern verfügt. Nach Angaben von Stefan Flury ist das entscheidende Kriterium für einen Start der eigentlichen Durchquerung ein erfolgreicher Versuchsstollen. Das heisst: Im Versuchsvortrieb muss zuerst ein Ausbruch im vorbehandelten Gebirge gelingen.

Ziel der eigentlichen Durchquerung sind zwei Tunnelröhren von je 9,4 Metern Durchmesser im Abstand von 100 Metern. Noch ist offen, wie man dieses Ziel erreichen will. Ein zurzeit aktuelles Szenario geht davon aus, dass man die Durchquerung in Etappen von 20 Metern Länge durchführt und dass man zwischen den beiden Tunnelröhren einen zusätzlichen Pilotstollen mit einem Durchmesser von 5 Metern erstellt. Der Pilotstollen in der Mitte dient dazu, einerseits die Verhältnisse zu erkunden und andererseits den Vortrieb der eigentlichen Tunnelröhren bei Bedarf zu unterstützen. Der mittlere Pilotstollen soll zuerst in Angriff genommen werden. Zeitlich zurückversetzt folgen die Pilotstollen der Tunnelröhren, welche dann in einer zweiten Stufe auf den effektiven Tunneldurchmesser ausgeweitet werden.

Bei jeder Etappe müssen vor dem eigentlichen Ausbruch mehrere Kilometer Bohrungen ausgeführt werden. Diese Bohrungen dienen dazu, das Gestein zu erkunden, zu entwässern und mit einem speziellen Injektionsmittel zu behandeln. Dadurch sollen die felsmechanischen Eigenschaften so verbessert werden, dass eine Durchquerung möglich sein wird. Die Projektleiter rechnen mit einer Bohrleistung von 80 Metern pro Arbeitstag und Maschinengruppe (siehe Kasten). Sie nehmen als ungünstigsten Fall an, dass die Pioramulde auf dem geplanten Tunnelniveau eine Ausdehnung von 250 Metern hat und aus reinem zuckerartigem Dolomit besteht. Sollte dies der Fall sein und geht man von den erwarteten Bohrleistungen aus, so muss mit einer Bauzeit von sechs Jahren gerechnet werden.

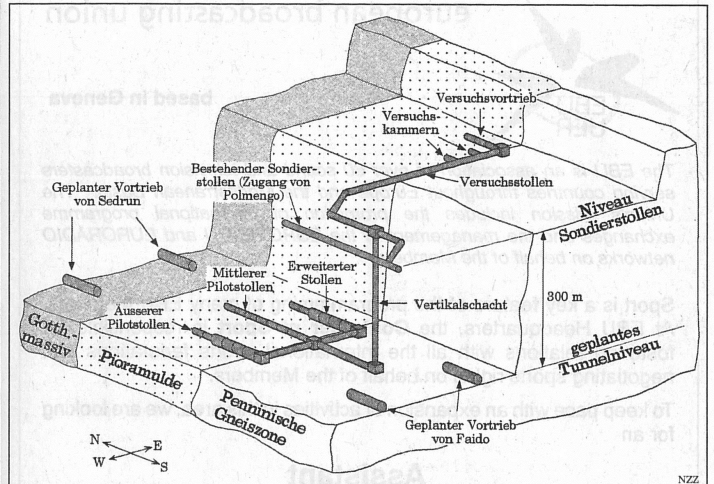
Was ist der ungünstigste Fall?

Nach Angaben von Stefan Flury soll mit der eigentlichen Durchquerung der Pioramulde Anfang 1999 begonnen werden. Falls Anfang 1999 wie ursprünglich vorgesehen auch mit dem Bau des Gotthardbasistunnels begonnen werden kann, dann würden die Tunnelbohrmaschinen (TBM) von Faïdo her die Pioramulde Ende 2003 erreichen. Nimmt man nun den ungünstigsten Fall an, bei dem die Durchquerung der Pioramulde sechs Jahre dauert, dann müssten die TBM ein Jahr warten, bis sie weiterbohren könnten. Diesen Zeitverlust müssten in diesem Fall die Mineure wettmachen, die sich der Pioramulde vom Zwischenangriff Sedrun aus mit der langsameren konventionellen Tunnelbauweise nähern. – Zum jetzigen Zeitpunkt kann die Projektleitung keine detaillierten Angaben machen, was die Durchquerung der Pioramulde genau kostet und wieviel Zeit dafür effektiv benötigt wird, denn sie muss

zylindrische Gebirgskörper genügend dicht und tragfähig ist, kann mit dem zweiten Schritt begonnen werden. Innerhalb des verfestigten Kerns wird nun über eine Strecke von 20 Metern der Pilotstollen mit einem Durchmesser von 5 Metern ausgebrochen. Der ausgebrochene Hohlraum wird laufend mit Stahlelementen ausgekleidet. Diese könnten bei Versagen des Entwässerungssystems oder bei einem Einsturz des behandelten Gebirgskörpers dem vollen Wasserdruck von 130 bar standhalten. Die fertige Auskleidung entspricht einer massiven Stahlröhre mit einer Wandstärke von 16 cm. Der heikelste Punkt des zweiten Schritts liegt beim Abschluss des Ausbruchs: unmittelbar vor dem Einbau einer massiven Stahlkonstruktion an der Pilotstollen-Front steht zwischen den Mineuren und dem unbehandelten Dolomit nur eine 10 Meter dicke Wand aus künstlich verfestigtem Gebirge. – Für eine einzelne Pilotstollen-Etappe (Verfestigung des Gebirgskörpers und Ausbruch des Stollens) rechnen die Ingenieure mit einem Zeitbedarf von 100 Tagen.

Nun kann mit der zweiten Stufe, der Ausweitung der beiden äusseren Pilotstollen auf einen Tunneldurchmesser von 9,4 Meter, begonnen werden. Wiederum muss zuerst der Gebirgskörper etappenweise vorbehandelt werden. Konkret bedeutet das, dass der Durchmesser des behandelten Gebirgskörpers von 23 auf 30 Meter erweitert wird. Da nun mehr Platz zur Verfügung steht, können in jeder Tunnelröhre gleichzeitig sechs Maschinengruppen eingesetzt werden. Für jede Ausweitungsetappe – d. h. jeweils eine Strecke von 20 Metern – wird mit einem Zeitbedarf von 110 Tagen gerechnet.

Im ungünstigsten Fall, d. h. falls die Pioramulde auf dem Tunnelniveau aus einer 250 Meter mächtigen Zone aus reinem zuckerartigem Dolomit bestehen sollte, müssen pro Pilotstollen je 14 Etappen à 20 Meter erstellt werden und für die beiden äusseren Stollen noch je 14 Erweiterungsetappen. Insgesamt sind in diesem Fall Bohrungen von 1300 Kilometern Länge nötig.



Schematischer Querschnitt durch die Pioramulde. Vom bestehenden Sondierstollen aus wird der Versuchsstollen gebaut. Gleichzeitig wird ein 300 m tiefer Vertikalschacht erstellt, der bis auf das Niveau des geplanten Basistunnels reicht. Die Darstellung ist nicht massstäblich. (Bild few.)

sich im wesentlichen auf Modelle, Interpretationen sowie auf eine Palette von verschiedenen möglichen Szenarien abstützen.

Kritiker der Projektleitung fürchten, dass die Komplexität der Pioramulde unterschätzt. Sie zweifeln daran, dass eine Maschinengruppe pro Arbeitstag durchschnittlich 80 Bohrmeter schafft, wie dies die Projektleitung annimmt. Nach Ansicht der Kritiker ist zudem ein Gemisch von festem Gestein und zuckerartigem Dolomit tunnelbautechnisch ungünstiger als der von der Ingenieurgesellschaft angenommene ungünstigste Fall von reinem zuckerartigem Dolomit. Sie vermuten, dass die Durchquerung der Pioramulde viel schwieriger und zeitaufwendiger sein wird, als es die Ingenieurgesellschaft wahrhaben will. Ob

diese kritischen Stimmen recht haben oder ob es den Verantwortlichen gelingt, die Pioramulde planmässig in den Griff zu bekommen, kann im Moment noch nicht gesagt werden.

Dies ändert sich jedoch 1998, denn mit dem Versuchsstollen tritt eine entscheidende Wende ein: der Übergang von der Theorie zur Praxis. Der Versuchsstollen wird zum ersten Mal konkrete Informationen zur Frage liefern, in welchem Zeit- und Kostenrahmen die Pioramulde effektiv durchquert werden kann. Diese Informationen sind letztlich auch nur auf diesem Wege erhältlich. Die Durchquerung der Pioramulde ist eine tunnelbautechnische Pionierleistung, welche weder durch theoretische Modelle noch durch Laborversuche vorweggenommen werden kann.

Ein Baukasten für die Nanoelektronik Synthese von Molekülen zu funktionellen Komponenten

Drähte, Leiterbahnen, Dioden und Transistoren sind die Bauteile, aus denen elektronische Schaltkreise bestehen. Im Zuge der voranschreitenden Miniaturisierung nähert sich die Grösse dieser Komponenten molekularen Dimensionen an. Damit ergibt sich die Möglichkeit, solche Bauteile direkt aus Molekülen herzustellen.

Bauteile aus Halbleitermaterialien werden immer kleiner. Bis zum Jahr 2000 will man Grössenordnungen von einem Zehntelmikrometer erreichen. Damit ist man bereits auf dem Weg von der Mikroelektronik zur Nanoelektronik (ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter). Diesem sogenannten «Top-down»-Ansatz steht jedoch eine andere Forschungsrichtung gegenüber: das «Bottom-up»-Konzept. Hierbei versuchen Wissenschaftler, aus einzelnen Molekülen mit definierten elektrischen Eigenschaften Anordnungen zu schaffen, die funktionstüchtigen Schaltkreisen entsprechen. Ein Protagonist dieser molekularen Nanoelektronik ist Klaus Müllen vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Ihm gelang es beispielsweise, molekulare Dioden und Drähte mit Abmessungen im Nanometerbereich herzustellen.

stoffketten angehängt. Diese Ketten machen das Molekül löslich; seine Lösungsmittelhülle wird ihm gleichsam angeheftet. Gibt man einen Tropfen der Lösung auf eine Oberfläche, sortieren sich die einzelnen Moleküle von selbst zu einer regelmässigen Packung wie in einem Kristall. Die langen Ketten benötigen dabei vergleichsweise viel Platz. Daher sind die runden Kohlenstoffscheibchen so weit voneinander getrennt, dass mit der feinen Spitze eines Rastertunnelmikroskops ein einzelnes Molekül gezielt angesteuert werden kann. Bei diesen Untersuchungen an einzelnen Molekülen registrierte Müllen eine asymmetrische Strom-Spannungs-Kennlinie, wie sie für Dioden charakteristisch ist.

Molekularer Datenspeicher

Den nanoelektronischen Baukasten füllen somit bereits molekulare Drähte und Dioden. Ein Transistor konnte jedoch bisher nicht realisiert werden. Deshalb ist an einen molekularen Computer noch lange nicht zu denken. Anders sieht es auf dem Gebiet der Datenspeicherung aus. Hier können die Forscher vielversprechende Ansätze vorweisen. Sie experimentieren dabei mit sogenannten Isophthalsäure-Molekülen. Diese tragen wiederum eine lange Alkylkette an einem zentralen Kohlenstoff-Sechsering und ordnen sich auf einer Oberfläche selbstorganisierend zu regelmässigen Mustern an. Zuvor wird jede Alkylkette mit einer «reaktiven Stelle» versehen, etwa einer Gruppe, die zur Polymerisation befähigt ist. Lenkt man nun gezielt Licht oder Elektronen auf einige Bereiche, reagieren die Moleküle an diesen Stellen und verändern das Muster.

Mit einer solchen Speichertechnologie können riesige Datenmengen auf kleinstem Raum abgelegt werden. Der Vorgang ist jedoch nicht umkehrbar. Ein monomolekularer Film kann nur ein einziges Mal beschrieben werden. Daher plant man als nächstes Versuche, bei denen die Moleküle als reaktive Stellen besondere Doppelbindungen erhalten. Diese können sogenannte «cis-trans»-Isomerisierungen ausführen, also unter Lichteinfluss reversibel hin und her klappen und somit Grundlage für einen vielfach beschreibbaren Datenspeicher sein.

Die Versuche sind auch unter einem anderen Aspekt von Interesse: Werden die Isophthalsäure-Moleküle durch Licht zur Polymerisation angeregt, verbinden sie sich miteinander zu einer langen Kette. Es entstehen Strukturen, die an Leiterbahnen erinnern. Ehe sie als solche funktionieren können, müssen jedoch zwei Probleme gelöst werden. Einerseits fehlt den Polymerketten die notwendige Leitfähigkeit. Diese liesse sich eventuell durch Dotieren erzeugen. Andererseits fanden bisher alle Versuche auf Graphitoberflächen statt. Leiterbahnen benötigen indes ein nichtleitendes Material als Untergrund.

Uta Bilow

Schritt für Schritt durch die Pioramulde

M. W. Das gegenwärtig aktuelle Szenario sieht vor, die Pioramulde in zwei Stufen zu durchqueren: In einer ersten Stufe werden drei Pilotstollen erstellt, wobei der mittlere Pilotstollen zeitlich den beiden äusseren vorausgeht. Noch während die Pilotstollen im Bau sind, beginnt die zweite Stufe: die beiden äusseren Pilotstollen werden erweitert.

Jeder einzelne Pilotstollen wird in Etappen von jeweils 20 Metern Länge erstellt. Die Ausführung einer Etappe wiederum geschieht in zwei Schritten: der Vorbehandlung und dem Ausbruch. Im ersten Schritt, der Vorbehandlung, werden zuerst vom Angriffspunkt aus mehrere hundert Bohrungen mit einer Gesamtlänge von 16 Kilometern pro Etappe in die Pioramulde getrieben. Diese Bohrungen dienen dazu, einen zylindrischen Gebirgskörper von 30 Metern Länge und 23 Metern Durchmesser zu behandeln. Im äusseren Bereich wird die Wasserdurchlässigkeit der Pioramulde reduziert, indem durch eine Injektion von Zement alle grösseren Hohlräume, in denen Wasser zirkuliert (Klüfte, Karst), verschlossen werden. Das Wasser, das weiterhin durch die abgedichtete Zone hindurch ins Innere des behandelten Gebirgskörpers fließt, wird gesammelt und über die Bohrungen abgeführt (Drainage). Mit diesem Vorgehen soll der extrem hohe Wasserdruck von 130 bar auf null abgebaut werden.

In den inneren Bereich des zylindrischen Gebirgskörpers – eine Zone von rund 25 Metern Länge und 12 Metern Durchmesser – wird ein spezielles Injektionsmittel gepresst. Dieses Injektionsmittel besteht aus einer Mischung aus Feinstbindemittel und Kunstharz. Damit soll ein stark verfestigter Gesteinskörper geschaffen werden. Aus Platzgründen können für die Ausführung der Injektionsbohrungen nur wenige Maschinen eingesetzt werden. Vorgesehen ist ein 24-Stunden-Betrieb an 320 Tagen pro Jahr mit jeweils drei Maschinengruppen (je eine Bohr- und Injektionsmaschine) pro Stollen.

Sobald man mit Kontrollbohrungen und Probenentnahmen sichergestellt hat, dass der behandelte