Erfahrungen bei der Durchörterung einer Großstörung im Inntaltunnel

o.Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr. mont Wulf Schubert[1]

Die Störung

Beim Bau des 12,7 km langen Innsbrucker Bahnumfahrungstunnel wurde bei Vortriebsstation ca. km 2,7 im Nordvortrieb eine mächtige Störung angefahren, die durch das Erkundungsprogramm nicht aufgeschlossen war. Ein zur Tunnelachse stark schleifender, mit zirka 30° bis 40° nach NNW einfallender, 2 bis 3 m mächtiger Mylonit bildete die nordseitige Begrenzung der Störung. Das Gebirge im Störungsbereich besteht aus serizitreichem, dünnlagigem Quarzphyllit, der tektonisch sehr stark beansprucht und bereichsweise sehr mürbe und stark verwittert ist. Die Beanspruchung zeigt sich einerseits in einer Gesteinszerlegung, die bis in den Kornbereich reicht, wodurch das Gebirge zerdrückt und sehr weich ist. Andererseits ist das sehr stark zerlegte Gebirge in sich nochmals durch Scharen von äußerst reibungsarmen mylonitischen Bahnen zerlegt. Bei etwa km 4,1 schien die Störung durch einen wiederum bis zu 2m mächtigen Mylonit, der annähernd die gleiche Orientierung wie jener bei km 2,7 hatte, abgegrenzt zu sein.

Nach heutigem Wissensstand wird angenommen, daß es sich um eine etwa 350 bis 450 m mächtige, mit 30 bis 40° nach NNW einfallende Abschiebungsbahn handelt, deren Entstehung auf den Zeitraum der Alpenbildung zurückgeführt werden kann.
Das Gebirge zwischen Vortriebsstation etwa km 4,1 und 4,5 ist zwar gestört, jedoch wesentlich kompakter als im Bereich davor. Bei etwa km 4,5 wurde erneut ein sehr schleifend zur Tunnelachse verlaufender Mylonit aus zerriebenem Serizit-Chlorit-Phyllit angefahren, dessen Mächtigkeit nicht abgeschätzt werden konnte, jedoch mindestens 20 m beträgt. Diese Störung unterscheidet sich von den vorhergehenden insofern, als zwar ähnlich wie die vorherigen schleifend in der Richtung des Unterinntales in den Tunnel streicht, dann allerdings über eine weitere Strecke praktisch achsparallel verläuft, um dann wieder annähernd in der Richtung des Oberinntales den Tunnelbereich zu verlassen. Ob und wie die beiden Störungszonen in Beziehung stehen, ist derzeit noch nicht geklärt.

[1] Der Autor war als Mitarbeiter der GEOCONSULT-Salzburg von Baubeginn bis Herbst 1992 Leiter der örtlichen Bauaufsicht am Inntaltunnel und ist seither Vorstand am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau an der TU Graz. Vorgetragen anläßlich des XLI. Geomechanikkolloquiums in Salzburg, 8. und 9. Oktober 1992.

Bild 1.: Schematischer Lageplan und Querschnitt

Verformungserscheinungen

Das Gebirge reagierte auf den Ausbruch der etwa 60 m^2 großen Kalotte mit sehr rasch erfolgender, heftiger Deformation. Die Setzung in der Firste in den ersten 24 Stunden (Bild 2) bewegte sich in der Kernzone der Störung in einer Größenordnung von 10 bis 22 cm, die Endsetzung erreichte Werte von 40 bis 100 cm. Die Konvergenzen in der Kalotte erreichten in der Regel die Größenordnung der Firstsetzungen.

Mit dem bei diesem Bauvorhaben eingesetzten berührungslosen Meßverfahren werden die Absolutverformungen jedes Meßpunktes ermittelt. Dabei zeigt sich, daß die Verformungen teilweise, bedingt durch Einflüsse des Gefüges und unterschiedliche Gebirgssteifigkeiten stark unsymmetrisch sind. Das Meßverfahren, das heute eigentlich bei Tunnelbauten Standard sein sollte, ermöglicht bei entsprechender Auswertung und Interpretation ein besseres Erkennen der mechanischen Vorgänge als die früher übliche relative Verformungsmessung mit dem Band. Dies ermöglicht einen wesentlich gezielteren Einsatz der Stützmittel, sowie eine leichtere Bestimmung des erforderlichen Vorhaltemaßes auch bei stark unsymmetrischen Verformungen.

Die Zeit - Verformungsdiagramme zeigen einen "klassischen" Verlauf mit einer weitgehenden Stabilisierung in der Kalotte und in der Regel nur mehr einen geringen Zuwachs durch den Strossenvortrieb.

Gewöhnlich klingt die Verformung spätestens nach Einbau der Sohle praktisch vollständig ab. Eine Ausnahme stellt der Bereich zwischen km 3,180 bis etwa 3,300 dar, auf den später noch eingegangen wird.

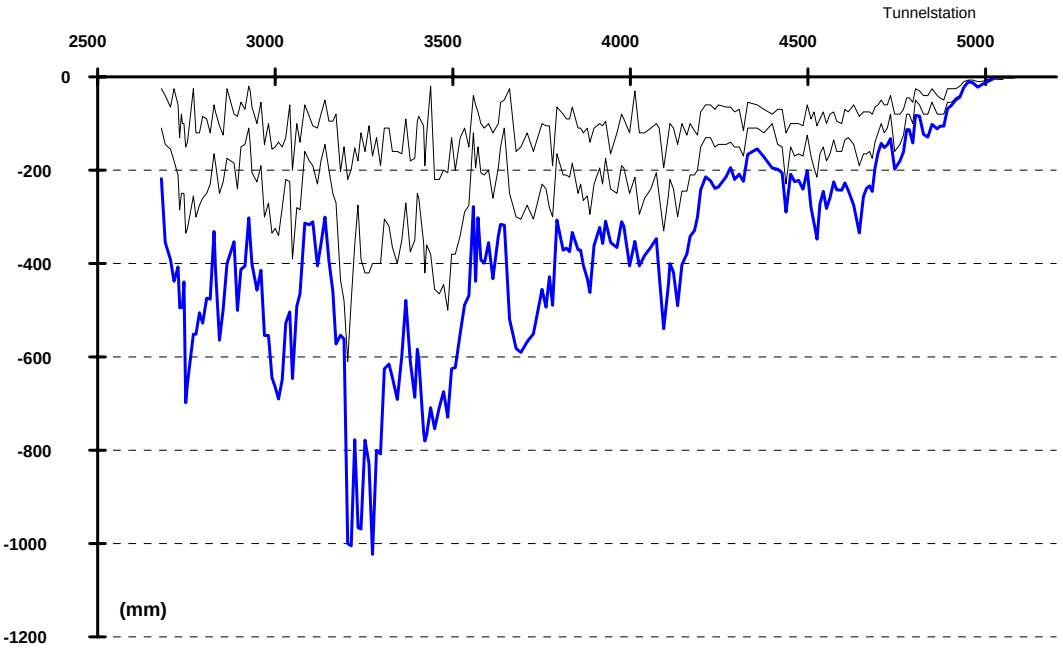

Bild 2: Firstsetzungen im Störungsbereich nach einemTag, sieben Tagen und nach Stabilisierung

Bemerkenswert sind auch die gemessenen Längsverformungen, die bereichsweise eine Größe bis zu 15 cm entgegen der Vortriebsrichtung erreichten. Über einen längeren Bereich zeigen sich Differenzen in der Längsverformung zwischen linkem und rechtem Ulm bis zu 10 cm, die vermutlich auf den Einfluß der Gefügestellung oder von Hauptstörungsbahnen zurückzuführen sind. Erste, auf der Baustelle durchgeführte systematische Analysen der gemessenen Längsverformungen lassen erkennen, daß möglicherweise aus der Variation der Relation Längsverformung/Setzung Störungen vorausgesagt werden können. Weitere Arbeiten auf diesem Gebiet sind geplant.

Vortrieb und Stützmitteleinsatz

Der Ausbruch in den schlechteren Bereichen der Störungszone erfolgte fast ausschließlich mit einem Tunnelbagger, unterstützt meist lediglich von Lockerungssprengungen. In mehreren Bereichen mußte wegen der geringen Verbandsfestigkeit des Gebirges die Kalotte in mehreren Abschnitten ausgebrochen und die Laibung sowie die Brust nach jedem Abschnitt versiegelt werden. Wegen der Wasserempfindlichkeit des Gebirges wurden die meisten Ankerlöcher trocken gebohrt.

Es ist bekannt, daß Verformungen in der hier aufgetretenen Größenordnung von einer durchgehenden Spritzbetonschale nicht mitgemacht werden können. Abplatzungen und Durchscheren der Schale sind die unvermeidliche Folge eines starren Ausbaues.

Um die notwendige Verformbarkeit des Ausbaues zu gewährleisten, wurden Deformationsschlitze, wie sie vom Tauern-, Arlberg- und Karawankentunnel bekannt sind, ausgeführt. Anfangs wurde jeweils ein Schlitz in den beiden Kämpfern belassen. Messungen zeigten, daß bei größeren Verformungen die Relativverschiebungen zwischen Gebirge und Schale mehrere Zentimeter betragen können. Diese Relativverschiebung hat wiederum zur Folge, daß die Anker auf kurzer Strecke überbeansprucht werden, und der Ankerkopf abreißt. Zur Verhinderung dieser Zwängung wurde versucht, das Ankerloch hohlraumseitig nicht ganz mit Mörtel zu füllen und dadurch eine Relativverformung von einigen Zentimetern ohne Ankerbruch zu ermöglichen. Als unbefriedigend erwiesen sich auch die konventionell durch Freilassen eines Streifens ausgeführten Verformungsschlitze, da die Schlitzbreite nur schwer sichergestellt werden kann und es zudem durch die verlaufenden Ränder zu Abplatzungen und Überschiebungen der Spritzbetonschale kommt. Dies bedingt ein ständiges "Bröseln" von Spritzbeton aus den Schlitzen und Herabfallen größerer Platten. Um die Sicherheit der Mannschaften zu gewährleisten, ist daher ein häufiges Absichern des losen Spritzbetons erforderlich.
Aufgrund dieser Erfahrungen wurden die Schlitze in der Folge mit einer einfachen Holzschalung ausgeführt. Nicht nur sank der Aufwand für Absichern praktisch gegen Null, es war auch eine rein optische Kontrolle der Verformungen durch Beobachtung der sich verringernden Schlitzbreite wesentlich erleichtert. Mit einer gewissen Übung ist eine relativ genaue Abschätzung der Verformungen möglich. Außerdem ist sichergestellt, daß bei einem Schließen der Schlitze eine Kraftübertragung zwischen den einzelnen Segmenten möglich ist.
Ab etwa km 3,250 wurde die Spritzbetonschale in der Kalotte in 5 Segmente unterteilt, da die Zwängungen in der Schale in diesem äußerst verformungsfreudigen Bereich unerträgliche Ausmaße angenommen hatten. Zusätzlich wurden beim Kalottenfuß Schalungen eingesetzt, woraus sich in der Kalotte 6 Verformungsschlitze ergeben. Die erforderliche Schlitzbreite wurde aus der erwarteten Radialverformung ermittelt. In Zonen mit großer Verformung wurden Schlitze mit einer aufsummierten Breite von rund 2 Metern ausgeführt, was eine Umfangsverkürzung von etwa 12%, oder eine durchschnittlichen Radialverformung von rund 60 cm ermöglicht. Mit dieser Maßnahme konnte die Zerstörung der Spritzbetonschale, und in Kombination mit den Optimierungen am Anker das Abreissen am Kopf größtenteils verhindert werden.

Bild 3: Typischer Kalottenausbau

Die Ankerung besteht aus 6 und 8m langen SN - Ankern, wobei verschiedene Ankertypen zum Einsatz kamen. Als beste Lösung erwiesen sich Anker mit durchgehend aufgewalztem Gewinde, da einerseits keine Schwächung des Querschnittes am Kopf vorhanden ist, und sie andererseits leicht gekürzt und die Ankerplatte wieder aufgebracht werden kann. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn nachprofiliert werden muß, oder Nischen nachträglich ausgebrochen werden.
Je nach Gebirgsverhältnissen schwankte die Ankeranzahl zwischen 17 und 29 Stück je Laufmeter in der Kalotte. Umgelegt auf Laufmeter Anker je Laufmeter Tunnel ergeben sich damit Werte zwischen 100 und 200 lfm/m. Die Wirkung der Anker beschränkte sich in weiten Bereichen auf eine Homogenisierung des Gebirges durch Verformungsbehinderung in den zahlreichen Trennflächen. Von einer wesentlichen Verbesserung des Gebirges durch die Ankerung kann meiner Ansicht nach nicht gesprochen werden.

Wegen der häufig geringen Ortsbruststabilität wurde mit großem Erfolg die Ortsbrust mit 8m langen Ankern verdübelt, wobei je nach den Verhältnissen 2 bis 4 Stück zum Einsatz kamen. Die Anker wurden bei jedem Abschlag gekürzt und, wenn notwendig mit einer Ankerplatte versehen.
Außerordentlich plastisch sich verhaltendes Gebirge wurde völlig überraschend im Bereich von etwa km 3,180 bis etwa 3,350 angetroffen. Aus Direktscherversuchen wurde ein Reibungswinkel von unter 18° (c=0,4 N/mm2) bis zu maximal 50° (c=0,15 N/mm2) an den besten Proben ermittelt.
Die durch den Ausbruch hervorgerufenen heftigen Bewegungen - Ersttagssetzungen in der Firste bis 230 mm, Setzung nach 7 Tagen bis 600 mm - schlossen sich die in diesem Bereich ausgeführten 2 Schlitze in der Kalottenschale binnen weniger Tage. Sehr rasch zeigte sich, daß die Spritzbetonschale der aufgeprägten Deformation nicht bruchlos folgen würde. Sicherheitsaspekte und ein bei sich fortsetzender Verformungstendenz zu erwartendes Unterprofil veranlaßten uns, einen Bereich von knapp 40 m noch vor dem Strossenausbruch nachzuprofilieren. Auch bei dieser Aktion zeigte sich der plastische Charakter des Materiales. Weder war eine Auflockerung, noch irgendein Bruch im Fels festzustellen. Die Arbeit wurde an zwei Angriffen gleichzeitig ausgeführt und der Einfachheit halber der gesamte Ausbau der Kalotte ausgewechselt.

In der Folge wurde das Vorhaltemaß auf bis zu 1,2m erhöht, die Spritzbetonschale wie bereits erwähnt in 5 Segmente unterteilt und die Schlitzbreite den erwarteten Deformationen angepaßt.

Die auftretenden Langzeitverformungen in diesem Bereich (bis 20 mm/Monat ein Jahr nach Ausbruch) lassen darauf schließen, daß die Ausbildung eines voll tragfähigen Gebirgstragringes innerhalb angemessener Zeit bei einem derart geringen Reibungswinkel nicht erreichbar ist. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß die Restverformungen im Zentrum der etwa 100m langen, besonders schlechten Zone (trotz annähernd gleichen Verhaltens in den ersten Wochen nach dem Ausbruch) am höchsten sind und gegen die Ränder hin in einer glockenförmigen Verteilung abnehmen. Dies deutet darauf hin, daß sich der Gebirgsdruck an den Rändern in Längsrichtung auf die kompetenteren Bereiche abträgt. Die Erstreckung einer Störungszone spielt also eine erhebliche Rolle für die Langzeitverformung.

Da die hohen Restverformungen in diesem Bereich einerseits zum Teil die Reserven im Vorhaltemaß aufgezehrt hatten, andererseits durch das Schließen der Schlitze vor Abklingen der Verformung starke Zerstörungen in der Schale hervorgerufen wurden, wird derzeit die Spritzbetonschale auf einen Bereich von etwa 60 m komplett ausgewechselt. Man hofft, daß durch den nunmehrigen steifen Ausbau die Kriechbewegungen zum Stillstand gebracht werden können.

Eine besondere Herausforderung stellten die zahlreichen in der Störungszone aufzufahrenden Nischen verschiedenen Typs dar. Der größte auszuführende Nischentyp ist die sogenannte Radabspannische. Bei einer Breite von etwa 15m ist die Nische im Ausbruch etwa 7m lang, was eine praktisch ebene Firstfläche von rund 100m^2 ergibt. Die erste dieser im Störungsbereich aufzufahrenden Nischen lag in einem Bereich mit relativ guter Gebirgsqualität. Der Ausbruch wurde in mehrere Teilquerschnitte zerlegt und die Sicherung jeweils in kleinen Abschnitten eingebaut. Obwohl die Vorgangsweise mühsam und zeitraubend war, konnte die Nische selbst ohne größere Probleme hergestellt werden. Stark in Mitleidenschaft gezogen wurde sie allerdings durch den weiteren Ausbruch der Kalotte, wobei besonders die Längsverformungen (bis 180 mm) unangenehm auffielen. Aufbauend auf diese Erfahrung wurden alle weiteren Nischen zuerst mit der Kalotte rund 20 m überfahren und erst dann ausgebrochen. Dieses Verfahren bewährte sich ausgezeichnet. Einerseits war der größte Teil der Spannungsumlagerung bereits abgeschlossen, andererseits der hohlraumnahe Bereich durch den vorhergehenden Kalottenausbau mit ausreichend Ankern verdübelt. Zusammen mit der besseren Angriffsmöglichkeit ergab sich eine sehr rationelle Arbeitsweise. Auffallend war, daß selbst bei schlechtesten Gebirgsverhältnissen das Gebirge bei der Aufweitung auf den Nischenquerschnitt kaum mehr Spannungsäußerungen zeigte, und auch die durch den Nischenausbruch hervorgerufenen zusätzlichen Verformungen äußerst gering waren. Dies deutet darauf hin, daß der Gebirgstragring sich

Bild 4: Radabspannische

weiter entfernt vom Hohlraum ausgebildet hat und selbst durch die ungünstige Form der Nischen kaum mehr beeinflußt wird.

Einfluß auf die Bauzeit

Die mittlere monatliche Vortriebsleistung im Jahr 1990 im Nordvortrieb lag bei rund 215m/Monat. Die durch die Störung erforderliche Reduktion der Abschlagslänge, die drastische Erhöhung der Stützmittel und die zahlreichen im Störungsbereich liegenden Nischen ließen den Monatsschnitt trotz hervorragender Leistung der Vortriebsmannschaften auf rund 115m/Monat sinken.

Gegenüber der, der Ausschreibung zugrundeliegenden Prognose mit dem Durchschlag im Mai 92, mit dem Betonierende im Herbst 92 und mit der Inbetriebnahme mit dem Sommerfahrplan 94, verzögert sich nun der Durchschlag und die Betonierung der Innenschale um etwa 7 Monate, während der Tunnel voraussichtlich wie vorgesehen in Betrieb genommen werden kann. Die wahrscheinlich planmäßige Inbetriebnahme ist durch einen früheren Betonierbeginn, die Errichtung eines zusätzlichen Lüftungsschachtes, und durch eine Straffung und teilweise Überlappung der Installationsarbeiten mit den Bauarbeiten zu erreichen.

Quellennachweis

1. John, M.; Köhler M., Ramspacher, W.: *Geotechnischer Bericht;* Bauvertrag Inntaltunnel, 1988
2. Pöchhacker, H.; *Moderner Tunnelvortrieb in sehr stark druckhaftem Gebirge-Theorie und Praxis,* Porr Nachrichten No 57/58, 1974
3. Hackl, E.:*Erfahrungen aus dem Vortrieb des Tauerntunnels*. Rock Mechanics 6. Berlin, Heidelberg, New York; Springer 1974
4. Schubert P, Marinko, T.: *Vortrieb des Karawankentunnels im tektonisch stark beanspruchten Südabschnitt*, Felsbau 7 Nr.2
5. Rabcewicz, L.v.: *Gebirgsdruck und Tunnelbau*, Springer 1944

Zusammenfassung

Die Bewältigung einer schleifend durchörterten, mehrere hundert Meter mächtigen Störung in äußerst verformungswilligem Gebirge beim Vortrieb des Inntaltunnels erforderte den Einsatz von unter ähnlichen Verhältnissen bewährten Techniken. Teils wurden diese Techniken weiterentwickelt. Der Einsatz zeitgemäßer Meßmethoden erlaubte eine leichtere Interpretation der felsmechanischen Vorgänge, sowie eine Verbesserung in der Deformationsprognose verglichen mit herkömmlichen Methoden. Wichtige Erfahrungen wurden auch beim Auffahren von geometrisch ungünstigen Querschnitten gemacht.

Summary

Tunneling through an extensive fault zone in heavily squeezing rock in the Inntaltunnel required methods, which already were successfully used under similar conditions. Partially those methods have been improved. Advanced deformation measurement methods allowed an easier interpretation of rockmechanical processes, as well as an improved deformation prognosis, compared to conventional measuring methods. Interesting experience was made, when excavating profiles with unfavourable geometries in the fault zone.

Resume

Pour surmonter un remaniement abrasivement percé d'une puissance de plusieurs mètres dans terrain trés susceptible de se déformer comme celui qu'on a rencontré au cours de l'avancement du tunnel dans la vallée de l'Inn (Inntaltunnel), il faut utiliser des techniques employées dans des conditions comparables. En partie, ces techniques ont été améliorées. Comparé à des méthodes traditionelles, l'emploie de méthodes modernes a rendu l'interpretation de la méchanique des rochers plus facile et amélioré le prognostic de la déformation.
En plus, on a fait d'importantes expériences avec le creusement de sections transversales d'une géometrie défavorable.