

Problemorientierte Auswertung geotechnischer Messungen

Neue Hilfsmittel und Anwendungsbeispiele

Von Dipl.-Ing. Albert F. Steindorfer, o. Univ.-Professor Dipl.-Ing. Dr. mont. Wulf Schubert und Dipl.-Ing. Klaus Rabensteiner

Im Tunnelbau kommt den Auswertungen und Interpretationen der routinemäßig durchgeführten geotechnischen Messungen eine große Bedeutung zu. Unter anderem werden die Messungen als Grundlage zur Festlegung der Bauweise, der Stützmittel und des erforderlichen Übermaßes herangezogen. Zur Gewährleistung der Sicherheit müssen während des Vortriebes kritische Verformungsvorgänge und ungünstige Beanspruchungszustände im Gebirge frühzeitig erkannt werden, um rechtzeitig geeignete Maßnahmen ergreifen zu können. Die große Menge an ermittelten Daten sowie deren Darstellung auf vielen verschiedenen Diagrammen birgt die Gefahr einer mangelnden Übersichtlichkeit.

Zur optimalen Nutzung des vorhandenen Datenmaterials ist eine Weiterentwicklung der Auswertungsverfahren und Darstellungsarten erforderlich.

Problemorientierte Auswertungen der Messungen und die Einführung von Kontrollmechanismen erlauben eine gezielte Selektion von kritischen Verformungserscheinungen. Eine Teilautomatisierung von bestimmten Kontrollmechanismen ist im Hinblick auf die zu bewältigende Datenflut und den erforderlichen Interpretationsaufwand vor Ort zwingend notwendig.

Geodätische Verschiebungsmessung

Durch die geodätische Verschiebungsmessung können im unterirdischen Hohlraumbau die räumlichen Verschiebungen beliebiger Meßpunkte entlang der Tunnellaubung in absoluten Koordinaten (das heißt auf ein dem Bauwerk übergeordnetes Bezugssystem, zum Beispiel Landeskoordinaten) ermittelt werden. Dadurch wird die Aussagekraft der Meßdaten im Vergleich zu den relativen Meßmethoden (Konvergenzmessung, Nivellement) wesentlich erhöht.

Kritik an den gegenwärtigen Darstellungsformen

Derzeit werden die Meßergebnisse in zweidimensionalen Diagrammen dargestellt. Zu diesem Zweck ist eine Zerlegung des räumlichen Verschiebungsvektors in drei zueinander normalstehende Komponenten (Setzung, Quer- und Längsverschiebung) notwendig. Die absoluten Werte dieser Komponenten werden in Abhängigkeit der Zeit für Einzelpunkte (Zeitverschiebungskurven) bzw. als Einflußlinien (Verlauf der Verschiebungen mehrerer Meßpunkte entlang einer Meßlinie zu einem bestimmten Zeitpunkt) dargestellt. In die Einflußliniendiagramme können auch Trendlinien eingetragen werden (1, 3).

Die beiden erstgenannten Verfasser sind Mitarbeiter des Instituts für Felsmechanik und Tunnelbau der TU Graz, der dritte ist Geschäftsführer der Geodata GmbH, Leoben.

Es gibt noch eine Reihe anderer Darstellungsformen (Verschiebungsvektor im Tunnelquerschnitt; Verschiebungsdifferenzen zwischen den Meßpunkten), auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

Die derzeitigen Darstellungsformen ermöglichen nur eine beschränkte Nutzung des Potentials der erhobenen Daten.

▷ Die zweidimensionale Darstellung beschränkt den räumlichen Überblick.

▷ Es gibt keine direkte räumliche Vergleichsmöglichkeit zwischen den Verschiebungen aller Meßpunkte eines ausgewählten Bereiches.

▷ Es werden nur absolute Größen dargestellt. Durch die teilweise durchgeführte Differenzbildung zwischen den Verschiebungen einzelner Meßpunkte wird der Einfluß der absoluten Größe nicht eliminiert.

▷ Die Darstellung von Verschiebungsgeschwindigkeiten ist nicht üblich.

Erweiterung der Methoden sowie neue Hilfsmittel zur Meßdatenauswertung

Darstellung relativer Größen

Die räumliche Orientierung des Verschiebungsvektors bzw. die Veränderung der Orientierung gibt einen Hinweis auf die Verformungs- und Spannungssituation im Gebirge. Durch die Betrachtung der Veränderung der Raumlage können charakteristische Trends in den Verschiebun-

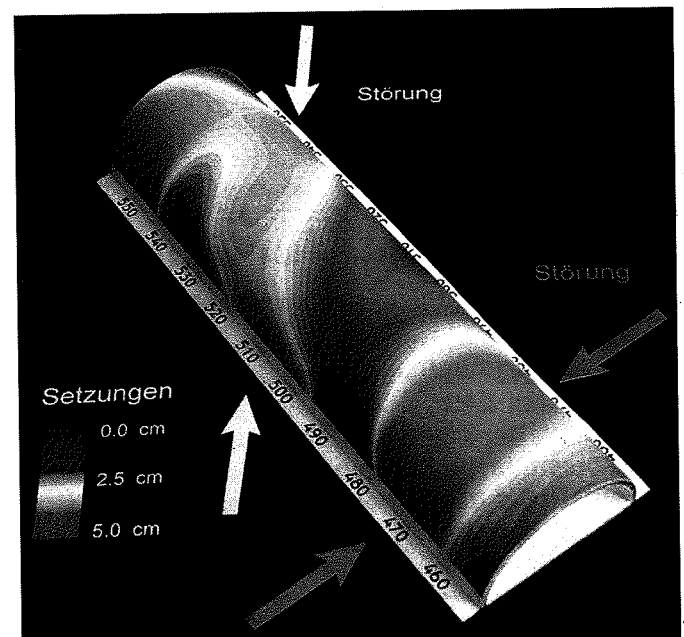


Bild 1 Isolflächendarstellung der gemessenen Setzungen auf der Tunnellaubung (Galgenbergtunnel Vortrieb Jassing Ost).

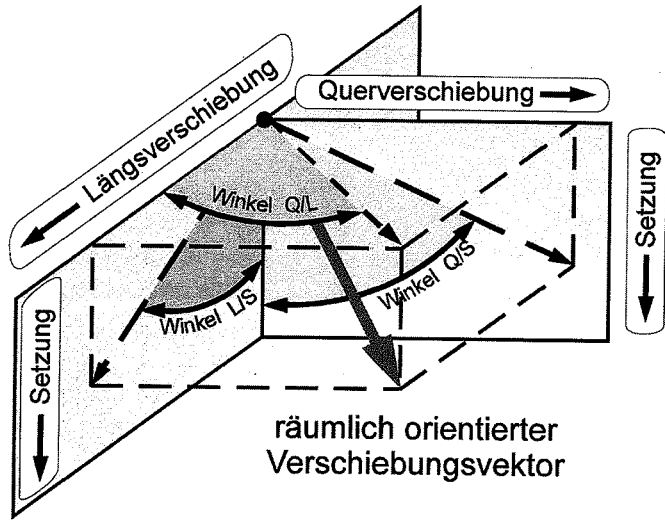


Bild 2 Vektorzerlegung und Winkeldefinition.

gen herausgefiltert werden, die wiederum einen Rückschluß auf Beanspruchungszustände im Gebirge zulassen. Die absolute Größe des Verschiebungsvektors kann bei dieser Art der Betrachtung vernachlässigt werden.

Zur Darstellung der Verschiebungsvektoren bieten sich folgende Möglichkeiten an:

Trendlinien der Vektororientierung

Wie es derzeit bei den absoluten Verschiebungsgrößen üblich ist, können auch Orientierungen der Verschiebungsvektoren in einer Ebene entlang einer Meßlinie (zum Beispiel Firste oder Ulme) in Form von Trendlinien dargestellt werden.

Durch diese Darstellungsform (Vernachlässigung der absoluten Verschiebungsgröße) sind lokale und großräumige Abweichungen der Verschiebungen von einem „Normalverhalten“ wesentlich leichter zu erkennen.

Das Bild 2 zeigt die Aufteilung des räumlich orientierten Vektors in drei Teilvektoren (Projektion des Raumvektors auf drei zueinander normalstehende Ebenen durch den Meßpunkt) sowie die entsprechende Definition der Verdrehungswinkel.

Untersuchungen am Inntal- und Galgenbergtunnel und numerische Berechnungen (5, 6) haben gezeigt, daß Steifigkeitsunterschiede im Gebirge sowie die großräumige Primärspannungssituation aus der Raumstellung der Verschiebungsvektoren zu erkennen sind (Bild 3). Die Prognose des Gebirgsverhaltens wird dadurch wesentlich erleichtert.

Während „normalerweise“ die Verschiebungsvektoren gegen die Vortriebsrichtung orientiert sind, kündigt eine Umkehr (Verschiebungsvektoren zeigen Richtung Ortsbrust) in der Regel einen vorausliegenden steiferen Gebirgsbereich an. Nähert sich hingegen der Vortrieb einer Störungszone, äußert sich dies nach der bisherigen Erfahrung in einem überproportionalen Anstieg der Längsverschiebung (2, 4) entgegen der Vortriebsrichtung (Bild 4).

Großräumige Anomalien in der Orientierung der Verschiebungsvektoren lassen Rückschlüsse auf die Primärspannungssituation zu. Als Beispiel wird hier ein Teilbereich der Hinterbergstörung (Station 1200 bis 1330) beim Galgenbergtunnel herangezogen. Betrachtet man die Entwicklung der Orientierung des Verschiebungsvektors der

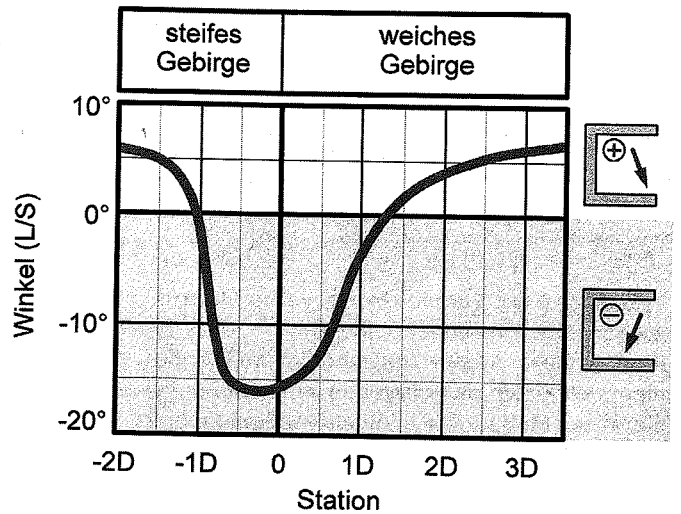


Bild 3 Ergebnis einer numerischen Berechnung (Trend des Winkels aus Längsverschiebung und Setzung).

Firste in der horizontalen Ebene (Quer- und Längsverschiebung), so läßt sich mit fortschreitendem Vortrieb eine zunehmende Rotation des Verschiebungsvektors nach links sowie in Richtung Ortsbrust erkennen (Bild 4). Es ist anzunehmen, daß die Orientierungen der Primärspannungen in diesem Bereich wesentlich von der Vertikalen bzw. Horizontalen abweichen, wodurch sich dieses ungewöhnliche Verschiebungsbild der Tunnelaibung ergibt.

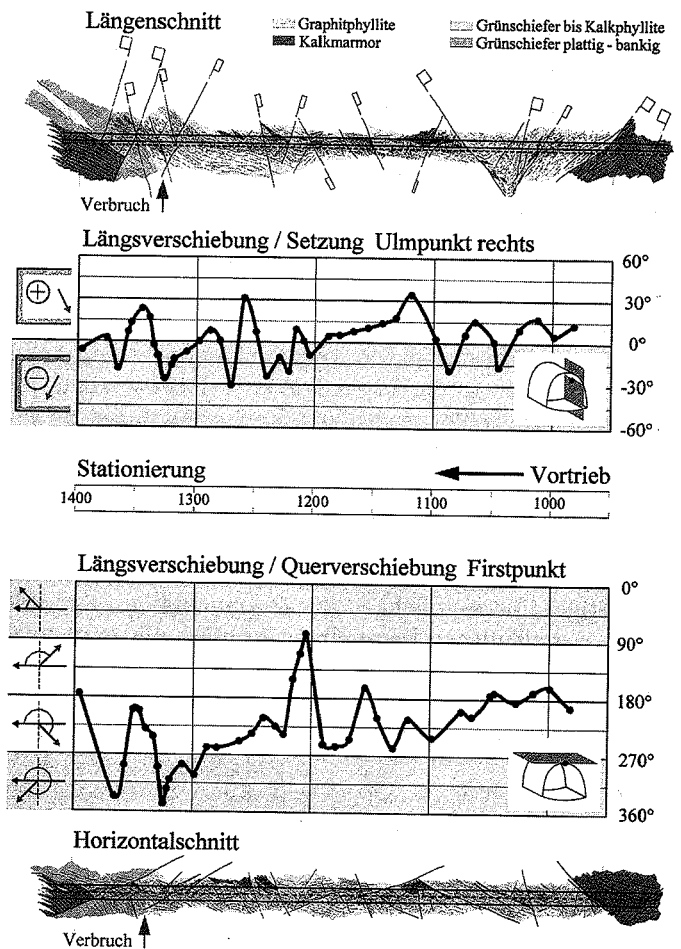


Bild 4 Geologie und Trendlinien der Vektororientierungen (Galgenbergtunnel – Hinterbergstörung).

Die Erkenntnisse aus der Meßdatenauswertung des Innaltunnels, speziell aber des Galgenbergtunnels zeigen, daß Trendlinien der Vektororientierungen ein wichtiges Hilfsmittel zur Interpretation von Messungen darstellen. Im Hinblick auf die Erhöhung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit sollten diese relativ einfach zu realisierenden Darstellungen in Hinkunft fixer Bestandteil der Auswertung vor Ort sein.

Trendlinien der Verschiebungsverhältnisse zwischen mehreren Meßpunkten

Eine weitere Auswertungsmöglichkeit ergibt sich durch einen Vergleich zwischen den Verschiebungsvektoren der einzelnen Meßpunkte in einem Meßquerschnitt. Zu diesem Zweck wird eine Quotientenbildung zwischen den Setzungen, den Querverschiebungen oder den Längsverschiebungen der Meßpunkte vorgenommen. Dabei erfolgt die Darstellung wiederum in Form von Trendlinien, damit die Entwicklung vortriebsorientiert beobachtet werden kann.

Verhältnis zwischen Ulm- und Firstsetzung

Durch diese Darstellung kann die Annäherung des Vortriebes an schleifend die Tunnelachse querende Störungen frühzeitig erkannt werden. Das Bild 5 zeigt ein Beispiel aus dem Galgenbergtunnel vom Vortrieb Jassing Ost (Stationsbereich 500). Die Trendlinie des Quotienten aus Ulmsetzung links zur Firstsetzung weist zwischen Station 490 und Station 500 einen starken Anstieg auf und kündigt eine Störung im linken Ulmbereich an, die bei Station 515 in den Querschnitt eintritt.

Der Quotient aus zwei Komponenten ist im Gegensatz zur entsprechenden Differenzbildung nicht von der absoluten Größe der Verschiebungen abhängig und somit besser geeignet, Abweichungen vom „Normalzustand“ auch in stark wechselhaftem Gebirge zu erkennen.

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit, die ebenfalls eine Annäherung des Vortriebs an eine die Achse schleifend querende Störung frühzeitig erkennen läßt, ist im Bild 9 zu finden.

Lagekugelprojektion

Die Raumorientierung von Verschiebungsvektoren kann am einfachsten in der Lagekugel dargestellt werden. Im Lagekugeldiagramm sind die Orientierungen und Bewegungen der Verschiebungsvektoren leicht nachvollziehbar.

Eine Kennzeichnung der Veränderung der Raumlage des Vektors in Form von Bewegungspfaden und eine Markierung des aktuellen Durchstoßpunktes des Vektors erhöht die Übersichtlichkeit der Dokumentation. Ein weiterer Vorteil dieser Darstellungsform ist die gute Vergleichsmöglichkeit mit den geologischen Aufzeichnungen (Schieferungsflächen, Klüfte oder Störungen). Somit sind gefügebedingte Verformungsphänomene leichter erkennbar (Bild 6).

Eine Teilautomatisierung von Kontrollmechanismen läßt sich ebenfalls mit Hilfe der Lagekugelprojektion bewerkstelligen. Die Definition eines Bereiches, der als „Normalzustand“ bezeichnet werden kann, ermöglicht eine automatische und routinemäßige Kontrolle der Verschiebungssituation in den Meßpunkten.

Zu diesem Zweck muß eine erwartete mittlere Orientierung des Verschiebungsvektors und eine Toleranzgrenze

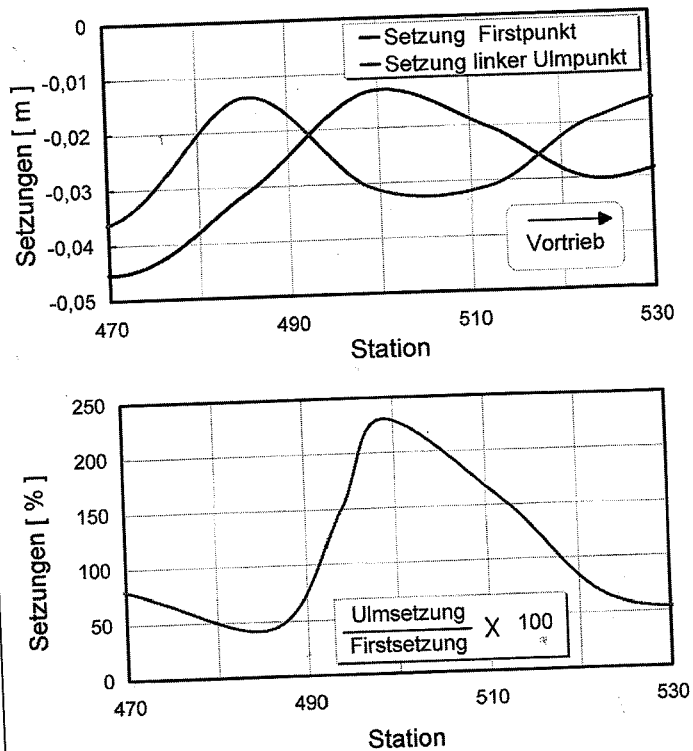


Bild 5 Vergleich der absoluten Setzungen mit der Verhältnistrendlinie (linker Ulm und Firste).

festgelegt werden. Diese Parameter basieren auf den für die einzelnen „geotechnischen Gebirgsbereiche“ erarbeiteten Erwartungsmodellen und auf Erfahrungswerten. Eine Anpassung an örtliches, aufgrund der Gebirgsstruktur entgegen der Erwartung abweichendes Verformungsverhalten, ist während des Vortriebs möglich. Aus Gründen der Verantwortlichkeit und der Sicherheit sollten der-

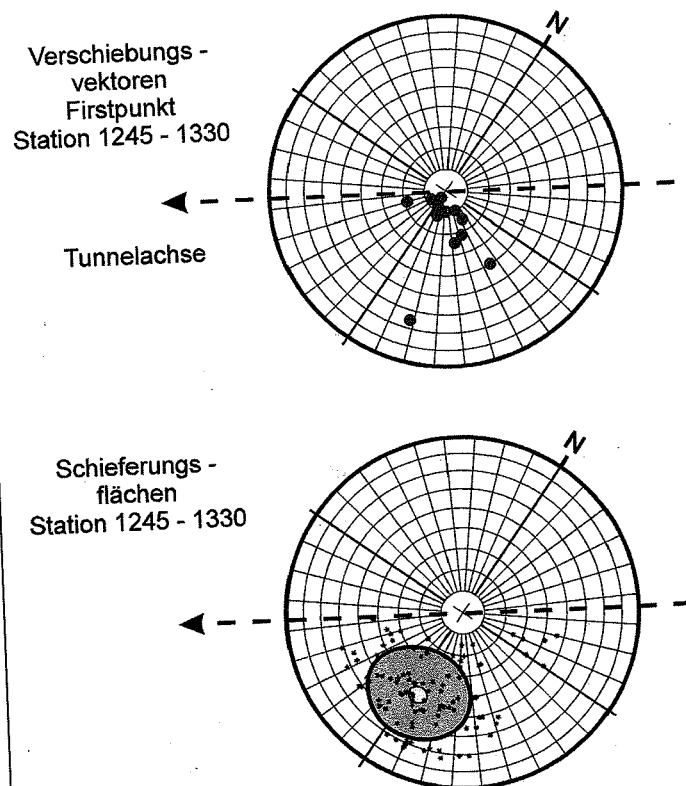


Bild 6 Gegenüberstellung der Verschiebungsvektoren und Schieferungsflächen (Galgenbergtunnel Hinterbergstörung).

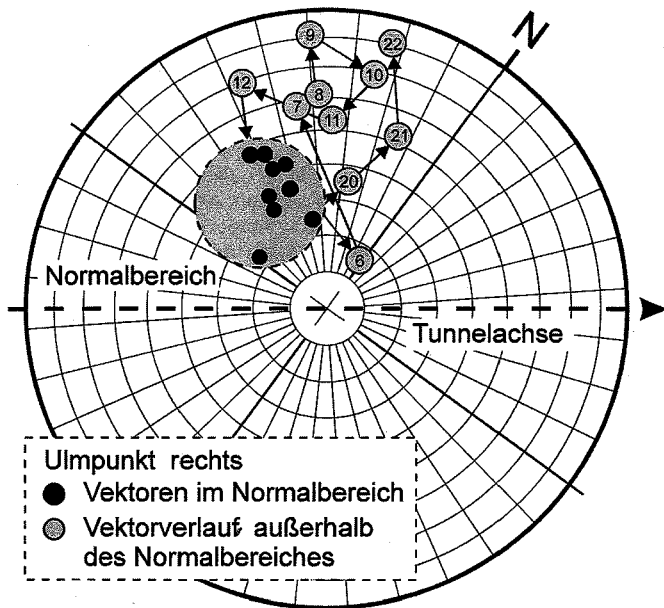


Bild 7 Verlauf der räumlichen Vektororientierung des rechten Ulmpunktes (Trend 5 m hinter OB) von Station 1566 bis 1752, Galgenbergtunnel Jassing Ost.

artige Anpassungen jedoch nur von kompetenten Geotechnikern vorgenommen werden.

Mit der Darstellung der Raumorientierung der Verschiebungsvektoren und „Normalbereiche“ in der Lagekugel können Abweichungen visuell leicht erkennbar gemacht werden. Zukünftig ist eine Automatisierung des Überprüfungsvorganges denkbar (Bild 7).

Dreidimensionale Darstellungsformen

Die derzeit übliche zweidimensionale Form der Darstellung bringt, wie schon erwähnt, den Nachteil der geringen räumlichen Übersicht mit sich. Eine einfache Möglichkeit zur dreidimensionalen Darstellung erhält man durch die Abwicklung der Tunnellaubung in die Ebene (Bild 8). Ausgehend von dieser Bezugsebene können die Werte der Verschiebungen aller Meßpunkte gleichzeitig und übersichtlich dargestellt werden.

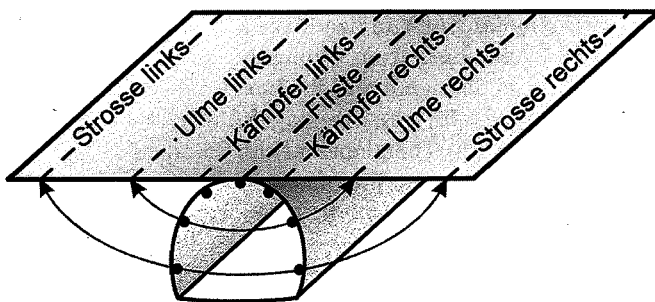


Bild 8 Tunnellaubungsabwicklung.

Zur Demonstration dieser Darstellungsform wird der in Bild 1 und 5 verwendete Bereich des Vortriebes Jassing Ost (ca. Station 500) herangezogen. Im Bild 9 ist der Trend der absoluten Setzungen 5 m hinter der Ortsbrust dargestellt. Von Station 460 bis 480 zeigen sich relativ hohe Vertikalverschiebungen am gesamten Querschnitt. Der Anstieg der Setzungen in diesem Bereich ist auf eine stumpf-

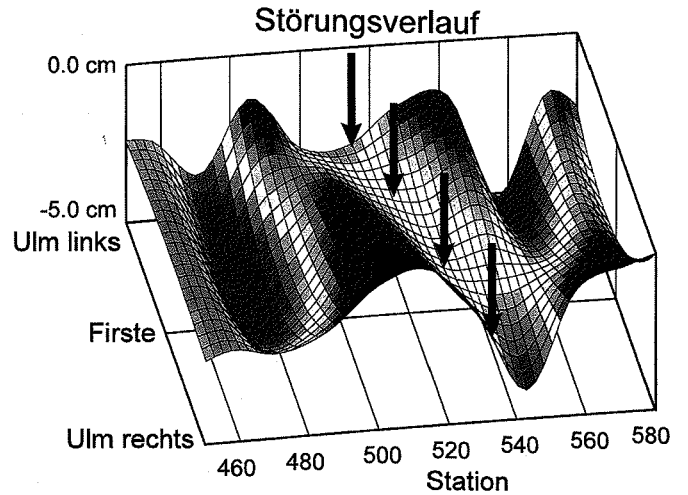


Bild 9 Gemessene Setzungen (Trend 5 m hinter OB).

winkelig die Tunnelachse querende Zerrüttungszone zurückzuführen.

Etwa ab Station 490 ist am linken Ulm eine deutliche Zunahme der Setzungen zu verzeichnen, die durch eine spitzwinkelig querende, bei Station 515 aus dem Hangenden in den Tunnelquerschnitt eintretende Störung verursacht wird. Das Queren der Störung und der Wiederaustritt aus dem Profil bei Station 535 sind in dieser Darstellung ebenfalls gut erkennbar.

Isoflächen und Isolinien

Zur Meßdatendarstellung können auch Isoflächen (bzw. Isolinien) verwendet werden. Diese Darstellungsform wird für die Ergebnisdarstellung von numerischen Berechnungen schon seit längerer Zeit verwendet. Dabei zeichnen sich charakteristische Verschiebungstrends durch Bereiche anderer Farben ab.

Eine Darstellung der Verschiebungen als Isoflächen auf der Hohlraumkontur liefert ein gut überschaubares räumliches Modell über die Verformungsvorgänge im Gebirge (Bild 1). Eine gute Vergleichsmöglichkeit mit den geologischen Strukturen ist in diesem Fall ebenfalls gegeben. Die Darstellung von Verschiebungsgeschwindigkeiten sowie Vektororientierungen ist in derselben Form möglich.

Implementierung der neuen Auswertungsmethoden in ein Programmpaket

Zur Auswertung und Darstellung der Meßdaten wird derzeit an der TU Graz das Programmsystem DEDALOS eingesetzt. Für einen Teil der hier gezeigten Darstellungsformen müssen die Daten im Moment noch in externen Programmen weiterverarbeitet werden. An einer direkten Verarbeitung der Daten im oben genannten Programmpaket wird derzeit mit Nachdruck gearbeitet. Mit ersten Baustelleneinsätzen kann im Frühjahr 1996 gerechnet werden.

Zusammenfassung

Ein sicherer und wirtschaftlicher Tunnelvortrieb erfordert rasche und kompetente Entscheidungen der vor Ort Tätigen. Die Einführung der absoluten Verschiebungsmessungen eröffnete neue Möglichkeiten, das Verhalten des komplexen Systems Gebirge-Ausbau besser zu erfassen. Nicht zuletzt im Hinblick auf die große Verantwortung der Bauleiter ist eine Verbesserung der Auswertungsverfahren unerlässlich.

Durch die Anwendung von problemorientierten Auswertungskriterien und Darstellungsformen wird ein Hilfswerkzeug geschaffen, das die optimale Verwertung der vorhandenen Meßdaten bei gleichzeitiger Vereinfachung und Erleichterung der Interpretationsarbeit ermöglicht.

Eine Vernetzung der erhobenen geologischen Daten und der geotechnischen Messungen mittels EDV wird in Zukunft dazu beitragen, den Entscheidungsablauf transparenter und rascher zu bewerkstelligen. Durch eine übersichtliche Gegenüberstellung der geologischen Verhältnisse mit den ausgewerteten Meßdaten wird das Erkennen von kritischen Verformungsvorgängen und ungünstigen Beanspruchungszuständen im Gebirge wesentlich erleichtert. Im Hinblick auf die große Menge an ermittelten Daten wird durch eine Automatisierung von bestimmten Kontrollmechanismen ein Teil des Interpretationsaufwandes von der EDV vorweggenommen.

Wesentliche Voraussetzungen für eine Verbesserung der Meßdatenauswertung sind eine repräsentative Meß-

punktichte und ein zuverlässiger Schutz der Meßpunkte gegen Beschädigung, um einen Datenverlust zu verhindern.

Quellennachweis

1. Vavrovsky, G. M.; Ayaydin, N.: Bedeutung der vortriebsorientierten Auswertung geotechnischer Messungen im oberflächennahen Tunnelbau; Forschung + Praxis, Band 22, Düsseldorf, Alba Fachverlag 1988.
2. Schubert, W.; Schubert, P.: Tunnels in squeezing rock: Failure Phenomena and Counteractions. Proc. Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul 1993, Balkema, Rotterdam.
3. Vavrovsky, G. M.; Schubert, P.: Advanced Analysis of Monitored Displacements Opens a New Field to Continuously Understand and Control the Geotechnical Behaviour of Tunnels, ISRM 8th Congress, Tokyo, 1995.
4. Schubert, W.; Riedmüller, G.: Geotechnische Nachlese eines Verbruches – Erkenntnisse und Impulse. Tagungsband zum 10. CVK, Graz, 1995.
5. Budil, A.: Die Längsverformung beim Tunnelvortrieb. Dissertation am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. TU Graz, dzt. in Fertigstellung.
6. Schubert, W.; Budil, A.: The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnexcavation, ISRM 8th Congress, Tokyo, 1995.

Three Gorges Dam Reservoir, Yangtze River, China

Preliminary notes on the stability of natural and artificial slopes

By Professor Charles Fairhurst

Construction of the Three Gorges Dam, with a world-record generating capacity of almost 18,000 MW, on the Yangtze River, near Yichang, China, is scheduled for completion about 2010-15. When the reservoir reaches the full height of 175 m at the dam, it will extend 566 km upstream to Chongqing on the Yangtze, and affect 173 tributaries for a total length of more than 5000 km of shoreline. The reservoir area will be over 1000 sq. km. To date, 320 landslides and unstable slopes, each with a volume in excess of 10 million cubic meters, have been identified.

Fig. 1 shows a general view of the region affected by the Yangtze River impoundment as a result of the Three Gorges Dam, extending from Sandouping to Chongqing. The main regions of known landslides and slope instability are indicated.

Those within 73 km upstream of the dam are being given primary attention due to their potential adverse impact on dam safety. This group of landslides and unstable slopes includes the Xintan Jiangjiapuo site - left bank (looking upstream), and the Lianziya creeping slide unsta-

ble slope (right bank)-both 25 km upstream of the dam; Fanjiaping (right bank) 47 km; Daping (left bank) 61 km; Huanglashi (left bank) 64 km; and Huangtupuo (right bank) 73 km upstream of the dam.

Much of the Three Gorges region of the Yangtze River consists of Mesozoic sediments, limestones, sandstones, shales, coal measures.

The 2500 m long concrete gravity dam is to be located at Sandouping across Zhongbaodau Island. It is founded on granite, part of a batholith intruded into the sediments.

The Changjiang or Yangtze River is a major transportation artery extending from Chongqing to Wuhan and the flood plains, to Shanghai and the East China Sea. The dam will be provided with two, five-stage shiplocks, allowing for the full 175 m lift. The slopes of the shiplocks, cut 2 km through the jointed granite, are steep - reaching a maximum height of 170 m above the top of the locks. Stability of the shiplocks is a major concern, especially since interruption of transportation for repair or maintenance could have major economic consequences.

This paper briefly describes the types of landslides and slope instabilities observed along the Yangtze, and some preliminary comment on ship lock stability.

Major landslides and slope instabilities within 73 km of the dam

Xintan-Jiangjiapuo Landslide

Fig. 2 shows (a) plan and (b) cross-sectional views of the Xintan-Jiangjiapuo landslide. The outcrop and sliding mass

The author is member of University of Minnesota, Minneapolis. Much of the information on which this paper is based has been generously provided by Chinese colleagues currently associated with the Three Gorges Project. The author wishes to thank, especially, Professor Ha, former Chief Engineer for the Three Gorges Project; Professor Dong Xuecheng Yangtze River Scientific Research Institute, and Professor Cui Zheng Quan, Chief of the Geotechnical Division, Changjiang Water Resources Commission. Study of the ship-lock stability using 3DEC was conducted by Dr. Chengho Lee, Itasca Consulting Group, Minneapolis. Too all the author express his sincere gratitude.