

7,5 Stunden für einen kompletten Abschlag von 6,9 m Länge. Da die Geräte alle vollautomatisch arbeiten, beschränkt sich das Personal auf 2–3 Personen je Schicht für die Aufsicht und Wartung. Gemessen an den Bohrmetern bzw. Tonnen hält das Gerät viermal so lange und die Investitionskosten sinken wie auch die Arbeitskosten auf die Hälfte von heute. Dagegen werden die Kosten für Energie, Wasser und Beton stark steigen, was aber trotzdem eine Gesamtkostenreduzierung gegenüber 2000 von ca. 30 % bewirken sollte.

Ein Blick sollte noch auf die Produktivität eines 70 m² Tunnels im Jahre 2020 getan werden. Wir haben nun die drei Zeitpunkte 1970, 2000 und 2020 betrachtet. Die technischen Verbesserungen wurden heraus gearbeitet und ergeben ein Potenzial für enorme Verbesserungen der Vortriebsgeschwindigkeit, man muss aber vom Potenzial sprechen, da vom Menschen nicht alle Möglichkeiten der technischen Optimierung ausgenutzt werden. Die größten Verbesserungsmöglichkeiten liegen aber sicher im Bereich *Ablauten und Sprengen*.

Verschiebungsprognose für den Tunnelbau

P. J. Sellner

Der Tunnelvortrieb in verformungsfreudigem Gebirge ist mit einer Reihe von Problemen verbunden. Eines davon ist die Vorhersage der Verschiebungen, die durch den Vortrieb entstehen. Bei druckhaften Verhältnissen kann eine ungenaue Einschätzung der Verschiebungen Nachprofilierungsarbeiten oder zusätzliche Hinterfüllungen mit Beton erfordern. Beides führt zu erheblichen Mehrkosten. Mittels analytischer Funktionen, künstlicher Intelligenz und gespeichertem Expertenwissen wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, die Verschiebungen zufolge des Auffahrens eines unterirdischen Hohlraumbauwerkes vorherzusagen. Die benötigten Funktionsparameter werden vor Ort erhoben. Diese Methode erlaubt die Berücksichtigung von unterschiedlichen Stützmittelsystemen, Vortriebsmethoden und unzeitigem Vortrieb. Durch Rückrechnung von ausgeführten Projekten und Verknüpfung der errechneten Funktionsparameter mit den entsprechenden geologischen und geotechnischen Gegebenheiten wird ein stetig erweiterbares Expertensystem erstellt, das für eine neue gegebene Situation die entsprechenden Funktionsparameter und somit die zu erwartenden Verschiebungen bestimmt.

Prediction of Displacements in Tunnelling. Tunnelling in poor ground is associated with a variety of problems. One of those is to accurately estimate the required amount of overexcavation. In squeezing ground an underestimation of the expected displacements may require costly reshaping. On the other hand, excessive overexcavation requires additional concrete for filling if there is an innerlining. The development of a reliable displacement prediction method will lead to more economical tunnelling. On the basis of analytical functions, artificial intelligence and the use of stored experience, a method is developed to predict displacements. The required input parameters are acquired at the tunnel face. The procedure considers several options, including the installation of support, sequential excavation, and non-steady tunnel advance. The analytical model is able to incorporate the time-dependent behaviour of rock mass and support as well as the face advance effect. Back calculations of case histories in combination with corresponding geological and geotechnical data provide the information for a knowledge base. For a new situation, the function parameters and ultimately the displacement behaviour can be calculated.

Einführung

Das Auffahren eines unterirdischen Hohlraumbauwerkes ist mit Verschiebungen und Deformationen der Hohlraumlaibung und des dahinter anstehenden Materials verbunden. Dies erfordert besonders bei Vortrieben in verformungsfreudigem Gebirge oder bei oberflächennahen, setzungsempfindlichen Tunnels eine besondere Berücksichtigung.

Die zu erwartenden Verschiebungen bestimmen im Wesentlichen das erforderliche Übermaß, das Stützmittelkonzept und den Vortrieb. Eine falsche Einschätzung der Verschiebungen – besonders der radialen Komponente – führt zwangsläufig zu Nachprofilierungen und

Überbeanspruchungen des Ausbaues im Falle einer Unterschätzung der Verschiebungen bzw. zu Hinterfüllungen im Falle einer Überschätzung. Beides sind kostenintensive Maßnahmen.

Stand der Technik

Zur Zeit werden in der Planungsphase Verschiebungen und somit auch die Ausbaubeanspruchung mit einfachen analytischen Methoden grob abgeschätzt (z. B. Feder¹, Hoek²). Unterstützt von numerischen Simulationen einzelner „Rechenquerschnitte“ werden Stützmittelklassen für typische Situationen festgelegt. Analytischen Methoden beruhen auf teils stark vereinfachten Annahmen der Realität wodurch die Genauigkeit der Ergebnisse leidet. Im Gegensatz dazu können mit numerischen Methoden nahezu alle möglichen Bauzustände dreidimensional und zeitabhängig erfasst und berechnet werden. Durch hochentwickelte Stoffgesetze werden die

Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Johann Sellner, Gruppe Geotechnik Graz, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz/Österreich.

Nach einem Vortrag, gehalten am 17. Mai 2000 beim Österreichischen Bergbautag 2000 in Leoben.

Berechnungsergebnisse immer wirklichkeitsnäher. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten im geologischen Modell sind der Informationsgehalt und die Genauigkeit der Eingangsparameter für die einzelnen Berechnungen in dieser Projektphase meist gering. Daher wird in der Regel das endgültige Design vor Ort festgelegt.

In der Bauphase ist der Gehalt an Informationen vergleichsweise hoch. Wesentliche Gebirgseigenschaften wie Festigkeit, Beanspruchung, Zerlegungsgrad, Gesteins- und Trennflächenparameter können vor Ort erhoben werden. Die Auswertungen von Verschiebungsmessungen (Schubert und Vavrovsky³, Rabensteiner⁴, Steindorfer⁵) liefern zusätzliche Informationen über die zu erwartenden Gebirgs- und Spannungsverhältnisse im Nahbereich vor der Ortsbrust. Eine tägliche Anwendung von numerischen Methoden zur Berechnung des zu erwartenden Verschiebungsverhaltens scheidet zur Zeit an einem nicht vertretbaren Aufwand von Zeit und Kosten. Die Festlegung des Stützmittelbedarfs und des erforderlichen Überprofils erfolgt daher meist aufgrund von Planungsvorgaben und Erfahrung. Zusätzliche Hilfestellungen für den Tunnelingenieur sind rar.

Mehrere Beobachtungssysteme wurden entwickelt um die Sicherheit und Stabilität des Bauwerkes zu beurteilen (z. B. Grasso⁶, Sakurai⁷). Im Wesentlichen beruhen diese Methoden auf der täglichen Beobachtung bestimmter Größen. Werden Grenzwerte überschritten, so

sind bestimmte Maßnahmen zu setzen. Sowohl die Grenzwerte als auch die entsprechenden Maßnahmen werden während der Planungsphase festgelegt. Ein Adaptieren kann zwar während dem Baufortschritt erfolgen, jedoch ist dies meist mit zeitintensiven Berechnungen und neuen Kalibrierungen verbunden. Dadurch kann die Flexibilität dieser Methoden leiden. Ein weiterer Nachteil dieser Methoden liegt in der Beobachtung des Betrages eines bestimmten Wertes und nicht in seiner zeitlichen Entwicklung. Dies kann zu Fehleinschätzungen führen.

Offensichtlich fehlen schnelle und effiziente Berechnungsmethoden die den Tunnelingenieur in seinen Entscheidungen unterstützen. Es sollen sowohl maximale Verschiebungen als auch die Verschiebungsgeschichte und somit das Verschiebungsverhalten genauer abgeschätzt bzw. berechnet werden können.

Neues Verfahren

Das neue, hier vorgestellte Verfahren basiert auf dem Prinzip der Kurvenanpassung. Analytische Funktionen, welche die radialen Verschiebungen der Hohlraumlaibung als Funktion der Zeit und des Fortschrittes des Ausbruches beschreiben, werden an gemessenen Verschiebungswerten angepasst. Die verwendeten analytischen Funktionen wurden von Sulem et al.⁸ auf-

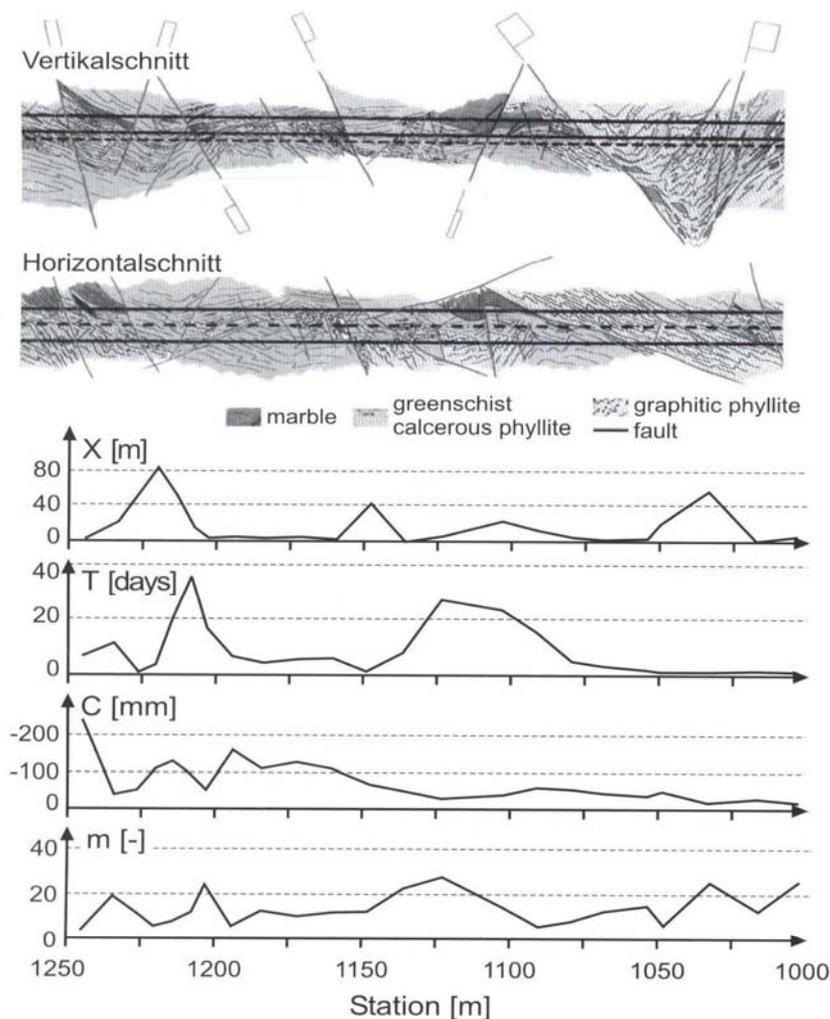


Abb. 1. Geologische Situation und rückgerechnete Kurvenparameter für einen Abschnitt eines Tunnels in den Alpen

gestellt und von Barlow⁹ und Sellner¹⁰ modifiziert und erweitert.

Die rückgerechneten Funktionsparameter können als charakteristisch für den betrachteten Rechenquerschnitt angesehen werden. Sie beschreiben das Verschiebungsverhalten des betrachteten Querschnittes. Es gibt zwei zeitabhängige und zwei vortriebsabhängige Kurvenparameter sowie zwei Parameter welche die Auswirkung von verschiedensten Stützmitteln beschreiben. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt eines rückgerechneten Tunnelprojektes. Dargestellt sind die geologischen Gegebenheiten und die aus den Verschiebungsmessungen ermittelten Funktionsparameter.

Im nächsten Schritt werden die errechneten Parameter mit bestimmten geologischen und geotechnischen Parametern verglichen. Diese Aufgabe wird von künstlichen neuronalen Netzwerken übernommen. Diese Netzwerke können Zusammenhänge zwischen der geologisch / geotechnischen Situation im betrachteten Querschnitt und den rückgerechneten Funktionsparametern erkennen und speichern. Werden genügend Fallbeispiele betrachtet und dem neuronalen Netzwerk zur Verfügung gestellt, so kann dieses ein Experten Wissen erstellen. Dieses beinhaltet den funktionalen Zusammenhang zwischen den Kurvenparametern und den angetroffenen Gegebenheiten. Abbildung 2 zeigt schematisch den Datenfluss und die Erstellung des Expertensystems. Für eine neue Situation kann nun dieses Expertensystem die Kurvenparameter als Funktion bestimmter geologischer und geotechnischer Daten berechnen. Für die vor Ort angetroffenen Gegebenheiten und einen geplanten Baufortschritt kann nun das Verschiebungsverhalten eines jeden Punktes ermittelt werden. Dieses Verfahren wird auch „Pure Prediction Method“ (PPM) genannt.

Liegen nicht genug Fallbeispiele vor um das Expertensystem zu trainieren, so kann das Gebirgsverhalten – repräsentiert durch die Kurvenparameter – von ähnlichen Vortriebsbereichen des Tunnelprojektes übernommen werden. Es hat sich gezeigt, dass in den meisten Fällen die zeitabhängigen Parameter übernommen, und die vortriebsabhängigen Parameter durch Kurvenanpassung an einige wenige Messwerte ermittelt werden können. Dies ermöglicht eine sehr genaue Verschiebungsprognose bereits wenige Tage nach dem Ausbruch eines betrachteten Querschnittes. Sollte das bereits festgelegte Übermaß sich als zu gering erweisen, so können geeignete Maßnahmen wie zum Beispiel Einbau eines temporären Kalottensohlgewölbes oder Nachankerung rechtzeitig durchgeführt werden, um die Verschiebungen zu reduzieren. Dieses Verfahren wird „Extrapolating Prediction Method“ (EPM) genannt.

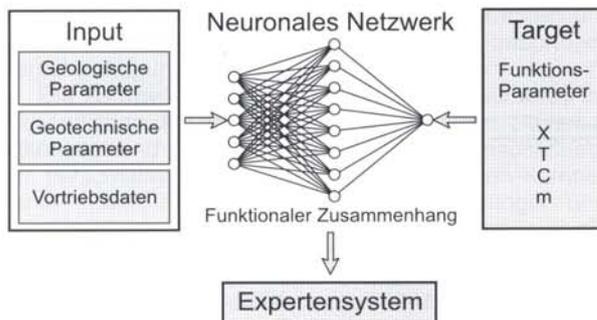


Abb. 2. Ermittlung des Experten Wissens aus der Gegenüberstellung von Eingabewerten (Input) und Zielwerten (Target)

Programmpaket GeoFit

Im Zuge eines Forschungsschwerpunktes am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität Graz¹⁰ wurde ein Programm entwickelt, welches beide obengenannten Berechnungsmethoden ermöglicht. Das Programm berechnet mittels Kurvenanpassung aus gemessenen Verschiebungsdaten die entsprechenden Kurvenparameter. Es erlaubt die Berücksichtigung von unmittelbar nach dem Ausbruch eingebrachten Stützmitteln, nachträglich eingebrachten Stützmitteln und sequentiellen Vortrieb. Schnittstellen zu gängigen Messdatenverwaltungsprogrammen sowie geotechnischen-geologischen Datenbanken sind vorgesehen. Die Steuerung des Programmes und Auswertung erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche.

Fallbeispiel Schnellstraße S6 – Tunnel Spital

Der Tunnel Spital durchörtert eine mächtige Störungzone, welche durch verschieden große Schollen von Karbonatgesteinen und Quarziten die in einer Matrix aus kataklastisch zerscherten Phylliten eingebettet sind, charakterisiert ist. Die Überlagerung des Lehnentunnels beträgt ca. 50 m bis 100 m. Die EPM wurde am Tunnel Spital erfolgreich getestet. Sie wurde für bestimmte Bereiche herangezogen, um Ausbruch, Ausbau und erforderliches Übermaß abzugleichen.

Am 1. Feber 2000 stand der Vortrieb der Kalotte auf Station 954,3 m. Das anstehende Gebirge bestand im wesentlichen aus härteren Dolomit- und Marmorblöcken in teils stark gestörten Phylliten. Die Überlagerung betrug ca. 90 m. Die letzten Bereiche wurde zumeist im Sprengvortrieb aufgefahren, ein Kalottensohlgewölbe wurde nicht eingebaut. Die vortriebsorientierte Auswertung der Verschiebungsmessungen zeigte, dass der Trend der Firstsetzung zunahm und die Vektororientierung (Verhältnis Längskomponente/Setzungskomponente) tendierte gegen die Vortriebsrichtung was mit einer Verschlechterung der vorausliegenden Gebirgsverhältnisse gedeutet werden konnte. Die Ersttagssetzung der Firste betrug 25 mm und lag damit weit über dem Betrag der letzten Messquerschnitte. Das Übermaß war mit 200 mm festgelegt und es bestand die Gefahr dieses allein durch den Kalottenvortrieb zu überschreiten.

Die EPM errechnete eine endgültige Firstsetzung zufolge Kalottenvortrieb von mehr als 250 mm (siehe Abb. 3). Die dazu notwendigen zeitabhängigen Kurvenparameter wurden vom letzten beobachteten Messquerschnitt übernommen. Die vortriebsabhängigen Parameter wurden durch Anpassung der Verschiebungsfunktion an die zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Messwerte (Nullmessung und Ersttagsmessung) ermittelt.

Der Vortrieb wurde für einen Tag eingestellt, um entsprechende Gegenmaßnahmen zu setzen. Nun wurde die EPM herangezogen, um den Einfluss eines temporären Kalottensohlgewölbes zu untersuchen. Die Stützmittelparame-ter für die Verschiebungsfunktion wurden aus Fallbeispielen rückgerechnet. Die endgültige Firstsetzung zufolge Kalottenvortrieb konnte laut EPM mit diesem zusätzlichen Stützmittel auf ca. 70 mm reduziert werden (siehe Abb. 4). Am 4. Feber 2000 wurde der Kalottenvortrieb mit nacheilendem Kalottensohlgewölbe wieder aufgenommen. Die gemessenen Verschiebungen deckten sich sehr genau mit den prognostizierten (siehe Abb. 5).

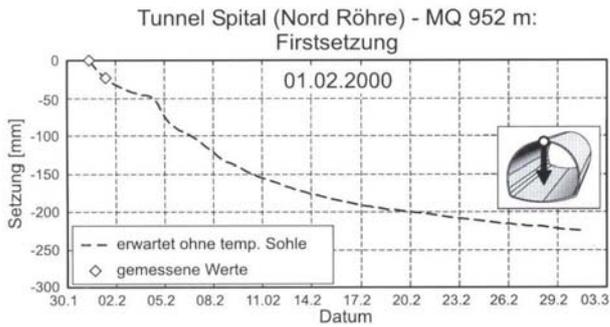


Abb. 3. Verschiebungsprognose einen Tag nach dem Abschlag: ohne temporärem Kalottensohlgewölbe

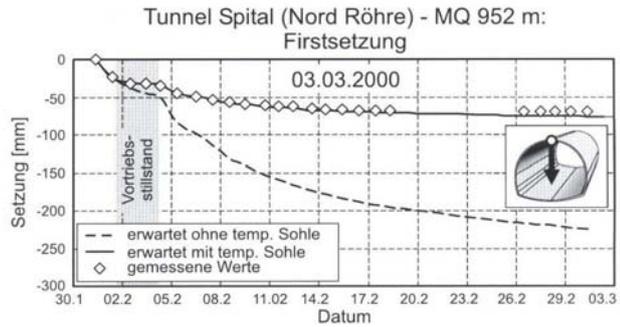


Abb. 5. Vergleich der gemessenen und prognostizierten Verschiebungen

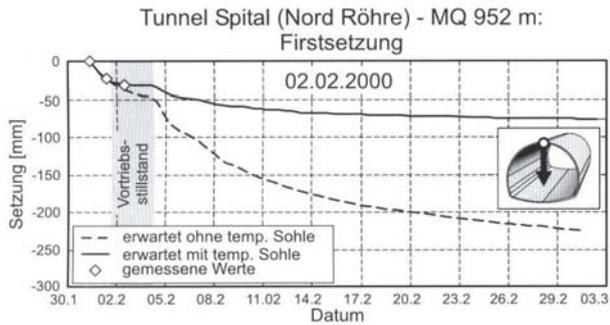


Abb. 4. Verschiebungsprognose zwei Tage nach dem Abschlag: mit und ohne temporärem Kalottensohlgewölbe

Fallbeispiel Wolfsgrubentunnel

Der Wolfsgrubentunnel durchörtert die Silvretta-Gruppe bestehend aus Lockergesteinen, Glimmerschiefer und phyllitische Gesteinen mit teils geringmächtigen Amphiboliten. Die Überlagerung des Eisenbahntunnels in Lehnenlage beträgt im Schnitt ca. 40 m. Im Zuge dieses Projektes wurde die PPM getestet.

Im Bereich der ersten 500 m des Ostportals wurden die Kurvenparameter aus den Verschiebungsmessungen

rückgerechnet und mit den geologischen und geotechnischen Gegebenheiten verglichen. Als Auswahlkriterium für die Eingangsparameter (Input) wurde der Korrelationskoeffizient zwischen den einzelnen Kurvenparametern und verschiedenen geologischen und geotechnischen Parametern herangezogen. Es hat sich gezeigt, dass zwischen den Parametern wie Überlagerungshöhe, Auslastungsgrad, Bewertung der Klufforientierung, Geological Strength Index (GSI) und Bruchzontentiefe auf der einen Seite und den Kurvenparametern auf der anderen Seite teils stark ausgeprägte funktionelle Zusammenhänge durch das neuronale Netzwerk gefunden und ermittelt werden konnten. Das durch diesen Trainingsprozess erstellte Expertenwissen wurde im nächsten Schritt für die Verschiebungsprognose von einzelnen Querschnitten herangezogen. Das trainierte neuronale Netz wurde mit den vor Ort angetroffenen geologischen und geotechnischen Parametern beschickt und die sich daraus ergebenden Kurvenparameter ermittelt. In Abb. 6 sind die rückgerechneten Kurvenparameter und die durch das neuronale Netz ermittelten Kurvenparameter gegenübergestellt.

Es ist ersichtlich, dass der funktionale Zusammenhang zwischen den vor Ort angetroffenen Gegebenheiten und den entsprechenden Kurvenparametern im Wesentlichen erfasst werden konnte. In Abb. 7 ist die prognostizierte und tatsächlich gemessene Firstsetzung

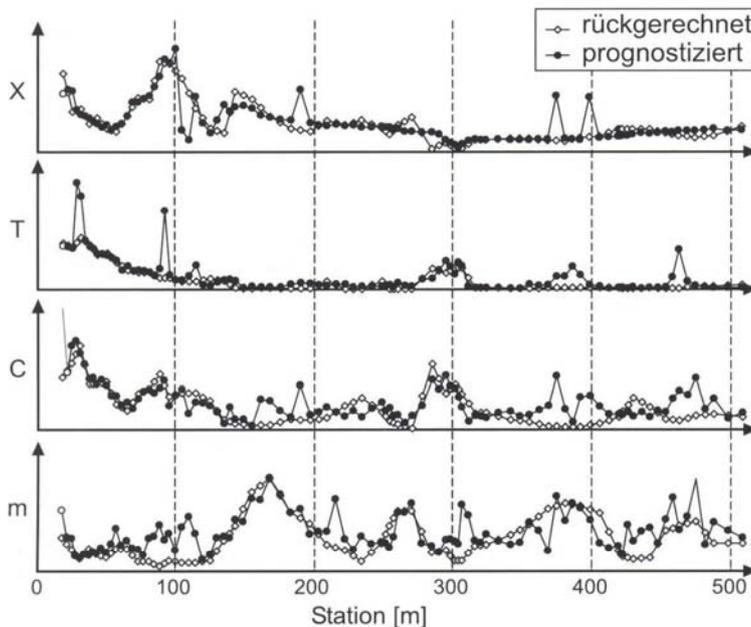


Abb. 6. Rückgerechnete und durch das neuronale Netzwerk prognostizierte Kurvenparameter

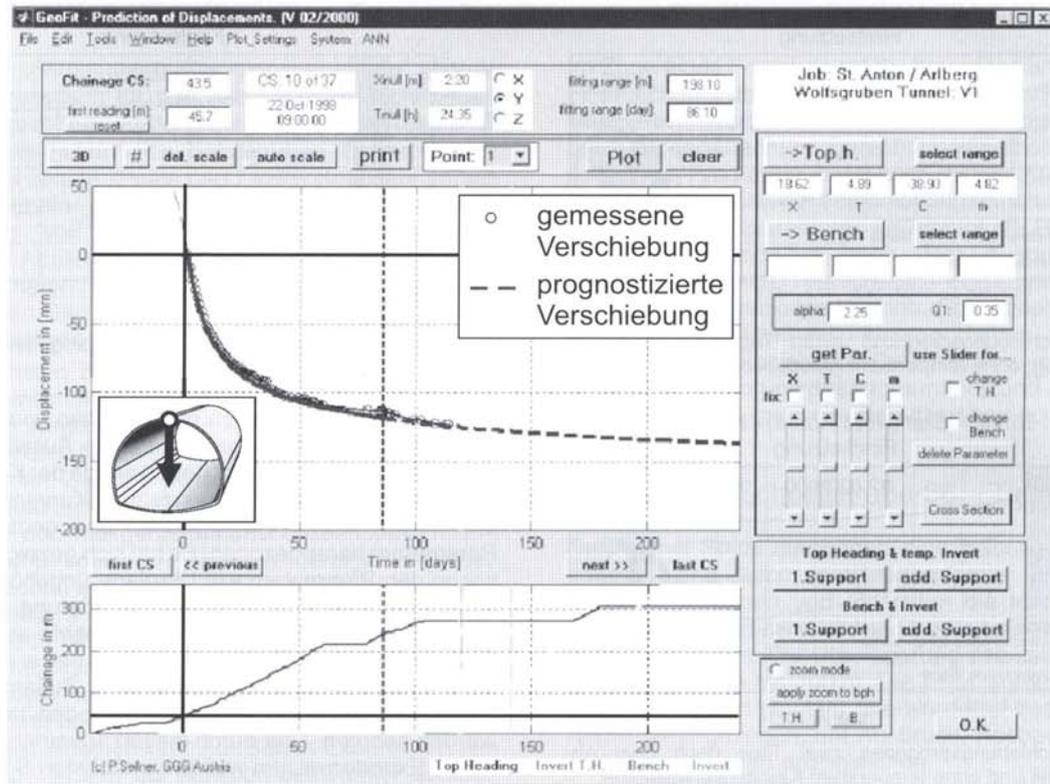


Abb. 7. Programmpaket GeoFit: Vergleich zwischen prognostizierter und gemessener Firstsetzung

des Messquerschnittes Tm 43,5 dargestellt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung zu erkennen. In manchen Messquerschnitten konnte diese Genauigkeit nicht erreicht werden. Dies ist auf den noch etwas verbesserungsbedürftigen Trainingsprozess zurückzuführen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die EPM ist eine baustellenreife Methode zur genauen Abschätzung der Endverschiebungen und des Verschiebungsverhaltens. Einflüsse von unterschiedlichen Stützmitteln können schnell und zuverlässig ermittelt werden. Nachträgliche Maßnahmen können rechtzeitig getätigt werden, sollten die Verschiebungen nicht im Einklang mit dem Ausbau oder dem gewählten Übermaß stehen.

Probleme gibt es zur Zeit noch mit der PPM. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf. Die Ungenauigkeit der Prognose kann auf folgende Punkte zurückgeführt werden: Der verhältnismäßig geringen Anzahl der zur diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Trainingsdaten, der neuronalen Netzwerk Architektur und dem Umstand, dass relevante Parameter nicht erhoben wurden. Diese drei Mängel sollten jedoch einfach zu lösen sein. Durch die kontinuierliche Sammlung von Fallbeispielen aus verschiedenen Tunnelprojekten kann das Expertenwissen stetig erweitert und somit die Prognose verbessert werden. Zahlreiche Forschungen werden weltweit auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz durchgeführt. Verbesserte Aufnahmemethoden vor Ort – zum Beispiel der Einsatz von stereographischen Aufnahmen zur Datenerhebung an der Ortsbrust¹¹ fördert die Objektivität von geologischen Daten. Dadurch werden Fehlinterpretationen vermieden und ebenfalls die Prognosegenauigkeit gesteigert.

Die Verschiebungsprognose ermöglicht nicht nur eine Abschätzung der endgültigen Verschiebungsbeträge, sondern auch die Vorhersage der Verschiebungsgeschichte. Dadurch kann ein „Normalverhalten“ des Tunnels definiert werden. Ein Abweichen von diesem bedeutet „abnormale“ Bedingungen. Stabilitätsprobleme können somit frühzeitig erkannt und vermieden werden¹⁰.

Literatur

- ¹ Feder, G.: Zum Stabilitätsnachweis für Hohlräume in festem Gebirge bei richtungsbetontem Primärdruck; BHM 122 (1977), H. 4, 131–140. – ² Hoek, E.: Support for very weak rock associated with faults and shear zones.– Proc. Int. Symp. on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, 14.–19. March 1999, Kalgoorlie, Australia. – ³ Schubert, P. und G. M. Vavrovsky: Interpretation of monitoring results. World Tunnelling (November 1994), 351–356. – ⁴ Rabensteiner, K.: Advanced tunnel surveying and monitoring. Felsbau 14 (1996) Nr. 2, 98–102. – ⁵ Steindorfer, A. F.: Short term prediction of rock mass behaviour in tunnelling by advanced analysis of displacement monitoring data. Doctoral Thesis, Institute for Rock Mechanics and Tunneling. Techn. Universität Graz, 1998. – ⁶ Grasso, P., K. Rossler, S. Pelizza und G. Zanella: Design and construction of a large cavern in a complex formation in NW Italy. In: Golser, J., W. J. Hinkel und W. Schubert (eds). Tunnels for people. Balkema, Rotterdam, 1997, 807–813. – ⁷ Sakurai, S., I. Kawashima und T. Otani: A criterion for assessing the stability of tunnels. In: Ribeiro e Sousa, L. M. and N. F. Grossmann (eds), Proc. Eurock 1993, Balkema, Rotterdam 1995, 969–973. – ⁸ Sulem, J., M. Panet und A. Guenot: Closure analysis in deep tunnels. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 24, (1987), 145–154. – ⁹ Barlow, J. P.: Interpretation of tunnel convergence measurements. MSc Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Alberta, Canada, 1986. – ¹⁰ Sellner, P. J.: Prediction of displacement in tunnelling. PhD Thesis, Institute for Rock Mechanics and Tunneling, Techn. Universität Graz, 2000 – ¹¹ Gaich, A., A. Fasching, und M. Gruber: Stereoscopic imaging and geological evaluation for geotechnical modelling at the tunnel site. Felsbau 17 (1999) Nr. 1, 15–21.