

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 105 (1987)  
**Heft:** 25

**Artikel:** Die statische Wirkungsweise eines im Tagbau erstellten Tunnelgewölbes  
**Autor:** Kovári, Kálmán / Tisa, Andreas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76637>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

den «Hochtonbereich». Für die akustischen Eigenschaften einer Fahrbahnoberfläche ist der Wellenlängenbereich von etwa 1 mm bis zu mehreren Dezimetern relevant. Mit zunehmenden Amplituden der Wellen im Bereich der Grobheit, das heisst oberhalb von etwa 10 mm bis 20 mm wachsen die Reifengeräusche an. Der Wellenlängenbereich von rd. 1 mm bis etwa 10 mm wirkt sich hingegen günstig aus. Ein ausgeprägter Amplitudenpegel in diesem Bereich, das heisst tief reichende Porosität, vermindert die Schallabstrahlung und ist deshalb erwünscht. Dies erklärt die akustischen Vorteile der hohlraumreichen Deckschichten, auch Drainsphal genannt. Die Optimierung der akustischen Eigenschaften dieser Deckschichten liegt nun darin, einerseits eine «scharfe Oberfläche» bestehend aus möglichst vielen kleinen, spitzen Elementen, anzustreben, um den abrollenden Reifen möglichst wenig anzuregen. Andererseits können gute Absorptionseigenschaften nur durch einen hohen Gehalt (mind. 10 Vol.-%) an «offenen Poren», sowie durch eine möglichst offene Oberfläche, die viel Schallenergie eindringen lässt, erzielt werden. Der Einfluss von Porosität und Flächenschärfe, also der Textur der Fahrbahnoberfläche auf die Reifengeräusche, ist auf Bild 3 angedeutet. Alle Bemühungen, Reifengeräusche zusätzlich auch durch weich-elastische Deckschichten zu vermindern, haben bisher noch keinen praktischen Erfolg gehabt.

## Ausblick

Die für die Griffigkeit, die Reifengeräusche und die Unebenheit jeweils massgebende geometrische Gestalt der Fahrbahnoberfläche ist auf Bild 4 in einem Wellenlängenspektrum übersichtlich dargestellt. Das für das Fahrzeug relevante Wellenlängenspektrum der Strassenoberfläche erstreckt sich über rd. 9 Dekaden, wobei sich die einzelnen Teilbereiche sehr unterschied-

lich auf das bewegte Fahrzeug auswirken. Obwohl die in Bild 4 angegebenen Bereiche nicht präzise eingegrenzt werden können, ist die Zuordnung doch als Orientierungshilfe nützlich. Die Wertung des gesamten Wellenlängenspektrums führt zu dem einfachen Schluss, dass Wellenlängen kleiner als wenige Millimeter notwendig, grössere Wellenlängen hingegen unerwünscht sind.

Im Hinblick auf die Polierresistenz unter sehr starker Verkehrsbelastung und auf möglichst günstige akustische Eigenschaften sind Deckschichten mit kleinerem Maximalkorn z.B. 5 bis 8 mm interessant. Die Grobheit für das erforderliche Drainagevermögen ist auch bei einem Maximalkorn von 5 bis 8 mm, geeignete Rezeptur vorausgesetzt, erfahrungsgemäss gewährleistet. Weitere Möglichkeiten zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen liegen in einem streng «funktionalen Schichtaufbau». Dies bedeutet, dass die Deckschicht noch konsequenter als bisher auf ihre spezifische Funktion hin konzipiert wird. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich Verbesserungsmöglichkeiten sowohl durch Verwendung künstlicher Zuschlagstoffe mit erhöhter Polierresistenz, grösserer Festigkeit und besserer Kornform, als auch durch Bindemittel mit günstigeren Haft- und Alterungseigenschaften. Um die höheren Kosten zu kompensieren, können derartige Schichten in aller Regel wesentlich dünner gehalten werden. Diese Überlegungen gelten in erster Linie für bituminöse Bauweisen. Die Optimierung von Zementbetonoberflächen muss im Hinblick auf die akustischen Eigenschaften neu überdacht werden, da alle Texturen, die in Längsrichtung Periodizitäten aufweisen (z.B. Querrillen oder Besenstrich) ungünstig sind.

Manchem Strasseningenieur mag die Betrachtung der Strassenoberfläche allein vielleicht etwas zu «oberflächlich» vorkommen. Wie aber im Gesicht des Menschen seine innere Verfassung zum Ausdruck kommt, so spiegelt auch die

Strassenoberfläche die innere, strukturelle Problematik wider. Die richtige Deutung der «oberflächlichen Erscheinungen» wird insbesondere für die Bewertung des Strassenzustandes im Rahmen einer ökonomischen Strassenerhaltung künftig eine besonders wichtige Rolle spielen.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. sc. techn. S. Huschek, Technische Universität Berlin.

## Literatur

- [1] E. Zipkes, Geschichtliche Entwicklung der bituminösen Strassenbeläge, Mitteilung Nr. 33 des ISETH (1976).
- [2] B. Wehner, Das Problem Strassengriffigkeit - Von den Anfängen bis zur Gegenwart; 50 Jahre Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen 1924 - 1974.
- [3] K.-H. Schulze, Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 189 (1975), herausg. vom BMV, Abt. Strassenbau, Bonn.
- [4] H. Grob, Erfahrungen mit den schweizerischen Strassenbaunormen bezüglich Griffigkeit, Internationales Colloquium über Strassengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, 5. u. 6. Juni 1968 in Berlin, Colloquiumsbericht herausgegeben von B. Wehner und K.-H. Schulze (1970) als Heft 2 der Berichte des Instituts für Strassen- und Verkehrswesen der TU Berlin.
- [5] H. Grob, Conception des chaussées bétonnées compte tenu des problèmes de glissance, XIVe Congrès Mondial de l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR), Prague 1971, Rapport du Comité de la glissance.
- [6] S. Huschek, Griffigkeit und Verkehrssicherheit auf nasser Strasse, Mitteilung Nr. 31 des ISETH (1975).
- [7] R. Pelloli, Griffigkeitsmessungen mit dem Skiddometer - Weitere Ergebnisse, Mitteilung Nr. 41 des ISETH (1979).
- [8] E. Zipkes, S. Sulger Buel, Schäden durch den Gebrauch von Spikesreifen, Mitteilung Nr. 24 des ISETH (1973).
- [9] S. Huschek, Befahrbarkeitsmessungen auf Strassen nach der Winkelmessmethode - Neue Untersuchungen, Mitteilung Nr. 28 des ISETH (1974).
- [10] S. Huschek, G. Brachner, Ebenheitsmessungen auf Strassen, Mitteilung Nr. 38 des ISETH (1977).
- [11] Internationales Seminar «Reifengeräusch und Strassenbau», Mitteilung Nr. 57 des ISETH (1984).

## Die statische Wirkungsweise eines im Tagbau erstellten Tunnelgewölbes

Von Kálmán Kovári und Andreas Tisa, Zürich

Aufgrund umfangreicher Deformationsmessungen im Feld wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, mit dem ein im Tagbau erstelltes Tunnelgewölbe aus Stahlbeton bemessen werden kann. Das Modell wird mit der Methode der Finiten Elemente berechnet und berücksichtigt den schrittweisen Aufbau des Tragwerkes im Zuge der etappenweisen Hinter- und Auffüllung als Bestandteil der Konstruktion.

## Einleitung

Der Immissionsschutz und Landschaftsschutz gewinnen mehr und mehr an Bedeutung. Es werden deshalb im Strassen- und Eisenbahnbau immer häufiger Tunnelgewölbe im Tagbau erstellt, seitlich hinterfüllt und nach den Gesichtspunkten der Landschaftsgestaltung oder der Nutzung der Gelän-

deoberfläche weiter aufgeschüttet. In vielen Fällen ist vorgängig ein Einschnitt oder ein Hangschnitt erforderlich.

Die Stärke des Tunnelgewölbes, seine Bewehrung, vor allem die Steifigkeit der seitlichen Hinterfüllung sind die wichtigsten Faktoren, die, bei einer gegebenen Geometrie und Aufschüttungshöhe, die Baukosten und z.T. auch die Bauzeit beeinflussen. Die sichere und wirtschaftliche Gestaltung und Bemessung solcher Tragwerke muss auf klaren Erkenntnissen über das Zusammenwirken der drei Strukturelemente Betongewölbe, gewachsener Boden und Auffüllung beruhen. Dieses Zusammenwirken ist insofern von komplexer Natur da die seitliche Hinterfüllung im Zuge ihres schrittweisen Einbringens zunächst die Rolle einer Belastung und anschliessend jene eines Tragelementes übernimmt. Nach der Beendigung der Verdichtungsarbeiten eines bestimmten Auffüllungsabschnittes setzt ein solcher Teil Widerstand gegen Verschiebungen des Bogens nach aussen, wobei Stützreaktionen geweckt werden.

Um diesen Mechanismus genauer zu ergründen, wurden an mehreren Objekten systematische Messungen hoher Präzision durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen haben zu einem Berechnungsverfahren geführt, mit dem nicht nur die gemachten Beobachtungen zutreffend erklärt, sondern auch eine Bemessung solcher Objekte möglich sind.

### Messprogramm und Messinstrumente

Das Kernstück des Messprogrammes bildet die Ermittlung der Biegelinie des Tunnelgewölbes. Die Biegelinie erhält man durch Invardrahtmessungen mit dem Präzisionsinstrument «DISTOMETER». Das Verfahren ist in [3] ausführlich beschrieben. Das Messprogramm wird durch Nivellements der Widerlager sowie durch Messung der Widerlagerverdrehungen ergänzt. Das Verfahren ist in [3] ausführlich beschrieben. Die Auswertung der umfangreichen Messdaten erfolgt mit Hilfe des, auf Personal Computer implementiertes, Programmes «INVAR» [2]. Es liefert auch eine übersichtliche grafische Darstellung der Messergebnisse.

### Messergebnisse

Die Interaktion zwischen Tunnelgewölbe und der seitlichen Hinterfüllung soll an Hand von einem ausgewählten Bei-

spiel veranschaulicht werden. Es betrifft den Tunnel Maria Zell, der Nationalstrasse N2 im Kanton Luzern, mit der Spannweite von  $2 \times 12,80$  m und Gewölbestrecke von 30 cm.

Aufgrund der Beobachtungen wird klar, dass die seitliche Hinterfüllung das Gewölbe offensichtlich in waagerechter und lotrechter Richtung in einer solchen Weise belastet, dass der Bogen seitlich nach innen und der Scheitel nach aussen geschoben wird. Das Tunnelgewölbe befindet sich somit bei der Hinterfüllungsetappe «bis zum Scheitel» (Bild 1a) in einem «vorgespannten» Zustand, der im Hinblick auf die weitere Auffüllung statisch günstig ist. Wie sich eine solche weitere Auffüllung am Tragwerk auswirkt, ersehen wir aus Bild 1b. Die Bogenverschiebungen werden als Folge einer 5,40 m mächtigen Auffüllung dargestellt. Der Bogen weicht seitlich nach aussen und der Scheitel nach innen aus, wobei entsprechend der Steifigkeit der seitlichen Hinterfüllung und dem Betrag der Verschiebungen Stützreaktionen geweckt werden. In Bild 1b sind die differentiellen Verschiebungen infolge der Auflast über dem Scheitel dargestellt. Wie aus Bild 1c ersichtlich, vermag die Aufschüttung in dieser Stärke noch nicht die oben erwähnte «Vorspannung» auszugleichen. Folgt keine weitere Aufschüttung mehr, so verursacht die Zwischenphase nach Fig. 1a die grössten Beanspruchungen des Bogens.

Schon aus diesen Überlegungen geht hervor, dass der Steifigkeit des seitlich hinterfüllten Materials nicht immer die Bedeutung zukommt, die man allgemein annimmt. Sie wird erst bei grösseren Aufschüttungshöhen massgebend, wobei dann aber auch mit der Bildung eines natürlichen Tragwerkes in der Auffüllung selbst zu rechnen ist.

### Das Berechnungsmodell

Das umfangreiche Beobachtungsmaterial von mehreren grösseren Tunnelbauprojekten mit verschiedenen Querschnittsformen und mit jeweils 4 bis 5 Auffüllungsetappen, die auch in asymmetrischer Weise erfolgten, hat es ermöglicht, ein Berechnungsmodell aufzustellen, das die Vielfalt von Erscheinungen befriedigend zu beschreiben vermag [3]. Das Berechnungsmodell (Bild 2) besteht aus einer Scheibe, die den gewachsenen Boden ① und die bereits verdichtete Hinterfüllung ② simuliert. Es enthält ein in die letztere eingebettetes Stabwerk für das Tunnelgewölbe. Es werden rein elastische Materialeigenschaften angenommen mit E-Mo-

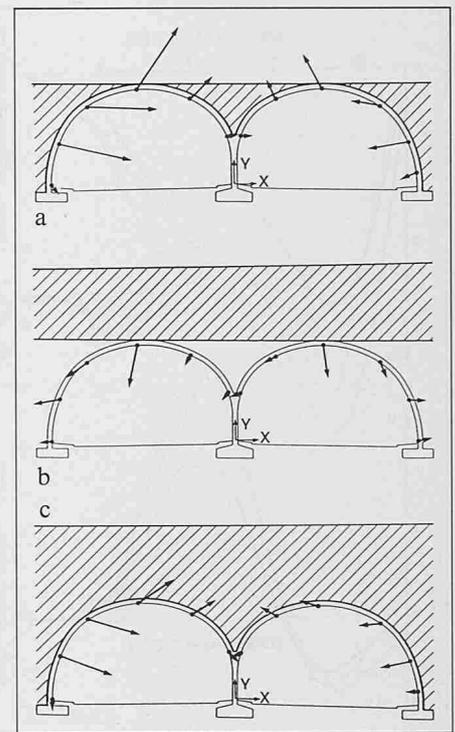
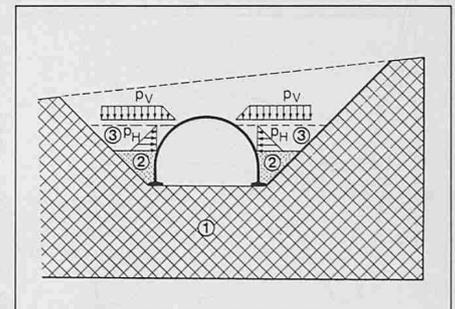


Bild 1. Tunnel Maria Zell. Bogenverformungen bei der Auffüllung bis zum Scheitel (a), differentielle (b), und totale Verformungen bei der endgültigen Aufschüttung (c)

Bild 2. Interaktion zwischen Tunnelgewölbe und Boden, ① gewachsener Boden, ② verdichtete Auffüllung, ③ letzte im Entstehen begriffene Aufschüttungsetappe



duli entsprechend der Steifigkeit der Böden und des Gewölbebetons. Die Begrenzung der Scheibe ist derart gewählt, dass differentielle Setzungen und Widerlagerverdrehungen den Verhältnissen entsprechend erfasst werden können. Als Belastung gilt in lotrechter Richtung das Gewicht  $P_V$  einer neu eingebrachten Auffüllungsschicht ③, und in waagerechter Richtung einen durch sie bewirkten Erddruck  $P_H$ . Die Berechnung erfolgt schrittweise ausgehend von der ersten Hinterfüllungsetappe, bei der sie zunächst nur als eine Belastungsgrösse in Erscheinung tritt. Die berechneten Deformationsgrössen und Schnittkräfte werden gespeichert. Beim nächsten Berechnungsschritt bildet nun diese erste Hinterfüllungsetappe bereits einen integrierenden Bestandteil der Scheibe. Der nächste Berechnungsschritt wird nun mit neuen Belastungssinkrementen durchgeführt. Die

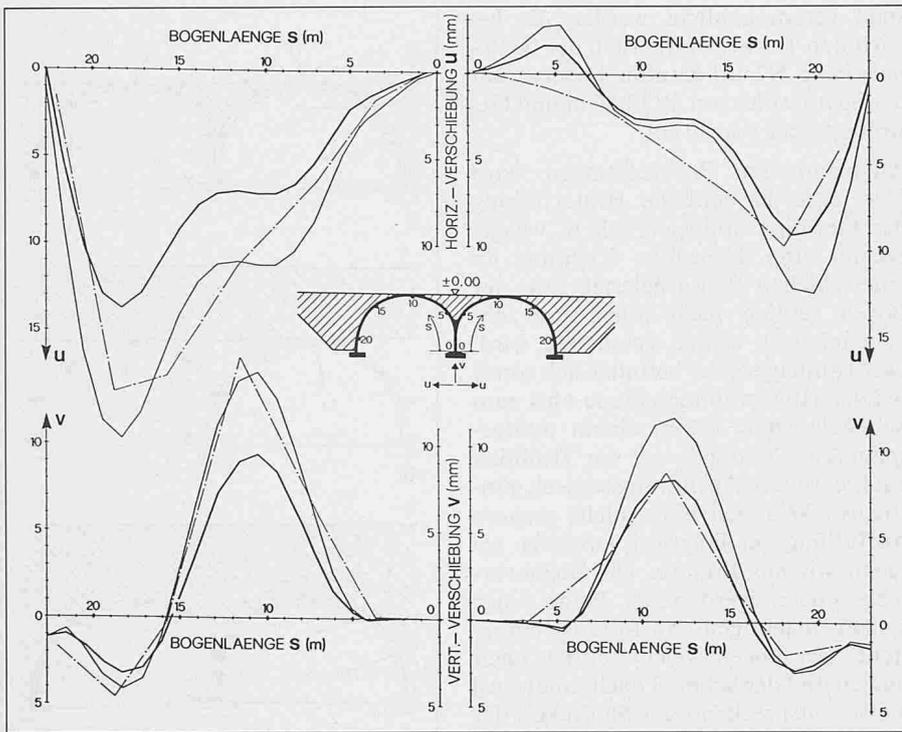
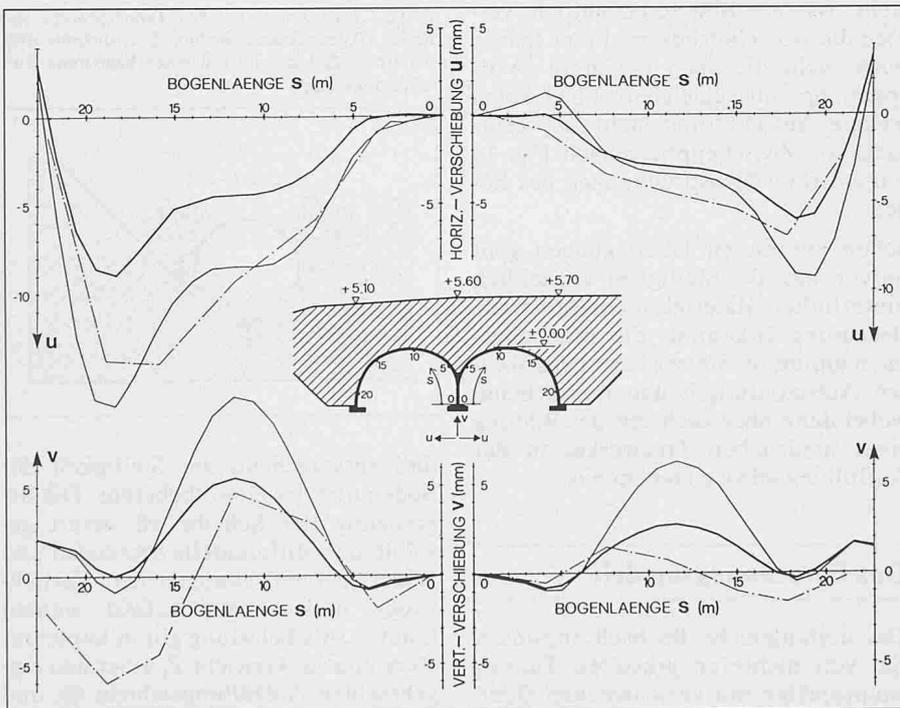


Bild 3. Tunnel Maria Zell; Verschiebungskomponenten  $u$  und  $v$  der Biegelinie; Hinterfüllung bis zum Scheitel. Berechnung: akt. Erddruck — Ruhedruck — Messung - · - · - · -

Bild 4. Tunnel Maria Zell; Verschiebungskomponenten  $u$  und  $v$  der Biegelinie; Endgültige Aufschüttung. Berechnung: Akt. Erddruck — Ruhedruck — Messung - · - · - · -



Ergebnisse dieses neuen Berechnungsschrittes werden zu den ersten aufsummiert. So schreitet man weiter bis die letzte Auffüllung erfasst ist. Für diese Berechnungen wurde das an das ETH entwickelte Finite-Elemente-Programm «RHEO-STAU» verwendet. Eine vollständige Implementation dieses in der Ingenieurpraxis seit Jahren verwendeten Programmes ist nun auch auf Personal Computern lauffähig, was seine Anwendung wesentlich erleichtert und verbilligt.

Eine Besonderheit des Berechnungsmodells besteht darin, dass es über ein «Modellgedächtnis» verfügt, welches einen asymmetrischen Auffüllvorgang, der jedoch zu einem symmetrischen Endzustand führt, voll berücksichtigt. In einem solchen Fall ergibt sich nämlich sowohl messtechnisch wie auch rechnerisch ein asymmetrischer Verschiebungszustand. Ein besonderes Problem stellt die Bestimmung des Erddruckbeiwertes  $\lambda$  für die Horizontalbelastung  $P_H$  dar. Bodenmechanische

Überlegungen und die Rückrechnung der gemessenen Verschiebungen zeigen, dass es sinnvoll ist, alle Berechnungen mit dem Ruhedruckbeiwert und dem Beiwert des aktiven Erddruckes durchzuführen. Damit wird eine der Sache innewohnende Unschärfe durch zwei Schranken begrenzt. Das hier beschriebene Berechnungsmodell unterscheidet sich in wesentlichen Teilen von jenen, welche für die in die Erde eingebetteten biegeschlaffe Stahlrohre vorgeschlagen wurden [4].

Ein Beispiel für den Vergleich von messtechnisch und rechnerisch erhaltenen Verschiebungen ist in Bild 3 und 4 dargestellt. Die Berechnungen wurden mit den E-Werten  $100 \text{ N/mm}^2$  bzw.  $30 \text{ N/mm}^2$  für den gewachsenen Boden bzw. Hinterfüllung und  $20\,000 \text{ N/mm}^2$  für den Gewölbebeton durchgeführt. Der Poissonzahl betrug  $\mu = 0,3$  und der Winkel der inneren Reibung für die Hinterfüllung  $\Phi = 30^\circ$ . Als Raumgewicht für das letztere wurde  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  angenommen. Bei der Betrachtung der Figuren sollte die Vorzeichenkonvention für die Auftragung der horizontalen Verschiebungskomponenten in den einzelnen Röhren beachtet werden. In Bild 3 erkennt man hauptsächlich bei den Horizontalverschiebungen eine deutliche Asymmetrie, die als Folge der oben erwähnten asymmetrischen Hinterfüllungsetappen (die oft nicht zu vermeiden sind) auftreten. Diese Asymmetrie im Verschiebungsbild ist aber auch in Bild 4 bei dem fertiggestellten Tunnel mit über 5 m Auffüllung noch gut erkennbar. Das hier beschriebene Berechnungsmodell wurde in den letzten Jahren für die Bemessung einer Reihe von Tunnelbauwerken eingesetzt und seine Aussagekraft durch systematische Verformungsmessungen im Zuge der Ausführung überprüft.

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. K. Kovari und dipl. Bau-Ing. A. Tisa, IBETH, Gruppe Fels und Untertagebau, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

#### Literatur

- [1] Kovari, K., Amstad, Ch.: Decision Making and Field Measurements in Tunnelling. 25th OYO Anniversary Lecture Meeting, Tokyo, 1979.
- [2] Tisa, A.: Handbuch zur Benützung des Programms INVAR. IBETH, 1987.
- [3] Kovari, K., Tisa, A.: Computational Models for Cut and Cover Tunnels Based on Field Measurements. 4th Int. Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Edmonton, 1982.
- [4] Klöppel, K., Glock, D.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu den Traglastproblemen biegeschlaffer in die Erde eingebetteter Rohre. Veröffentlichung des Institutes für Statik und Stahlbau der TH Darmstadt, Heft 10, 1970.