Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 90 (1972)
Heft: 16: SIA-Heft, Nr. 3/1972: Tunnel

Artikel: Spannungsumlagerungen bei Tunnelunterfahrung
Autor: Amstad, Ch. / Kovári, K. / Vannotti F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85177

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.02.2026

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

SIA-Heft Nr. 3, 1972

An die Leser der Schweiz. Bauzeitung

Ende 1970 ist es uns gelungen, *Georg Weber*, dipl. Bauing., als Mitarbeiter für die Redaktion der Schweizerischen Bauzeitung zu gewinnen. Vor Jahresfrist hat er bei uns seine Tätigkeit aufgenommen. Gut eingearbeitet, ist er mit Anfang dieses Monats zum zeichnenden Redaktor ernannt worden. Geboren am 9. November 1933 als Sohn unseres SIA- und GEP-Kollegen Dr. Armin Weber, Professor am Technikum Winterthur, hat unser jüngster Redaktor am Gymnasium Zürich die Maturität B und hierauf 1957 sein ETH-Diplom erworben. Von 1958 bis 1971 stand er im Dienste der Elektro-Watt AG in Zürich. In der ersten Zeit bearbeitete er hauptsächlich Wasserkraftanlagen, Schiffahrtsprojekte und Wirtschaftlichkeitsstudien. 1961 war er als Bauleiter auf der Baustelle Chanrion/Mauvoisin im Wallis tätig. 1963/64 brachte er im Auftrag seines schweizerischen Arbeitgebers in Vancouver, Kanada, zu, wo er hydrologische Studien, Vorprojekte für Mehrzweckanlagen und das Projekt für ein Stauwehr bearbeitete. Mit der Ablieferung einer Arbeit über Hydrologie von Ost-Pakistan wies er sich über die Fähigkeit aus, selbständig als Ingenieur zu arbeiten; er wurde in die Association of Professional Engineers of British Columbia aufgenommen. Nach seiner Rückkehr in die Schweiz waren vorerst das Kraftwerk Arosa (Projekt und Durchführung), Studien für Pumpspeicherwerke in der Schweiz und Bearbeitung von Einstauverlusten seine Hauptaufgaben. 1965 wurde er zum Handlungsbevollmächtigten ernannt. Für das Netz der Gasverbund Ostschweiz AG bearbeitete er neben der Projektierung und den Behördekontakten hauptsächlich die Durchführung des Landerwerbs, Durchleitungsrechte und Enteignungen.

Seine vielseitigen Erfahrungen und sein zugriffiges Temperament kommen unserem Redaktor auch bei seiner neuen Tätigkeit zustatten, so dass wir seinem Wirken bei uns mit Zuversicht entgegensehen und ihm als Nachfolger von Redaktor W. Jegher, der Ende Juni dieses Jahres in den Ruhestand treten wird, das Gebiet des Bauingenieurwesens zur besonderen Pflege anvertrauen.

Für den Verwaltungsrat der Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

O. A. Lardelli, Präsident Dr. *U. Zürcher*, Sekretär

Spannungsumlagerungen bei Tunnelunterfahrung

DK 624.191.1.001

Von **Ch. Amstad, K. Kovári, F. Vannotti**, Zürich

Die vorliegende Arbeit möchte zunächst anhand von «Einflusslinien» und unter vereinfachenden Annahmen Anhaltspunkte über das Mass der gegenseitigen Beeinflussung zweier Tunnelröhren in Abhängigkeit der Entfernung von der Kreuzungsstelle vermitteln. Weiter sollen die Möglichkeiten einer eingehenden Untersuchung bei gegebener Geometrie, elastisch-plastischen Materialeigenschaften und Einbauten an einem Beispiel gezeigt werden.

1. Einleitung

Im Zuge des immer dichteren Ausbaues unserer inner- und ausserstädtischen Verkehrswege häufen sich die Fälle, wo bestehende Tunnel in einem derart geringen Abstand unterfahren werden, dass die gegenseitige Beeinflussung der Tunnelröhren nicht mehr vernachlässigt werden darf. Besonders wichtig ist der Fall, bei welchem der Verkehr im bestehenden Rohr durch den Bau eines (nahegelegenen) Tunnels unter keinen Umständen beeinträchtigt werden darf. Eine statische Untersuchung des Problems unter Berücksichtigung der wichtigsten Faktoren ist deshalb erwünscht. Da aber im Einflussbereich zweier sich kreuzender

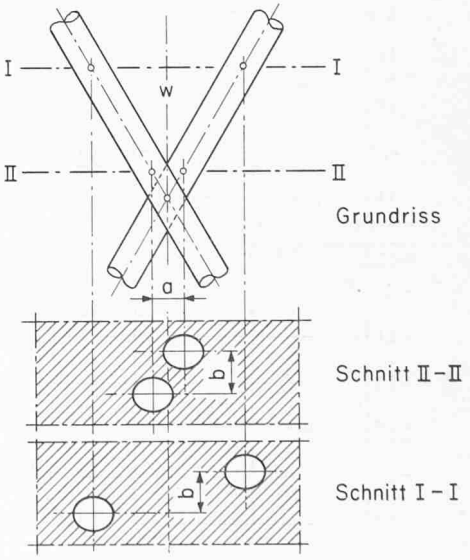

Bild 1. Grundriss und Schnitte bei einer Tunnelunterfahrung

Tunnelröhren selbst bei homogenem Material ein räumlicher Verschiebungs- bzw. Spannungszustand vorliegt, wird man sich im allgemeinen mit Näherungslösungen begnügen. Die Näherung besteht im vorliegenden Fall darin, dass das räumliche Problem durch ebene Schnitte (Bild 1) auf ein Scheibenproblem zurückgeführt wird. Die Spannungsanalyse wird dann für verschiedene Scheiben im ebenen Verschiebungszustand mit verschiedenen gegenseitigen Lochabständen durchgeführt. Die Schnittebenen werden senkrecht zur Winkelhalbierenden w gewählt. Sind die Röhren Kreiszylinder, so erscheinen die Schnitte ellipsenförmig. Da im folgenden nur ein Überblick über die Spannungskonzentrationen an der Schnittstelle gesucht wird, kann – ohne wesentliche Einschränkung der allgemeinen Gültigkeit – mit Kreisprofilen anstelle von Ellipsen gearbeitet werden.

Die Berechnungen wurden mit dem Finite Element-Programm zur statischen Analyse von Untertagbauten des Institutes für Strassen- und Untertagbau an der ETH Zürich durchgeführt. Die theoretischen Grundlagen und der Ausbau dieses Programmes für die Felsstatik sind in [1] dargestellt.

2. Einflusslinien

Um für das Gebirge möglichst allgemeingültige Resultate zu erhalten, wird ideal-elastisches Material und ein homogener primärer Spannungszustand angenommen. Liegen die Tunnelachsen tiefer als der etwa vierfache mittlere Rohrdurchmesser, so kann mit Recht das Eigengewicht der betrachteten Scheibe vernachlässigt und somit ein homogenes primäres Spannungsfeld angenommen werden. Als Einfluss-

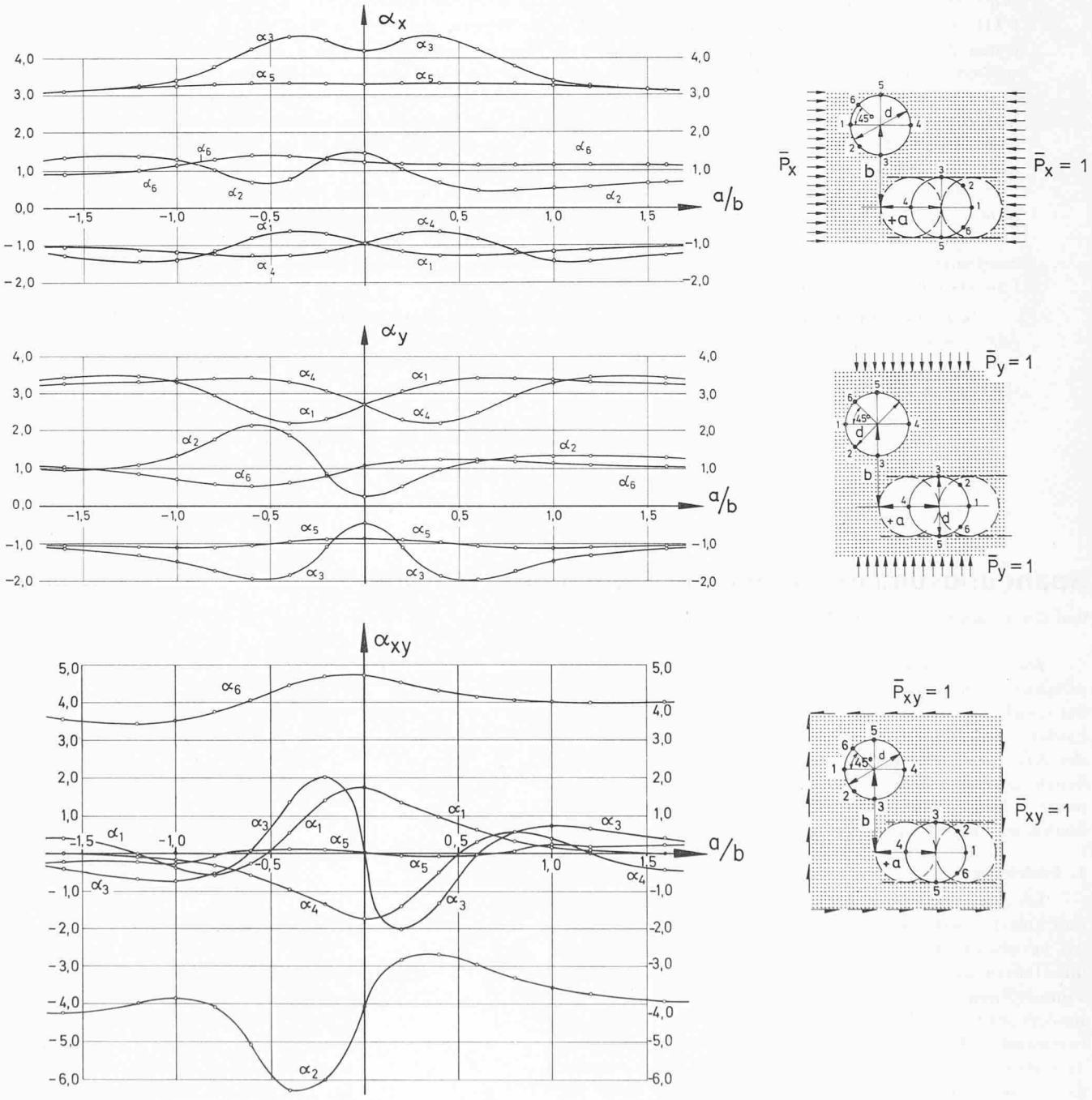

Bild 2. Einflusswerte für die Tangentialspannungen am Ausbruchrand bei $b = 1{,}25\ d$. Oben Einflusswerte α_x. Mitte Einflusswerte α_y. Unten Einflusswerte α_{xy}

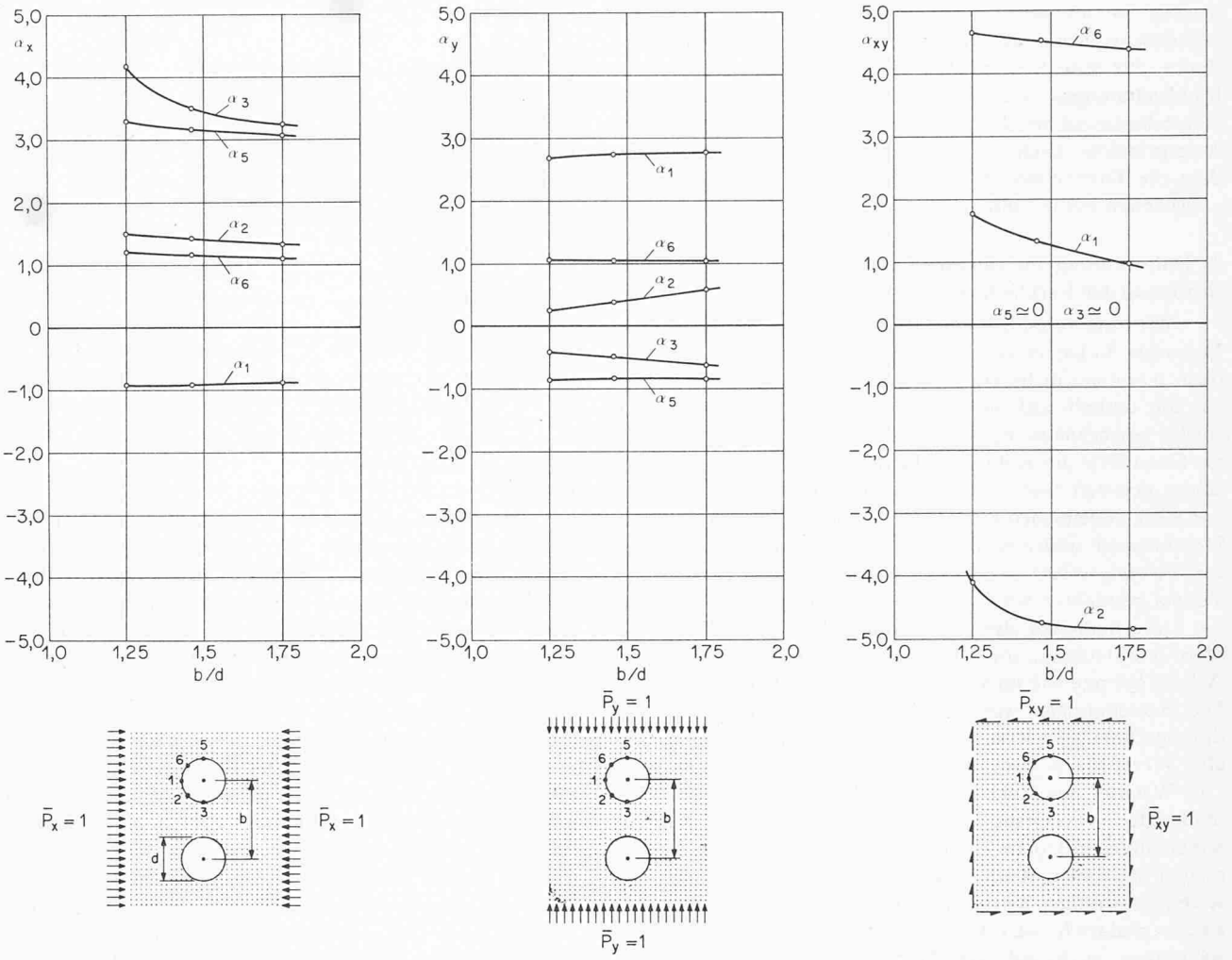

Bild 3. Einflusswerte für die Tangentialspannungen am Ausbruchrand für den Schnitt durch die Kreuzungsstelle ($a = 0$)

grössen wählen wir die Tangentialspannungen am Kreisumfang in den Punkten 1 bis 6 (Bild 2). Ihr Verlauf in Funktion des gegenseitigen Lochabstandes und unter den Einheitsbelastungen der einzelnen Spannungskomponenten ergibt die Einflusslinien [1]). In Bild 2 sind sie für den Fall $b = 1{,}25\,d$ (b = fester Vertikalabstand der beiden Tunnelachsen, d = Durchmesser der Tunnelröhren) dargestellt. Da der kürzere Abstand der Punkte 3—3 in diesem Falle nur die Hälfte des Kreisradius beträgt, wird ein engeres Zusammenrücken der beiden Röhren praktisch kaum in Frage kommen.

Die Tangentialspannung σ_i an der Stelle i für einen gegebenen Spannungszustand (P_x, P_y, P_{xy}) erhält man durch die einfache Überlagerung nach

$$\sigma_i = \alpha_{ix}\, P_x + \alpha_{iy}\, P_y + \alpha_{ixy}\, P_{xy} \tag{1}$$

Die Diagramme von Bild 2 lassen die massgebende Wirkung der Schubspannungskomponenten und somit den Einfluss der Richtung der Hauptspannungen erkennen. Es ist zu bedenken, dass eine reine Schubbelastung in Wirklichkeit kaum vorkommt und den grossen Werten des Bildes 2c nur im Zusammenhang mit der Überlagerung der einzelnen Komponenten (1) eine Bedeutung zukommt. Es zeigt sich weiter, dass die Horizontalbelastung $P_x = 1$ höhere Beanspruchungen ergibt als $P_y = 1$. Eine interessante Feststellung ergibt sich aus dem Vergleich der Spannungskonzentrationen um ein einziges Loch bzw. um zwei Löcher. Die Zunahme der Tangentialspannungen im oberen Rohr infolge Unterfahrung kann bei allen Belastungsfällen bis 50 % betragen. Mit grösserwerdendem Abstand der beiden Tunnelachsen konvergieren die Spannungen gegen die Werte das Einlochproblem (z. B. $\alpha_{3x} \rightarrow 3{,}0$ in Bild 2a).

Es bleibt noch abzuschätzen, wie die Spannungskonzentration mit grösserwerdendem Verhältnis b/d abnimmt. Zu diesem Zweck betrachten wir den Schnitt durch die Kreuzungsstelle und die Punkte 1, 2, 3, 5 und 6 auf dem Kreisumfang. In diesem Fall ist $a = 0$ und b/d veränderlich. Die Resultate der Berechnungen sind in Bild 3 dargestellt. Sie sind auch für das Problem paralleler Tunnelröhren aufschlussreich.

Bemerkungen zur Berechnung der Einflusszahlen

Das Programm arbeitet mit linearem Verschiebungsansatz für die einzelnen Elemente. Daraus folgt, dass die Spannungen elementenweise konstant und somit ihre Änderungen unstetig sind. Da der Spannungsgradient gerade am Lochrand am grössten ist, scheinen die Randspannungen als Einflusszahlen vom numerischen Standpunkt aus nicht sehr geeignet. Sie veranschaulichen aber die eingetretenen Spannungsumlagerungen am besten; aus diesem Grunde

[1]) Es handelt sich hier also nicht um Einflusslinien im Sinne der Baustatik (bewegliche Einheitslasten). Da eine Verwechslung ausgeschlossen ist, glauben wir die gleiche Bezeichnung verwenden zu dürfen.

wurden sie als massgebende Grössen behalten. Um ihre numerische Aussagekraft zu erhöhen, mussten für jeden Punkt, für jede Stellung und für jeden Belastungsfall die Randspannungen durch Extrapolation über mehrere Elemente bestimmt werden. Bei der Anwendung des Überlagerungsprinzipes nach (1) wird trotzdem zu beachten sein, dass die Differenzen grosser Zahlen die Genauigkeit von σ_i erheblich herabmindern können.

3. Unterfahrung im elastisch-plastischen Material, Berücksichtigung der Verkleidung

Wird die vereinfachende Annahme des ideal-elastischen Materials fallengelassen, so können keine allgemein gültigen Resultate mehr erzielt werden. Im folgenden möchten wir uns deshalb auf die Durchrechnung eines einzigen Beispieles beschränken, bei dem der primäre Spannungszustand, die Geometrie der Röhren und eine bestimmte Verkleidungsstärke gegeben sind. Auch hier werden – ohne Einschränkung der allgemeinen Gültigkeit – Kreisprofile mit gleichem Durchmesser angenommen. Als massgebende Grössen für den Störungseffekt der Unterfahrung auf den bestehenden Tunnel betrachten wir hier die Normalkräfte, Momente und die Deformationen der Verkleidung. Das untere Rohr sei ohne Verkleidung, und der kürzeste Abstand der beiden Achsen betrage wie im vorangehenden Abschnitt $b = 1{,}25\ d$. Die Berechnungen werden für zwei Schnitte (A und B) durchgeführt. Die Resultate der Bilder 4 und 5 zeigen, dass alle Werte nach dem unteren Hohlraum orientiert sind. Der Wechsel des Vorzeichens der Momente und der Normalkräfte ist verständlich, wenn man beachtet, dass die Verkleidung mit dem umgebenden Fels vollständig zusammenwirkt. Einem Rechenmodell mit der Ausschaltung der Reibung zwischen Beton und Fels steht nichts im Wege. In einem praktisch wichtigen Fall würden sich die Untersuchungen auch auf verschiedene Bauzustände und vor allem auf den Einfluss der Verkleidung des unteren Tunnels auf das bestehende Rohr erstrecken.

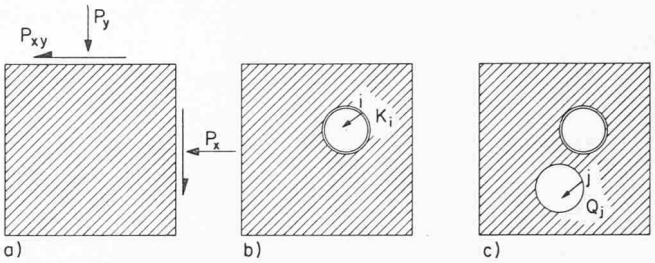

Bild 6. Der Berechnungsvorgang.

a) Der primäre Spannungszustand (Phase I)

b) Berechnung der Spannungsumlagerung infolge Lochwirkung des ersten Tunnels (Phase II), K_i Knotenkraft im Punkt i

c) Berechnung der Spannungsumlagerung infolge Tunnelunterfahrung (Phase III), Q_j Knotenkraft im Punkt j

Bemerkungen zur Berechnung

Die Belastungszustände mit drei Phasen I, II und III sind in Bild 6 dargestellt. Es wird in der Phase I von der elastischen, ungelochten Scheibe ausgegangen (Bild 6a), welche unter der Wirkung des primären Spannungszustandes steht. Je nach der Tiefenlage der Tunnelröhren rechnet man mit homogenem oder mit veränderlichem Spannungsfeld. Der zugehörige Verschiebungszustand kann nach einer einfachen Integration (2) in einer Formel erfasst werden. Das Programm ist eingerichtet, diesen analytisch formulierten Zustand auszuwerten. In der Phase II (Bild 6b) wird die Spannungsverteilung infolge Lochwirkung des ersten Rohres unter Berücksichtigung allfälliger Einbauten bestimmt. Als Belastung werden Knotenkräfte K_i aus dem primären Zustand errechnet und mit entgegengesetztem Vorzeichen am Lochrand angebracht. Je nach dem primären Spannungszustand und den Festigkeitseigenschaften des Materials können bereits in diesem Fall plastische Deformationen auftreten. Die Berechnung kann also einen Iterationsprozess nach den Grundsätzen der Plastizitätstheorie erfordern.

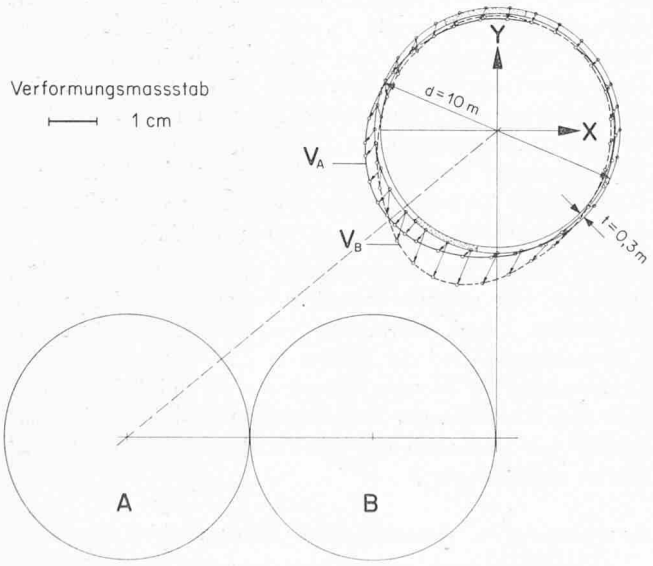

Bild 4. Verformungen der Betonverkleidung des bestehenden Tunnels infolge Unterfahrung in den Schnitten A und B. Elastisch-plastische Analyse.

Primärer Spannungszustand. $P_x = 50$ t/m², $P_y = 100$ t/m², $P_{xy} = 25$ t/m²

Materialkennwerte: $E_{Fels} = 100\,000$ t/m², $\upsilon = 0{,}3$, $c = 50$ t/m², $\varphi = 30°$

Verkleidung: $E_{Beton} = 2\,000\,000$ t/m², $t = 0{,}3$ m

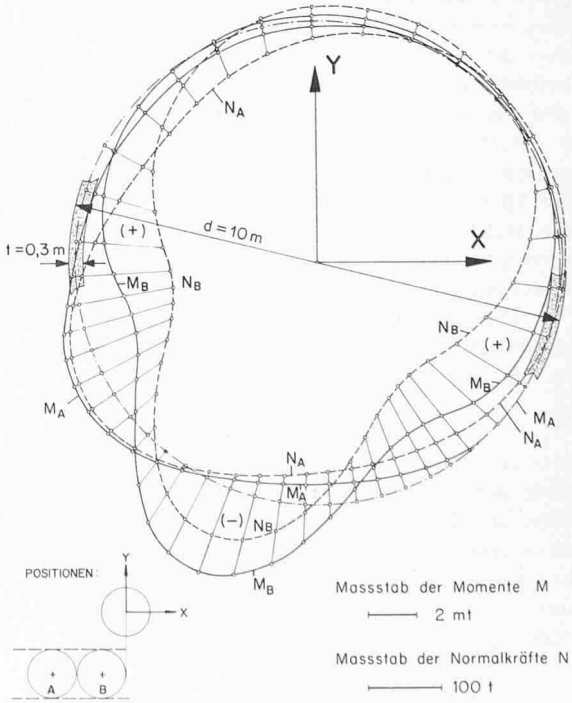

Bild 5. Änderung der Momente und Normalkräfte in der Betonverkleidung des bestehenden Tunnels infolge Unterfahrung in den Schnitten A und B. Elastisch-plastische Analyse. Angaben wie Bild 4

Dieser Spannungs- und Verformungszustand (numerisch formuliert) dient als Grundlage zu den weiteren Rechnungen, weshalb er für die ganze Scheibe gespeichert werden muss. In der Phase III (siehe Bild 6c) wird ein neuer Belastungsfall schrittweise eingeführt, indem der Umfang des zweiten Hohlraumes spannungsfrei gemacht wird. Praktisch wird so vorgegangen, dass aus den Spannungen der Stufe II (am Lochrand) Knotenkräfte Q_j ermittelt werden, die dann mit entgegengesetztem Vorzeichen schrittweise (in Inkrementen) angebracht werden. Wegen den grossen Spannungskonzentrationen wird es sich hier im allgemeinen um eine elastisch-plastische Analyse handeln. Als eigentliche Ergebnisse der ganzen Untersuchung gelten die Beanspruchungen und Deformationen des Gewölbes im oberen Tunnel infolge des Belastungsfalles III allein oder aber die totalen Werte nach den Stufen I, II und III (Bild 6). In den Bildern 4 und 5 sind nur die differentiellen Werte, d. h. der Übergang von Stufe II auf Stufe III dargestellt.

Die Verfasser möchten an dieser Stelle Herrn Prof. *H. Grob* für seine wertvollen Anregungen und für die kritische Durchsicht des Manuskriptes bestens danken.

Literaturverzeichnis

[1] STAUB-Handbuch, Fides-Rechenzentrum Zürich, August 1971.

[2] *Kovari, K.:* Ein Beitrag zum Bemessungsproblem von Untertagbauten, Schweiz. Bauzeitung, *87* (1969), H. 37, S. 687–697.

Adresse der Verfasser: Ch. Amstad, dipl. Bauing. ETHZ, Dr. sc. techn. *K. Kovári* und *F. Vannotti,* dipl. Math. ETHZ, Institut für Strassen- und Untertagbau an der ETH, Zürich, Clausiusstrasse 33, 8006 Zürich.

Vermessung und Absteckung für den Gotthard-Strassentunnel

Von **W. Schneider,** Ingenieurgemeinschaft Schneider und Weissmann, Chur und Zürich

DK 625.712.35:528.486

Wie das Wasser frisst sich der Verkehr in wachsenden Strömen durch unser Land. Die Technik lenkt diese Flut auf dem direktesten Weg auch durch den Wall der Alpen; nach dem Bau der Tunnelröhren im Westen und Osten unseres Landes nun bald zentral durch den längsten Strassentunnel der Welt, durch den mythosumwitterten St. Gotthard. Wie lange noch – und die Tremolakehren gehören wie die Teufelsbrücke auch zum Mythos!

Der Vermessung, welcher sich älteste Kulturvölker selbst unterirdisch erfolgreich zu bedienen wussten, stellt sich bei diesem neuen riesigen Bauvorhaben die Aufgabe, als Untertag-Lotse bei einer solchen Maulwurftätigkeit den Weg zu weisen. Sie hat Grundlagen zu schaffen, welche die projektierten Angriffspunkte nach Lage und Höhe genauestens zueinander in Beziehung bringen, und sie hat die Verantwortung dafür zu übernehmen, dass die Achsen der Stollen, der Schächte und des Haupttunnels bis zum erfolgreichen Durchschlag einwandfrei abgesteckt werden.

Das Problem hat sich schon vor hundert Jahren beim Bau des Gotthard-Eisenbahntunnels gestellt. Die Ingenieure *Gelpke* und *Koppe* haben als wahre Pioniere die Absteckungsaufgabe auch nach heutigem Massstab glänzend bewältigt. Auf sich selbst angewiesen, haben sie unter Anwendung neuer Methoden, deren Kenntnis sie sich zum Teil noch besonders aneignen mussten, die Aufmerksamkeit und Bewunderung der Öffentlichkeit auf sich gezogen; selbst der damalige Bundesrat hat sich laufend über die Ergebnisse der Absteckung informieren lassen.

Heute, mit den vorangegangenen Erfahrungen bei der Absteckung grosser Stollensysteme beim Kraftwerkbau und bei Strassentunneln, werden solche ausgedehnte Vermessungsaufgaben im Team gelöst, nicht ohne dass der Einzelne für seinen Teil Verantwortung voll zu übernehmen hätte.

Ausschreibung, Vergebung und Aufteilung der Arbeiten

Das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau (ASF) hat im Auftrag der Kantone Uri und Tessin einige wenige Fachleute, die schon ähnliche Aufträge ausgeführt hatten, im Mai 1967 zu einem Ideen- und gleichzeitigen Kostenwettbewerb für die Vermessungsarbeiten zur Absteckung der Tunnelachse eingeladen. Zu bestimmen waren Lage und Höhe der Tunnelportale und der Schachtmündungen für die damals vorliegenden zwei Tunnelvarianten, im gesamten für acht Angriffsstellen.

Das ASF gab bekannt, dass die Tunnelvermessung Anlass geben werde zur Überprüfung der Landesvermessung und zu weitern wissenschaftlichen Untersuchungen durch die Eidg. Landestopographie und die Schweiz. Geodätische Kommission.

Bei der Übernahme eines solchen verantwortungsvollen Auftrages muss vor allem die Sicherheit des Gelingens Richtschnur sein. Es konnte deshalb keine «billige» Lösung in Frage kommen, um die verlangte Kostenofferte zu gewinnen – aber ebensowenig durfte es ein «brillantes», kostspieliges Vermessungsdispositiv sein.

Das ASF liess die eingegangenen Vermessungsprojekte prüfen, und die Kantone Tessin und Uri haben unter Mitberücksichtigung der Kostenangebote die Arbeit einer zu gründenden Ingenieurgemeinschaft Schneider & Weissmann übertragen.

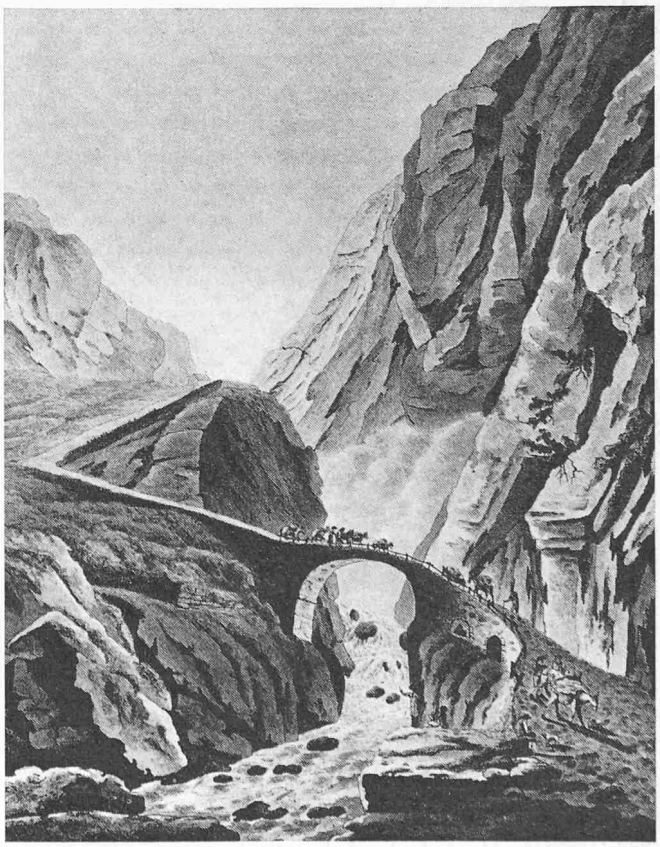

Bild 1. Die alte Teufelsbrücke in der Schöllenen (Photo Schweiz. Verkehrszentrale)