Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 88 (1970)

Heft: 44

Artikel: Anwendung der Federanalogie bei der statischen Berechnung von kreisförmigen Tunnelprofilen

Autor: Winkler, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84652

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: 10.01.2026

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

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

75 Jahre Elektro-Watt

Die Elektro-Watt, Elektrische und Industrielle Unternehmungen AG, feiert in diesem Herbst das Jubiläum ihres 75jährigen Bestehens. Sie hatte schon vor langer Zeit die Bedeutung des «Engineering» [1]) *für die Schweiz und das Ausland erfasst und eine technische Abteilung geschaffen. Diese wurde Ende 1964 juristisch verselbständigt und in die Elektro-Watt Ingenieurunternehmung AG umgewandelt. Diese neue Gesellschaft beschäftigt zurzeit 185 diplomierte Ingenieure, welche die beiden schweizerischen oder ausländische technische Hochschulen absolviert haben, sowie 134 Ingenieur-Techniker HTL. Diese Ingenieure, von denen zahlreiche Mitglieder des SIA sind, bemühen sich, die ihnen aufgegebenen Probleme gemäss den neuesten Erkentnissen zu lösen. In den folgenden Aufsätzen, für die wir den Verfassern bestens danken, werden einige dieser Aufgaben, die auf verschiedenen technischen Gebieten liegen, dargestellt.*

Wir wissen wohl, dass viele Inhaber kleinerer Ingenieur- und Architekturbüros, die den Kern des SIA bilden, diesen gigantischen Konkurrenten nicht gern sehen. Trotzdem haben wir es für richtig erachtet, der Jubilarin dieses Heft zu widmen. Zum ersten, weil die Tätigkeit eines jeden Ingenieurs, ob er in kleinen oder grossen Organisationen mitwirkt, zum Ansehen des schweizerischen Ingenieurstandes beiträgt. Zum zweiten, weil viele Aufgaben der heutigen Zeit derart komplex sind, dass sich das Teamwork zu deren Lösung aufdrängt. Ein solches kann aber auch durch (dauernde oder auf einzelne Objekte beschränkte) Zusammenarbeit kleinerer Büros erreicht werden. Und schliesslich gibt es Aufgaben, die von einem kleinen Büro rationeller und rascher bearbeitet werden. Die Verteilung der Arbeitsgebiete ist eine Frage des Masses, d. h. des Masshaltens. Es gibt ja schon eine beträchtliche Anzahl von Grossen. Wenn ein solcher, wie es zuweilen vorkommt, auch kleine und kleinste Aufträge sucht, verstösst er gegen den Grundsatz «Leben und leben lassen». Doch sind wir überzeugt, dass gerade die Elektro-Watt den Frieden mit den traditionellen Büros zu schaffen weiss. Herzlich wünschen wir ihr ein erspriessliches Wirken im vierten Viertel ihres ersten Jahrhunderts!

Die Redaktion

[1]) *Darunter versteht man die ingenieurmässige, technisch-wirtschaftliche und interdisziplinäre Gesamtbearbeitung komplexer technischer Aufgaben.*

Anwendung der Federanalogie bei der statischen Berechnung von kreisförmigen Tunnelprofilen

DK 624.19.001.2

Von **W. Winkler**, dipl. Ing. ETH, Elektro-Watt Ingenieurunternehmung AG

1. Einleitung

In den nachstehenden Ausführungen soll gezeigt werden, wie anhand eines praktisch durchgerechneten U-Bahn-Profiles mittels eines Ersatzsystems der Einfluss der Bettung mitberücksichtigt werden kann. Diese wird entsprechend der Bodenbeschaffenheit und der Baumethode angenommen, wodurch es möglich wird, deren lokale Gegebenheiten in der Rechnung zu berücksichtigen.

Wie die folgenden Berechnungen zeigen, werden durch die Deformation von schlanken Konstruktionen im umgebenden Material Kräfte mobilisiert, die, durch die Bettungsziffer erfasst, wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit dieser Konstruktionen haben.

2. Grundlagen

2.1 Geologie

Das untersuchte Tunnelprofil von einem Innendurchmesser von 6 m liegt in einer fest gelagerten sandig-siltigen Schicht, die bei einem Reibungswinkel von rund 32° und bei einem Raumgewicht von 1,8 t/m³ noch eine recht ansehnliche Kohäsion aufweist. Dieser relativ hohe Wert ist auf eine Verfesti-

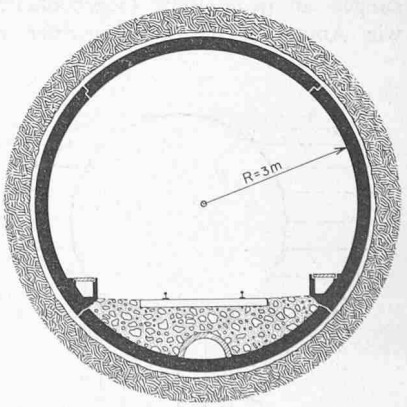

Bild 1. Querschnitt des untersuchten Tunnelprofils, Massstab 1:150

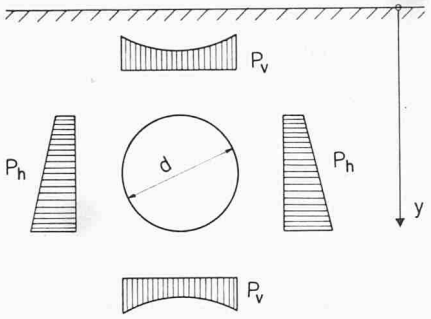

Bild 2. Lasten

gung durch Kalk zurückzuführen. Die Erdüberdeckung über Scheitel beträgt rund 12 m.

2.2 Konstruktion

Die Tunnelwandung besteht aus vier vorfabrizierten, miteinander gelenkig verbundenen Stahlbetontübbingen, die je einen Kreissektor von 90° umfassen. Untersucht wurden Wandstärken von 25 cm, 30 cm und 35 cm (Bild 1).

2.3 Belastungsannahmen

Um die Zusammenhänge verständlicher zu machen, werden als Auflast nur das Bodeneigengewicht und der Seitendruck mit zwei Grenzwerten in Rechnung gestellt. Die übrigen Lasten, wie Verkehrslasten, Auflasten von Häusern, ungleichmässige Temperaturänderungen usw., werden in den nachfolgenden Vergleichsrechnungen weggelassen. Die vertikale Last aus dem Bodeneigengewicht $p_v = \gamma \cdot y$ wird ohne Abminderung und der seitliche Erddruck $p_h = \lambda \cdot \gamma \cdot y$ mit den Werten λ a $= 1/6$ und λo $= 1/2$ eingesetzt (Bild 2).

3. Angenommenes statisches System

Die Berechnung erfolgt an einem ebenen, elastisch gebetteten System, wobei der stetig gekrümmte, in der Achsrichtung 1 m breite Zylinderring durch ein Polygon ersetzt wird.

Die elastische Bettung wird mit Hilfe von horizontalen und vertikalen Federstäben ($J = 0$) erfasst. Anpassungen an geologische Gegebenheiten, wie Änderung der Bettungsziffer bei

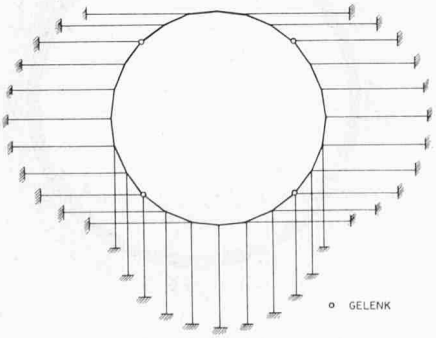

Bild 3. Statisches System

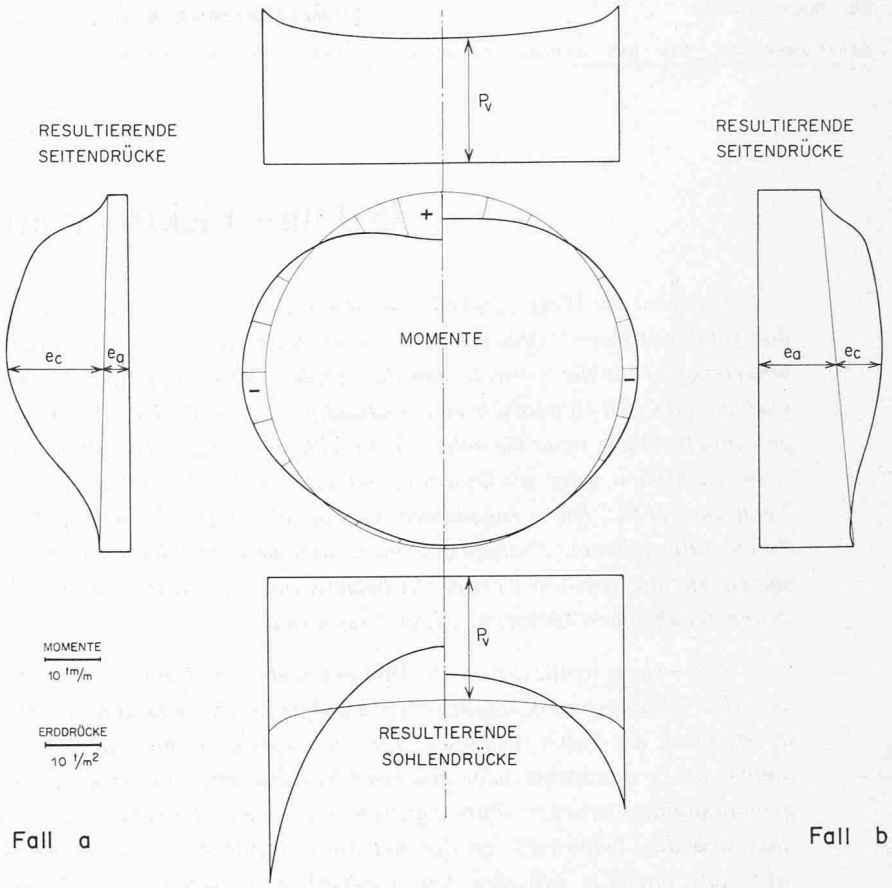

Bild 4. Momente, Seiten- und Sohlendrücke

Schichtwechsel, lassen sich mit dieser orthogonalen Anordnung der Federstäbe eher vornehmen als bei einer radialen Anordnung. Die Querschnittsfläche eines Stabes bei gegebener Federlänge lässt sich nach der Gleichung

$$\frac{p}{c_b} = \Delta l = \frac{a \cdot b \cdot l \cdot p}{E_b \cdot F}$$

berechnen, wobei bedeuten:

- p die Pressung
- c_b die Bettungsziffer
- a der Abstand der Federstäbe
- b die Breite des Zylinderringes in der Achsrichtung
- l die Federlänge
- E_b der Elastizitätsmodul des Betons
- F die Querschnittsfläche des Federstabes

Die Bettungszahl erhält man näherungsweise, wenn die Steifezahl des Bodens durch den Tunnelradius dividiert wird. Es wird in der Berechnung zwischen der vertikalen und der horizontalen Bettung unterschieden, wobei die Bettungszahl für die horizontalen Stäbe jeweils mit dem halben Wert eingesetzt wird. Mit dieser vorsichtigen Annahme berücksichtigt man die allfällige seitliche Auflockerung des Erdmaterials. Um die Auflast nicht abzumindern, wird die vertikale Bettung nur von unten her wirkend in Rechnung gestellt (Bild 3).

Die Wirkungsweise der elastischen Bettung wird deutlicher durch Einführung von zwei Bettungszahlen:

$c_{bv} = 5$ kg/cm³ und $c_{bv} = 2{,}5$ kg/cm³.

4. Statische Berechnung

Die Schnittkräfte an dem im Bild 3 dargestellten statischen System wurden mit dem STRESS-Programm für ebene Rahmen bei der Arithma AG, Zürich, berechnet. Es wurden die folgenden Fälle angenommen:

a) Die vertikale Auflast und der abgeminderte Seitendruck wirken auf den elastisch gebetteten Kreisring. Diese Annahme stellt den Fall dar, bei dem der seitliche Erddruck vor dem Hinterfüllen der Hohlräume durch Verschiebungen im Erdmaterial reduziert wurde.

b) Die vertikale Auflast und der Ruhedruck wirken auf den elastisch gebetteten Kreisring. Dieser Fall entspricht einer Bauausführung, bei der die Hohlräume unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge satt hinterfüllt werden.

c) Die vertikale Auflast und der abgeminderte Seitendruck wirken auf den nicht gebetteten Kreisring. Dieser Fall entspricht einer Ausführung, bei der die Hohlräume nicht hinterfüllt werden.

d) Die vertikale Auflast und der Ruhedruck wirken auf den Kreisring ohne

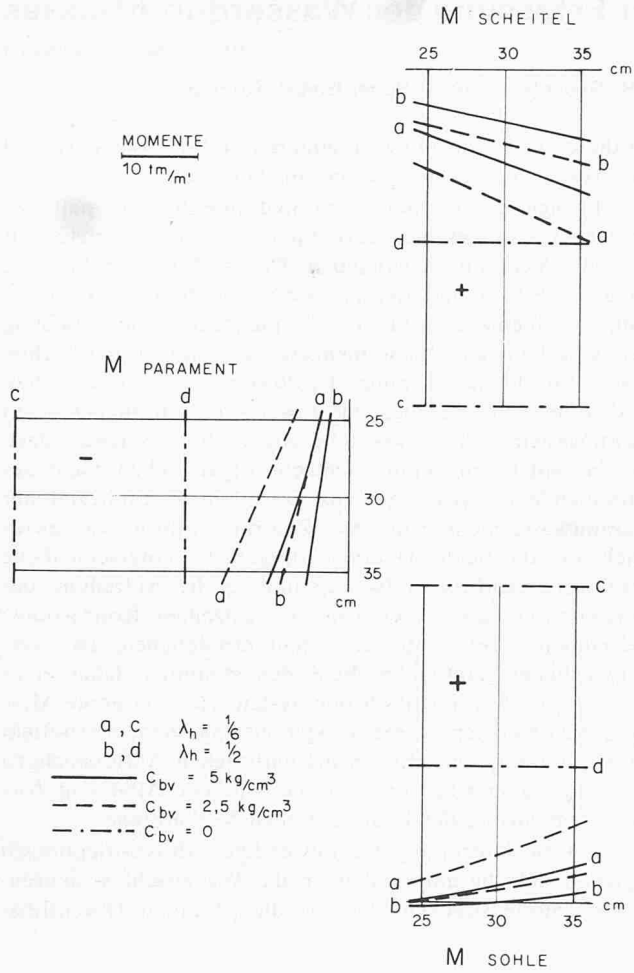

Bild 5. Momente

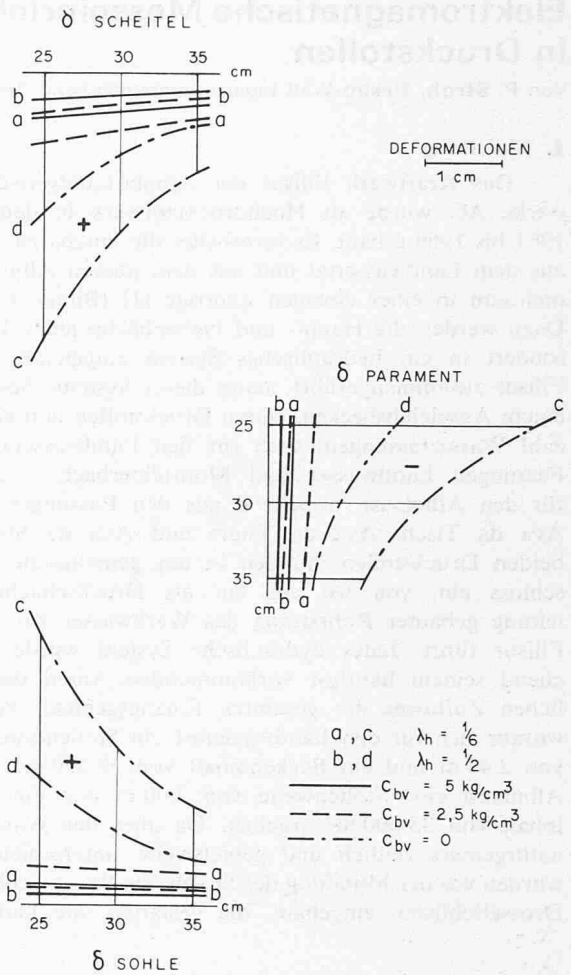

Bild 6. Deformationen

Berücksichtigung der Bettung. – Die Tunnelprofile sind früher oft unter dieser Annahme berechnet worden.

5. Die Ergebnisse

Im Bild 4 wurde der Momentverlauf mit den zugehörigen Erddrücken und Bodenreaktionen an dem elastisch gebetteten Kreisring für die Fälle a und b bei einer Wandstärke von 25 cm und bei einer Bettungszahl von $c_{bv} = 5$ kg/cm³ dargestellt. Der Einfluss der Bettung ist anhand der Zunahme der Seitendrücke deutlich erkennbar. Das stärkere Anwachsen der seitlichen Bodenreaktionen e_c infolge Bettung im Fall a folgt aus grösseren Deformationen des Kreisprofils. Entsprechend nehmen hier auch die Biegemomente zu, obwohl die resultierenden Seitendrücke der beiden Fälle praktisch identisch sind.

In den Bildern 5 und 6 wurden die Momente und die Deformationen im Scheitel, im Parament und in der Sohle in Abhängigkeit der Wandstärken für die Fälle a, b, c und d zusammengestellt. Die positiven Momente verursachen Zug an der Innenseite des Ringes. Die nach innen gerichtete Verschiebung wird als positiv bezeichnet. Bei den Fällen a und b werden durch das Variieren der Wandstärke die Deformationen nur wenig beeinflusst, hingegen zeigen die Momente eine Zunahme entsprechend den Steifigkeiten. Bei c und d wird das System infolge der symmetrischen Belastung statisch bestimmt, deshalb bleiben die Biegemomente bei Änderung der Wandstärke konstant.

6. Auswertung der Ergebnisse

Die obigen Untersuchungen an dem elastisch gebetteten Kreisring haben gezeigt, dass die durch Belastung erzeugten Deformationen eine Reaktion infolge Bettung im Erdmaterial hervorrufen, die ihrerseits bei der seitlichen Stützung des Kreisprofils wesentlich mithilft.

Die Grösse der seitlichen Bodenreaktionen ist bei gegebener Vertikallast hauptsächlich von dem als Horizontallast eingeführten Erddruck abhängig (Bild 4). Je grösser der seitliche Erddruck angenommen werden kann, desto kleiner werden infolge Bettung die mobilisierten seitlichen Stützkräfte, wobei die Summe der beiden auch in jenen Fällen, in denen die Bettungsziffer auf die Hälfte reduziert wurde, annähernd gleich blieb. Hingegen verursachen die erhöhten Deformationen grössere Momente. Bei schlanken oder durch Gelenke flexibler gewordenen Konstruktionen, die selbstverständlich auch auf Stabilität untersucht werden müssen, spielt die Steifigkeit der Tunnelwandung in bezug auf die Bodenreaktionen keine allzu grosse Rolle. Dies bestätigt auch das Bild 6. Diese an einem praktischen Beispiel unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gewählten Wandstärken haben hier also auf die Deformationen nur einen geringen Einfluss.

Die Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass die Nichtberücksichtigung der elastischen Bettung zu Biegemomenten führt, die das Vielfache der am gebetteten Kreisring errechneten Momente betragen können. Deshalb sind in der Praxis nur solche Baumethoden zu wählen, bei denen der Einfluss von Bettung und Ruhedruck gewährleistet ist, um eine wirtschaftliche Tunnelkonstruktion zu erreichen. In Frage kommen moderne Baumethoden mit Bohr- oder Schildvortrieb, bei denen die Hohlräume unmittelbar nach dem Einbau der Tübbinge satt hinterfüllt werden.