

Gedanken zur Berechnung der Stahlbetontübbinge

Autor(en): **Baumgartner, Alfons**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **105 (1987)**

Heft 47

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76756>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Gedanken zur Berechnung der Stahlbetontübbinge

Von Alfons Baumgartner, Winterthur

Einleitung

Die Berechnung von vorfabrizierten Stahlbetontübbingen kann nach zwei grundsätzlich verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Einerseits mit dem Programm der finiten Elemente, wobei das statische System das Traggewölbe und das Bodenmaterial umfasst, d.h. die Eigenschaften des Bodenmaterials sind im statischen System inbegriffen. Andererseits mit der Stabstatik, bei welcher das statische System aus dem Traggewölbe und der Bettung des Bodenmaterials besteht. Dabei wird das Gewicht des Bodens in Form von Erddrücken als Belastung eingeführt. Die Eigenschaften des Bodenmaterials sind in bezug auf die Bettung im statischen System enthalten und für die Belastungsannahmen sind die übrigen Bodenkennwerte massgebend.

Beim Tunnel Quartan wurde die Berechnung der Tübbinge mit der Stabstatik durchgeführt. Mit vier verschiedenen Messmethoden wurde das Verformungsverhalten der Tübbingauskleidung überprüft und gleichzeitig versucht, Rückschlüsse auf die effektiv wirkende Belastung und die effektive Grössenordnung der Bettung zu ziehen.

Projekt-Statik

Grundlagen

Angenommene Materialeigenschaften

Der statischen Berechnung wurden folgende Materialkennwerte zugrunde gelegt:

Beton: Würfeldruckfestigkeit
 $\beta W28 = 40 \text{ N/mm}^2$
 Zulässige Randspannung
 $\sigma_r = 16(20) \text{ N/mm}^2$
 Elastizitätsmodul
 $E = 21\,000 \text{ N/mm}^2$

Stahl: (Hochwertiger Stahl III)
 Streckgrenze (2‰)
 $\sigma_{2,0} = 460 \text{ N/mm}^2$
 Zulässige Spannung
 $\sigma_{ezul} = 240(280) \text{ N/mm}^2$

Boden:

Aufgrund des geologischen Berichtes wurden folgende Materialeigenschaften für die statische Berechnung angenommen.

Feuchtraumgewicht $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
 Reibungswinkel $\varphi = 32^\circ$

Kohäsion $c = 0 \text{ kN/m}^3$
 ME-Wert $ME = 70 \text{ MN/m}^2$

Konstruktion und Tragverhalten des Aussengewölbes

Das Aussengewölbe des Tunnels besteht aus sechs vorfabrizierten, miteinander gelenkig verbundenen Tübbingelementen. Ein First-, zwei Ulm-, zwei Sohl-tübbinge und der Schlussstein bilden zusammengesetzt einen Kreisring mit einem Radius von 5,5 m. Der First-, sowie die Ulmtübbinge weisen eine Stärke von 30 cm auf. Die Stärke des Sohl-tübbinges variiert zwischen 30 cm und 55 cm.

Damit dieser an sich instabile Gelenkring tragfähig ist, sind äussere Stützkkräfte notwendig. Diese Kräfte werden durch das den Tunnel umgebende Bodenmaterial gebildet. Nach aussen gerichtete Verformungen des Gewölbes erzeugen eine Erhöhung, nach innen gerichtete Verformungen eine Verminderung des Erddruckes. Durch diese Konstruktion des Gewölbes ist es möglich, das Bodenmaterial hauptsächlich zur Stützung des Hohlraumes heranzuziehen.

Belastungen

Für die Berechnung wurden folgende zwei Belastungsgruppen unterschieden:

- Transport-, Lagerungs- und Montage-lasten. Diese Beanspruchungen konnten durch einen minimalen Armierungsgehalt abgedeckt werden.
- Belastungen der Tübbinge nach dem Einbau durch die Schildpressendrucke. Vertikale und horizontale Erdlasten. Allfällige Verkehrslasten bei kleiner Überdeckung.

Im Folgenden sollen einige Gedanken zur Ermittlung der vertikalen und horizontalen Erddrücke erläutert werden.

Es wird angenommen, dass im ungestörten Boden Ruhedruck herrscht und somit folgende Beziehungen gelten:

$$- P_v = \gamma \times h$$

$$- P_h = \lambda_o \times \gamma \times h$$

Wobei γ das Raumgewicht des Bodens, h die Überlagerungshöhe und λ_o den Ruhedruckbeiwert bedeuten.

Durch den Vortrieb mit dem Schild, sowie die Verformungen des flexiblen Aussengewölbes werden im Bereich der Tunnelröhre kleinere oder grössere Auflockerungen und Spannungsum-

lagerungen im Bodenmaterial hervorgerufen. Bei genügender Überdeckung kann sich im Boden über einem nachgebenden First ein Gewölbe bilden, wodurch der vertikale Ruhedruck abgemindert wird. Diese reduzierte Vertikalbelastung wurde nach einer Arbeit von A. Voellmy berechnet. Vergleiche mit der Berechnungsmethode von K. Terzaghi, sowie mit Messergebnissen anlässlich des Baues des Donnerbühl-tunnels in Bern ergaben, dass die Berechnung nach Voellmy die grössten Werte ergibt und somit auf der sicheren Seite liegt.

Da sich über dem First der vertikale Ruhedruck vermindert, muss die restliche Last seitlich des Tunnels abgetragen werden, was zu einer Erhöhung der Vertikalspannungen führt und den Seitendruck beeinflusst. Die Laboruntersuchungen für den Bau des Donnerbühl-tunnels ergaben Seitendrucke, welche ungefähr dem 1,65fachen Wert des aktiven Erddruckes entsprachen. Da für die Biegebeanspruchung ausser der Bettung hauptsächlich die Differenz zwischen Vertikal- und Horizontalbelastung massgebend ist, haben wir die Erhöhung des aktiven Erddruckes auf 25% bis 30% beschränkt, um auf der sicheren Seite zu bleiben.

Statisches System und Berechnung

Für die Berechnung wurde ein ebenes, elastisch gebettetes Stabsystem gewählt, wobei die Kreisform der Tübbinge durch ein Polygon ersetzt wurde. Bei jeder Stossfuge der Tübbinge wurde im statischen System ein Gelenk angeordnet. Da der Schlussstein nur eine Länge von 60 cm aufweist, wurde an seiner Stelle für die Berechnung ein Gelenk angenommen. Die Bettung des Bodenmaterials, welche dem Kreisring mit fünf Gelenken die notwendige Stabilität verschafft, wurde durch radial angeordnete Stäbe dargestellt.

Die Berechnung wurde auf einem eigenen Computer durchgeführt.

Bemessung

Die Bemessung der Tübbinge wurde auf dem Bruchniveau durchgeführt. Da ein Versagen eines Tübbinges infolge Normalkraft das Versagen des Tragsystemes zur Folge hätte, wurde ein Sicherheitsfaktor bezüglich Anwachsen der Normalkraft von 1,6 vorgesehen. Wenn die Armierung infolge Vergrösserung der Biegebeanspruchung des Tübbings die Streckgrenze erreicht, bildet sich ein plastisches Gelenk. Solange die Rotationsfähigkeit dieses Gelenkes gewährleistet ist, besteht für das Gesamtsystem keine Gefahr des Versagens. Aus diesen Gründen wurde für den Sicherheitsfaktor bezüglich An-

wachsen des Biegemomentes ein kleinerer Faktor von 1,2 gewählt. Die Bemessung erfolgte mit Hilfe von Interaktionsdiagrammen.

Weitere Untersuchungen

Zusätzlich zu den erwähnten Berechnungen wurden weitere Untersuchungen durchgeführt:

Da die Eingangswerte der statischen Berechnung starke Streuungen aufweisen, wurden Berechnungen mit verschiedenen Bettungsziffern durchgeführt. Weiter wurde untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Erddrücke auf das System ausüben und welche Änderungen die Schnittkräfte bei der Variation der Biegesteifigkeit des Tübbingringes erfahren.

Nur mit Hilfe solcher Zusatzuntersuchungen konnte eine Grundlage geschaffen werden, welche sich aus der statischen Berechnung ergebende Materialstärken zu verantworten erlaubt.

Folgerungen aufgrund durchgeführter Messungen

Messprogramm

Es wurden nur Messungen durchgeführt, von welchen wir annahmen, dass sie für allfällige Vergleiche mit der statischen Berechnung von Bedeutung sein könnten:

- Konvergenzmessungen
- Gleitmikrometernmessungen
- Dehnungsmessungen
- Messungen der Tübbingverformungen

Konvergenzmessungen

Um über die Verformung des Gewölbes laufend informiert zu sein, wurden in den beiden Tunnelröhren in Abständen von mindestens 100 m Konvergenzmessungen durchgeführt.

Gleitmikrometernmessungen

Der Zweck dieser Messungen war die Erfassung der Vertikalverformungen des Bodens im Bereich des Tunnels. Es wurden durch die Firma Solexperts AG, Schwerzenbach, in drei Querschnitten Messungen durchgeführt. Leider sind die Ergebnisse eines Querschnittes durch den starken Verbruch des Bodens während des Vortriebs unbrauchbar geworden.

Dehnungsmessungen

In zwei Querschnitten wurden in Zusammenarbeit mit der EMPA die Dehnungen der Tübbing in Tunnelquerrichtung gemessen, um die vorhandenen Schnittkräfte ermitteln zu können.

Tübbingverformungen

In Abständen von 6,00 m wurden zusätzlich zu den Konvergenzmessungen die Verformungen der Tübbingelemente ermittelt.

Messergebnisse

Konvergenzmessungen

Unter der Voraussetzung, dass sich der *ME*-Wert des Bodens in Tunnellängsrichtung nicht wesentlich ändert, müssten die Verformungen des Gewölbes in Abhängigkeit der Überlagerungshöhe variieren. Nach einem Vergleich der zahlreichen Konvergenzmessungen konnte jedoch keine Gesetzmässigkeit festgestellt werden, was folgende Ursachen haben kann:

- In dem wechselhaften Bodenmaterial variieren die Kennwerte wie *ME*-Wert und innerer Reibungswinkel sehr stark, was einen Einfluss auf die Bettung und die Erddrücke, und somit auf die Verformungen hat.
- Beim Vorschub des Schildes verliert der zuletzt eingebaute Tübbingring den Schutz des Schildschwanzes und es verbleibt rund um den Ring ein Hohlraum in der Stärke des Schildschwanzes (8 cm). Dieser Hohlraum wurde sofort unten mit Zementmörtel und oben mit Rollgerste verpresst. Diese Verpressung ist leider nicht kontrollierbar und war vermutlich teilweise ungenügend. Das hatte zur Folge, dass die seitliche Stützung des Tübbingringes durch das Bodenmaterial erst nach grösseren Verformungen einsetzte.
- Durch den Vortrieb war die Auflockerung des Materials so gross, dass sich die Erddrücke sowie die Bettung stark veränderten.

Welche dieser Ursachen oder deren Kombination für die unterschiedlichen Verformungen massgebend waren, konnte nicht eindeutig festgestellt werden.

Gleitmikrometernmessungen

Die Verformungen des Bodens in den Messquerschnitten lassen auf eine Auflockerungshöhe von rund 12 m schliessen. Der vertikale Erddruck beträgt somit bei den zwei Messquerschnitten rund 250 kN/mm². Die Berechnung des Vertikaldruckes nach Voellmy ergab für Überdeckungen von 27 m und 31 m Werte von 250 kN/mm² und 260 kN/mm². Die berechneten Vertikaldrücke stimmen somit gut mit den gemessenen Werten überein. Es muss jedoch eingeschränkt werden, dass nur zwei Messquerschnitte zur Verfügung standen.

Dehnungsmessungen

Um aus den gemessenen Dehnungen die Schnittkräfte ermitteln zu können,

wurden an den entsprechenden Tübbing Kernbohrungen vorgenommen und an den entnommenen Bohrproben der *E*-Modul des Betons bestimmt. Die Berechnung der Normalkräfte ergab im Umbereich einen Mittelwert von rund 1200 kN. Dies entspricht einem Vertikaldruck von etwa 220 kN/m² und einer Auflockerungshöhe von rund 10 m. Nach Voellmy wurde für eine Überlagerungshöhe von 15 m ein Vertikaldruck von 200 kN/m² und somit eine Auflockerungshöhe von 9,5 m ermittelt.

Die aus den Messungen berechneten Momente sind teilweise um 10–20% grösser als die Werte aus der statischen Berechnung. Diese Differenz der Momente lässt sich aus dem Unterschied zwischen dem für die Berechnung verwendeten, kleineren und dem an Bohrkernen gemessenen, grösseren *E*-Modul erklären. Da die Momente zum Teil aus Zwängungen entstanden sind, werden sie sich infolge Kriechens des Betons vermindern.

Tübbingverformungen

Nach einem Vergleich der verschiedenen Messergebnisse mussten dieselben Unregelmässigkeiten, wie bei den Konvergenzmessungen festgestellt werden. Die Messungen liessen keine Rückschlüsse auf die Überlagerungshöhe zu und konnten somit nur zur zusätzlichen Kontrolle der Konvergenzmessungen dienen.

Folgerungen

Diejenigen Messergebnisse, welche eine Überprüfung der Grundlagen der statischen Berechnung zuliesse, ergaben auch eine gute Übereinstimmung mit denselben. Da die Messergebnisse teilweise nur aus zwei Querschnitten stammen, kann die vorgenannte Aussage nicht auf den gesamten Tunnelbereich bezogen werden. Beim Schildvortrieb können die Verfüllung des Hohlraumes zwischen den Tübbing und dem Bodenmaterial, sowie die Schildpressendrucke unter Umständen grossen Einfluss auf die auftretenden Spannungen und Verformungen der Tübbing haben. Aus diesen Gründen sind Rückschlüsse aus Messungen an Tübbing auf Druck- und Bettungsverhältnisse des Bodens mit Vorsicht zu beurteilen.

Eine zusätzliche Kontrolle der Grundlagen der Berechnung aufgrund der Verformungsmessungen des Bodens, erlaubt eine bessere Beurteilung des Verhaltens des gesamten Tragsystems, als Messungen an Tübbing allein.

Adresse des Verfassers: A. Baumgartner, Bauingenieur SIA, Grünenfelder + Keller AG, 8400 Winterthur und 9500 Wil.