

Einflussfaktoren auf die Erddruckverteilung bei eingeschütteten Tunneln

Ansgar Kirsch, Bruno Mattle

ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH

Zusammenfassung: Eingeschüttete Galerien und Tunnel stellen aus statischer Sicht nach wie vor kritische Bauwerke dar, da deren Beanspruchung von vielen, nicht eindeutig bestimmbar, Einflussfaktoren abhängig ist. Anhand numerischer Studien wird in der folgenden Ausarbeitung der Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die resultierende Erddruckverteilung untersucht. Ein Vergleich mit analytischen Ansätzen, die in der Ingenieurpraxis verwendet werden, deutet an, dass diese die Umverteilung des Erddrucks teilweise erheblich unterschätzen. Die statische Untersuchung der Tragwerke zeigt jedoch, dass trotz deutlich streuender Erddruckansätze die Streuung in der rechnerischen Beanspruchung weniger ausgeprägt ist.

1 EINLEITUNG

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen werden Tunnel häufig in offener Bauweise hergestellt und anschließend, zumindest teilweise, wieder eingeschüttet. Dabei kommen in der Regel Gewölbequerschnitte zum Einsatz. Ähnliche Querschnitte finden bei Lawinenschutzgalerien Anwendung. In beiden Fällen macht man sich die gekrümmte Form des Tragwerks zunutze, um Biegemomente im System gering zu halten.

Aufgrund der Topographie des Geländes oder gestalterischer Aspekte werden diese Bauwerke oft unsymmetrisch eingeschüttet. Dadurch sind diese als besonders empfindlich anzusehen: durch die unsymmetrische Belastung bilden sich im oberen Bereich der bergseitigen Ulme deutliche Spitzen in der Momentenverteilung aus, die weder in der Größe noch in der genauen Lage exakt zu prognostizieren sind.

Die Bemessung von Tunneln in offener Bauweise erfolgt in der Regel mit elastisch gebetteten Stabwerken. In diesen Modellen wird die Interaktion zwischen Boden und Bauwerk über Federn abgebildet. Die Belastung aus dem Erdreich wird als äußere Flächenlast aufgebracht. Die Schwierigkeit bei dieser entkoppelten Modellierung ist die Abschätzung einer realistischen Bettung sowie der Größe und der Verteilung des Erddrucks. Eine Fehlein-

schätzung der resultierenden Erddruckverteilung ist einer der wesentlichen Gründe für die aufgetretenen Schadensfälle (vgl. [3], [4]).

Neben den mechanischen Parametern (Scherfestigkeit und Steifigkeit) des Untergrundes und der Hinterfüllung beeinflussen folgende Faktoren die resultierende Lastverteilung auf unsymmetrisch eingeschüttete Tunnel, und damit die sich ergebenden Schnittgrößen:

- Reibung zwischen Tragwerk und Boden
- Steifigkeitsunterschiede zwischen den beiden Auflagern
- Geometrie der Einschüttung (ebene oder geneigte Böschung)
- Relativbewegung zwischen Bauwerk und Boden
- Bauphasen zur Einschüttung des Tunnels
- Sohlausbildung (offen oder geschlossen)
- Verdichtung der Einschüttung

Im Folgenden wird herausgearbeitet, welchen Einfluss einige der oben genannten Faktoren auf die resultierende Erddruckverteilung haben. Nach einer kurzen Vorstellung der in der Ingenieurpraxis verwendeten Erddruckansätze werden zweidimensionale Finite Elemente-Berechnungen vorgestellt, die mit dem Programm *Phase2* durchgeführt wurden. Einzelheiten des numerischen Modells, die Wahl der Eingabeparameter und die Ergebnisse der Parameterstudie werden präsentiert. Ziel des Beitrags ist es, aufzuzeigen, unter welchen Rahmenbedingungen die vorhandenen analytischen Belastungsansätze zutreffende Ergebnisse liefern.

2 ANSÄTZE FÜR DIE VERTEILUNG DES ERDDRUCKS AUF GALERIEN

In der Literatur finden sich verschiedene Vorschläge für den Ansatz des Erddrucks auf Tunnel in offener Bauweise. Diese werden kurz vorgestellt, um anschließend eine Bewertung aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Finite Elemente-Berechnungen zu ermöglichen. Es wird darauf hingewiesen, dass aus mechanischer Sicht die Wahl des Erddrucks bei Stabwerksmodellen grundsätzlich ein iterativer Prozess unter Berücksichtigung der Tragwerksverformungen ist, der jedoch häufig nicht gänzlich umgesetzt wird.

In den ersten statischen Berechnungen zu überschütteten Galerien wurde, analog zu anderen Stützkonstruktionen, ein aktiver bzw. erhöhter Coulomb'scher Erddruck nach ÖNORM B4434 angesetzt. Diese klassische Erddruckverteilung nimmt linear mit der Tiefe zu. Einige Schäden an Galerien im oberen Bereich der bergseitigen Ulme wurden darauf zurückgeführt, dass eine solche Erddruckverteilung die tatsächlich wirkenden Spannungen zwischen Schale und Boden nur unzureichend wiedergibt [2][1].

Von Schober [5] (vgl. auch [2]) wurde eine alternative Erddruckverteilung aus Erddruckmessungen abgeleitet. Ausgehend vom erhöhten aktiven Erddruck wird eine flächengleiche Umlagerung des Drucks in den oberen Bereich der Ulme durchgeführt. Die Umlagerungsfigur hängt dabei vom Neigungswinkel β der angrenzenden Böschung ab (vgl. [2]).

Gemäß Richtlinie 853 der Deutschen Bahn [1] müssen zwei Lastfallkombinationen auf Tunnel in offener Bauweise untersucht werden:

- Minimaler horizontaler Erddruck gleichzeitig mit maximaler Firstauflast
- Maximaler horizontaler Erddruck gleichzeitig mit minimaler Firstauflast

Die Berechnung der vertikalen Firstauflast erfolgt dabei durch Multiplikation der Wichte mit dem 1,0-fachen (minimale) bzw. 1,3-fachen (maximale) der Überlagerungshöhe h_{ii} . Bei Erhöhung der Firstauflast wird die Vertikalspannung auf die seitlichen Flanken um 30% abgemindert. Der minimale horizontale Erddruck wird aus dem aktiven Erddruck abgeleitet, der maximale aus dem Erdruhedruck. In beiden Fällen wird der Druck in ein flächengleiches Rechteck mit konstanter Erddruckordinate umgelagert.

Freiseder und Schmid [3] schlagen aufgrund von Messungen an ausgeführten Tunneln in offener Bauweise eine weitere Verteilung des horizontalen Erddrucks vor. Dabei wird der erhöhte aktive Erddruck (50% aktiver Erddruck, 50% Erdruhedruck) flächengleich umgelagert, wobei die Ordinate im Fußpunkt der umgelagerten Erddruckfigur den halben Wert des nicht umgelagerten Erddrucks aufweist.

Von der Abteilung Brücken- und Tunnelbau der Landesbaudirektion Tirol wird üblicherweise eine Belastungsfigur vorgeschlagen, die ebenfalls vom erhöhten aktiven Erddruck ausgeht. Dieser wird in einen über die Tiefe konstanten Erddruck umgelagert und zusätzlich in der oberen Hälfte um 50% erhöht. Diese Erhöhung ist als alternierender Lastfall zu betrachten [2].

Für die Talseite von stark ungleichmäßig eingeschütteten Galerien schlagen Freiseder und Schmid eine linear mit der Tiefe zunehmende, umgelagerte Erdruhedruckverteilung vor. Zudem ist die resultierende Erddruckwirkung DH aus der Differenz der Erddrücke zwischen Berg- und Talseite oberhalb der Firste bis zur Geländeoberkante zu berücksichtigen. Dies erfolgt üblicherweise durch den Ansatz von Einzelkräften im Firstbereich.

3 VERGLEICHENDES BEISPIEL

Anhand des Beispiels eines Tunnels in offener Bauweise werden die klassischen Erddruckansätze mit den Ergebnissen einer numerischen Parameterstudie verglichen.

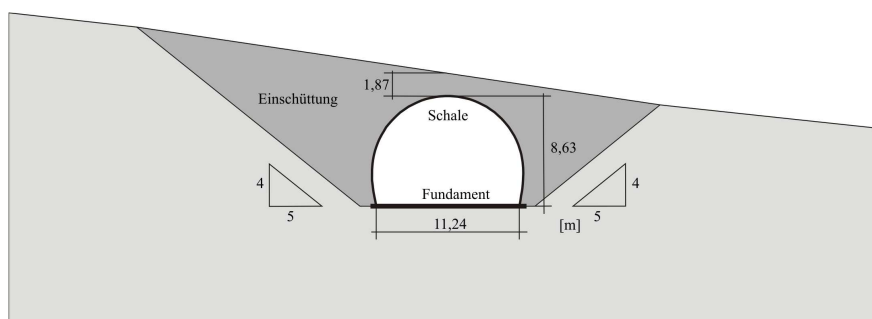


Abbildung 1: Querschnitt des betrachteten Problems

3.1 Geometrie der Problemstellung

Dazu dient der in Abb. 1 dargestellte Querschnitt mit einer maximalen Tunnelbreite von 11,84 m. Der Tunnel liegt in einem Einschnitt von ca. 11 m Tiefe. Die Geländeoberkante ist mit 8,4° schräg geneigt. Die Neigung des Einschnitts wurde mit 4:5 angenommen.

3.2 Numerische Modellierung

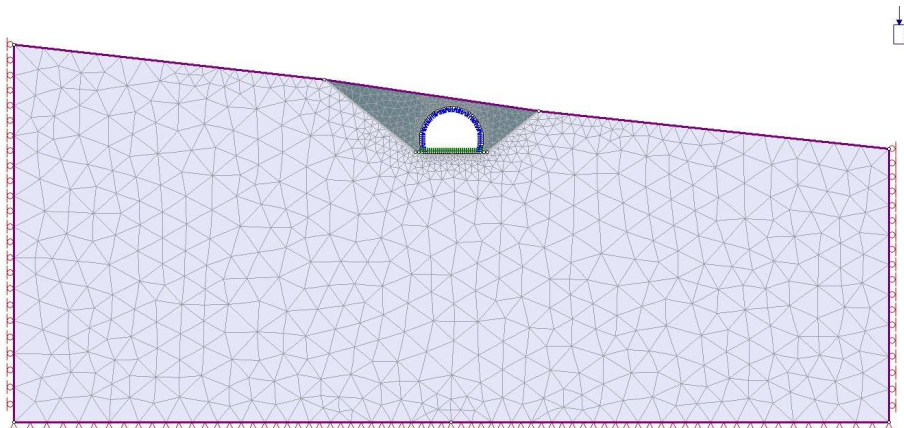


Abbildung 2: Diskretisierung des Modells

Die Problemstellung wurde mit insgesamt 2216 sechsknotigen Dreieckselementen mit quadratischem Verschiebungsansatz modelliert. Das Modell (vgl. Abb. 2) weist insgesamt eine Breite von 170 m und eine Tiefe unter Tunnelsohle von ca. 50 m auf. Die Geometrie des Gewölbequerschnitts wurde in Übereinstimmung mit Abb. 1 gewählt.

Materialmodelle

Sowohl der anstehende Boden im Bereich des Tunnels als auch die Auffüllung wurden mit einem linear elastisch, ideal plastischen Materialmodell mit Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb modelliert. Die verwendeten Eingabeparameter für den sog. Referenzfall sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Materialparameter für Boden und Überschüttung (Referenzfall)

Parameter	Bezeichner	Einheit	Wert	
			Untergrund	Überschüttung
Elastizitätsmodul	E	MN/m ²	100	50
Querdehnzahl	ν	-	0,3	0,3
Reibungswinkel	φ	°	35	35
Kohäsion	c	kN/m ²	5	0
Wichte des Bodens	γ	kN/m ³	20	20
Seitendruckbeiwert	K_0	-	0,6	0,6

Für das Tunnelgewölbe und das Fundament aus Stahlbeton wurden Balkenelemente verwendet (vgl. Tab. 2). Zudem wurde die Schnittstelle zwischen Stahlbeton und Boden über eigene Kontaktelemente, sogenannte „joints“, definiert. Die verwendeten Kontakteigenschaften für den Referenzfall sind in Tab. 3 zusammengestellt.

Tabelle 2: Materialparameter und Geometrie für Tunnelgewölbe und Fundament

Parameter	Bezeichner	Einheit	Wert	
			<i>Gewölbe</i>	<i>Fundament</i>
Elastizitätsmodul	E	MN/m ²	30.000	30.000
Querdehnzahl	ν	-	0,2	0,2
Dicke	d	m	0,65	0,80
Wichte	γ	kN/m ³	25	25

Tabelle 3: Kontakteigenschaften zwischen Stahlbeton und Boden (joints)

Parameter	Bezeichner	Einheit	Wert	
			<i>Membran</i>	<i>Fundament</i>
Kontaktkriterium			Mohr-Coulomb	starrer Verbund
Zugfestigkeit		MN/m ²	0	
Reibungswinkel	φ	°	15	
Kohäsion	c	kN/m ²	1	
Normalsteifigkeit	k_n	MN/m ² /m	250.000	1.000.000
Normalsteifigkeit	k_n	MN/m ² /m	10	100.000

Modellierungsschritte

Im numerischen Modell wurden generell folgende Schritte vorgegeben:

1. Berechnung des Ausgangsspannungszustandes für das Gelände (inkl. Einschnitt)
2. Aktivieren der Elemente für Gewölbe und Fundament
3. Herstellung der Überschüttung durch Aktivieren *aller* zugehörigen Elemente

Parameterstudie

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf die resultierende Belastung der Schale zu untersuchen, wurden folgende Varianten zum oben vorgestellten Referenzfall untersucht:

- Nr. 1a: Reduktion von Reibungswinkel und Kohäsion der Membran (joint) auf Null
- Nr. 1b: Vollständiger, starrer Verbund zwischen Membran und Gewölbe sowie Erhöhung der Steifigkeit im Kontakt
- Nr. 2: Offene Sohle (zwei Streifenfundamente anstatt einer durchgehenden Platte)
- Nr. 3: Erhöhung der Steifigkeit des Untergrundes ($E_{\text{Untergrund}} = 1.000 \text{ MN/m}^2$)
- Nr. 4: Lagenweiser Einbau der Überschüttung in Schritt 3 (Schütthöhen ca. 1,0-1,5 m; abwechselnder Einbau links und rechts)

4. ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

4.1 Darstellung der Ergebnisse in Form von resultierenden Druckverteilungen

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen wurden in Form der resultierenden Normal- und Schubspannungen in der Kontaktfuge zwischen Gewölbe und Boden ausgelesen. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den analytischen Ansätzen wird die resultierende Kontaktschubspannung in horizontale bzw. vertikale Schnitte projiziert.

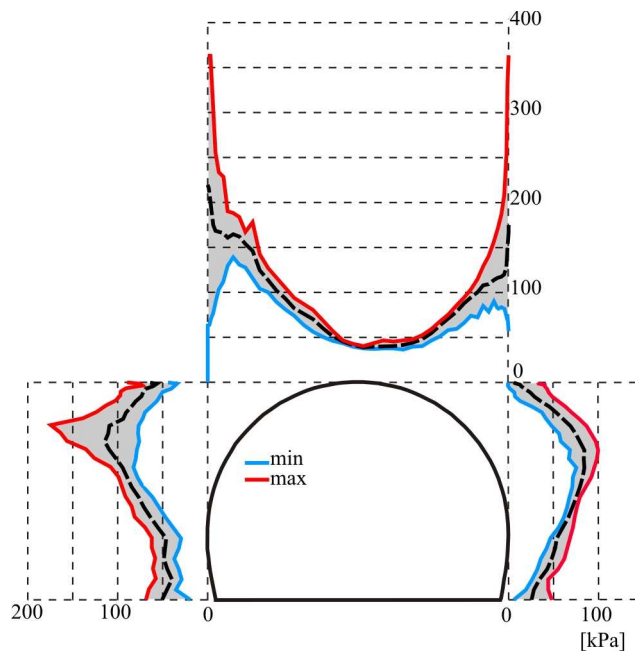


Abbildung 3: Resultierende Druckverteilung auf die Tunnelschale (strichliert: Mittelwerte)

Abb. 3 veranschaulicht die Bandbreite der resultierenden Druckverteilung auf die Tunnelschale, die aus der numerischen Parameterstudie gewonnen wurde. Für die horizontalen Drücke fällt für alle untersuchten Szenarien die Umlagerung des Erddrucks in die oberen Bereiche der Ulme auf – sowohl für die bergseitige Ulme (links) als auch die talseitige Ulme (rechts).

4.2 Darstellung der resultierenden Momentenverteilung

Die resultierende Momentenverteilung in der Tunnelschale ist in Abb. 4 veranschaulicht. Darin zeigen sich deutliche Unterschiede lediglich im Übergangsbereich von Gewölbe zu Fundament (besonders für die Berechnungen Nr. 2 und Nr. 3). Ansonsten gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Position und Größe des maximalen Moments in der bergseitigen Ulme.

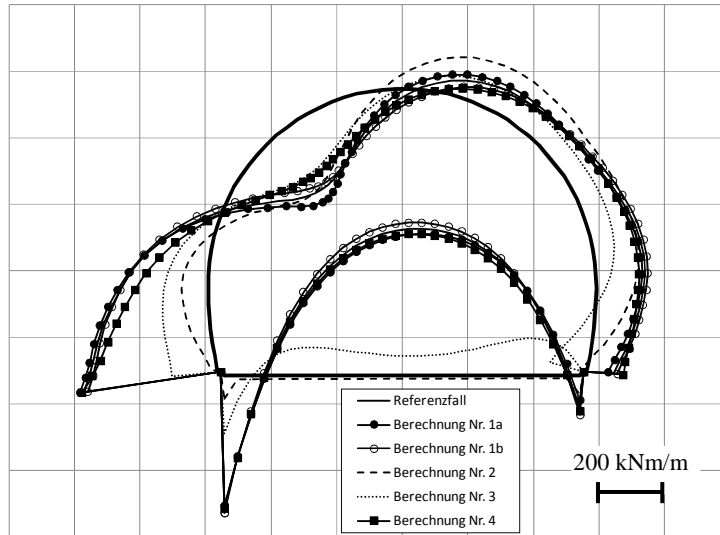


Abbildung 4: Resultierende Momentenverteilung im Gewölbe

4.3 Vergleich der Druckverteilungen mit analytischen/empirischen Ansätzen

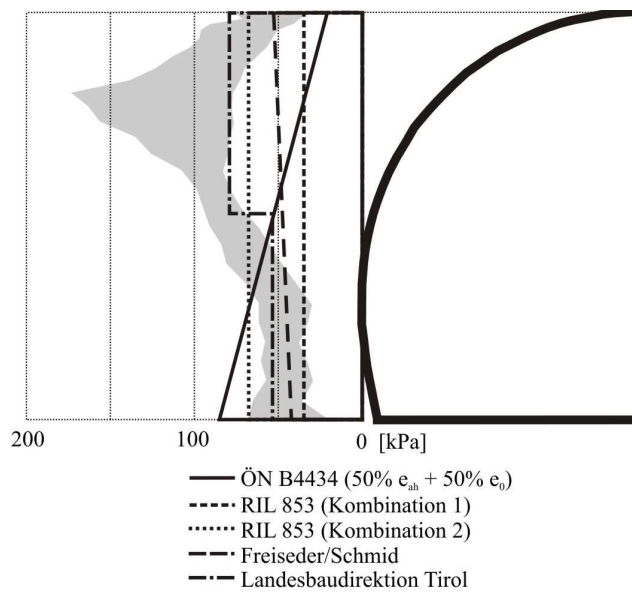


Abbildung 5: Vergleich analytischer Ansätze für die horizontale Belastung des bergseitigen Gewölbes mit den Ergebnissen der numerischen Parameterstudie (grau hinterlegt)

Abb. 5 zeigt den Vergleich der analytisch bestimmten Lastverteilungen mit jenen der numerischen Berechnungen (vgl. Abschnitt 2). Exemplarisch wurde die horizontale Belastung

der bergseitigen Ulme für den Vergleich gewählt. Die signifikante Abweichung zu den Ergebnissen der numerischen Berechnungen für das gegebene Beispiel wird deutlich: alle analytischen Ansätze unterschätzen die absolute Größe des Erddrucks im oberen Bereich der bergseitigen Ulme. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass bei den analytischen Ansätzen zusätzlich eine Horizontalkraft ΔH aus den unterschiedlichen Erddrücken berg- und talseitig oberhalb der Firste zu berücksichtigen ist. Dieser Ansatz verringert den Unterschied zwischen analytischer und numerischer Berechnung. Die Berechnungen für die talseitige Ulme zeigen qualitativ dasselbe Ergebnis.

5. SCHLUSSFOLGERUNG

Die durchgeführte numerische Parameterstudie zum Einfluss verschiedener Faktoren auf die Erddruckverteilung auf eingeschüttete Galerien zeigt eine recht geringe Bandbreite an Ergebnissen, sowohl im Hinblick auf die horizontalen und vertikalen Erddruckverteilungen als auch im Hinblick auf die Momentenverteilung im Gewölbe.

Die Unterschiede zwischen herkömmlichen analytischen Ansätzen und numerischen Ergebnissen sind jedoch deutlich zu erkennen. Alle analytischen Berechnungsansätze unterschätzen deutlich die ausgeprägte Umverteilung der horizontalen Erddrücke in die oberen Bereiche der Ulme. Es wird daher für die Praxis auf jeden Fall empfohlen, neben Stabwerksberechnungen auch Berechnungen am Kontinuum durchzuführen.

Weitere Untersuchungen müssen die Ergebnisse bestätigen, die hier anhand eines Beispiels vorgestellt wurden. Außerdem sollen in einem weiteren Schritt die Konsequenzen für die Menge und Abstufung der erforderlichen Biegebewehrung erarbeitet werden.

LITERATUR

- [1] Deutsche Bahn AG:
Richtlinie 853, „Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten“
Stand 2003
- [2] Feix, J.; Walkner, R.; Schustereder, C.
Einfluss der Boden-Bauwerk-Interaktion auf die Bemessung von Lawinengalerien
Bauingenieur 83 (2008), S. 158-166
- [3] Freiseder, M.; Schmid, K.
Tunnelbauwerke in offener Bauweise – Realistische Ansätze für die Lastverteilung
Christian-Veder-Kolloquium (2005), S. 171-186
- [4] Kirsch, A.; Kolymbas, K.
Zum Erddruck auf Lawinenschutzgalerien
Bautechnik 86, Heft 9 (2009), S. 774-779
- [5] Schober, W. (1999)
Zur Frage der Lastannahmen bei hinterfüllten Galerien und eingeschütteten Tunnel-
röhren - unveröffentlicht, Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwissen-
schaften, entnommen aus: Autengruber, L.: Lawinen und Steinschlaggalerien, Skrip-
tum, Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, 2004