

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 78 (1960)  
**Heft:** 38

**Artikel:** Beitrag zur Theorie der Erddrücke auf das Tunnelmauerwerk  
**Autor:** Houska, Jaromir  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-64958>

### **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:** 21.02.2026

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

# Beitrag zur Theorie der Erddrücke auf das Tunnelmauerwerk

DK 624.191.6

Von Ing. Jaromir Houska, Oberassistent, Techn. Hochschule, Prag (Tschechoslowakei)

In den März-Heften dieses Jahrganges der Schweizerischen Bauzeitung wurde eine Reihe von interessanten Aufsätzen [Lit. 1] über den Bau des Donnerbühl-Tunnels in Bern veröffentlicht. Sehr lehrreich ist die Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Erddrücke auf den Tunnel bei einer nicht zu hohen Ueberlagerungsschicht. Die Vergrößerung der wirklich gemessenen gegenüber den berechneten Werten der waagerechten Seitendrücke ist, wie die Verfasser richtig betonen, auf die zu kleinen Verschiebungen des Bodens zurückzuführen.

Ich habe versucht, diese Tatsachen auch in die mathematische Verarbeitung der Theorie einzuführen und die Terzaghi-Methode etwas in entsprechender Richtung abzuändern, damit die rechnerischen Ergebnisse der Wirklichkeit näherkommen. Der Grundgedanke beruht im folgenden:

Wenn bei irgendeiner Vortriebsart des Tunnels (z. B. der Schild-Methode) der Boden verhindert wird, die zur Ausbildung des plastischen Grenzzustandes in der umgebenden Erdmasse notwendigen Verschiebungen auszuüben, werden nur örtliche Störungen (Gleitbewegungen) entstehen, und nicht ein Vollbruch, der erst die vollständige Wirkung des Scherwiderstandes des Bodens bedingt. Deswegen weisen auch die diesmal nur vermuteten seitlichen Gleitkeile grössere Widerstandsfähigkeit gegen die senkrechte Belastung auf; daraus ergibt sich allerdings auch die Erhöhung der seitlichen Erddrücke.

Diese Umstände können mathematisch näherungsweise durch die nachstehenden Voraussetzungen ausgedrückt werden:

1. Die Scherfestigkeit  $s$  des Bodens wird auf zwei Drittel ihres vollen Wertes herabgesetzt, und zwar infolge nur örtlicher Scherbrüche (und nicht eines Vollbruches), ähnlich wie es Terzaghi [2] bei der Berechnung der Grenztragfähigkeit des Baugrundes im Falle örtlicher Scherbrüche empfiehlt. Es ist deshalb

$$(1) \quad s' = \frac{2}{3} s \quad \text{oder}$$

$$(1a) \quad \operatorname{tg} \varphi' = \frac{2}{3} \operatorname{tg} \varphi \quad \text{und}$$

$$(1b) \quad c' = \frac{2}{3} c$$

Hier sind:  $s$  = Scherfestigkeit des Bodens,  $\varphi$  = Winkel der inneren Reibung,  $c$  = Haftfestigkeit (Kohäsion).

2. Die senkrechten Gleitflächen über dem Tunnelscheitel werden nicht an den äusseren Enden der Gleitkeile, sondern in der halben Breite derselben vorausgesetzt. Eine ähnliche Annahme gibt Klein [3] für den Fall der Erddrücke auf Grabenleitungen an, wenn die Verfüllung neben den Röhren im Graben verlässlich und gut verdichtet ist und deshalb auch grössere Lasten übernehmen kann.

3. Ein gewisser Teil der Belastung, die sich durch die Scherfestigkeit des Bodens in den senkrechten Gleitflächen aus dem Gebiete über dem Tunnelscheitel nach beiden Seiten hinter die Gleitflächen überträgt (Gewölbewirkung), wird — wieder wegen grösserer Steifigkeit (Unverschieblichkeit) der Gleitkeile — auf dieselben zurückgeführt, und diese werden somit mehr belastet.

Das ursprüngliche Terzaghi-Rechnungsverfahren [2] (Bild 1) gibt folgende Gleichungen an:

für senkrechte Scheiteldrücke:

$$(2) \quad \sigma_z = \frac{\gamma b_1 - c}{K \operatorname{tg} \varphi} \left[ 1 - \exp \left( -K \frac{H}{b_1} \operatorname{tg} \varphi \right) \right] + q \exp \left( -K \frac{H}{b_1} \operatorname{tg} \varphi \right)$$

für waagerechte Seitendrücke:

$$(3) \quad \sigma_x = (\sigma_z + \gamma z) \operatorname{tg}^2 \alpha - 2c \operatorname{tg} \alpha$$

Hier sind (laut Bild 1):

$\gamma$  = Raumgewicht des Bodens,

$H$  = Ueberlagerungshöhe des Tunnels,

$q$  = gleichförmige Belastung der Geländeoberfläche,

$K$  = Beiwert, ungefähr gleich 1,

$z$  = Tiefe unter dem Tunnelscheitel,

$2b_1$  = Breite des «Senkungsgrabens» über dem Tunnel; für den Kreisquerschnitt gilt:

$$(4) \quad b_1 = r (\sec \alpha + \operatorname{tg} \alpha) = r [\cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha (1 - \sin \alpha)]$$

$r$  = Halbmesser des Tunnels,

$$\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$$

Im dritten Absatz des oben erwähnten Aufsatzes [1, S. 171] werden die Seitendrücke aus einer etwas abgeänderten Gleichung berechnet; die senkrechte Belastung der seitlichen Gleitkeile wird gleich dem Gewichte der ganzen Ueberlagerungsschicht angenommen, während bei Terzaghi — wie aus Gl. (3) ersichtlich ist — diese Belastung nur vom senkrechten Scheiteldruck  $\sigma_z$  gebildet wird. Die Gleichung von Prof. Bonnard<sup>1)</sup> laut unseren Bezeichnungen lautet:

$$(5) \quad \sigma_x = p_2 = \gamma (H + r) \operatorname{tg}^2 \alpha - 2c \operatorname{tg} \alpha$$

Mit der Einführung der drei früher besprochenen Voraussetzungen bekommen die Gleichungen diese Form:

Die senkrechten Scheiteldrücke:

$$(6) \quad \sigma_z =$$

$$\frac{\gamma b_1' - c'}{K \operatorname{tg} \varphi'} \left[ 1 - \exp \left( -K \frac{H}{b_1'} \operatorname{tg} \varphi' \right) \right] + q \exp \left( -K \frac{H}{b_1'} \operatorname{tg} \varphi' \right)$$

<sup>1)</sup> In dieser Gleichung (Seite 171 der SBZ) ist ein Druckfehler, denn im zweiten Gliede auf der rechten Seite der Gleichung fehlt der Faktor 2.

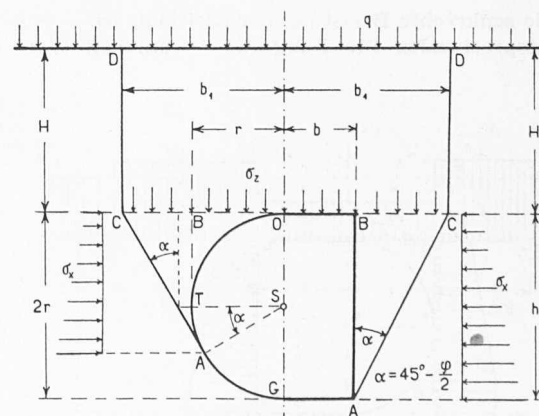


Bild 1. Schema für die Berechnung der Erddrücke für den kreisrunden und rechteckigen Tunnelquerschnitt nach Terzaghi

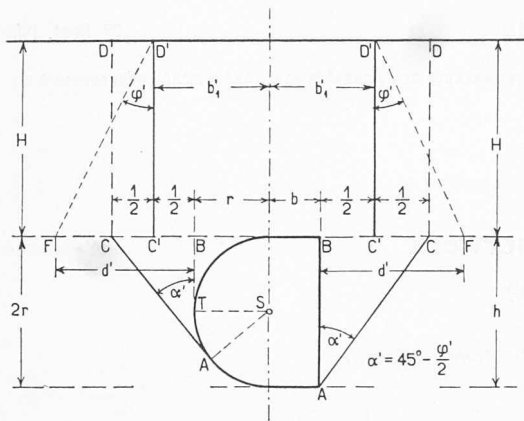
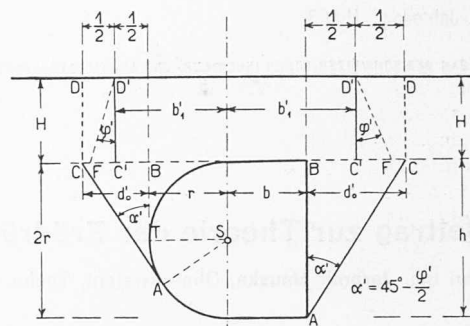


Bild 2 (links). Schema für die Berechnung der Erddrücke für den kreisrunden und rechteckigen Tunnelquerschnitt im Falle, dass in der umgebenden Erdmasse kein plastischer Grenzzustand entsteht

Bild 3 (rechts). Dasselbe wie im Bild 2 für niedrigere Ueberlagerungshöhen



Die Werte  $\varphi'$  und  $c'$  sind aus Gl. (1a) und (1b) zu entnehmen; die «wirkende Grabenbreite»  $2b_1'$  ist mit folgender Beziehung gegeben (Bild 2):

$$(7) \quad b_1' = \frac{r}{2} (1 + \sec \alpha' + \tg \alpha')$$

wo wieder  $\alpha' = 45^\circ - \frac{\varphi'}{2}$

Die zusätzliche Belastung der Gleitkeile  $\sigma'$ , die sich auf die Strecke  $d'$  (bzw.  $d_0'$ ) verteilt, geht aus der Beziehung hervor (Bild 4):

$$S' = r (\sigma - \sigma_z) = d' \sigma'$$

wo  $\sigma = \gamma H$ ; daraus

$$(8) \quad \sigma' = (\sigma - \sigma_z) \frac{r}{d'}$$

Die Strecke  $d'$  kann leicht aus Bild 2 abgeleitet werden

$$(9) \quad d' = \frac{r}{2} (\sec \alpha' + \tg \alpha' - 1) + H \tg \varphi'$$

Wenn die Ueberlagerungsschicht zu niedrig ist (Bild 3), d. h.

$$\text{wenn } H \tg \varphi' < \frac{r}{2} (\sec \alpha' + \tg \alpha' - 1)$$

setzen wir anstatt  $d'$  den Wert  $d_0'$  ein:

$$(9a) \quad d_0' = r (\sec \alpha' + \tg \alpha' - 1)$$

Die waagerechten Seitendrücke in der Tiefe  $z$  unter dem Tunnelscheitel sind

$$(10) \quad \sigma_x = (\sigma + \sigma' + \gamma z) \tg^2 \alpha' - 2c' \tg \alpha'$$

und in der Mitte der Seitenwand

$$(11) \quad \sigma_{x2} = [\gamma (H + r) + \sigma'] \tg^2 \alpha' - 2c' \tg \alpha'$$

Hier sei noch bemerkt, dass die Gleichung (10) nur bis zum Berührungspunkte A der Gleitfläche mit dem Tunnelumfang ihre Geltung behält. Unterhalb dieser Höhe bleiben die Seitendrücke unverändert, worauf schon Krynine seinerzeit [4] hingewiesen hat.

Die senkrechte Belastung der Gleitkeile ist — gegenüber der entsprechenden Gleichung (5) — um den Wert  $\sigma'$  erhöht.

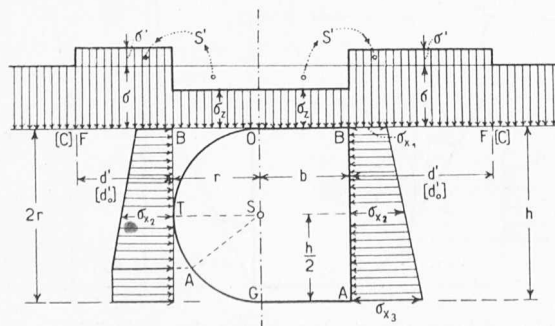


Bild 4. Angenommene Verteilung der Spannungen in der Umgebung des Tunnels

Für den rechteckigen Tunnelquerschnitt mit der Höhe  $h$  und der Breite  $2b$  gelten folgende Gleichungen:

für  $\sigma_z$  die Gl. (6) ohne Aenderung;

$$(12) \quad \text{für } b_1' \text{ anstatt (7): } b_1' = b + \frac{h}{2} \tg \alpha'$$

$$(13) \quad \text{für } \sigma' \text{ anstatt (8): } \sigma' = (\sigma - \sigma_z) \frac{b}{d'}$$

$$(14) \quad \text{für } d' \text{ anstatt (9): } d' = \frac{h}{2} \tg \alpha' + H \tg \varphi'$$

für  $d_0'$  anstatt (9a), wenn nämlich  $H \tg \varphi' < \frac{h}{2} \tg \alpha'$  :

$$(14a) \quad d_0' = h \tg \alpha'$$

für  $\sigma_x$  die Gl. (10) ohne Aenderung.

In der nachstehenden Tabelle werden die Ergebnisse aller drei Rechnungsverfahren verglichen, und zwar für den Fall, dass  $c = 0$ ,  $q = 0$ ,  $\varphi = 30^\circ$  und  $35^\circ$ ,  $K = 1$ , für die Ueberlagerungshöhen  $H/2r$  (bzw.  $H/h$ ) = 0,5; 1; 1,5; 2, und für den rechteckigen Querschnitt mit den Verhältnissen  $2b/h = 1,2; 1; 0,8$  und für den Kreisquerschnitt. Die einzelnen Spalten enthalten folgende Werte:

A ursprüngliche Terzaghi-Methode,

A' die nach der Gl. (5) berechneten Seitendrücke,

B neues Verfahren,

C Erhöhung der neuen B-Werte gegenüber den A-Werten in %:

$$C = 100 \frac{B - A}{A} \%$$

C' Erhöhung der neuen B-Werte gegenüber den A'-Werten, ebenfalls in %:

$$C' = 100 \frac{B - A'}{A'} \%$$

Die Bedeutung der Bezeichnungen  $\sigma_{x1}$ ,  $\sigma_{x2}$  und  $\sigma_{x3}$  ist aus Bild 4 ersichtlich.

Alle Erddrücke sind als bezogene Werte angegeben, wobei als Grundwert das Gewicht der Ueberlagerungsschicht  $\sigma = \gamma H$  gewählt wurde.

Für den Kreisquerschnitt und  $\varphi = 35^\circ$  sind die errechneten Erddrücke  $\sigma_z$  und  $\sigma_{x2}$  mit den direkt gemessenen (Kurven M) auf dem Bilde 5 graphisch zusammengestellt.

Aus der Tabelle und dem Bilde 5 geht hervor:

1. Das neue Verfahren gibt die Scheiteldrücke  $\sigma_z$  etwas höher im Vergleich mit dem Terzaghi-Verfahren an, was mit der Erfahrung ungefähr übereinstimmt.

2. Das neue Verfahren gibt die Seitendrücke  $\sigma_x$  gegenüber dem Terzaghi-Verfahren um 64 bis 198 % grösser, im Vergleich mit der von Prof. Bonnard benützten Gleichung (5) dagegen nur um 51 bis 74 % grösser an, d. h. im Bereiche, in dem die wirklichen Seitendrücke auch tatsächlich von Prof. Bonnard beobachtet und gemessen worden sind.

Damit ist eine gute Uebereinstimmung der neuen Theorie mit der Wirklichkeit dargelegt.

Zum Schluss möchte ich nochmals betonen, dass die neue Theorie nur ein Näherungsverfahren darstellt, das keine Ansprüche auf Exaktheit macht. Der Verfasser ist sich der physikalischen und kinematischen Widersprüche der angenommenen Voraussetzungen bewusst; doch hat er versucht, trotz diesen Ungenauigkeiten mit dem neuen Verfahren der Wirklichkeit näherzukommen.

Literaturverzeichnis

[1] Schweizerische Bauzeitung 78. Jg., 1960, H. 10 ff.: fünf Aufsätze über den Bau des Donnerbühl-Tunnels in Bern, von R. Desponds, D. Bonnard und E. Recordon, F. Chaud und O. J. Rescher, P. Kipfer und H. Wanzenried, H. Ruppaner. Namentlich: D. Bonnard und E. Recordon: Experimentelle Untersuchung des Erddruckes auf den Tunnel, S. 168 bis 171.

[2] K. Terzaghi: Theoretical soil mechanics. J. Wiley, New York, 1943.

[3a] G. K. Klein: Berechnung der im Boden eingebetteten Röhren (russisch). Gosstrojizdat Moskau, 1951.

[3b] G. K. Klein: Baumechanik der losen Körper (russisch). Gosstrojizdat Moskau, 1956.

[4] D. P. Krynine: Pressure on the lining of circular tunnels in plastic soils. Proc. ASCE, May 1944; Translations, paper No. 2252, S. 1048 bis 1082.

Adresse des Verfassers: Ing. Jaromir Houska, Trojanova 13, Prag.

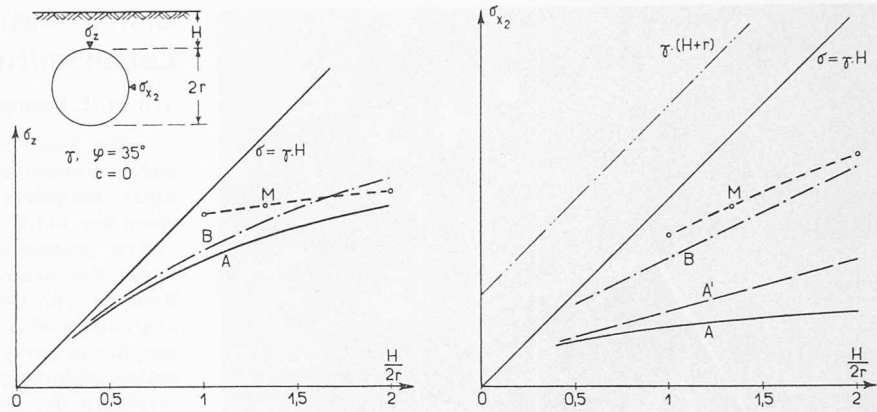


Bild 5. Vergleich zwischen den errechneten (A, A' und B) und den gemessenen (M) Erddrücken auf den Tunnel

Tabelle zum Vergleich der Rechnungsverfahren (Bezeichnungen im Text)

$\varphi^\circ$	$\frac{H}{h}$	$\frac{2b}{h}$	$\frac{\sigma_z}{\gamma H}$			$\frac{\sigma_{x1}}{\gamma H}$					$\frac{\sigma_{x2}}{\gamma H}$					$\frac{\sigma_{x3}}{\gamma H}$				
			A	B	C	A	A'	B	C	C'	A	A'	B	C	C'	A	A'	B	C	C'
30	0,5	1,2	0,886	0,905	2,1	0,299		0,511	71	53	0,629		0,983	57	47	0,962		1,454	51	45
		1	0,877	0,894	1,9	0,292		0,507	74	51	0,626		0,978	56	47	0,959		1,450	51	45
		0,8	0,867	0,882	1,7	0,289		0,504	75	50	0,622	0,677	0,975	57	46	0,956	1,000	1,447	51	45
		Kreis	0,846	0,875	3,3	—		—	—	—	0,615		1,008	64	51	—		—	—	—
	1	1,2	0,790	0,821	3,9	0,263		0,540	105	60	0,430		0,777	81	55	0,597		1,012	70	52
		1	0,774	0,803	3,7	0,258		0,535	107	59	0,425		0,771	82	54	0,591		1,007	70	51
		0,8	0,756	0,780	3,2	0,252		0,529	110	57	0,419	0,500	0,765	83	53	0,585	0,667	1,000	71	50
		Kreis	0,723	0,775	7,2	—		—	—	—	0,408		0,812	99	62	—		—	—	—
	1,5	1,2	0,708	0,749	5,8	0,236	0,333	0,549	133	63	0,347		0,705	103	59	0,458		0,863	89	55
		1	0,688	0,725	5,4	0,229		0,541	136	61	0,340		0,700	106	58	0,452		0,855	89	54
		0,8	0,663	0,696	5,4	0,221		0,534	142	58	0,332	0,444	0,690	108	56	0,443	0,556	0,848	92	53
		Kreis	0,624	0,688	10,6	—		—	—	—	0,319		0,719	125	62	—		—	—	—
	2	1,2	0,638	0,684	7,2	0,213		0,552	159	64	0,299		0,670	124	61	0,379		0,788	108	58
		1	0,614	0,656	6,8	0,205		0,545	166	62	0,288		0,662	130	59	0,371		0,780	110	56
		0,8	0,587	0,622	6,0	0,196		0,535	173	59	0,279	0,417	0,653	134	57	0,362	0,500	0,771	113	54
		Kreis	0,543	0,615	13,2	—		—	—	—	0,264		0,680	158	63	—		—	—	—
35	0,5	1,2	0,860	0,883	2,7	0,233		0,450	93	66	0,504		0,856	70	58	0,775		1,261	63	55
		1	0,847	0,870	2,7	0,230		0,446	94	65	0,500		0,854	71	58	0,771		1,260	64	55
		0,8	0,832	0,854	2,7	0,225		0,444	97	64	0,496	0,542	0,849	71	57	0,766	0,813	1,256	64	55
		Kreis	0,815	0,852	4,5	—		—	—	—	0,491		0,880	79	62	—		—	—	—
	1	1,2	0,744	0,785	5,5	0,202		0,473	134	75	0,337		0,675	100	66	0,472		0,879	86	62
		1	0,725	0,763	5,5	0,196		0,467	138	72	0,332		0,670	102	65	0,466		0,872	87	61
		0,8	0,700	0,742	6,0	0,190		0,460	142	70	0,325	0,406	0,662	104	63	0,460	0,542	0,865	88	60
		Kreis	0,673	0,731	8,6	—		—	—	—	0,318		0,690	117	70	—		—	—	—
	1,5	1,2	0,649	0,700	7,8	0,176	0,271	0,478	172	76	0,266		0,613	130	69	0,356		0,748	110	66
		1	0,625	0,672	7,5	0,169		0,471	179	74	0,260		0,606	133	67	0,350		0,741	112	64
		0,8	0,597	0,639	7,1	0,162		0,464	186	71	0,252	0,362	0,599	138	66	0,342	0,452	0,734	115	62
		Kreis	0,565	0,634	12,0	—		—	—	—	0,244		0,621	154	72	—		—	—	—
	2	1,2	0,571	0,627	9,8	0,155		0,479	212	77	0,222		0,580	161	71	0,290		0,680	135	67
		1	0,545	0,596	9,3	0,148		0,471	218	74	0,216		0,573	165	69	0,283		0,675	139	66
		0,8	0,515	0,560	8,8	0,140		0,464	231	71	0,207	0,339	0,565	173	67	0,275	0,406	0,666	142	64
		Kreis	0,480	0,555	15,6	—		—	—	—	0,198		0,590	198	74	—		—	—	—