

Unterschiede beim Festigkeitsnachweis nach DIN 1045 und EC 2 am Beispiel eines Tunnelrahmens

T 2478

T 2478

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

S C H L U ß B E R I C H T

Thema: Unterschiede beim Festigkeitsnachweis nach DIN 1045 und
EC 2 am Beispiel eines Tunnelrahmens

Zusammenfassung zum Forschungsvorhaben

Unterschiede beim Festigkeitsnachweis nach DIN 1045
und Eurocode 2 am Beispiel eines Tunnelrahmens

Für die Ingenieure der Tragwerksplanung bedeutet die Anwendung des Eurocode 2 (EC 2) gegenüber der Anwendung nach DIN 1045 eine völlige Umstellung in der Art der Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen.

Das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit bestand daher zunächst darin, ein Anwendungsbeispiel nach dem Eurocode 2 für einen Tunnelrahmen zu erarbeiten, das den Ingenieuren der Tragwerkplanung helfen soll, sich in den Eurocode 2 einzuarbeiten und das als Musterberechnung dienen kann.

Dieses von Hand in aller Ausführlichkeit aufgestellte Anwendungsbeispiel liegt mit dem Abschluß dieses Forschungsvorhabens vor.

Bei der Berechnung der Schnittgrößen wurde von einer linearen Verteilung der Bodenpressungen ausgegangen, da dies leicht nachprüfbar ist. Nach Bettungsziffer- oder Steifeziffer-Verfahren berechnete Schnittgrößen haben keinen Einfluß auf den Gang der Bemessung und führen auch nicht zu anderen Aussagen über den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).

Im Anwendungsbeispiel werden die Quellen der in der Berechnung verwendeten Formeln und Zahlenwerte an allen Stellen zitiert mit

- EC 2 Eurocode 2 Teil 1
- EC 2 A Anhang zum Eurocode 2 Teil 1
- HM Hilfsmittel zum Eurocode 2 Teil 1
- GB Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2
- Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227,
von Dr.-Ing. H.-U. Litzner, Betonkalender 1991,
Teil I

und den entsprechenden Verweisen auf Tabellen, Gleichungen,

Abschnitten beziehungsweise Absätzen und dergleichen.

Auf Besonderheiten und mögliche Fehlerquellen wird aufmerksam gemacht.

Das Anwendungsbeispiel kann weiterhin als Grundlage für eine Programmierung der Berechnung dienen.

Der Berechnung nach Eurocode 2 ist die Bemessung nach DIN 1045 vorangestellt, um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen beider Verfahren zu ermöglichen.

Weiterhin sollte mit der vorliegenden Arbeit der Überlegung nachgegangen werden, ob man die Teilsicherheitsbeiwerte für die Belastungen infolge der Erdlasten nach Eurocode 2 bei Bauwerken des Tief- und Grundbaues, speziell von Tunnelrahmen der untersuchten Art verringern könne.

Aus der Berechnung hat sich ergeben, daß nach dem Eurocode 2 für die Bemessung derartiger Bauwerke der Grenzzustand der Ribbildung für quasiständige Last ausschlaggebend ist, wenn bestimmte Ribweiten an den Außen- und Innenseiten der Konstruktion aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit vorgegeben werden. Im vorliegenden Fall war aus Gründen der Wasserdichtigkeit an der Außenseite eine Ribweite von 0,2 mm und an der Innenseite von 0,3 mm einzuhalten. Demzufolge hat eine Reduzierung der Teilsicherheitsbeiwerte für die Belastung infolge der Erdlasten keinen Einfluß auf die erforderliche Bewehrung.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist diese Aussage unabhängig von der Art der Annahme der Verteilung der Bodenpressung unter der Tunnelsohle als lineare oder nichtlineare - nach einem Bettungsziffer- oder Steifeziffer-Verfahren ermittelte - Spannungsverteilung.

Verallgemeinernd läßt sich feststellen, daß der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) für die Bemessung derartiger Tragwerke des Erd- und Grundbaues maßgebend ist, wenn das Verhältnis der Bemessungsmomente infolge quasiständiger

Last im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) - M(SLS) - und den Bemessungsmomenten infolge maximaler Last im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) - M(ULS) - größer ist als das Verhältnis der zulässigen Spannung in der Bewehrung in Abhängigkeit vom Grenzdurchmesser beziehungsweise von den Stababständen - σ_s - nach EC 2, Tab. 4.11 und 4.12 zum Bemessungswert der Festigkeit des Betonstahls an der Streckgrenze - f_{yd}/γ_s -

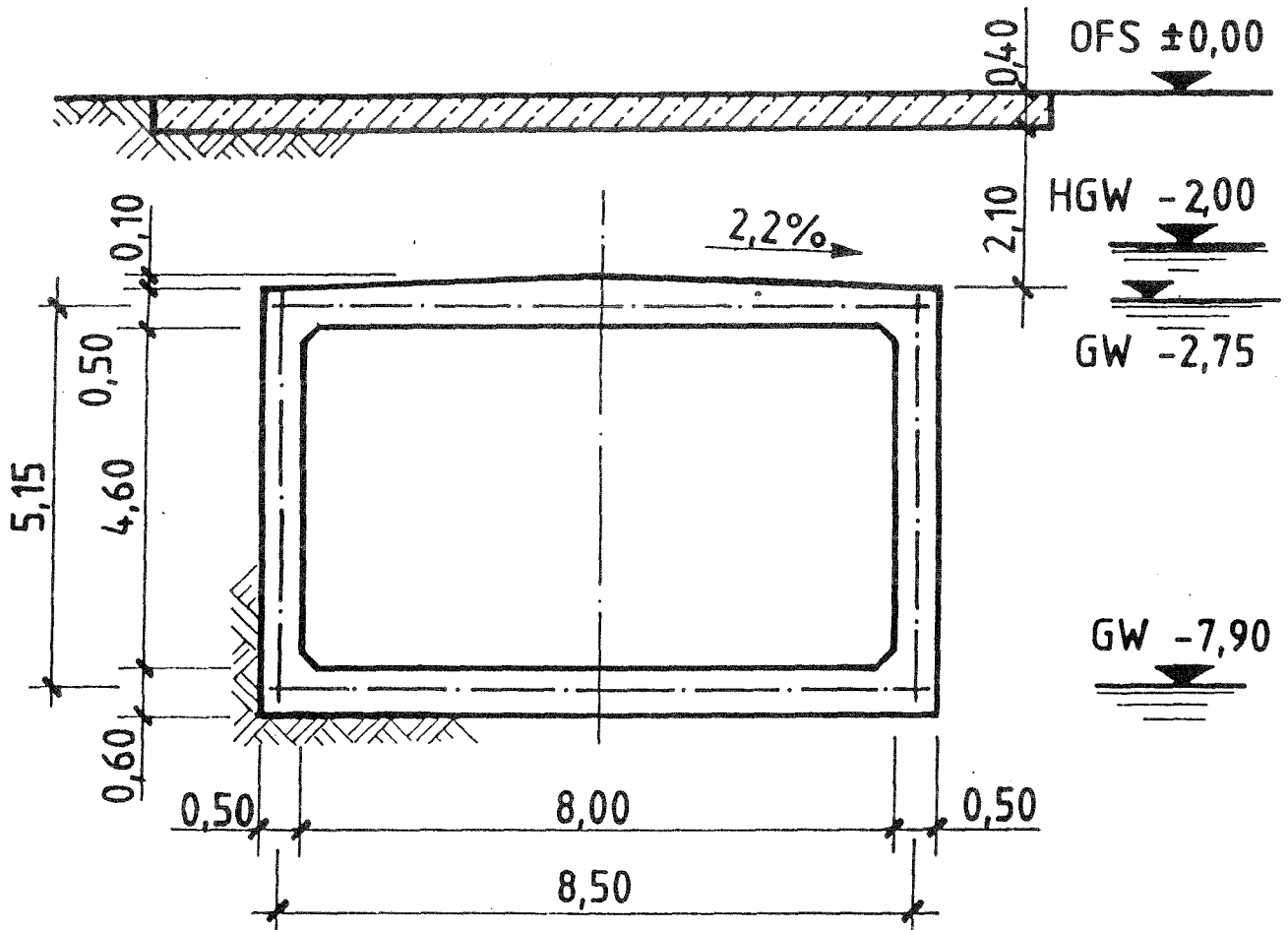
$$\frac{M(SLS)}{M(ULS)} \geq \frac{\sigma_s}{f_{yd}/\gamma_s}$$

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel ist

$$\frac{\sigma_s}{f_{yd}/\gamma_s} = \frac{240}{500/1,15} = 0,55.$$

Anwendungsbeispiel für EC 2 Tunnelrahmen

Schalplan



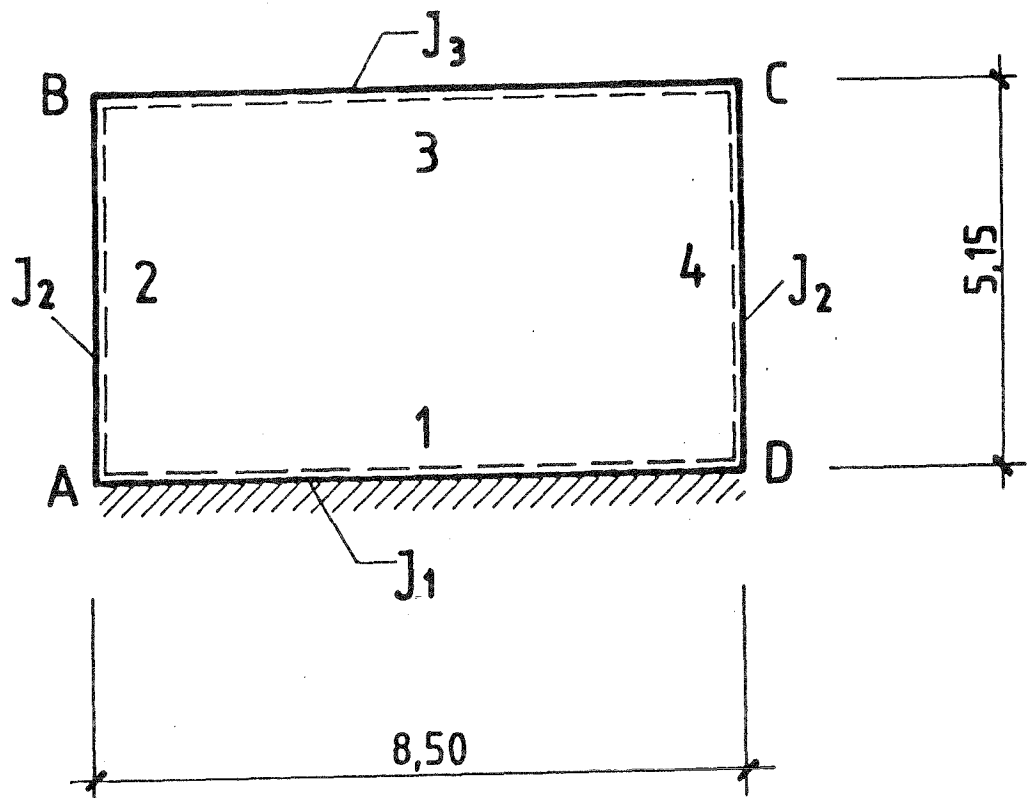
Beton C 35/45
Betonstahl B St 500 S

Anwendungsbeispiel für EC 2 Tunnelrahmen

Statisches System

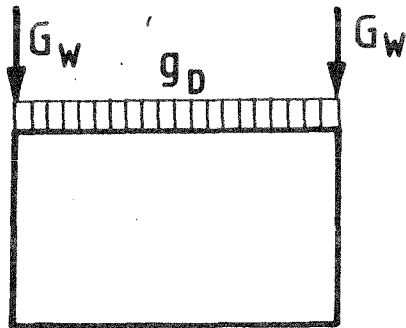
Symmetrischer geschlossener Rechteckrahmen
mit Flächenlagerung

Bodenspannungen
von Knoten A zu Knoten D geradlinig



Anwendungsbeispiel für EC 2 Tunnelrahmen

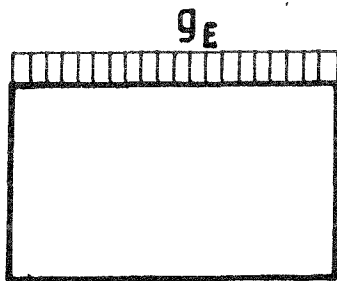
Belastungen



Eigenlast

$$g_D = 13,1 \text{ kN/m}^2$$

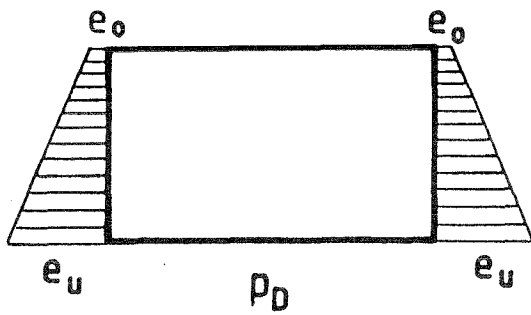
$$G_W = 65,0 \text{ kN}$$



Erdlast auf der Tunneldecke

$$\text{HGW} = -2,00\text{m} : g_{E1} = 52,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{GW} = -2,75\text{m} : g_{E2} = 50,0 \text{ kN/m}^2$$



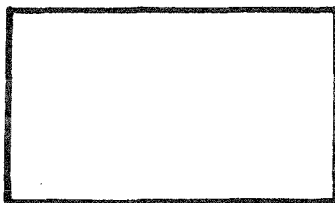
Erddruck auf die Tunnelwände

	e_o	e_u
HGW = -2,00m	28,3	105,3 kN/m ²
GW = -2,75m	23,5	100,5 kN/m ²
GW = -7,90m	23,5	67,5 kN/m ²



Verkehrslast auf der Tunneldecke

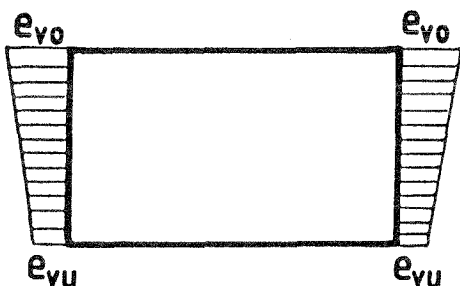
$$p_D = 15,0 \text{ kN/m}^2$$



Verkehrslast neben der Tunneldecke

$$e_{v_o} = 6,2 \text{ kN/m}^2$$

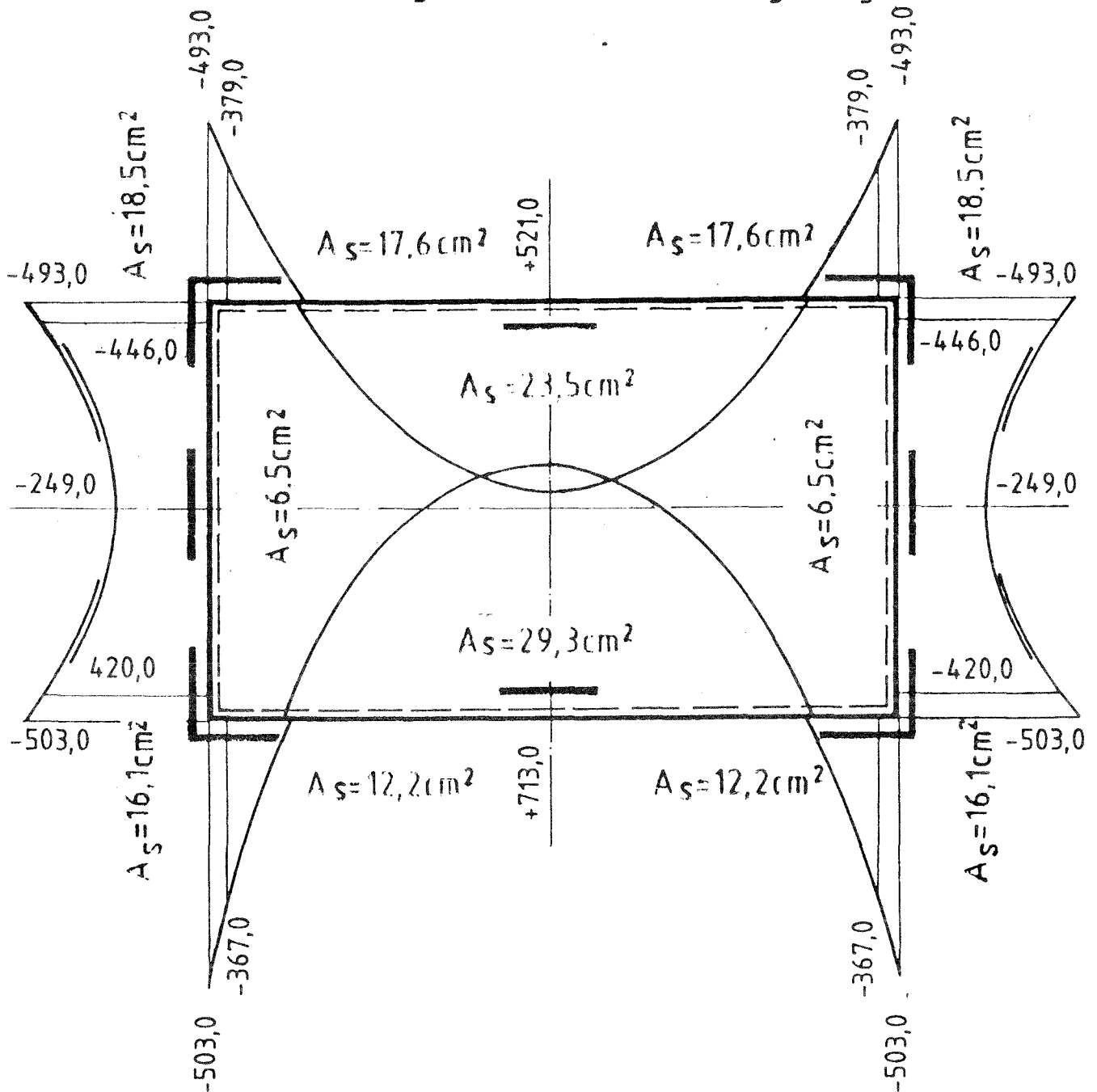
$$e_{v_u} = 4,2 \text{ kN/m}^2$$



Anwendungsbeispiel für EC 2 Tunnelrahmen

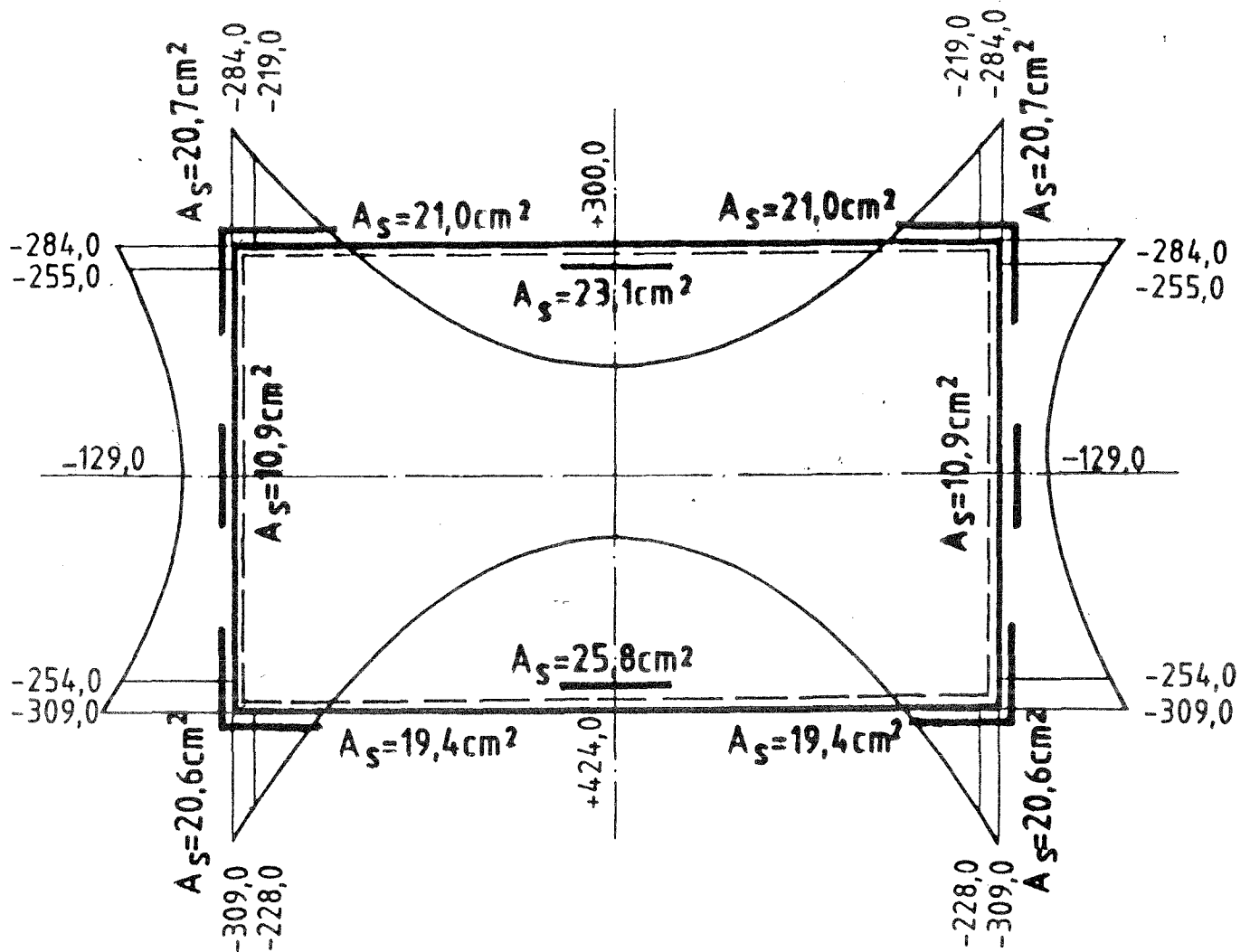
Momentenverlauf im Grenzzustand
der Tragfähigkeit

Bewehrung ohne Momentenumlagerung



Anwendungsbeispiel für EC 2 Tunnelrahmen

Momentenverlauf unter quasiständiger Last
erforderliche Rißbewehrung



Rißbreite außen $w=0,2\text{mm}$
innen $w=0,3\text{mm}$

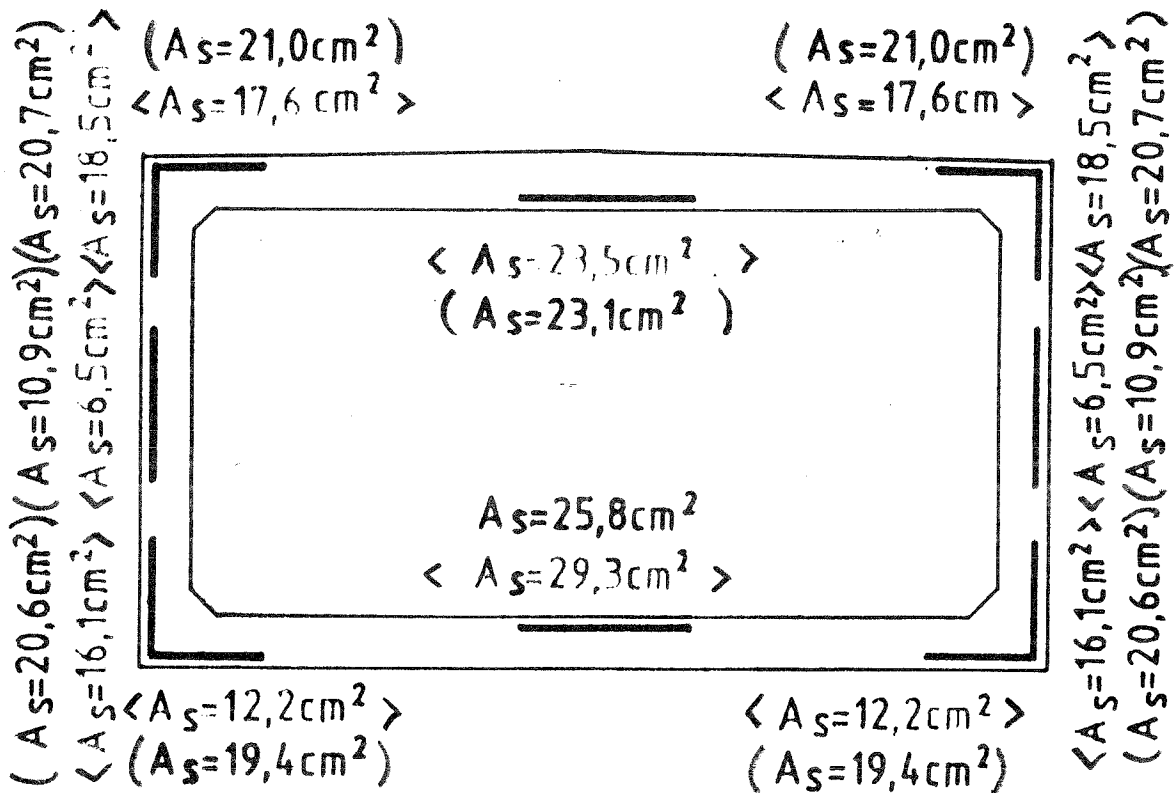
Anwendungsbeispiel für EC 2 Tunnelrahmen

Erforderliche Bewehrung

im Grenzzustand der Tragfähigkeit < >

Erforderliche Bewehrung

im Grenzzustand der Rißbildung
unter quasiständiger Last ()



Rißbreite außen $w = 0,2 \text{ mm}$
innen $w = 0,3 \text{ mm}$

Anwendungsbeispiel

für

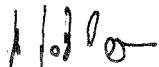
Eurocode 2, Teil 1

TUNNELRAHMEN

aufgestellt: Herbert Hotzler

Homyerstraße 18

0-1110 Berlin

Aug./Sept. 1992: 

Die Berechnung umfaßt 55 seiten.

Anwendungsbeispiel für ECL; Tunnelrahmen

Inhaltsverzeichnis

0. Allgemeines	seite	2
1. Statisches System		3
2. Baustoffe		4
3. Lastannahmen; sicherheit gegen Auftrieb		4
4. Belastungen		9
5. Schnittgrößen		13
6. Baustoffkennwerte, Betondeckung		21
7. Bemessung nach DIN 1045		22
8. Nachweis des Grenzzustandes für Biegung nach ECL ohne Momentenumlagerung		27
9. Mindestbewehrung zur Rissebeschränkung infolge Zwang		33
10. Minimale Bewehrung im Grenzzustand der Rißbildung unter quasiständiger Last		35
11. Grenzzustand des Schnittgrößenverlaufes mit Momentenumlagerung		41
12. Grenzzustand der Tragfähigkeit für Querkraft		45
13. Spannungsbegrenzung unter Gebrauchsbedingungen		51
14. Nachweis der Rißbreite		55
15. Nachweis der Durchbiegung		55

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

0. Allgemeines

Die gesamte Berechnung wird in herkömmlicher Art mit einem Taschenrechner ohne Verwendung irgendwelcher Software aufgestellt, so daß alle Schritte nachvollzogen werden können.

Hinweise auf Vorschriften und Hilfsmittel sind an rechten Seitenrand angegeben. Es bedeuten

EC 2 Eurocode 2 Teil 1;

abgedruckt in Betonkalender 1991, Teil II

EC 2 A Anhang zum Eurocode 2 Teil 1

HM Hilfsmittel zum Eurocode 2 Teil 1

GR Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2
Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227
von Dr.-Ing. H.-U. Litzner

abgedruckt in Betonkalender 1991, Teil I

Die nach Eurocode 2 verwendeten Gleichungen werden zum besseren Verständnis zunächst ohne Zahlenwerte angeschrieben.

Verwendete Literatur wird, so weit erforderlich, im Laufe der Berechnung angegeben.

Ergebnisse werden in den Dimensionen

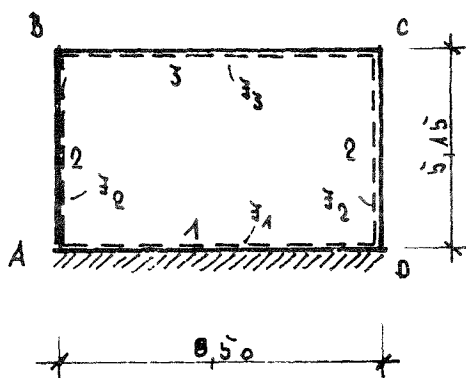
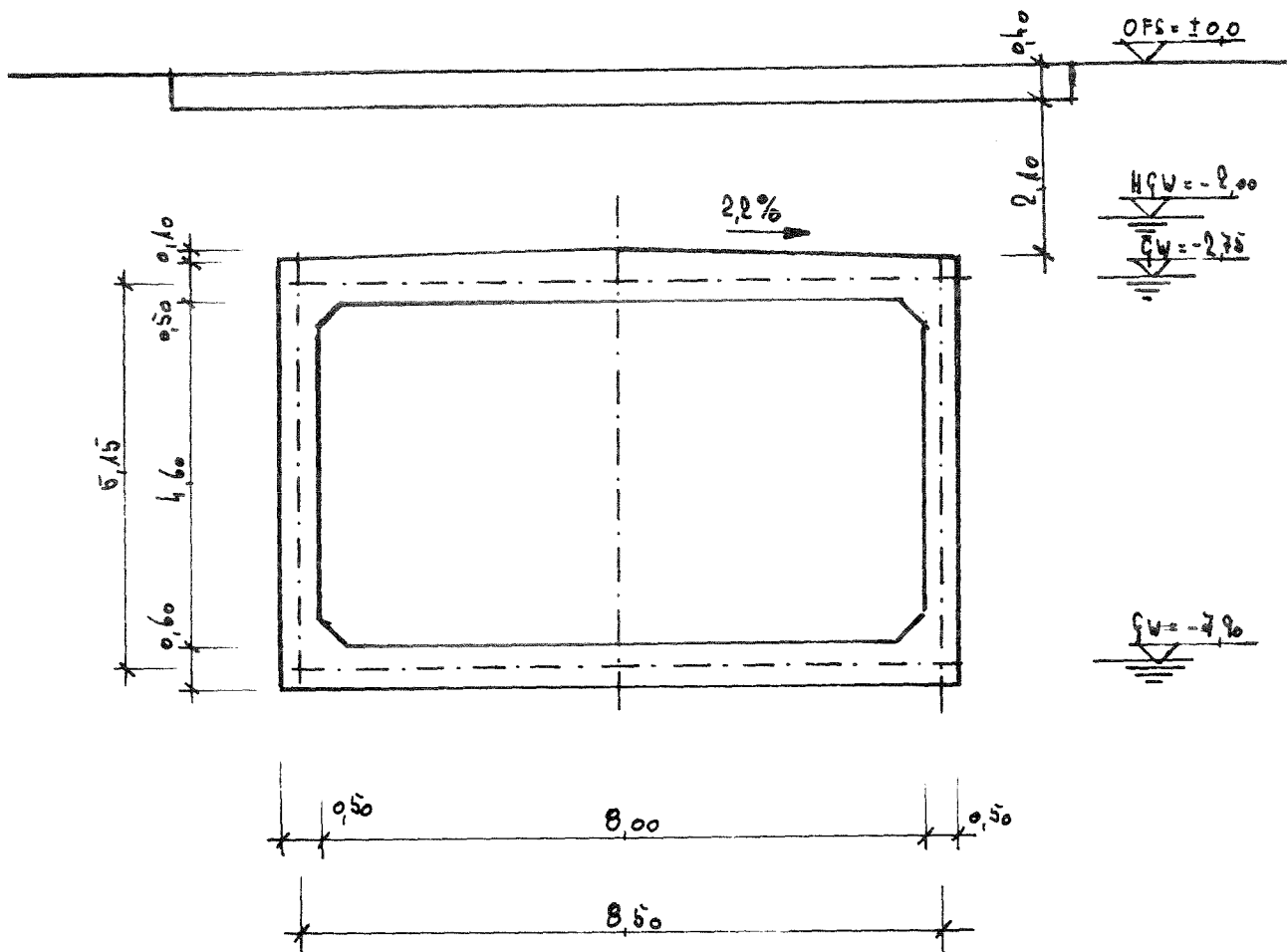
kN/m^2 anstelle kPa und N/mm^2 anstelle MPa angegeben, obwohl die zweite Schreibweise kürzer ist und teilweise auch im Eurocode 2 zu finden ist; siehe EC 2 Tab. 4.11 und Tab. 4.12.

Sollte sich aus einem Zahlenansatz ein Zahlenwert mit einer Zehnerpotenz ergeben, so wird anstelle der Zehnerpotenz sofort das entsprechende Kurzzeichen des Internationalen Einheitensystems gesetzt.

Beispiel: $\dots = 3,5 \cdot 10^3 \text{ kN}$
 $\cong 3,5 \text{ MN}$

Anwendungsbeispiel für ECL; Tunnelrahmen

1. Statistisches System



Symmetrisch geschlossener Rechteckrahmen
mit Flächen Lagerung

Die Bodenspannungen werden vom
Knoten A zum Knoten D geradlinig
angenommen.

Diese Annahme ergibt die größten
Biegemomente in der Sohlplatte und
liegt damit auf der sicheren Seite.
Das System ist dreifach statisch
unbestimmt.

Es ist nebenstehend dargestellt.

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

Sohlen dicke	$d_1 = 0,60 \text{ m}$
Wanddicke	$d_2 = 0,50 \text{ m}$
Deckendicke	$d_3 = 0,50 \text{ m}$
Tunnelhöhe	$h = 5,15 \text{ m}$
Tunnelbreite	$l = 8,50 \text{ m}$

2. Baustoffe

Beton	C 35/45
Betonstahl	B St 500 S

3. Lastannahmen

Stahlbeton des Tunnels	
Rechenwert	$g = 25,0 \text{ kN/m}^3$

Straßendecke	
Rechenwert	$g = 24 \text{ kN/m}^3$

Bodenart

Kies-Sand eng gestuft

Wichte Rechenwert	erdfeucht	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
	unter Auftrieb	$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$
Reibungswinkel		$\varphi = 35^\circ$

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

Oberfläche Straßendecke $DfS = 0,00\text{ m}$

Höchster Grundwasserstand $HGW = -2,00\text{ m}$

das entspricht

$t = 0,30\text{ m}$ über Tunneldecke

$t = 0,75\text{ m}$ über Systemlinie Tunneldecke

Folgende Varianten werden untersucht

$$q_w = -2,75\text{ m}$$

das entspricht der Höhe Systemlinie Tunneldecke

außerdem

$$q_w = -7,90\text{ m}$$

das entspricht der Höhe Systemlinie Tunnelsohle

Einseitiger Erddruck wird ausgeschlossen.

Sollte durch spätere Baumaßnahmen außerhalb des Tunnels ein einseitiger Erddruck auftreten können, so sind die Schachtarbeiten auf eine Länge von 1000 m

zu begrenzen, so daß der einseitige Erddruck über die Tunneldecke mit dem statischen System einer Scheibe auf die ansohließenden Bereiche verteilt werden kann.

Verkehrslast

auf der Tunneldecke und neben dem Tunnel auf den Erdstoffen

SLW 60 Ersatzlast $33,3\text{ kN/m}^2$

gleichmäßig verteilte Flächenlast

über dem SLW $5,0\text{ kN/m}^2$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

Länge des SLW $l = 6,00 \text{ m}$

Breite des SLW $b = 3,00 \text{ m}$

Gesamtbreite des Tunnels $b_T = 9,00 \text{ m}$

Schwingbeiwert

DIN 1072 Abs. 5.3.6

$$\gamma = 1,4 - 0,008 l_\gamma - 0,1 \cdot h_{\text{ü}} \geq 1,0$$

$$l_\gamma = 8,50 \text{ m}$$

$$h_{\text{ü}} = 2,75 \text{ m}$$

$$\gamma = 1,4 - 0,008 \cdot 8,50 - 0,1 \cdot 2,75 = 1,06$$

gleichmäßig verteilte Verkehrslast als Ersatzlast

$$p = 1,06 \cdot 33,3 \cdot \frac{3,00}{9,00} + 5,0 \cdot \frac{9,00 - 3,00}{9,00}$$

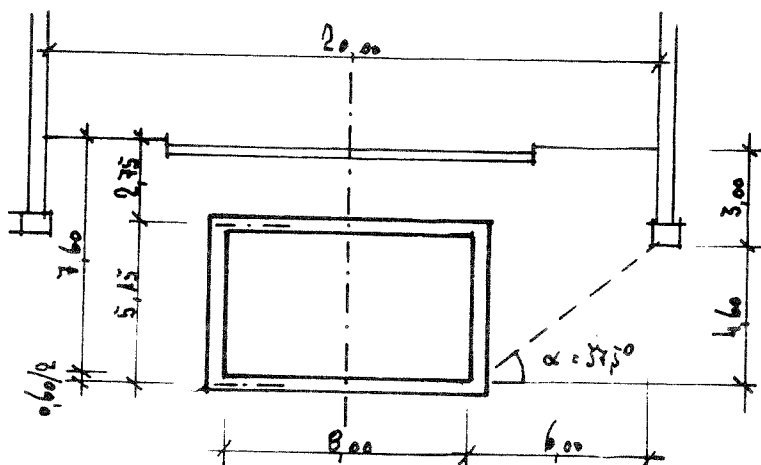
$$\approx 15,0 \text{ kN/m}^2$$

Diese Annahme dürfte auf der sicheren Seite liegen, da eine Lastverteilung über Last des SLW auch in Längsrichtung des Tunnels erfolgt.

Diese Verkehrslast deckt eine $0,80 \text{ m}$ hohe Erdauflast aus mitteldichten Sand ab.

$$h_E = \frac{15,0}{18,0} \approx 0,80 \text{ m}$$

Fundamentlast benachbarter Gebäude



Die Berücksichtigung des Einflusses einer Fundamentlast aus einem Gebäude neben dem Tunnel wird aus folgenden Grund nicht für erforderlich angesehen.

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

geschätzte Tiefe eines Gebäudefundamentes

Kellerhöhe	2,50 m
Fundamenthöhe	0,50 m
	$t_k = 3,00 \text{ m}$

Tiefe OF Tunnelsohle

$$t_{so} = 2,75 + 6,15 - 0,60/2 = 7,60 \text{ m}$$

Höhenunterschied der Fundamente

$$\Delta t = 7,60 - 3,00 = 4,60 \text{ m}$$

Straßenbreite

$$b_s = 20,00 \text{ m}$$

lichte Tunnelbreite

$$b_{TL} = 8,00 \text{ m}$$

Abstand Gebäudefundament bis Innenfläche Tunnel

$$s = (20,00 - 8,00)/2 = 6,00 \text{ m}$$

Winkel zwischen Fundament-Außenkante und der Kante innere Tunnelwand obere Tunnelsohle

$$\alpha = \arctan \frac{4,60}{6,00} = 37,5^\circ$$

Dieser Winkel entspricht etwa dem Reibungswinkel des Bodens

$$\alpha \approx \varphi = 35^\circ$$

Laster auf der Tunnelsohle

Es wird angenommen, daß die Laster aus

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

- Eigenlast der Tunnelsohle
- Schotterbett
- Schienenfahrzeuge

auf den Baugrund übertragen werden, ohne Schnittgrößen zu erzeugen.

Die Eigenlast der Tunnelsohle trifft beim Betonieren auf. In diesem Zustand hat der Beton keine Festigkeit und kann demzufolge keine Biegemomente aufnehmen.

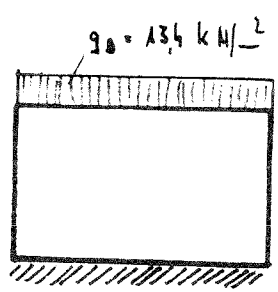
Ein Schotterbett auf der Tunnelsohle gibt die Lasten unmittelbar über die Tunnelsohle auf den Baugrund ab, und dürfte damit keine Durchbiegungen und damit auch keine Biegemomente zur Folge haben.

Die Lasten von Schienenfahrzeugen werden über Schienen, Schwellen, Schotterbett und Tunnelsohle verteilt. Außerdem dürfte diese Lasten Formänderungen der Tunnelsohle verursachen, die die Formänderungen infolge der Bodenpressung aus allen anderen Lastfällen mindestens teilweise wieder aufheben.

Ungleichmäßige Setzungen werden ausgeschlossen.

Anwendungsbeispiel für EC 2: Tunnelrahmen

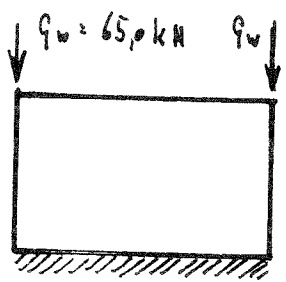
4. Belastungen; Sicherheit gegen Auftrieb
 Lastfall 1: Eigenlast der Tunneldecke



$$q_0 = \frac{0,50 + 0,55}{2} \cdot 25 = 13,1 \text{ kN/m}^2$$

$$\approx 13,4 \text{ kN/m}^2$$

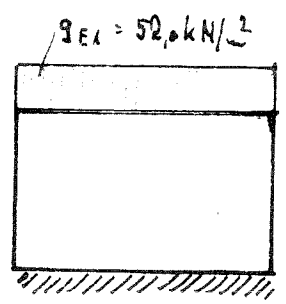
Lastfall 2: Eigenlast der Tunnelwände



$$q_w = 0,50 \cdot 5,15 \cdot 25 = 64,4 \text{ kN}$$

$$\approx 65,0 \text{ kN}$$

Lastfall 3a: Straße und Erdlast auf der Tunneldecke

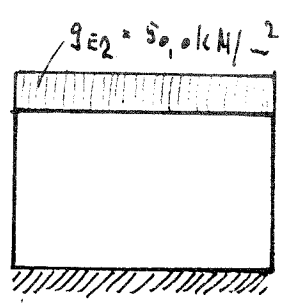


bei: $H_{GW} = -2,00 \text{ m}$

straße	$0,40 \text{ m} \cdot 24$	=	9,6	kN/m^2
Erdlast	$(2,00 - 0,40) \cdot 19$	=	30,4	-
	$(2,50 - 2,00) \cdot (11 + 10)$	=	10,5	-
Sonstiges, Abrundung		\approx	1,5	-

$$q_{E1} = 52,0 \text{ kN/m}^2$$

Lastfall 3b: Straße und Erdlast auf der Tunneldecke



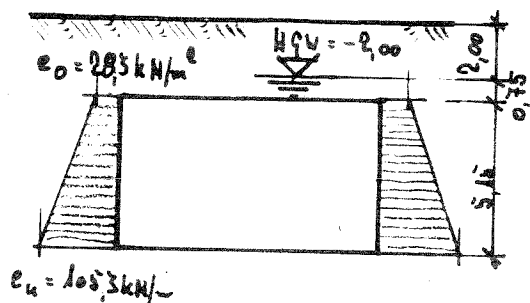
bei: $H_{GW} = -2,75 \text{ m}$

straße	$0,40 \text{ m} \cdot 24$	=	9,6	kN/m^2
Erdlast	$(2,50 - 0,40) \cdot 19$	=	39,9	-
Sonstiges, Abrundung		\approx	0,5	-

$$q_{E2} = 50,0 \text{ kN/m}^2$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

Lastfall 4a: Erddruck auf die Tunnelwände
bei $HGW = -2,00$



Erddruckwinkel

$$K_0 = 1 - \sin \varphi'$$

$$= 1 - \sin 35^\circ = 0,43$$

$$\approx 0,45$$

Näherungsweise

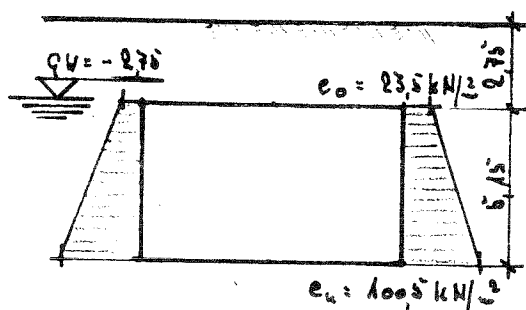
$$e_0 = 0,45 \cdot 19 \cdot 2,00 + 0,45 \cdot 11 \cdot 0,75 + 10 \cdot 0,75$$

$$= 28,3 \text{ kN/m}^2$$

$$e_u = 0,45 \cdot 19 \cdot 2,00 + 0,45 \cdot 11 \cdot (0,75 + 5,15) + 10 \cdot (0,75 + 5,15)$$

$$= 105,3 \text{ kN/m}^2$$

Lastfall 4b: Erddruck auf die Tunnelwände
bei $GW = -2,75$



Näherungsweise

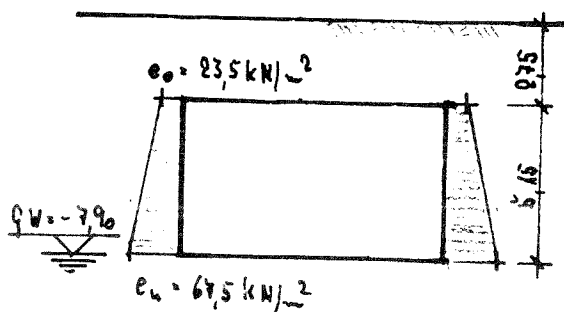
$$e_0 = 0,45 \cdot 19 \cdot 2,75$$

$$= 23,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e_u = 0,45 \cdot 19 \cdot 2,75 + 0,45 \cdot 11 \cdot 5,15 + 10 \cdot 5,15$$

$$= 100,5 \text{ kN/m}^2$$

Lastfall 4c: Erddruck auf die Tunnelwände
bei $GW = -7,90$



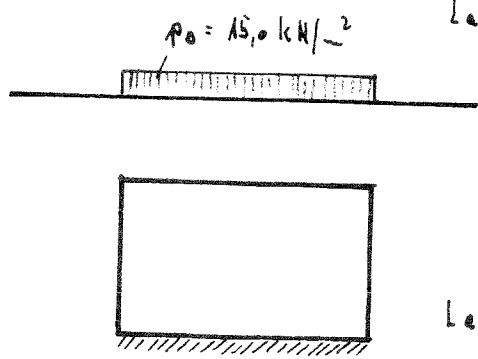
$$e_0 = 0,45 \cdot 19 \cdot 7,90$$

$$= 23,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e_u = 0,45 \cdot 19 \cdot 7,90$$

$$= 67,5 \text{ kN/m}^2$$

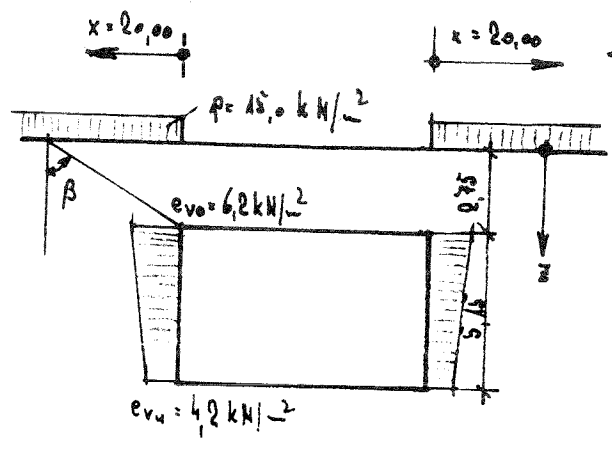
Anwendungsbeispiel für EEL; Tunnelrahmen



Lastfall 5: Verkehrslast auf der Tunneldecke

$p_0 = 15,0 \text{ kN/m}^2$

Lastfall 6: Erddruck auf die Tunnelwände infolge Verkehrslast neben dem Tunnel

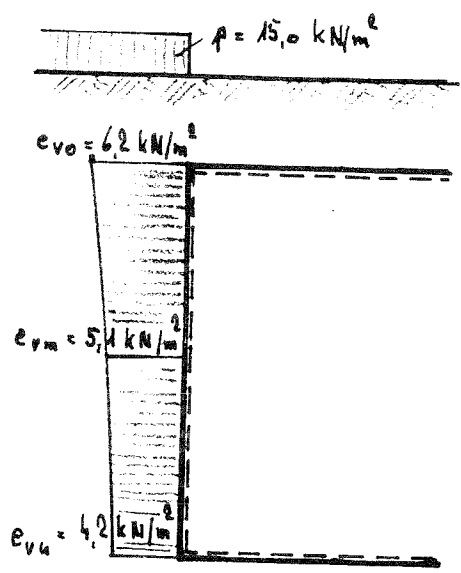


- Türkei, H.: Statik im Erdbau. Erd B. S. 11.
Beil.: 1990.

Abs. 6/15 Ruhedruckspannung
Die Berechnung liegt auf der sicheren Seite, wenn neben dem Tunnel ein $x = 20,00 \text{ m}$ breiter belasteter Streifen angenommen wird.

$$e_v = \frac{p}{\pi} (\beta - \sin \beta \cdot \cos \beta)$$

$$p = 15,0 \text{ kN/m}^2$$



$z = 2,75 \text{ m} :$

$$e_{vo} = \frac{15,0}{\pi} \left(\arctan \frac{20,00}{2,75} - \sin \arctan \frac{20,00}{2,75} \cdot \cos \arctan \frac{20,00}{2,75} \right) = 6,2 \text{ kN/m}^2$$

$z = 2,75 + 5,15/2 \approx 5,35 \text{ m} :$

$$e_{vm} = \frac{15,0}{\pi} \left(\arctan \frac{20,00}{5,35} - \sin \arctan \frac{20,00}{5,35} \cdot \cos \arctan \frac{20,00}{5,35} \right) = 5,1 \text{ kN/m}^2$$

$z = 2,75 + 5,15 = 7,90 \text{ m} :$

$$e_{vu} = \frac{15,0}{\pi} \left(\arctan \frac{20,00}{7,90} - \sin \arctan \frac{20,00}{7,90} \cdot \cos \arctan \frac{20,00}{7,90} \right) \approx 4,2 \text{ kN/m}^2$$

Der Erddruck wird näherungsweise linear über die

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelbau

Höle angenommen.

Vergleichsweise ergibt sich für einen

$$x = 10,00 \text{ m}$$

breiten belasteten Streifen neben dem Tunnel

$$z = 2,75 \text{ m} :$$

$$e_{v0} = 5,0 \text{ kN/m}^2$$

$$z = 5,75 \text{ m} :$$

$$e_{vm} = 3,2 \text{ kN/m}^2$$

$$z = 7,90 \text{ m}$$

$$e_{vn} = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

Der Erddruck ist bei 10,00 m Belastungsbreite zu Teil wesentlich geringer als bei 20,00 m.

Diesen Unterschied ist aber im Vergleich zum Erddruck nach Lastfall 4 unwesentlich.

Sicherheit gegen Auftrieb

Eigenlast des Tunnels

$$0,9(9,00 \cdot 5,70 - 0,00 \cdot 4,60) \cdot 25 = 306,3 \text{ kN}$$

$$\text{Straßendecke } 0,9 \cdot 9,00 \cdot 0,40 \cdot 24 = 77,8 \text{ kN}$$

Erdenlast

$$0,9 \cdot 9,00 [(2,00 - 0,40) \cdot 19 + (2,50 - 2,00) \cdot 11] = 290,8 \text{ kN}$$

$$= 694,8 \text{ kN}$$

$$\text{Auftrieb } 1,1 \cdot 9,00 \cdot 5,70 \cdot 10 = 564,3 \text{ kN}$$

$$< 694,8 \text{ kN}$$

Bei bestimmten Bauzuständen ist das Grundwasser gegebenenfalls abzusenken.

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

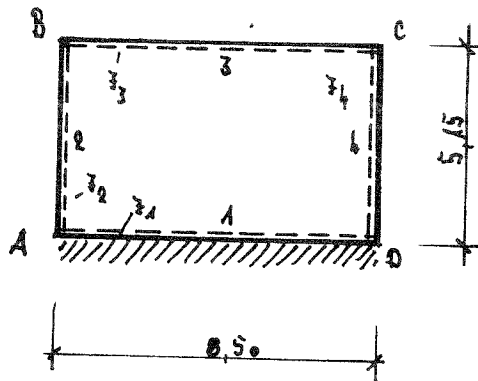
5. Schnittgrößen

Die Berechnung erfolgt nach

- Kleinlogel, A.: Rahmenformeln.

Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1949.

Rahmenform 109

Normalkräfte bei Druck
positiv

$$k_1 = \frac{z_2}{z_1} = \frac{0,50^3}{0,60^3} = 0,579$$

$$k_2 = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{h}{l} = \frac{0,50^3 \cdot 5,15}{0,50^2 \cdot 8,50} = 0,606$$

$$K_1 = 2k_2 + 3 = 2 \cdot 0,606 + 3 = 4,212$$

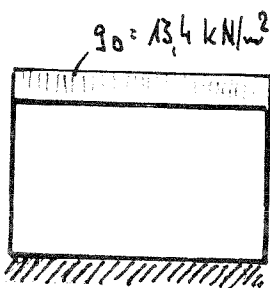
$$K_2 = 3k_1 + 2k_2 = 3 \cdot 0,579 + 2 \cdot 0,606 = 2,948$$

$$K_3 = 3k_2 + 1 - \frac{k_1}{5} = 3 \cdot 0,606 + 1 - \frac{0,579}{5} = 2,702$$

$$K_4 = \frac{6k_1}{5} + 3k_2 = \frac{6 \cdot 0,579}{5} + 3 \cdot 0,606 = 2,512$$

$$N_1 = K_1 \cdot K_2 - k_2^2 = 4,212 \cdot 2,948 - 0,606^2 = 12,049$$

$$N_2 = 1 + k_1 + 6 \cdot k_2 = 1 + 0,579 + 6 \cdot 0,606 = 5,214$$



Lastfall 1: Eigelast der Tunneldecke

$$q_0 = 13,4 \text{ kN/m}^2$$

$$M_A = M_D = - \frac{13,4 \cdot 8,50^2}{4 \cdot 12,049} (0,579 \cdot 4,212 - 0,606)$$

$$= - 36,8 \text{ kNm}$$

$$M_B = M_C = - \frac{13,4 \cdot 8,50^2}{4 \cdot 12,049} (2,948 - 0,579 \cdot 0,606)$$

$$= - 50,2 \text{ kNm}$$

$$\text{max } M_1 = \frac{13,4 \cdot 8,50^2}{8} - 36,8$$

$$= + 84,2 \text{ kNm}$$

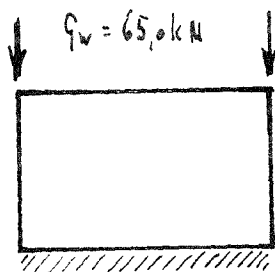
Anwendungsbeispiel für EQL; Tunnelrahmen

$$\begin{aligned} \text{max } M_3 &= \frac{13,4 \cdot 8,5^2}{8} - 52,2 \\ &= +68,8 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{4m} = M_{2m} &= -\frac{36,8 + 52,2}{2} \\ &= -44,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$S_1 = -S_3 = \frac{-52,2 + 36,8}{5,15} = -3,0 \text{ kN}$$

$$S_2 = S_4 = \frac{13,4 \cdot 8,5}{2} = 57,0 \text{ kN}$$



Lastfall 2: Eigenlast der Tunnelwände

$$q_w = 65,0 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} M_A = M_D &= -\frac{65,0 \cdot 8,5^2 \cdot 0,579}{2 \cdot 12,049} \cdot 4,212 \\ &= -55,9 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_B = M_C &= +\frac{65,0 \cdot 8,5^2 \cdot 0,579}{2 \cdot 12,049} \cdot 0,606 \\ &= +8,0 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{max } M_1 &= \frac{2 \cdot 65,0 \cdot 8,5^2}{8} - 55,9 \\ &= +82,2 \text{ kNm} \end{aligned}$$

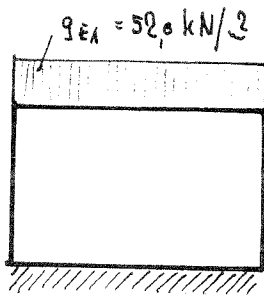
$$\text{max } M_3 = +8,0 \text{ kNm}$$

$$M_{2m} = M_{4m} = \frac{-55,9 + 8,0}{2} = -24,0 \text{ kNm}$$

$$S_1 = -S_3 = \frac{8,0 + 55,9}{5,15} = 12,4 \text{ kN}$$

$$S_2 = S_4 = 65,0 \text{ kN}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen



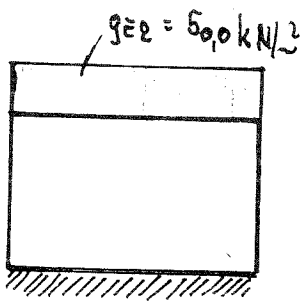
Lastfall 3a: Straße und Erdlast auf der Tunneldecke

bei: $HGW = -2,00$ m

$$g_{E1} = 50,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\eta = \frac{50,0}{13,4} = 3,73$$

Die Schnittgrößen werden durch Multiplikation mit dem Faktor η aus Lastfall 1 berechnet.



Lastfall 3b: Straße und Erdlast auf der Tunneldecke

bei: $HGW = -2,75$ m

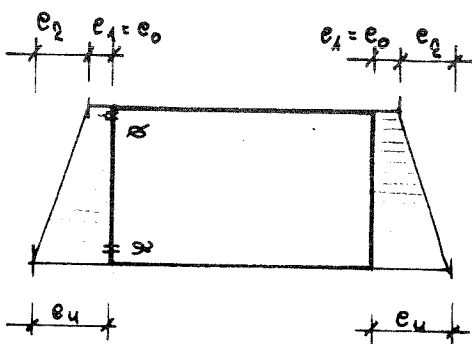
$$g_{E2} = 50,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\eta = \frac{50,0}{13,4} = 3,73$$

Die Schnittgrößen werden durch Multiplikation mit dem Faktor η aus Lastfall 1 berechnet.

Die Lastfälle 3a und 3b schließen sich gegenseitig aus.

Lastfall 4: Erddruck auf die Tunnelwände



$$g = \frac{5,15^2}{4} \cdot e_1 + \frac{2}{15} \cdot 5,15^2 \cdot e_2$$

$$= 6,631 \cdot e_1 + 3,536 \cdot e_2$$

$$q = \frac{5,15^2}{4} \cdot e_1 + \frac{7}{60} \cdot 5,15^2 \cdot e_2$$

$$= 6,631 \cdot e_1 + 3,094 \cdot e_2$$

$$M_A = M_B = M_C = -\frac{0,606}{12,049} \left[4,212(6,631e_1 + 3,536e_2) - 0,606(6,631e_1 + 3,094e_2) \right]$$

$$= -1,202 \cdot e_1 - 0,655 \cdot e_2$$

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

$$M_B = M_C = M_3 = -\frac{0,606}{12,049} \left[2,948(6,631 \cdot e_1 + 3,074 \cdot e_2) - 0,606(6,631 \cdot e_1 + 3,536 \cdot e_2) \right]$$

$$= -0,781 \cdot e_1 - 0,351 \cdot e_2$$

$$S_1 = \frac{5,15}{2} e_1 + \frac{5,15}{3} e_2 + \frac{1}{5,15} (-0,781 \cdot e_1 - 0,351 \cdot e_2 + 1,202 \cdot e_1 + 0,655 \cdot e_2)$$

$$= 2,657 \cdot e_1 + 1,776 \cdot e_2$$

$$S_3 = \frac{5,15}{2} e_1 + \frac{5,15}{6} e_2 + \frac{1}{5,15} (0,781 \cdot e_1 + 0,351 \cdot e_2 - 1,202 \cdot e_1 - 0,655 \cdot e_2)$$

$$= 2,493 \cdot e_1 + 0,799 \cdot e_2$$

Lastfall 4a: Erddruck auf die Tunnelwände

$$b_0: HGW = -2,00 \text{ m}$$

$$e_0 = e_1 = 28,3 \text{ kN/m}^2$$

$$e_u = 105,3 \text{ kN/m}^2$$

$$e_2 = 105,3 - 28,3 = 77,0 \text{ kN/m}^2$$

Die Schnittgrößen sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Maximales Moment

$$Q_x = 211,9 - 105,3 \cdot x + 77,0 \cdot \frac{x^2}{2 \cdot 5,15} = 0$$

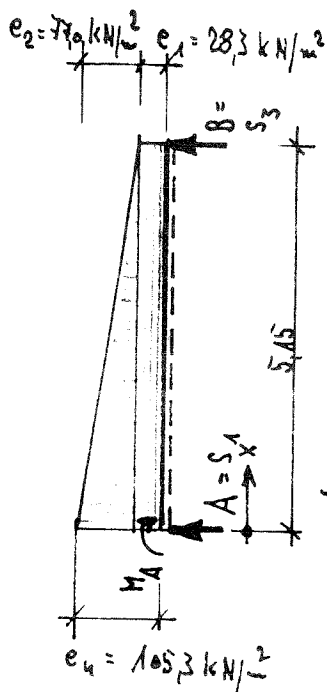
$$x^2 - 14,086x + 20,345 = 0$$

$$x_{1,2} = 7,043 \pm \sqrt{49,601 - 20,345}$$

$$= 2,43 \text{ m}$$

$$\text{max } M_0 = M_4 = 211,9 \cdot x - 105,3 \cdot \frac{x^2}{2} + 77,0 \cdot \frac{x^3}{6 \cdot 5,15} - 84,5$$

$$= +155,4 \text{ kNm}$$



Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelbauwerke

Lastfall 4b: Erddruck auf die Tunnelwände

$$\text{bei: } q_w = -2,75 \text{ m}$$

$$e_0 = e_1 = 23,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e_u = 100,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e_2 = 100,5 - 23,5 = 77,0 \text{ kN/m}^2$$

Die Schnittgrößen sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Maximales Moment

$$Q_x = 199,2 - 100,5 \cdot x + 77,0 \cdot \frac{x^2}{2 \cdot 5,15} = 0$$

$$x^2 - 13,444x + 26,646 = 0$$

$$x_{1,2} = 6,722 - \sqrt{45,102 - 26,646}$$

$$= 2,42 \text{ m}$$

$$\text{max } M_2 = M_4 = 199,2 \cdot x - 100,5 \cdot \frac{x^2}{2} + 77,0 \cdot \frac{x^3}{6 \cdot 5,15} - 78,7$$

$$= 144,4 \text{ kNm}$$

Lastfall 4c: Erddruck auf die Tunnelwände

$$\text{bei: } q_w = -7,90 \text{ m}$$

$$e_0 = e_1 = 23,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e_u = 67,5 \text{ kN/m}^2$$

$$e_2 = 67,5 - 23,5 = 44,0 \text{ kN/m}^2$$

Die Schnittgrößen sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Maximales Moment

$$Q_x = 140,6 - 67,5 \cdot x + 44,0 \cdot \frac{x^2}{2 \cdot 5,15} = 0$$

$$x^2 - 15,801x + 32,913 = 0$$

$$x_{1,2} = 7,901 \pm \sqrt{62,419 - 32,913}$$

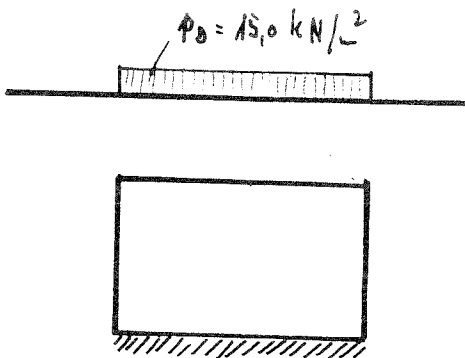
$$= 2,47 \text{ m}$$

Anwendungsbeispiel für EQR; Tunnelrahmen

$$\begin{aligned} \max M_0 = M_4 &= 140,6 \cdot x - 67,5 \cdot \frac{x^2}{2} + 44,0 \cdot \frac{x^3}{6 \cdot 5,15} - 57,1 \\ &= 105,7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Die Lastfälle 4a, 4b und 4c schließen sich gegenseitig aus.

Der Lastfall 4a ist mit dem Lastfall 3a verbunden.

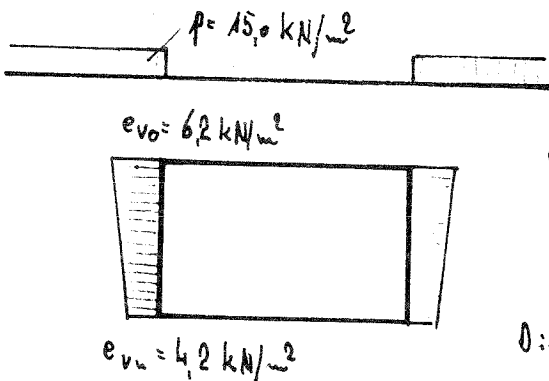


Lastfall 5: Verkehrslast auf der Tunneldecke

$$p_0 = 15,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\eta = \frac{15,0}{13,4} = 1,119$$

Die Schnittgrößen werden durch Multiplikation mit dem Faktor η aus Lastfall 1 berechnet.



Lastfall 6: Erddruck auf die Tunnelwände infolge Verkehrslast neben dem Tunnel

$$e_{v0} = e_l = 6,2 \text{ kN/m}^2$$

$$e_{vu} = 4,2 \text{ kN/m}^2$$

$$e_r = 4,2 - 6,2 = -2,0 \text{ kN/m}^2$$

Die Schnittgrößen sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Maximales Moment

$$Q_x = 12,9 - 4,2x - 2,0 \cdot \frac{x^2}{2 \cdot 5,15} = 0$$

$$x^2 + 21,630x - 66,435 = 0$$

$$x_{1,2} = -10,815 \pm \sqrt{116,964 + 66,435}$$

$$= 2,73 \text{ m}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

$$\begin{aligned} \max M_2 = M_4 &= 12,9 \cdot x - 4,2 \frac{x^2}{2} - 2,1 \cdot \frac{x^3}{6 \cdot 5,15} - 6,1 \\ &= 12,1 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Zusammenstellung der Schnittgrößen: Deckkräfte positiv

LF	Lastfall	$M_A = M_D$	$M_B = M_C$	M_1	$M_2 = M_4$	M_3	S_1	$S_2 = S_4$	S_3
1	Eigenlast, Decke $g_0 = 13,4 \text{ kN/m}^2$	-36,8	-52,2	+84,2	-44,5	+68,8	-3,0	+57,0	+3,0
2	Eigenlast, Wände $q_w = 65,0 \text{ kN}$	-55,9	+8,0	+82,2	-24,0	+8,0	+12,4	+65,0	-12,4
3a	Straße, Erdlast $g_{E1} = 52,0 \text{ kN/m}^2$	-142,8	-202,5	+326,9	-172,6	+267,2	-11,6	+221,0	+11,6
3b	Straße, Erdlast $g_{E2} = 50,0 \text{ kN/m}^2$	-137,3	-194,7	+314,3	-166,0	+256,9	-11,1	+212,5	+11,1
4a	Erddruck bei HQW-200 $e_1 = 28,3 ; e_2 = 77,0$	-84,5	-49,1	-84,5	+155,4	-49,1	+211,9	0,0	+132,1
4b	Erddruck bei qW-275 $e_1 = 23,5 ; e_2 = 77,0$	-78,7	-45,4	-78,7	+144,4	-45,4	+199,2	0,0	+120,1
4c	Erddruck bei qW-390 $e_1 = 23,5 ; e_2 = 44,0$	-57,1	-33,8	-57,1	+105,7	-33,8	+140,6	0,0	+93,7
5	Verkehrslast auf Tunnel $p_D = 15,0 \text{ kN/m}^2$	-41,2	-58,4	+94,3	-49,8	+77,1	-3,3	+63,8	+3,3
6	Erddruck infolge Verkehr $e_1 = 6,2 ; e_2 = -2,0$	-6,1	-4,1	-6,1	+12,1	-4,1	+12,9	0,0	+18,9
Σ LF 1, 2, 3a, 4a, 5, 6		-367,3	-358,3	+497,0	-123,4	+367,9	+219,3	+406,8	+151,5
Σ LF 1, 2, 3b, 4c, 5		-328,3	-331,1	+517,8	-178,6	+377,0	+135,6	+398,3	+98,7
Σ LF 1, 2, 3b, 4b; standig		-308,7	-284,3	+402,0	-90,1	+288,3	+197,5	+334,5	+121,8
Σ LF 1, 2, 3b, 4c; standig		-287,1	-272,7	+423,6	-128,8	+299,9	+138,9	+334,5	+95,4

Anwendungsbeispiel für EOL, Tunnelrahmen

Extreme Schnittgrößen

Die Addition der Extremwerte der Momente M_2, M_4 aus den verschiedenen Lastfällen ist nicht exakt, da sie nicht an den gleichen Stellen auftreten. Der Unterschied ist aber unmerklich und liegt auf der sicheren Seite.

Die Überlagerung der Lastfälle 1, 2, 3a, 4a, 5 und 6 ergibt die größten Momente an den Knoten und die größten Normalkräfte.

Die Überlagerung der Lastfälle 1, 2, 3b, 4c und 5 ergibt die größten Momente in Stabmitte.

Die Momente in der Mitte der Tunnelsohle und der Tunneldecke infolge der Lastfälle 1, 2, 3a, 4a, 5 und 6 und infolge der Lastfälle 1, 2, 3b, 4c und 5 unterscheiden sich nur unwesentlich - maximal 4,2% - wohl aber die Normalkräfte.

Die Überlagerung der Lastfälle 1, 2, 3b und 4b wird als ständige Belastung angesehen.

Die größten Momente an den Knoten und die größten Normalkräfte ergeben sich aus den Lastfällen 1, 2, 3a, 4a, 5 und 6.

Die größten Momente in Stabmitte ergeben sich aus den Lastfällen 1, 2, 3b, 4c und 5.

Die Momente in der Mitte der Tunnelsohle und in der Mitte der Tunneldecke infolge der Lastfälle 1, 2, 3b, 4c und 5 und infolge der Lastfälle 1, 2, 3a, 4a, 5 und 6 unterscheiden sich nur unwesentlich - maximal 4,2% - wohl aber die Normalkräfte.

Als ständige Belastung werden die Lastfälle 1, 2, 3b und 4b beziehungsweise 1, 2, 3b und 4c angesehen.

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

b. Baustoffe und Kennwerte, Betondeckung

Beton C 35/45 nach EC 2
entspricht B 35 nach DIN 1045

charakteristische Zylinderdruckfestigkeit

$$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC 2, Tab. 3.1}$$

Elastizitätsmodul

$$E_{cm} = 33,5 \text{ kN/mm}^2 \quad \text{EC 2, Tab. 3.2}$$

Bemessungsschubfestigkeit

$$\tau_{Rd} = 0,37 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC 2, Tab. 4.8}$$

Betonstahl B St 500 S nach DIN 488

Festigkeit an der Streckgrenze

$$f_y = 500 \text{ N/mm}^2$$

Elastizitätsmodul

$$E_s = 200 \text{ kN/mm}^2 \quad \text{EC 2, Abs. 3.3.4.4 (1)}$$

Betondeckung

Umweltklasse 2a EC 2, Tab. 4.1

feuchte Umgebung ohne Frost

Bauteile in nichtaggressivem Boden und Wasser

ohne Frost

min $c = 20 \text{ mm}$

EC 2, Tab. 4.2

Verhältnismaß der Betondeckung

$$s_{min} < \Delta h < s_{max}$$

EC 2, Abs. 4.1.3.3 (8)

angenommen $\Delta h = 10 \text{ mm}$

Rechnerische Betondeckung

$$\text{nom } c = 20 + 10 = 30 \text{ mm}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunneldecken

7. Bemessung nach DIN 1045

Tunneldecke, Knoten B

$$d = 0,50 \text{ m}; \quad h = 0,50 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Schallgrößen am Wandanschnitt nach Tab. 5.18

$$Q_A = 406,8 - 65,0 = 341,8 \text{ kN}$$

$$q = 13,4 + 52,0 + 15,0 = 80,4 \text{ kN/m}^2$$

$$M_B^I = -358,3 + 341,8 \cdot 0,25 - 80,4 \cdot 0,25^2 / 2$$

$$= -275,4 \text{ kNm}$$

$$M_3 = -151,5 \text{ kNm}$$

$$M_2 = 275,4 + 151,5(0,46 - 0,50/2) = 307,2 \text{ kNm}$$

$$k_h = 46 \sqrt{1,00 / 307,2} = 2,62$$

$$k_x = 0,22; \quad k_s = 3,8; \quad k_z = 0,92$$

$$\varepsilon_b = -1,41 \text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0 \text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{307,2}{46} \cdot 3,8 - \frac{10 \cdot 151,5}{206}$$

$$= 20,1 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Tunneldecke, Feldmitte

$$d = 0,55 \text{ m}; \quad h = 0,55 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,51 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_2 = 377,0 + 98,7(0,51 - 0,55/2) = 400,2 \text{ kNm}$$

$$k_h = 51 \sqrt{1,00 / 400,2} = 2,55$$

$$k_x = 0,23; \quad k_s = 3,82; \quad k_z = 0,92$$

$$\varepsilon_b = -1,49 \text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0 \text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{400,2}{51} \cdot 3,82 - \frac{10 \cdot 98,7}{206}$$

$$= 26,5 \text{ cm}^2$$

Anwendungsbeispiel für EC2: Tunnelrahmen

Tunnelsohle, Knoten A

$d = 0,60 \text{ m}$; $h = 0,60 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,56 \text{ m}$; $b = 1,00 \text{ m}$
 Schnittgrößen am Wandanschnitt nach Tab. S. 18

$$Q_A = 406,8 \text{ kN}$$

$$q = 13,4 + 2 \cdot 65,0 / 8,50 + 52,0 + 15,0 = 95,7 \text{ kN/m}^2$$

$$M_A' = -367,3 + 406,8 \cdot 0,25 - 95,7 \cdot 0,25^2 / 2$$

$$= -268,6 \text{ kNm}$$

$$M_A = -219,3 \text{ kNm}$$

$$M_S = 268,6 + 219,3(0,56 - 0,60/2) = 325,6 \text{ kNm}$$

$$k_h = 56 \sqrt{1,00 / 325,6} = 3,10$$

$$k_x = 0,19; \quad k_s = 3,75; \quad k_z = 0,93$$

$$\varepsilon_b = -1,20\text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0\text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{325,6}{56} \cdot 3,75 - \frac{10 \cdot 219,3}{286}$$

$$= 14,1 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Tunnelsohle, Feldmitte

$d = 0,60 \text{ m}$; $h = 0,56 \text{ m}$; $b = 1,00 \text{ m}$

$$M_S = 518,8 + 135,6(0,56 - 0,60/2) = 553,1 \text{ kNm}$$

$$k_h = 56 \sqrt{1,00 / 553,1} = 2,38$$

$$k_x = 0,25; \quad k_s = 3,85; \quad k_z = 0,91$$

$$\varepsilon_b = -1,66\text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0\text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{553,1}{56} \cdot 3,85 - \frac{10 \cdot 135,6}{286}$$

$$= 33,3 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Anwendungsbeispiel für ECR; Tunnelrahmen

Tunnelwand, Knoten A

$$d = 0,50 \text{ m}; \quad h = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Schnittgrößen am Sohlenanschnitt nach Tab. S.19

$$Q_A = 219,3 \text{ kN}$$

$$q = 28,3 + 77,0 + 6,2 - 2,0 = 109,5 \text{ kN/m}^2$$

$$M_A' = -367,3 + 219,3 \cdot 0,30 - 109,5 \cdot 0,30^2 / 2 + (77,0 - 2,0) \frac{0,30^3}{6 \cdot 0,5 \cdot 1,5}$$

$$= -306,4 \text{ kNm}$$

$$N_2 = -406,8 \text{ kN}$$

$$M_S = 306,4 + 406,8 (0,46 - 0,50/2) = 391,8 \text{ kNm}$$

$$k_h = 46 \sqrt{1,00 / 391,8} = 2,32$$

$$k_x = 0,26; \quad k_s = 3,87; \quad k_2 = 0,91$$

$$\varepsilon_b = -1,71 \text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0 \text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{391,8}{46} \cdot 3,87 - \frac{1,0 \cdot 406,8}{286}$$

$$= 18,7 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Feldmitte

$$d = 0,50 \text{ m}; \quad h = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_S = 178,6 + 398,3 (0,46 - 0,50/2) = 262,2 \text{ kNm}$$

$$k_h = 46 \sqrt{1,00 / 262,2} = 2,84$$

$$k_x = 0,21; \quad k_s = 3,78; \quad k_2 = 0,93$$

$$\varepsilon_b = -1,29 \text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0 \text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{262,2}{46} \cdot 3,78 - \frac{1,0 \cdot 398,3}{286}$$

$$= 7,6 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Knoten B

$$d = 0,50 \text{ m}; \quad h = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Schnittgrößen am Deckanschnitt nach Tab. S.19

Anwendungsbeispiel für ECD; Tunnelrahmen

$$Q_B = 151,5 \text{ kN}$$

$$q = 28,3 + 77,0 + 6,2 - 0,0 = 109,5 \text{ kN/m}^2$$

$$M_B' = -350,3 + 151,5 \cdot 0,25 - 34,5 \cdot 0,25^2/2 - (77,0 - 0,0) \frac{0,25^3}{6 \cdot 5,15} \\ \approx -321,5 \text{ kNm}$$

$$N_2 = -406,8 + 65,0 = -341,8 \text{ kN}$$

$$M_S = 321,5 + 341,8(0,46 - 0,50/2) = 393,3 \text{ kNm}$$

$$k_h = 46 \sqrt{1,00/393,3} = 2,3$$

$$k_x = 0,26; \quad k_s = 3,87; \quad k_2 = 0,91$$

$$\varepsilon_b = -1,91\text{‰}; \quad \varepsilon_s = 5,0\text{‰}$$

$$\text{erf } A_s = \frac{393,3}{46} \cdot 3,87 - \frac{10 \cdot 341,8}{286} \\ = 2,2 \text{ cm}^2$$

Bemessung für Querkraft

Tunnel decke

$$\text{war } Q = 406,8 - 65,0 = 341,8 \text{ kN}$$

$$q = 13,4 + 52,0 + 15,0 = 80,4 \text{ kN/m}^2$$

maßgebende Querkraft

$$Q_s = 341,8 - 80,4(0,25 + 0,46/2) = 303,2 \text{ kN}$$

Grundwert der Schubspannung

$$\tau_0 = \frac{303,2}{1,00 \cdot 0,92 \cdot 0,46} = 716 \text{ kN/m}^2$$

Grenzen der Grundwerte der Schubspannung

bei gestaffelter Bewehrung

$$\tau_{0,11} = 400 \text{ kN/m}^2 < \tau_0 = 716 \text{ kN/m}^2 < \tau_{0,2} = 2400 \text{ kN/m}^2$$

$$\eta = 716/2400 = 0,30 < \eta_4$$

Bemessungswert

$$\tau = 0,4 \cdot 716 = 286 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{erf } A_\tau = 286 \cdot 1,00 \cdot \frac{1,75}{500000} = 1,00 \text{ cm}^2$$

Anwendungsbeispiel für ECL; Tunnelrahmen

Die Schubbewehrung ist auf eine Länge von

$$x = \frac{2 \cdot Q_s}{q} = \frac{400 \cdot 992 \cdot 0,46 \cdot 1,00}{80,4} = 2,11 \text{ m}$$

zu verteilen.

Für durchgehende Bewehrung gilt

$$x = \frac{600 \cdot 992 \cdot 0,46}{80,4} = 3,16 \text{ m}$$

Tunnelsohle

$$\max Q = 406,8 \text{ kN}$$

$$q = 13,4 + 2 \cdot 65,0/8,50 + 80,0 + 13,0 = 95,7 \text{ kN/m}^2$$

wirfgebende Querkraft

$$Q_s = 406,8 - 95,7 \cdot (0,30 + 0,56/2) = 351,3 \text{ kN}$$

Grundwert der Schubspannung

$$\tau_0 = \frac{351,3}{1,00 \cdot 93 \cdot 0,56} = 675 \text{ kN/m}^2$$

Grenzen der Grundwerte der Schubspannung bei gestaffelter Bewehrung

$$\tau_{011} = 400 \text{ kN/m}^2 < \tau_0 = 675 \text{ kN/m}^2 < \tau_{02} = 2400 \text{ kN/m}^2$$

$$\eta = 675/2400 = 0,28 < 0,4$$

Bewertungswert

$$\tau = 0,4 \cdot 675 = 270 \text{ kN/m}^2$$

$$A_z = 270 \cdot 1,00 \cdot \frac{1,75}{500000} = 9,5 \text{ m}^2$$

Die Schubbewehrung ist auf eine Länge von

$$x = \frac{2 \cdot Q_s}{q} = \frac{400 \cdot 993 \cdot 0,56 \cdot 1,00}{95,7} = 2,18 \text{ m}$$

zu verteilen.

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

8. Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit für Biegung nach EC2 ohne Momentenumlagerung
Kennwerte der Baustoffe siehe Abs. 6, S. 21

Teilsicherheitsbeiwerte für ständige Einwirkungen

EC2, Abs. 2.3.3.1

$$\gamma_g = 1,35$$

EC2, Tab. 2.2

veränderliche Einwirkungen

$$\gamma_Q = 1,5$$

EC2, Tab. 2.2

Teilsicherheitsbeiwerte für

Beton

EC2, Abs. 2.3.3.2

$$\gamma_c = 1,5$$

EC2, Tab. 2.3

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

$$= 35 / 1,5 = 23,3 \text{ N/mm}^2$$

EC2, 9.2. (4.1)

$$E_{cd} = E_{cm} / \gamma_c$$

$$= 33,5 / 1,5 = 22,3 \text{ kN/mm}^2$$

EC2, 9.2. (4.1)

Betonstahl

$$\gamma_s = 1,15$$

EC2, Tab. 2.3

$$f_{yd} = f_y / \gamma_s$$

$$= 500 / 1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$$

Tunneldecke, Knoten B; LF 1, 2, 3a, 4a; 5, 6

$$M_{sd} = -1,35(50,2 - 0,0 + 2 \cdot 0,5 + 49,1) - 1,5(58,4 + 4,1)$$

$$= -493,1 \text{ kNm}$$

$$q_d = 1,35(13,4 + 52,0) + 1,5 \cdot 15,0$$

$$= 110,8 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{Bd} = 1,35(57,0 + 221,0) + 1,5 \cdot 63,8$$

$$= 471,0 \text{ kN}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrakete

$$N_{sd} = -1,35(3,0 - 12,4 + 11,6 + 132,1) - 1,5(3,3 + 13,9) \\ = -207,1 \text{ kN}$$

Schnittgröße an Wanderschnitt

$$M_{sd}^I = -493,1 + 471,0 \cdot 0,25 - 110,8 \cdot 0,25^2 / 2 \\ = -378,8 \text{ kNm}$$

$h = 0,50 \text{ m}$; $d = 0,50 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,46 \text{ m}$; $b = 1,00 \text{ m}$
auf die Bewehrung bezogenes Moment

$$M_{sds} = M_{sd} - N_{sd} \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad \text{HM 90. (6.12)}$$

$$= 378,8 + 207,1(0,46 - 0,50/2) = 422,3 \text{ kNm}$$

dimensionales bezogenes Moment

$$\mu_{sds} = \frac{M_{sds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad \text{HM 90. (6.11)}$$

$$= \frac{422,3}{1,00 \cdot 0,46^2 \cdot 23300} = 0,0857$$

$$< 0,252 = \mu_{sds, \text{lim}} \quad \text{HM Abs. 6.2.2.1.3}$$

$$\xi = 0,135; \quad \eta = 0,945; \quad \varepsilon_{ce} = -3,13; \quad \varepsilon_{sx} = 2000$$

$$\text{auf } A_{sx} = \frac{1}{\sigma_{sx}} \left(\frac{M_{sds}}{z} + N_{sd} \right) \quad \text{HM 90. (6.14)}$$

$$= \left[\frac{422,3}{(0,945 \cdot 0,46)} - 207,1 \right] / 435000 \\ = 17,6 \text{ cm}^2$$

Tunnelbohrer, Feldmitte; LF 1, 2, 3b, 4c; 5

$$h = 0,55 \text{ m}; \quad d = 0,55 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,51 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = 1,35(68,8 + 8,0 + 256,9 - 33,8) + 1,5 \cdot 77,1 = 520,5 \text{ kNm}$$

$$N_{sd} = -1,35(3,0 - 12,4 + 11,1 + 93,7) - 1,5 \cdot 3,3 = -133,7 \text{ kN}$$

Anwendungsbeispiel für EC 2: Tunnelbohrer

$$M_{sds} = 520,5 + 133,7 \left(0,51 - \frac{0,55}{2} \right) = 551,9 \text{ kNm}$$

dimensionsloses Moment

$$\mu_{sds} = \frac{551,9}{1,00 \cdot 0,51^2 \cdot 23300} = 0,0911 < 0,252 = \mu_{sds,pl}$$

$$\xi = 0,143 ; \quad \eta = 0,935 ; \quad \epsilon_{ce} = -3,30 \quad \epsilon_{s1} = 19,86$$

$$\text{erf } A_{s1} = \left(\frac{551,9}{0,935 \cdot 0,51} - 133,7 \right) / 435000 = 23,5 \text{ cm}^2$$

Tunnelbohrer, Knoten A; LF 1, 2, 3e, 4e, 5, 6

$$h = 0,60 \text{ m} ; \quad d = 0,60 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,56 \text{ m} ; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = -1,35(36,8 + 55,9 + 142,8 + 84,5) - 1,5(41,2 + 6,1) = -503,0 \text{ kNm}$$

$$q_d = 1,35(13,4 + 2 \cdot 65,0/8,50 + 52,0) + 1,5 \cdot 15,0 = 131,4 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_{d1} = 1,35(57,0 + 65,0 + 221,0) + 1,5 \cdot 63,8 = 558,8 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = -1,35(-3,0 + 12,4 - 11,6 + 211,9) - 1,5(-3,3 + 12,9) = -297,5 \text{ kNm}$$

Schnittgrößen am Wandaustritt

$$M'_{sd} = -503,0 + 558,8 \cdot 0,25 - 131,4 \cdot 0,25^2 / 2 = -367,4 \text{ kNm}$$

bezogenes Moment

$$M_{sds} = 367,4 + 297,5 \left(0,56 - \frac{0,60}{2} \right) = 444,8 \text{ kNm}$$

dimensionsloses Moment

$$\mu_{sds} = \frac{444,8}{1,00 \cdot 0,56^2 \cdot 23300} = 0,0609 < 0,252 = \mu_{sds,pl}$$

$$\xi = 0,104 ; \quad \eta = 0,960 ; \quad \epsilon_{ce} = -2,34 ; \quad \epsilon_{s1} = 20,0$$

Anwendungsbeispiel für E22; Tunnelrahmen

$$\text{or } A_{s1} = [444,8 / (0,960 \cdot 0,56) - 297,5] / 435000 \\ = 10,2 \text{ cm}^2$$

Tunnelsohle, Feldmitte; LF 1,2,3b,4c; 5

$$h = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,56 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = 1,35(84,2 + 80,2 + 314,3 - 57,1) + 1,5 \cdot 94,3 = 713,3 \text{ kNm}$$

$$M_{sd} = -1,35(-3,0 + 10,4 - 11,1 + 140,6) + 1,5 \cdot 3,3 = -182,6 \text{ kNm}$$

bezogenes Moment

$$M_{sds} = 713,3 + 182,6(0,56 - 0,60/2) = 760,8 \text{ kNm}$$

dimensionloses Moment

$$M_{sds} = \frac{760,8}{1,00 \cdot 0,56^2 \cdot 23300} = 0,1041 \\ < 0,252 = M_{sds,pl}$$

$$\xi = 0,162; \quad \eta = 0,932; \quad \varepsilon_{c2} = -3,50; \quad \varepsilon_{s1} = 18,13$$

$$\text{or } A_{s1} = [760,8 / (0,932 \cdot 0,56) - 182,6] / 435000 \\ = 29,3 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Knoten A

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = -503,0 \text{ kNm};$$

$$Q_{sd} = 297,5 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,35(28,3 + 77,0) + 1,5(6,2 - 2,0) = 148,5 \text{ kN/m}^2$$

$$N_{sd} = -558,8 \text{ kN}$$

Schnittgrößen an Wandaußenmitte

$$M'_{sd} = -503,0 + 297,5 \cdot 0,30 - 148,5 \cdot 0,30^2 / 2 + (1,35 \cdot 77,0 - 1,5 \cdot 2,0) \cdot \frac{0,30^3}{6 \cdot 5,15} \\ = -420,3 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

bezogenes Moment

$$M_{Sds} = 420,3 + 558,8(0,46 - 0,50/2) = 537,6 \text{ kNm}$$

dimensionsloses Moment

$$M_{Sds} = \frac{537,6}{1,00 \cdot 0,46^2 \cdot 23300} = 0,1091 < 0,252 = \mu_{Sds, \text{pl}}$$

$$\xi = 0,170; \quad \eta = 0,929 \quad \epsilon_{c2} = -3,50 \quad \epsilon_{s1} = 17,03$$

$$\text{or } A_{s1} = [537,6 / (0,929 \cdot 0,46) - 558,8] / 435000 \\ = 16,1 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Feldmitte

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{Sd} = 1,35(44,5 + 24,0 + 166,0 - 105,7) + 1,5 \cdot 49,8 \\ = 248,6 \text{ kNm}$$

$$N_{Sd} = -1,35(57,0 + 65,0 + 212,5) - 1,5 \cdot 63,8 \\ = -547,3 \text{ kN}$$

bezogenes Moment

$$M_{Sds} = 248,6 + 547,3(0,46 - 0,50/2) = 363,5 \text{ kNm}$$

dimensionsloses Moment

$$\mu_{Sds} = \frac{363,5}{1,00 \cdot 0,46^2 \cdot 23300} = 0,0737 < 0,252 = \mu_{Sds, \text{pl}}$$

$$\xi = 0,120; \quad \eta = 0,952; \quad \epsilon_{c2} = -2,74 \quad \epsilon_{s1} = 20,00$$

$$\text{or } A_{s1} = [363,5 / (0,952 \cdot 0,46) - 547,3] / 435000 \\ = 6,5 \text{ cm}^2$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelbohrer

Tunnelwand, Knoten B

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = -493,1 \text{ kNm}$$

$$Q_{sd} = 207,1 \text{ kN}$$

$$q_{d1} = 1,35 \cdot 20,3 + 1,5 \cdot 6,2 = 47,5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{d2} = 1,35 \cdot 77,0 - 1,5 \cdot 2,0 = 101,0 \text{ kN/m}^2$$

$$N_{sd} = -471,0 \text{ kN}$$

Schmittgrößen am Wandanschnitt

$$M'_{sd} = -493,1 + 207,1 \cdot 0,25 - 47,5 \cdot 0,25^2/2 - 101,0 \cdot \frac{0,25^3}{6 \cdot 1,5 \cdot 1,5}$$

$$= -442,9 \text{ kNm}$$

bezogenes Moment

$$M_{sds} = 442,9 + 471,0 \cdot (0,46 - 0,50/2) = 541,8 \text{ kNm}$$

dimensionsloses Moment

$$M_{sds} = \frac{541,8}{1,00 \cdot 0,46^2 \cdot 23300} = 0,1099$$

$$< 0,252 = M_{sds,pl}$$

$$\xi = 0,172; \quad \eta = 0,928; \quad \epsilon_{c2} = -3,50; \quad \epsilon_{s1} = 16,83$$

$$\text{erf } A_{s1} = \left[541,8 / (0,928 \cdot 0,46) - 471,0 \right] / 435000$$

$$= 10,3 \text{ cm}^2$$

Anwendungsbeispiel für EC2: Tunnelrahmen

9. Mindestbewehrung zur Rissbeschränkung

infolge Zwangs

EC2, Abr. 4.4.2.2

$$\therefore A_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} / \sigma_s$$

EC2, §9. (4.78)

k_c Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung vor dem Auftreten der ersten Biegerisse

$k = 0,8 \dots 0,5$ Beiwert zur Berücksichtigung von Zwangsspannungen, die Eigenspannungen überlagert sind; k ist Funktion von h

$f_{ct,eff}$ wirksame Betonzugfestigkeit EC2, Tab. 3.1

Es wird angenommen, daß der Tunnelrahmen im Schatten der Baugrube liegt, demzufolge etwaige Zwangsspannungen nur gering ausgesetzt ist und die Frostrißbildung nach $t > 28$ Tagen bei Verfüllen der Baugrube auftritt.

$$f_{ct,eff} = 3,2 \text{ N/mm}^2$$

$A_{ct} = \frac{1}{2} b \cdot h$ Betonfläche der Zugzone vor der Rißbildung

σ_s zulässige Spannung in der Bewehrung unmittelbar nach der Rißbildung als Funktion der Rißweite und des Stabdurchmessers oder des Stababstandes nach EC2, Tab. 4.11 oder 4.12

Die sich aus EC2, §9. (4.78) ergebende Mindestbewehrung zur Rissbeschränkung in Folge Zwangs ist immer kleiner als die minimale

Anwendungsbeispiel für ECR; Tunnelrahmen

Bewehrung im Grenzstand der Rißbildung unter quasiständiger Last. Sie wird daher im folgenden nicht nachgewiesen. Bezüglich der Begrenzung der Rißbildung infolge Zwang durch Schwinden und Temperatur in Längsrichtung sind weitere Überlegungen erforderlich, die hier nicht Gegenstand der Betrachtung sind. Beispielsweise könnten etwaige Risse durch zweckmäßige Bauabläufe, Bauverfahren, Betonnachbehandlungen wie Abdecken und Feuchthalten der Konstruktion bis zum Verfüllen des Tunnels, schwindarme oder quellende Zemente beziehungsweise Zemente mit Quellzusätzen oder ähnliche Verfahren vermieden zumindest aber begrenzt werden.

Anwendungsbeispiel für EC 2: Tunnelrahmen

10. Minimale Bewehrung im Grenzzustand der Rißbildung unter quasi-ständiger Last EC Abs. 4.4.2.3

Als quasi-ständige Lasten werden zwei mögliche Lastkombinationen angesehen.

Fall 1: Grundwasserstand in Höhe Tunneldecke

$$\sum LK 1, 2, 3b, 4b$$

siehe Tab. S. 19

Fall 2: Grundwasserstand in Höhe Tunnelsohle

$$\sum LK 1, 2, 3b, 4c$$

siehe Tab. S. 19

Der höchste Grundwasserstand dürfte ein Extremfall sein und wird deshalb nicht als quasi-ständige Last betrachtet.

Für den Grenzzustand der Rißbildung darf keine Momentenumlagerung vorgesehen werden!

Tunneldecke, Knoten B

$$M_g = -284,3 \text{ kNm}$$

$$q = 13,4 + 50,0 = 63,4 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_g = 334,5 - 65,0 = 269,5 \text{ kN}$$

$$N_g = -121,8 \text{ kN}$$

Schnittgrößen am Wandanschnitt

$$M'_g = -284,3 + 269,5 \cdot 0,25 - 63,4 \cdot 0,25^2 / 2 = -218,9 \text{ kNm}$$

$h = 0,50 \text{ m}$; $d = 0,50 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,46 \text{ m}$; $b = 1,00 \text{ m}$
bezogenes Moment

$$M_{gs} = M'_g - N_g(d - b/2)$$

$$= 218,9 + 121,8 \cdot (0,46 - 0,50/2) = 244,5 \text{ kNm}$$

Die Bewehrung für dieses Moment ergibt sich aus

$$A_{s,g} = \left(\frac{M_{gs}}{z} + N_g \right) \frac{1}{\sigma_s}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

Für den Hebelarm der inneren Kräfte wird
 $z = 0,85d$

gesetzt, da sich bei den Schnittgrößen infolge quasi-ständiger Last ein fast linearer Verlauf der Spannungen über die Druckzonenhöhe ergeben dürfte.

Für die Stahlspannung wird nach EC2 Tab. 4.11 beziehungsweise Tab. 4.12 gemäß Abs. 4.4.2.3(3) bei:

$$\text{Ri\ssbreite } w = 0,2 \text{ m} \quad (\text{Au\ssenseite})$$

$$\text{Stababstand } s = 0,10 \text{ m}$$

die Stahlspannung

$$\sigma_s = 240 \text{ N/mm}^2$$

EC2 Tab. 4.12

abgelesen.

$$A_{s,S} = \left(\frac{244,5}{0,85 \cdot 0,46} - 121,8 \right) / 240000$$

$$= 21,0 \text{ cm}^2$$

Tunneldecke, Feldmitte

$$h = 0,55 \text{ m}; \quad d = 0,55 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,51 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_g = 299,9 \text{ kNm}$$

$$N_g = -95,4 \text{ kN}$$

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 299,9 + 95,4 \left(0,51 - 0,55/2 \right) = 322,3 \text{ kNm}$$

$$\text{Ri\ssbreite } w = 0,3 \text{ m} \quad (\text{Innenseite})$$

$$\text{Stababstand } s = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{Stahlspannung } \sigma_s = 280 \text{ N/mm}^2$$

EC2 Tab. 4.12

$$A_{s,S} = \left(\frac{322,3}{0,85 \cdot 0,51} - 95,4 \right) / 280000$$

$$= 23,1 \text{ cm}^2$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrakete

Tunnel schle, Knoten A

$$h = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,60 - 0,03 - \frac{0,02}{2} = 0,56 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$\text{Fall 1: Grundwasserstand} \quad \varphi_w = -2,75 \text{ m}$$

$$M_g = -308,7 \text{ kNm}$$

$$g = 13,4 + 2 \cdot 65,0 / 0,50 + 50,0 = 78,7 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_d = 334,5 \text{ kN}$$

$$N_d = -197,5 \text{ kN}$$

Schnittgröße am Wandanschnitt

$$M_g' = -308,7 + 334,5 \cdot 0,25 - 78,7 \cdot 0,25^2 / 2 = -227,5 \text{ kNm}$$

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 227,5 + 197,5 \left(\frac{0,56 - 0,60}{2} \right) = 278,9 \text{ kNm}$$

$$\text{Ri\ssbreite} \quad w = 0,2 \text{ m} \quad (\text{A-\betaen-seite})$$

$$\text{Stababstand} \quad s = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{Stabspannung} \quad \sigma_s = 200 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC2 Tab. 4.12}$$

$$A_{sg} = \left(\frac{278,9}{0,85 \cdot 0,56} - 197,5 \right) / 200000 = 19,4 \text{ cm}^2$$

$$\text{Fall 2: Grundwasserstand} \quad \varphi_w = -7,90 \text{ m}$$

$$M_g = -207,1 \text{ kNm}$$

$$g = 13,4 + 2 \cdot 65,0 / 0,50 + 50,0 = 78,7 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_d = 334,5 \text{ kN}$$

$$N_d = -130,9 \text{ kN}$$

Schnittgröße am Wandanschnitt

$$M_g' = -207,1 + 334,5 \cdot 0,25 - 78,7 \cdot 0,25^2 / 2 = -205,9 \text{ kNm}$$

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 205,9 + 130,9 \left(\frac{0,56 - 0,60}{2} \right) = 242,0 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel für EC 2, Tunnelrahmen

$$A_{sg} = \left(\frac{240,0}{0,85 \cdot 0,56} - 138,9 \right) / 200000 = 18,5 \text{ cm}^2 < 19,4 \text{ cm}^2$$

Tunnelsohle, Feldmitte

$$h = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,56 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_g = 423,6 \text{ kNm}$$

$$N_g = -138,9 \text{ kN}$$

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 423,6 + 138,9 (0,56 - 0,60/2) = 459,7 \text{ kNm}$$

$$R: \text{Breite} \quad w = 0,3 \text{ m} \quad (\text{Innen-seite})$$

$$\text{Stababstand} \quad s = 0,10 \text{ m}$$

$$\text{Stahlspannung} \quad \sigma_s = 320 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC 2, Tab. 4.12}$$

$$A_{sg} = \left(\frac{459,7}{0,85 \cdot 0,56} - 138,9 \right) / 320000 = 25,8 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Knoten A

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_g = -308,7 \text{ kNm};$$

$$Q_g = 197,5 \text{ kN}$$

$$q = 23,5 + 77,0 = 100,5 \text{ kN/m}^2$$

$$N_g = -334,5 \text{ kN}$$

Schiffgröße a - Wandaustritt

$$M_g' = -308,7 + 197,5 \cdot 0,30 - 100,5 \cdot 0,30^2/2 + 77,0 \cdot \frac{0,30^3}{6 \cdot 5,15} = -253,9 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 253,9 + 334,5 \left(0,46 - 0,50/2 \right) = 324,1 \text{ kNm}$$

$$R: \text{Ri\ssbreite} \quad w = 0,2 \text{ m} \quad (\text{Au\ssenseite})$$

$$\text{Stababstand} \quad s = 0,10 \text{ m}$$

$$\text{Stahlspannung} \quad \sigma_s = 240 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC2, Tab. 4.12}$$

$$A_{sg} = \left(\frac{324,1}{0,85 \cdot 0,46} - 334,5 \right) / 240.000$$

$$= 20,6 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Feldmitte

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_g = -128,8 \text{ kNm}$$

$$N_g = -334,5 \text{ kN}$$

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 128,8 + 334,5 \left(0,46 - 0,50/2 \right) = 199,0 \text{ kNm}$$

$$R: \text{Ri\ssbreite} \quad w = 0,2 \text{ m} \quad (\text{Au\ssenseite})$$

$$\text{Stababstand} \quad s = 0,20 \text{ m}$$

$$\text{Stahlspannung} \quad \sigma_s = 160 \text{ N/mm}^2 \quad \text{EC2, Tab. 4.12}$$

$$A_{sg} = \left(\frac{199,0}{0,85 \cdot 0,46} - 334,5 \right) / 160.000$$

$$= 10,9 \text{ cm}^2$$

Tunnelwand, Knoten B

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_g = -204,3 \text{ kNm}$$

$$Q_g = 121,8 \text{ kN}$$

$$q = 23,5 + 77,0 = 100,5 \text{ kN/m}^2$$

$$N_g = -334,5 \text{ kN}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

Schallgröße an Wandaustritt

$$M_g' = -284,3 + 121,8 \cdot 0,25 - 23,5 \cdot 0,25^2 / 2 - 77,0 \cdot \frac{0,25^3}{6 \cdot 5,15}$$

$$= -254,6 \text{ kNm}$$

bezogenes Moment

$$M_{gs} = 254,6 + 334,5 \left(0,46 - 0,50 / 2 \right) = 324,9 \text{ kNm}$$

Riβbreite $w = 0,2 \text{ m}$ A-βe-seite

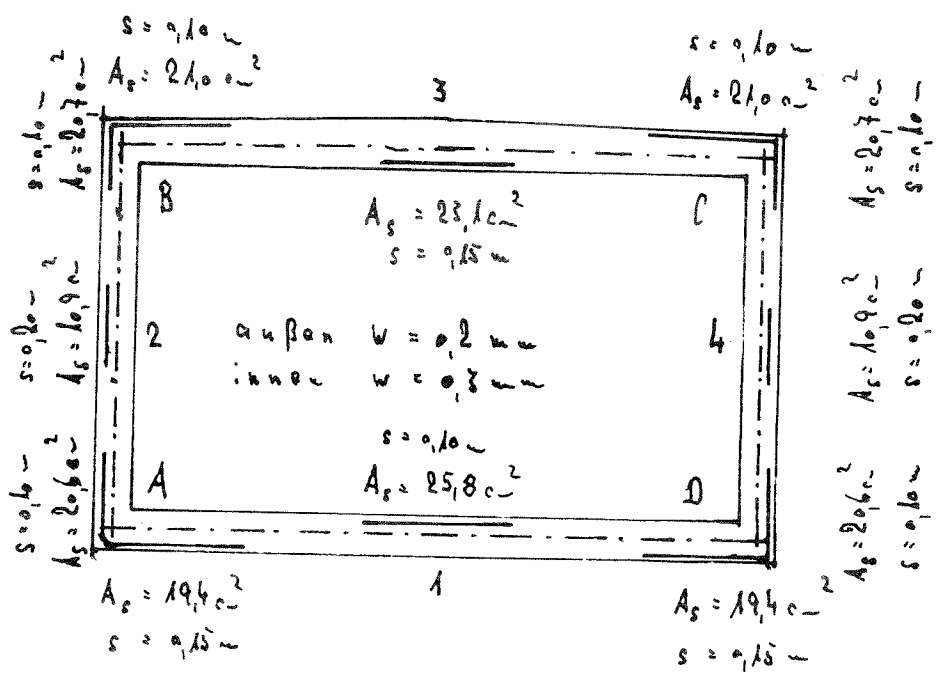
Stababstand $s = 0,10 \text{ m}$

Stahlspannung $\sigma_s = 240 \text{ N/mm}^2$ EC2, Tab. 4.12

$$A_{sg} = \left(\frac{324,9}{0,85 \cdot 0,46} - 334,5 \right) / 240000$$

$$= 20,7 \text{ cm}^2$$

Die vorstehende ermittelte minimale Bewehrung unter Berücksichtigung der Riβbildung ist nachstehend in der Systemskizze zusammengestellt.



Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

11. Grenz Zustand des Schnittgrößenverlaufes mit Momentenumlagerung
 Mit der vorstehend berechneten Bewehrung in Grenz Zustand der Rißbildung können folgende Momente in Grenz Zustand der Tragfähigkeit aufgenommen werden.

$$A_s = \left(\frac{M_{sds}}{z} + N_{sd} \right) / f_{yd}$$

$$M_{sds} = (A_s \cdot f_{yd} - N_{sd}) \cdot z$$

$$M_{sds} = M_{sd} - N_{sd} \cdot (d - h/2)$$

$$M_{sd} = \left[A_s \cdot f_{yd} - N_{sd} \left(1 - \frac{d - h/2}{z} \right) \right] \cdot z$$

$f_{yd} = f_y / \gamma_s$ Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls EC2; Abs. 2.3.3.2

$$f_{yd} = 500 / 1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$$

z Hebelarm der inneren Kräfte; wird in Grenz Zustand der Tragfähigkeit näherungsweise zu $z \approx 0,9 \cdot d$ gesetzt.

Tunneldecke, Knoten B; Wandausschnitt

$$A_s = 21,0 \text{ cm}^2; \quad h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$N_{sd} = -1,35 (3,0 - 12,4 + 11,1 + 93,7) - 1,5 \cdot 3,3 = -133,7 \text{ kN} \quad \text{LF 1, 2, 3b, 4c; 5}$$

$$M_{sdB} = \left[21,0 \cdot 10^{-4} \cdot 435 \cdot 1000 + 133,7 \left(1 - \frac{0,46 - 0,50/2}{0,9 \cdot 0,46} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,46 = 405,5 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel für EC 2: Tunnelrahmen

Tunneldecke, Feldmitte

$$A_s = 23,1 \text{ cm}^2; \quad b = 0,55 \text{ m}; \quad d = 0,51 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$N_{sd} = -1,35(3,0 - 12,4 + 11,1 + 93,7) - 15,33 = -133,7 \text{ kN}$$

$$M_{sd,3} = \left[23,1 \cdot 10^{-4} \cdot 435000 + 133,7 \left(1 - \frac{0,51 - 0,55/2}{0,9 \cdot 0,51} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,51$$

$$= 491,2 \text{ kNm}$$

Widerstehendes Moment des Bauteils Tunneldecke

$$R_d = M_{sd,8} + M_{sd,3} = 405,5 + 491,2 = 896,7 \text{ kNm}$$

Einwirkendes Moment zwischen den Wandanschlüssen

$$q_d = 1,35(13,4 + 52,0) + 15,15,0 = 110,8 \text{ kN/m}^2$$

$$S_d = M_{sd} = 110,8 \cdot \frac{8,00^2}{8} = 886,3 < 896,7 \text{ kNm} = R_d$$

Das einwirkende Moment ist kleiner als das widerstehende.

Tunnelsohle, Knoten A; Wandanschluss

$$A_s = 19,4 \text{ cm}^2; \quad h = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,56 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$N_{sd} = -1,35(-3,0 + 12,4 - 11,1 + 140,6) + 15,33 = -182,6 \text{ kN}$$

$$M_{sd,A} = \left[19,4 \cdot 10^{-4} \cdot 435000 + 182,6 \left(1 - \frac{0,56 - 0,60/2}{0,9 \cdot 0,56} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,56$$

$$= 469,9 \text{ kNm}$$

Tunnelsohle, Feldmitte

$$A_s = 25,8 \text{ cm}^2; \quad h = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,56 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$N_{sd} = -1,35(-3,0 + 12,4 - 11,1 + 140,6) + 15,33 = -182,6 \text{ kN}$$

$$M_{sd,1} = \left[25,8 \cdot 10^{-4} \cdot 435000 + 182,6 \left(1 - \frac{0,56 - 0,60/2}{0,9 \cdot 0,56} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,56$$

$$= 610,2 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel für EC2: Tunnelbohrer

Widerstehendes Moment des Bauteiles Tunnelsohle

$$R_d = M_{sd,8} + M_{sd,1} = 469,9 + 610,2 = 1080,1 \text{ kNm}$$

Einwirkendes Moment zwischen den Wandanschlüssen

$$q_d = 1,35 (13,4 + 2 \cdot 65,0 / 8,50 + 50,0) + 1,5 \cdot 15,0 = 131,4 \text{ kNm/m}^2$$

$$S_d = M_{sd} = 131,4 \cdot \frac{8,00^2}{8} = 1051,2 \text{ kNm}$$

$$< 1080,1 \text{ kNm} = R_d$$

Tunnelwand, Knoten A; Wandanschnitt

$$A_s = 2,6 \text{ m}^2; \quad h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = -1,35 (57,0 + 65,0 + 201,0) - 1,5 \cdot 63,8 = -558,8 \text{ kNm}$$

$$M_{sd,A} = \left[2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 435000 + 558,8 \left(1 - \frac{0,46 - 0,50/2}{0,9 \cdot 0,46} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,46$$

$$= 485,0 \text{ kNm}$$

Tunnelwand, Feldmitte

$$A_s = 1,99 \text{ m}^2; \quad h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = -1,35 (57,0 + 65,0/2 + 221,0) - 1,5 \cdot 63,8 = -514,9 \text{ kNm}$$

$$M_{sd,e} = \left[1,99 \cdot 10^{-4} \cdot 435000 + 514,9 \left(1 - \frac{0,46 - 0,50/2}{0,9 \cdot 0,46} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,46$$

$$= 301,3 \text{ kNm}$$

Tunnelwand, Knoten B; Wandanschnitt

$$A_s = 2,7 \text{ m}^2; \quad h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$M_{sd} = -1,35 (57,0 + 221,0) - 1,5 \cdot 63,8 = 471,0 \text{ kNm}$$

$$M_{sd,B} = \left[2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 435000 + 471,0 \left(1 - \frac{0,46 - 0,50/2}{0,9 \cdot 0,46} \right) \right] \cdot 0,9 \cdot 0,46$$

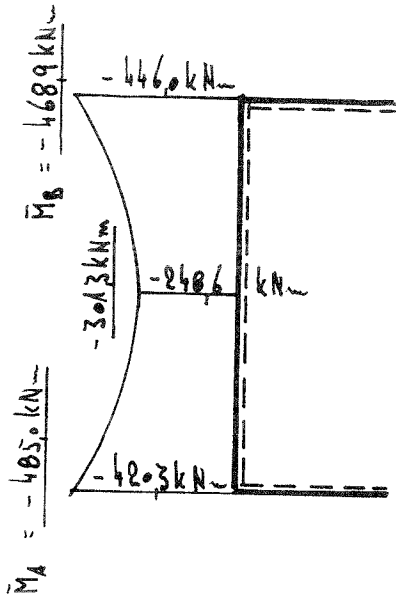
$$= 468,9 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel für EQL: Tunnelrahmen

Die Gegenüberstellung der widerstehenden Momente des Bauteiles Tunnelwand zu den einwirkenden Momenten, siehe Abs. 8, S. 30 bis 32, zeigt, daß an allen Stellen die widerstehenden Momente größer sind als die einwirkenden. Bei negativen Momenten ist gegebenenfalls die Bedingung

$$S_d + \frac{\bar{M}_A + \bar{M}_B}{2} < 0$$

einzuhalten.



Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelbauwerk

10. Grenz Zustand der Tragfähigkeit für Querkraft
Tunneldecke

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Der Einfluß der geringen Neigung der Tunneldecke wird vernachlässigt.

Querkraft, siehe Tab. 5.19 LF 1, 2, 3a, 5

$$\max Q_s = 1,35(57,0 + 221,0) + 1,5 \cdot 63,8 = 471,0 \text{ kN}$$

gleichmäßig verteilte Belastung

$$q_s = 1,35(13,4 + 52,0) + 1,5 \cdot 15,0 = 110,8 \text{ kN/m}^2$$

Normalkraft

$$N_{sd} = 1,35(3,0 - 12,4 + 11,6 + 132,1) + 1,5 \cdot 3,3 = 106,3 \text{ kN} \quad (\text{Druck})$$

Bemessungswert der Querkraft EC2; Abs. 4.3.2.2 (10)

$$V_{sd} = 471,0 - 110,8(0,25 + 0,46) = 392,3 \text{ kN}$$

Widerstandswert der Querkraft ohne Schubbewehrung

EC2; Abs. 4.3.2.3 (1)

$$V_{Rd1} = \left[z_{Rd} \cdot k (1,2 + 40 \cdot s_1) + 0,15 \sigma_{cp} \right] b_w \cdot d \quad \text{gl. (4.18)}$$

$$z_{Rd} = 0,37 \text{ m/m}^2$$

EC2; Tab. 4.8

$k = 1$ bei mehr als 50% gestaffelter Bewehrung

$$k = 1,6 - d$$

$$= 1,6 - 0,46 = 1,14$$

$$s_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d}$$

A_{s1} Zugbewehrung an Auflager

$\approx 12,0 \text{ m}^2$ geschätzt (ob. $A_{s, \text{erf}}$)

$$s_1 = \frac{12,0 \cdot 10^{-4}}{1,00 \cdot 0,46} = 0,0026 \approx 0,261 \%$$

$$\sigma_{cp} = N_{sd} / A_c$$

A_c Fläche des Betonquerschnitts

$$\sigma_{cp} = \frac{106,3}{1,00 \cdot 0,50} = 372,6 \text{ kN/m}^2$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

$$V_{Rd1} = [370 \cdot 1,14 (1,2 + 40 \cdot 0,0026) + 0,15 \cdot 370,6] \cdot 1,00 \cdot 0,46$$

$$= 278,7 \text{ kN}$$

$$< 392,3 = V_{Sd}$$

Widerstandswert der Querkraft mit Schubbewehrung
EC2; Abs. 4.3.2.4.3 (1)

$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd}$ §l. (4.22)

$V_{cd} = V_{Rd1}$ Querkraft-Widerstandswert des Betons

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}$$

Querkraft-Widerstandswert der vertikalen Schubbewehrung

$$f_{ywd} = f_y / \gamma_s \quad \text{Bemessungsfestigkeit der Schubbewehrung}$$

$$= 500 / 1,15 = 435 \text{ N/mm}^2$$

Mindestschubbewehrung EC2; Abs. 5.4.3.3
nach EC2 Abs. 4.3.2.1 §(2) nicht erforderlich,
da die Tunneldecke als Platte angesehen werden kann.

Bügelabstand gewählt EC2; §l. (5.17)

$$\max s = 0,30 \text{ m}$$

vertikale Bügel

$$s/\alpha = 1,0$$

gewählt:

$$A_{sw} = 2,0 \text{ cm}^2$$

$$V_{wd} = \frac{2,0 \cdot 10^{-4}}{0,30} \cdot 0,9 \cdot 0,46 \cdot 435 \cdot 1000 = 120,1 \text{ kN}$$

$$V_{Rd3} = 278,7 + 120,1 = 398,8 \text{ kN}$$

$$> 392,3 \text{ kN} = V_{Sd}$$

Anwendungsbeispiel für EC 2; Tunnelrahmen

Tragfähigkeit der Betondruckstrebe

EC 2; Abs. 4.3.2.4.3 (4)

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} v f_{cd} \cdot b_w \cdot \eta \cdot d \cdot (1 + \cot \alpha) \quad \text{§ 4.25}$$

$$v = \eta \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{200} \right) \geq 0,5 \quad \text{§ 4.21}$$

$$= 0,7 - \frac{35}{200} = 0,525 > 0,5$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 35 / 1,5 = 23,3 \text{ N/mm}^2$$

 $\cot \alpha = 0$ bei vertikale Bügel

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot 0,525 \cdot 23300 \cdot 1,00 \cdot 0,9 \cdot 0,46$$

$$= 2532 \text{ kN}$$

$$> 392,3 \text{ kN} = V_{sd}$$

$$V_{sd} \leq \frac{1}{5} V_{Rd2}$$

$$392,3 < \frac{1}{5} 2532 = 506,4 \text{ kN} \quad \text{EC 2; § 5.17}$$

Der gewählte maximale Bügelabstand von

$$s = 0,30 \text{ m}$$

ist nach EC 2 § 5.17 zulässig.

Tunnelbohle

$$h = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,56 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Querkraft, siehe Tab. S. 19

$$\max Q_s = 1,35(57,0 + 65,0 + 201,0) + 1,5 \cdot 63,8 = 558,8 \text{ kN}$$

gleichmäßig verteilte Belastung

$$q_s = 1,35(13,4 + 2 \cdot 65,0 / 8,5 + 52,0) + 1,5 \cdot 15,0 = 131,4 \text{ kN/m}^2$$

Normalkraft

$$N_{sd} = 1,35(-3,0 + 12,4 - 11,6 + 211,9) - 1,5 \cdot 3,3 = 278,1 \text{ kN}$$

(Druck)

Bemessungswert der Querkraft EC 2; Abs. 4.3.2.2 (1a)

$$V_{sd} = 558,8 - 131,4(0,25 + 0,56) = 452,4 \text{ kN}$$

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

Widerstandswert der Querkraft ohne Schubbewehrung
EC2; Abs. 4.3.2.3 (1)

$$k = 1,6 - 0,56 = 1,04$$

$$A_{s1} \approx 15,0 \text{ cm}^2 \quad \text{geschätzt} \quad (0,6 \cdot A_{serf})$$

$$g_1 \approx \frac{15,0 \cdot 10^{-4}}{1,00 \cdot 0,56} = 0,0027$$

$$v_{cp} = \frac{238,1}{1,00 \cdot 0,60} = 463,5 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{Rd1} = [370 \cdot 1,04 (1,2 + 40 \cdot 0,0027) + 0,15 \cdot 463,5] \cdot 1,00 \cdot 0,56$$

$$= 320,8 \text{ kN}$$

$$< 452,4 \text{ kN} = V_{sd}$$

Widerstandswert der Querkraft mit Schubbewehrung
EC2; Abs. 4.3.2.4.3 (1)

Bügelabstand gewählt

EC2 §9.5.17

$$s = 0,30 \text{ m}$$

$$A_{sw} = 2,00 \text{ cm}^2 \quad \text{gewählt}$$

$$V_{wd} = \frac{2,00 \cdot 10^{-4}}{0,30} \cdot 0,9 \cdot 0,56 \cdot 435000$$

$$= 146,2 \text{ kN}$$

$$V_{Rd3} = 337,2 + 146,2 = 483,4 \text{ kN}$$

$$> 452,4 \text{ kN} = V_{sd}$$

Tragfähigkeit der Betondruckstreben

EC2; Abs. 4.3.2.4.3 (4)

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \left(0,7 - \frac{35}{200} \right) 23300 \cdot 1,00 \cdot 0,9 \cdot 0,56$$

$$= 3082,3 \text{ kN}$$

$$> 452,4 \text{ kN}$$

$$V_{sd} \leq \frac{1}{5} V_{Rd2}$$

$$452,4 < \frac{1}{5} 3082,3 = 616,5 \text{ kN}$$

Der gewählte maximale Bügelabstand von $s = 0,30 \text{ m}$ ist nach EC2 §9.5.17 zulässig.

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

Tunnelwand, Knoten A

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Querkraft, siehe Tab. S. 19

$$\begin{aligned} \max Q_s &= 1,35(-3,0 + 12,4 - 11,6 + 2 \cdot 11,9) + 1,5 \cdot 12,9 \\ &= 302,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Be Lastung

$$q_1 = 1,35 \cdot 28,3 + 1,5 \cdot 6,2 = 47,5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_2 = 1,35 \cdot 77,0 - 1,5 \cdot 2,0 = 101,0 \text{ kN/m}^2$$

Normalkraft

$$N_{sd} = 1,35(+57,0 + 65,0 + 221,0) = 463,1 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Querkraft EC2; Abs. 4.3.2.2 (10)

$$\begin{aligned} V_{sd} &= 302,4 - (47,5 + 101,0)(0,30 + 0,46) + 101,0 \frac{(0,30 + 0,46)^2}{2 \cdot 0,15} \\ &= 195,2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Widerstandswert der Querkraft ohne Schubbewehrung
EC2; Abs. 4.3.2.3 (1)

$$k_c = 1,6 - 0,46 = 1,14$$

gewählte Bewehrung auf der Innenseite der Wand

$$A_s = 11,3 \text{ cm}^2$$

$$\rho_1 = \frac{11,3 \cdot 10^{-4}}{1,00 \cdot 0,46} = 0,0025$$

$$\sigma_{cp} = \frac{463,1}{1,00 \cdot 0,50} = 926,2 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} V_{Rd1} &= \left[370 \cdot 1,14 (1,2 + 40 \cdot 0,0025) + 0,15 \cdot 926,2 \right] \cdot 1,00 \cdot 0,46 \\ &= 315,8 \text{ kN} \\ &> 195,2 \text{ kN} = V_{sd} \end{aligned}$$

Schubbewehrung ist nicht erforderlich.

Anwendungsbeispiel EC2; Tunnelrahmen

Tunnelwand, Knoten B

$$h = 0,50 \text{ m}; \quad d = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

Querkraft, siehe Tab. S. 10

$$\begin{aligned} \max Q_s &= 1,35(3,0 - 12,4 + 11,6 + 132,1) + 1,5(33 + 139) \\ &= 207,1 \text{ kN} \end{aligned}$$

Belastung

$$q_1 = 1,35 \cdot 28,3 + 1,5 \cdot 6,2 = 47,5 \text{ kN/m}^2$$

$$q_2 = 1,35 \cdot 77,0 - 1,5 \cdot 2,0 = 101,0 \text{ kN/m}^2$$

Normalkraft

$$N_{sd} = 1,35(57,0 + 221,0) + 1,5 \cdot 638 = 471,0 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Querkraft EC2, Abs. 4.3.2.2 (10)

$$\begin{aligned} V_{sd} &= 207,1 - 47,5(0,25 + 0,46) - 101,0 \frac{(0,25 + 0,46)^2}{2 \cdot 0,15} \\ &= 178,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

Widerstandswert der Querkraft ohne Schubbewehrung
EC2; Abs. 4.3.2.3 (1)

$$k = 1,6 - 0,46 = 1,14$$

gewählte Bewehrung auf der Innenseite der Wand

$$A_s = 11,3 \text{ cm}^2$$

$$\rho_1 = \frac{11,3 \cdot 10^{-4}}{1,00 \cdot 0,46} = 0,0025$$

$$\sigma_{cp} = \frac{471,0}{1,00 \cdot 0,50} = 942,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned} V_{Rd1} &= \left[370 \cdot 1,14 (1,2 + 40 \cdot 0,0025) + 0,15 \cdot 942,0 \right] \cdot 1,00 \cdot 0,46 \\ &= 317,2 \text{ kN} \\ &> 178,3 \text{ kN} = V_{sd} \end{aligned}$$

Schubbewehrung ist nicht erforderlich.

Anwendungsbeispiel EC2; Tunnelbau

13. Spannungsbegrenzung unter Gebrauchsbedingungen
EC2; Abs. 4.4.1

Nach EC2; Abs. 4.4.1.2 (2) kann angenommen werden, daß die Spannungsbegrenzungen unter Gebrauchsbedingungen eingehalten sind, da

- die Bemessung nach EC2; Abs. 4.3 durchgeführt wurde; siehe diese Berechnung Abs. 8, S. 27 ff.,
- die minimale Bewehrung nach EC2; Abs. 4.4.2.2 eingehalten wird; siehe diese Berechnung Abs. 10, S. 35 ff.,
- die konstruktionsbedingungen EC2; Abs. 5 berücksichtigt werden,
- wicht mehr als 30% der Schnittgrößen umgelagert wurden; siehe diese Berechnung Abs. 9, S. 27 ff. und Abs. 10, S. 35 ff.

Tunneldecke, Knoten B

$$ULS: M'_{sd} = 378,8 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 405,5 \text{ kNm} = M'_{sd}$$

Tunneldecke, Feldmitte

$$ULS: M_{sd} = 520,5 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 1,3 \cdot 491,2 = 638,6 \text{ kNm} = M_{sd}$$

Tunnelsohle, Knoten A

$$ULS: M'_{sd} = 367,4 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 469,9 \text{ kNm} = M'_{sd}$$

Tunnelsohle, Feldmitte

$$ULS: M_{sd} = 713,3 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 1,3 \cdot 610,2 \text{ kNm} = 793,3 \text{ kNm}$$

Anwendungsbeispiel EC2: Tunnelrahmen

Tunnelwand, Knoten A

$$ULS: M_{sd} = 420,3 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 485,0 \text{ kNm} = M_{sd}$$

Tunnelwand, Feldmitte

$$ULS: M_{sd} = 248,6 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 301,3 \text{ kNm} = M_{sd}$$

Tunnelwand, Knoten B

$$ULS: M_{sd} = 442,9 \text{ kNm}$$

$$SLS: < 468,9 \text{ kNm} = M_{sd}$$

Dieser Nachweis kann entfallen, da die Bedingungen a) bis d) eingehalten sind. Es wird nur der Berechnungsgang gezeigt.

Rechnerischer Nachweis der Spannungsbegrenzung
Spannungsbegrenzung, EC2: Abs. 4.4.1.1 (2) und (7)

Beton $\sigma_s = 0,6 \cdot f_{ck}$ seltene Lastkombination
 $\leq 0,6 \cdot 35 = 21 \text{ N/mm}^2$

Betonstahl $\sigma_s = 0,8 \cdot f_{yk}$ seltene Lastkombination
 $\leq 0,8 \cdot 435 = 348 \text{ N/mm}^2$

Tunneldecke, Feldmitte

Mittlere unter Annahme einer Linearen Spannungsverteilung
 EC2: Abs. 4.4.1.2 (3)

$$\mu = E_s / E_c = 15$$

$$x = \frac{\mu \cdot A_s}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{2b \cdot d}{\mu \cdot A_s}} - 1 \right)$$

$$A_s = 23,1 \text{ cm}^2; \quad d = 0,55 - 0,04 = 0,51 \text{ m}; \quad b = 1,00$$

$$x = \frac{15 \cdot 23,1 \cdot 10^{-4}}{1,00} \left(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1,00 \cdot 0,51}{15 \cdot 23,1 \cdot 10^{-4}}} - 1 \right)$$

$$= 0,157 \text{ m}$$

$$z = 0,51 - 0,157/3 = 0,458 \text{ m}$$

Anwendungsbeispiel EC 2: Tunnelbohrer

$$\sigma_c = \frac{2 M_{ds}}{x \cdot z \cdot b}$$

$$M_d = M_f + \gamma_{1,1} \cdot M_p \quad \text{EC 2: Abs. 2.3.3.2 9(2)}$$

$$N_d = N_f + \gamma_{1,1} \cdot N_p \quad \text{Gl. (2.96)}$$

$$M_{ds} = M_d - N_d \cdot (d - h/2)$$

$$M_d = 299,9 + 97,77 \cdot 1 = 397,7 \text{ kNm} \quad \text{Tab. 9.19}$$

$$N_d = -(95,4 + 97,3 \cdot 3) = -297,7 \text{ kN}$$

$$M_{ds} = 397,7 + 297,7 \cdot (0,51 - 0,55/2) = 376,8 \text{ kNm}$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot 376,8}{0,157 \cdot 0,450 \cdot 1,00} = 10,5 \text{ N/mm}^2 < 21,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \left(\frac{1}{2} \sigma_c \cdot x \cdot b + N_d \right) \frac{1}{A_s} \\ &= \left(\frac{1}{2} \cdot 10,500 \cdot 0,157 \cdot 1,00 - 297,7 \right) / (23,1 \cdot 10^{-4}) \\ &= 314,5 \text{ N/mm}^2 < 348 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Tunnelbohrer, Feldmitte

$$A_s = 25,8 \text{ cm}^2; \quad b = 0,60 \text{ m}; \quad d = 0,56 \text{ m}; \quad h = 1,00 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{15 \cdot 25,8 \cdot 10^{-4}}{1,00} \left(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1,00 \cdot 0,56}{15 \cdot 25,8 \cdot 10^{-4}}} - 1 \right) \\ &= 0,173 \text{ m} \end{aligned}$$

$$z = 0,56 - 0,173/3 = 0,502 \text{ m}$$

$$M_d = 423,6 + 0,7 \cdot 94,3 = 489,6 \text{ kNm}$$

$$N_d = -138,9 + 0,7 \cdot 3,3 = -136,6 \text{ kN}$$

$$M_{ds} = 489,6 + 136,6 \cdot (0,56 - 0,60/2) = 525,1 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{2 \cdot 525,1}{0,173 \cdot 0,502 \cdot 1,00} = 12,1 \text{ N/mm}^2 < 21,0 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Anwendungsbeispiel für EC2, Tunnelrahmen

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \left(\frac{1}{2} \cdot 12100 \cdot 0,173 \cdot 1,00 - 136,6 \right) / 25,8 \cdot 10^{-4} \\ &= 352,5 \text{ N/mm}^2 \\ &\approx 348 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Tunneldecke, Knoten B

$$A_s = 21,00 \text{ m}^2; \quad h = 0,50 \text{ m}; \quad a' = 0,46 \text{ m}; \quad b = 1,00 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}x &= \frac{15 \cdot 21,0 \cdot 10^{-4}}{1,00} \left(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot 1,00 \cdot 0,46}{15 \cdot 21,0 \cdot 10^{-4}}} - 1 \right) \\ &= 0,142 \text{ m}\end{aligned}$$

$$z = 0,46 - 0,142/3 = 0,413 \text{ m}$$

$$M_{dl} = 284,3 + 0,7(58,4 + 4,1) = 328,1 \text{ kNm}$$

$$M_{dl} = -121,8 - 0,7(3,3 + 13,9) = -133,8 \text{ kNm}$$

$$M_{d,s} = 328,1 + 133,8(0,46 - 0,50/2) = 356,2 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \frac{2 \cdot 356,2}{0,142 \cdot 0,413 \cdot 1,00} = 12,1 \text{ N/mm}^2 \\ &< 21,0 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_s &= \left(\frac{1}{2} \cdot 12100 \cdot 0,142 \cdot 1,00 - 133,8 \right) / 21,0 \cdot 10^{-4} \\ &= 345,4 \text{ N/mm}^2 \\ &< 348 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Weitere Nachweise werden nicht für es erforderlich angesehen.

Anwendungsbeispiel für EC2; Tunnelrahmen

14. Nachweis der Rißbreite EC2; Abs. 4.4.2.4

Dieser Nachweis kann entfallen, da in Abs. 10, S. 35 die minimale Bewehrung im Grenzzustand der Rißbildung unter quasiständiger Last ermittelt wurde.

15. Nachweis der Durchbiegung EC2; Abs. 4.4.3.2

Verhältnissfaktor

EC2; Tab. 4.14

für das Mittelfeld einer
einschig gespannten Platte
bei gering beanspruchtem Beton
und $l/d = 35$

größte Spannweite der Platte

$$\max l = 8,50 \text{ m}$$

statische Höhe

$$d = 0,46 \text{ m}$$

$$l/d = 8,50 / 0,46 = 18,5$$

$$< 35$$

Eine ausführliche Berechnung der Durchbiegung ist nicht erforderlich.

Person responsible
of the research work:

Dr.-Ing. Hotzler
O-1110 Berlin, Homeyerstr. 18

IV 1-5-693/92

7 2478

Subject: Differences in the proof of stability according to DIN 1045 and EC 2
shown on the example of a tunnel frame

In order to facilitate working with Eurocode 2 Part 1 - EC 2 - for engineers
designing structures, the present document gives a detailed example of the
application of EC 2 in the case of a tunnel frame.

The differences in the results obtained from the calculation according to EC 2
and DIN 1045 are pointed out.

Proof is delivered of the fact that according the EC 2 the limit state of
cracking under quasi-permanent load is decisive for the design of the
structure if for reasons of serviceability certain crack widths are assumed to
occur at the outside and inside of the structure. In the present case the
following crack widths have been assumed:

at the outside	0.2 mm
at the inside	0.3 mm.

Due to the fact that the limit state of cracking under quasi-permanent loading
is decisive for the design, a reduction of the partial safety factors of
loading due to earth loads will be without any influence on the required
reinforcement.

T 2498

Personne responsable
de la recherche:

Dr.-Ing. Hotzler
0-1110 Berlin, Homeyerstr. 18

IV 1-5-693/92

Sujet: Différences constatées lors de l'épreuve de la stabilité selon DIN 1045
et EC 2 sur l'exemple d'un cadre pour tunnel

En vue de faciliter le travail avec l'Eurocode N° 2 Partie 1 - EC 2 - pour les concepteurs de structures portantes, le présent document donne un exemple très détaillé portant sur l'application de l'EC 2 à un cadre pour tunnel.

Les différences constatées dans les résultats obtenus lors d'un calcul selon l'Eurocode 2 et la norme DIN 1045, respectivement, sont mises en évidence.

Il est démontré que selon l'EC 2 c'est l'état limite de la fissuration lors d'un effort quasi-permanent qui est déterminant pour le dimensionnement si pour des raisons d'aptitude à l'emploi on présume aux côtés extérieurs et intérieurs de l'ouvrage des largeurs de fissure données. Dans le cas présent, on est parti des largeurs de fissure suivantes:

côtés extérieurs	0,2 mm
côtés intérieurs	0,3 mm.

Etant donné que l'état limite de la fissuration lors d'un effort quasi-permanent est déterminant pour le dimensionnement de l'ouvrage, une réduction des coefficients partiels de sécurité de l'effort causé par les charges du sol reste sans influence sur l'armature requise.