

DIE BERECHNUNG VON TROG- UND TUNNELBAUWERKEN FÜR EISENBAHNEN NACH DEM TEILSICHERHEITSKONZEPT *

Dr.-Ing. Axel Städing, Dipl.-Ing. Tina Krockner

Zusammenfassung: Zur Erprobung der neuen Regelwerke im Tunnelbau wurden Musterberechnungen nach dem neuen Teilsicherheitskonzept und – zum Vergleich – nach dem bisherigen Globalsicherheitskonzept durchgeführt. Der Bericht erläutert an vier wirklichkeitsnahen Beispielen – einem Trogbauwerk, einem Tunnel in offener Bauweise, einem Tunnel in Spritzbetonbauweise und einem Tübbingtunnel – die anzusetzenden Einwirkungen, die Wahl der Teilsicherheiten, den Berechnungsgang und die Ergebnisse. Die Auswirkungen des Teilsicherheitskonzeptes hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit werden durch Vergleich mit Ergebnissen nach dem Globalsicherheitskonzept dargestellt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die vorgesehenen Regelungen in den Richtlinien 836 und 853 und die zugehörigen fachspezifischen Vorschriften, insbesondere DIN 1054 und die DIN-Fachberichte 101 und 102, zusammen eine hinreichende und zweckmäßige Grundlage für die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes auf Tunnel und andere geotechnische Bauwerke sind.

1 Aufgabenstellung

Die Umstellung der deutschen Vorschriften im konstruktiven Ingenieurbau auf die neue Vorschriftengeneration mit dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept betrifft auch die Tunnelbauwerke für Eisenbahnen. Da mit der Anwendung des neuen Konzeptes auf Tunnelbauwerke bisher keine Erfahrungen vorlagen, wurden Musterbeispiele mit den folgenden Zielen untersucht:

- Absicherung neuer Regelungen in den Richtlinien (Ril) 836 und 853 der Deutschen Bahn AG und der zugehörigen fachspezifischen Normen durch Berechnung und Bemessung repräsentativer Trog- und Tunnelbauwerke
- Überprüfung der Auswirkungen des Teilsicherheitskonzeptes hinsichtlich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit durch Vergleichsberechnungen nach dem bisherigen Globalsicherheitskonzept
- Ableitung von Empfehlungen für die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes bei der statischen Berechnung von Tunnelbauwerken.

* Beitrag auf der Tagung „Fortbildung Fachbeauftragte und Planungsingenieure für Tunnel und Erdbauwerke“ der Deutschen Bahn AG Systemtechnik am 13. und 14.11.2003 in Gemünden-Langenprozelten, überarbeitete Fassung vom 04.02.2004

Zu diesem Zweck wurden u. a. die folgenden wirklichkeitsnahen Bauwerksbeispiele berechnet:

1. ein Trogbauwerk,
2. ein Tunnelbauwerk in offener Bauweise als einzelliger Stahlbetonrahmen und
3. ein zweischaliger Tunnel in geschlossener Bauweise (Spritzbeton) und
4. ein Tübbingtunnel.

Nachfolgend werden die Standsicherheitsnachweise der o.g. Beispiele nach dem Teilsicherheitskonzept erläutert, die Ergebnisse mit den Resultaten nach dem Globalsicherheitskonzept verglichen und Empfehlungen zur Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes gegeben.

2 MASSGEBENDE NEUE TECHNISCHE VORSCHRIFTEN

Für Planung, Bau und Instandhaltung von Eisenbahntunneln gilt die Richtlinie 853 der Deutschen Bahn AG. Für Trogbauwerke gilt die Ril 836, die allerdings während der Bearbeitung der Musterbeispiele in ihrer neuen Fassung noch nicht vollständig vorlag.

Für die Ansätze im Einzelnen wie Einwirkungen, Erddruckansätze, Bemessung gelten die entsprechenden fachspezifischen Vorschriften. Dies sind im Wesentlichen:

- DIN 1054 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Ausgabe Januar 2003
für die Sicherheitsnachweise des Tunnelbauwerkes einschließlich der Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände aus Baugrund und Grundwasser
- DIN-Fachbericht 101 Einwirkungen auf Brücken, Ausgabe März 2003
für den Ansatz von Verkehrslasten und zugehörigen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten auf der Einwirkungsseite
- DIN-Fachbericht 102 Betonbrücken, Ausgabe März 2003
für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen und die Teilsicherheitsbeiwerte für die Baustoffeigenschaften
- DIN 1055-1 Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1: Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen, Ausgabe Juni 2002
für die Berechnung der Eigengewichte usw.
- DIN 4085 Baugrund – Berechnung des Erddrucks, Ausgabe Dezember 2002
für die Ermittlung der Erddrücke

Der Stand der Vorschriften entspricht dem Zeitpunkt der Bearbeitung.

3 STANDSICHERHEITSNACHWEIS FÜR EIN TROGBAUWERK

3.1 Berechnung nach dem Teilsicherheitskonzept

Die Abmessungen des betrachteten Stahlbetontrogs, die Baugrund- und Grundwasserverhältnisse und die Verkehrslasten im Gebrauchszustand sind Bild 1 zu entnehmen.

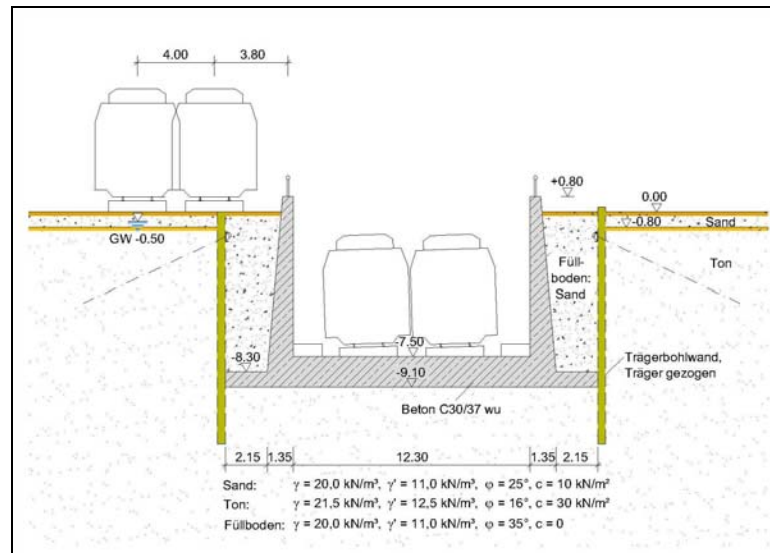


Bild 1: Trogbauwerk, Querschnitt

Für das Trogbauwerk soll als übergeordnetes Regelwerk die Ril 836, für die baugrundspezifischen Nachweise die DIN 1054 und hinsichtlich der Verkehrslasten der DIN-Fachbericht 101 (DIN-Fb 101) gelten. Auf der Grundlage dieser Vorschriften ist für die Bau- und Endzustände die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen. Darüber hinaus ist der Auftriebssicherheitsnachweis zu führen.

Für die statische Berechnung werden die folgenden Grundlagen zusammengestellt:

Die charakteristischen Baugrundkennwerte werden in der Regel in einem Baugrundgutachten angegeben. Sie entsprechen den beim Globalsicherheitskonzept zugrunde zu legenden Rechenwerten der Baugrundkennwerte. Die Materialkennwerte für den Beton und den Betonstahl sowie die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte sind dem DIN-Fachbericht 102 zu entnehmen. Im statischen System wird das Bauwerk mit seinen wahren Abmessungen und charakteristischen Steifigkeiten abgebildet.

Als Einwirkungen auf das Trogbauwerk werden angesetzt: das Eigengewicht nach DIN 1055, der Wasserdruck nach DIN 1054, der minimale und der maximale Erddruck nach DIN 4085, die Verkehrslasten auf der Hinterfüllung und im Trog nach DIN-Fb 101 und die Temperaturbeanspruchungen in Anlehnung an Ril 853, vgl. Tabelle 1. Die zukünftige Fassung der Ril 836 wird hinsichtlich der Temperatureinwirkungen auf die ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 2 verweisen.

Stahlbetontrog	
<i>Einwirkungen</i>	
Ständige:	Veränderliche:
Eigengewicht Trogbauwerk Eigengewicht Ausbau kein Erddruck bzw. Verdichtungserddruck bzw. aktiver Erddruck Auflast auf Sporn Wasserdruck	LM 71 im Trog Lasten aus LM 71 Exzentrizität der Vertikallasten Exzentrizität aus Überhöhung Zentrifugallasten Seitenstoß Verkehrslasten auf Dienstwegen Eisenbahnlasten auf Hinterfüllung Lasten aus LM 71 Seitenstoß Temperatur

Tabelle 1: Einwirkungen auf den Stahlbetontrog

Für den Tragsicherheitsnachweis sind die Teilsicherheiten für die ständigen Lasten der DIN 1054 zu entnehmen. Für die Verkehrslasten ist der DIN-Fb 101 zu beachten, für die Temperatur ist der Wert nach Ril 853 anzusetzen. Zusätzlich zu den Teilsicherheiten erhalten die nicht vorherrschenden veränderlichen Einwirkungen einen Kombinationsbeiwert. Dieser ist für die Verkehrslasten dem DIN-Fb 101 und für die Temperatureinwirkungen Ril 853 zu entnehmen. Die Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte für den Endzustand sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, d. h. für die Begrenzung der in der Ril 853 vorgegebenen Rissbreiten, sind die Einwirkungen mit ihren charakteristischen Werten anzusetzen. Die Kombinationsbeiwerte für die veränderlichen Einwirkungen sind dabei gemäß Ril 853 für die Anforderungsklasse D, häufige Einwirkungskombination zu wählen, DIN-Fb 101, Anhang G IV, Tabelle G.2. Der Kombinationsbeiwert für die Temperatureinwirkungen ist in der Ril 853 angegeben.

Die Schnittgrößen im Bauwerk werden mit Hilfe eines Stabwerkprogrammes für alle Lastfallkombinationen berechnet. Dazu werden die aus den einzelnen charakteristischen Einwirkungen resultierenden Schnittgrößen bei linearer Berechnung mit den o. g. Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten multipliziert und miteinander überlagert.

Die Bemessung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt nach DIN-Fb 102. Im Unterschied zur bisherigen Biegebemessung nach DIN 1045 (1988) darf dabei die Verfestigung des Betonstahles bis zu einer Zugfestigkeit von $f_{tk,cal} = 525 \text{ N/mm}^2$ berücksichtigt werden (anstatt $\beta_s = 500 \text{ N/mm}^2$). Die Bemessung der Schubbewehrung erfolgt wie bisher in Anlehnung an ein Fachwerkmodell, wobei die Druckstrebenneigung in Abhängigkeit von der Größe der Querkraft zwischen $18,4^\circ$ und 60° anzunehmen ist.

Die Bemessung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit besteht in der Beschränkung der Rissbreite, die in Ril 853 vorgegeben ist.

Stahlbetontrog			
globale Sicherheitsbeiwerte		Teilsicherheitsbeiwerte	
Einwirkungen		Einwirkungen (GZ 1B, LF1):	
ständige	$\gamma = 1,00$	ständige	
		allgemein	$\gamma_G = 1,35$
		akt. Erddruck, Wasser	$\gamma_G = 1,35$
		Erdruchedruck	$\gamma_G = 1,20$
veränderliche	$\gamma = 1,00$	veränderliche	
		Verkehr im Trog	$\gamma_Q = 1,45$
			$\psi_0 = 0,80$
		Verkehr auf Hinterf.	$\gamma_Q = 1,45$
			$\psi_0 = 0,80$
Temperatur	$\gamma_T = 1/1,75$	Temperatur	$\gamma_Q = 1,00$
			$\psi_0 = 0,80$
Widerstände		Widerstände	
Stahl	$\gamma_s = 1,75$	Stahl	$\gamma_s = 1,15$
Beton	$\gamma_B = 1,50$	Beton	$\gamma_c = 1,50$

Tabelle 2: Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte für den Tragfähigkeitsnachweis

3.2 Vergleich der Ergebnisse nach dem Teilsicherheitskonzept und nach dem Globalsicherheitskonzept

In den Bildern 2 und 3 sind die für die Tragfähigkeit erforderlichen Bewehrungsquerschnitte nach beiden Sicherheitskonzepten gegenübergestellt. Demnach fordert das Teilsicherheitskonzept in allen Bemessungspunkten weniger Biegebewehrung als das Globalsicherheitskonzept. Die Ursache hierfür liegt im wesentlichen in der insgesamt kleineren Bemessungssicherheit für die maßgebenden Einwirkungen Erd- und Wasserdruck: So ergibt sich aus den Teilsicherheiten für diese Einwirkungen multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert für den Betonstahl eine Gesamtbemessungssicherheit von etwa $1,15 \times 1,20 = 1,38$ bzw. $1,15 \times 1,35 = 1,55$. Beim Globalsicherheitskonzept beträgt die Sicherheit für diese Fälle 1,75. Weiterhin ergibt sich aus der neuen Biegebemessung bei geringer bis mäßiger Biegebeanspruchung durch den Ansatz einer höheren rechnerischen Stahlzugfestigkeit ($f_{tk,cal} = 525 \text{ N/mm}^2$) eine weitere Verringerung des erforderlichen Bewehrungsquerschnittes ($\Delta \leq 5 \%$).

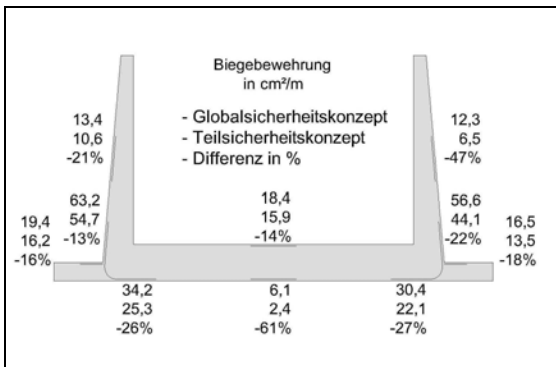


Bild 2: Biegezugbewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B

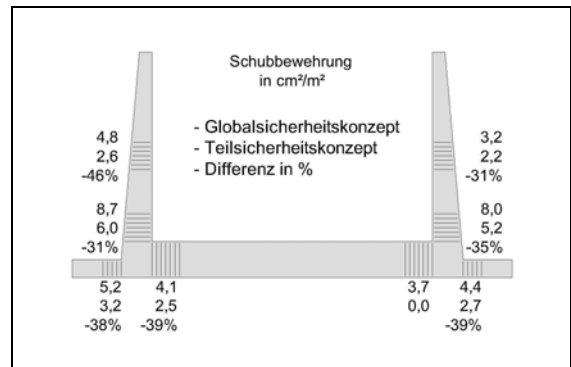


Bild 3: Schubbewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B

Im Hinblick auf die zu erwartende hohe Wahrscheinlichkeit, dass die tatsächlichen Erd- und Wasserdrücke nicht größer werden als angesetzt und der Erdruhedruck bereits bei kleinen Wandverformungen abnimmt, ist die kleinere Bemessungssicherheit für Wasser- und Erdruhedruckbeanspruchungen akzeptabel und steht in Übereinstimmung mit dem probabilistischen Sicherheitskonzept. Die etwas größere Bemessungssicherheit für Temperaturbeanspruchungen ist für das Gesamtergebnis der Bemessung von untergeordneter Bedeutung und ebenfalls akzeptabel.

Bei der Schubbemessung ergeben sich nach den neuen Vorschriften ebenfalls kleinere Bewehrungsquerschnitte. Auch hier ist das Produkt der Teilsicherheiten kleiner als die alte Globalsicherheit 1,75. Darüber hinaus wird beim neuen Bemessungskonzept bei vergleichbaren Schubbeanspruchungen mit flacheren Druckstreben gerechnet.

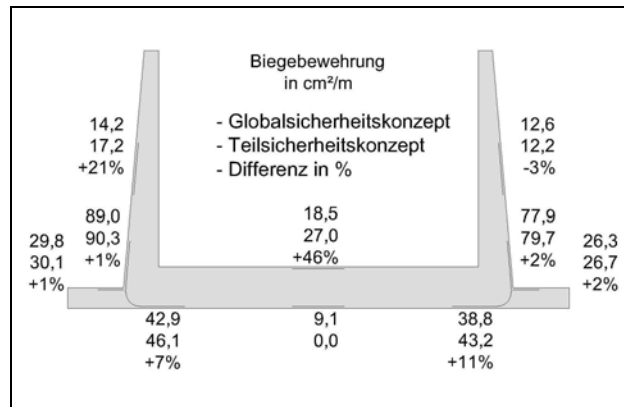


Bild 4: Biegezugbewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 2

Die aus dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit resultierenden Bewehrungsquerschnitte nach beiden Konzepten sind in Bild 4 dargestellt. Die hier auftretenden Unterschiede haben mehrere Ursachen: Nach neuer Ril 853 sind die Temperaturansätze für Tröge der ZTV-ING Teil 5, Abschnitt 2 zu entnehmen. Die darin angegebenen Werte sind wesentlich größer als die für die Vergleichsberechnung angesetzten Zahlen, die in Anlehnung an die alte Ril 853, Ausgabe 10.98 gewählt wurden. Weiterhin gehen die Temperaturschnittgrößen nach neuem Regelwerk mit dem Faktor 0,6 in die Rissbreitenbemessung ein. Bei der Vergleichsberech-

nung wurden demgegenüber die Temperaturschnittgrößen unverändert angesetzt, da die alte Ril 853 hierzu keine Angaben macht. Darüber hinaus fordern die alte und die neue Ril unterschiedliche Rissbreiten für wu-Beton auf der Bauwerksaußenseite. Nach neuem Regelwerk sind 0,15 mm und nach alter Vorschrift 0,2 mm einzuhalten. Als weitere kleine Einflüsse sind noch die unterschiedlichen Rissformeln und die unterschiedliche Betondeckung zu nennen (0,5 cm mehr nach neuer Vorschrift). Aufgrund dieser Randbedingungen ergibt sich auf der Sohloberseite nach neuer Vorschrift ein deutlich größerer Bewehrungsquerschnitt. Auf der Außenseite des Bauwerks liefert die Berechnung weitgehend ähnlich große Bewehrungsquerschnitte.

4 Standsicherheitsnachweis für ein Tunnelbauwerk in offener Bauweise

4.1 Berechnung nach dem Teilsicherheitskonzept

Der untersuchte Eisenbahntunnel ist mit seinen Abmessungen, den Baugrund- und Grundwasserverhältnissen in Bild 5 dargestellt. Die hierfür maßgebende übergeordnete Vorschrift ist die Ril 853. Die fachspezifischen Normen sind dieselben, wie die für das Trogbauwerk. Die Sicherheitsnachweise und die in die Berechnung eingehenden Werte entsprechen ebenfalls denen für das Trogbauwerk, vgl. 2.1. Zusätzlich ist für den Tunnelrahmen die außergewöhnliche Einwirkung Brand nach Ril 853, Modul 1001, anzusetzen. Diese Einwirkung ist zusammen mit den übrigen Einwirkungen als außergewöhnliche Bemessungssituation zu untersuchen, vgl. Ril 853, Modul 2001.

Die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit für das Bauwerk werden analog zum Vorgehen beim Trogbauwerk geführt, vgl. 2.1.

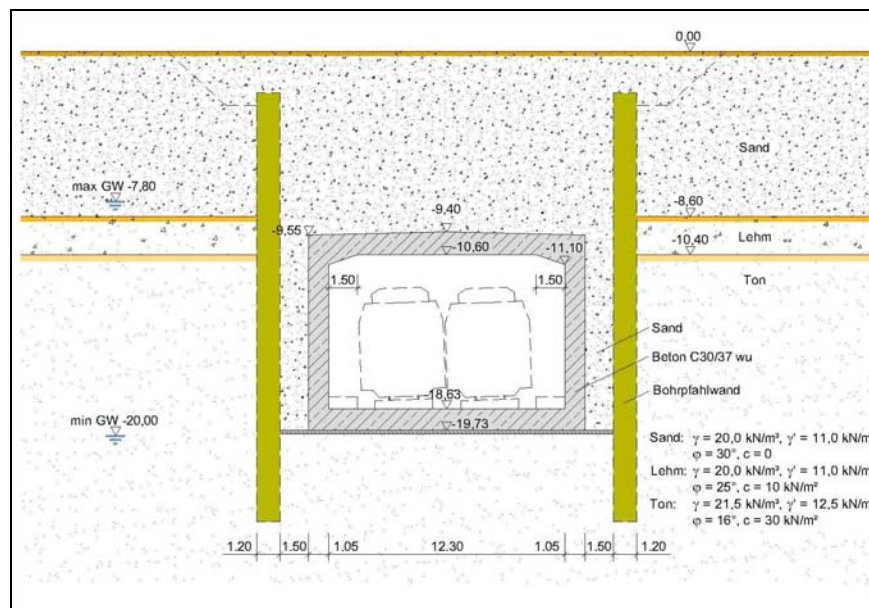


Bild 5: Tunnel in offener Bauweise, Querschnitt

4.2 Vergleich der Ergebnisse nach dem Teilsicherheitskonzept und nach dem Globalsicherheitskonzept

Der Vergleich der für die Tragfähigkeit erforderlichen Bewehrungsquerschnitte zeigt, dass die neue Vorschriftengeneration in den Rahmenecken bis zu 30 % mehr Biegebewehrung erfordert, vgl. Bild 6. Die Ursache hierfür liegt in der nun neu hinzugekommenen Forderung nach Bemessung für den Lastfall „Brand“ mit $\Delta T = 50\text{ K}$ für Wände und Decke.

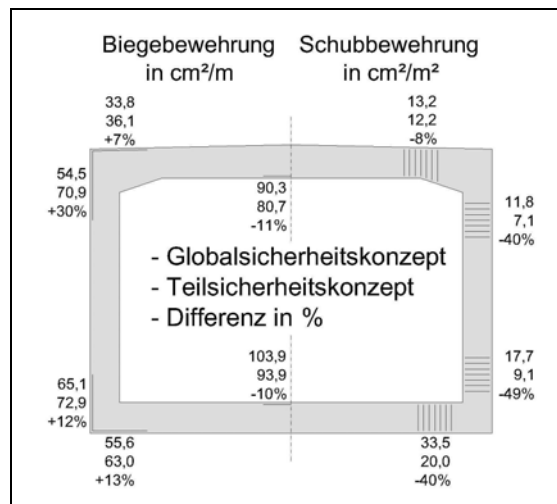


Bild 6: Tunnel in offener Bauweise, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B, Teilsicherheitskonzept mit LF Brand

Ohne Berücksichtigung des Lastfalles „Brand“ liefert das neue Teilsicherheitskonzept für die Tragfähigkeit in allen Querschnitten 10 bis 16 % kleinere Biegebewehrungsquerschnitte, vgl. Bild 7.

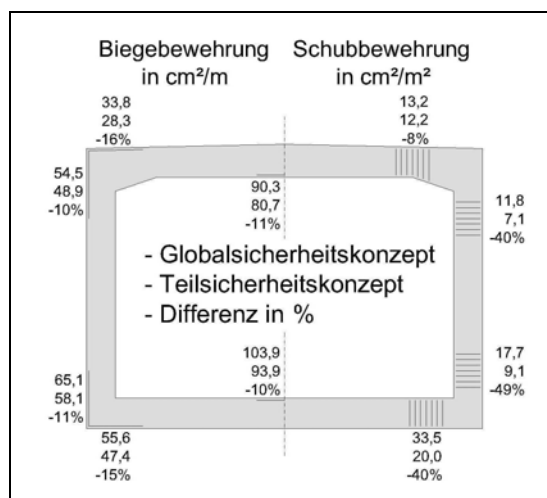


Bild 7: Tunnel in offener Bauweise, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B, ohne LF Brand

Die Ursachen für die Unterschiede wurden bereits am Beispiel des Trogbauwerkes erläutert: insgesamt kleinere Bemessungssicherheit für die maßgebenden Einwirkungen Erddruck, Wasserdruck und Eigengewicht und höhere Ausnutzung der Stahlzugfestigkeit. Im Hinblick darauf, dass Überschüttung, Wasserdruck und Eigengewicht mit guter Wahrscheinlichkeit zutreffend erfasst werden können, ist die neue, etwas kleinere Bemessungssicherheit für diese Einwirkungen akzeptabel und steht in Übereinstimmung mit dem probabilistischen Sicherheitskonzept.

Wie beim Trogquerschnitt sind auch hier die Schubbewehrungsquerschnitte nach dem Teilsicherheitskonzept kleiner als nach dem alten Bemessungskonzept. Die Ursachen – kleinere Gesamtsicherheit und flachere Druckstreben – wurden bereits unter 2.2 erläutert.

Die aus dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit resultierenden Bewehrungsquerschnitte nach beiden Konzepten weichen mit Ausnahme des Wertes in der oberen Rahmenecke nur wenig voneinander ab, vgl. Bild 8. Die Unterschiede ergeben sich aus den unterschiedlichen Kombinationsbeiwerten für die Temperatur (alt: 1,0, neu: 0,6), aus den einzuhaltenden Rissbreiten auf der Tunnelaußenseite (alt: 0,2 mm, neu: 0,15 mm) und aus den unterschiedlichen Rissformeln.

Als Gesamtergebnis der Bemessung zeigt sich auch hier, dass die Gebrauchstauglichkeitsnachweise für die Biegezugbewehrung maßgebend werden. Dadurch ergeben sich letztlich nur geringe bis mäßige Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus alter und neuer Bemessung.

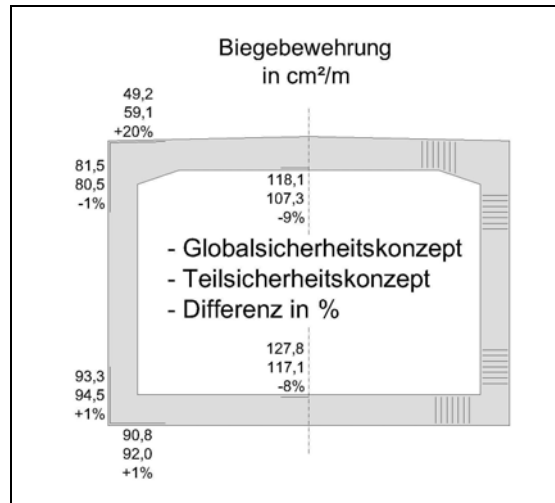


Bild 8: Tunnel in offener Bauweise, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 2

5 Standsicherheitsnachweis für ein Tunnelbauwerk in Spritzbetonbauweise

5.1 Berechnung nach dem Teilsicherheitskonzept

Der betrachtete zweigleisige Eisenbahntunnel wird in Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Er liegt mit einer Überlagerung von 18 m im Hangschutt und gering bis deutlich verwitterten Tonschiefer-Sandstein-Wechselfolgen. Der Grundwasserspiegel wird im Bauzustand bis auf

Höhe der Tunnelsohle abgesenkt und liegt im Endzustand 3,4 m über der Tunnelfirste. Die Gesamtkonstruktion und die Abmessungen im einzelnen sind Bild 9 zu entnehmen.

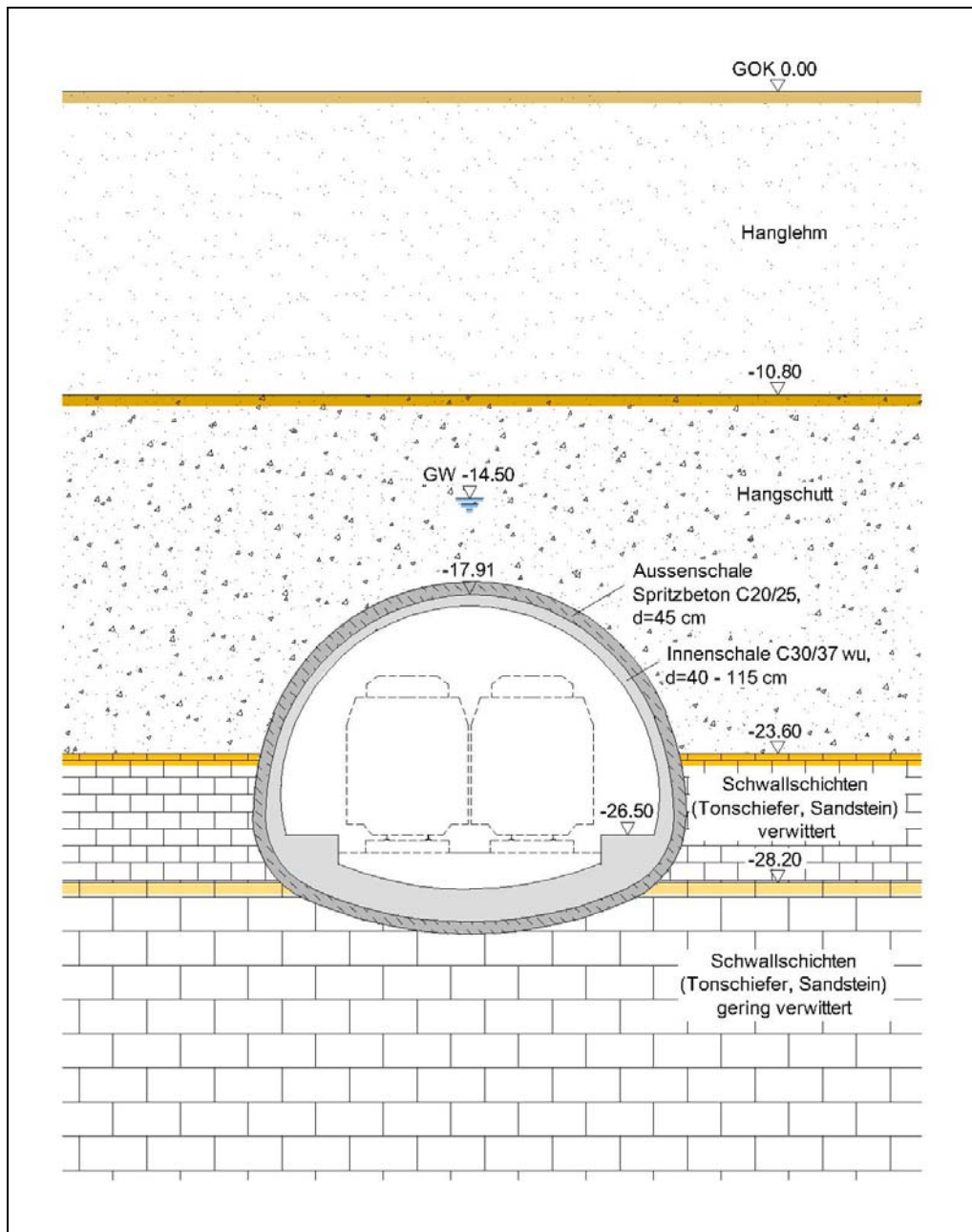


Bild 9: Tunnel in Spritzbetonbauweise, Querschnitt

Als übergeordnete Vorschrift für dieses Bauwerk gilt die Ril 853. Für die Ansätze im einzelnen gelten dieselben fachspezifischen Vorschriften wie für die vorangegangenen Beispiele. Die Berechnungsansätze entsprechen im Prinzip denen für das Tunnelbauwerk in offener Bauweise. Als Berechnungsmodell wird hier ein Finite-Element-Modell (FE-Modell) gewählt, welches Bauwerk und Baugrund mit ihren wahren Abmessungen und mit ihren charakteristischen Steifigkeiten abbildet. Darüber hinaus wird im betrachteten Fall auch der Baufortschritt mit den daraus resultierenden Lastumlagerungen erfasst, vgl. Bilder 10 und 11.

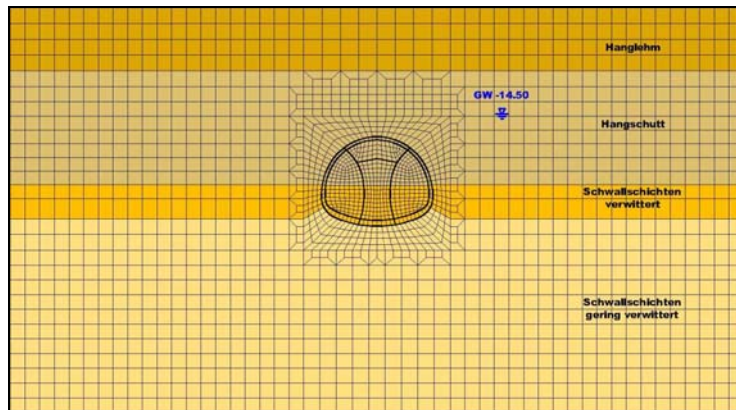


Bild 10: Tunnel in Spritzbetonbauweise, FE-Modell

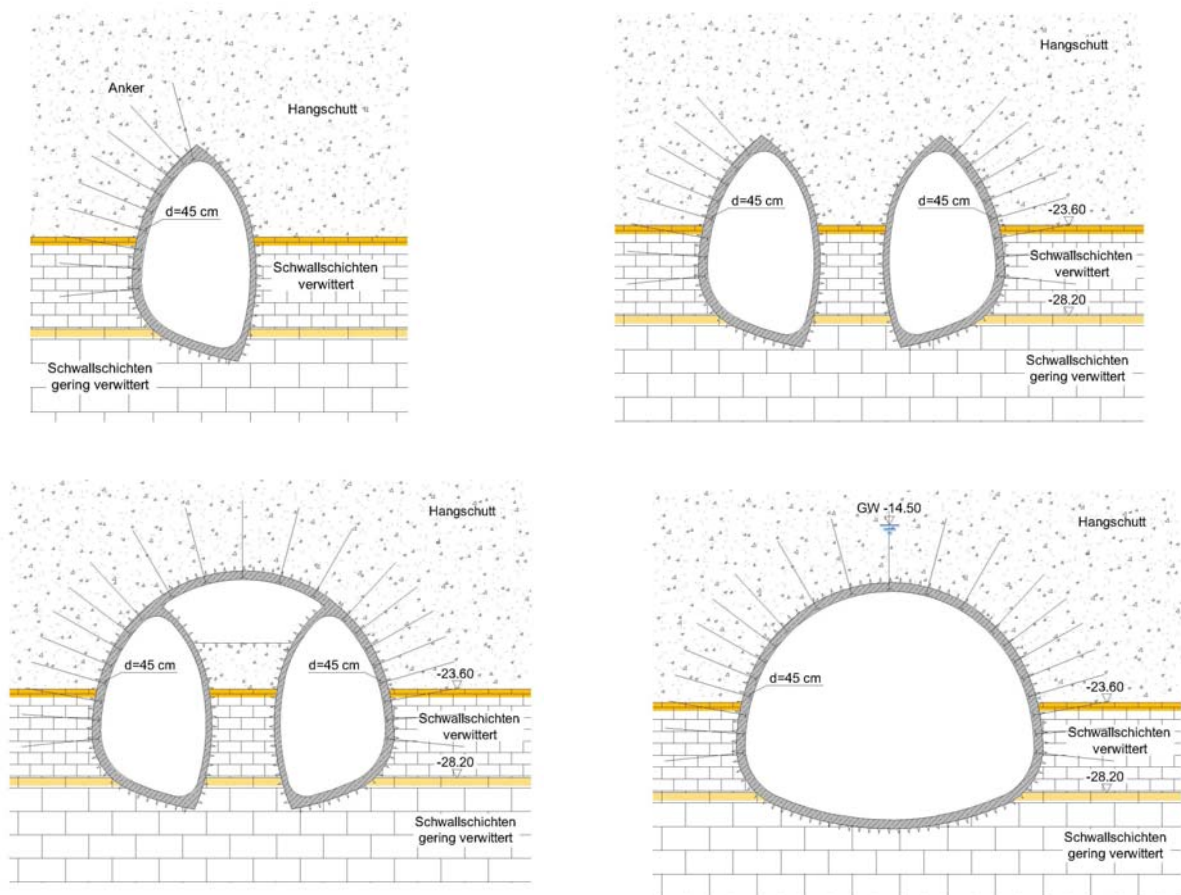


Bild 11: Tunnel in Spritzbetonbauweise, untersuchte Bauzustände

Wie für die vorangegangenen Beispiele werden die Nachweise der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit auf der Grundlage der DIN 1054 geführt. Die Einwirkungen Eigengewicht, Gebirgsdruck und Wasserdruck werden dabei mit ihren charakteristischen Werten auf das System angesetzt. Die Spannungen im Gebirge entsprechen dadurch in allen Zuständen den wahren Werten, so dass nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehungen und Bruchkriterien für das Gebirge uneingeschränkt und unverändert angewendet werden können. Für die Bemessung werden die so errechneten Schnittgrößen mit den zugehörigen

Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1054, Tabelle 2 multipliziert. Der Ansatz erhöhter Lasten auf das FE-Modell ist wegen des nichtlinearen Spannungs-Dehnungsverhaltens des Baugrundes nicht praktikabel. Lediglich die Temperatureinwirkung werden für den Tragfähigkeitsnachweis mit dem Faktor $1/\gamma_G$ multipliziert und auf das System aufgebracht, um bei der Bemessung letzten Endes die Temperaturteilsicherheit von 1,0 zu erreichen. Für den Tunnel in geschlossener Bauweise ergeben sich damit die in Tabelle 3 zusammengestellten Sicherheitsbeiwerte.

Spritzbetonbauweise			
globale Sicherheitsbeiwerte		Teilsicherheitsbeiwerte	
Einwirkungen		Einwirkungen (GZ 1 B, LF1):	
ständige	$\gamma = 1,00$	ständige allgemein	$\gamma_G = 1,35$
		Eigengewicht (Erd- u. Wasserdr.)	$\gamma_G = 1,35$
Temperatur	$\gamma_T = 1/1,75$	veränderliche Temperatur	$\gamma_Q = 1,00$
Widerstände		Widerstände	
Stahl	$\gamma_s = 1,75$	Stahl	$\gamma_s = 1,15$
Beton	$\gamma_B = 2,10$	Beton	$\gamma_c = 1,50$

Tabelle 3: Sicherheitsbeiwerte für den Tragfähigkeitsnachweis

Bei der Ermittlung der Schnittgrößen für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die Temperatureinwirkungen gemäß Ril 853, Modul 2001, mit einem Kombinationsbeiwert von $\psi = 0,6$ multipliziert.

Die Bemessung der Außen- und der Innenschale für den Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt nach DIN-Fb 102. Dabei wird auch die Außenschale – dem Modul 2001 entsprechend – mit den Teilsicherheiten des Lastfalles 1 (Endzustand) bemessen.

5.2 Vergleich der Ergebnisse nach dem Teilsicherheitskonzept und nach dem Globalsicherheitskonzept

Aufgrund der ungünstigen Baugrundverhältnisse und der relativ großen Lockergesteinsüberlagerung ist die 45 cm dicke Spritzbetonschale hoch ausgenutzt. Sowohl nach altem als auch nach neuem Bemessungskonzept muss die Schale daher relativ stark bewehrt werden, vgl. Bild 12. Erwartungsgemäß ergeben sich nach dem Teilsicherheitskonzept kleinere Biegebewehrungsquerschnitte als nach dem alten Bemessungsverfahren. Die Unterschiede fallen jedoch nicht so groß aus wie beim Beispiel „offene Bauweise“, da die Querschnitte größtenteils überdrückt sind und der Unterschied in der Gesamtsicherheit bei Druckbeanspruchung kleiner ist als bei Biegezug.

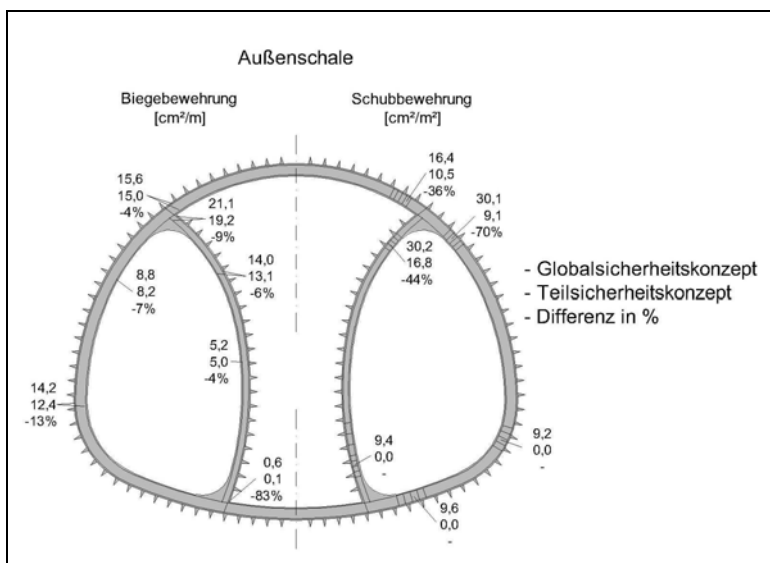


Bild 12: Spritzbetonschale, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B

Die Biegebeanspruchung der Innenschale ist vergleichsweise gering, da diese zu einem Zeitpunkt eingebaut wird, zu dem die Bettungsreaktionen des Baugrundes bereits geweckt sind (Verformung der Außenschale), vgl. Bild 13. Die Ursache für die kleinere Biegezugbewehrung nach dem Teilsicherheitskonzept in den beiden auf Biegung beanspruchten Querschnitten liegt in der insgesamt kleineren Gesamtsicherheit bei der Tragfähigkeitsbemessung und wurde bereits erläutert. Dies gilt ebenfalls für die Schubbewehrung in der unteren Ulme. Für die Sohle ist nach alter Vorschrift gerade noch keine Schubbewehrung erforderlich.

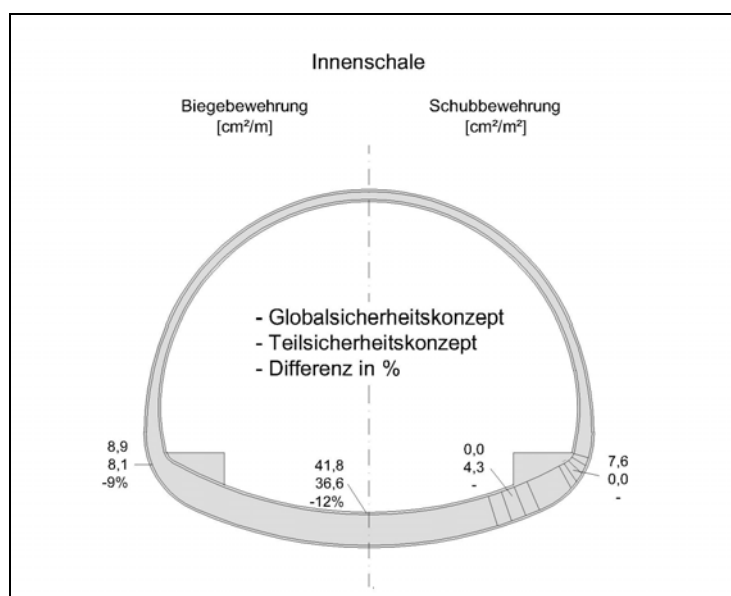


Bild 13: Innenschale, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B

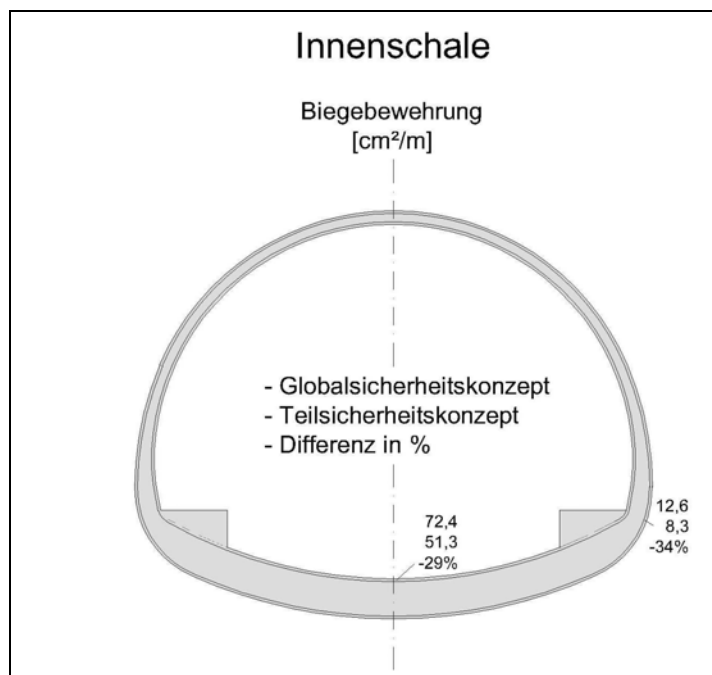


Bild 14: Innenschale, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 2

Die aus dem Gebrauchstauglichkeitsnachweis resultierende Bewehrung ist im Bild 14 dargestellt. Hier zeigen sich Unterschiede von -29 bzw. -34 % in den Bewehrungsquerschnitten nach altem und neuem Konzept. Die Ursache hierfür liegt in erster Linie an den unterschiedlichen Faktoren, mit denen die Temperaturbeanspruchung in die Rissbreitenbemessung eingeht. Nach der neuen Ril 853 ist die Temperatur mit dem Kombinationsbeiwert 0,6 im Grenzzustand 2 zu berücksichtigen. Die alte Richtlinie hat hierzu keine Angaben gemacht. In der Vergleichsberechnung wurde daher mit dem Faktor 1,0 gerechnet. Hieraus resultieren deutlich größere Biegebeanspruchungen nach dem alten Bemessungskonzept. Auf der Schalenaußenseite wird dieser Einfluss dadurch gedämpft, dass die neue Vorschrift eine kleinere Rissbreite (0,15 mm) fordert als die alte (0,2 mm). Weitere Einflüsse sind die etwas unterschiedlichen rechnerischen Steifigkeiten des Betons ($B35 - C30/37 \Delta E = -6 \%$), die unterschiedlichen Formeln zur Berechnung der Rissbewehrung sowie die unterschiedlichen Stabdurchmesser, welche im Zuge der Rissbreitenbemessungen möglich werden. So wirkt sich ein erforderlicher größerer Stabdurchmesser, welcher für einen etwas größeren Bewehrungsquerschnitt erforderlich wird, zusätzlich erhöhend auf den erforderlichen Bewehrungsquerschnitt aus.

6 Standsicherheitsnachweis für einen Tübbingtunnel

6.1 Berechnung nach dem Teilsicherheitskonzept

Der untersuchte eingleisige Tübbingtunnel liegt mit 14 m Überlagerung überwiegend in Mergel und mit der Sohle in mitteldichtem Sand. Der höchste anzusetzende Grundwasserspiegel liegt

1 m unter OK Gelände. Die Tunnelkonstruktion mit ihren Abmessungen, die Baugrundschiichtung und die anzusetzenden Wasserstände sind Bild 15 zu entnehmen.

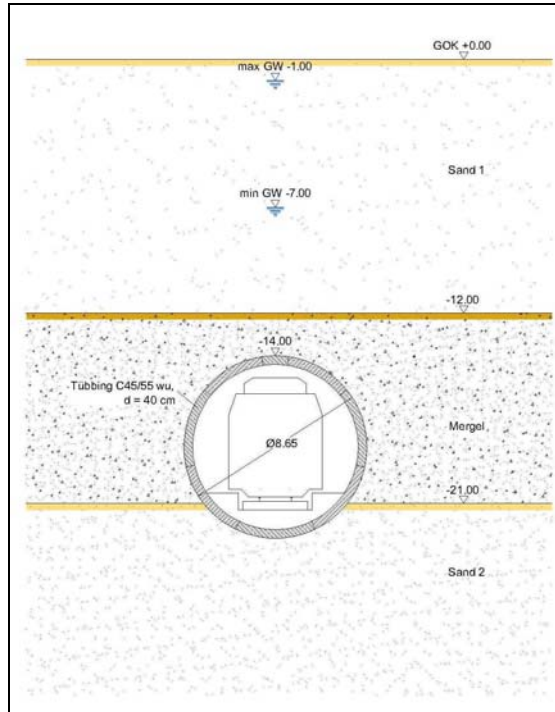


Bild 15: Tübbingtunnel, Querschnitt

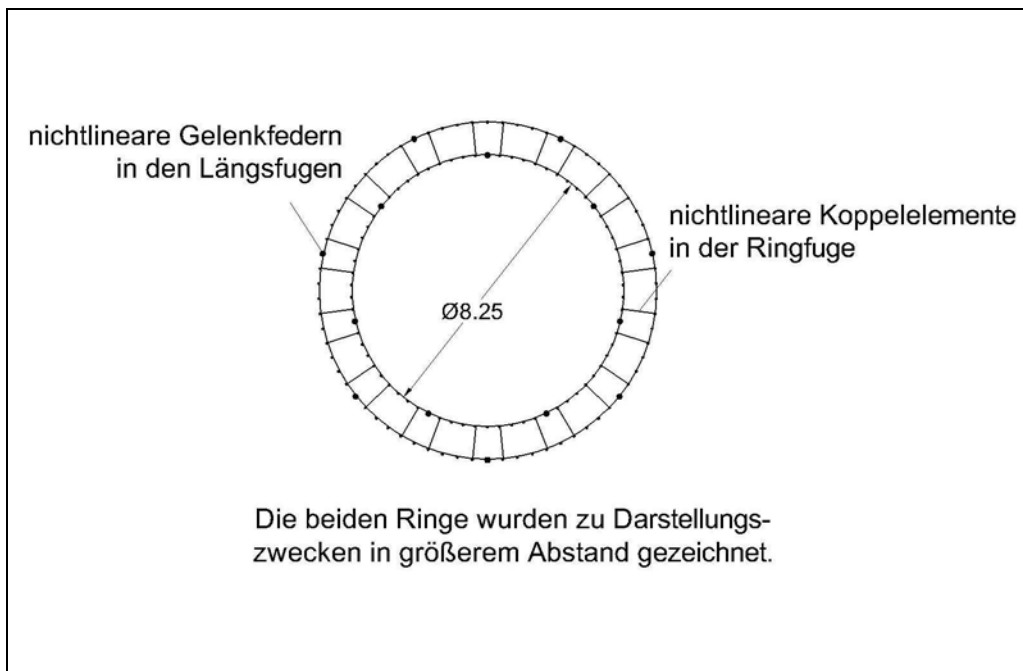


Bild 16: Tübbingtunnel, statisches System

Auch für diesen Eisenbahntunnel gilt die Richtlinie 853 als übergeordnete Vorschrift. Für die Ansätze im Einzelnen gelten dieselben fachspezifischen Vorschriften wie für die vorange-

gangenen Beispiele. Als statisches Modell werden zwei hintereinander liegende, miteinander gekoppelte Ringe diskretisiert, die mit Ausnahme des Firstbereiches elastisch gebettet sind, siehe Bild 16. Die Kontaktstellen in den Längsfugen werden als Gelenke mit definierter, nichtlinearer Verdrehsteifigkeit simuliert. Die Kopplung benachbarter Ringe durch Nut und Feder wird durch Koppelstäbe zwischen den Ringen abgebildet, die ebenfalls eine nichtlineare Federkennlinie besitzen.

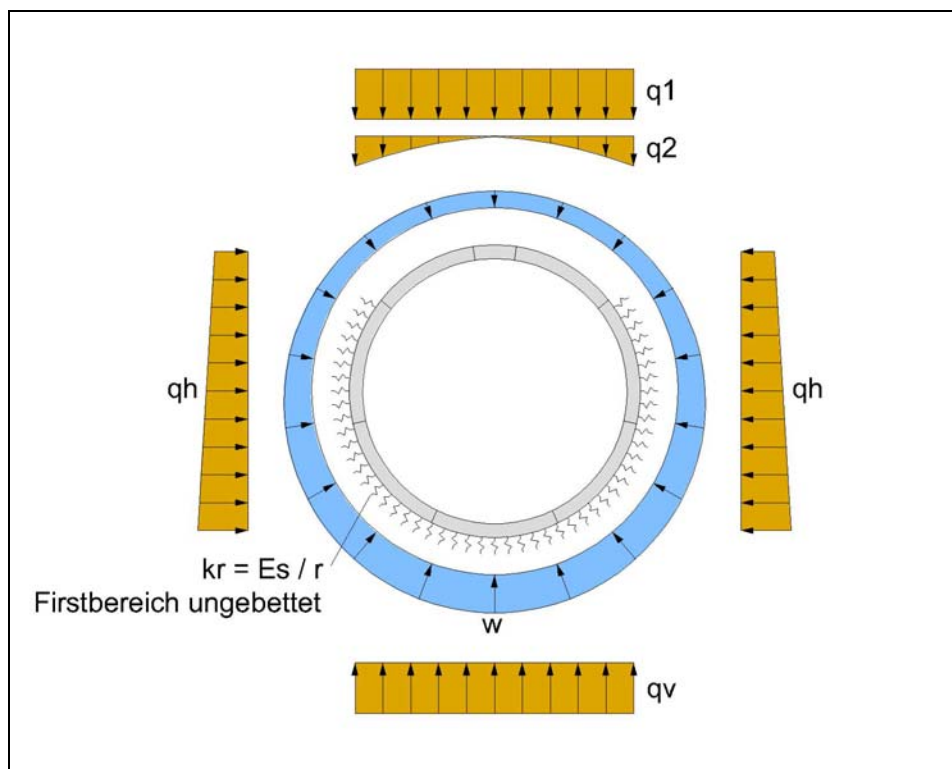


Bild 17: Tübbingtunnel, Einwirkungen

In Anlehnung an die Empfehlung zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein wird bei der Schnittgrößenberechnung eine Vorverformung der Tübbingringe von der Größe $r / 200 = 2,1$ cm angesetzt, was als realistische Imperfektion beim Ringbau anzusehen ist. Aus rechen-technischen Gründen erfolgt im vorliegenden Fall im Zusammenhang mit der Vorverformung die Berechnung nach Theorie II. Ordnung. Dabei werden die Einwirkungen – vgl. Bild 17 – mit den jeweils zugehörigen Teilsicherheiten multipliziert und auf das statische System aufgebracht. Die Teilsicherheiten für die ständigen Einwirkungen Eigengewicht, Erddruck und Wasserdruck werden nach DIN 1054, Tabelle 2 angesetzt. Sie sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Die Temperatureinwirkungen und der zugehörige Sicherheitsbeiwert 1,0 ergeben sich aus der Richtlinie 853. In Anlehnung an ein ausgeführtes Bauwerk werden neben der planmäßigen Überlagerung zusätzlich Abgrabungen und Aufschüttungen oberhalb des Tunnels angesetzt, welche im vorliegenden Fall als Bauzustände angenommen werden. Die Einstufung derartiger Sonderlastfälle ist in der Praxis von Fall zu Fall zu entscheiden bzw. mit den zuständigen Stellen zu vereinbaren. Verkehrslasten im Tunnel werden nicht angesetzt, da sie günstig wirken. Neben den Beanspruchungen infolge Erd- und Wasserdruck werden auch die Bauzustände

de „Pressendruck auf die Tübbinge“ untersucht. Hierbei wird unterschieden nach Vortriebskräften für den Regelvortrieb, welche mit den Sicherheiten nach Lastfall 1 aufzunehmen sind, und nach maximal installierten Pressenkräfte, welche als Lastfall 2 anzusehen sind.

Mit den so ermittelten Schnittgrößen werden die Tübbinge für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und für die Gebrauchstauglichkeit nach DIN-Fb 102 bemessen.

Tübbingtunnel			
globale Sicherheitsbeiwerte		Teilsicherheitsbeiwerte	
Einwirkungen		Einwirkungen (GZ 1 B):	
ständige	$\gamma = 1,00$	ständige	
		allgemein	$\gamma_G = 1,35$ (LF1)
			$\gamma_G = 1,20$ (LF2)
		Eigengewicht (Erd- u. Wasserdr.)	$\gamma_G = 1,35$
			$\gamma_G = 1,20$ (LF2)
Temperatur	$\gamma_T = 1/1,75$	veränderliche Temperatur	$\gamma_Q = 1,00$
Widerstände		Widerstände	
Stahl	$\gamma_s = 1,75$ (LF1)	Stahl	$\gamma_s = 1,15$
	$\gamma_s = 1,40$ (LF2)		
Beton	$\gamma_B = 2,10$	Beton	$\gamma_c = 1,50$

Tabelle 4: Sicherheitsbeiwerte für den Tragfähigkeitsnachweis

6.2 Vergleich der Ergebnisse nach dem Teilsicherheitskonzept und nach dem Globalsicherheitskonzept

Für den Nachweis der Tragfähigkeit ergeben sich sowohl bei der Biegebewehrung als auch bei der Schubbewehrung für die Koppelkräfte nach dem Teilsicherheitskonzept kleinere Bewehrungsquerschnitte als nach dem Globalsicherheitskonzept, obwohl im vorliegenden Fall der Lastfall Bauzustand (LF2, unsymmetrische Überschüttung und Abgrabung) maßgebend wird und die Gesamtsicherheit nach beiden Bemessungskonzepten etwa gleich ist ($1,4 \approx 1,2 \times 1,15 = 1,38$), vgl. Bild 18. Die Ursache für die Unterschiede liegt in den für die Theorie II. Ordnung angesetzten Sicherheitsbeiwerten für die verformungswirksamen Einwirkungen. Hierbei werden nach altem Bemessungskonzept die Einwirkungen mit der Gesamtsicherheit von 1,4 auf das System aufgebracht und nach neuem Konzept mit der Teilsicherheit von 1,2. In Kombination mit den großen Ringdruckkräften ergeben sich die dargestellten Bewehrungsunterschiede, die prozentual groß sind, absolut gesehen jedoch eher klein. Bei der Bemessung der Spaltzugbewehrung in den Längsfugen infolge Ringdruck und in den Ringfugen infolge Pressenkräfte sind die Bewehrungsunterschiede klein, da diese Kräfte nach beiden Konzepten genau gleich bzw. ungefähr gleich groß sind und auch die Gesamtsicherheiten etwa gleich groß sind, siehe oben.

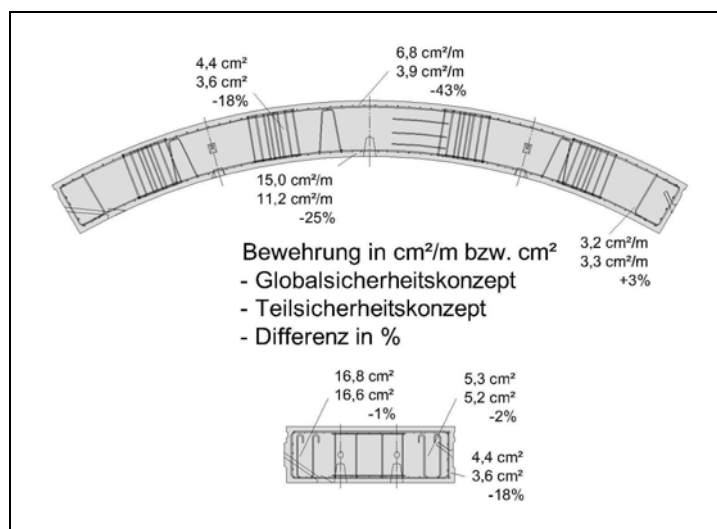


Bild 18: Tübbingtunnel, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 1 B

Beim Gebrauchstauglichkeitsnachweis macht sich die unterschiedliche Größe, mit der die Temperatureinwirkungen in die Bemessung eingehen, bemerkbar. Während nach neuer Ril die Temperaturschnittgrößen mit 0,6 zu multiplizieren sind, wurde in der Vergleichsberechnung mit 1,0-fachen Werten gerechnet, da die alte Ril keinen Faktor zur Reduzierung der Temperaturbeanspruchungen angegeben hat. Hieraus ergeben sich die in Prozenten recht großen, absolut gesehen jedoch eher kleinen Unterschiede in der erforderlichen Biegebewehrung.

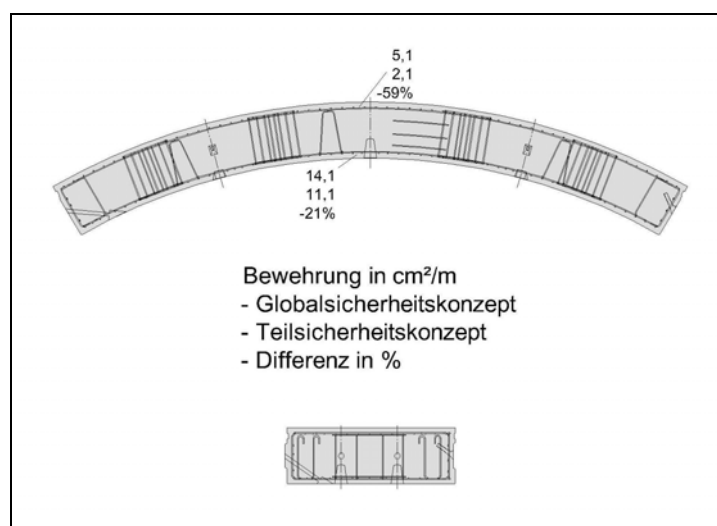


Bild 19: Tübbingtunnel, Bewehrung aus Nachweisen im Grenzzustand 2

Auch bei diesem Beispiel ist festzuhalten, dass die Unterschiede der Bewehrungsquerschnitte nach altem und neuem Bemessungskonzept insgesamt, unter Berücksichtigung der absoluten Werte akzeptabel sind.

7. Ergebnisse und Empfehlungen

Das Ergebnis der Erprobung des neuen Teilsicherheitskonzeptes mit den gewählten Beispielen und der Vergleich mit Berechnungen nach dem bisherigen Globalsicherheitskonzept lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Biege- und Schubbewehrung der untersuchten Bauwerke ist nach dem Tragfähigkeitsnachweis des neuen Teilsicherheitskonzeptes etwas kleiner als nach dem bisherigen Globalsicherheitskonzept. Im Hinblick darauf, dass die ständigen Einwirkungen Erddruck, Wasserdruck und Eigenlasten mit guter Wahrscheinlichkeit zutreffend erfasst werden können und die hierauf anzusetzenden Teilsicherheiten dementsprechend klein gewählt werden dürfen, ist die kleinere Bemessungssicherheit akzeptabel und entspricht dem probabilistischen Sicherheitskonzept.
- Maßgebend für die letztlich erforderliche Biegebewehrung des Bauwerks ist in der Regel der Rissbreitennachweis. Hier liefern beide Sicherheitskonzepte in der Summe weitgehend ähnliche Bewehrungsquerschnitte.
- Die nach neuem Nachweiskonzept kleinere Schubbewehrung resultiert daraus, dass nun flachere Druckstreben im Berechnungsmodell angenommen werden. Es ist anzunehmen, dass dies durch Forschungsergebnisse abgedeckt ist.
- Eine Änderung der Baukosten durch Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes ist nicht zu erwarten.
- Für nichtlineare Berechnungen wird empfohlen, die Schnittgrößen mit charakteristischen Einwirkungen zu bestimmen und anschließend mit den zugehörigen Teilsicherheiten zu multiplizieren.
- Der Nachweis der Beschränkung der Rissbreite nach DIN-Fb 102 erscheint im Hinblick auf die Streuung der Berechnungsansätze und Ergebnisse recht aufwendig und suggeriert eine scheinbare, aber kaum vorhandene Genauigkeit. Es wird empfohlen, den Nachweis zu vereinfachen, z. B. mittels tabellarischer Zuordnung von Stabdurchmessern und Stahlspannungen.

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Richtlinien 836 und 853 in Verbindung mit den fachspezifischen Normen eine hinreichende und zweckmäßige Grundlage für die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau sind.

Literatur:

- [1] Deutsche Bahn AG: Richtlinie 836, Erdbauwerke und sonstige geotechnischen Bauwerke planen, bauen und instand halten, Stand September 2003
- [2] Deutsche Bahn AG: Richtlinie 853, Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, Stand September 2003
- [3] DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken, Beuth Verlag, März 2003
- [4] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken, Beuth Verlag, März 2003
- [5] Städing, A., Krockner, T.: Das Teilsicherheitskonzept im Tunnelbau, Musterberechnungen nach Ril 853 und Vergleich mit dem Globalsicherheitskonzept. November 2003
- [6] Duddeck, H. et al.: Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln in Lockergestein. Die Bautechnik, S. 349 – 356, 10/1980
- [7] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Heft 175, Betongelenke; Kritische Spannungszustände des Betons bei mehrachsiger, ruhender Kurzzeitbelastung. Verlag von Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin 1965