

# Kriterien für die Anwendung von unbe- wehrten Innenschalen für Straßentunnel

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 92

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a stylized, lowercase, green font with a white outline. The letters are bold and rounded, giving it a modern and professional appearance.

# **Kriterien für die Anwendung von unbe- wehrten Innenschalen für Straßentunnel**

von

Ingo Kaundinya

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 92

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/benutzung.php?la=de>

## **Impressum**

### **Bericht zum Forschungsprojekt AP F1100.2237022**

Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel

### **Herausgeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### **Druck und Verlag**

Fachverlag nw in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-004-5

Bergisch Gladbach, April 2013

## Kurzfassung – Abstract

### Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel

Die Innenschalen von Straßentunneln in geschlossener Bauweise werden in der Regel als Stahlbetonkonstruktion ausgeführt. Die Ausführung unbewehrter Tunnelinnenschalen kann für den Bauherrn eine erhebliche Kostenersparnis bedeuten, da die Kosten für die Bewehrung und deren Einbau eingespart werden. Unbewehrte Innenschalen für Straßentunnel in geschlossener Bauweise wurden in der Vergangenheit bei einzelnen Projekten in Deutschland bereits ausgeführt. Die Anforderungen an die bauliche Durchbildung und an die Gebrauchstauglichkeitseigenschaften wurden aufgrund fehlender Regelungen in den ZTV-ING objektspezifisch festgelegt. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführte Auswertung der Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen zeigt, dass viele der Tunnel eine hohe Anzahl von Rissen und Betonabplatzungen in den unbewehrten Bereichen aufweisen. Die hier erforderlichen nachträglichen Instandsetzungsmaßnahmen führen häufig zu hohen Kosten und Beeinträchtigungen der Tunnelverfügbarkeit. Als Fazit aus diesen Erfahrungen kann der Einsatz von unbewehrten Innenschalen nur in Ausnahmefällen bei vorliegenden besonders günstigen Randbedingungen empfohlen werden. Neben einer günstigen Geologie zählen hierzu noch weitere Parameter, die im vorliegenden Bericht ausführlich dargelegt werden. Zur Vermeidung vertragsrelevanter Probleme bei der Ausführung unbewehrter Innenschalen wird eine klare Festlegung der Gebrauchstauglichkeitseigenschaften der fertigen Tunnelinnenschale empfohlen. Bezüglich der zulässigen Rissweiten in unbewehrten Innenschalen wird die Anwendung der Vorgaben aus der Ril 853, Modul 853.4004 empfohlen.

In den ZTV-ING sollten für den Sonderfall einer unbewehrten Innenschale auch weiterhin keine speziellen Anforderungen festgelegt werden. Kriterien für die Anwendung unbewehrter Innenschalen wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes erarbeitet und sollten bei Bedarf den Straßenbauverwaltungen der Länder und den Planern zur Verfügung gestellt werden.

### Criteria for the application of unreinforced road tunnel linings

The inner linings of road tunnels build in conventional construction method (NATM tunnel) are regularly build as reinforced concrete constructions. Nevertheless the construction of unreinforced tunnel linings could result in a considerable benefit for the tunnel owner due to the saving of costs for reinforcement and its installation. Some tunnels in Germany had already been constructed with unreinforced tunnel linings. For these projects the requirements regarding structural design and serviceability were defined object specific due to missing requirements in the ZTV-ING. The analysis of experiences with unreinforced tunnel linings in German road tunnels done in this research report comes to the conclusion that many tunnel show considerable cracks and concrete spallings in the unreinforced built sections. The here required subsequent repair measures often lead to high costs and negative impacts on the tunnel availability. Based on these experiences the application of unreinforced tunnel linings could only be recommended in exceptional cases with very favourable boundary conditions. Apart from favourable geological conditions there are other important parameters which are described in detail in this report. In order to avoid contractual problems it is recommended to clearly describe the serviceability properties of the completed tunnel lining in the tender documents. Concerning allowable crack width the application of the specifications defined in the Ril 853 modul 853.4004 is recommended.

For the special case of unreinforced tunnel linings no additional requirements should be included in future versions of the ZTV-ING. Criteria for the application of unreinforced tunnel linings have been worked out in this research report and should be made available to road operators in the Federal States („Länder“) and design engineers.



## Inhalt

<b>1 J Einleitung</b> .....	7 W	<b>3.4 W Vergleich des Zustandes bewehrt und unbewehrt ausgeführter Tunnelinnenschalen</b> .....	28 W
1.1 W Allgemeines .....	7 W		
1.2 W Problemstellung .....	7 W		
1.3 W Zielsetzung .....	7 W	<b>3.5 Beurteilung der Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen bei deutschen Straßentunneln</b> .....	29 W
1.4 W Vorgehensweise .....	7 W		
<b>2 J Grundsätzliches zu unbewehrten Innenschalen</b> .....	8 W	<b>4 J Schlussfolgerungen für das Regelwerk</b> .....	30 W
		4.1 W Anwendung von unbewehrten Innenschalen .....	30 W
<b>3 J Analyse der bisherigen Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen</b> .....	9 W	4.2 W Rissvermeidung .....	30 W
3.1 W Vorschriftenlage .....	9 W	4.3 W Rissbehandlung .....	31 W
3.1.1 ZTV-ING .....	9 W	4.4 W Regelungen in den ZTV-ING .....	31 W
3.1.2 Deutsche Bahn .....	9 W		
3.1.3 Empfehlungen des DAUB .....	10 W	<b>5 J Zusammenfassung und Empfehlungen</b> .....	31 W
3.1.4 RI-EBW-PRÜF .....	11 W		
3.1.5 Österreichische Vorschriften .....	12 W	<b>6 J Literatur</b> .....	32 W
3.1.6 Schweizer Vorschriften .....	12 W		
3.2 W Bisherige Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen bei deutschen Straßentunneln .....	12 W	<b>Anhang:</b> Der Anhang befindet sich auf der dem Bericht beigefügten CD. Detaillierte Auswertung für deutsche Straßentunnel mit unbewehrter Innenschale	
3.2.1 Tunnel Rennsteig (BAB A 71) .....	13 W		
3.2.2 Tunnel Hochwald (BAB A 71) .....	17 W	Der Anhang befindet sich auf der dem Bericht beigefügten CD.	
3.2.3 Grenztunnel Füssen .....	20 W		
3.2.4 Kohlbergtunnel .....	22 W		
3.2.5 Tunnel Königshainer Berge .....	22 W		
3.2.6 Tunnel Schwarzer Berg .....	24 W		
3.3 W Detaillierte Analyse und Bewertung des Zustandes von unbewehrten Innenschalen .....	25 W		
3.3.1 Risse .....	26 W		
3.3.2 Abplatzungen .....	28 W		
3.3.3 Wasserzutritte .....	28 W		



# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Innenschalen von Straßentunneln in geschlossener Bauweise werden im Regelfall als bewehrte Stahlbetonkonstruktion ausgeführt. Bei besonders günstigen geologischen Bedingungen wurden in der Vergangenheit in Deutschland auch unbewehrte Innenschalen bei Straßentunneln ausgeführt. Dabei wurden je nach Projekt nur einige Regelblöcke bis hin zum gesamten Tunnel als unbewehrte Konstruktion ausgeführt. Portalblöcke und Blöcke mit Querschnittsänderungen bzw. Querschnittsver-schneidungen werden meist, aufgrund der auftretenden Zwangsschnittgrößen, bewehrt ausgeführt. Durch die unbewehrte Bauweise kann der Bauherr erhebliche Kosten bei der Herstellung der Tunnelinnenschale einsparen.

Im europäischen Ausland (vor allem Österreich und der Schweiz) werden unbewehrte Innenschalen sehr viel häufiger als in Deutschland ausgeführt. Zu begründen ist dies vor allem durch die in der Regel sehr günstigen Gebirgsverhältnisse in diesen Ländern.

Die Deutsche Bahn AG hat in der Vergangenheit viele Tunnel mit unbewehrter Innenschale gebaut. Aufgrund vieler Schadensfälle wird seit einigen Jahren nur noch eine bewehrte Ausführung von Tunnelinnenschalen zugelassen.

In Deutschland ausgeführte Straßentunnel mit unbewehrter Innenschale werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes hinsichtlich der Erfahrungen und aufgetretenen Risse sowie Betonabplatzungen analysiert und bewertet.

Die Betrachtung von Kosten, insbesondere von Lebenszykluskosten, für Tunnel mit unbewehrten Innenschalen ist nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes.

## 1.2 Problemstellung

Unbewehrte Innenschalen für Straßentunnel in geschlossener Bauweise wurden in der Vergangenheit bei einzelnen Projekten (z. B. Rennsteigtunnel, Tunnel Schwarzer Berg) bereits ausgeführt. Die Ausführung unbewehrter Innenschalen beschränkt sich dabei auf Baumaßnahmen, bei denen besonders günstige geologische Randbedingungen vorliegen. Die Anforderungen an die bauliche Durchbildung und an die Gebrauchstauglichkeitseigen-

schaften werden objektspezifisch festgelegt. Aktuelle Erfahrungen zeigen, dass dies nur teilweise und unzureichend erfolgt ist und zu vertragsrelevanten Problemen führt. Dies betrifft insbesondere Fragen der Gebrauchstauglichkeit wie z. B. die für unbewehrte Innenschalen zulässigen Rissweiten und Rissbilder im Endzustand.

## 1.3 Zielsetzung

In den ZTV-ING sind für den Sonderfall einer unbewehrten Innenschale z. Zt. keine speziellen Anforderungen festgelegt. Ziel des Projektes ist es daher, Kriterien für die Anwendung unbewehrter Innenschalen als Grundlage für die Fortschreibung der ZTV-ING zu erarbeiten. Die Ausführung unbewehrter Innenschalen kann für den Bauherrn eine erhebliche Kostenersparnis bedeuten, da die Kosten für die Bewehrung und deren Einbau eingespart werden. Weiterhin ergeben sich durch die fehlende Bewehrung auch systembedingte Vorteile wie etwa eine geringere Beschädigungsgefahr für die bergseitige Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sollen in die Fortschreibung der einschlägigen Vorschriften (ZTV-ING) einfließen und bei der Planung und Ausführung zukünftiger Straßentunnel mit unbewehrten Innenschalen berücksichtigt werden.

## 1.4 Vorgehensweise

Im vorliegenden Forschungsbericht werden die Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen bei deutschen Straßentunneln anhand vorliegender Prüfberichte von Haupt- und Zwischenprüfungen recherchiert und analysiert. Die auftretenden Rissbilder und Betonabplatzungen werden beschrieben und denen von bewehrten Innenschalen gegenübergestellt. Abschließend werden Empfehlungen für die weitere Anwendung unbewehrter Innenschalen bei zukünftigen Projekten sowie für die Fortschreibung des Regelwerks gegeben. Schwerpunkt ist die Definition zulässiger Rissweiten bei unbewehrten Innenschalen.

Im Einzelnen wurden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt:

- Auswertung bestehender Regelwerke (ZTV-ING, Ril 853) und Empfehlungen (z. B. des DAUB) sowie entsprechender Fachliteratur,



- Liste nationaler Tunnelprojekte, bei denen unbewehrte Innenschalen ausgeführt wurden,
- Zusammenstellung und Auswertung der Randbedingungen und Erfahrungen von 6 Straßentunneln mit unbewehrter Innenschale,
- detaillierte Auswertung der ersten und zweiten Hauptprüfung der Tunnel Rennsteig und Hochwald bzgl. Rissbilder und Betonabplatzungen und deren zeitlicher Entwicklung an den unbewehrten Tunnelblöcken,
- Identifizierung der maßgebenden Risstypen von unbewehrten Innenschalen,
- exemplarischer Vergleich der Häufigkeit von Rissen, Betonabplatzungen sowie Feuchtstellen bewehrter und unbewehrt ausgeführter Tunnelblöcke bei 2 deutschen Tunnelprojekten,
- Zusammenstellung und Beschreibung der speziellen Anforderungen für den Einsatz von unbewehrten Innenschalen in Straßentunneln,
- Erarbeitung von Vor- und Nachteilen unbewehrter Innenschalen und Definition möglicher Einsatzbereiche und Grenzen,
- Erarbeitung von Empfehlungen für die Fortschreibung der ZTV-ING bzgl. Anforderungen an unbewehrte Innenschalen.

## 2 Grundsätzliches zu unbewehrten Innenschalen

Bei unbewehrten Innenschalen wird bei der Herstellung der Innenschale auf jegliche Stahlarmierung, sei es in Form von Stabstahl, Mattenstahl oder auch Stahlfasern, verzichtet. Die zum Einsatz kommende Betonrezeptur unterscheidet sich dabei meist nur unwesentlich von der Rezeptur für bewehrte Betoninnenschalen. Auch für unbewehrte Innenschalen müssen bei deutschen Straßentunneln die Anforderungen an den Beton gemäß ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 1 eingehalten werden. Dies gilt auch für die Expositionsklassen. Häufig werden einzelne Tunnelblöcke auch nur teilweise unbewehrt ausgeführt. So wird in lokal höher beanspruchten Bereichen bzw. besonders für Betonabplatzungen gefährdeten Bereichen eine konstruktive oder auch lokal statisch erforderliche Bewehrung eingelegt. Beispiele hierfür sind die Bereiche der Blockfuge, Nischen oder auch Befestigungen

von Tunneleinbauten (z. B. Ventilatoraufhängungen). Auch bei Tunneln, die überwiegend in unbewehrter Bauweise ausgeführt wurden, verbleiben meist viele Blöcke, die trotzdem bewehrt ausgeführt werden müssen. Dies betrifft insbesondere Portalblöcke und Blöcke mit Querschnittsänderungen (z. B. Querschlaganschlüsse, Aufweitungen, Pannenbuchten etc.). Bei diesen Blöcken ist eine Betonstahl-Bewehrung aus statischen Gründen erforderlich.

Unbewehrte Tunnelinnenschalen können grundsätzlich die folgenden Vorteile gegenüber der bewehrten Regellösung bieten:

Wichtigstes Argument für die Ausführung unbewehrter Innenschalen ist der wirtschaftliche Vorteil durch den Entfall der Bewehrung und aller damit zusammenhängenden Arbeiten. Hierbei spielen vor allem die eingesparten Materialkosten, aber auch der beschleunigte Bauablauf eine Rolle.

Weitere Vorteile unbewehrter Innenschalen ergeben sich systembedingt durch die Verringerung einiger Risiken, die bei bewehrten Tunnelinnenschalen auftreten können:

- keine Gefahr der Beschädigung der Abdichtung durch die bergseitige Bewehrung,
- keine zusätzlichen Maßnahmen für den baulichen Brandschutz erforderlich (Beton ist weniger temperaturempfindlich als Stahl),
- keine Korrosion der Bewehrung mit nachfolgenden Betonabplatzungen,
- keine Betonminderdeckung.

Die folgenden Nachteile unbewehrter Tunnelinnenschalen können angeführt werden [Daub07] [Spring97]:

- geringere Tragfähigkeit,
- empfindlich für Biegebeanspruchung der Schale durch asymmetrische Belastungen,
- größere Anzahl von Rissen, oft mit großen Rissweiten ( $> 2,0$  mm),
- Gefährdung der Abdichtung durch Abplatzungen und scharfe Risskanten am bergseitigen Ende von Längsrissen,
- Beeinträchtigung der Haltbarkeit von Beschichtungen und Anstrichen durch auftretende Risse,

- Herausfallen von Betonstücken, die durch Längs- und Radialrisse von der übrigen Innenschale abgetrennt worden sind.

Risse in unbewehrten Innenschalen führen häufig zu umfangreichen Rissverpress-Kampagnen nach Fertigstellung des Tunnels. Die Kostenübernahme für die Rissbehandlung bei unbewehrten Innenschalen ist dabei häufig Anlass für Streitigkeiten zwischen Bauherr und Auftragnehmer. Risse in unbewehrten Innenschalen sind dabei nicht von vorneherein als „Mangel“ oder „Schaden“ anzusehen, da keine Korrosionsgefahr für die Bewehrung besteht. Risse bei unbewehrten Innenschalen sind z. T. systembedingt und oft nicht vermeidbar. Aus diesen Gründen ist es sehr wichtig, bereits im Bauvertrag eindeutige Regelungen für zulässige Rissweiten und die Behandlung von Rissen festzulegen.

Auf Risse in unbewehrten Innenschalen wird im folgenden Kapitel detailliert eingegangen.

### 3 Analyse der bisherigen Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen

In den folgenden Kapiteln wird der bisherige Kenntnisstand zu unbewehrten Innenschalen im Tunnelbau in Deutschland und im europäischen Ausland zusammengestellt. Dabei wird insbesondere auf die Vorschriftenlage in Deutschland und in Österreich eingegangen sowie bisherige Erfahrungen bei deutschen Straßentunneln analysiert und bewertet.

#### 3.1 Vorschriftenlage

##### 3.1.1 ZTV-ING

In Deutschland gibt es zurzeit keine speziellen Vorschriften für unbewehrte Innenschalen von Straßentunneln. Die Anforderungen an die Ausbildung der Innenschale für die Tunnelkonstruktion sind für Straßentunnel in Deutschland in den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)“ [ZTV-07] geregelt. Anforderungen für die Anwendung unbewehrter Innenschalen sind dort zurzeit noch nicht definiert. Gemäß ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1, Nr. 7.1 (1) ist „die Innenschale in der Regel bewehrt auszuführen“. Die Regelungen in den ZTV-ING beziehen sich demnach ausschließlich auf den Fall einer

Stahlbetoninnenschale. Bei Ausführung von unbewehrten Tunnelinnenschalen ist aktuell, wie auch schon in der Vergangenheit, eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Bezüglich der Betonrezeptur sind auch bei unbewehrter Ausführung der Innenschale die Anforderungen gemäß ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 1 zu erfüllen.

Bezüglich des baulichen Brandschutzes sind bei unbewehrten Innenschalen keine besonderen Nachweise erforderlich, sofern die Mindestschalendicke von 35 cm eingehalten wird.

Unbewehrte Innenschalen können nur mit einer Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) ausgeführt werden. Eine WUB-KO ist aufgrund der erforderlichen Begrenzung der Rissbreite nur bewehrt herstellbar.

#### Regelbauweise

Regelbauweise gemäß ZTV-ING Teil 5 ist in der geschlossenen Bauweise (Spritzbetonbauweise) eine 2-schalige Konstruktion, bestehend aus Spritzbeton-Außenschale und Ort beton-Innenschale (bewehrt) mit dazwischenliegender Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen (Bild 1).

##### 3.1.2 Deutsche Bahn

Die Anforderungen an die Ausbildung von Tunnelinnenschalen für deutsche Eisenbahntunnel sind in der Richtlinie 853 der DB Netz AG [Bahn07] im Modul 4001 und 4004 geregelt. In Modul 853.4001 „Allgemeine Grundsätze für Vortrieb, Sicherung und Ausbau“ wird festgelegt, dass der endgültige Ausbau von Eisenbahntunneln aus bewehrtem Ort beton oder Tübbings aus Stahlbeton herzustellen ist [Bahn11]. Unbewehrte Tunnelinnenschalen sind

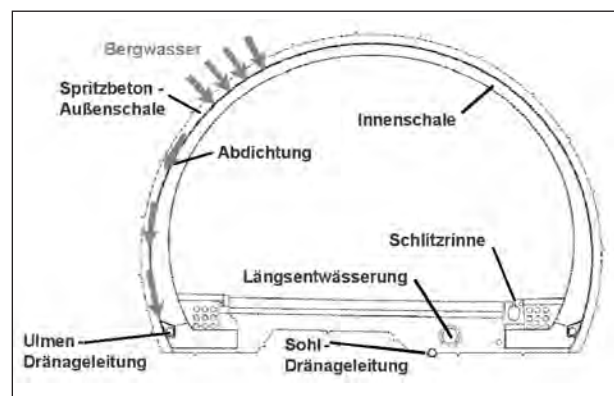


Bild 1: Regelbauweise gemäß ZTV-ING für Tunnel in geschlossener Bauweise

danach nach der aktuell gültigen Bahn-Richtlinie generell nicht mehr zugelassen. Eine Ausnahme bilden Nebenanlagen (wie z. B. Notausgänge), die nicht von Zügen befahren werden. Im Leitfaden zur Richtlinie 853 wird zu Modul 4001 eine Begründung für den Ausschluss von unbewehrten Tunnelinnenschalen für Bahntunnel angegeben: Durch den Lastfall Eigengewicht, Staudruck aus dem Zugverkehr und Einwirkungen aus Temperatur und Schwinden kam es in der Vergangenheit zu starken Rissbildungen bei Eisenbahntunneln. Als Beispiel werden die Tunnelbauwerke auf der Schnellfahrstrecke Hannover – Würzburg angeführt. Die Risse traten dabei erst nach Inbetriebnahme auf. Bei den Rissen handelt es sich dabei überwiegend um Firstlängsrisse, vielfach mit Versatz. Hinzu kamen viele halbmondförmige Risse an den Blockfugen. Die Risse mussten aufwändig verpresst werden. Als maßgebende Ursache für die starken Rissbildungen wird seitens der Bahn der Einfluss des Zugverkehrs (erhöhter Temperatureaustausch, Erschütterungen, Staudruck) angesehen [Bahn11].

Im Modul 4004 „Ausbau mit Ort beton“ der Richtlinie 853 [Bahn07] werden besondere Güteanforderungen an unbewehrten Ort beton für den Ausbau definiert. Hierbei handelt es sich um Vorgaben zur Rissverpressung für bestimmte Risstypen (Bild 2), die in Tabelle 1 in übersichtlicher Form zusammengestellt wurden.

Im Leitfaden zur Ril 853 [Bahn11] werden die Erfordernisse der Rissverpressung für die einzelnen Risstypen folgendermaßen erläutert:

„Radialrisse (Typ I, vgl. Bild 2) wirken statisch wie zusätzliche Blockfugen. Eine Rissbehandlung aus Gründen der Standsicherheit ist nicht erforderlich.

Firstlängsrisse (Typ II, vgl. Bild 2) bedeuten statisch eine zusätzliche Gelenkbildung. Der aus reiner Gelenkdrehung resultierende rechnerisch ermittelte Primärrissbreitenanteil ist nach den durchgeführten Modellstudien bis 1,2 mm Breite als unkritisch einzustufen. Dieses Maß erhöht sich durch Kriechen. Bei größeren Rissbreiten können u. U. einzelne dünne Betonteile im Sekundärbereich (Druckzonenbereich) bis zu einer Selbststabilisierung ausbrechen.

Die Angaben der zulässigen Rissbreiten (vgl. Tabelle 1) bedeuten nicht, dass breitere Risse in jedem Fall gefährlich sein müssen. Risse mit Versatz bedürfen in jedem Falle einer besonderen Aufmerksamkeit“

Typ nach Ril	Risstyp	Grenzwert für Rissbreiten, ab der verpresst werden muss
Typ I	Linienförmige (nicht verzweigte) Radialrisse	> 2,0 mm
Typ II	Linienförmige (nicht verzweigte) Firstlängsrisse	> 1,5 mm
Typ III	Unregelmäßige Risse	> 1,5 mm
Typ IV	Ulmenlängsrisse	> 1,5 mm
	Halbmondförmige Risse im Bereich der Blockfugen und Ankerschienen	immer
	Risse mit Rissuferversätzen > 0,5 mm	immer

Tab. 1: Risstypen und Grenzwerte für Rissbreiten nach Ril 853 [Bahn07]

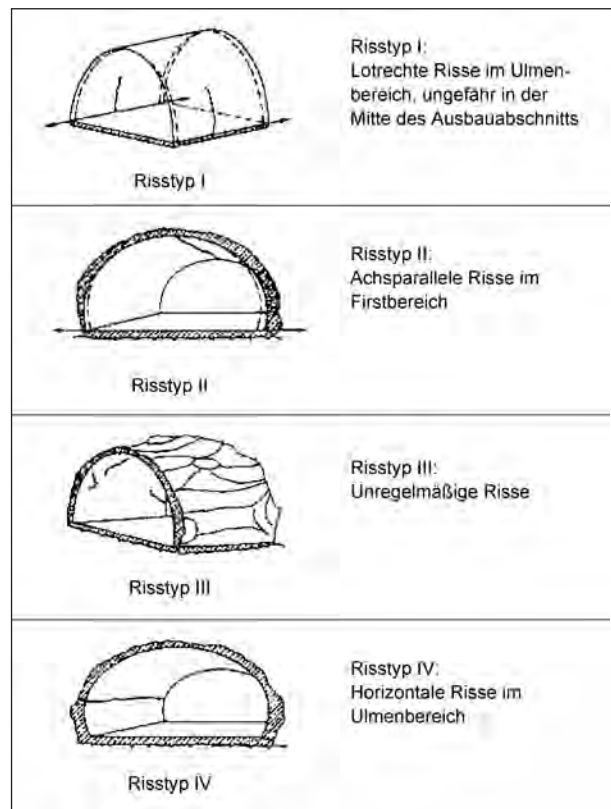


Bild 2: Risstypen nach Ril 853 [Bahn07]

### 3.1.3 Empfehlungen des DAUB

Der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis „Unbewehrte Tunnelinnenschalen“ hat in 2007 „Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen“ veröffentlicht [Daub07]. Hier werden Einsatzmöglichkeiten und Grenzen unbewehrter Innenschalen in einem 5-seitigen Papier dargestellt. Dabei wird auf Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnach-

weise eingegangen und Hinweise zu Konstruktion, Betonrezeptur, Nachbehandlung und Bewertung und Behandlung von Rissen gegeben. Viele der im Papier enthaltenen Empfehlungen zu unbewehrten Innenschalen bleiben leider sehr allgemein und unkonkret. So werden z. B. für den Einsatzbereich keine Grenzwerte für Gebirgskennwerte o. Ä. genannt. Wichtigste Empfehlungen sind:

- Unbewehrte Innenschalen sollten nur angewendet werden, wenn Risse und die Zerlegung der Innenschale in Teilstücke (infolge durchgehender Risse) sowie kleinere Betonabplatzungen keinen Nachteil für die Nutzung des Tunnels darstellen.
- Sonderbereiche bzw. -blöcke wie z. B. Pannbuchten, Aufweitungen, Querschlaganschlüsse etc. sollten nicht unbewehrt ausgeführt werden.
- Blockfugen sind besonders rissgefährdete Bereiche bei unbewehrten Innenschalen und daher so auszubilden, dass Bewegungen benachbarter Blöcke möglich sind (z. B. Trennanstrich der Fugenflanken vorsehen). Ggf. sind Raumbfugen auszubilden. Die luftseitige Fuge ist mit einer Trapezleiste herzustellen.
- Bei der Betonrezeptur wird die Verwendung von Flugasche in den nach ZTV-ING vorgegebenen Grenzen auch für unbewehrte Innenschalen empfohlen.
- Für einen geraden Rissverlauf des sehr häufig bei unbewehrten Innenschalen auftretenden Längsrisses in der Firste wird das Einlegen einer Dreiecks- oder Trapezleiste auf dem Scheitel des Schalwagens empfohlen. Die so entstehende Scheinfuge verbessert die Kinematik des entstehenden Betongelenkes.
- Zur Rissbehandlung wird die Anwendung der Vorgaben aus der Ril 853, Modul 4004 empfohlen (siehe Kapitel 3.1.2).
- Die Rissbehandlung (Verpressung) sollte möglichst erst dann durchgeführt werden, wenn sich das Rissbild nicht mehr wesentlich verändert.
- Veränderungen im Rissbild sollten systematisch gemessen und dokumentiert werden.
- Zur Rissverpressung wird die Verwendung von Harzen empfohlen, die eine hohe Festigkeit und Steifigkeit entwickeln. Die Anwendung der ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 5 wird empfohlen.

### 3.1.4 RI-EBW-PRÜF

Gemäß der „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)“ [PRÜF07] können Feuchtstellen, Risse und Abplatzungen in Straßentunneln die Dauerhaftigkeit (D) und unter Umständen auch die Standsicherheit (S) und Verkehrssicherheit (V) einer unbewehrten Tunnelinnenschale beeinträchtigen. In der Richtlinie werden beispielhaft Grenzwerte für Rissweiten angegeben, bei denen für gewöhnlich von einer Beeinträchtigung der Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit und/oder Dauerhaftigkeit und damit auch von einem Schaden/Mangel auszugehen ist.

Die Grenzwerte für Rissweiten von Radialrissen und Längsrissen für eine Bewertung als mittelfristig zu behebbender Schaden (D = 2) entsprechen denen der Ril 853 (vgl. Tabelle 1). Für durchgehende Firstlängsrisse wird allerdings zusätzlich auch eine Beeinträchtigung der Standsicherheit der Innenschale gesehen (S = 1-2, D = 2-3). Bei wasserführenden Rissen wurde der Grenzwert für einen mittelfristig zu behebbenden Schaden (D = 2) auf Rissweiten  $\geq 1,0$  mm herabgesetzt.

Für halbmondförmige Risse wird aufgrund der Möglichkeit herausbrechender Betonstücke zusätzlich auch eine Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit gesehen (Rissweite  $\leq 0,5$  mm: V = 1, D = 2, Rissweite  $> 0,5$  mm: V = 2, D = 2).

Bei Betonabplatzungen wird in Abhängigkeit von der Größe von einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit ausgegangen (V = 1-3, D = 1). Grenzwerte für die Bewertung in Abhängigkeit von der Größe sind nicht angegeben.

Für Durchfeuchtungen bzw. Aussinterungen werden keine Grenzwerte angegeben. Sie sind gemäß RI-EBW-PRÜF immer als Mangel bzgl. Dauerhaftigkeit (D = 1-2) zu bewerten.

Durch die Anwendung der RI-EBW-PRÜF und der darin enthaltenen Schadensbeispiele werden bei der Bauwerksprüfung alle Risse, Betonabplatzungen und Feuchtstellen, unabhängig von ihrer Größe, in jedem Fall als Schaden erfasst. Auch bei kleinen Rissen in unbewehrten Innenschalen wird immer eine Bewertung D = 1 vorgenommen. Dies ist bezüglich unbewehrter Innenschalen nicht nachvollziehbar, da wie in Kapitel 2 erläutert und auch gemäß anderen Regelwerken und in der Literatur

[Bahn07, Daub07], hier nicht von einem Schaden gesprochen werden kann. Insbesondere die Einschätzung, dass durchgehende Firstlängsrisse zu einem Standsicherheitsproblem bei unbewehrten Innenschalen führen können, wird in der Literatur eindeutig verneint (vgl. Kapitel 3.3 und 3.5).

### 3.1.5 Österreichische Vorschriften

In der ÖVBB-Richtlinie RVS 9.34 „Innenschalenbeton“ [RVS04] sind die Anforderungen an Innenschalenbeton (Herstellung, Einbau, Nachbehandlung) und konstruktive Mindestanforderungen an Tunnelinnenschalen zusammengestellt. Die Anforderungen an Innenschalen gelten sowohl für bewehrte als auch für unbewehrte Innenschalen. Als konstruktive Mindestanforderungen an unbewehrte Innenschalen wird eine Mindestschalendicke von 20 cm (ohne Abdichtung) bzw. 25 cm (mit Abdichtung) vorgeschrieben. Es wird eine Trennschicht zwischen Innen- und Außenschale empfohlen, falls keine Abdichtung vorhanden ist. Die Blockfugen sollen als Pressfugen ausgebildet werden. Bei unbewehrten Innenschalen kann ein Verpressen von Rissen entfallen, wenn der Nachweis der Unbedenklichkeit erbracht wird. Weitere detailliertere Vorgaben zu zulässigen Rissbreiten etc. sind in der Richtlinie nicht enthalten.

### 3.1.6 Schweizer Vorschriften

Nach der Schweizer Norm SIA 197/2 „Projektierung Tunnel – Straßentunnel“ [SIA 204] sind Tunnelinnenschalen wenn möglich immer unbewehrt auszuführen. Die Innenschale muss eine Mindestdicke von 30 cm aufweisen. Nach der zugehörigen Grundlagennorm SIA 197 „Projektierung Tunnel – Grundlagen“ [SIA 104] ist für den Nachweis der Tragfähigkeit der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit  $f_{cd}$  um 20 % abzumindern. Weitere detailliertere Vorgaben z. B. zu zulässigen Rissbreiten bei unbewehrten Innenschalen etc. sind auch in der Schweizer Norm nicht enthalten.

## 3.2 Bisherige Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen bei deutschen Straßentunneln

Im Folgenden sind alle deutschen Straßentunnel im Bereich der Bundesfernstraßen zusammengestellt, bei denen unbewehrte Innenschalen zur Ausführung kamen (Tabelle 2). Die Anzahl unbewehrter Blöcke sowie die Anzahl der Blöcke mit Rissen, Abplatzungen sowie Wasserzutritten geben einen ersten Überblick über den Zustand der Tunnelinnenschalen. Als vorläufiger Grenzwert für die Erfassung von Rissen wurde hier eine Rissweite von größer 0,3 mm ge-

Nr.	Straße	Name	Anzahl Tunnelröhren	Gesamtlänge aller Röhren in m	Länge unbewehrt in m	unbewehrt %	Baujahr	letzte HP	Innenschalendicke in cm	Anzahl unbew. Blöcke	Anzahl unbew. Blöcke mit Rissen, Abplatzungen, Feuchtstellen
1	A 71	Rennsteigtunnel	2	15.794	6.840	43	2003	09.01.2008	30-40	570	380
2	A 71	Hochwaldtunnel	2	2.112	1.236	59	2001	12.01.2006	30	103	103
3	A 7	Grenztunnel Füssen	1	1.285	908	71	1999	29.04.2010	25	77	76
4	A 96	Kohlbergtunnel	2	1.256	990	79	1992	19.10.2009	40-50	99	60
5	A 4	Tunnel Königshainer Berge	2	6.676	5.200	78	1999	25.02.2004	30-60	520	475
6	A 70	Tunnel Schwarzer Berg	Alt	738	610	83	1986	27.06.2005	30	122	122
			Neu	722	690	96	2004	09.10.2009	40	69	67
7	B 294	Reutherbergtunnel	1	1.270	100	8	1992	31.03.2006	k. A.	10	10
8	A 861	Tunnel Nollinger Berg	Ost	1.236	490	40	2000	17.11.2005	40-60	49	k. A.
			West	1.260	400	32	2005	28.07.2010	40-60	40	31
9	A 8	Lämmerbuckel	1	624	624	100	1940	12.07.2010	k. A.	k. A.	k. A.
10	A 81	Schönbuchtunnel	2	1.246	1.156	93	1979	09.07.2009	k. A.	k. A.	k. A.
11	B 21	Wendelbergtunnel	1	483	397	82	1987	12.05.2009	25-40	k. A.	k. A.
<b>Summe</b>				<b>34.702</b>	<b>19.641</b>					<b>1.659</b>	<b>1.324</b>
k. A. = keine Angaben vorhanden											

Tab. 2: Übersicht deutsche Straßentunnel mit unbewehrter Innenschale

wählt, da ab dieser Rissweite bei bewehrten Innenschalen eine Verpressung gemäß Ril 853, Modul 4004 sowie häufig auch bei Straßentunneln bauvertraglich gefordert wird. Dies ist im Hinblick auf den späteren Vergleich mit bewehrten Innenschalen wichtig. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die hier erfassten Risse und Abplatzungen nicht automatisch mit einem „Schaden“ oder „Mangel“ gleichzusetzen sind (siehe Kapitel 2 und 3.3) obwohl sie bei der Bauwerksprüfung gemäß RI-EBW-PRÜF [PRÜF07] als solcher erfasst werden (siehe Kapitel 3.1.4). Daher wird in diesem Bericht allgemein von „Auffälligkeiten“ oder „Typen von Auffälligkeiten“ gesprochen. Gemeint sind damit alle festgestellten Risse, Abplatzungen, Feuchtstellen etc. unabhängig von deren Größe.

Im Folgenden werden für 6 Tunnel mit vorliegender guter Datenbasis der Zustand und die aufgetretenen Rissbilder bzw. Abplatzungen und deren zeitliche Entwicklung kurz beschrieben. Die für die Untersuchungen verwendete Datengrundlage für die einzelnen Bauwerke ist in Tabelle 3 zusammengestellt. Bauwerksbücher und Prüfberichte wurden

aus SIB-Bauwerke verwendet. Für die Tunnel Rennsteig und Hochwald lagen umfangreiche Untersuchungen zum Rissbild vor, die seitens des Tunnelbetreibers zur Verfügung gestellt wurden. Hier wurden für die Dokumentation und Analyse des Rissbildes durch ein externes Ingenieurbüro auch Laser-Scan-Aufnahmen (Spacetec-Tunnel-scanner) ausgewertet. Die Tabellen mit detaillierten Auswertungen je Tunnelblock sind im Anhang 1 zusammengestellt.

Die detaillierte Analyse und Klassifizierung der aufgetretenen Risse und Abplatzungen an unbewehrten Innenschalen ist in Kapitel 3.3 zusammengestellt.

### 3.2.1 Tunnel Rennsteig (BAB A 71)

Der im Jahr 2003 fertig gestellte Tunnel Rennsteig liegt im Zuge der BAB A 71 zwischen Erfurt und Schweinfurt in der Nähe von Oberhof.

Er besteht aus einer Oströhre mit 660 Blöcken und einer Weströhre mit 662 Blöcken, von denen je-

Nr.	Straße	Name	Bauwerksbuch Stand (Datum)	Prüfberichte HP	Prüfberichte EP	sonstige Unterlagen
1	A 71	Rennsteigtunnel	17.03.2011	10.07.2003 09.02.2008	-	Schadenaufstellung Ing.-Büro Probst Mai 2003 (1. HP) und Dez. 2007 (2. HP)
2	A 71	Hochwaldtunnel	17.03.2011	10.07.2003 09.02.2008	-	Schadenaufstellung Ing.-Büro Probst Aug. 2001 (1. HP) und Dez. 2005 (2. HP)
3	A 7	Grenztunnel Füssen	17.03.2011	28.04.2004 29.04.2010	-	-
4	A 96	Kohlbergtunnel	17.03.2011	13.07.2009 (N)* 19.14.209 (S)*	13.11.2006*	-
5	A 4	Tunnel Königshainer Berge	17.03.2011	20.09.2002 25.02.2004	-	-
6	A 70	Tunnel Schwarzer Berg	17.03.2011	27.06.2005	05.09.2008(N)*	-
			17.03.2011	09.10..2009	-	-
7	B 294	Reutherbergtunnel	17.03.2011			
8	A 861	Tunnel Nollinger Berg	17.03.2011			
			17.03.2011			
9	A 8	Lämmerbuckel	17.03.2011			
10	A 81	Schönbuchtunnel	17.03.2011			
11	B 21	Wendelbergtunnel	17.03.2011			

\* keine separaten Prüfberichte. Prüfung/Zustand aus Bauwerksbuch übernommen

Tab. 3: Datengrundlage für die Untersuchungen

weils 43 % komplett unbewehrt, 25 % teilbewehrt (z. B. Bereiche der Ventilatoraufhängungen und Nischen) und 32 % bewehrt ausgeführt wurden. Die Länge der Oströhre beträgt 7.878,02 m, die der



Bild 3: Portal Tunnel Rennsteig

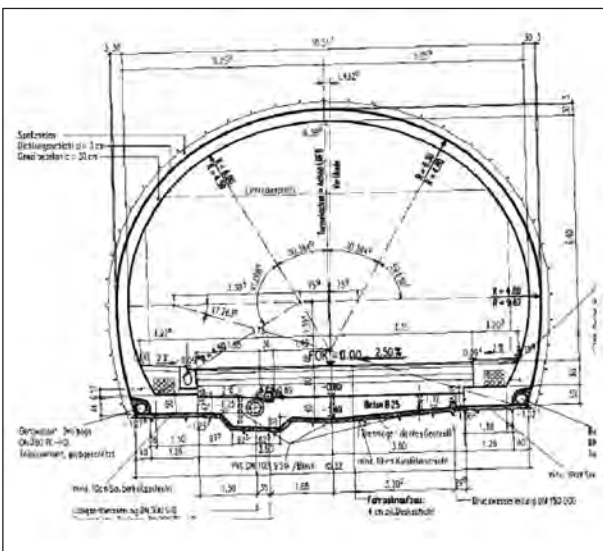


Bild 4: Regelquerschnitt unbewehrt mit Sohlplatte

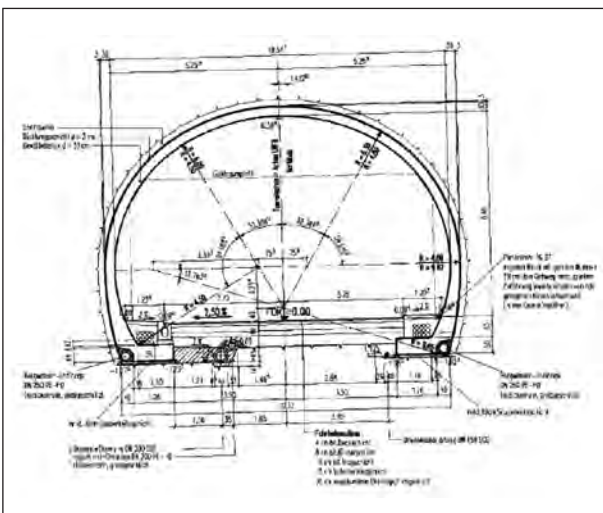


Bild 5: Regelquerschnitt unbewehrt mit offener Sohle

Weströhre 7.916,00 m. Die Innenschalendicke der unbewehrten Blöcke liegt bei 30 cm, wobei bei den unbewehrten Blöcken zwei unterschiedliche Regelquerschnitte verwendet wurden: zum einen ein Regelquerschnitt mit Sohlplatte (Bild 4) und zum anderen ein Regelquerschnitt mit offener Sohle (Bild 5).

Die erste Hauptprüfung (1. HP) ist im Mai 2003 durchgeführt worden. Es wurde eine Zustandsnote von 2,0 festgestellt. Dabei lag der Anteil der Blöcke ohne Risse (> 0,3 mm), Abplatzungen oder Feuchstellen bei ungefähr 30 %. Die zweite Hauptprüfung (2. HP) wurde dann im Dezember 2007 durchgeführt. Es wurde eine Zustandsnote von 2,7 bzw. 2,5 ermittelt, wobei alle unbewehrten Blöcke Risse aufwiesen: Oströhre: i. M. 8-9 Risse/Abplatzungen je Block, Weströhre: i. M. 9-10 Risse/Abplatzungen je Block.

Im Folgenden wird die Veränderung des Rissbildes und der Abplatzungen von 2003 bis 2007 getrennt nach Ost- und Weströhre detailliert dargestellt. Dabei wird vor allem auf die unterschiedlichen Risstypen eingegangen.

**Oströhre**

Die Analyse der ersten und zweiten Hauptprüfung ergab, dass sowohl in der Oströhre als auch in der Weströhre neben Rissen Abplatzungen am häufigsten festgestellt wurden. Feuchstellen spielten nur eine untergeordnete Rolle. Die Verteilung der verschiedenen Typen von Auffälligkeiten hat sich von der 1. zur 2. HP verändert, da eine starke Zunahme der Risse festgestellt wurde (vgl. Bild 6, Bild 7).

Bei der Oströhre ist klar zu erkennen, dass der größte Anteil an Rissen bei der 1. HP durch Netz-

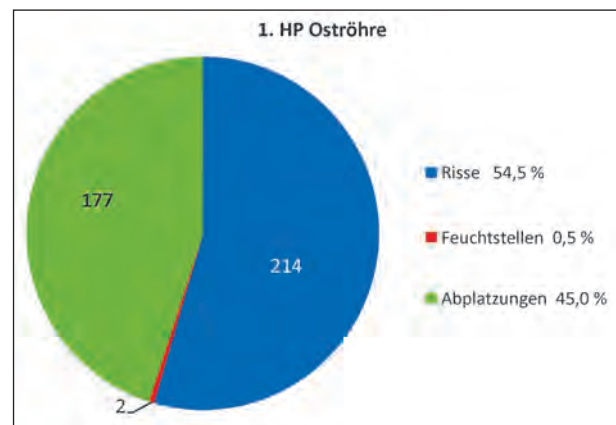


Bild 6: Verteilung der Auffälligkeiten Oströhre, 1. HP

risse gekennzeichnet ist. Darauf folgen die Firstlängsrisse, die Radialrisse und die halbmondförmigen Risse. Nur Ulmenrisse sowie sonstige Risse sind kaum vorhanden (Bild 8).

Die Firstlängsrisse haben sich um 90 % von der ersten bis zur zweiten HP vermehrt. Aber auch die Anzahl der Radialrisse und der Netzrisse ist sehr stark angestiegen. Die Anzahl halbmondförmiger Risse und sonstiger Risse hingegen ist konstant geblieben (Bild 8, Bild 9 und Bild 11).

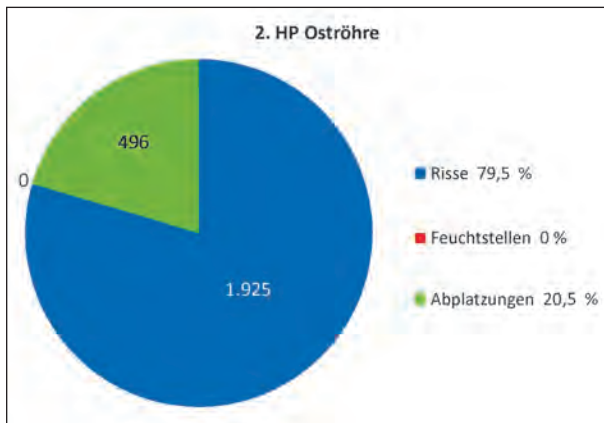


Bild 7: Verteilung der Auffälligkeiten Oströhre, 2. HP

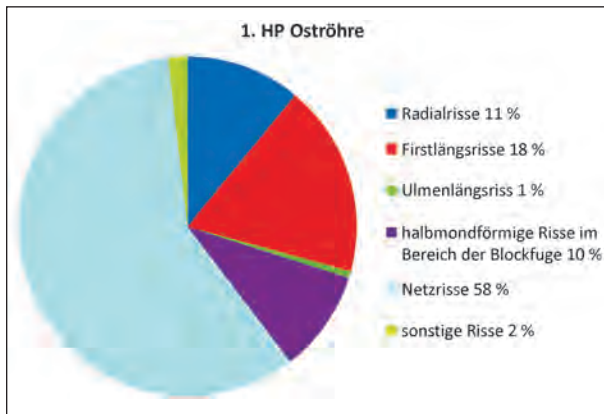


Bild 8: Verteilung der Risstypen 1. HP Oströhre

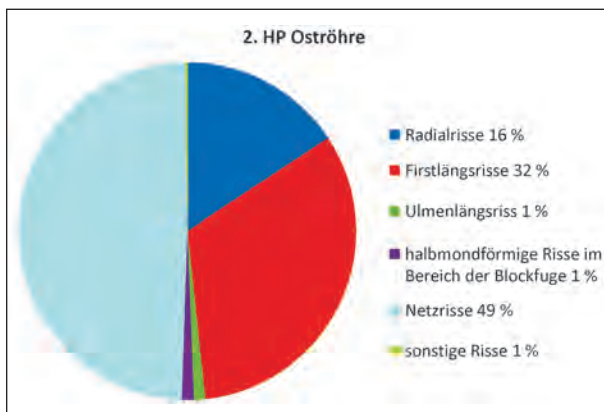


Bild 9: Verteilung der Risstypen 2. HP Oströhre

Über die Lage und Größe der Risse (Bild 10) lässt sich Folgendes sagen: Die Radialrisse treten in 40 % der unbewehrten Blöcke auf und kommen überwiegend im unteren Ulmenbereich direkt über dem Bankett vor. Die maximale Größe der Radialrisse beträgt nicht mehr als 2,0 mm. Die Firstlängsrisse treten in mehr als 80 % der unbewehrten Blöcke auf. Auch hier liegt die maximale Größe bei nicht mehr als 2,0 mm. Auffällig ist jedoch die Lage. Fast alle Firstlängsrisse liegen ungefähr beidseitig 1,5 m vom First entfernt, selten liegt ein Riss direkt im First. Auch bei der Länge der Firstlängsrisse ist zu erkennen, dass nur 1/3 durchgehend ist. Größtenteils verläuft der Riss regelmäßig und weist nur vereinzelt Verzweigungen auf. Die Ulmenlängsrisse kommen in nur 3 % der unbewehrten Blöcke vor. Sie sind nie durchgehend und verlaufen immer im Ulmenbereich, meistens ca. 6 m über dem Bankett. Die maximale Breite der Ulmenlängsrisse liegt unter 1,5 mm. Abplatzungen erreichen eine Tiefe

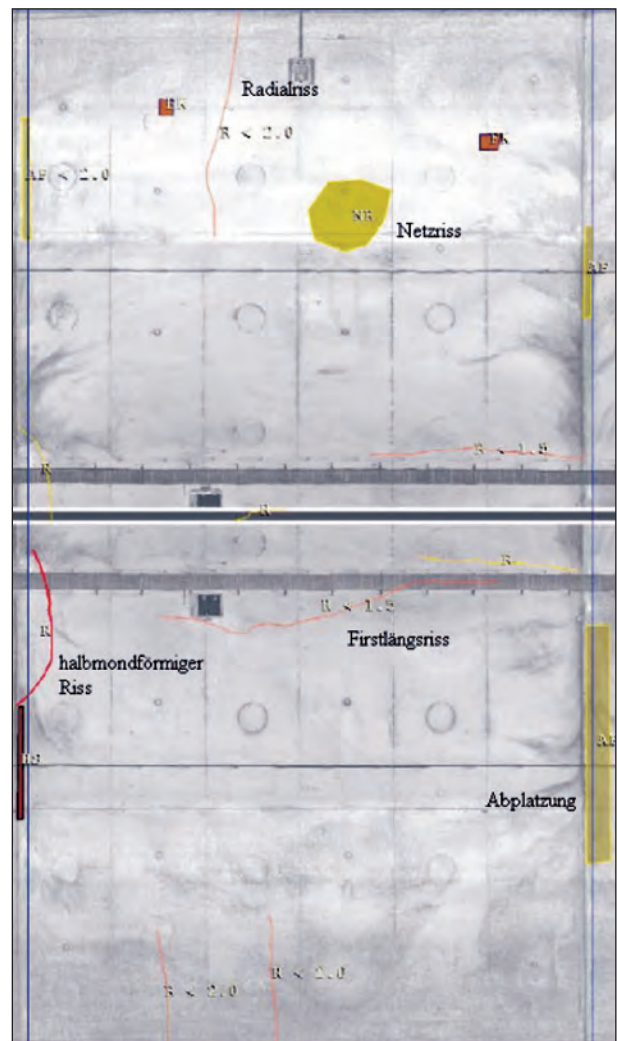


Bild 10: Beispiel für verschiedene Risstypen in der Blockabwicklung



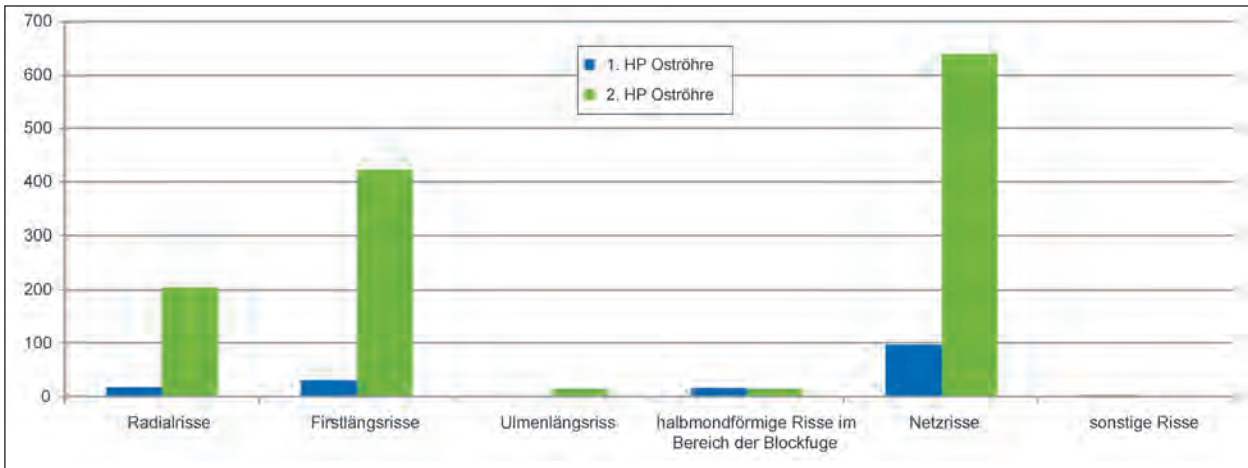


Bild 11: Entwicklung der Risstypen

von mehr als 2,0 mm mit unterschiedlich großen Flächen. Diese kommen in 75 % der unbewehrten Blöcke vor und liegen meist im Bereich der Blockfuge. In mehr als 60 % der unbewehrten Blöcke treten Netzrisse auf, dagegen halbmondförmige Risse in nur 5 %. Bild 11 zeigt die Entwicklung der Risstypen von der 1. bis zur 2. HP.

**Weströhre**

Was die Verteilung der Auffälligkeiten bei der Weströhre angeht, konnten hier bei der 1. HP nur wenig Ähnlichkeiten zur Oströhre (Bild 6, Bild 7) festgestellt werden. Der Anteil der Feuchtstellen ist bei der 1. HP bei der Weströhre deutlich höher als bei der Oströhre (Bild 12) und auch der Anteil der Abplatzungen überwiegt bei der Weströhre (1. HP). Bei der 2. HP sind dann wieder mehr Parallelen zwischen Ost- und Weströhre feststellbar: Auch bei der Weströhre überwiegen jetzt klar die Risse gegenüber den Abplatzungen und die Feuchtstellen sind stark zurückgegangen (Bild 13).

Bezüglich der Risstypen ist es bei der Weströhre ähnlich wie bei der Oströhre. Auch hier haben sich die Firstlängsrisse sowie die Netzrisse von der ersten zur zweiten Hauptprüfung deutlich am meisten vermehrt (Bild 14 und Bild 15).

Außerdem liegen die Radialrisse, wie auch bei der Oströhre, überwiegend im unteren Ulmenbereich direkt über dem Bankett und haben eine maximale Größe von kleiner 2,0 mm. Hierbei sind jedoch nur 30 % der Blöcke von Radialrissen betroffen. Ebenso haben auch die Firstlängsrisse eine maximale Größe unter 2,0 mm. Diese liegen auch wie bei der Oströhre beidseitig 1,5 m vom First entfernt und nie direkt in der Firstlinie. Dennoch haben 85 % der un-

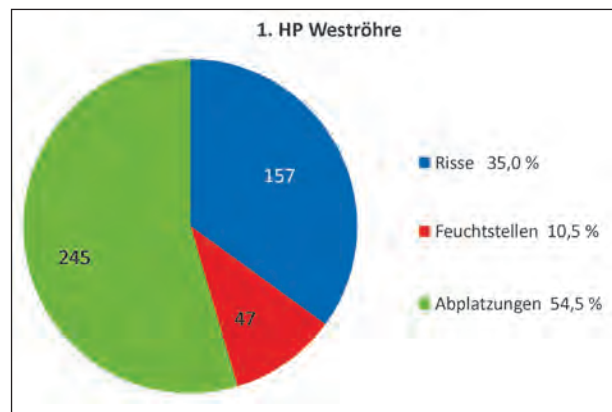


Bild 12: Verteilung der Auffälligkeiten Weströhre, 1. HP

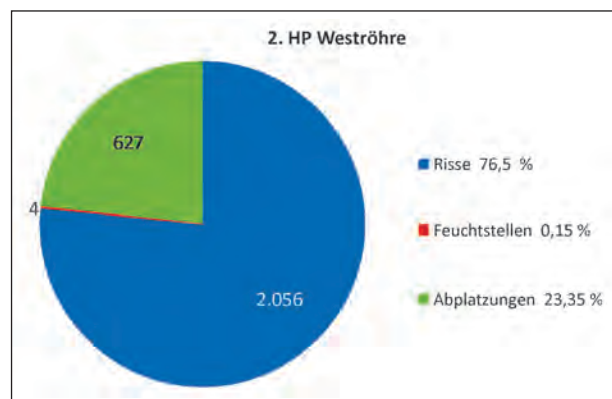


Bild 13: Verteilung der Auffälligkeiten Weströhre, 2. HP

bewehrten Blöcke Firstrisse, von denen 1/3 der Risse durchgehend ist. Zugleich verlaufen auch die Risse der Weströhre regelmäßig und zeigen nur vereinzelt Verzweigungen auf. Anders die halbmondförmigen Risse, die bei der Oströhre konstant geblieben sind, haben sich bei der Weströhre vermehrt. So besitzen fast 10 % der unbewehrten Blöcke halbmondförmige Risse. Ulmenrisse kommen auch hier nur in 1 % der unbewehrten Blöcke

vor. Dagegen sind aber 90 % der Blöcke von Netzrissen und 80 % von Abplatzungen betroffen. Ferner treten die Abplatzungen auch hier meist im Bereich der Blockfuge auf und erreichen eine Tiefe von über 2,0 mm. Bild 16 zeigt die Entwicklung der Risstypen von der 1. bis zur 2. HP.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die unbeherrschten Tunnelinnenschalenblöcke im Tunnel Rennsteig stark bis bereichsweise sehr stark vor

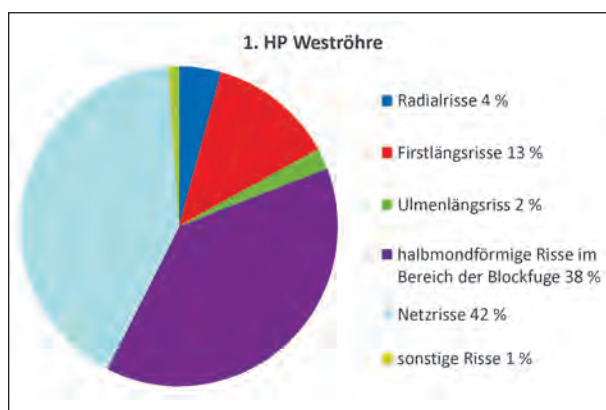


Bild 14: Verteilung der Risstypen 1. HP Weströhre

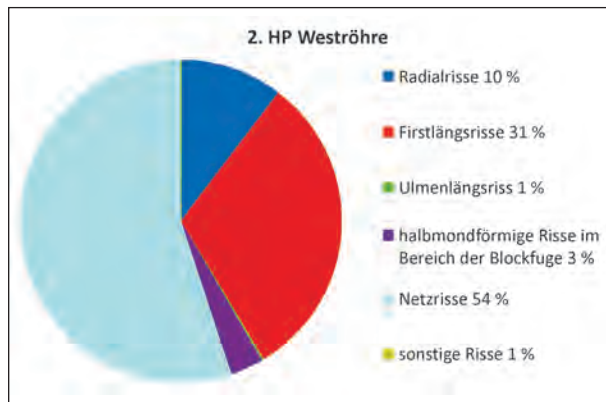


Bild 15: Verteilung der Risstypen 2. HP Weströhre

allem von Rissen, aber auch bereichsweise von Abplatzungen geprägt sind. Die Risse und Abplatzungen haben sich im Verlauf der letzten Jahre auch verstärkt. Dies zeigt sich auch an der Zustandsnote, die sich von 2,0 (Ost) bzw. 1,9 (West) in 2003 auf 2,7 (Ost) bzw. 2,5 (West) in 2008 verschlechtert hat. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Zustandsnote auf Basis der Bauwerksprüfung nach RI-EBW-PRÜF alle Risse und Abplatzungen unabhängig von der Größe berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.1.4). Tatsächlich ist aber nur ein geringer Anteil der Risse und Abplatzungen wirklich als Schaden im Sinne dieses Berichtes zu klassifizieren (siehe Kapitel 3.3).

### 3.2.2 Tunnel Hochwald (BAB A 71)

Der 2001 fertig gestellte Tunnel Hochwald liegt im Zuge der BAB A 71 zwischen Erfurt und Schweinfurt bei Zella-Mehlis. Der Tunnel Hochwald besteht aus zwei Röhren, der Ost- und Weströhre. Beide Röhren weisen eine Länge von 1.056,00 m auf.



Bild 17: Portal Tunnel Hochwald

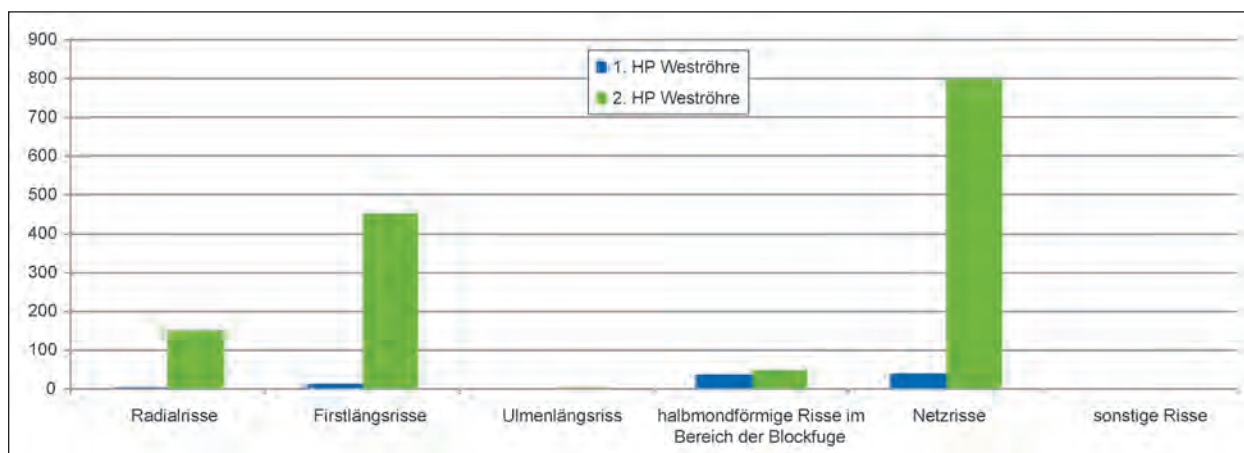


Bild 16: Entwicklung der Risstypen

Die Oströhre hat 91 Blöcke, von denen 60 % unbewehrt sind und 40 % bewehrt. Bei der Weströhre sind von den 93 Blöcken 53 % unbewehrt und 47 % bewehrt. Die unbewehrten Bereiche liegen jeweils in den mittleren Tunnelabschnitten. Die Innenschalendicke der unbewehrten Blöcke beträgt planmäßig 40 cm. Es wurden zwei Hauptprüfungen durchgeführt, die erste im August 2001 und die zweite im Dezember 2005. Im September 2009 wurde dann noch eine einfache Prüfung (EP) durchgeführt. Bei beiden Röhren sind bei der ersten Hauptprüfung (1. HP) von den unbewehrten Blöcken nur 3 % komplett ohne Risse oder Abplatzungen und ungefähr 45 % nur mit kleineren Rissen/Abplatzungen. Bei der zweiten Hauptprüfung (2. HP) jedoch zeigen fast alle Blöcke starke Rissbildungen und Abplatzungen: Oströhre: 1 bis 10, i. M. 7 Risse/Abplatzungen je Block; Weströhre: 1 bis 16, i. M. 10 Risse/Abplatzungen je Block.

**Oströhre**

Die Analyse der ersten und zweiten Hauptprüfung ergab, dass sowohl in der Oströhre als auch in der Weströhre neben Rissen Abplatzungen und Auswaschungen (freiliegendes Korngerüst) am häufigsten

festgestellt wurden. Die Verteilung der Auffälligkeiten hat sich von der 1. zur 2. HP verändert, da eine starke Zunahme der Risse und gleichzeitig eine Abnahme der Feuchtstellen festgestellt wurden (vgl. Bild 18, Bild 19).

Bezüglich der Verteilung der Risstypen ist bei der Oströhre klar zu erkennen, dass Netzrisse, Firstlängsrisse und Radialrisse am häufigsten auftreten. Halbmondförmige Risse, sonstige Risse sowie Ulmenlängsrisse sind nicht so oft vorhanden (Bild 20, Bild 23).

Am deutlichsten zugenommen haben von der ersten Hauptprüfung zur zweiten die Radialrisse (Bild 21). Sie kommen in 78 % der unbewehrten Blöcke vor und liegen meist im unteren Ulmenbereich über den Banketten. Die maximale Größe der Radialrisse liegt bei 0,65 mm. Auch die Firstlängsrisse haben stark zugenommen. Sie kommen bei der zweiten Hauptprüfung in allen unbewehrten Blöcke vor und haben eine maximale Größe von 2,0 mm. Die Firstlängsrisse sind in 85 % der Blöcken durchgehend, verlaufen aber sehr unregelmäßig. Die Netzrisse, die sich auch vermehrt haben, kommen in 76 % der unbewehrten Blöcke vor.

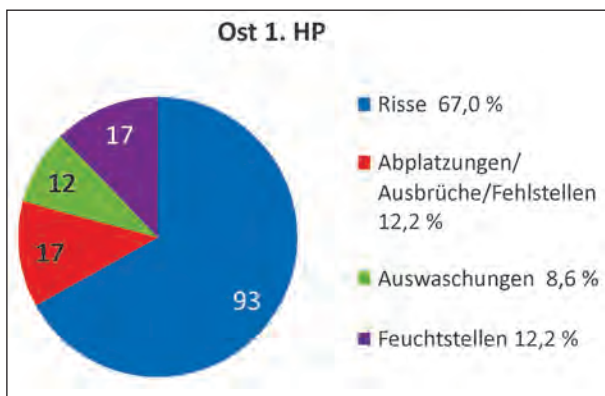


Bild 18: Verteilung der Auffälligkeiten Oströhre, 1. HP

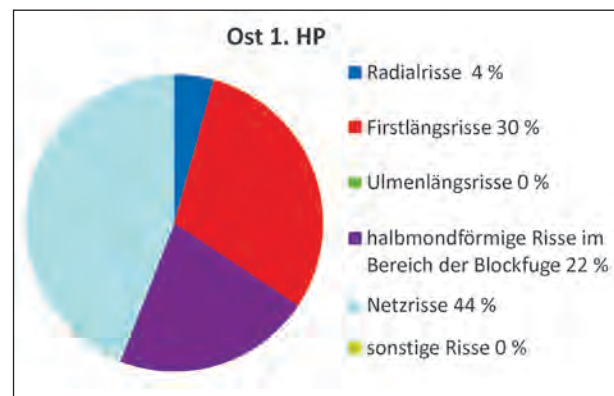


Bild 20: Verteilung der Risstypen 1. HP Oströhre

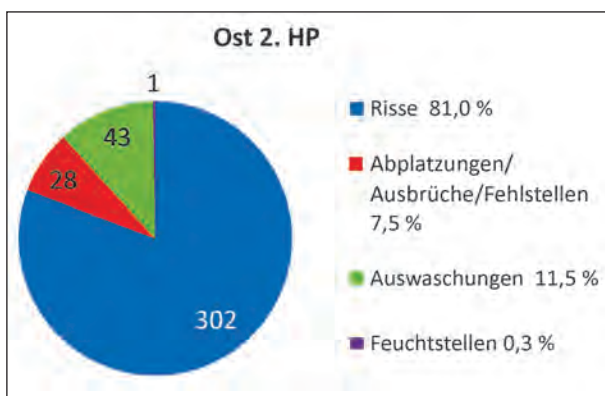


Bild 19: Verteilung der Auffälligkeiten Oströhre, 2. HP

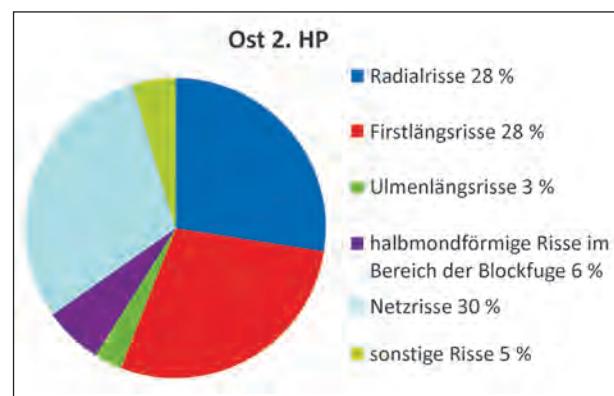
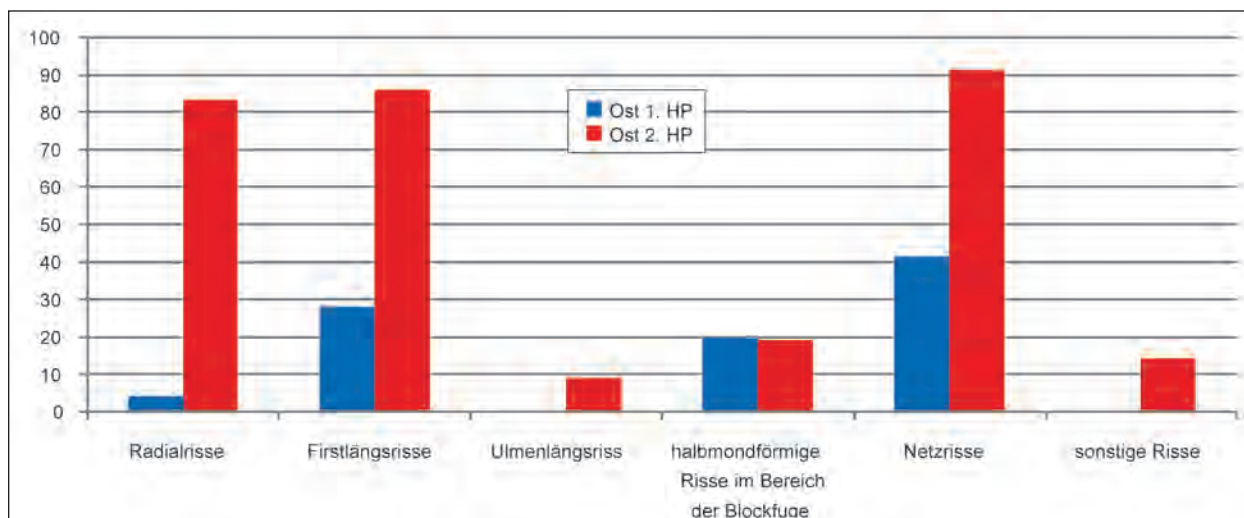


Bild 21: Verteilung der Risstypen 2. HP Oströhre



**Bild 22:** Entwicklung der Risstypen



**Bild 23:** Typisches Rissbild Oströhre 2. HP

Ulmenlängsrisse, sonstige Risse und Abplatzungen haben sich nur wenig vermehrt. So kommen die Ulmenlängsrisse in nur 13 %, sonstige Risse in 20 % und Abplatzungen in 39 % der unbewehrten

Blöcke vor. Dabei erreichen die Abplatzungen eine maximale Tiefe von bis zu 4,0 cm. Nicht verändert haben sich die halbmondförmigen Risse, diese kommen sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Hauptprüfung in 28 % der unbewehrten Blöcke vor. Stark verringert haben sich hingegen die Feuchtstellen. Wo bei der ersten Hauptprüfung noch 14 Blöcke von Feuchtstellen betroffen waren, ist es bei der zweiten Hauptprüfung nur noch ein Block. Zu den Auswaschungen ist zu sagen, dass sie sich im geringen Maß auch vermehrt haben. So sind bei der zweiten Hauptprüfung 46 % der unbewehrten Blöcke von Auswaschungen betroffen. Bild 22 zeigt die Entwicklung der Risstypen von der 1. bis zur 2. HP.

### Weströhre

Was die Verteilung der Auffälligkeiten bei der Weströhre angeht, konnten hier bei der 1. HP Ähnlichkeiten zur Oströhre (Bild 18, Bild 19) festgestellt werden. Allerdings ist der Anteil der Risse und der Abplatzungen bei der 1. HP bei der Weströhre deutlich höher als bei der Oströhre (Bild 24). Bei der 2. HP sind dann wieder weniger Parallelen zwischen Ost- und Weströhre feststellbar: Bei der Weströhre dominieren jetzt fast ausschließlich die Risse, wobei bei der Oströhre immer noch knapp 20 % auf die übrigen Typen von Auffälligkeiten entfallen (Bild 25).

Die Abplatzungen und die Feuchtstellen haben sich von der ersten zur zweiten HP verringert. Wo bei der 1. HP noch 6 Feuchtstellen vorhanden waren, treten bei der 2. HP keine Feuchtstellen mehr auf. Bei den Abplatzungen sind bei der zweiten Haupt-

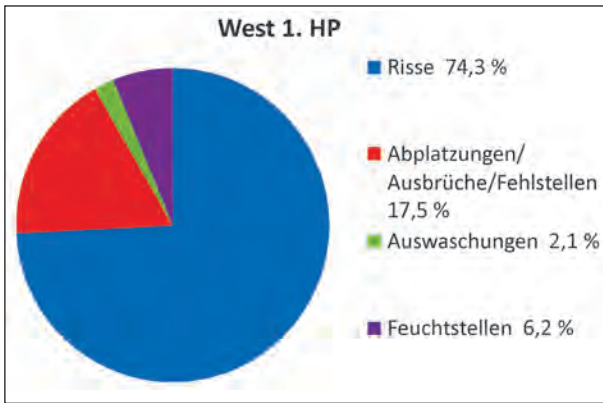


Bild 24: Verteilung der Auffälligkeiten Weströhre, 1. HP

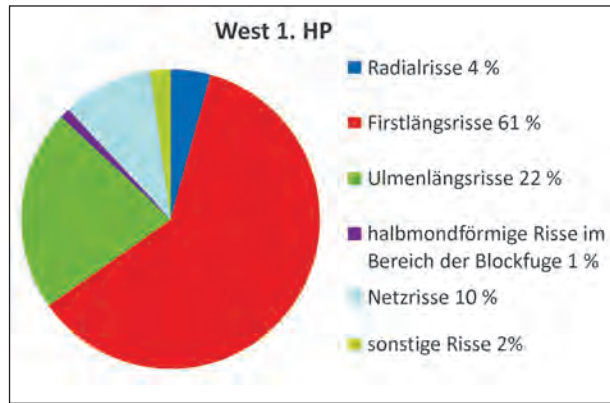


Bild 26: Verteilung der Risstypen 1. HP Weströhre

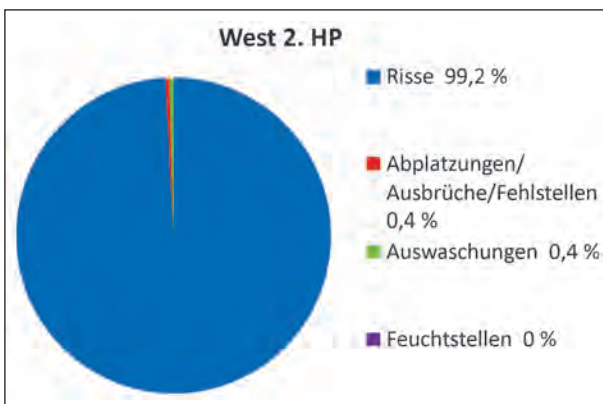


Bild 25: Verteilung der Auffälligkeiten Weströhre, 2. HP

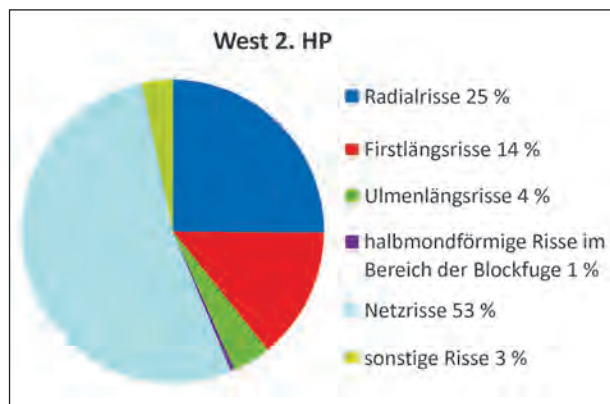


Bild 27: Verteilung der Risstypen 2. HP Weströhre

prüfung nur noch 4 % der unbewehrten Blöcke betroffen. Die maximale Tiefe der Abplatzungen liegt bei 3,0 cm. Auswaschungen haben bei der Weströhre kaum eine Bedeutung, sie treten bei der ersten wie auch bei der zweiten Hauptprüfung nur zweimal auf.

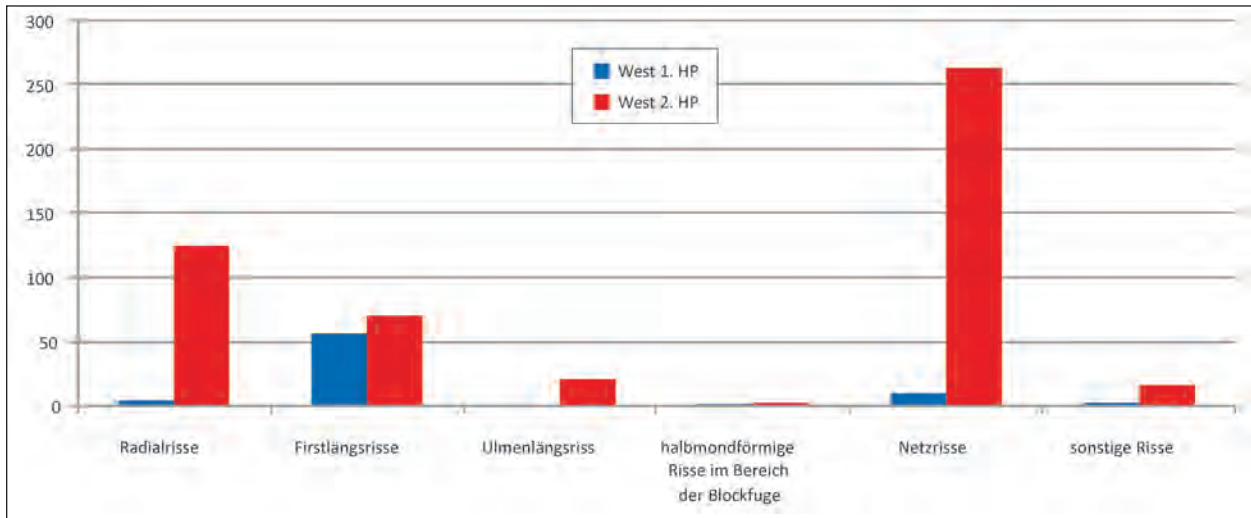
Was die Verteilung der Risstypen angeht, zeigt sich bei der Weströhre, dass die Netzrisse deutlich am häufigsten auftreten. Alle unbewehrten Blöcke sind durch Netzrisse beschädigt. So gibt es Blöcke, die eine hohe Anzahl an Netzrisen aufweisen, zum Teil bis zu neun Stück (Bild 26). Hierbei haben die Netzrisse auch klar am stärksten zugenommen von der 1. HP zur 2. HP. Auch die Radialrisse haben sich stark vermehrt und kommen bei der Weströhre in 92 % der Blöcke vor. Sie kommen überwiegend im unteren Ulmenbereich über den Banketten vor, treten aber auch häufiger im oberen Ulmenbereich auf. Die maximale Größe der Radialrisse liegt bei 1,6 mm. Nicht sehr stark vermehrt haben sich die Firstlängsrisse. Sie kommen aber in allen unbewehrten Blöcken vor und besitzen eine maximale Größe von 2,5 mm und sind alle durchgehend. Aber wie auch bei der Oströhre verlaufen alle Firstlängs-

risse unregelmäßig, das bedeutet mal genau im First, mal neben dem First, aber auch schräg über den First. Die Ulmenlängsrisse wie auch die halbmondförmigen Risse sind konstant geblieben und haben sich kaum verändert. Dabei treten die Ulmenlängsrisse in 29 % der Blöcke auf, die halbmondförmigen Risse sogar nur in 4 % der Blöcke. Sonstige Risse sind etwas mehr geworden, kommen aber auch nur in 25 % der Blöcke vor und haben eine maximale Größe von 0,7 mm (Bild 27). Bild 28 zeigt die Entwicklung der Risstypen von der 1. bis zur 2. HP.

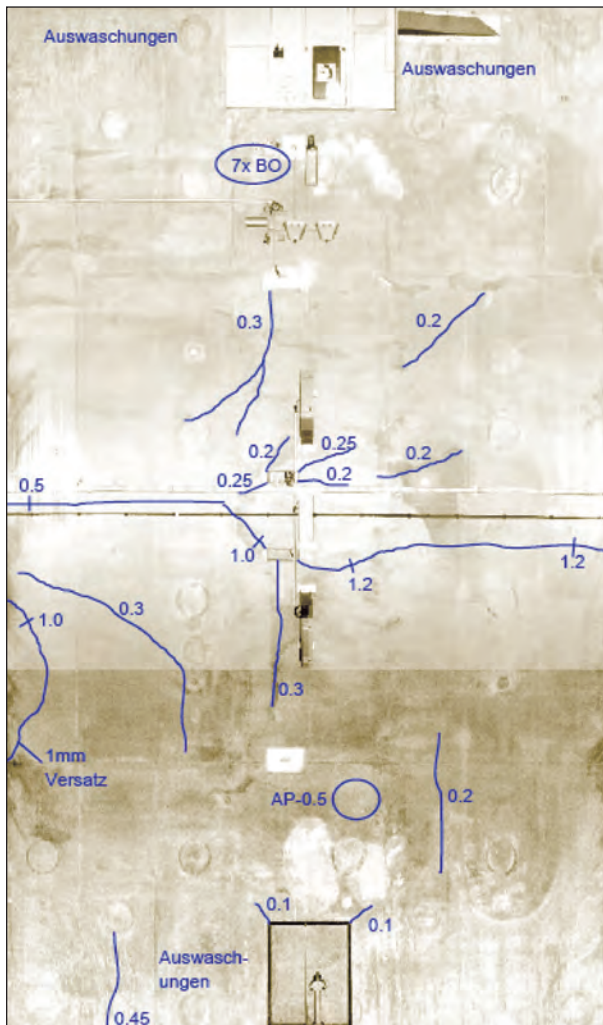
Insgesamt lässt sich feststellen, dass die unbewehrten Blöcke des Tunnels Hochwald starke bis bereichsweise sehr starke Risse/Abplatzungen (vor allem Risse) aufweisen. Dies spiegelt sich auch teilweise in der Zustandsnote wider, die sich von 1,9 in 2002 auf 2,4 in 2009 (Oströhre) bzw. 2,3 (Weströhre) verschlechtert hat.

### 3.2.3 Grenztunnel Füssen

Der Grenztunnel Füssen (BAB A 7) hat eine Länge von 1.285 m und ist 1999 zu 70 % unbewehrt her-



**Bild 28:** Entwicklung der Risstypen



**Bild 29:** Beispiel für verschiedene Risstypen in der Blockabwicklung



**Bild 30:** Portal Grenz Tunnel Füssen

(mit 1 bis 6 einzelnen Typen von Auffälligkeiten je Block, i. M. 1-2 Typen je Block). Der Zustand der unbewehrten Blöcke des Grenz隧nells Füssen wird vor allem durch Risse beeinträchtigt (Bild 31). Hier wurde allerdings bei der Bauwerksprüfung eine sehr grobe Unterscheidung der Risstypen verwendet (Bild 32). Die Verteilung der Risstypen hat sich von der ersten (2004) zur 2. HP (2010) nicht verändert. Die Längsrisse haben überwiegend eine Breite zwischen 1 und 2 mm, treten vor allem im Tunnelscheitel auf und sind meist nicht durchgehend. Bei den sonstigen Typen von Auffälligkeiten konnte eine starke Zunahme der Feuchtstellen und Aussinterungen festgestellt werden. Insgesamt liegt die Zustandsnote für die Teilbauwerke des Tunnells Füssen (unbewehrter Teil) zwischen 1,6 und 2,2. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Tunnelinnenschale des Grenz隧nells Füssen leicht bis bereichsweise mittelstark von vor allem Risse und Feuchtstellen betroffen ist.

gestellt worden. Von den 77 unbewehrten Tunnelblöcken haben nach der HP in 2010 gut 70 % aller Blöcke Risse, Aussinterungen, Feuchtstellen etc.

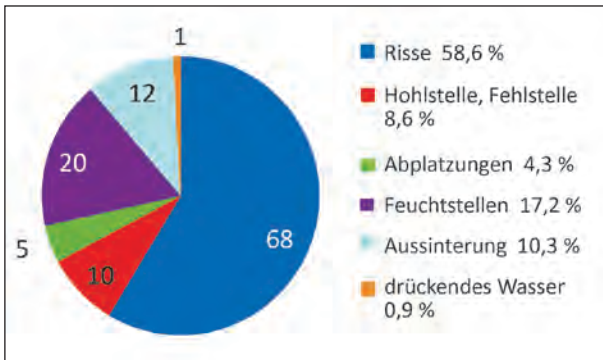


Bild 31: Verteilung der Auffälligkeiten 2. HP 2010



Bild 33: Portal Kohlbergtunnel

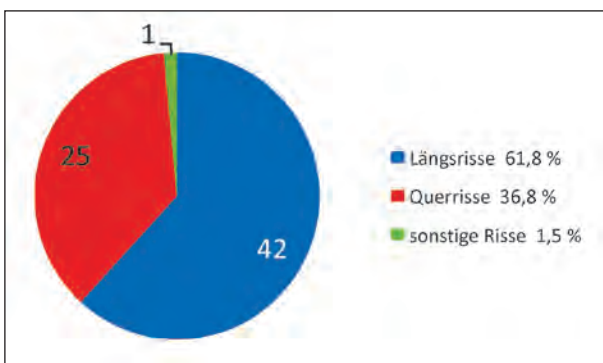


Bild 32: Verteilung der Risstypen 2. HP 2010

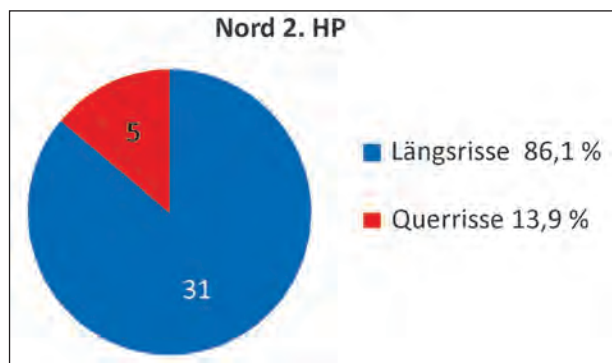


Bild 34: Verteilung der Risstypen Nordröhre HP 2009

### 3.2.4 Kohlbergtunnel

Der Kohlbergtunnel (BAB A 96) bei Erkheim hat eine Länge von 630 m (Nordröhre) und 626,17 m (Südröhre). Der Tunnel ist im Jahre 1992 zu 79 % unbewehrt hergestellt worden. Von den 99 unbewehrten Tunnelblöcken sind nach der 2. HP in 2009 60 Blöcke leicht gerissen (1 bis max. 4 Risse je Block, i. M. 1 Riss je Block). Hauptsächlich den Zustand beeinflussender Faktor bei den unbewehrten Blöcken des Kohlbergtunnels sind demnach Risse (Bild 34, Bild 35). Das Rissbild in der Nord- und Südröhre ist dabei ungefähr gleich. Bei den Risstypen dominieren die Längsrisse. Die Rissgrößen liegen zwischen 0,2 und 1,0 mm. Detaillierte Angaben zur Lage der Risse sind im Bauwerksbuch nicht vorhanden. Zur Rissentwicklung kann festgestellt werden, dass z. B. in der Südröhre die Anzahl der Risse von 2006 (2. EP) bis 2009 um ca. 70 % abgenommen hat. Auch die Zustandsnote hat sich von 1,9 auf 1,7 verbessert. Vermutlich sind hier Instandsetzungsarbeiten durchgeführt worden. Hierüber gibt es im Bauwerksbuch allerdings keine Angaben. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich die Risse am Kohlbergtunnel im Rahmen halten und den Zustand der Innenschale nicht stark beeinträchtigen.

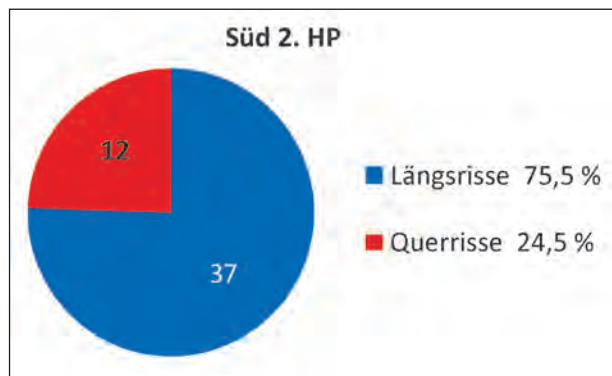


Bild 35: Verteilung der Risstypen Südröhre HP 2009

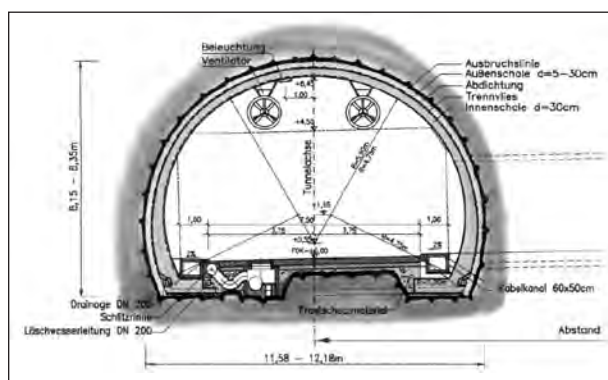
### 3.2.5 Tunnel Königshainer Berge

Der Tunnel Königshainer Berge liegt im Zuge der BAB A 4 von Görlitz nach Dresden bei Kodersdorf/Wiesa. Der Tunnel wurde 1999 fertig gestellt und besitzt eine Nord- und Südröhre mit jeweils 3.338,10 m Länge. Insgesamt 520 Innenschalenblöcke des Tunnels (entspricht 78 %) wurden unbewehrt hergestellt. Die unbewehrten Blöcke haben eine Innenschalendicke von 30 cm (Bild 37).

Nach der letzten Hauptprüfung in 2004 sind 475 der 520 unbewehrten Innenschalenblöcke gerissen. Hauptsächlich den Zustand beeinflussender Faktor



**Bild 36:** Portal Tunnel Königshainer Berge



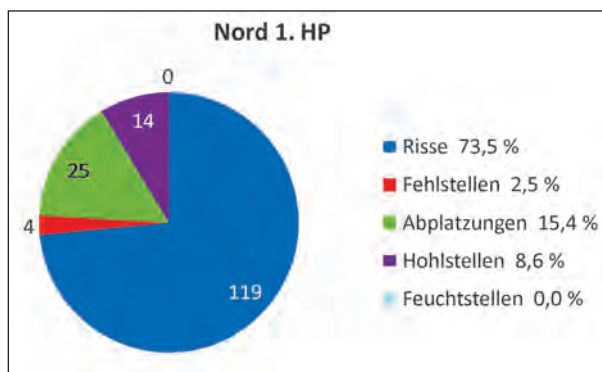
**Bild 37:** Regelquerschnitt Tunnel Königshainer Berge (unbewehrte Blöcke)

bei den unbewehrten Blöcken des Tunnels Königshainer Berge sind also auch Risse. Im Folgenden werden die Nord- und Südröhre getrennt betrachtet und die Ergebnisse der 1. und 2. HP ausgewertet.

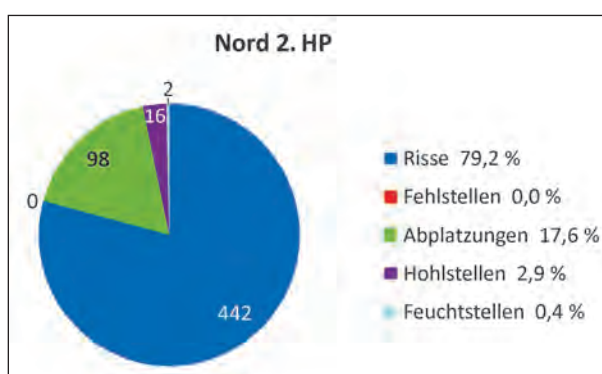
### Nordröhre

Von der 1. bis zur 2. HP hat sich die Verteilung der Auffälligkeiten nicht wesentlich geändert. Der Anteil der Risse hat noch mehr zugenommen, dafür wurden weniger Hohlstellen und Fehlstellen festgestellt. Die absolute Anzahl der Risse und Abplatzungen hat sehr stark zugenommen (Bild 38, Bild 39). Von den 260 unbewehrten Blöcken sind nur 24 ohne Risse/Abplatzungen. Die anderen Blöcke weisen zwischen 1 und 8 (i. M. ca. 3-4) Risse/Abplatzungen auf. Knapp 80 % der Auffälligkeiten sind Risse. Bezüglich der Risstypen dominieren die Firstlängsrisse und die Radialrisse (Bild 40). Die Rissweiten liegen zwischen 0,3 und 2,0 mm (i. M. 0,8 mm für die Firstlängsrisse und i. M. 0,4 mm für die Radialrisse).

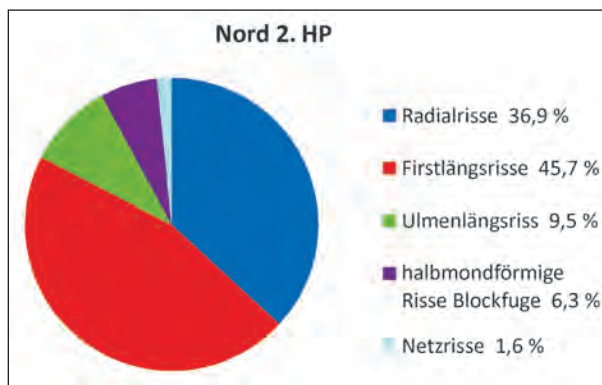
Insgesamt liegt die Zustandsnote für die Nordröhre des Tunnels Königshainer Berge (unbewehrter Teil) nach der 2. HP bei 2,9. Bei der einfachen Prüfung in 2007 betrug die Zustandsnote dann 2,0. Es wurden nicht alle Risse/Abplatzungen erfasst (Festle-



**Bild 38:** Verteilung der Auffälligkeiten Nordröhre HP 2002



**Bild 39:** Verteilung der Auffälligkeiten Nordröhre HP 2004



**Bild 40:** Verteilung der Risstypen 2. HP 2004

gung aus letzter HP) und einige Schäden (wie z. B. Abplatzungen) wurden instandgesetzt.

### Südröhre

Bei der Südröhre ist das Zustandsbild vergleichbar mit der Nordröhre. Bei der 1. HP war der Anteil der Risse an allen Typen von Auffälligkeiten sogar noch höher als bei der Nordröhre (Bild 38, Bild 41). Auch bei der Südröhre hat von der 1. HP bis zur 2. HP die Anzahl der Risse und Abplatzungen massiv zugenommen (Bild 42). Die Verteilung entspricht dabei in etwa der der Nordröhre. Bei der Südröhre weist



fast jeder Block nach der 2. HP Risse und Abplatzungen auf (nur 19 von 260 unbewehrten Blöcken ohne Risse/Abplatzungen). Die Anzahl der Risse/Abplatzungen je Block liegt dabei zwischen 1 und max. 10 Stück (i. M. 2 bis 3) und ist damit (was den Mittelwert angeht) geringfügig kleiner als bei der Nordröhre. Dominierend sind auch bei der Südröhre die Risse (mehr als 80 %). Auch bei der Rissverteilung zeigen sich Parallelen zur Nordröhre. Es dominieren fast ausschließlich Firstlängsrisse und Radialrisse (Bild 43). Der Anteil der Radialrisse ist bei der Südröhre nochmal höher als bei der Nordröhre. Die Rissweiten liegen zwischen 0,3 und 2,0 mm

(i. M. 0,9 mm für die Firstlängsrisse und i. M. 0,5 mm für die Radialrisse).

Insgesamt ist die Qualität der Südröhre noch etwas schlechter als die der Nordröhre (11 % mehr Risse/Abplatzungen).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Tunnelinnenschale des Tunnels Königshainer Berge nach der 2. HP in 2004 einen mittleren bis hohen Grad an Rissen und Abplatzungen aufweist.

### 3.2.6 Tunnel Schwarzer Berg

Der Tunnel Schwarzer Berg liegt im Zuge der BAB A 70 von Bamberg nach Schweinfurt bei Eltmann. Die erste Röhre (Nordröhre) des Tunnels wurde 1986 fertig gestellt und besitzt eine Länge von 738 m. Die zweite Röhre (Südröhre) wurde 2004 gebaut und hat eine Länge von 722 m. 83 % (Nordröhre) bzw. 86 % (Südröhre) der Innenschalenblöcke des Tunnels wurden unbewehrt hergestellt. Die unbewehrten Blöcke der alten Röhre haben eine Innenschalendicke von 30 cm und sind aus Beton B25 hergestellt (Bild 45). Bei der neuen Röhre beträgt die Innenschalendicke 40 cm.

Nach der letzten HP in 2009 bzw. EP 2008 haben fast alle unbewehrten Innenschalenblöcke Risse, Abplatzungen etc. (i. M. 4 Stück je Block bei beiden Röhren). Dabei traten bei den unbewehrten Blöcken des Tunnels Schwarzer Berg vorwiegend Risse, Abplatzungen und Hohlstellen bzw. Fehlstellen auf (Bild 47, 48). Die Abplatzungen traten dabei vorwiegend an den Blockfugen in der Tunnelfirste der Südröhre auf (Bild 46). Bei den Rissen dominieren Quer- und Schrägrisse sowie Längsrisse. Der Zustand der alten Nordröhre hat sich von der

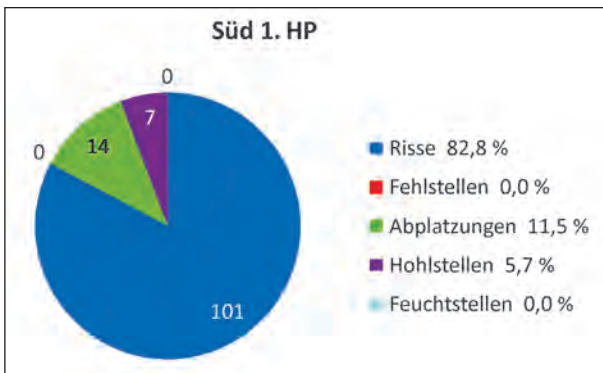


Bild 41: Verteilung der Auffälligkeiten Südröhre HP 2002

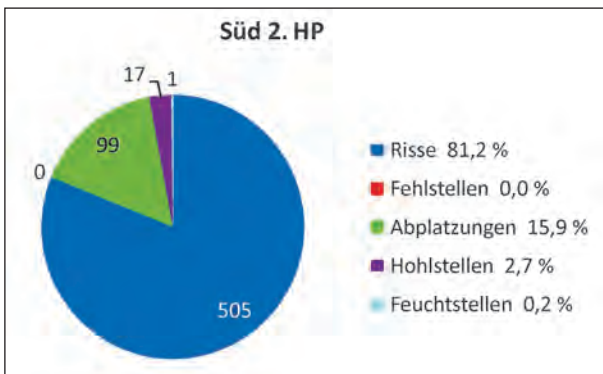


Bild 42: Verteilung der Auffälligkeiten Südröhre HP 2004

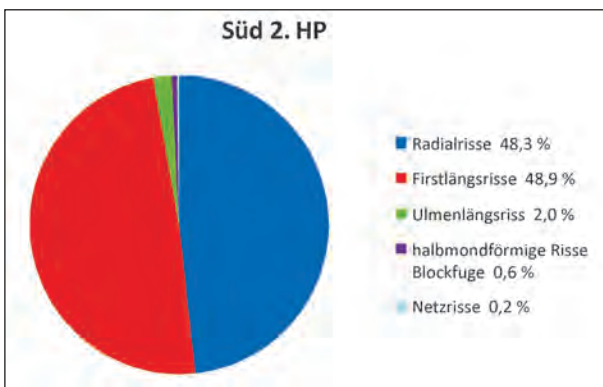
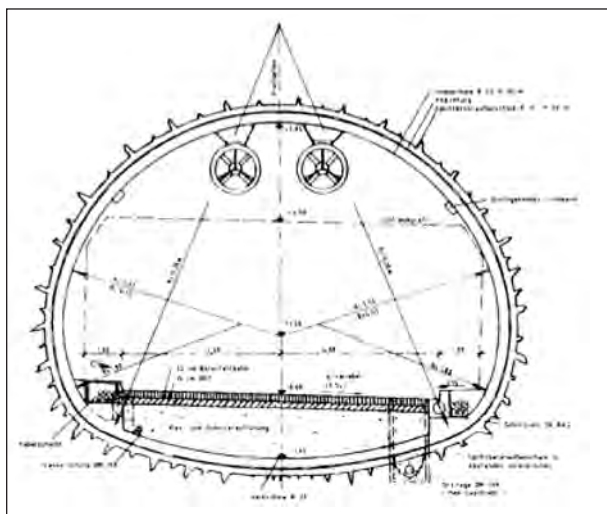


Bild 43: Verteilung der Risstypen 2. HP 2004



Bild 44: Portal Tunnel Schwarzer Berg (Verkehrsführung vor und während des Baus der 2. Röhre)



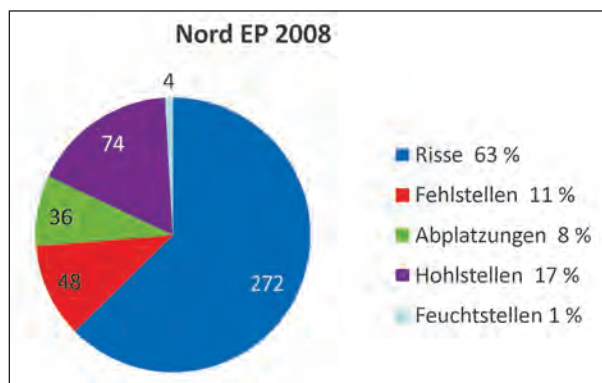
**Bild 45:** Regelquerschnitt Tunnel Schwarzer Berg (Nordröhre/alt)



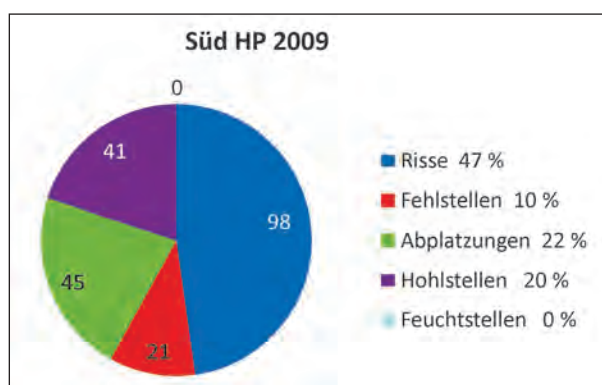
**Bild 46:** Abplatzung im Bereich der Blockfuge (Südröhre/neu)

HP in 2005 bis zur EP in 2008 nicht verschlechtert. Die Risse und Abplatzungen/Hohlstellen sind alle bereits zu einem früheren Zeitpunkt aufgetreten. Die Zustandsnote liegt konstant bei 2,5. Bei der Südröhre hat sich der Zustand von 2004 (Jahr der Inbetriebnahme) bis 2007 stark verschlechtert (von Zustandsnote 1,9 auf 3,0). Dann wurden bis zum Ablauf der Frist für Mängelansprüche umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt. Die Zustandsnote hat sich dann in 2009 (HP) auf 2,5 verbessert.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Tunnelinnenschale des Tunnels Schwarzer Berg nach der HP in 2009 (Südröhre) bzw. EP in 2008 (Nordröhre) eine mittleren bis hohe Anzahl von Rissen, Abplatzungen und Hohl- bzw. Fehlstellen aufweist.



**Bild 47:** Verteilung der Auffälligkeiten Nordröhre (alt) EP 2008



**Bild 48:** Verteilung der Auffälligkeiten Südröhre (neu) HP 2009

### 3.3 Detaillierte Analyse und Bewertung des Zustandes von unbewehrten Innenschalen

Im Folgenden werden die unter Kapitel 3.2 beschriebenen den Zustand der Innenschale negativ beeinflussenden Faktoren bei Tunneln mit unbewehrten Innenschalen (Risse, Abplatzungen und andere Auffälligkeiten) zusammenfassend betrachtet und ausgewertet. Die detaillierte Analyse von 6 Tunneln mit unbewehrten Innenschalen hat ergeben, dass im Mittel fast alle unbewehrten Blöcke (93,5 %) Risse, Abplatzungen oder andere Auffälligkeiten aufweisen (Tabelle 4). Der anhand der unbewehrt hergestellten Tunnelänge gewichtete Mittelwert aller Risse, Abplatzungen und anderer Auffälligkeiten je Block beträgt für die betrachteten 6 Tunnel 5,4. Aus der Zusammenstellung (Tabelle 4) ist aber auch ersichtlich, dass der Mittelwert bei den Tunneln sehr unterschiedlich ist. Insbesondere der Hochwaldtunnel und der sehr lange Rennsteigtunnel weisen eine vergleichsweise hohe Anzahl von Rissen und Abplatzungen je unbewehrtem Tunnelblock auf. Der Tunnel Schwarzer Berg hat im Mittel einen mäßig hohen Mittelwert. Aufgrund

Nr.	Straße	Name	Röhre	Länge unbewehrter Bereich	Risse, Abplatzungen etc. an unbewehrten Blöcken bei letzter HP				
					Anzahl Risse, Abplatzungen etc. insgesamt Block [Mittelwert]	Anteil Blöcke mit Rissen, Abplatzungen etc. insgesamt [%]	Anteil Risse [%]	Anteil Abplatzungen/Ausbrüche/Fehlstellen/Hohlstellen [%]	Anteil Feuchtstellen [%]
1	A 71	Rennsteigtunnel	Ost	3.408	8,5	100,0	79,5	20,5	0,0
			West	3.432	9,4	100,0	76,5	23,4	0,2
2	A 71	Hochwaldtunnel	Ost	648	6,9	100,0	81,0	7,5	0,3
			West	588	10,2	100,0	99,2	0,4	0,0
3	A 7	Grenztunnel Füssen		908	1,5	72,7	58,6	12,9	17,2
4	A 96	Kohlbergtunnel	Nord	500	0,7	52,0	97,0	3,0	0,0
			Süd	490	1,0	69,4	100,0	0,0	0,0
5	A 4	Tunnel Königshainer Berge	Nord	2.600	2,1	90,4	79,2	20,5	0,4
			Süd	2.600	2,4	92,3	81,2	18,6	0,2
6	A 70	Tunnel Schwarzer Berg	Nord (alt)	610	3,9	100,0	63,0	36,0	1,0
			Süd (neu)	690	3,0	97,1	47,0	52,0	0,0
Summe				16.474					
Gewichteter Mittelwert alle Tunnel					5,5	93,3	77,9	19,9	1,1

Tab. 4: Zusammenfassung und Auswertung des Zustandes

der großflächigen Abplatzungen an mehreren Blockfugen muss hier aber bereichsweise von einer größeren Beeinträchtigung des Innenschalenzustandes ausgegangen werden. Ähnliches gilt für den Tunnel Königshainer Berge. Hier wurden bereichsweise sehr starke Rissbildungen dokumentiert. Die Tunnel Füssen und Kohlberg weisen nur wenige Risse, Abplatzungen oder andere Auffälligkeiten auf. An einigen Blöcken sind die Anzahl und Ausprägung der Risse, Abplatzungen und Feuchtstellen stark erhöht.

Die häufigsten Auffälligkeiten sind (Tabelle 4):

- Risse (mehr als 3/4 aller Auffälligkeiten),
- Abplatzungen/Fehlstellen/Hohlstellen (gut 20 %),
- Wasserzutritte (ca. 1 %).

Weitere Typen von Auffälligkeiten wie Auswaschungen und Aussinterungen kommen nur bei einzelnen Tunneln vor und wurden deshalb hier nicht getrennt aufgeführt. Für Fehlstellen im Beton wurden in den vorliegenden Prüfberichten unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Daher werden Abplatzun-

gen, Ausbrüche, Fehlstellen und Hohlstellen in einer Spalte zusammengefasst und im Text als Abplatzungen bezeichnet. Mit Ausnahme der Hohlstellen beschreiben die anderen 3 verwendeten Begriffe denselben Sachverhalt: fehlender Beton an der luftseitigen Betonoberfläche der Innenschale. Die Hohlstellen wurden hier mit dazugezählt, da es sich auch um eine großflächige Betonfehlstelle (allerdings in der Innenschale unterhalb der luftseitigen Betonoberfläche) handelt.

Die Details für die einzelnen Tunnel sind in Kapitel 3.2 beschrieben.

### 3.3.1 Risse

Bei den Rissen treten die folgenden Typen am häufigsten auf (Tabelle 5):

- Längsrisse, überwiegend im Firstbereich,
- Radial bzw. Querrisse,
- Netzrisse,
- halbmondförmige Risse.

### Längsrisse im Firstbereich

(Risstyp II nach Bild 2) sind die am häufigsten auftretenden Typen bei Tunneln mit unbewehrter Innenschale. Ihre Entstehung ist größtenteils systembedingt. Durch Überschreiten der Zugspannungen an der luftseitigen Betonoberfläche infolge der Beanspruchungen der Innenschale aus den Gebrauchslastfällen (insbesondere der Lastfall „Eigen-gewicht + Temp. Winter + Schwinden“ wird hier maßgebend) kommt es infolge der fehlenden Bewehrung zwangsläufig zum Riss [Spring97]. Der Riss wirkt dann hier statisch wie ein zusätzliches Gelenk. Die Rissweite, Risstiefe und Lage des Längsrisses sind dabei sehr unterschiedlich und abhängig von den objektspezifischen Randbedingungen am jeweiligen Tunnel. Eine Rolle spielen hier z. B. die evtl. wirkende Gebirgsauflast, die Bettung durch die Spritzbetonaußenschale und das Gebirge (besonders ungünstig sind hier asymmetrische Beanspruchungen, die zu hohen Biegezugkräften führen) und die tatsächliche Dicke der Innenschale. Weitere Einflussparameter, die in der Literatur genannt werden, sind ausführungsbedingte Parameter wie z. B. Nachbehandlung [Daub07, Spring97].

Eine große Gefahr bei Firstlängsrissen ist die Bildung von so genannten Sekundärrissen ab einer bestimmten Grenzlängsweite des Primärrisses. Durch die Bildung von Sekundärrissen kann es zu einem bergseitigen örtlichen Ausbrechen des gedrückten Schalenrandes und somit zu einer Zerlegung der Innenschale in Teilstücke kommen. Ein Sekundärriss entsteht bei zu großer Gelenkrotation (zu großer Rissweite) durch Umlenkkkräfte an der Risswurzel senkrecht zum Primärriss. Als Grenzlängsweiten werden in [Maidl91]  $w = 0,8$  mm für 30 cm Innenschalendicke und  $w = 1,0$  mm für 40 cm Innenschalen genannt.

Die bei den 6 untersuchten Tunneln gemessenen Rissweiten der Firstlängsrisse bewegen sich zwischen 0,2 mm und max. 2,5 mm. Die Firstlängsrisse sind sehr häufig über den ganzen Block durchgehend und liegen oft nicht genau in der Firste, sondern etwas außermittig (ca. 1,0 bis 1,5 m) mit einem unregelmäßigen, teilweise verzweigten Verlauf.

An Stellen, an denen die verzweigten, unregelmäßig verlaufenden Längsrisse untereinander oder zusammen mit Querrissen oder Netzzissen geschlossene Linienzüge bilden, können sich Bruchstücke von mehreren cm Größe bilden, die aus der

Innenschale auf die Fahrbahn fallen können. Dieses Rissbild wurde beispielsweise am Tunnel Hochwald festgestellt. Durch die Bruchstücke kann die Verkehrssicherheit des Tunnels beeinträchtigt werden. Für die Standsicherheit des Tunnels stellen die Risse und die kleinen Bruchkörper kein Problem dar.

### Längsrisse im Ulmenbereich

(Risstyp VI nach Bild 2) kommen sehr viel seltener vor als Firstlängsrisse. Die bei den 6 untersuchten Tunneln gemessenen Rissweiten der Längsrisse bewegen sich zwischen 0,2 mm und max. 1,6 mm. Die Längsrisse sind sehr häufig über den ganzen Block durchgehend und liegen meist im mittleren Ulmenbereich und haben oft einen unregelmäßigen Verlauf.

### Radialrisse

(Risstyp I nach Bild 2) entstehen meist im unteren Ulmenbereich direkt oberhalb der Bankette. Sie wirken statisch wie zusätzliche Blockfugen und stellen kein Problem für die Standsicherheit dar [Bahn07]. Bei den untersuchten 6 Tunneln kommen diese Risstypen im Mittel am zweithäufigsten vor. Es wurden Rissweiten zwischen 0,6 mm und maximal 2,0 mm gemessen. Radialrisse entstehen hauptsächlich durch Schwind- und Temperaturverformungen der Innenschale.

### Netzzisse

(Risstyp III nach Bild 2) kommen ebenfalls sehr häufig vor (vergleichbar mit Radialrissen). Sie weisen ein sehr unregelmäßiges Rissbild auf und treten hauptsächlich im Ulmenbereich auf. Häufig verbinden sich die Netzzisse mit den Längsrissen zu geschlossenen Linienzügen, was zu den oben erläuterten Problemen mit herausgelösten Bruchstücken aus der Innenschale führt. Der Grund für die Entstehung von Netzzissen ist in der Literatur nicht näher untersucht worden. Möglich ist die Kombination aus Schwind- und Temperaturverformungen sowie örtlichen Inhomogenitäten der Betoninnenschale.

### Halbmondförmige Risse

entstehen sehr viel seltener als die anderen Risstypen. Sie treten immer im Bereich der Blockfuge, meistens in der Firste, auf. Der Grund für die Entstehung sind Scherbeanspruchungen parallel zur

Nr.	Straße	Name	Röhre	Länge unbewehrter Bereich	Risse an unbewehrten Blöcken bei letzter HP				
					Anteil Längsrisse [%]	Anteil Radial-/Querrisse [%]	Anteil Netzrisse [%]	Anteil halbmond-förmiger Risse [%]	
1	A 71	Rennsteig-tunnel	Ost	3.408	33	16	49	1	
			West	3.432	32	10	54	3	
2	A 71	Hochwald-tunnel	Ost	648	31	28	30	6	
			West	588	28	25	53	1	
3	A 7	Grenztunnel Füssen		908	62	37	0	0	
4	A 96	Kohlberg-tunnel	Nord	500	86	14	0	0	
			Süd	490	76	25	0	0	
5	A 4	Tunnel Königshainer Berge	Nord	2.600	55	37	2	6	
			Süd	2.600	49	48	0	1	
6	A 70	Tunnel Schwarzer Berg	Nord (alt)	610	k. A.	44	k. A.	4	
			Süd (neu)	690	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	
Summe:				16.474					
Gewichteter Mittelwert alle Tunnel						43,9	26,8	26,9	2,4

Tab. 5: Zusammenfassung und Auswertung der Risstypen

Fuge oder/und Druckbeanspruchungen senkrecht zur Fugenfläche [Daub07] z. B. durch Bewegungen benachbarter Blöcke infolge Temperaturbeanspruchung (Ausdehnung) bzw. vertikale Verschiebung von Blöcken z. B. durch Setzungen. Die halbmond-förmigen Risse können aber auch bereits im Zuge der Innenschalenherstellung infolge Überbeanspruchung durch Schalwagenkräfte entstehen. Oft führen die halbmond-förmigen Risse auch zu Abplatzungen an der Blockfuge.

Für Risstypen, die hauptsächlich durch Schwind- und Temperaturverformungen der Innenschale entstehen (z. B. Radialrisse und Netzrisse), gibt es möglicherweise auch einen Zusammenhang mit der Blocklänge: je länger der Block, desto größer die Verformungen. Die Tunnel Rennsteig und Hochwald mit den meisten Rissen wurden beide mit 12-m-Blöcken hergestellt, wohingegen die übrigen Tunnel 10 m Blocklänge aufweisen.

### 3.3.2 Abplatzungen

Abplatzungen kommen bei unbewehrten Innenschalen relativ häufig vor. Im Mittel 20 % Schäden an den unbewehrten Blöcken der untersuchten Tunnel sind Abplatzungen (Tabelle 4). Abplatzungen, teilweise auch Ausbrüche oder Fehlstellen ge-

nannt, treten an unterschiedlichen Stellen auf: an den Blockfugen im Zusammenhang mit halbmond-förmigen Rissen oder im Firstbereich durch Risse, die sich zu geschlossenen Linienzügen verbunden haben.

### 3.3.3 Wasserzutritte

Wasserzutritte spielen bei den untersuchten Tunneln mit unbewehrten Innenschalen nur eine untergeordnete Rolle. Sie treten nicht häufiger auf als bei bewehrt ausgeführten Tunneln. Eine Ausnahme ist hier der Grenztunnel Füssen, der viele Feuchstellen aufweist.

## 3.4 Vergleich des Zustandes bewehrt und unbewehrt ausgeführter Tunnelinnenschalen

Der Vergleich des Zustandes von bewehrten und unbewehrten Blöcken wurde exemplarisch an 2 der untersuchten Tunnel durchgeführt: dem am stärksten im unbewehrten Bereich von Rissen und Abplatzungen gekennzeichneten Tunnel Hochwald und den vergleichsweise wenig von Rissen und Abplatzungen betroffenen Kohlbergtunnel. Es zeigt sich, dass die Anzahl der Risse und Abplatzungen

Straße	Name	Röhre	Länge unbewehrter Bereich	Länge bewehrter Bereich	Risse, Abplatzungen etc. an Blöcken bei letzter HP			
					unbewehrt		bewehrt	
					Anzahl Risse, Abplatzungen etc. insgesamt pro Block [Mittelwert]	Anteil Blöcke mit Rissen, Abplatzungen etc. insgesamt [%]	Anzahl Risse, Abplatzungen etc. insgesamt pro Block [Mittelwert]	Anteil Blöcke mit Rissen, Abplatzungen etc. insgesamt [%]
A 71	Hochwald-tunnel	Ost	648	444	6,9	100,0	1,4	67,6
		West	588	./.	10,2	100,0	0,9	59,1
A 96	Kohlberg-tunnel	Nord	500	120	0,7	52,0	0,2	16,7
		Süd	490	130	1,0	69,4	0,0	0,0

Tab. 6: Gegenüberstellung des Zustandes von bewehrten und unbewehrten Blöcken

bei bewehrten Blöcken deutlich geringer ist als bei den unbewehrten Blöcken desselben Tunnels (Tabelle 6). Insbesondere die Anzahl der Risse und die Rissweiten sind bei bewehrten Blöcken deutlich kleiner als bei den unbewehrten Blöcken. Die maximalen Rissbreiten betragen bei den bewehrten Blöcken 0,3 mm. Risse > 0,2 mm sind bei bewehrten Blöcken eher selten. Die überwiegend vorkommenden Auffälligkeiten bei bewehrten Tunnelblöcken sind Abplatzungen, Hohlstellen/Fehlstellen und Auswaschungen. Mangelnde Betondeckung wurde hier nicht ausgewertet, da hier der Vergleich zu den unbewehrten Blöcken fehlen würde.

### 3.5 Beurteilung der Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen bei deutschen Straßentunneln

Die Auswertung der ausgeführten Projekte hat gezeigt, dass die Erfahrungen mit unbewehrten Innenschalen sehr unterschiedlich, aber tendenziell eher negativ sind. Die überwiegende Anzahl der Tunnel weist vergleichsweise viele Risse, Abplatzungen oder andere Auffälligkeiten in den unbewehrt hergestellten Bereichen auf. So entsteht insbesondere optisch ein sehr schlechter Eindruck dieser Bereiche. Auffällig ist, dass besonders in der jüngeren Vergangenheit hergestellte Tunnel wie die Tunnel auf der BAB A 71 (Tunnel Rennsteig und Hochwald), die neue Röhre des Tunnels Schwarzer Berg sowie der Tunnel Königshainer Berge besonders stark von Rissen, Abplatzungen etc. betroffen sind. Ob hier besonders extreme klimatische Bedingungen (z. B. große Temperaturschwankungen), geologische Randbedingungen (z. B. hohe tatsächlich aktivierte Gebirgsauflast) oder ausführungstechnische Fehler (z. B. Betontechnologie, Nachbar-

handlung) eine Rolle spielen, konnte letztlich nicht abschließend geklärt werden. Wahrscheinlich handelt es sich um eine Kombination aus verschiedenen Einflussfaktoren. Auffällig ist in jedem Fall, dass einige Tunnel eine deutliche Verschlechterung insbesondere des Rissbildes nach einigen Jahren des Betriebes zeigen (z. B. der Rennsteigtunnel). Hier scheint es auch nach vielen Jahren noch zu Lastumlagerungen und Verformungsbeanspruchungen zu kommen, die eine deutliche Verschlechterung des Zustandes und vor allem des optischen Erscheinungsbildes nach sich ziehen.

Wenn man über Risse und Abplatzungen an unbewehrten Innenschalen spricht, sollte man aber auch immer Folgendes bedenken: Insbesondere weisen viele Tunnel Risse auf, die auch bei sorgfältigster Planung und Ausführung unbewehrter Innenschalen systembedingt vorkommen können und die von daher auch nicht grundsätzlich als „Schaden“ oder „Mangel“ zu bewerten sind. Hier sind vor allem die Firstlängsrisse zu nennen. Die festgestellten Risse und Abplatzungen an den unbewehrten Innenschalblöcken haben alle keinen Einfluss auf die Standicherheit der Tunnel. Einflüsse auf die Gebrauchstauglichkeit können vorliegen, wenn sich durch geschlossene Rissysteme Bruchstücke aus der Tunnelinnenschale lösen können, die dann auf die Fahrbahn fallen. In diesen Fällen ist eine umgehende Rissanierung geboten. Hier kann dann auch von einem „Schaden“ oder „Mangel“ gesprochen werden. Ein anderer Fall mit Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit können Wasserzutritte sein, die aber mit Ausnahme des Grenztesnells Füßen nur sehr selten festgestellt werden. Ein Grund könnte die geringere Gefahr von Beschädigungen der Abdichtung durch die fehlende Bewehrung bei den unbewehrten Innenschalen sein. Einschrän-

kungen zur Dauerhaftigkeit ergeben sich durch Risse oder Abplatzungen in unbewehrten Innenschalen aufgrund der fehlenden Stahlarmierung nicht.

Der Vergleich bewehrter und unbewehrt ausgeführter Tunnelblöcke im selben Tunnel zeigt eindeutig eine geringere Anzahl und Größe der Risse und Abplatzungen an den bewehrten Tunnelblöcken.

In den meisten stark von Rissen gekennzeichneten Tunneln mit unbewehrter Innenschale sind bereits umfangreiche Verpresskampagnen zur Behandlung der Risse durchgeführt worden. Ob diese Instandsetzungsmaßnahmen, die meist vor Ablauf der Frist für Mängelansprüche nach VOB durchgeführt wurden, langfristig zur Verbesserung der Qualität und Stabilisierung des Rissbildes beitragen, konnte aus den vorliegenden Unterlagen nicht entnommen werden.

Für eine abschließende Bewertung der Wirtschaftlichkeit unbewehrter Tunnelinnenschalen empfehlen wir Kostenvergleiche zwischen einer bewehrten Variante und einer unbewehrten Variante. Es ist zu untersuchen, ob die Einsparungen durch die nicht eingebaute Bewehrung die Kosten für die Rissinstandsetzung übersteigen. Kostenvergleiche sind nicht Teil dieses Forschungsberichtes.

## 4 Schlussfolgerungen für das Regelwerk

### 4.1 Anwendung von unbewehrten Innenschalen

Die Anwendung von unbewehrten Innenschalen kann nur in Ausnahmefällen empfohlen werden. Voraussetzung ist das Vorliegen besonders günstiger Rahmenbedingungen hinsichtlich:

- Geologie: geringe Gebirgsauflast, keine nachdrängenden Lasten, kein druckhaftes Gebirge, symmetrische Belastung der Innenschale,
- Hydrogeologie: kein drückendes Wasser,
- Gebrauchstauglichkeitsanforderungen: Risse in bestimmter Größe werden zugelassen,
- Querschnittsgeometrie: möglichst gleichmäßig gekrümmtes Gewölbe mit großen Radien,

- Querschnittswechsel: Querschnittsverschneidungen, Querschlaganschlüsse etc. müssen bewehrt hergestellt werden,
- Kostenvorteile der unbewehrten Bauweise: deutlicher Kostenvorteil unter Berücksichtigung der Kosten für die Behandlung erwarteter Rissweiten,
- Blocklängen: Es wird die Ausführung maximal 10 m langer Blöcke empfohlen,
- Innenschalendicke: nach statischer Erfordernis, mindestens 35 cm (wie bei bewehrter Innenschale).

### 4.2 Rissvermeidung

Zur Vermeidung von Rissen in unbewehrten Innenschalen werden in [Spring97] einige Maßnahmen genannt, von denen viele bereits durch die Fortschreibung des Regelwerks [ZTV07] umgesetzt wurden. So wird bei unbewehrten Innenschalen auf eine möglichst ebene Spritzbetonrücklage verwiesen, was durch die generelle Forderung des besonders ebenen Abdichtungsträgers bereits seit Ende 2007 im Regelwerk verankert ist. Die Forderung nach einer Trennschicht zwischen Innen- und Außenschale ist bei abgedichteten Tunneln nach den ZTV-ING, Teil 5, Abschnitte 1 und 5 durch die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und die Schutzschicht immer gegeben (Regelbauweise). Auch betontechnologische Maßnahmen wie Ersatz des Zementes durch Flugasche, Nachbehandlung, Begrenzung der Frischbetontemperatur sowie Ausschallfristen von mind. 12 Std. sind in den ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 1 [ZTV07] bereits geregelt. Ein wichtiger Hinweis ist die Vermeidung von zu hohen Frühfestigkeiten des Betons, da hierdurch auch eine Rissbildung begünstigt wird. Die oben angesprochenen Maßnahmen greifen allerdings nur zur Minimierung ausführungstechnisch bedingter Risse in unbewehrten Innenschalen. Die Auswertung der Projekterfahrungen in Kapitel 3.2 hat aber gezeigt, dass die Risse meistens erst nach einigen Jahren auftreten.

Wenn Firstlängsrisse in unbewehrten Innenschalen erwartet werden, wird zur Verbesserung der statischen Verträglichkeit und besseren Optik der Firstlängsrisse in [Spring97] vorgeschlagen, eine Sollbruchstelle (z. B. durch eine in die Schalung eingelegte Dreikantleiste) in der Firste vorzusehen. Alternativ kann auch eine Scheinfuge in der Firstlinie durch einen mindestens 10 cm tiefen Fugenschnitt vorgesehen werden.

### 4.3 Rissbehandlung

Die Rissweiten ändern sich infolge von Temperatur und Feuchtigkeitsänderungen jahreszeitlich bedingt. So wird im Winter meist eine größere Rissweite als im Sommer gemessen [Spring97]. Daher empfiehlt es sich, Dokumentationen des Rissbildes im Winter auszuführen, um die maximalen Rissweiten zu erfassen.

Die Rissebehandlung sollte soweit möglich erst zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, zu dem keine größeren Veränderungen des Rissbildes mehr zu erwarten sind. Zur Feststellung dieses Zeitpunktes empfiehlt sich die regelmäßige Dokumentation von Rissweite und Risslänge für einige charakteristische Risse [DAUB07]. Dies kann im Rahmen der regelmäßigen Bauwerksprüfungen oder bei sich stark veränderndem Rissbild durch Sonderprüfungen erfolgen.

In [Pött93] wird aus statischer Sicht eine Rissbehandlung ab 1,0 mm Rissweite empfohlen, da darüber hinausgehende Rissweiten zu unverträglichen Gelenkrotationen führen, die sich dann statisch nicht mehr nachweisen lassen. In der Ril 853 [Bahn11] werden Rissweiten bis 1,2 mm als unkritisch angesehen.

Es wird empfohlen, die Rissbehandlung nach Ril 853, Modul 853.4004 zu Grunde zu legen. Die folgenden Regelungen werden empfohlen:

Immer zu verpressen sind

- Risse, die sich zusammen mit anderen Rissen oder Begrenzungsflächen zu einem zusammenhängenden Linienzug entwickelt haben. Hier besteht die Gefahr der Herauslösung von Bruchkörpern aus der Innenschale,
- linienförmige (nicht verzweigte) Radialrisse mit Rissbreiten  $> 2,0$  mm,
- linienförmige (nicht verzweigte) Firstlängsrisse, unregelmäßige Risse und Ulmenlängsrisse mit Rissweiten  $> 1,5$  mm,
- halbmondförmige Rissbildungen im Bereich der Blockfugen (generell unabhängig von der Rissweite),
- Risse mit Rissuferversätzen über 0,5 mm.

Bei Rissen, die die oben genannten Kriterien erfüllen bzw. die Grenzwerte überschreiten, wird empfohlen, von einem „Schaden“ oder „Mangel“ auszu-

gehen, der instandgesetzt werden sollte. Zur Rissverpressung empfiehlt sich die Verwendung bei der BAST gelisteter Produkte nach ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 5. Empfehlenswert sind Zementsuspensionen aus Feinstzement oder Epoxidharze. Bei der Wahl des Verpressmaterials muss bei unbewehrten Innenschalen nicht auf Aspekte des Korrosionsschutzes geachtet werden. Im Vordergrund steht der Kraftschluss.

### 4.4 Regelungen in den ZTV-ING

Es wird empfohlen, in den ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1 keine zusätzlichen Regelungen zu unbewehrten Innenschalen aufzunehmen. Unbewehrte Innenschalen sind keine Regelbauweise und sollten nur in Ausnahmefällen ausgeführt werden. Hierzu sollte nach wie vor eine Zustimmung im Einzelfall durch das BMVBS bzw. die Auftragsverwaltung der Länder erforderlich sein. Der bisher in Nr. 7.1 (1) enthaltene Richtlinientext: „In der Regel ist die Innenschale bewehrt vorzusehen. Für die Ausführung unbewehrter Innenschalen ist eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich“ sollte daher bei der zukünftigen Fortschreibung der ZTV-ING beibehalten werden. Weiterhin wird empfohlen, die in diesem Forschungsbericht herausgearbeiteten Randbedingungen und Empfehlungen für den Einsatz unbewehrter Innenschalen den Straßenaubauverwaltungen und Planern zugänglich zu machen.

## 5 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Innenschalen von Straßentunneln in geschlossener Bauweise werden in der Regel als Stahlbetonkonstruktion ausgeführt. Die Ausführung unbewehrter Innenschalen kann für den Bauherrn eine erhebliche Kostenersparnis bedeuten, da die Kosten für die Bewehrung und deren Einbau eingespart werden. Weiterhin ergeben sich durch die fehlende Bewehrung auch systembedingte Vorteile wie etwa eine geringere Beschädigungsgefahr für die bergseitige Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen oder eine fehlende Gefahr von Bewehrungskorrosion. Auch die Anforderungen an den baulichen Brandschutz können bei unbewehrten Innenschalen einfacher erfüllt werden: Durch die fehlende Stahlarmierung ist die Innenschale im Brandfall we-



niger empfindlich für hohe Temperaturen und lange Temperatureinwirkung.

Die im Rahmen dieses Projektes erfolgte Auswertung und Analyse bislang ausgeführter Tunnel mit unbewehrter Innenschale zeigen, dass in den unbewehrt hergestellten Bereichen teilweise eine sehr hohe Anzahl von Rissen und Betonabplatzungen aufgetreten ist. Die Risse mussten teilweise durch aufwändige Rissverpress-Kampagnen instandgesetzt werden. An exemplarisch betrachteten 2 Tunnelbauwerken weisen bewehrt hergestellte Blöcke im selben Tunnel eine vergleichsweise geringere Anzahl an Rissen und Abplatzungen als die unbewehrten Blöcke auf. Als Fazit aus den vorliegenden Erfahrungen der 6 detailliert betrachteten Straßentunnel kann der Einsatz von unbewehrten Innenschalen nur in Ausnahmefällen bei vorliegenden besonders günstigen Randbedingungen empfohlen werden. Diese Aussage gilt insbesondere für den Bereich des Haupttunnelquerschnitts. In untergeordneten Bauwerksteilen (wie z. B. Rettungsstollen) mit geringeren Anforderungen an das optische Erscheinungsbild und fehlender Verkehrsbeeinträchtigung durch eventuell erforderliche nachträgliche Instandsetzungsarbeiten kann eine unbewehrte Innenschale eventuell häufiger eine wirtschaftliche Lösung darstellen.

Entsprechende Kriterien für günstige Randbedingungen hinsichtlich einer unbewehrten Ausführung der Innenschale werden im vorliegenden Schlussbericht aufgeführt. Neben einer günstigen Geologie sind vor allem die Akzeptanz systembedingter Risse und ein deutlicher Kostenvorteil zu nennen. Bei der Berechnung des Kostenvorteils einer unbewehrten Lösung sind die Kosten für die Instandsetzung systembedingter Risse unbedingt mit einzu beziehen.

Als Grenzwerte für zulässige Rissweiten in unbewehrten Innenschalen wird die Anwendung der Vorgaben der Ril 853, Modul 853.4004 empfohlen.

Das Einlegen einer Trapezeleiste in der Firste beim Betonieren der unbewehrten Innenschalblöcke wird empfohlen. Damit kann ein geradliniger Firstriss erzeugt werden. Dies führt zu einer Verbesserung der Kinematik und des Tragverhaltens der Innenschale sowie zu einer Verbesserung des optischen Erscheinungsbildes.

Des Weiteren wird empfohlen, maximal 10 m lange Blöcke bei unbewehrten Innenschalen zuzulassen.

Die Innenschalendicke von unbewehrten Innenschalen sollte wie bei den bewehrten Innenschalen der Regellösung mindestens 35 cm betragen.

Bei der Entscheidung zugunsten einer unbewehrten Innenschale muss man mit der Entstehung von zumindest einigen charakteristischen Rissen rechnen. Durch entsprechende Sorgfalt bei der Planung und Ausführung und bei vorhandenen günstigen Randbedingungen können die Anzahl und Größe von Rissen und Betonabplatzungen minimiert werden.

Eine Ergänzung von Vorgaben für unbewehrte Innenschalen in den ZTV-ING wird nicht empfohlen. Eine unbewehrte Innenschale ist eine Sonderlösung für die weiterhin eine Zustimmung im Einzelfall beim BMVBS bzw. der zuständigen Auftragsverwaltung der Länder zu beantragen ist.

## 6 Literatur

- [Bahn07] Deutsche Bahn AG: Richtlinie 853 (Ril 853) – Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten. DB Netz AG, Frankfurt/Main. Ausgabe Januar 2007
- [Bahn11] Deutsche Bahn AG: Richtlinie 853 (Ril 853) – Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten. DB Netz AG, Frankfurt/Main. 5. Aktualisierung Februar 2011
- [Daub07] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis „Unbewehrte Tunnelinnenschalen“: Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen. Tunnel 5/2007
- [Maidl91] Ingenieurgesellschaft Prof. Maidl und Prof. Springenschmid: Betoninnenschalen für Tunnel an den Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn, Beurteilung und Behandlung von Rissen. Unveröffentlichter Forschungsbericht, erstattet an die DB München, September 1991
- [Pött93] PÖTTLER, R.: Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich. Beton- und Stahlbetonbau 88 (1993), Heft 6. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1993
- [PRÜF07] BMVBS: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Aus-

---

wertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF). Ausgabe 11/2007. Download: [www.bast.de](http://www.bast.de)

- [RVS04] ÖVBB: Richtlinie RVS 9.34 „Innenschalenbeton“. Hrsg.: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Wien, Ausgabe Mai 2004
- [SIA 104] SIA 197:2004: Projektierung Tunnel – Grundlagen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Ausgabe 10/2004
- [SIA 204] SIA 197/2:2004: Projektierung Tunnel – Straßentunnel. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Ausgabe 10/2004
- [Spring97] SPRINGENSCHMID, R., PLANNERER, M.: Firstrisse in der Innenschale großer Tunnel – Ursachen und Wege zur Vermeidung. Beton- und Stahlbetonbau 92 (1997), Heft 3, S. 68-72, und Heft 4, S. 109-112. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1997
- [ZTV-07] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5, Tunnelbau, Verkehrsblatt Verlag, 2007

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

### 2002

- B 35: Bewährung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken  
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt  
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität  
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger  
Krause, Wiggemhauser, Krieger € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken  
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

### 2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Weschpfennig € 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahn- tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht  
Eilers, Kähler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau  
Städig, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2  
Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung  
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

### 2004

- B 45: Erfahrungssammlungen:  
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile  
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken  
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen  
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brück- kenseilen und -kabeln  
Hemmer-Halswick € 13,00
- B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau  
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

### 2005

- B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken  
Steinauer, Scharnigg € 13,50

### 2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken  
Holst, Streicher, Gardej, Kohl, Wöstmann, Wiggemhauser € 15,00 -
- B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf- tung von Epoxidharz  
Raupach, Rößler € 13,50
- B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3  
Holst € 13,50

- B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln  
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50
- B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen  
Friedrich, Staack € 14,50
- B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
Tauscher € 14,50
- B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten- pflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

### 2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten- pflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50
- B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expo- sitionsklasse XF2  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50
- B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50
- B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel  
Sistenich € 14,50

### 2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme  
Schröder € 12,50
- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teiler- neuerung - Bewährung  
Schröder € 13,50
- B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutz- plankenpfosten  
Schröder, Staack € 13,00
- B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unter- füllstoff  
Eilers € 12,00
- B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50
- B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4  
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

### 2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50
- B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln  
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00
- B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straß- entunneln  
Blosfeld € 17,50

- B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. -  
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50 -
- B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln**  
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50
- B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen**  
Tauscher € 14,50

## 2010

- B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau**  
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen**  
Weschpfennig, Kropf, von Witzzenhausen € 13,50
- B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00
- B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk**  
Müller € 14,00
- B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand**  
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

## 2011

- B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems**  
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00 -
- B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Eurocodes**  
*Teil 1: DIN-FB 101 "Einwirkung auf Brücken" ↪*  
*Teil 2: DIN-FB 102 "Betonbrücken" ↪*  
*Teil 3: DIN-FB 103 "Stahlbrücken" ↪*  
*Teil 4: DIN-FB 104 "Verbundbrücken" ↪*  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. -  
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, -  
Schrack, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,  
Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50 -
- B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50
- B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spannliedführung**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik (in Vorbereitung)
- B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln**  
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00
- B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse**  
Müller, Vogel, Neumann € 14,50
- B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand**  
Freundt, Böning € 16,00

- B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken**  
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00
- B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)**  
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00
- B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung**  
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50
- B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton**  
Nguyen, Freitag € 13,50

## 2012

- B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie**  
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00
- B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte "Stahlbrücken" und "Verbundbrücken" an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen**  
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50
- B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke**  
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50
- B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard**  
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

## 2013

- B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung**  
Freundt, Böning € 15,00
- B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel**  
Kaundinya € 14,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Fachverlag nw  
in der Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Komplettverzeichnis erhältlich.