

# **Einsatzbereiche endgültiger Spritzbeton- konstruktionen im Tunnelbau**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 46**



**bast**

# **Einsatzbereiche endgültiger Spritzbeton- konstruktionen im Tunnelbau**

von

Frank Heimbecher  
Wilhelm Decker  
Hans-Günter Faust

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 46**

**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, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 02230:**  
Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau

### Herausgeber

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

### Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9293

ISBN 3-86509-089-3

Bergisch Gladbach, Januar 2004

## Kurzfassung – Abstract

### Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau

Beim Einsatz endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Straßentunnelbau kommen prinzipiell zwei Anwendungsfälle in Betracht:

1. Einsatz als einschalige Konstruktionen, d. h., die Spritzbeton-Außenschale (1. Lage) stellt im Verbund mit einer 2. Spritzbetonlage die endgültige Konstruktion dar. Die Außenschale muss dabei dauerhaft Tragfunktionen übernehmen.
2. Einsatz als zweischalige Spritzbetonkonstruktionen, bei der anstelle des Schalbetongewölbes der Regelbauweise eine Spritzbetonschale als Innenschale aufgebracht wird. Außen- und Innenschale wirken getrennt voneinander, die Außenschale übernimmt im Endzustand keine Funktionen.

Die Einsatzbereiche, aber auch -grenzen beider Anwendungsfälle sind für den Straßentunnelbau in Deutschland bislang weitestgehend unklar. Abgesicherte Erfahrungen liegen nur wenige vor. Erste Einsätze zeigen jedoch, dass für beide Fälle wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten existieren. Entscheidend ist dabei allerdings die Frage, welche dauerhafte Ausführungsqualität mit diesen Konstruktionen im Vergleich zur zweischaligen Regelbauweise überhaupt erreicht werden kann. Um diese und andere Fragen beantworten zu können, wurden im Zuge der Ausführung des Rennsteigtunnels (BAB A71) beide Anwendungsfälle näher untersucht: der erste Fall anhand einer von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) konzipierten Versuchsstrecke, der zweite Fall anhand von Ausführungen, die auf Initiative der am Rennsteigtunnel ausführenden Arbeitsgemeinschaft zurückgehen.

Im vorliegenden Bericht werden die Untersuchungen, die im Rahmen der Ausführungen zur Beurteilung der Einsatzbereiche durchgeführt wurden, sowie deren Ergebnisse dargestellt.

Grundlage der Untersuchungen bildet dabei der Kenntnisstand, der in beiden Anwendungsfällen derzeit vorliegt.

Eine Analyse ausgeführter Bauwerke zeigt, dass sich die meisten Einsätze einschaliger Konstruktionen

auf den U-Bahn- und Stadtbahnbau konzentrieren. Hier liegen zwar Erfahrungen vor, diese sind allerdings, insbesondere wegen der größeren Ausbruchsquerschnitte, nur zum Teil auf den Straßentunnelbau übertragbar. Dagegen sind erste Anwendungsfälle zweischaliger Spritzbetonkonstruktionen bereits im Bahn- und Straßentunnelbau zu finden.

Zur Untersuchung der Einsatzbereiche einschaliger Spritzbetonkonstruktionen wurden im Rahmen der Versuchsstrecke am Rennsteigtunnel die Ausführbarkeit, das Tragverhalten und das Dichtheitsverhalten verschiedener einschaliger Varianten untersucht. Dazu war es erforderlich, die straßentunnel-spezifischen und hydrogeologischen Randbedingungen zu formulieren, die in die Konzeptionierung der Versuchsstrecke einfließen mussten. Anhand der Ergebnisse ließen sich Empfehlungen ableiten, die bei einer zukünftigen Anwendung einschaliger Spritzbetonkonstruktionen berücksichtigt werden sollten. Neben reinen Spritzbetonkonstruktionen wurden dazu vergleichend auch geschaltete Konstruktionen in die Untersuchungen einbezogen.

Die zweischaligen Spritzbetonkonstruktionen kamen in den Kalottenbereichen der beiden Lüfterkavernen sowie in einem der beiden Zuluftstollen des Rennsteigtunnels zum Einsatz.

Durch die Begleitung der Planungen und Ausführungen konnte aufgezeigt werden, welche wesentlichen Zusatzmaßnahmen bei diesen Ausführungsvarianten zu beachten sind, um eine vergleichbare Qualität zur Regelbauweise zu erhalten.

Insgesamt konnte durch die Untersuchungen gezeigt werden, dass beide Anwendungsfälle ihre Einsatzbereiche, aber auch -grenzen aufweisen. So lässt sich eine Anwendung einschaliger Spritzbetonkonstruktionen nur in den Tunnelbereichen empfehlen, die nicht unter ständigem Straßenverkehr stehen, d. h. primär in Zuluft- oder in Fluchtstollen. Die Begründungen dazu und die geeigneten Konstruktionen werden im Bericht dargelegt. Die zweischaligen Spritzbetonkonstruktionen können unter Beachtung der aufgeführten Zusatzmaßnahmen und einer hohen Ausführungsqualität gerade im Bereich von Aufweitungsbereichen oder anderen schalungsaufwändigen Bereichen eine

technische Alternative zur zweischaligen Regelbauweise darstellen. Die Frage der wirtschaftlichen Vorteile zweischaliger Spritzbetonkonstruktionen gegenüber der Regelbauweise lässt sich dabei allerdings nur objektspezifisch beantworten.

### **Ranges of application of final shotcrete constructions in road tunnelling**

With the use of final shotcrete constructions in road tunnelling there are principally considered two cases of use:

1. Use as one-shell constructions, that means the shotcrete outer lining (first layer) represents the final construction in connection with a second shotcrete layer. Here, the outer lining has to take on load-bearing functions permanently.
2. Use as double-shell shotcrete constructions, where a shotcrete shell as inner lining is used instead of the cast arch of the usual construction method. Outer and inner lining work separately, the outer lining does not have any functions in the final state.

Until now the ranges of application, but also the limits of both cases of use are almost unclarified for the road tunnelling in Germany. There are only few covered experiences. First uses show however that for both cases economic possibilities of use exist. Here, it is important to know which permanent carrying-out quality can be reached with these constructions in comparison with the double-shell standard construction method anyway. For answering these and other questions both cases of use were examined more closely in the course of the construction phase of the Rennsteigtunnel (BAB A71). The first case with a test area drafted by the Federal Highway Research Institute (BAST), the second case with constructions which go back on the initiative of the consortium at the Rennsteigtunnel.

In the present report the examinations, made in the scale of the construction for judging the ranges of application are shown as well as their results.

The basis of the examinations is the state of knowledge which is present in both cases of use at the moment.

An analysis of carried-out buildings shows that the most uses of one-shell constructions concentrates on the underground and on the suburban railway. Here, experiences are present but these are only

partly transferable to the road tunnel construction, especially because of the bigger excavated cross-sections. In contrast to this, first cases of use of double-shell shotcrete constructions can already be found in railway and road tunnelling.

For examining the ranges of application of one-shell shotcrete constructions the practicability, the structural behaviour and the sealing behaviour of different one-shell variants were examined at the test area at the Rennsteigtunnel. Therefore it was necessary to formulate the road tunnel specific and hydro-geological marginal conditions which had to be integrated into the conception of the test area. With these results it was possible to derive recommendations which should be taken into consideration for a future use of one-shell shotcrete constructions. Apart from pure shotcrete constructions also cast constructions were comparatively integrated into the examinations.

The double-shell shotcrete constructions were used in the top headings of the two fan caverns as well as in one of the two air supply galleries of the Rennsteigtunnel.

By accompanying the plannings and the carrying outs it could be demonstrated which essential additional measures are to be taken into consideration in these carrying out variants for getting a comparable quality to the standard construction method.

All in all, with the examinations it could be shown that both ways of use show their ranges but also the limits of their application. Thus, a use of one-shell shotcrete constructions could only be recommended in tunnels which are not frequently under traffic that means primarily in supply air galleries or in escape galleries. The reasons for this and the suitable constructions are explained in the report. The double-shell shotcrete constructions can be a technical alternative to the double-shell standard construction method considering the listed additional measures and the high carrying out quality especially in the field of enlargement areas or other areas with elaborate formworks. The question of economic advantages of double-shell shotcrete constructions in contrast to the standard construction method could only be answered object-specifically.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	7	4.3.1	Messquerschnitte	20
1.1	Allgemeines	7	4.3.2	Messgeber	20
1.2	Problemstellung	7	4.3.2.1	Temperaturgeber	20
1.3	Zielsetzung	7	4.3.2.2	Dehnungsgeber	20
<b>2</b>	<b>Bisheriger Kenntnisstand</b>	8	4.3.3	Messergebnisse	21
2.1	Vorschriftenlage	8	4.3.3.1	Temperaturmessungen	21
2.1.1	ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1	8	4.3.3.2	Dehnungsmessungen	23
2.1.2	Richtlinie 853 der DB AG	8	4.4	Visuelle Untersuchungen	26
2.2	Erfahrungen aus Einsätzen endgültiger Spritzbetonkonstruk- tionen	9	4.4.1	Ausführung	26
2.2.1	1-schalige Spritzbeton- Konstruktionen	9	4.4.1.1	Einbau der 1. Lage	26
2.2.1.1	U-Bahn München, Baulos U6 West-5	9	4.4.1.2	Einbau der 2. Lage	26
2.2.1.2	U-Bahn Bielefeld, Baulos 2312	10	4.4.2	Dichtheit	28
2.2.1.3	Stadtbahn Gelsenkirchen	11	4.4.2.1	Dichtheit nach Einbau der 1. Lage	28
2.2.1.4	Kehrtunnel Isenthal	11	4.4.2.2	Dichtheit nach Einbau der 2. Lage	29
2.2.1.5	Sicherheitstunnel Mont Terri	12	4.5	Schlussfolgerungen	31
2.2.1.6	Beurteilung	12	4.5.1	Ausführung	31
2.2.2	2-schalige Spritzbeton- Konstruktionen	13	4.5.2	Tragfähigkeit	31
2.2.2.1	Fluchtstollen Fernthaltunnel	13	4.5.3	Gebrauchstauglichkeit	32
2.2.2.2	Straßentunnel Bad Wildbad	13	4.5.3.1	Erreichbare Dichtheitsklasse im Endzustand	32
2.2.2.3	Beurteilung	14	4.5.3.2	Verbesserungspotenzial	32
<b>3</b>	<b>Randbedingungen</b>	14	<b>5</b>	<b>2-schalige Ausführungen</b>	32
3.1	Straßentunnelspezifische Randbedingungen	14	5.1	Konstruktion	33
3.2	Hydrogeologische Randbe- dingungen	15	5.1.1	Herstellung im Bereich der Zuluftstollen	33
<b>4</b>	<b>1-schalige Versuchsstrecke</b>	15	5.1.2	Zusatzmaßnahmen	34
4.1	Geologisch/hydrologische Verhältnisse	15	5.2	Erfahrungen	35
4.1.1	Geologie	16	5.2.1	Ausführbarkeit	35
4.1.2	Hydrologie	16	5.2.2	Dichtheit	36
4.2	Konstruktion	16	5.2.3	Wirtschaftlichkeit	36
4.2.1	Schalenvarianten	17	5.3	Schlussfolgerungen	37
4.2.2	Sicherungsmittel	17	<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen</b>	37
4.2.3	Spritzbetonrezeptur	18	<b>Literatur</b>		40
4.2.4	Stahlfasern	18			
4.2.5	Fugenbereiche	18			
4.2.6	Entwässerung	19			
4.3	Messtechnische Untersuchungen	20			



# 1 Einleitung

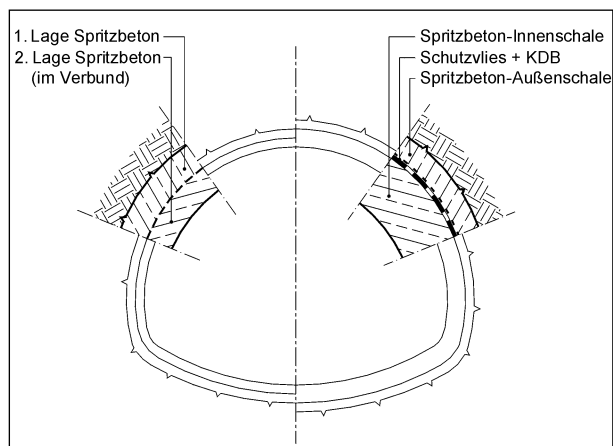
## 1.1 Allgemeines

Im bergmännischen Straßentunnelbau kommt als Regelbauweise die zweischalige Bauweise mit einer Außen- und Innenschale ohne Verbundwirkung zum Einsatz. Während die Außenschale als eine verrottbare Sicherung von relativ kurzer Lebensdauer angesehen wird und bei der statischen Nachweisführung für den Endzustand unberücksichtigt bleibt, stellt die Innenschale das langfristig tragende Tunnelbauwerk dar, welches die Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit auf Dauer zu erfüllen hat. Die Innenschale wird im Regelfall blockweise in Schalbeton hergestellt und durch eine Kunststoffdichtungsbahn sowie ein Schutz- und Dränagevlies von der Außenschale getrennt. Anstehendes Bergwasser wird in der Regel durch ein Entwässerungssystem gefasst und drucklos abgeleitet.

## 1.2 Problemstellung

Die in jüngster Zeit erzielbaren Qualitätssteigerungen bei der Herstellung einer Spritzbetonschale haben, mit dem Bestreben, Tunnelstrecken wirtschaftlicher herzustellen, zu der Überlegung geführt, den Spritzbeton nicht nur zur vorübergehenden Sicherung, sondern auch dauerhaft zur endgültigen Sicherung heranzuziehen. Dabei kommen prinzipiell zwei Anwendungsfälle in Betracht (Bild 1-1):

Der erste Anwendungsfall stellt das auch als einschalige Bauweise bekannte Konstruktionsprinzip



**Bild 1-1:** Endgültige Spritzbetonkonstruktionen (links: 1-schalige Bauweise, rechts: 2-schalige Bauweise)

dar. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass die erste Lage (bisher Außenschale) im Verbund mit der zweiten Lage (bisher Innenschale) im Endzustand Tragfunktionen auch rechnerisch übernimmt und so zu einer erheblichen Materialeinsparung und damit Reduzierung der Herstellungskosten beiträgt. Da der Einbau einer Kunststoffdichtungsbahn aufgrund der erforderlichen Verbundwirkung der beiden Lagen nicht möglich ist, muss die Dichtigkeit allein durch die Spritzbetonschale gewährleistet werden.

Die Anwendungsmöglichkeiten bzw. -grenzen der einschaligen Bauweise im Straßentunnelbau sind noch weitestgehend unklar. Hier ist vorwiegend die Frage der erreichbaren Dichtigkeit der Schalenkonstruktion unter Berücksichtigung der geologisch-hydrologischen Randbedingungen zu klären. Zudem müssen im Straßentunnelbau erhöhte Anforderungen an die Oberflächengestaltung der Schaleninnenseite berücksichtigt werden, was die Frage nach generellen Einsatzgrenzen aufwirft.

Als zweiter Anwendungsfall ist bei der zweischaligen Bauweise die Ausführung der Innenschale als Spritzbeton- anstelle einer sonst üblichen Schalbetonkonstruktion zu betrachten. Diese Bauweise kann wirtschaftlich interessant sein für schalungsaufwändige Sonderquerschnitte wie z. B. Lüfterkavernen oder Aufweitungsbereiche, bei denen kein Gewölbeschalwagen zum Einsatz kommen kann.

Daher ist man bestrebt, gerade für die Ausführung dieser Bereiche neue, kostengünstigere Bauverfahren einzusetzen, ohne dabei allerdings Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen. Im Zuge der Ausführung des Straßentunnels Rennsteig kam daher im Bereich der beiden Lüfterkavernen und in einem der beiden Zuluftstollen eine direkt auf die Abdichtung aufgebrachte Spritzbetoninnenschale als endgültige Konstruktion zum Einsatz. Erfahrungen mit diesem Bauverfahren liegen bislang bei einem Straßentunnel in Baden-Württemberg und einem Bahntunnel vor. Die am Rennsteigtunnel anzutreffenden großen Dimensionen der Lüfterkavernen stellen allerdings neue Anforderungen an die Konstruktion und Ausführungsqualität einer gespritzten Innenschale.

## 1.3 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der beiden Anwendungsfälle zu erarbeiten. Für die einschalige Bau-



weise war dazu eine Versuchsstrecke zu planen, auszuführen und messtechnisch sowie visuell zu untersuchen, bei der unterschiedliche Spritzbetonvarianten als endgültige Konstruktionen zum Einsatz kommen sollten. In Verbindung mit den Ausführungen zum zweiten Anwendungsfall sollte dadurch das gesamte Spektrum der möglichen Spritzbetonkonstruktionen im bergmännischen Tunnelbau hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten als endgültige Konstruktionen beurteilt werden können.

Gerade im Hinblick auf die ggf. vorgesehene bauliche Nachrüstung von Straßentunneln in Form paralleler Fluchtstollen wäre somit eine Entscheidungsgrundlage gegeben, die zur objektspezifischen Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von Spritzbeton für endgültige Konstruktionen herangezogen werden kann.

## 2 Bisheriger Kenntnisstand

Eine Analyse des bisherigen Kenntnisstandes sollte aufzeigen, wie sich gerade im Hinblick auf einen zukünftigen Einsatz endgültiger Spritzbetonkonstruktionen die derzeitige Vorschriftenlage in Deutschland darstellt und inwieweit positive, aber auch negative Erfahrungen aus Einsätzen endgültiger Spritzbetonkonstruktionen bei den Verkehrsträgern Straße und Bahn vorliegen.

### 2.1 Vorschriftenlage

Die für den bergmännischen Tunnelbau maßgebenden Regelwerke der Baulastträger stellen die seit dem 01.05.03 verbindlich im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen eingeführten Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5 „Tunnelbau“, Abschnitt 1 „Geschlossene Bauweise“ [16] sowie bei der Deutschen Bahn AG die mit dem Eisenbahn-Bundesamt abgestimmte Richtlinie 853 (Rili 853) dar, die zum 01.06.02 eingeführt wurde [17].

#### 2.1.1 ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1

Im Teil 5 „Tunnelbau“, Abschnitt 1 „Geschlossene Bauweise“ der ZTV-ING [16] wird als Regelbauweise die zweischalige Bauweise vorgesehen. Die Trennung der Außen- von der Innenschale erfolgt

entweder durch die Kunststoffdichtungsbahn oder bei einer ausschließlichen Abdichtung durch eine wasserundurchlässige Betonkonstruktion (WUB-KO) durch den Einbau einer Trennschicht (z. B. Folie oder Vlies). Zudem hat bei der Verlegung der Bewehrung die Befestigung so zu erfolgen, dass kein Verbund zwischen Spritzbeton-Außenschale und Innenschale entsteht. Regelwerksanforderungen zur einschaligen Bauweise existieren bislang nicht.

Ähnlich verhält es sich im zweiten Anwendungsfall, allerdings schließen die Anforderungen an die Konstruktion und Herstellung der Innenschale die Ausführung einer Spritzbeton-Innenschale nicht explizit aus.

#### 2.1.2 Richtlinie 853 der DB AG

Auch die Vorschrift für Bahntunnelbauwerke sieht als Regelbauweise die zweischalige Bauweise vor, d. h., es erfolgt eine strikte Trennung der Spritzbeton-Außenschale von der Innenschale [17]. Dieses soll entweder durch den Einbau der einlagigen oder doppelagigen Kunststoffdichtungsbahnen oder bei einer ausschließlichen Abdichtung mit einer Konstruktion aus wasserundurchlässigem Schalbeton durch den Einbau von Gleitschichten zwischen der Außen- und Innenschale erreicht werden.

Beim Bau von neuen Tunneln darf Spritzbeton in besonderen Fällen, z. B. trockenem Gebirge, für den endgültigen Ausbau eingesetzt werden, wenn dafür eine unternehmensinterne Genehmigung erteilt wurde. Der Spritzbeton für den Ausbau muss bewehrt sein und eine Mindestdicke von 7 cm aufweisen. Im Spritzbeton für den endgültigen Ausbau sich einstellende Risse über 0,3 mm Breite sollen verpresst werden. Dabei ist derzeit noch die ZTV-Riss '93 zu beachten. Bei außergewöhnlichen Beanspruchungen oder bei wasserführenden Rissen sollen auch Risse bis 0,3 mm Breite verpresst werden. Diese Vorgaben werden unabhängig eines Einsatzes von Spritzbeton als endgültigen Ausbau bei 1- oder 2-schaligen Konstruktionen aufgeführt.

Anwendungen 1-schaliger Spritzbetonkonstruktionen auf den Neubaustrecken der DB AG sind bislang, soweit bekannt, nicht vorhanden und auch nicht geplant. Anwendungen im Bahntunnelbau, bei denen eine 2-schalige Spritzbetonkonstruktion mit einer gespritzten Innenschale ausgeführt wurde, werden in Kapitel 2.2.2 behandelt.

## 2.2 Erfahrungen aus Einsätzen endgültiger Spritzbetonkonstruktionen

Im Folgenden ist das Ergebnis einer Recherche zu den Erfahrungen dargestellt, die derzeit zu beiden Anwendungsfällen vorliegen.

### 2.2.1 1-schalige Spritzbeton-Konstruktionen

Die Analyse ausgeführter Straßen- und Bahntunnelbauwerke zum ersten Anwendungsfall ergab, das bislang die einschalige Bauweise im Straßen- und auch im Bahntunnelbau in Deutschland nicht oder nur wenig zum Einsatz kam. Daher wurden auch die Erfahrungen analysiert und ausgewertet, die im Zuge der Ausführung einschaliger Konstruktionen beim U- und S-Bahn-Bau und internationalen Bauwerken gewonnen wurden (Tabelle 2-1).

Die Ausführung einschaliger Konstruktionen begann in Deutschland im Jahre 1981. Seitdem wurden in verschiedenen Strecken unterschiedliche Konstruktionen ausgeführt. Vergleiche zwischen den Konstruktionen sind aufgrund der wechselnden geologisch-hydrologischen Verhältnisse nur schwer möglich. Außerdem war der Entwicklungsstand bzgl. der Verfahrenstechnik und der Materialtechnologie aufgrund der verschiedenen Aus-

führungszeitpunkte jeweils sehr unterschiedlich. Speziell in den letzten Jahren wurden in diesen Bereichen zudem wesentliche Fortschritte erzielt. Die meisten Erfahrungen zur einschaligen Bauweise liegen aus dem Stadtbahnbau vor, bei dem die Tunnelröhren mit einem Fullround-Schalwagen druckwasserhaltend hergestellt wurden. Zum Vergleich sind in Tabelle 2-1 die einschaligen Ausführungen aufgeführt, bei denen Schalbeton als zweite Lage zum Einsatz kam. Nachfolgend werden die Erfahrungen dargestellt, die bei Einsätzen endgültiger Spritzbetonkonstruktionen sowohl national als auch international gewonnen wurden.

#### 2.2.1.1 U-Bahn München, Baulos U6 West-5

Die Versuchsstrecke (Bauzeit 1991) liegt im Bereich einer trompetenförmigen Aufweitung des eingleisigen Querschnittes von 38 auf 52 m<sup>2</sup>. Die Gebirgsüberdeckung beträgt ca. 8 m, der normale Grundwasserstand liegt 3 m über der Tunnelsohle, der höchste Grundwasserstand war in der Tunnelfirste anzunehmen. Der Regelquerschnitt in Ulme und Firste besteht aus einer 15 cm dicken Spritzbetonschicht, die im Endzustand zur statischen Mitwirkung herangezogen wird, sowie zwei weiteren je 10 cm dicken Spritzbetonschichten (Bild 2-1). Der

Baulos	Bauzeit	Querschnitt	Länge [m]	Max. Überd. [m]	Wasserdruck ü.F. [m]	Schalenaufbau 1. Lage	Schalenaufbau 2. Lage	Schalendicke (gesamt)
Bochum (D1/C1a)	1981-1983	U-Bahn	1000	10	0,5	12 cm Spritzbeton	25 cm Schalbeton	37 cm
Bochum (D6)	1984-1987	U-Bahn	500	6	0,5	14 cm Spritzbeton	25 cm Schalbeton	39 cm
Bielefeld (2312)	1987-1989	U-Bahn	808	10	0,6	15 cm Spritzbeton	25 cm Schalbeton	40 cm
Dortmund (K6a)	1989-1990	U-Bahn	80	9,3	0	15 cm Spritzbeton	25 cm Stf.-Schalbeton	40 cm
Dortmund (S4)	1989-1992	S-Bahn	60	19	1,2	20 cm Spritzbeton	35 cm Stf.-Schalbeton	55 cm
<b>München (U6)</b>	<b>1991</b>	<b>U-Bahn</b>	<b>60</b>	<b>7,5</b>	<b>0</b>	<b>15 cm Spritzbeton</b>	<b>2 x 10 cm Spritzbeton</b>	<b>35 cm</b>
Bielefeld (2312)	1987-1989	U-Bahn	104	10	0,6	15 cm Stf.-Spritzbeton	10 cm Stf.-Spritzbeton	25 cm
Gelsen- kirchen	1981	U-Bahn	100	8	0,5	5 cm Mörtel + 12,5 cm Spritzb.	12,5 cm Spritzbeton	30 cm
Kehrtunnel Isenthal	1993-1995	Straße (2-spurig)	320	15	0	5 cm Spritzbeton Bewehrungsnetz, 5 cm Spritzbeton	5 cm Spritzbeton Bewehrungsnetz, 5 cm Spritzbeton	20 cm (Schweiz)
Sicherheits- tunnel Mont Terri (Schweiz)	1991 (1-spurig)	Straße	870	380	0	15 cm Spritzbeton	10-12 cm Stf.-Spritzbeton, 5 cm Spritzbeton	30-32 cm

Tab. 2-1: Übersicht ausgeführter Tunnelbauwerke in 1-schaliger Bauweise (fett gedruckt: 1-schalige endgültige Spritzbetonkonstruktionen)

Sohlbereich wurde konventionell in 2-schaliger Bauweise hergestellt (Bild 2-2). Der Übergang 1-/2-schalig wurde mit Hilfe eines längs laufenden Fugenbandes ausgeführt.

Eine Rissaufnahme der fertigen Tunnelstrecke im Bereich der 60 m langen einschaligen Versuchsstrecke ergab vor allem einige Risse im Bereich der Aufweitung des Querschnittes. Dies ist jener Bereich, der zuletzt aufgespritzt wurde und an dem die größten Schichtdicken auftraten. Viele der Risse waren trocken, einige jedoch wasserführend. Der Aufwand für die Rissverpressung lag in der Bandbreite des Aufwandes für den konventionellen zweischaligen Ausbau. Zusammenhänge zwischen den aufgetretenen Rissen und der Lage der Gitterbögen sowie sonstiger Einbauten waren nicht feststellbar. Die Risse wiesen Breiten von 0,3 bis 0,5 mm an der Luftseite und 0,0 bis 0,3 mm an der

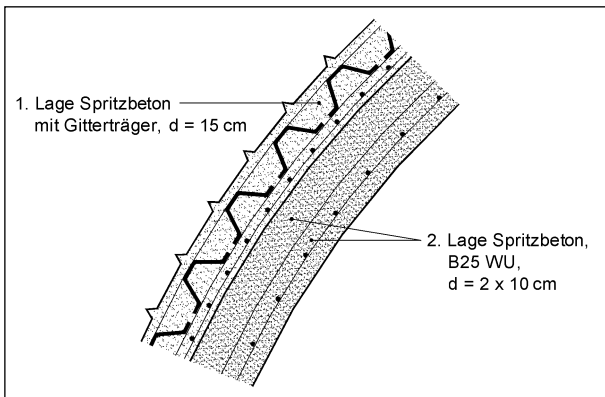


Bild 2-1: Schalenaufbau beim Baulos U6 in München

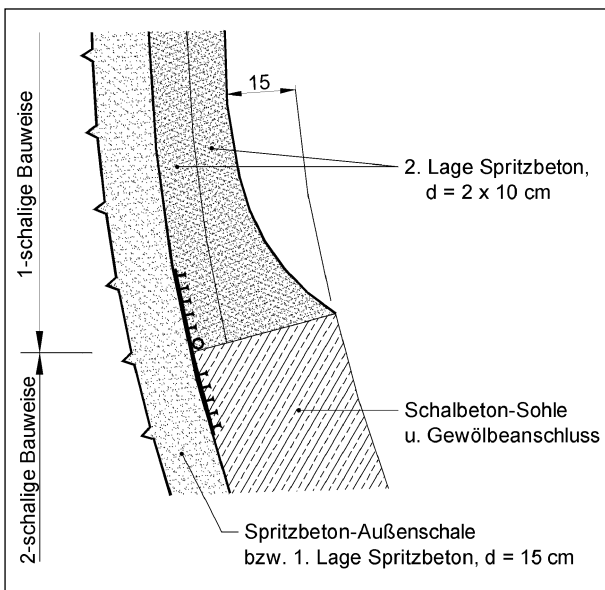


Bild 2-2: Übergangskonstruktion Gewölbe-/Sohlbereich beim Baulos U6 in München

Bergseite auf. Für ihre Erklärung wurde eine Nachrechnung durchgeführt [8]. Danach hätte zur Vermeidung der Risse die Längsbewehrung auf die tatsächlich zur Ausführung kommenden unterschiedlichen Schichtdicken bemessen bzw. die Schichtdicken aus diesem Grund und zur Vermeidung von Temperaturzwangsspannungen einheitlich begrenzt und entsprechend der rechnerischen Ansätze eingehalten werden müssen.

2.2.1.2 U-Bahn Bielefeld, Baulos 2312

Im Zuge der Erstellung des Bauloses 2312 der U-Bahn Bielefeld wurde 1988 eine 104 m lange Demonstrationsstrecke in einschaliger Bauweise hergestellt. Diese Ausführungsvariante wurde als Sondervorschlag ausgeführt. Die erste Lage besteht aus 15 cm dickem konventionellem Trockenspritzbeton (ohne Faserzugabe) mit Gitterträgern und die zweite Lage aus einer 10 cm dicken fugenlosen Stahlfaserspritzbetonlage aus Nassspritzbeton mit geraden und geriefelten Drahtfasern (Wirecon, 70 kg/m<sup>3</sup>). Die Gitterträger wurden so niedrig ausgebildet, dass sie in der ersten Lage vollständig eingespritzt werden konnten. Hierdurch sollten Wasserwegigkeiten entlang der Gitterträger vermieden werden. Der Querschnitt im Bereich der Demonstrationsstrecke wurde größer ausgelegt, um im Falle der Wasserundichtigkeit eine zusätzliche Innenschale einbauen zu können [12].

Nach einer Begehung am 03.02.99 durch einen der Verfasser kann Folgendes festgehalten werden:

Im Bereich der Demonstrationsstrecke mussten nur an wenigen Stellen Nacharbeiten durchgeführt

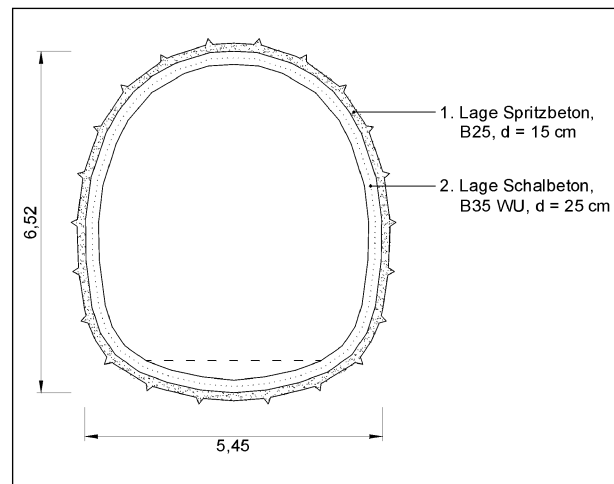
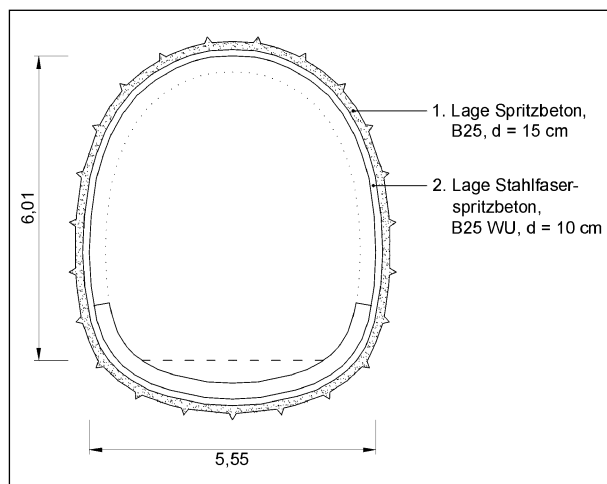


Bild 2-3: 1-schaliger Querschnitt des U-Bahnlozes 2312 in Bielefeld (2. Lage Schalbeton)

werden. Hier haben die Stahlfasern die prognostizierte risseverteilende Wirkung erzielt. Einzelne Risse sind nicht zu verzeichnen. Feuchtstellen sind im Bereich der Gitterträger deutlich zu erkennen. Hier ist die Spritzbetonoberfläche weiß und rostbraun (keine Korrosion) verfärbt. Jedoch ist die Menge des zutretenden Wassers sehr gering, da die Risse durch Einschwemmungen von Kalk und Erdreich einem Selbstheilungsprozess unterworfen sind. Die Strecke kann insgesamt als erfolgreiche Anwendung einer einschaligen Spritzbetonkonstruktion bezeichnet werden. Die auf der Leibung sichtbaren Stahlfasern waren zwar angerostet, Betonabplatzungen aufgrund der Rostbildung waren allerdings nicht zu beobachten. Vom Einbau einer zusätzlichen Innenschale kann daher abgesehen werden. Gleichzeitig weist das Ergebnis auf Schwachstellen in der Konstruktion hin. Der damals geforderte bündige Abschluss der Gitterträger mit der tunnelseitigen Oberfläche der 1. Spritzbetonlage hat die Wasserwegigkeit in der Gesamtschale stark begünstigt. Daher ist in jedem Fall eine tunnelseitige Überdeckung der Gitterträger von mind. 20 mm vorzusehen, um eine kompakte Einlagerung der Gitterträger in den Spritzbeton der 1. Lage zu gewährleisten. Die Positionierung der Gitterträger mit dem Einzelgurt zur Bergseite hin, hat sich nicht bewährt. Der Grund für diese Maßnahme war, dass die Wasserwegigkeit herabgesetzt wird. Diese konnte nicht nachgewiesen werden. Außerdem wird die Stabilität beim Aufstellen des Trägers nachteilig beeinflusst. Weiterhin ist der Gitterträger in traditioneller Aufstellung mit dem bergseitig liegenden Doppelgurt wesentlich besser einzuspritzen.



**Bild 2-4:** 1-schaliger Querschnitt des U-Bahnlooses 2312 in Bielefeld (2. Lage Stf.-Spritzbeton)

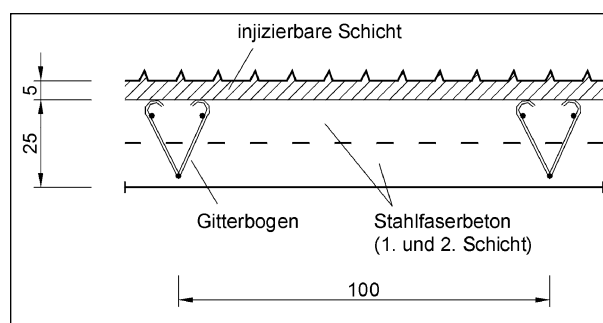
### 2.2.1.3 Stadtbahn Gelsenkirchen

Die Auskleidung des eingleisigen Stadtbahn-Tunnels in Gelsenkirchen (Bauzeit 1981) besteht aus einem gebirgsseitig aufgetragenen porösen Mörtel von ca. 5 cm Dicke und aus zwei nachfolgend eingebauten jeweils etwa 12,5 cm dicken Spritzbetonlagen (Bild 2-5). Die Mörtelschicht diente zur nachträglichen Injektion, um die Wasserundurchlässigkeit der Tunnelschale sicherzustellen. Die Dichtheit der infolge des abgestuften Vortriebs zahlreichen Arbeitsfugen wurde durch versetzte Anordnung der Fugen der ergänzenden Spritzbetonschicht gegenüber der vorlaufenden ersten Schicht erhöht. Eine Konzentration von Feuchtstellen zeichnete sich bereits beim Vortrieb im Bereich der Gitterträger ab, weil sich trotz der in Vorversuchen nachgewiesenen dichten Umhüllung der Bewehrungsstäbe entlang der Diagonalbügel der Gitterbogen eine höhere Wasserwegigkeit einstellte als in den übrigen Spritzbetonbereichen. Dadurch entstand optisch der Eindruck, als werde die Tunnelschale durchlässiger. Dann aber setzte die Selbstheilung des Betons ein, so dass nach etwa einem halben Jahr nach Fertigstellung der Großteil der Undichtigkeiten zugesintert war. Zurück blieben nur noch wenige Feuchtstellen [9]. Die Versuche zur Herstellung einer aufgespritzten Dichthaut unter Verwendung von Kunststoffen führten nicht zum Erfolg [10].

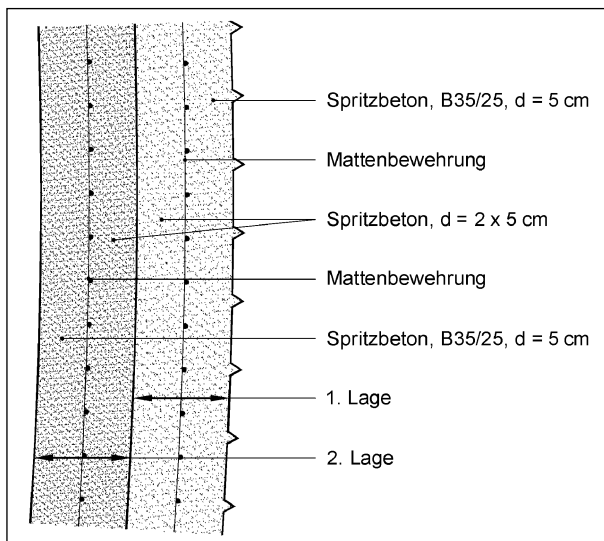
### 2.2.1.4 Kehrtunnel Isenthal

Der 320 m lange Straßentunnel Isenthal (Schweiz, Bauzeit 1993-1995) mit einer Fahrbahnbreite von 6,5 m wurde in einschaliger Bauweise und dränierend ausgeführt, d. h., es besteht im Gegensatz zum Münchener U-Bahn-Los keine Druckbeanspruchung der Konstruktion durch Bergwasser.

Als Ausgleichsschicht und „Außengewölbe“ wurde eine 5 bis 15 cm starke Spritzbetonschicht, die mit



**Bild 2-5:** Schalenaufbau Stadtbahn Gelsenkirchen



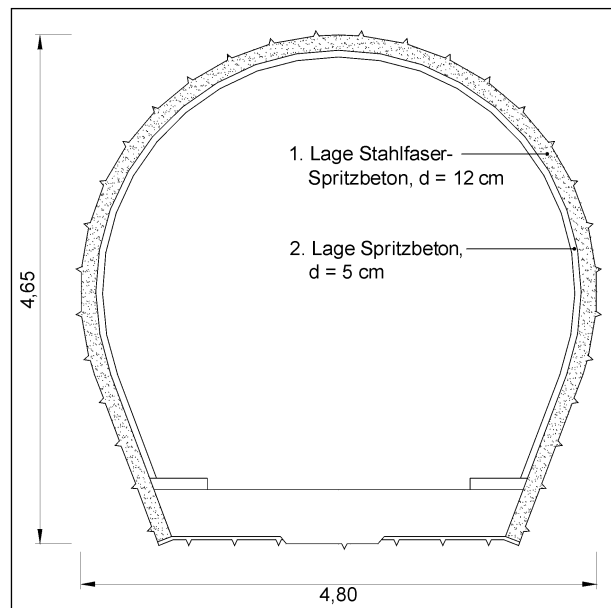
**Bild 2-6:** Schalenaufbau beim Kehrtunnel Isenthal

einem Bewehrungsnetz versehen wurde und im Mittel 10 cm stark sein sollte, aufgebracht (Bild 2-6). Immer noch anfallendes Bergwasser wurde mit lokalen Dräns gefasst und in die Sickerleitung geführt. Als „Innengewölbe“ wurde eine weitere bewehrte Spritzbetonschicht (ca. 10 cm) aufgebracht [11].

### 2.2.1.5 Sicherheitstunnel Mont Terri

Der einschalig ausgeführte Abschnitt des Sicherheitstunnels Mont Terri (Schweiz, Bauzeit 1991) entstand als Erkundungsstollen im Abstand von ca. 40 m von der insgesamt 4 km langen Hauptröhre des Tunnels.

Ausgeführt wurde ein 870 m langes, ca. 4,80 m breites und ca. 4,65 m hohes Hufeisenprofil mit einer 4 m breiten Stollensohle – aus Stahlbeton entsprechend einem Sohlgewölbe (Bild 2-7). Zur Felssicherung wurden Stahlbögen HEB 120 im Abstand von 1 bis 1,50 m und Spritzbeton eingebaut. Zur Abkürzung der bereits verzögerten Bauzeit verwendete man anstelle des für die Felssicherung ausgeschriebenen mit Stahlgewebematten bewehrten Spritzbetons einen Stahlfaser-Nassspritzbeton (mit  $L = 30$  mm und  $D = 0,5$  mm Dramix-Fasern) und baute diesen statt 15 cm nur 12 cm dick ein. Für den endgültigen Ausbau wurden abschließend noch 5 cm Nassspritzbeton aufgetragen. Der Stahlfasernassspritzbeton erfüllte voll die an ihn gestellten Erwartungen, da der zeitaufwändige Stahlgewebematteneinbau entfiel und man mit einer geringeren Schichtdicke auskam [13].



**Bild 2-7:** 1-schaliger Querschnitt des Sicherheitstunnels Mont Terri

### 2.2.1.6 Beurteilung

Die Analyse der ausgeführten Bauwerke zeigt, dass auf den Tunnelleibungen vereinzelt Undichtigkeiten auftraten, die durch den anstehenden Wasserdruck noch verstärkt wurden und nachträglich zum Teil mehrfach abgedichtet werden mussten. Die Hauptursache der Undichtigkeiten ist auf Spritzschatten im Bereich der Ausbaubögen und der Bewehrungsstäbe zurückzuführen. Der beim Baulos 2312 der U-Bahn Bielefeld geforderte bündige Abschluss der Gitterträger mit der tunnelseitigen Oberfläche der ersten Spritzbetonlage hat die Wasserwegigkeit in der Gesamtschale stark begünstigt. Daher ist in jedem Fall eine tunnelseitige Überdeckung der Gitterträger vorzusehen, um eine kompakte Einlagerung der Gitterträger in den Spritzbeton der 1. Lage zu gewährleisten.

Eine wesentliche Erkenntnis aus den Erfahrungen ist daher, bei der Konstruktion der Verbundschale die Ausbildung der Verbundfuge ohne Verbundbewehrung vorzusehen. Sie stellt eine wichtige Voraussetzung für eine wirtschaftliche und wasserundurchlässige Tunnelschale dar. Die Spritzbetonoberfläche muss in jedem Fall vor dem Aufspritzen oder Gegenbetonieren der nächsten Lage gesäubert werden (z. B. mit Hochdruckwasserstrahlen), um eine gute Haftung bzw. Verbundwirkung zu erzielen.

Der Ersatz der konventionellen Bewehrung durch Stahlfasern erwies sich sowohl von der Ausführbarkeit als auch von der Dichtheit her als vorteilhaft.

## 2.2.2 2-schalige Spritzbeton-Konstruktionen

Die Analyse der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktionen führte zu dem Ergebnis, dass bislang lediglich zwei Bauwerke, ein Bahn- und ein Straßentunnel, ausgeführt wurden, zu denen Erfahrungen vorliegen bzw. bekannt sind.

### 2.2.2.1 Fluchtstollen Fernthaltunnel

Im Zuge der Ausführung des 1.555 m langen Fernthal-Tunnels der Eisenbahn-Neubaustrecke Köln-Rhein/Main kam beim Bau eines 142 m langen Fluchtstollens (Bauzeit 2000/2001) eine 2-schalige Spritzbetonkonstruktion zum Einsatz. Hintergrund war die bereichsweise sehr starke Kurvenkrümmung des Fluchtstollens, die zu einem hohen Schalungsaufwand geführt hätte.

Die Konzeption sah vor, im Gewölbereich den Spritzbeton der Innenschale ( $d = 35$  cm, B25) auf eine 1-lagige KDB mit Ringabschottung aufzubringen (Bild 2-8). Die Herstellung erfolgte in zwei Lagen. Blockfugen waren nicht vorgesehen. Die Ausführung machte u. a. eine unternehmensinterne Genehmigung (UiG) der DB AG erforderlich. Diese wurde auf Antrag für den konkreten Fall erteilt und ist auch auf Rettungsstollen anderer Tunnel der DB AG mit vergleichbaren Verhältnissen übertragbar. Dabei ist hervorzuheben, dass es sich bei der Ausführung um eine 2-schalige Spritzbetonkonstruktion handelt, die dauerhaft Wasserdruckbeanspruchungen standhalten muss, da eine freie Gebirgsentwässerung nicht vorgesehen war. Um eine Gleichwertigkeit gegenüber der geschalteten Konstruktion gewährleisten zu können, wurden nachfolgende Zusatzmaßnahmen durchgeführt:

- Verdichtung der Rondellenanzahl zur Befestigung des Schutzvlieses und der KDB (mind. 4 Stück/m),
- punktuelle Befestigung eines Geogitters auf der KDB zur besseren Haftung des Innenschalen-Spritzbetons,
- pro Block ( $L = 10$  m) 5 achsparallele Injektions-schläuche zur späteren Nachinjektion zwischen KDB und Innenschale nach 28 Tagen mit einem Verpressdruck von ca. 2 bar,
- Abschaltung der Anschlussfuge Übergang Sohl-/Gewölbereich und Einbringen von Beton ohne Beschleuniger (Dicke ca. 5 bis 8 cm) kurz vor dem Spritzbeginn zur Reduzierung des Rückpralls und Gewährleistung der geforderten Betonqualität sowie Dichtheit,

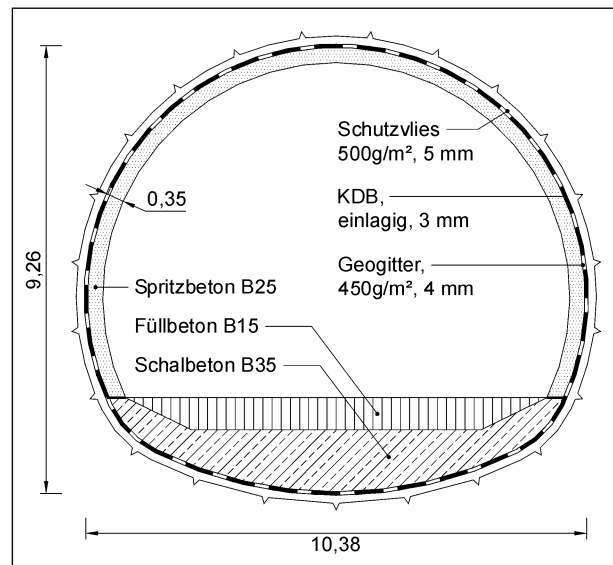


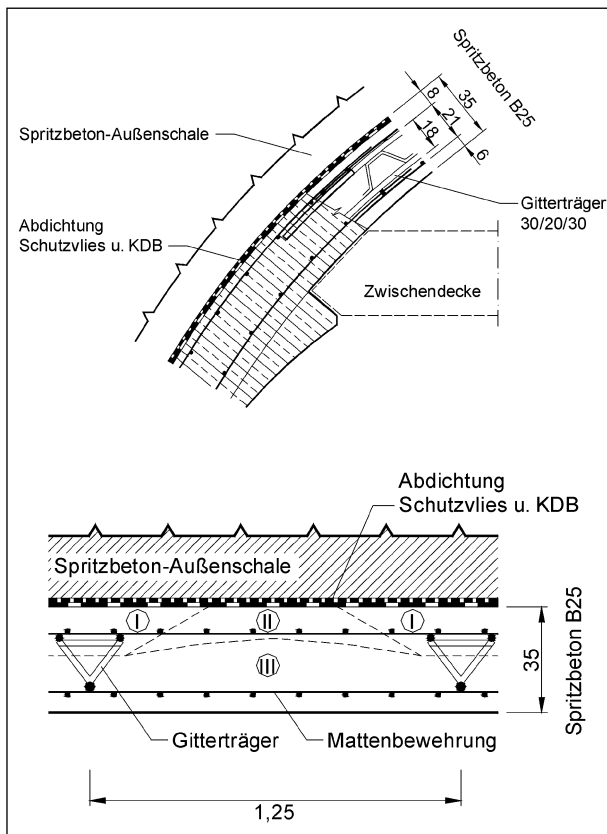
Bild 2-8: Querschnitt Fluchtstollen Tunnel Fernthal

- Reduzierung der Bewehrungsanordnung und Stabdurchmesser auf den tatsächlich erforderlichen Mindestumfang zur Reduzierung bzw. Vermeidung von Spritzschatten,
- Auftragen der 1. Lage des Innenschalen-Spritzbetons in einer längs laufenden, rippenförmigen Struktur mit in sich unregelmäßiger Oberfläche, um eine verbesserte Querkraftübertragung zur 2. Spritzbetonlage zu erzielen,
- Vorbehandlung der Spritzbetonoberfläche der 1. Lage vor Auftrag der 2. Lage durch nasses Sandstrahlen,
- Bohrkernentnahme aus dem Bauwerk und aus Spritzkisten zur Prüfung der Druckfestigkeiten.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sich die Ausführung als eine gleichwertige Alternative zur 2-schaligen Regelausführung erwies.

### 2.2.2.2 Straßentunnel Bad Wildbad

Im Zuge der Ausführung des 1.340 m langen bergmännischen Tunnelabschnittes zur Entlastung des Kurortes Bad Wildbad kam beim Bau der Lüfterkaverne des Tunnels eine 2-schalige Spritzbetonkonstruktion zum Einsatz. Dabei wurde die Innenschale über der Zwischendecke mit bewehrtem Spritzbeton B25 aufgetragen auf das ausgeschriebene Abdichtungssystem bestehend aus einem Schutz- und Drainagevlies ( $500 \text{ g/m}^2$ ) und einer 2 mm starken PVC-Dichtungsbahn (Bild 2-9). Als Spritzbeton wurde Trockenbeton mit alkalifreiem Spritzzement ohne Erstarrungsbeschleuniger verwendet, der



**Bild 2-9:** Schalenaufbau im Kavernenbereich des Straßentunnels Bad Wildbad (oben: Übergang Schalbeton-Spritzbeton, unten: Darstellung der Betonierreihenfolge bei der Spritzbeton-Innenschale) [nach 14]

sich durch hohe Früh- und Endfestigkeiten auszeichnete. Es wurden Festigkeiten von  $20,3 \text{ N/mm}^2$  (nach 1d) und von  $60,3 \text{ N/mm}^2$  (nach 28d) erzielt. Gegenüber der Regelbauweise wurden folgende Zusatzmaßnahmen durchgeführt:

- Ausspritzen vorhandener Überprofile der ersten Spritzbetonlage,
- sorgfältiges Verlegen der KDB unter Vermeidung des Überspannens von Hohlkehlen,
- Verdichtung der Anzahl der Befestigungsronddellen, vor allem im Überkopfbereich,
- Durchführung der Spritzarbeiten nach einem festgelegten Spritzschema zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Spritzschatten.

Auch bei dieser Ausführung konnte insgesamt eine Gleichwertigkeit zur Regelbauweise erreicht werden.

### 2.2.2.3 Beurteilung

Die dargestellten Ausführungen zeigen, dass in beiden Anwendungsfällen zur Gewährleistung

einer Gleichwertigkeit gegenüber den zweischaligen Regelbauweisen erhöhte Anforderungen an die Ausführungsqualität erforderlich wurden. Dies betraf in erster Linie die Herstellungsqualität des Spritzbetons. Während bei der Ausführung des Fluchtstollens Fernthal-Tunnel ein Geotextil zur Reduzierung des Rückpralls fungierte, wurde beim Straßentunnel Bad Wildbad auf diese Zusatzmaßnahme verzichtet. Bei beiden Tunnelbauwerken wurde nach einem bestimmten Spritzschema gearbeitet, um die Spritzbeton-Innenschale überhaupt aufbauen zu können.

Die beiden Anwendungsfälle zeigen, dass hier bei zukünftigen Ausführungen 2-schaliger Spritzbetonkonstruktionen auf einen positiven Erfahrungsstand zurückgegriffen werden kann.

## 3 Randbedingungen

Während für die 2-schaligen Spritzbetonkonstruktionen aufgrund der vorliegenden Erfahrungswerte die Anwendungsbereiche beschrieben werden können und lediglich Detailfragen speziell zur Ausführbarkeit und Dichtheit zu klären sind, zeigen die in Tabelle 2-1 aufgeführten Bauwerke, dass die Erfahrungen, die bislang bei der Ausführung 1-schaliger Konstruktionen gewonnen wurden, nicht ohne weitere Untersuchungen auf den Straßentunnelbau übertragbar sind. Die größtenteils im oberflächennahen Stadtbahnbaubereich ausgeführten Konstruktionen spiegeln nur zum Teil die Verhältnisse des meist tiefliegenden Straßentunnelbaus, verbunden mit den auftretenden hydrogeologischen Randbedingungen, wider.

Für beide Anwendungsfälle dürfen bei einer Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten allerdings die straßentunnelspezifischen Randbedingungen nicht unberücksichtigt bleiben.

### 3.1 Straßentunnelspezifische Randbedingungen

Im Straßentunnelbau werden im Gegensatz zum sonstigen Tunnelbau erhöhte Anforderungen an die Oberflächengestaltung der Tunnelwände gestellt. Durch den Straßenverkehr und durch die winterlichen Unterhaltungsdienste verschmutzen die Tunnelwände. Der Schmutz setzt sich aus Abgasrückständen, Ruß, Straßenstaub in Verbindung mit mineralölhaltigen Emissionen der Fahrzeuge und Tausalzrückständen zusammen [2]. Die Rußpartikel an

der Tunnelwand beeinflussen deren Helligkeit und senken das Lichtniveau im Tunnel. Eine glatte und möglichst rissfreie Oberfläche senkt den Verschmutzungsgrad, bietet Schutz gegen Frost-/Tausalzangriffe und ermöglicht eine effektive Reinigung.

Aus diesen Überlegungen heraus ließe sich ein Straßen-Tunnelbauwerk hinsichtlich der Oberflächengestaltung der Tunnelinnenseite in verschiedene Bereiche klassifizieren: In Tunnelbereiche, die schon aufgrund der betriebstechnischen, aber auch sicherheitsrelevanten Anforderungen eine glatte bzw. helle Innenschalen-Oberfläche benötigen, wie die

- Haupttröhren und
- Ein- bzw. Ausfahrbereiche, sowie in
- Tunnelbereiche, bei denen eine spritzrauh Oberfläche den Anforderungen genügt wie beispielsweise
  - Querschläge,
  - Übergangsbereiche oder
  - Fluchtstollen.

Dabei kann das Lüftungssystem als Entscheidungskriterium eine nicht unbedeutende Rolle spielen. Beim Einbau einer Zwischendecke ließe sich die 2-schalige Regelbauweise im Bereich der Haupttröhren bzw. Ein- und Ausfahrbereiche auf den Sohl- und unteren Ulmenbereich beschränken, während im Firstbereich, vom Tunnelnutzer nicht sichtbar, 2-schalige Spritzbetonkonstruktionen als endgültige Sicherung zum Einsatz kommen könnten. Das Beispiel in Bad Wildbad zeigt, wie der Übergang von der 2-schaligen Regelbauweise zur 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion praktisch umgesetzt werden könnte.

### 3.2 Hydrogeologische Randbedingungen

Während die hydrogeologischen Randbedingungen bei der Entscheidung zu einer zweischaligen Spritzbetonkonstruktion eine eher untergeordnete Bedeutung haben, sind sie für die Anwendung der 1-schaligen Bauweise von grundsätzlicher Bedeutung.

Die generelle Anwendungsmöglichkeit der einschaligen Bauweise wird durch den vorherrschenden Betonangriffsgrad des Bergwassers bestimmt. Dieser sollte als nicht oder nur chemisch schwach betonangreifend nach DIN Fachbericht 100 [5] ein-

gestuft sein, um die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit der Konstruktion über die gesamte Nutzungsdauer gewährleisten zu können.

Aus den geologischen Randbedingungen, die bereits beim Vortrieb den Einbau eines Sohlgewölbes erfordern können, und den vorherrschenden Bergwasserverhältnissen ergeben sich technische Grundsatzfragen zur konstruktiven Auslegung, durch die eine dauerhafte Dichtheit der 1-schaligen Konstruktionen gewährleistet werden muss. Dazu gehören

- der Schalenaufbau (Spritz- oder Schalbeton),
- die Fassung des Bergwassers an der Ausbruchslängung,
- die Ausführung des Entwässerungssystems,
- die Ausbildung der Blockfugenbereiche und
- die Bewehrungsart sowie der Bewehrungsumfang der einzelnen Lagen.

Diese Grundsatzfragen können nur teilweise durch die vorliegenden Erfahrungen beantwortet werden.

Es fehlen Untersuchungen, die unter Einbeziehung der in den letzten Jahren verzeichneten technologischen Fortschritte eine direkte Vergleichsmöglichkeit verschiedener Konstruktionsvarianten unter gleich bleibenden Randbedingungen zulassen.

Daher wurde die Ausführung einer Versuchsstrecke beschlossen, bei deren Konzeption die straßentunnelspezifischen sowie die geologisch-hydrologischen Randbedingungen berücksichtigt wurden, um die Anwendungsmöglichkeiten der einschaligen Konstruktionen für den Straßentunnelbau objektiv beurteilen zu können.

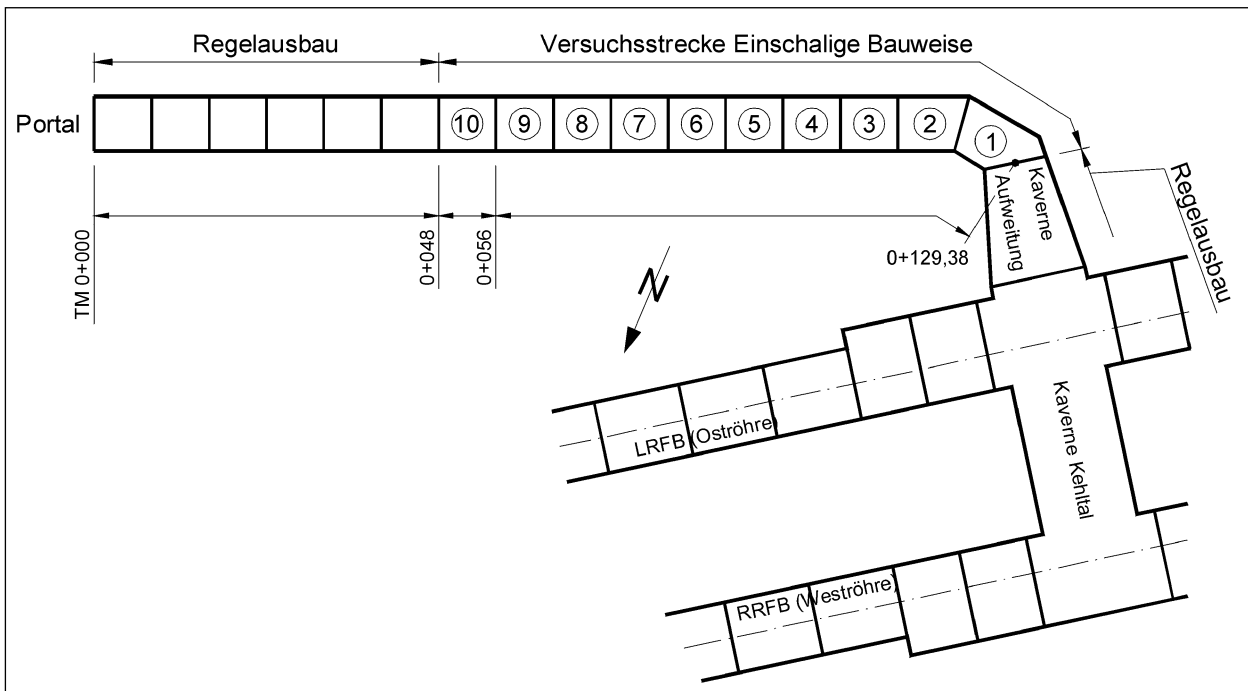
## 4 1-schalige Versuchsstrecke

Die 1-schalige Versuchsstrecke wurde in dem ca. 129 m langen Zuluftstollen Kehlthal ausgeführt, der nach ca. 3.050 m vom Nordportal der Haupttröhren aus mit einer Neigung von bis zu 8 % an eine der beiden Luftaustauschzentralen des Rennsteigtunnels (BAB A71) anschließt (Bild 4-1).

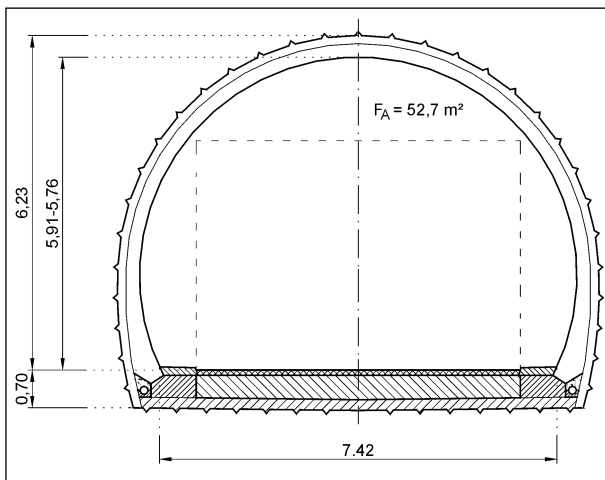
### 4.1 Geologisch/hydrologische Verhältnisse

Der Zuluftstollen liegt in einer breiten tektonischen Störungszone. Eine starke tektonische Beanspru-





**Bild 4-1:** Anschluss des Zuluftstollens Kehltal an die Haupttröhren des Rennsteigtunnels [3]



**Bild 4-2:** Querschnitt der Versuchsstrecke

chung in diesem Bereich hat zu einer intensiven tiefgrundigen Zerklüftung und Entfestigung des Älteren Porphyrs bis 20 m unter Tunnelgradiente geführt. Beim Vortrieb des Zuluftstollens wurde daher mit erheblichem Wasserandrang gerechnet.

#### 4.1.1 Geologie

Im Anfangsbereich der Versuchsstrecke von TM 0+048 (Beginn der Versuchsstrecke) bis TM 0+057 liegen mittelstark, im oberen Teil des Querschnittes auch sehr stark bis stark, verwitterte Sedimente der Goldlauterfolge vor. Dabei handelt es sich um eine Wechselfolge von flach gelagerten, quarzitisches ge-

bundenen, mittelbankigen Konglomeraten, dünnbankigen Sandsteinen und dickplattigen Ton-Schluffsteinen mit niedriger bis mittlerer Gesteinsfestigkeit. Von TM 0+056 bis TM 0+129,38 (Ende der Versuchsstrecke) wurden meist nur leicht verwitterte Sedimente der Goldlauterfolge mit überwiegend hoher Gesteinsfestigkeit angetroffen.

#### 4.1.2 Hydrologie

Im Bereich des Zuluftstollens Kehltal liegt die Grundwasseroberfläche 10 bis 20 m über der Gradienten. Der prognostizierte Bergwasseranfall wurde aufgrund des vorliegenden tektonisch stark gestörten und entfestigten Quarzporphyrs auf 3 bis 6 l/s pro 100 m Tunnellänge, in ausgeprägten Klüftzonen auch bis auf 10 l/s geschätzt. Entgegen der prognostizierten Wassermengen zeigte sich beim Vortrieb eine im Anfangsbereich der Versuchsstrecke tropfende Wasserführung, die ab TM 0+060 in einen fast trockenen Zustand überging. Aufgrund der für die Erarbeitung des geotechnischen Gutachtens durchgeführten pH-Wert- und CO<sub>2</sub>-Messungen wird das Bergwasser im Bereich der Versuchsstrecke als schwach betonangreifend eingestuft.

#### 4.2 Konstruktion

Die Konstruktion war für die in Bild 4-2 dargestellte Querschnittsgröße auszulegen. Hauptaugen-

merk sollte auf der Variation verschiedener Schalungskonstruktionen liegen.

#### 4.2.1 Schalenvarianten

Bei einer Blocklänge von 8 m und einer Versuchsstreckenlänge von ca. 80 m sollten fünf verschiedene Schalenvarianten untersucht werden.

Die Auswahl der Schalenvarianten erfolgte nach den Kriterien Reduzierung der Herstellungskosten sowie Verkürzung der Bauzeit unter Beibehaltung der Möglichkeit zu einer hohen Ausführungsqualität.

Im Bereich der Varianten 2 bis 5 wurde entsprechend der Regelbauweise eine mattenbewehrte Spritzbetonlage als erste Sicherung aufgebracht. Bei der Variante 1 wurde die Mattenbewehrung durch eine Stahlfaserbewehrung ersetzt.

Der Zuluftstollen Kehltal schließt bogenförmig an die Hauptröhren an (Bild 4-1). Die Ausführung der Regelbauweise hätte in diesem Bereich einen hohen Schalungsaufwand zur Folge gehabt. Daher wurde für diesen Bereich als Variante 1 die äußere stahlfaserbewehrte Spritzbetonlage durch eine zweite innere, ebenfalls stahlfaserbewehrte Spritzbetonlage ergänzt. Die Schalendstärke liegt bei 32 bis 37 cm.

Zum Vergleich wurde bei der Variante 2 die mattenbewehrte Außenschale ebenfalls mit einer zweiten stahlfaserbewehrten Spritzbetonlage ergänzt. Insgesamt ergibt sich auch hier eine abgeminderte Schalendstärke gegenüber der zweischaligen Konstruktion um bis zu 15 cm.

Die Variante 3 stellt ebenfalls eine reine Spritzbetonkonstruktion dar. Die Außenschale wird hier mit einer weiteren konventionell bewehrten Spritzbetonlage ( $d = 10-15$  cm) ergänzt, so dass sich insgesamt, wie bei den Varianten 1 und 2, eine Schalendstärke von 32 bis max. 37 cm ergibt.

Bei der Variante 4 wurde die konventionell bewehrte Spritzbeton-Außenschale mit einer zweiten geschalteten Lage ergänzt. Eine Bewehrung der zweiten Lage war hier nicht vorgesehen. Dadurch wurde ein direkter Vergleich der Varianten 4 und 5 möglich, der Rückschlüsse auf die risseverteilende Wirkung der Stahlfaserbewehrung der Variante 5 erlaubt.

Bei der Variante 5 wurde die konventionell, d. h. mattenbewehrte Spritzbeton-Außenschale ebenfalls mit einer zweiten geschalteten Lage ergänzt. Die zweite Lage wurde mit Stahlfasern bewehrt. Die

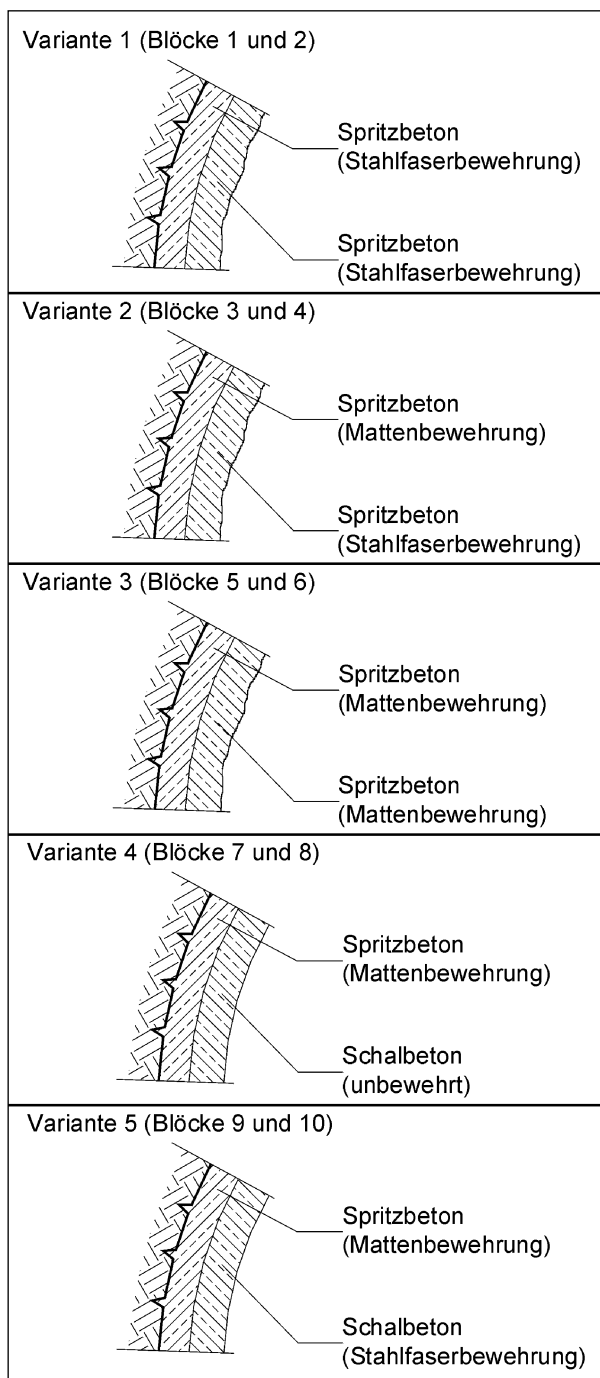
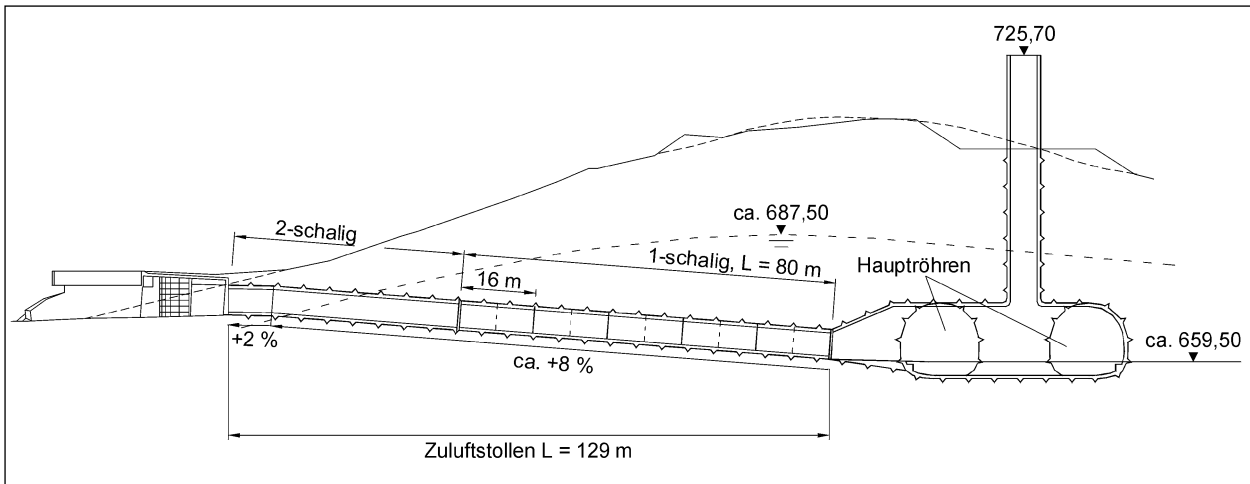


Bild 4-3: Konstruktionsaufbauten der Versuchsstrecke

Gesamtschalendstärke entspricht der der zweischaligen Regelbauweise und liegt bei insgesamt 47 cm. Dadurch wurde ein direkter Vergleich mit der zweischaligen Regelkonstruktion möglich. Die Anordnung der Konstruktionsvarianten im Längsschnitt zeigt Bild 4-4.

#### 4.2.2 Sicherungsmittel

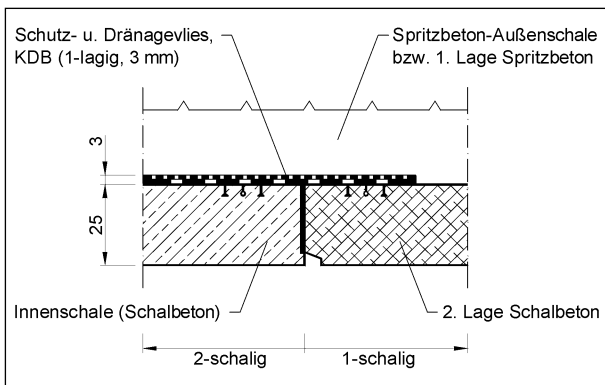
Die Versuchsstrecke wurde größtenteils im Sprengvortrieb aufgeföhren. Im Anfangsbereich der Ver-



**Bild 4-4:** Anordnung der Konstruktionsvarianten im Längsschnitt

Zuschlag	Sand 0 – 1 mm bzw. 0 – 2 mm, Splitt GK 8 mm
Zement	Karsdorfer Zement CEM II/A – S 52,5 R mit einem Gehalt von 380 kg/m <sup>3</sup> (Portlandzement mit 6 bis 20 % Hütensandanteil)
BE-Mittel	UMA GUNITE FLÜSSIG AA der Fa. Torggler mit einem Gehalt von 5 % bezogen auf den Zementgehalt
Gesamt-Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	1,49 M-% < 1,5 M-%
w/z-Wert	0,50
Frischbeton-temperatur	20 °C
Fließmittel	Mapefluid X 404

**Tab. 4-1:** Spritzbetonrezeptur der Versuchsstrecke



**Bild 4-5:** Blockfugenausbildung beim Übergang 2-schalige/1-schalige Bauweise (2. Lage Schalbeton)

suchsstrecke erfolgte der Ausbruch zum Teil durch mechanisches Lösen. Die Spritzbetonschale ist überwiegend einlagig bewehrt (Q 188) sowie zusätzlich mit Gitterträgern und 4 m langen SN-Ankern (6 - 9 Stck. pro Abschlag) gesichert. Die Abschlagslänge lag bei 1,0 und 1,3 m.

### 4.2.3 Spritzbetonrezeptur

Der in der Versuchsstrecke eingebaute Spritzbeton entspricht hinsichtlich seiner Rezeptur dem Spritzbeton der Regelbauweise (s. Tabelle 4-1).

Bei dem eingesetzten Beschleuniger-Mittel handelte es sich um einen alkaliarmen Beschleuniger, der in Kombination mit dem eingesetzten Zement bei einem Gehalt von 5 % bezogen auf den Zementgehalt die Forderung eines Gesamt-Na<sub>2</sub>O-Äquivalentes kleiner 1,5 M-% erfüllt.

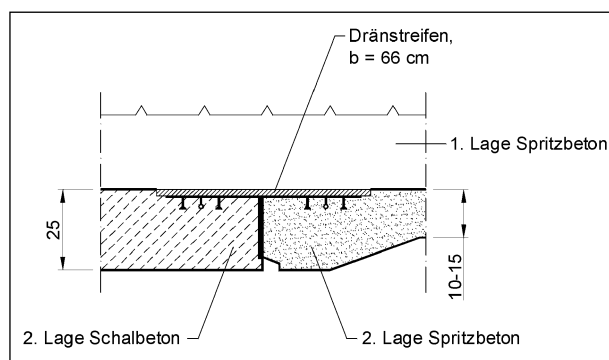
### 4.2.4 Stahlfasern

Die Ausführung der Konstruktionsvariante 1 hatte zur Folge, dass schon beim Vortrieb der Einbau von Stahlfaser-Spritzbeton auf einer Länge von ca. 20 m erforderlich wurde. Als Stahlfaser kam eine Dramix-Stahldrahtfaser der Fa. Bekaert zum Einsatz. Die mit Haken an beiden Enden versehene Faser weist eine Schlankheit von 65, eine Faserlänge von 35 mm und somit einen Durchmesser von 0,54 mm auf (Typ RC-65/35-BN). Pro m<sup>3</sup> Beton wurden 40 kg Fasern eingebaut.

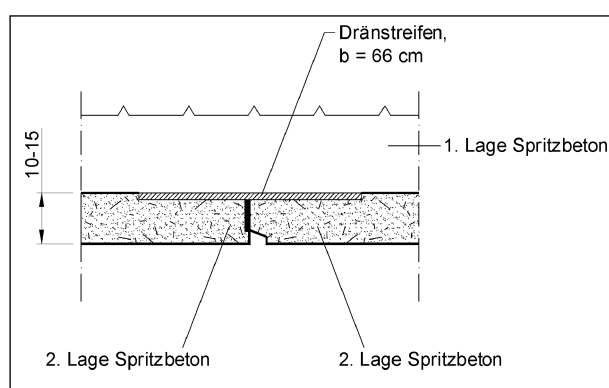
### 4.2.5 Fugenbereiche

Aufgrund der Übergänge von der 2-schaligen Regelbauweise zur 1-schaligen Versuchsstrecke sowie aufgrund der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten innerhalb der Versuchsstrecke wurden unterschiedliche Blockfugenausbildungen erforderlich.

In Bild 4-5 ist die bauliche Durchbildung der Übergangsbereiche von der Regelausführung zur Versuchsstrecke und umgekehrt dargestellt. Die



**Bild 4-6:** Blockfugenausbildung beim Übergang 1-schalig (2. Lage Schalbeton)/1-schalig (2. Lage Spritzbeton)



**Bild 4-7:** Blockfugenausbildung beim Übergang 1-schalig (2. Lage Spritzbeton)/1-schalig (2. Lage Spritzbeton)

Kunststoffdichtungsbahn der Regelausführung wurde an ein außen liegendes Blockfugenband angeschweißt, wodurch eine Abschottung zur Versuchsstrecke gegeben ist. Die Blockfuge wurde als Pressfuge ausgebildet.

Beim Übergang von Block 6 (2. Lage Spritzbeton mit Mattenbewehrung) zu Block 7 (2. Lage Schalbeton, unbewehrt) wurde ebenfalls ein außenliegendes Blockfugenband eingebaut. Die Anordnung des Fugenbandes verursachte eine Verbundstörung zwischen der ersten und zweiten Lage und hätte somit eine unkontrollierte Wasserführung begünstigt. Daher wurde zwischen dem Fugenband und der ersten Spritzbetonlage zusätzlich ein quer laufender Dränstreifen angeordnet, der durch die erste Lage durchsickerndes Bergwasser kontrolliert in das Entwässerungssystem abführen sollte.

Bei den Blöcken, die als endgültige Spritzbetonkonstruktionen ausgebildet wurden, d. h. von Block 1 bis Block 6, wurden ebenfalls die Blockfugen als Pressfugen ausgebildet. Ein Fugenband kam hier allerdings nicht zum Einsatz. Zur Gewährleistung einer kontrollierten Wasserführung wurde auch hier über der Blockfuge ein quer laufender

Dränstreifen zwischen der ersten und zweiten Spritzbetonlage angeordnet.

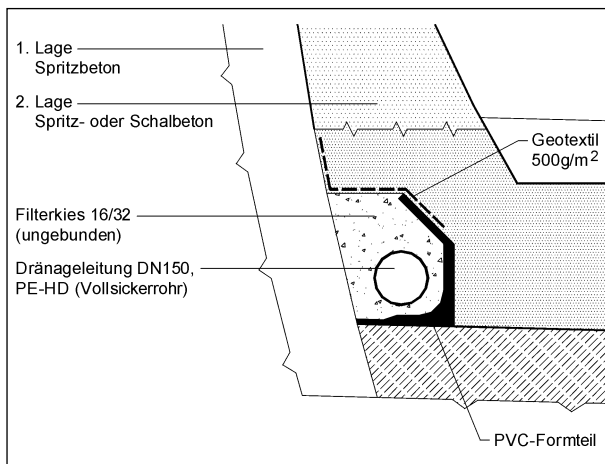
#### 4.2.6 Entwässerung

Der derzeitige Kenntnisstand zeigt, dass in Deutschland bislang nur einschalige Tunnelstrecken ohne Entwässerungssystem ausgeführt wurden. Durch den daraus resultierenden Aufbau des Wasserdrucks im Endzustand führten diese Ausführungen in vielen Fällen zu Undichtigkeiten und damit aufwändigen Instandsetzungsmaßnahmen.

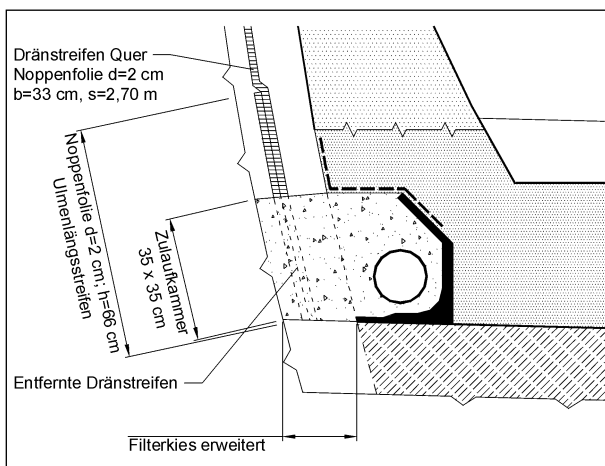
Entgegen den bisherigen Ausführungen sollten durch die konstruktive Auslegung der Versuchsstrecke die Fassung und Ableitung des anstehenden Bergwassers sichergestellt werden können, um einen Wasseraufstau zu vermeiden. Dazu sollte das Entwässerungssystem der zweischaligen Regelbauweise auch im Bereich der Versuchsstrecke zum Einsatz kommen. Bei der Versuchsstrecke wurde daher in Deutschland erstmalig die einschalige Bauweise mit einem System zur freien Gebirgsentwässerung kombiniert. Diese Kombination erforderte Zusatzmaßnahmen zur Gewährleistung einer aufstaufreien Gebirgsentwässerung.

Bei der zweischaligen Regelbauweise wird zwischen der Spritzbeton-Außenschale und der Kunststoffdichtungsbahn ein Vlies angeordnet. Das Vlies hat zum einen die Aufgabe, die Kunststoffdichtungsbahn vor Beschädigungen durch die Spritzbetonoberfläche zu schützen und zum anderen als Flächendränage eine ausreichende Transmissivität zur Ableitung des Bergwassers zum Ulmenfuß zu gewährleisten.

Bei der einschaligen Bauweise kann aufgrund der notwendigen Verbundwirkung zwischen der äußeren und inneren Schale ein durchgängiges Flächendränagelement nicht angeordnet werden. Dadurch bestände die Gefahr des Wasserrückstaus, was aufgrund der fehlenden Kunststoffdichtungsbahn Undichtigkeiten verursachen könnte. Um dennoch eine Transmissivität zwischen Gebirge und Spritzbetonlage gewährleisten zu können, wurden pro Block jeweils 3 Noppenbahnstreifen ( $b = 33 \text{ cm}$ ) in Umfangrichtung über den Ulmenbereich eingebaut. Der Einbau erfolgte durch direktes Einspritzen des Dränstreifens auf der Ausbruchslaubung. Am Ulmenfuß wurde zusätzlich ein Noppenbahnstreifen in Längsrichtung angeordnet. An der Schnittstelle der längs- und querlaufenden Noppenbahnstreifen wurden Aussparungen in Form von Zulaufkammern ( $35 \times 35 \text{ cm}$ ) vorgesehen, durch die das Bergwasser



**Bild 4-8:** Ausbildung des Entwässerungssystems im Normalbereich



**Bild 4-9:** Ausbildung des Entwässerungssystems im Bereich der Zulaufkammern

der Ulmenlängsdränageleitung zugeführt werden soll (Bild 4-8 und Bild 4-9).

Das neuartige Entwässerungssystem soll zu einer Reduzierung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes beitragen. Es hebt sich durch den Einbau ungebundener Filterschichten sowie des dargestellten Formteiles von den bisherigen Systemen ab. Dies hatte zur Folge, dass auch die Versuchsstrecke, speziell der Anschluss Sohle-Gewölbe beim Einbau der zweiten Lage, auf dieses System abzustimmen war.

### 4.3 Messtechnische Untersuchungen

Der Erfolg einer hohen Ausführungsqualität einer 1-schaligen Konstruktion wird maßgeblich durch den Einbauzeitpunkt der zweiten Lage beeinflusst. Ein zu früher Zeitpunkt kann zu Belastungen der Gesamtkonstruktionen führen, die Rissbildungen

und damit Undichtigkeiten verursachen. Ein zu später Zeitpunkt kann hohe Zwangbeanspruchungen zwischen der ersten und zweiten Lage verursachen. Ziel messtechnischer Untersuchungen war es daher, den Einbauzeitpunkt der 2. Lage zu optimieren.

Dazu wurden mit Beginn der Ausführung der Versuchsstrecke messtechnische Untersuchungen gestartet. Ziel der Untersuchungen war es, Kenntnisse darüber zu erlangen, wie sich kurz- und langfristig die Tragwirkung der ersten Lage und der Temperaturverlauf der abfließenden Hydratationswärme entwickeln.

#### 4.3.1 Messquerschnitte

Im Zuge der Ausführung der ersten Spritzbetonlage wurden zwei Messquerschnitte im Bereich der Versuchsstrecke installiert, durch die sowohl Dehnungs- als auch Temperaturmessungen an der ersten Spritzbetonschale möglich wurden.

Die Messquerschnitte wurden im Bereich der Konstruktionsvarianten 1 und 3, d. h. im Bereich der Blöcke 1 und 2 bzw. 5 und 6, eingebaut (Bild 4-1). Sie wurden in einer möglichst großen Entfernung vom Zuluftstollenportal installiert, um Einflüsse aus Temperaturschwankungen der Außenluft zu vermeiden.

#### 4.3.2 Messgeber

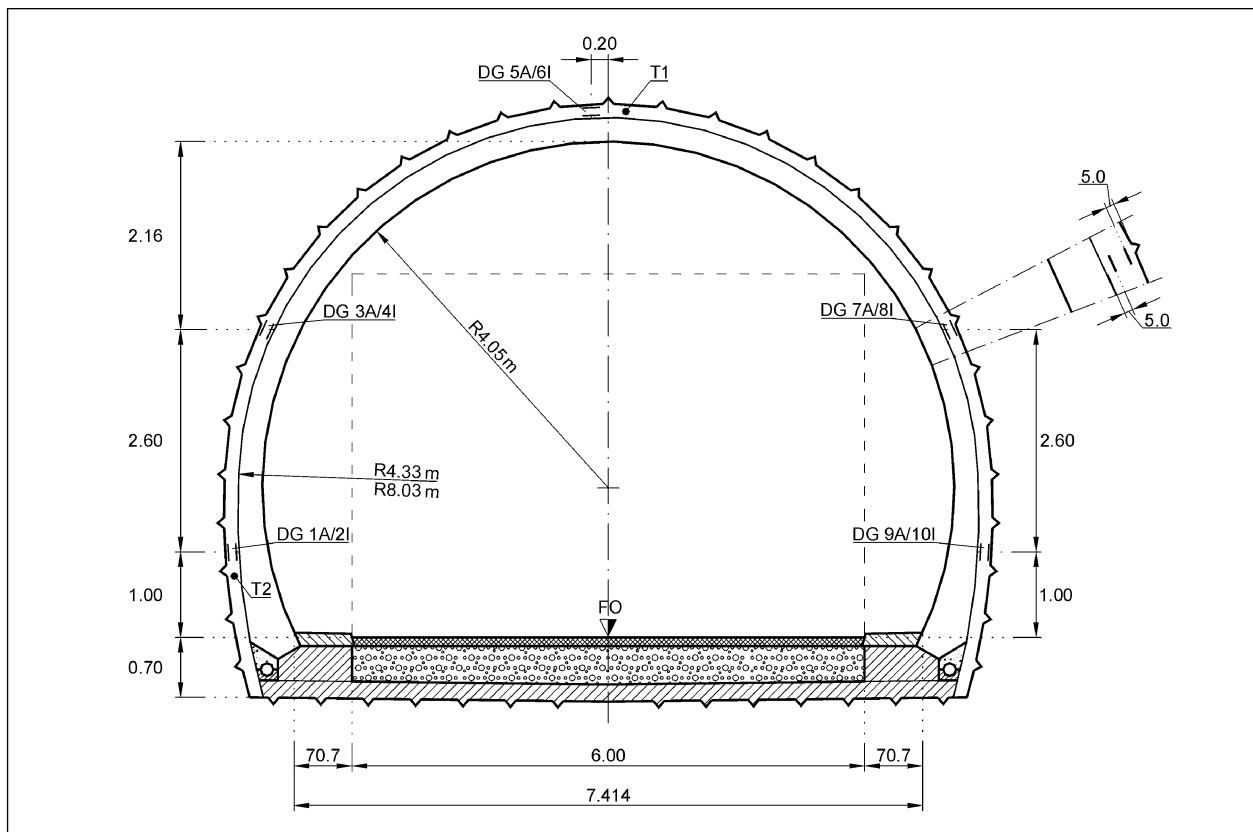
Als Messgeber kamen Temperatur- und Dehnungsgeber zum Einsatz. Da sich die Dehnungsgeber durch ihre direkte Interpretationsfähigkeit auszeichnen, wurde ihnen gegenüber einem Einsatz mit hydraulischen Druckkissen der Vorzug gegeben.

##### 4.3.2.1 Temperaturgeber

Als Temperaturgeber wurden pro Querschnitt zwei gekapselte Widerstandstemperaturgeber Pt 100 eingebaut. Sie sollten Informationen über die Wärmeentwicklung nach Einbau der ersten Spritzbetonlage sowie über die Wärmeübertragung der zweiten Lage auf die erste Lage geben.

##### 4.3.2.2 Dehnungsgeber

Der eingebaute Dehnungsgeber Typ SSM-1 der Fa. Geodata besteht aus zwei Bewehrungsstäben, die nach dem Einbau voll in den Beton eingebettet sind, und einem zentralen Rohr mit geringer Längssteifigkeit. Bei einer Relativverschiebung der



**Bild 4-10:** Positionierung der Messgeber über den Querschnitt

beiden parallelen Bewehrungsstäbe wird dem zentralen Rohr eine Verformung aufgezwungen, die der Betonverformung entspricht. Diese wird mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen gemessen, die in einer temperaturkompensierten Vollbrückenschaltung am Zentralrohr aufgeklebt sind. Die Ableesungen erfolgten mit einem digitalen Ablesegerät. Die Genauigkeit betrug  $1 \times 10^{-6} \text{ m/m} = 1 \mu\text{m/m} = 1/1.000 \text{ ‰}$ .

Die Positionierung der Messgeber ist in Bild 4-10 dargestellt. Insgesamt wurden je Messquerschnitt fünf Dehnungsmessgeberpaare und zwei Temperaturegeber angeordnet.

Die Anordnung der Dehnungsgeber erfolgte entsprechend der Verformungslinie einer tiefliegenden Tunnelschale. Die Dehnungsgeber des Messquerschnittes 1 wurden direkt an die Mattenbewehrung im Übergangsbereich der Blöcke 5 und 6 angeschlossen. Beim zweiten Messquerschnitt wurden die Dehnungsgeber mit Bewehrungsstreifen am Gebirge befestigt und im Übergangsbereich der Blöcke 1 und 2 eingespritzt. Die Temperaturegeber wurden zum einen im Firstbereich und zum anderen im unteren Ulmenbereich angeordnet.

### 4.3.3 Messergebnisse

Die ersten Messungen im Messquerschnitt 1 erstreckten sich über einen Zeitraum von 28 Tagen. Die Messungen im Messquerschnitt 2 über einen Zeitraum von 20 Tagen.

Am 07.12.99 wurde der Vortrieb im Bereich des Zuluftstollens Kehltal aufgrund baubetrieblicher Planungen der bauausführenden ARGE bis zum 01.03.00 unterbrochen. Aufgrund des Gefälles von ca. 8 % Richtung Ortsbrust war während des Vortriebes der Versuchsstrecke ein ständiges Abpumpen des Bergwassers erforderlich. Um keine zusätzlichen Pumpkosten während der Vortriebsunterbrechung zu verursachen, wurden die Anschlüsse der Messgeber versiegelt und der Zuluftstollen über den genannten Zeitraum geflutet, d. h., während der Vortriebsunterbrechungen fanden keine Messungen statt.

#### 4.3.3.1 Temperaturmessungen

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen sind in Bild 4-11 und Bild 4-12 dargestellt. Sie zeigen einen typischen Temperaturverlauf einer abbindenden Spritzbetonschale. Aufgrund der Hydratationswärmeentwicklung ist nach dem Spritzbetonauf-

trag eine deutliche Temperaturzunahme ersichtlich, die sich im Laufe der Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons abbaut. Die maximale Temperaturzunahme liegt beim Messquerschnitt 1 bei ca. 30 K, beim Messquerschnitt 2 steigt sie bis max. 20 K an. Nach [6] lässt sie sich bei einer geeigneten Bontontechnologie auf 20 K begrenzen.

Diese Temperaturzunahme, die einer aufgezwungenen Dehnung entspricht, ist die Ursache für Zwangsspannungen, die in der Spritzbetonschale auftreten und zur Erstrissbildung führen. Die Zwangsspannungen werden mit zunehmendem Alter des Betons durch Kriechen und plastische Verformungen abgebaut, gleichzeitig aber durch

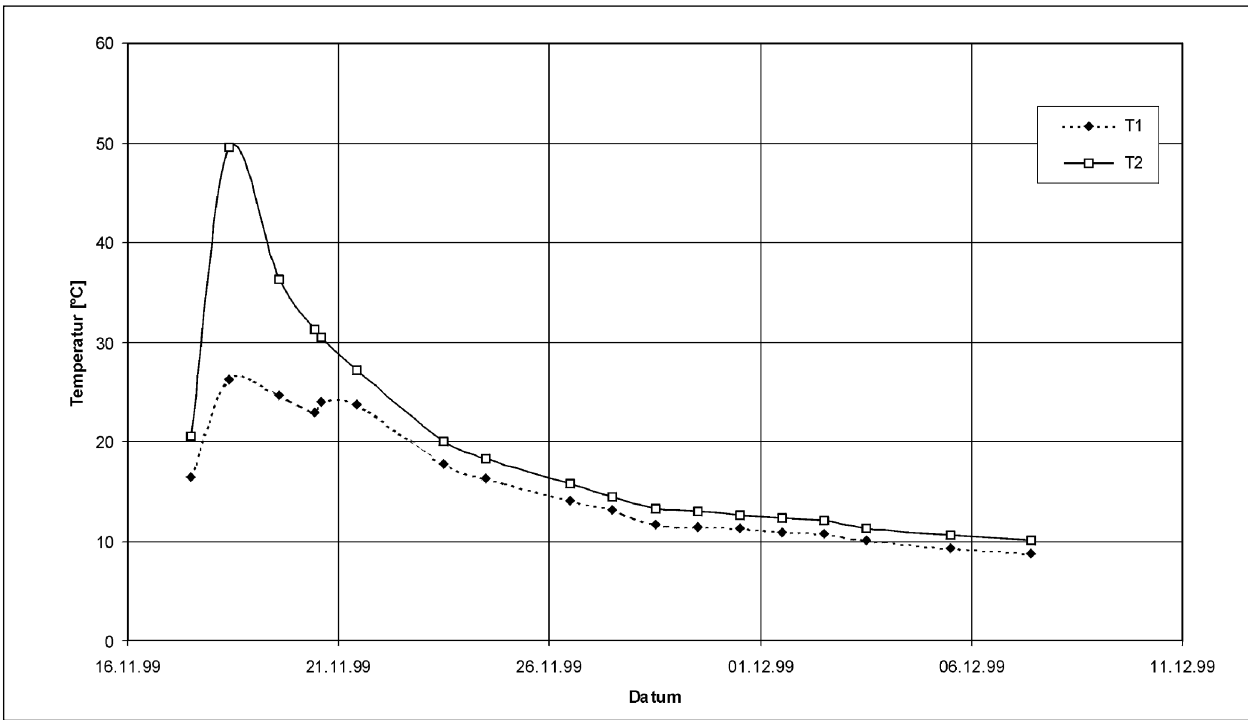


Bild 4-11: Ergebnisse der Spritzbeton-Temperaturmessungen (Messquerschnitt 1 im Übergangsbereich Block 5/6)

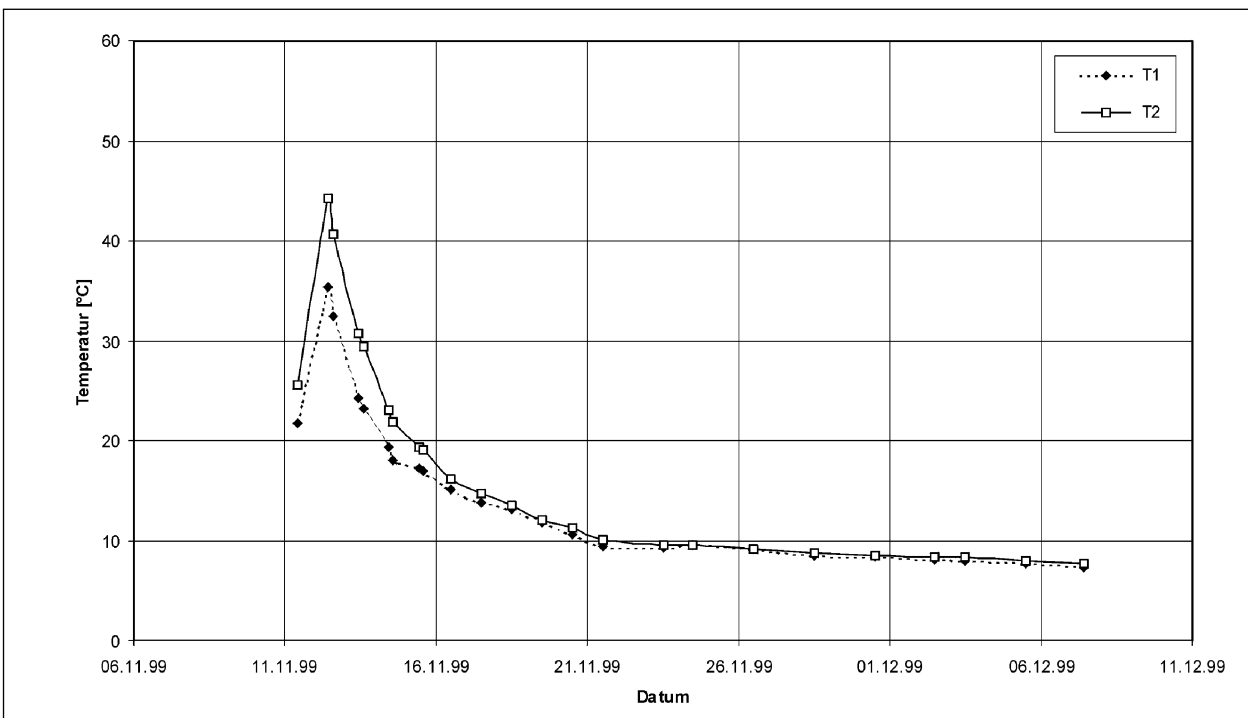


Bild 4-12: Ergebnisse der Spritzbeton-Temperaturmessungen (Messquerschnitt 2 im Übergangsbereich Block 1/2)

Schwindeinflüsse wieder verstärkt [7]. Die durch die Zwangspannungen entstehenden Risse dürfen jedoch bei der Beurteilung des Dichtheitsverhaltens einer Spritzbeton-Außenschale nicht überbewertet werden. Bedeutender sind vielmehr die durch das Nassspritzen möglichst zu vermeidenden Spritzschatten im Bereich der Gitterträger und Bewehrungsmatten, die zu Längsläufigkeiten des Bergwassers und damit Undichtigkeiten führen können.

Im Anfangsstadium sind Temperaturdifferenzen zwischen dem Firstbereich (Messgeber T1) und dem unteren Ulmenbereich (Messgeber T2) festzustellen, die sich jedoch nach ca. 5 bis 7 Tagen abgebaut haben. Diese Unterschiede werden auf die unregelmäßigen Schalendicken im First- und Ulmenbereich zurückgeführt, die zu unterschiedlichen Lagen der Temperaturgeber zur Gebirgs- bzw. zur Luftseite führen.

Der Abkühlungsprozess im Messquerschnitt 1 (mattenbewehrter Spritzbeton) verläuft annähernd analog zum Messquerschnitt 2 (stahlfaserbewehrter Spritzbeton).

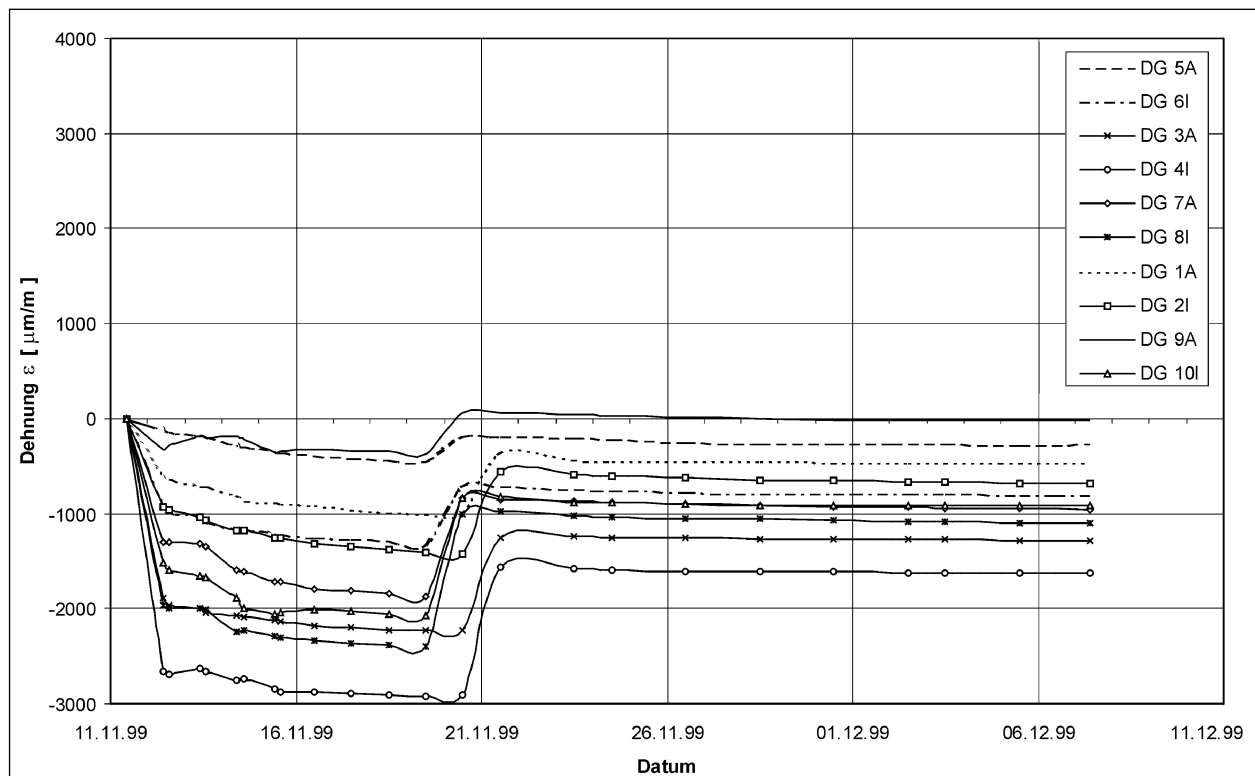
Die nach der Vortriebsunterbrechung wieder aufgenommenen Messungen, die bis kurz vor Ausfüh-

rung der zweiten Lage durchgeführt wurden, ließen keine wesentlichen Änderungen im Temperaturverlauf der ersten Spritzbetonlage erkennen.

#### 4.3.3.2 Dehnungsmessungen

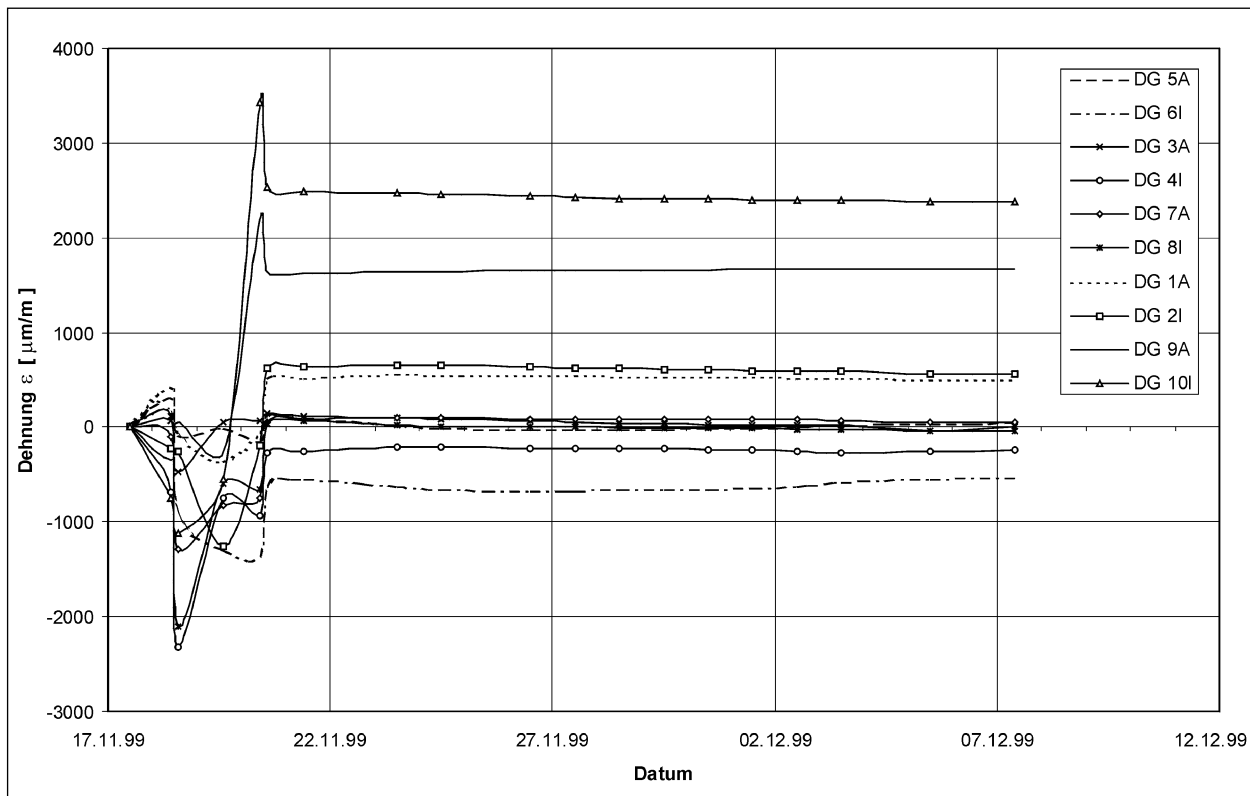
Die in der Anfangsbelastung gewonnenen Ergebnisse der Dehnungsmessungen zeigen die Bilder 4-13 und 4-14. Im Messquerschnitt 1 (Übergangsbereich Block 5/6) traten die maximalen Stauchungen im oberen linken Ulmenbereichen auf. Im Messquerschnitt 2 (Übergangsbereich Block 1/2) erfuhr der rechte untere Ulmenbereich die größten Dehnungen, während die maximalen Stauchungen im Firstbereich zu erkennen waren.

Beim Messquerschnitt 1 waren in den ersten 10 Tagen nach Einbau der Spritzbetonschale Stauchungen über den gesamten Gewölbbereich zu beobachten. Seit dem 13.11.1999 war eine deutliche Abnahme der Stauchungsvorgänge zu verzeichnen. Am 21.11.1999 ging der Stauchungsprozess in einen Dehnungsprozess über. Dieser sprunghafte Dehnungsanstieg wird darauf zurückgeführt, dass der Vortrieb zu diesem Zeitpunkt beendet wurde und dadurch eine weiterführende Spannungsänderung im Gebirge unterblieb.



**Bild 4-13:** Ergebnisse der Dehnungsmessungen an der Spritzbeton-Außenschale (Messquerschnitt 1 – Übergangsbereich Block 5/6)



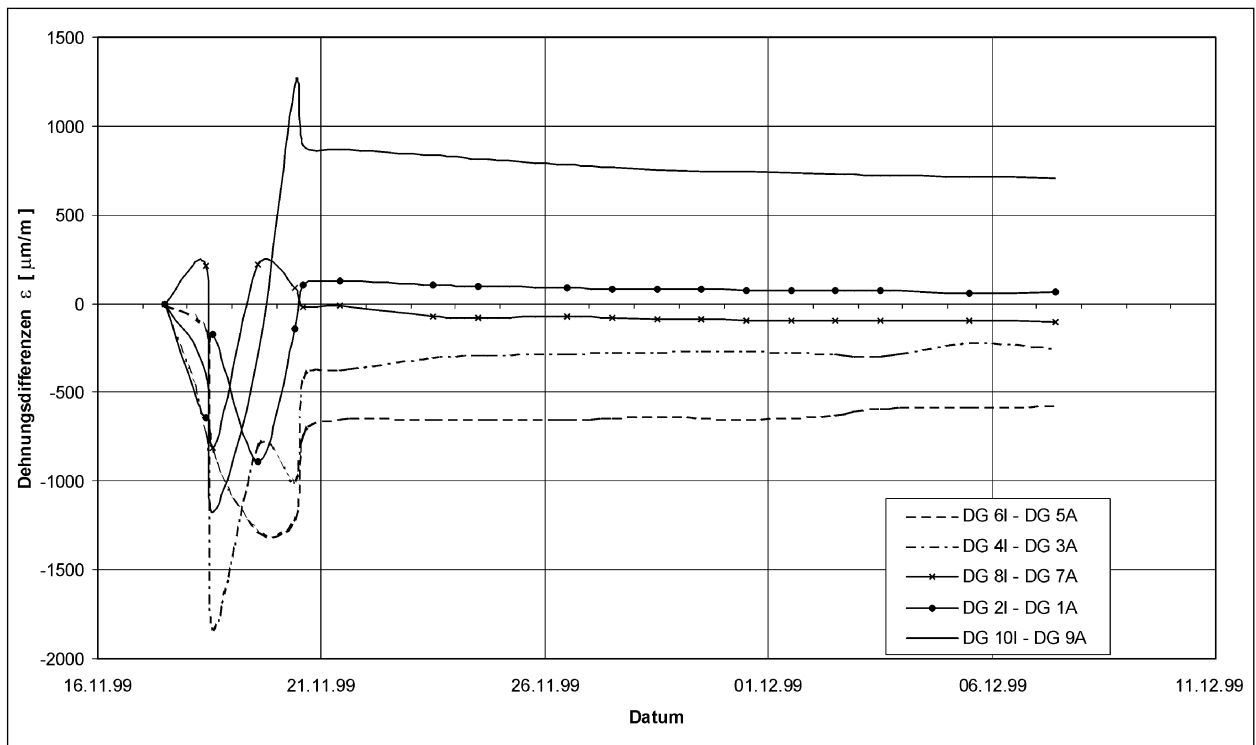


**Bild 4-14:** Ergebnisse der Dehnungsmessungen an der Spritzbeton-Außenschale (Messquerschnitt 2 – Übergangsbereich Block 1/2)

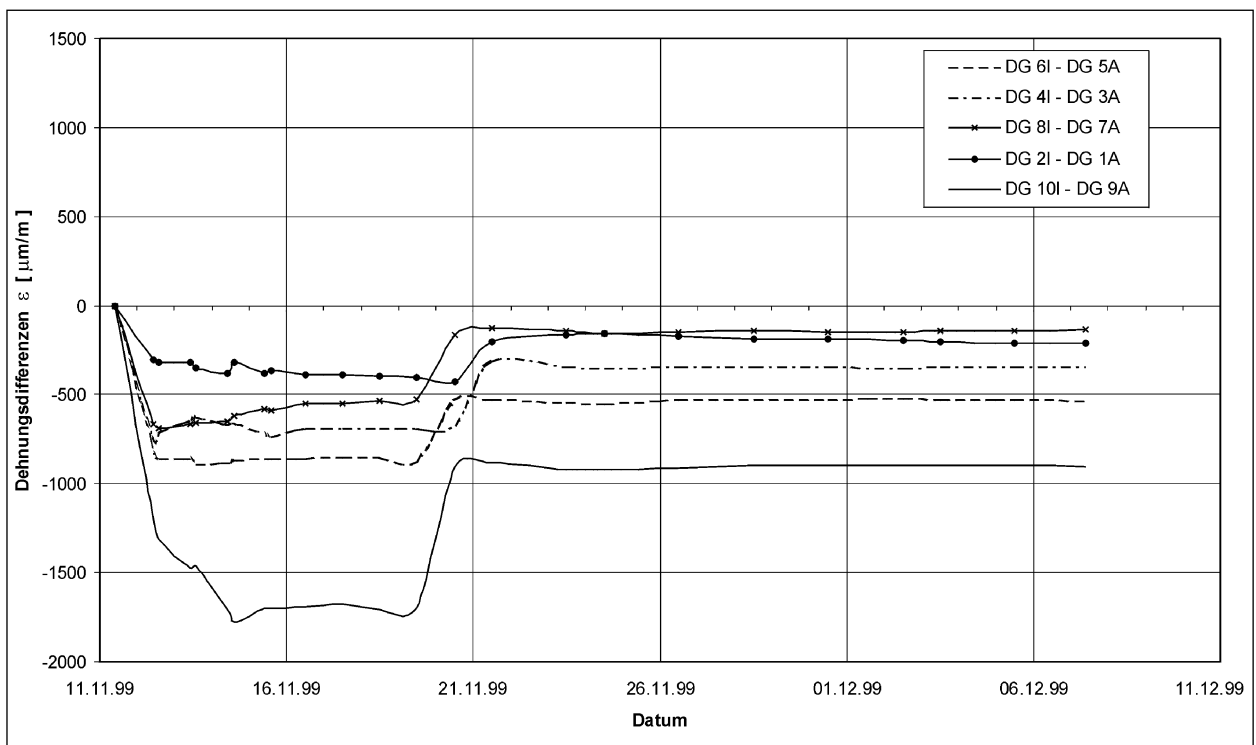
Die wesentlichen Verformungsvorgänge beschränkten sich auf die ersten 2 bis 3 Tage nach Sicherungseinbau. Die maximalen Stauchungen lagen bei 3.000  $\mu\text{m/m}$ , d. h., pro m Tunnelumfang hatte sich die Schale um 3 mm gestaucht.

Im Vergleich zum Messquerschnitt 1 verliefen im zweiten Messquerschnitt die Dehnungen bzw. Stauchungen wesentlich ungleichmäßiger. Jedoch waren auch hier im Anfangsstadium Beanspruchungen in Form von Stauchungen über den gesamten Gewölbebereich ersichtlich. Die maximalen Stauchungen waren im oberen linken sowie unteren rechten Ulmenbereich zu beobachten. Am 21.11.99 war auch im zweiten Messquerschnitt ein sprunghafter Dehnungsanstieg zu verzeichnen, der im Vergleich zum ersten Messquerschnitt wesentlich intensiver ausfiel. Insgesamt erfuhr die Spritzbetonschale in diesem Bereich eine Dehnungsbeanspruchung von ca. 3,7 mm/m. Der sprunghafte Anstieg wird auf die nähere Positionierung des zweiten Messquerschnittes zum Vortriebsende zurückgeführt. Nach dem 21.11.99 wurden im unteren rechten Ulmenbereich die maximalen Dehnungen beobachtet, die im Laufe der Messdauer einen konstanten Verlauf aufwiesen.

In Bild 4-15 und Bild 4-16 sind die Dehnungs- bzw. Stauchungsdifferenzen der jeweiligen Messgeberpaare dargestellt. Sie erlauben Rückschlüsse auf die Momenten- und Normalkraftbeanspruchung der Spritzbetonschale. Hohe Dehnungs- bzw. Stauchungsdifferenzen deuten auf eine erhöhte Momentenbeanspruchung hin. Im Messquerschnitt 1 waren im unteren rechten Ulmenbereich die größten Stauchungsdifferenzen mit einem Maximalwert von 1,8 mm/m, im linken unteren sowie rechten oberen Ulmenbereich die geringsten Stauchungsdifferenzen mit einem Minimalwert von 0,15 mm/m feststellbar. Im Messquerschnitt 2 war entsprechend der Dehnungswerte in Bild 4-14 ein sprunghafter Wechsel der Dehnungs- bzw. Stauchungsdifferenzen zu verzeichnen. Der maximale Wechsel lag im unteren rechten Ulmenbereich und ging von 1,1 mm/m Stauchung auf 1,2 mm/m Dehnung über. Die Minimalwerte von 0,08 mm/m wurden entsprechend dem Messquerschnitt 1 im linken unteren sowie im rechten oberen Ulmenbereich beobachtet. Mit fortschreitender Messdauer wurde ein gleich bleibender Verlauf der Dehnungs- und Stauchungsdifferenzen erkennbar. Die konstanten Maximalwerte lagen auch hier im unteren rechten Ulmenbereich sowie im Firstbereich.



**Bild 4-15:** Dehnungsdifferenzen beim Messquerschnitt 1 (Übergangsbereich Block 5/6)



**Bild 4-16:** Dehnungsdifferenzen beim Messquerschnitt 2 (Übergangsbereich Block 1/2)

Die im Messquerschnitt 1 im oberen linken Ulmenbereich aufgetretenen Maximalstauchungen sowie die vergleichsweise geringen Stauchungsdifferenzen in diesem Bereich, deuteten auf eine hohe Normalkraftbelastung und geringe Biegebeanspruchung hin.

Entsprechendes war im Messquerschnitt 2 zu beobachten. Anders verhielt es sich im unteren rechten Ulmenbereich. Hier zeigten die Ergebnisse eine vergleichsweise höhere Biege- und geringere Normalkraftbeanspruchung.

Die Dehnungsmessungen zeigten zusätzlich, dass neben den Beanspruchungen im Anfangsstadium ebenso eine Vortriebsunterbrechung das Dehnungs- bzw. Stauchungsverhalten einer Spritzbetonschale stark beeinflussen kann. Bei den Messergebnissen des Messquerschnittes 2 wurden diese Einflüsse besonders deutlich. Die Maximalbeanspruchungen waren hier aufgrund des Vortriebsstillstandes entstanden. Der Vortrieb wurde in einem Abstand von ca. 10 m vom zweiten Messquerschnitt unterbrochen.

Auch hier ließen die weiteren Messungen, die bis kurz vor Ausführung der zweiten Lage durchgeführt wurden, wie bei den Temperaturmessungen keine wesentlichen Änderungen im Dehnungs- bzw. Stauchungsverhalten der ersten Spritzbetonlage erkennen.

## 4.4 Visuelle Untersuchungen

Zusätzlich zu den messtechnischen Untersuchungen fanden visuelle Untersuchungen statt, die sich auf die Ausführung der Versuchsstrecke und die zu erreichende Rissefreiheit sowie Dichtheit konzentrierten.

### 4.4.1 Ausführung

Die regelmäßige Begleitung der Ausführungsarbeiten sollte aufzeigen, wo Probleme auftraten bzw. zu lösen waren, die speziell für die einschalige Bauweise von Bedeutung sind und daher bei zukünftigen Einsätzen der einschaligen Bauweise beachtet werden sollten. Sie lassen sich zeitlich auf den Einbauvorgang der 1. Lage und den der 2. Lage eingrenzen.

#### 4.4.1.1 Einbau der 1. Lage

Beim Einbau der 1. Lage wurde vor Beginn der Arbeiten gemeinsam mit der bauausführenden ARGE festgelegt, dass hier gegenüber der Regelbauweise bis auf wenige Ausnahmen keine Besonderheiten zu beachten sind. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass die 1. Lage eine entsprechende Ausführungsqualität erhalten sollte wie die Spritzbeton-Außenschale der Regelbauweise. Es konnte damit gezeigt werden, wie eine Spritzbeton-Außenschale zur 1-schaligen Bauweise genutzt werden kann, ohne dass gesonderte Bedingungen, die zu höheren Kosten als üblich geführt hätten, beachtet werden mussten.

Die besonderen Maßnahmen, die hier abweichend von der Regelbauweise zusätzlich durchgeführt wurden, beschränkten sich auf den

- Einbau der Dränstreifen sowie
- die Zugabe von Stahlfasern.

Der Zuluftstollen Kehital musste im Bereich der Versuchsstrecke aufgrund der geologischen Randbedingungen teilweise in mehreren, bis zu fünf Teilausbrüchen aufgeföhren werden. Dieses führte zu Schwierigkeiten beim Einbau der Dränstreifen. Durch den ständigen Wechsel zwischen Ausbruch, Schutterung und Sicherungseinbau war ein gleichmäßiges und sauberes Einspritzen der Dränstreifen nur schwer möglich. Der Einbau der Dränstreifen erfolgte zudem kontinuierlich, was sich störend auf den Baubetrieb auswirkte.

Die im Bereich der Konstruktionsvariante 1 (Blöcke 1 und 2) eingebauten Stahlfasern wurden sowohl in loser als auch verklebter Form an der Baustelle angeliefert und in der Mischanlage dem Spritzbeton beigegeben. Beim Mischen zeigte sich, dass die in loser Form eingemischten Stahlfasern zur Igelbildung neigten. Daher kamen fortwährend nur Mischungen zum Einsatz, denen verklebte Stahlfasern zugegeben wurden.

#### 4.4.1.2 Einbau der 2. Lage

Nach Einbau der 1. Spritzbetonlage erfolgten wie bei der Regelbauweise der Einbau der Sauberkeitsschicht, die Installation des Entwässerungssystems sowie die Ausführung der Bankette. Anschließend wurde wie beim Fluchtstollen des Fernthal-Tunnels ein dünnes Bett (ca. 5 cm Höhe) aus dem angelieferten Spritzbeton allerdings ohne Beschleunigerzugabe händisch aufgebracht. Dadurch sollte einerseits ein sauberer Übergang im Fugenbereich Gewölbe – Sohle erreicht werden, andererseits sollte der entstehende Rückprall aus dem schräg aufgetragten Betonbett aus dem zu betonierenden Bereich herausrollen. Die Ausführungen zeigten, dass sich diese Maßnahme auch in Kombination mit dem neuartigen Entwässerungssystem bewährte.

Die Herstellung der einzelnen Blöcke erfolgte in der entgegengesetzten Vortriebsrichtung, d. h. angefangen vom Block 1 (Stahlfaser-Spritzbeton) bis Block 10 (unbewehrter Schalbeton).

Bei der Herstellung der 2. Spritzbetonlage lag die Priorität bei der Vermeidung bzw. Minimierung von

Spritzschatten, um eine maximale Dichtheit (s. Kapitel 4.4.2) zu erreichen. Neben der Bewehrungsart und deren Anordnung war hier eine qualitativ hochwertige Spritzbeton-Verfahrenstechnik ausschlaggebend. Da allerdings aus Kostengründen gegenüber dem Einbau der 1. Lage bzw. im Vergleich zur Regelbauweise bewusst keine gesonderten maschinellen Maßnahmen bzw. Verfahren zum Einsatz kommen sollten, musste die hochwertige Ausführungsqualität allein durch die Auftragungstechnik, d. h. die halbautomatische Düsenführung (Spritzbeton-Manipulator), erzielt werden.

Zur Gewährleistung eines optimalen Verbundes wurde die 1. Spritzbetonlage vor Einbau der 2. Lage mit Hochdruckwasserstrahlung gesäubert und vorgehäst. Vorgaben hinsichtlich der Vorbehandlung existierten grundsätzlich nicht. Entscheidend war, dass die 1. Lage frei von losen Partikeln war und durch die Vornässung ein gewisser Haftverbund beim Auftragen erreicht wurde. Konkrete Anforderungen an den Vornässungsgrad, wie sie bei der Instandsetzung mit Spritzbeton zukünftig vorgegeben werden sollen, erscheinen für den praktischen Einsatz im Tunnelbau auch nicht zweckdienlich.

Die Stahlfaserzugabe und -menge der 2. Lage der Blöcke 1 bis 4 entsprachen denjenigen der 1. Lage. Weitere Bewehrung kam allerdings im Gegensatz zur 1. Lage (Gitterbögen) nicht zum Einsatz. Dadurch sollte eine Spritzschattenbildung möglichst verhindert werden. Aufgrund der Verbundwirkung zwischen der 1. und 2. Lage hatten die Stahlfasern ausschließlich rissbreitenbeschränkende Aufgaben wahrzunehmen.

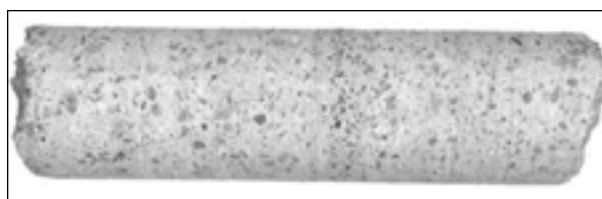
Die Bilder 4-17 und 4-18 zeigen Bohrkernaufnahmen, die dem Block 2 entnommen wurden. Bei beiden Lagen kamen Stahlfasern zum Einsatz.

In Bild 4-17 ist die gesamte Schalenstärke zu sehen. Der Übergang von der 1. zur 2. Lage, d. h. die Verbundfuge, ist nur schwer erkennbar, sie lässt auf eine volle Verbundwirkung schließen. Auch Spritzschatten lassen sich bei diesen Bohrkernen und drei weiteren, die diesem Bereich entnommen wurden, nicht erkennen. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass die Bohrkern nicht im Bereich von Gitterträgern der 1. Lage entnommen wurden.

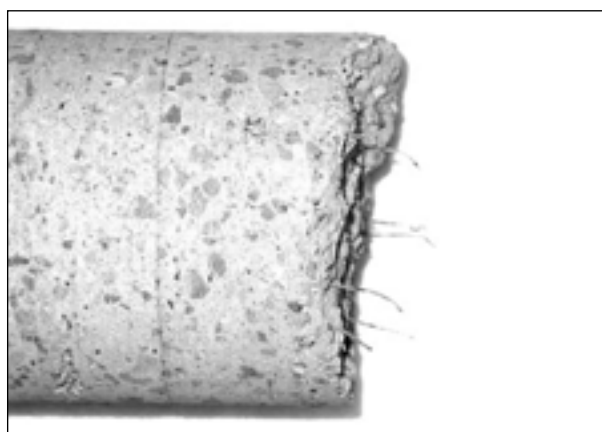
Auf die Oberfläche der stahlfaserbewehrten zweiten Spritzbetonlage der Blöcke 1 bis 4 wurde abschließend eine dünne Schicht des in der Regel-

bauweise aufgetragenen Abdichtungsträgers aufgebracht. Dieser kam ausschließlich die Aufgabe zu, sicherheitshalber die eingebauten Stahlfasern luftdicht abzuschließen, um Rostbildung und etwaige Abplatzungen zu vermeiden. Mehr als 10-jährige Erfahrungen beim einschaligen U-Bahnlos in Bielefeld (s. Kapitel 2.2.1.2) zeigen jedoch, dass zwar eine Rostbildung der Stahlfasern bei Atmosphärenkontakt stattfindet, diese jedoch nicht zu Abplatzungen führt.

Im Bereich der Blöcke 5 und 6 (2. Lage Spritzbeton mit Mattenbewehrung) hätte eine 2-schalige Ausführung eine selbsttragende Bewehrung erfordert. Aufgrund der Verbundwirkung zur ersten Lage konnten hier allerdings die Bewehrungsmatten an der 1. Spritzbetonlage befestigt werden. Dadurch konnten auch für diese Bereiche die Voraussetzungen für eine minimale Spritzschattenbildung erreicht werden.



**Bild 4-17:** Bohrkern aus Block 2 (1. Lage Stahlfaser-Spritzbeton, 2. Lage Stahlfaser-Spritzbeton)



**Bild 4-18:** Bohrkern aus Block 2 – Detail mit Stahlfaserverteilung



**Bild 4-19:** Bohrkern aus Block 5 (1. Lage Spritzbeton, 2. Lage Spritzbeton, beide mit Mattenbewehrung)



**Bild 4-20:** Positionierung des Schalwagens in Block 7 (2. Lage Schalbeton, unbewehrt)

Bei der Herstellung der zweiten Lage der Blöcke 7 und 8 (Schalbeton, unbewehrt) sowie der Blöcke 9 und 10 (Schalbeton, stahlfaserbewehrt) kam der in Bild 4-20 dargestellte Schalwagen zum Einsatz. Dazu wurde das Schalgerüst auf einen Lkw montiert und konnte somit in die entsprechenden Positionen verfahren werden.

Trotz des vergleichsweise kleineren Querschnittes der Versuchsstrecke zu den Regelquerschnitten der Haupttröhren zeigte sich jedoch auch hier, dass eine gewisse Einarbeitungszeit für die Schalwagenmontage erforderlich ist. Hierbei kam allerdings erschwerend das starke Gefälle des Fluchtstollens (ca. 8 %) hinzu. Die Schalwagenkonstruktion blieb der ausführenden ARGE überlassen.

#### 4.4.2 Dichtigkeit

Neben der Ausführung der Versuchsstrecke lag der Schwerpunkt der visuellen Untersuchungen auf dem Dichtheitsverhalten der verschiedenen Konstruktionsvarianten. Obwohl von vornherein erwartet wurde, dass die Dichtigkeit nur durch den Einbau einer zweiten Lage erreicht werden kann, wurde bereits das sich einstellende Dichtheitsverhalten der 1. Lage untersucht, um etwaige Undichtigkeiten nach Fertigstellung der Versuchsstrecke besser nachvollziehen zu können. Zudem war im Bereich der Blöcke 1 und 2 durch die Stahlfaserzugabe anstelle der Mattenbewehrung eine gegenüber der Regelbauweise geänderte Bewehrungsart eingebaut, was eine geringe Spritzschattenbildung und damit ein besseres Dichtheitsverhalten erwarten ließ.

##### 4.4.2.1 Dichtigkeit nach Einbau der 1. Lage

Bei den Beobachtungen des Dichtheitsverhaltens der ersten Spritzbetonlage konnte eindeutig eine Abhängigkeit zwischen der Feuchtigkeitsentwick-

lung in der Versuchsstrecke und den jahreszeitlich schwankenden Niederschlagsmengen im Bereich des Zuluftstollens nachgewiesen werden. Der in den Boden infiltrierte Niederschlag wurde nach 4 bis 5 Tagen an der Spritzbetonleibung sichtbar. Zwischen den unterschiedlichen Bewehrungsabschnitten stellte sich das Dichtheitsverhalten wie folgt dar:

##### Abschnitt mit Spritzbeton, stahlfaserbewehrt (Blöcke 1 und 2)

Im Bereich des mit Stahlfaser-Spritzbeton ausgeführten Abschnittes zeigten sich direkt nach Einbau Feuchtstellen, die sich auf bestimmte Bereiche konzentrierten (Bild 4-21). In diesen Bereichen waren die Feuchtstellen überwiegend längs der Gitterträger zu orten. Ursache dieser Undichtigkeiten dürften örtliche Wasserzutritte sein, die sich aufgrund der nicht zu vermeidenden Spritzschattenbildung längs der Gitterträger verteilten. Die größten Wasserzutritte waren allerdings aus dem ungesicherten Sohlbereich zu beobachten.

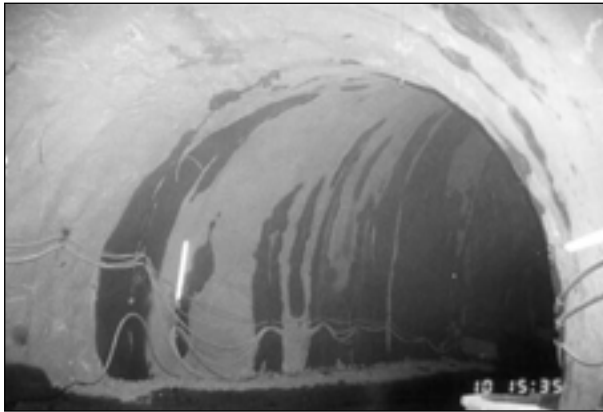
##### Abschnitt mit Spritzbeton, mattenbewehrt (Blöcke 3 bis 10)

Die entsprechend der Regelbauweise in den Blöcken 3 bis 10 eingebaute mattenbewehrte Spritzbetonschale zeigte keine Unterschiede hinsichtlich des Dichtheitsverhaltens gegenüber dem mit Stahlfasern bewehrten Abschnitt. Auch in diesem Abschnitt wurden die Gitterträger eingebaut, so dass sich auch hier Längsläufigkeiten des Bergwassers ergaben (Bild 4-22).

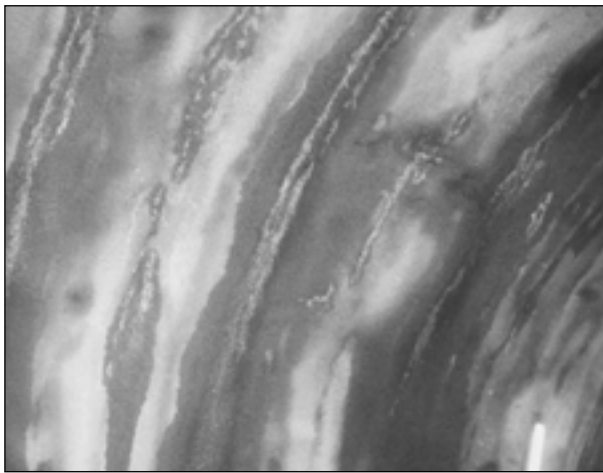
Eine Zunahme der Feuchtigkeitsstellen aufgrund einer erhöhten Spritzschattenbildung gegenüber dem stahlfaserbewehrten Abschnitt war nicht feststellbar.

Aufgrund der jahreszeitlich bedingten Niederschlagsschwankungen gingen in den Sommermonaten die Feuchtstellen im gesamten Bereich der Versuchsstrecke zurück. Zudem konnte mit fortschreitendem Alter der Schale eine Zunahme von Sinterstellen beobachtet werden, die insgesamt zu einer Abnahme der Feuchtstellen führten.

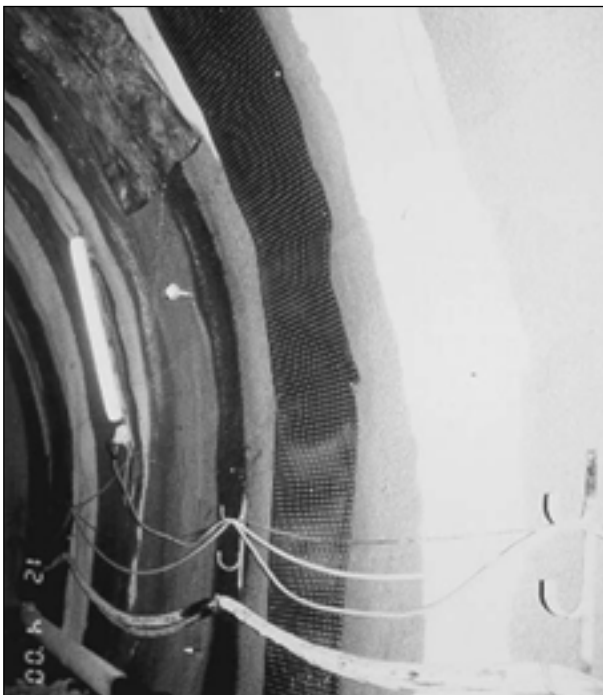
Im Bereich der Blöcke 2 und 10 wurde jeweils eine tropfende Stelle beobachtet, die zeitweise je nach Niederschlagsmenge in eine fließende Stelle überging. Zur Beherrschung dieser Stellen wurden, wie bei der 2-schaligen Regelbauweise üblich, Noppenbahnstreifen auf die erste Spritzbetonlage aufgebracht, die das Bergwasser fassten und in den Sohlbereich ableiteten (Bild 4-23).



**Bild 4-21:** Feuchtstellen im Bereich der Gitterträger der Blöcke 1 und 2 (Stahlfaserbewehrung)



**Bild 4-22:** Feucht- und Sinterstellen im Bereich Block 4 (Mattenbewehrung)



**Bild 4-23:** Ableitung punktueller Wasserzutritte über Noppenbahnstreifen im Bereich von Block 10

#### 4.4.2.2 Dichtheit nach Einbau der 2. Lage

Der komplette Einbau der 2. Lage der Versuchsstrecke wurde Ende Mai 2002 fertiggestellt. Während des Einbaus der 2. Lage und nach deren Fertigstellung fanden regelmäßige Begehungen der Versuchsstrecke statt, um das Dichtheitsverhalten der jeweiligen Gesamtkonstruktionen erfassen zu können. Dazu wurden die einzelnen Blöcke vierteljährlich, d. h. in den Monaten Februar, Mai, August und Oktober 2002 sowie Januar und April 2003, fotografisch erfasst und hinsichtlich der Riss- und Feuchtigkeitsentwicklung analysiert. Bild 4-24 bis Bild 4-27 zeigen exemplarisch das Dichtheitsverhalten einzelner Blöcke der Versuchsstrecke. Dabei stellt sich das Dichtheitsverhalten der einzelnen Abschnitte wie folgt dar:

##### Abschnitt mit Spritzbeton (Blöcke 1 bis 6):

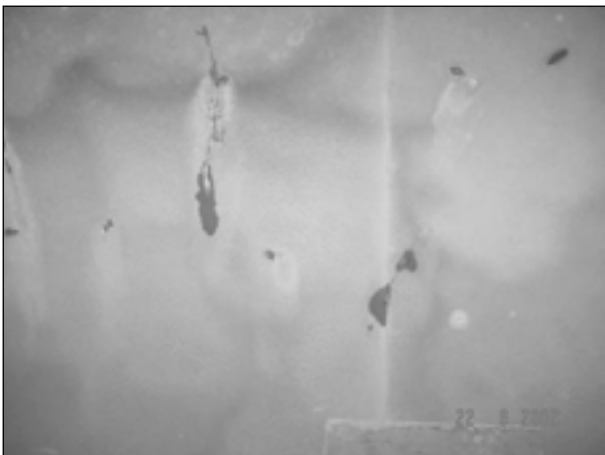
Bild 4-24 zeigt den Bereich der Blöcke 1 und 2, bei denen eine zweite stahlfaserbewehrte Spritzbetonlage aufgebracht wurde. Zum Zeitpunkt der Aufnahme konnte nur eine Feuchtstelle in diesem Bereich festgestellt werden. Auch während des gesamten Beobachtungszeitraumes konnten keine weiteren erwähnenswerten Feuchtstellen erfasst werden.

Entsprechende Beobachtungen gelten auch für den Bereich der Blöcke 3 und 4, bei denen die zweite Spritzbetonlage ebenfalls mit Stahlfasern bewehrt wurde.

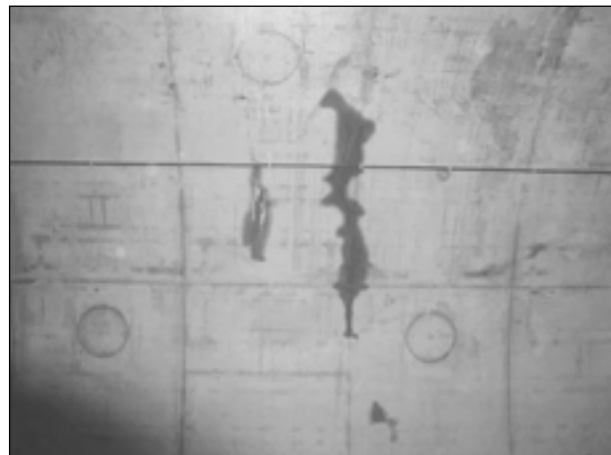
Bild 4-25 zeigt das Dichtheitsverhalten im Bereich von Block 5, bei dem die zweite Spritzbetonlage genau wie die erste Lage mit einer Mattenbewehrung versehen wurde. Über den gesamten Beobachtungszeitraum wurde hier eine geringfügige



**Bild 4-24:** Feuchtstelle im Bereich der Blöcke 1 und 2 (2. Lage Spritzbeton, stahlfaserbewehrt)



**Bild 4-25:** Risse und Feuchtstellen im Bereich Block 5 (2. Lage Spritzbeton, mattenbewehrt)



**Bild 4-26:** Feuchtstellen im Bereich Block 8 (2. Lage Schalbeton, unbewehrt)

Rissbildung mit Feuchtstellen beobachtet. Ein ähnliches Dichtheitsverhalten wurde bei Block 6 festgestellt. Die höhere Anzahl an Feuchtstellen der Blöcke 5 und 6 wird auf die Spritzschattenbildung zurückgeführt, die sich teilweise auch durch die Mattenbewehrung im Bereich der zweiten Lage ergeben hat (s. a. Bild 4-19).

#### **Abschnitt mit Schalbeton (Blöcke 7 bis 10):**

Aufgrund des späten Einbaus der zweiten Lage wurde gerade bei den geschalteten Varianten mit einer erhöhten Zwangbeanspruchung zwischen der ersten und zweiten Lage gerechnet. Dadurch wären bei den unbewehrten Blöcken 7 und 8 Risse mit vergleichsweise großen Rissweiten nicht zu verhindern gewesen.

Im Abschnitt der geschalteten zweiten Lage wurde im Block 8 eine erwähnenswerte Feuchtstelle auf der Tunnelleibung festgestellt (Bild 4-26). Ursache hierfür ist ein Riss, der sich quer zur Tunnelachse entwickelte. Seine Ausrichtung lässt auf die Zwangbeanspruchung zwischen den beiden Lagen schließen. Je nach den Witterungsverhältnissen konnte eine Zunahme oder Abnahme der Feuchtstelle beobachtet werden, die sich zum Teil bis auf die Fahrbahn ausweitete. Von einem dauerhaften Versintern des Risses ist nicht auszugehen.

Positiv zeigte sich allerdings der Block 7, der die gleiche Konstruktionsvariante wie Block 8 aufweist. Hier wurden während des Beobachtungszeitraumes keine nennenswerten Feuchtstellen auf der Tunnelleibung festgestellt.

Die Blöcke 9 und 10 zeigten das beste Dichtheitsverhalten der Versuchsstrecke. Hier waren wäh-



**Bild 4-27:** Bereich Blöcke 9 und 10 (2. Lage Schalbeton, stahlfaserbewehrt)

rend des Beobachtungszeitraumes keine Feuchtstellen auf der Tunnelleibung feststellbar. Lediglich die Stellen der Bohrkernentnahme wiesen nach deren Verschluss Feuchtstellen auf. Sie sind allerdings für eine Beurteilung des Dichtheitsverhaltens irrelevant. Sie zeigen im Gegenteil, dass in diesem Abschnitt der Versuchsstrecke Bergwasser ansteht.

In der Tabelle 4-2 ist der Umfang der auf den Leibungen jeweils beobachteten Feuchtstellen gegenübergestellt worden. Der Umfang lässt sich in drei Kategorien einordnen: keine, geringe sowie mäßige Feuchtstellen. Die Bandbreite zwischen zwei Kategorien liegt in den jahreszeitlichen Schwankungen der Feuchtstellen begründet. Deutlich wird, dass bei den endgültigen Spritzbetonkonstruktionen die Blöcke 1 bis 4 die geringsten Feuchtstellen aufweisen, so dass von einem positiven Einfluss der Stahlfaserbewehrung in der zwei-

Bl.-Nr.	1. Lage	2. Lage	Feuchtstellen
1	Spb. (Stf)	Spb. (Stf)	keine bis gering
2	Spb. (Stf.)	Spb. (Stf)	keine bis gering
3	Spb. (M)	Spb. (Stf)	keine bis gering
4	Spb. (M)	Spb. (Stf)	keine bis gering
5	Spb. (M)	Spb. (M)	gering bis mäßig
6	Spb. (M)	Spb. (M)	gering bis mäßig
7	Spb. (M)	Schalb. (o.B.)	mäßig
8	Spb. (M)	Schalb. (o.B.)	mäßig
9	Spb. (M)	Schalb. (Stf)	keine
10	Spb. (M)	Schalb. (Stf)	keine

Spb. = Spritzbeton, Schalb. = Schalbeton,  
Stf = Stahlfaserbewehrung, M = Mattenbewehrung,  
o.B. = ohne Bewehrung

**Tab. 4-2:** Umfang der Feuchtstellen auf der Tunnelleibung

ten Lage auf das Dichtheitsverhalten gegenüber einer Mattenbewehrung (Blöcke 5 und 6) gesprochen werden kann. Die unterschiedliche Bewehrungsart in der ersten Lage der Blöcke 1 und 2 (Stahlfasern) sowie der Blöcke 3 und 4 (Matten) wirkte sich dagegen auf das Dichtheitsverhalten nicht aus. Zwar lässt sich der Umfang der Feuchtstellen der Blöcke 7 und 8 mit demjenigen der Blöcke 5 und 6 nicht vergleichen, allerdings zeigten die Beobachtungen der Feuchtstelle im Block 8, dass hier dauerhaft kein Versintern der Feuchtstelle zu erwarten ist, so dass der Umfang bei mäßig eingestuft wird, während sich die Variante in den Blöcken 5 und 6 von gering bis mäßig einordnen lässt. Bei den Blöcken 9 bis 10 waren während des Beobachtungszeitraumes keine Feuchtstellen, Risse oder Sinterstellen auf der Tunnelleibung festzustellen.

## 4.5 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungsergebnisse im Rahmen der einschaligen Versuchsstrecke lassen Schlussfolgerungen zur Ausführung, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit einschaliger Spritzbetonkonstruktionen zu. Zusätzlich lassen sich Vergleiche zu den einschaligen Varianten mit einer geschalteten zweiten Lage ziehen.

### 4.5.1 Ausführung

Die von der zweischaligen Regelbauweise beim Einbau der ersten Spritzbetonlage abweichenden Ausführungen betreffen den Einbau der Dränstreifen sowie den Einbau des Stahlfaser-Spritzbetons. Bei einer zukünftigen Ausführung sollte Folgendes berücksichtigt werden:

- Beim Ausbruch in Teilen sollte der Einbau von Dränstreifen, wie auch beim Vortrieb der Hauptrohren gehandhabt, nicht planmäßig, sondern ausschließlich bei konzentrierten Wasserzutritten vorgesehen werden. Über den Einbau sollte direkt vor Ort entschieden werden. Beim Verlegen und Einspritzen der quer und längs laufenden Noppenbahnstreifen ist auf eine hohe Ausführungsqualität zu achten. Im Bereich der Blöcke 5 und 8 wurden im Übergangsbereich Gewölbe/Sohle Feuchtstellen beobachtet, die zwar für eine Beurteilung der verschiedenen Ausführungsvarianten irrelevant sind, dennoch auf Ausführungsschwierigkeiten beim Einbau der Noppenbahnstreifen zurückgeführt werden.
- Die beim Einmischen der Stahlfasern aufgetretenen Probleme werden durch den unerprobten Einsatz von Stahlfaser-Spritzbeton beim Bau des Rennsteigtunnels begründet, da Stahlfaser-Spritzbeton ausschließlich im Bereich der Versuchsstrecke zum Einsatz kam. Im Zuge eines planmäßigen Einsatzes wird die Stahlfaserzugabe im Spritzbeton als problemlos erachtet.

Vor Einbau der zweiten Lage ist die erste Spritzbetonlage von losen Partikeln zu säubern und vorzunässen. Diese Maßnahme sollte nicht unterschätzt werden, da die Verbundwirkung ausschließlich über die Verzahnung der zweiten mit der ersten Lage gewährleistet sein muss. Bei nicht idealen Voraussetzungen, die eine lange Zeitspanne bis zum Einbau der zweiten Lage verursachen können und somit eine Verschmutzung der ersten Lage durch den laufenden Baubetrieb bewirken, ist dieser Maßnahme besondere Beachtung zu schenken.

### 4.5.2 Tragfähigkeit

Die Spritzbetonschale erfährt die maximalen planmäßigen Beanspruchungen im Anfangsstadium, d. h. direkt nach Einbau des Spritzbetons. Diese Belastungsphase erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 2 bis 3 Tagen. Danach verlaufen die Stauchungs- bzw. Dehnungsbeanspruchungen gleich bleibend auf niedrigerem Niveau weiter. Die Beanspruchungen aus der Hydratationswärmeentwicklung konzentriert sich auf die ersten 10 Tage nach Sicherungseinbau.

Unregelmäßigkeiten im Bauablauf, wie z. B. Vortriebsunterbrechungen, können zu unplanmäßigen Beanspruchungen der Spritzbetonschale führen. Diese bewirken Lastumlagerungen in der Schale und können die für das Anfangsstadium planmäßig



errechneten Beanspruchungen noch übersteigen, was bei Wiederbeginn des Vortriebs zu einem erhöhten Verbruchsrisiko sowie je nach Einbaupunkt der zweiten Lage zu unerwarteten Zwangbeanspruchungen führen kann.

#### 4.5.3 Gebrauchstauglichkeit

Der Dichtheitszustand nach Einbau der ersten Spritzbetonlage zeigt deutlich, dass die Gebrauchstauglichkeit durch den Einbau ausschließlich einer Spritzbetonlage nicht gewährleistet werden kann. Unter den am Zuluftstollen Kehltal herrschenden hydrologischen Bedingungen wurden trotz eines sorgfältigen Einbaus der ersten Spritzbetonlage Undichtigkeiten beobachtet. Mit fortdauernder Ableitung des Bergwassers und damit vollständiger Absenkung des Grundwasserspiegels wurde zwar eine Abnahme der Feuchtstellen im Gewölbebereich festgestellt, allerdings kann aufgrund der direkten Durchsickerungsmöglichkeit des Oberflächenwassers eine vollständige Abnahme der Feuchtstellen auf der Spritzbetonleibung der ersten Lage ausgeschlossen werden. Die dauerhafte Abdichtung muss daher mit dem Einbau einer zweiten Lage erzielt werden.

##### 4.5.3.1 Erreichbare Dichtheitsklasse im Endzustand

Die visuellen Beobachtungen haben gezeigt, dass eine vollständig trockene Innenschalenleibung bei den in der Versuchsstrecke vorliegenden hydrologischen Bedingungen für sämtliche Spritzbeton-Konstruktionsvarianten im Endzustand nicht erreicht werden konnte. Allerdings konnte auch gezeigt werden, dass keine Konstruktionsvariante vollständig versagt hat und für einen zukünftigen Einsatz als völlig ungeeignet erscheint. Das Dichtheitsverhalten der Variante 4 im Bereich der Blöcke 7 und 8 führte jedoch im Hinblick auf eine zukünftige Einsatzempfehlung zu eher unbefriedigenden Ergebnissen.

Die für die in die Versuchsstrecke eingebauten Spritzbeton-Konstruktionsvarianten mit Stahlfaserbewehrung zu erreichende Dichtheit lässt sich nach ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1, Tabelle 5.1.1, in die Klasse 3, kapillare Durchfeuchtung, einordnen. Dabei muss die Leibung des Ausbaus so dicht sein, dass an den Innenseiten nur vereinzelt und örtlich begrenzt handfeuchte Stellen auftreten. Als handfeuchte Stellen sind solche anzusehen, an denen zwar eine Durchfeuchtung der Leibung zu erkennen ist und aufgelegtes Lösch- oder Zeitungspapier sich

infolge Feuchtigkeitszunahme verfärbt, aber kein Tropfwasser austritt. Für die Spritzbetonkonstruktionen mit Mattenbewehrung ist die Dichtheitsklasse 3 daher nur bedingt, unter Beachtung einer hohen Ausführungsqualität erreichbar. Insgesamt lassen sich die für die Regelbauweise geforderte Dichtheitsklasse 1, vollständig trocken, sowie bei einer Ausbildung der Innenschale als wasserundurchlässige Betonkonstruktion (WUB-KO) mindestens geforderte Dichtheitsklasse 2, weitgehend trocken, im Endzustand ohne weitere Zusatzmaßnahmen mit den reinen Spritzbetonkonstruktionen nicht erreichen.

Bei den geschalteten Varianten zeigte die Variante mit einer stahlfaserbewehrten zweiten Lage die besten Ergebnisse, auch im Vergleich zu den endgültigen Spritzbetonkonstruktionen. Unter Beachtung einer hohen Ausführungsqualität lässt sich mit dieser Konstruktionsvariante die Dichtheitsklasse 2 nach Teil 5 der ZTV-ING erreichen. Die Variante mit einer unbewehrten zweiten Lage lässt sich dagegen aufgrund der unbefriedigenden Ergebnisse in die Dichtheitsklassifizierung der ZTV-ING nicht einordnen.

##### 4.5.3.2 Verbesserungspotenzial

Die geologischen Randbedingungen im Bereich der Versuchsstrecke hatten den Einbau von Gitterträgern in der ersten Spritzbetonlage über die gesamte Länge der Versuchsstrecke, d. h. auch im Bereich der Blöcke 1 und 2, zur Folge. Der ausschließliche Einbau einer Stahlfaserbewehrung unter Wegfall der Gitterträger in der ersten Lage ließe hier ein verbessertes Dichtheitsverhalten der Spritzbetonschale erwarten. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein Wegfall der Gitterträger nur bei sehr guten geologischen Randbedingungen möglich werden kann.

Weitere Forschungen finden zur Zeit international auf dem Gebiet spritzbarer Abdichtungssysteme statt. Hierbei muss allerdings die Zielsetzung, die mit dem Einsatz einschaliger Konstruktionen verbunden wurde, nämlich wirtschaftliche Vorteile gegenüber der Regelbauweise zu erhalten, generell in Frage gestellt werden.

## 5 2-schalige Ausführungen

Im Zuge der Herstellung der Innenschale des Rennsteigtunnels (BAB A71) wurde seitens der ausführenden ARGE dem Bauherrn der Antrag unterbreitet, die Kalottenbereiche der zwei Lüfterka-

vernen (s. Bild 5-1) sowie die sich anschließenden trompetenförmigen Aufweitungsbereiche in einer 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion auszuführen. Die Hauptursache dieses Vorschlages lag darin, den hohen Schalungsaufwand in diesen geometrisch komplizierten Bereichen zu vermeiden.

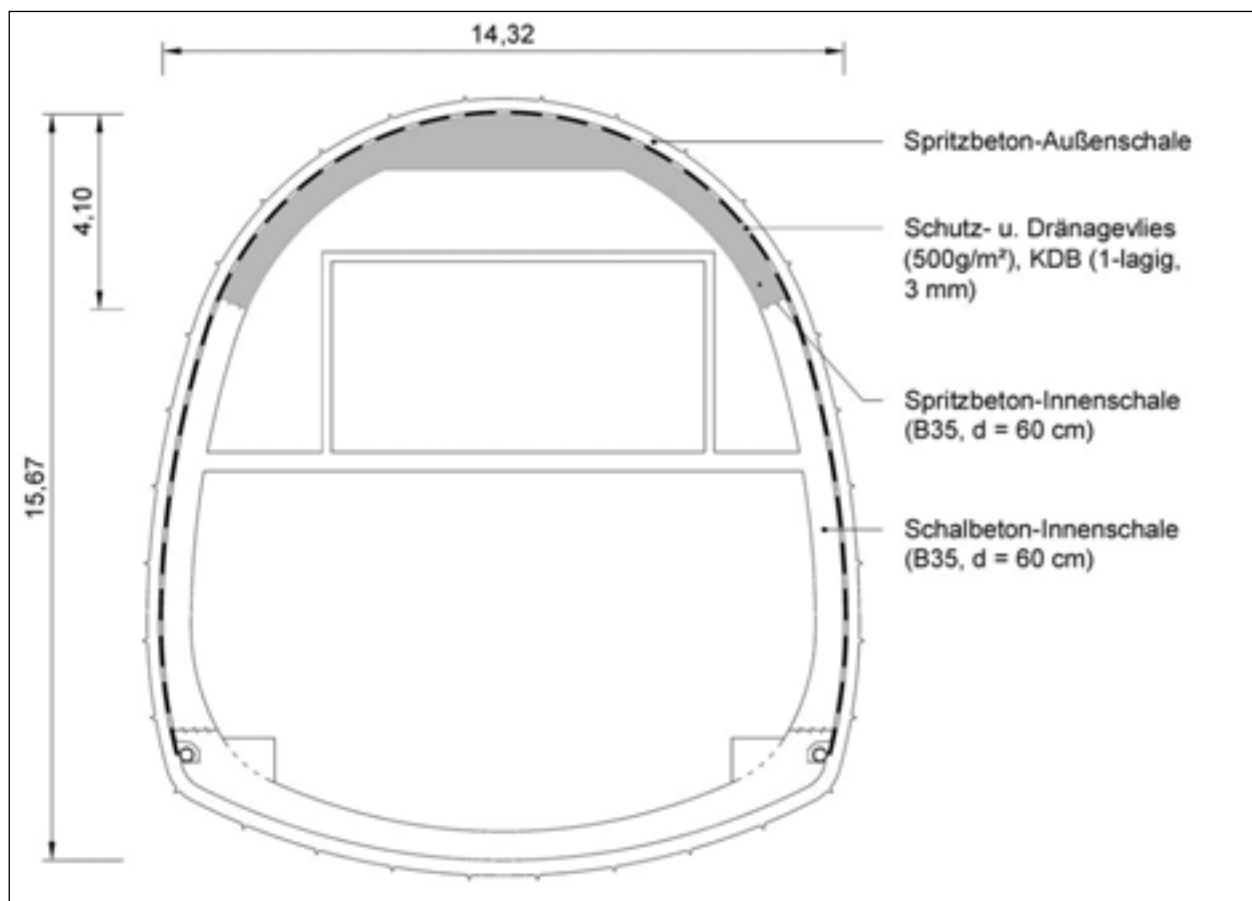
## 5.1 Konstruktion

Die konstruktive Auslegung beruht im Wesentlichen auf den Erfahrungswerten, die vom Bau des Fluchtstollens im Fernthaltunnel (NBS Köln-Rhein/Main, s. Kapitel 2.2.2.1) vorlagen. Die Zustimmung des Bauherrn zur Abweichung von der vertraglich vereinbarten geschalteten Regelbauweise erfolgte allerdings nur unter Erfüllung zusätzlicher Auflagen. Qualitätseinbußen gegenüber der Regelbauweise durften nicht auftreten. Die Gleichwertigkeit der Ausführung gegenüber der Vertragsvariante musste zweifelsfrei gegeben sein. Aufgrund der gerade im Bereich der Lüfterkavernen auftretenden statischen Beanspruchungen wurde beschlossen, einen der beiden Zuluftstollen des Rennsteigtunnels, den Zuluftstollen Floßgraben, als „Einarbei-

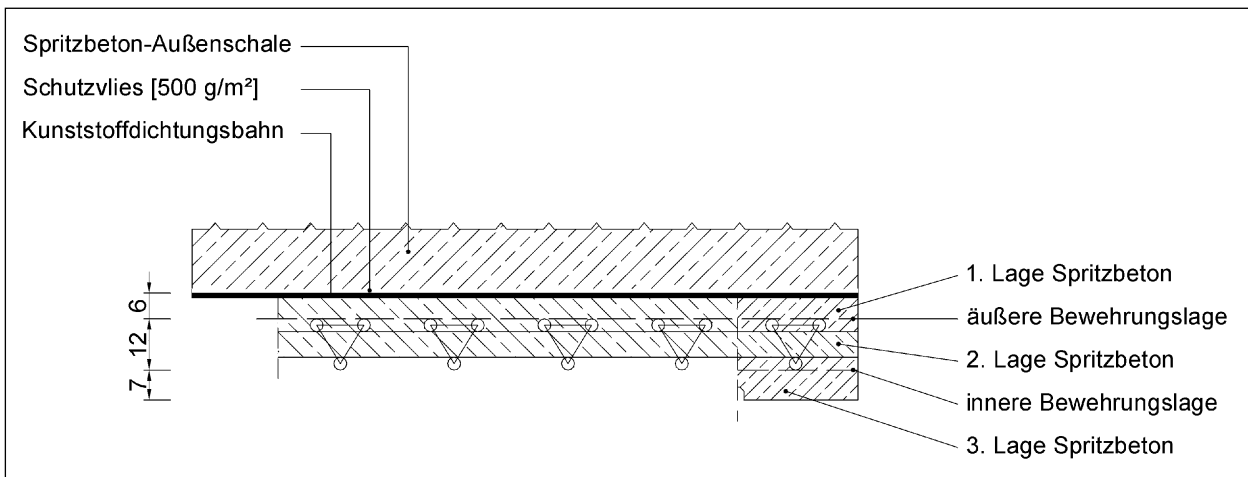
tungsstrecke“ zu nutzen. Erst nach erfolgreicher Ausführung dieser Strecke wurde die Entscheidung zugunsten einer 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion in den Kavernenbereichen der Lüfterkavernen gefällt.

### 5.1.1 Herstellung im Bereich der Zuluftstollen

Der Aufbau der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion ist in Bild 5-2 dargestellt. Zur Reduzierung der Profilungenauigkeiten wurde auf die Spritzbeton-Außenschale ein Isolierträger in 0/5er Körnung aufgebracht. Auf den Isolierträger wurde wie bei der Regelbauweise ein Schutz- und Dränagevlies (500 g/m<sup>2</sup>) angeordnet und anschließend die KDB aufgeschweißt. Nach dem Verschweißen der KDB-Bahnen wurde blockweise eine Stirnabschalung gestellt, d. h., wie bei der Regelbauweise erfolgt eine Trennung der einzelnen Blöcke. Die Bewehrung der Innenschale besteht aus einer äußeren Mattenlage, Pantex-3-Gurt-PS-Trägern und einer inneren Mattenlage aus zwei Mattenlagen. Die 3-Gurt-Träger wurden so eingebaut, dass sich die zwei schwächeren Stäbe bergseitig, der einzelne stärkere Stab luftseitig befindet. Nach Aufbau der



**Bild 5-1:** Positionierung der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion im Kalottenbereich der Lüfterkavernen des Rennsteigtunnels



**Bild 5-2:** Schalenaufbau der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion

Gitterträger und der äußeren Mattenlage wurde zunächst der Bankettbeton befeuchtet und wie beim Fluchtstollen des Fernhaltunnels ein dünnes Bett (ca. 5 cm) aus dem angelieferten Spritzbeton aufgebracht. Anschließend wurde bis zur Innenkante des Gitterträgers der Spritzbeton in einem Winkel von 45° auf ganzer Blocklänge aufgespritzt. Dadurch sollte anfallender Rückprall beim Spritzen des Gewölbes über diese Spritzbetonfläche aus dem zu betonierenden Bereich herausrollen. Anschließend wurde der Spritzbeton in zwei Lagen jeweils zwischen den Gitterträgern nach einer definierten Spritzreihenfolge aufgebracht (Bild 5-2, 1. und 2. Lage Spritzbeton). Nach Entfernen des an den Gitterträgern anhaftenden Spritzbetons erfolgte der Einbau der inneren Bewehrungslagen und der Einbau der dritten Spritzbetonlage mit einer 0/5er Körnung. Die Herstellung der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion in den Kavernenbereichen der Lüfterkavernen erfolgte in der entsprechenden Vorgehensweise.

### 5.1.2 Zusatzmaßnahmen

Die Entscheidung zur Anwendung der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion war an bestimmte Zusatzmaßnahmen gekoppelt, die zwischen Auftraggeber, dem Prüfer und der ausführenden ARGE vereinbart wurden. Zur Festlegung der Zusatzmaßnahmen wurden die möglichen Fehlerquellen des Verfahrens erfasst und bewertet. Im Einzelnen waren dies

- die Bildung von Hohlräumen zwischen KDB und Gebirge,
- die Bildung von Hohlräumen zwischen KDB und dem Innenschalen-Spritzbeton,

- Spritzschatten bzw. Hohlräume innerhalb der Spritzbetonschale,
- unzureichender Haftverbund zwischen Spritzbeton und Bewehrung und damit unzureichender Korrosionsschutz der Bewehrung,
- Trennflächen zwischen den einzelnen Spritzbetonlagen bzw. Fehlstellen in den Arbeitsfugen.

Um diesen potenziellen Fehlerquellen entgegenzutreten, wurden nachfolgende Zusatzmaßnahmen beschlossen:

- glatte, möglichst faltenfreie Verlegung der KDB durch Verdichtung der Rondellenanzahl; mit Hilfe von Abstandhaltern sollten die verbleibenden, unvermeidbaren Ausbeulungen der KDB in der Umgebung der Schweißnähte in der Weise fixiert werden, dass weder eine Federung der KDB noch deren Verlagerung befürchtet werden musste,
- steife und vibrationsarme Befestigung der Bewehrung,
- Herstellung eines hohlraumfreien, dichten Betongefüges, u. a. durch Reduzierung der Stabdurchmesser der Bewehrung im Kavernenbereich auf max. 20 mm, kein Spritzen durch mehrere Bewehrungslagen, Planung ausreichend großer Stababstände der Bewehrung,
- nachträgliche First-/Ringspaltverpressung zwischen KDB und Spritzbeton-Innenschale über Verpressschläuche, die radial die Innenschale durchdringen und an der KDB befestigt werden (Verpressdruck zwischen 2 bis max. 3 bar); dabei ist ein Eindringen von Suspension in die Dränagekörper zu unterbinden,

- Gewährleistung einer Betonfestigkeit der Spritzbeton-Innenschale entsprechend der Festigkeit einer Ort beton-Innenschale (B 35),
- Nachbehandlung des Spritzbetons über Abschottung einzelner Bereiche.

Aufgrund der Erfahrungen vom Fluchtstollen des Fernthal-Tunnels wurde auf ein zusätzliches Anbringen eines Geogitters auf der KDB verzichtet. Eine Verpressung zwischen der Spritzbeton-Außenschale und der KDB war nicht vorgesehen, da hierdurch die Dränwirkung des Vlieses, der lokalen Unebenheiten und der Räume hinter unvermeidbaren Falten der KDB verloren gegangen wäre [15].

Zur Prüfung der Ausführung der Zusatzmaßnahmen waren nachfolgende Ergänzungen erforderlich:

- Darstellung der Rezepturen und Auswertung der Eignungsprüfungen der zum Einsatz kommenden Spritzbetonsorte,
- Durchführung und Auswertung von Güte- und Erhärtungsprüfungen, ergänzt durch Kernbohrungen aus dem Bauwerk,
- Durchführung von Kernbohrungen zur Erkundung möglicher Hohlräume,
- Darstellung der Spritzabläufe in den Ausführungszeichnungen,
- Detailangaben zur Ausführung der Block- und Arbeitsfugen,
- Anordnung der Injektionsschläuche in den Ausführungszeichnungen mit Vorgaben zur planmäßigen Verpressung (Mischung, Verpressdruck, etc.),
- Darstellung des Nachbehandlungskonzeptes für den Spritzbeton.

## 5.2 Erfahrungen

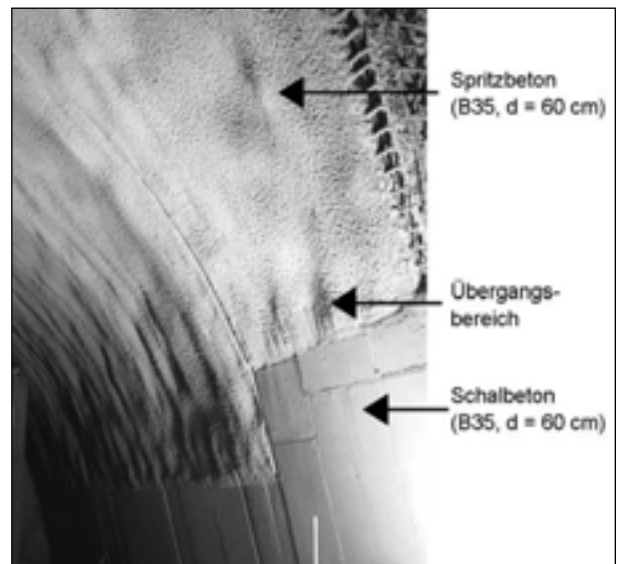
Durch die Begleitung der Planungen und Ausführungen der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion am Rennsteig-Tunnel sollten Erfahrungen zur Ausführbarkeit, Dichtheit und Wirtschaftlichkeit gewonnen werden.

### 5.2.1 Ausführbarkeit

Die gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass der Erfolg einer qualitativ gleichwertigen Ausführung zur geschalteten Regelbauweise wesentlich vom Spritz-



**Bild 5-3:** 2-schalige Spritzbetonkonstruktion im Zuluftstollen des Rennsteigtunnels (BAB A71)



**Bild 5-4:** Übergang Schalbeton/Spritzbeton-Innenschale im Kallottenbereich der Lüfterkavernen

verfahren sowie der verwendeten Spritzbeton-Rezeptur abhängt.

Dies wurde zu Beginn der zu spritzenden Innenschale im Zuluftstollen Floßgraben deutlich. Verschiedene Erprobungen mit unterschiedlichen Rezepturen und Auftragstechniken führten anfangs zu eher unbefriedigenden Ergebnissen. Aufgrund der Festigkeitsanforderungen sollte zur Erstarrungsbeschleunigung ursprünglich ein alkalifreier Beschleuniger zum Einsatz kommen. Die alkalifreie Beschleunigung verursachte allerdings ein zu schnelles Erstarren und Anhaften an der Bewehrung. Dadurch war eine nachträgliche Verformung und Verschiebung des frischen Betons schon nach wenigen Sekunden nicht mehr möglich. Ein weiterer Betoneintrag hinter die Bewehrung gestaltete sich als schwierig durchführbar. Im

Zuge der „Erprobungsstrecke“ konnten jedoch eine optimierte Rezeptur sowie Auftragungstechnik gefunden werden. Zur Erstarrungsbeschleunigung griff man dabei auf den alkaliarmen Beschleuniger zurück, der bereits in Zuge der Spritzbeton-Außenschalen der Hauptröhren zum Einsatz kam. Die geforderte Festigkeit konnte nachgewiesen werden.

Um ein möglichst monolithisches Bauwerk zu erhalten, sollte ein anisotropes Festigkeitsverhalten vermieden werden. In diesem Sinne sollten die gespritzten Innenschalen im Rennsteig-Tunnel so weit wie möglich „frisch in frisch“ hergestellt werden. Durch das kontinuierliche Spritzen wurde erreicht, dass zumindest bis zur Unterbrechung für den Einbau der inneren Bewehrungslage keine Lagenstruktur, wie sie häufig bei den beim Vortrieb eingebrachten Spritzbeton-Außenschalen zu beobachten ist, entstehen kann. Um auch die innere, nach der Bewehrungsergänzung aufgebrachte Betonschicht fest mit der übrigen Schale zu verbinden, zeigten die Maßnahmen wie

- Abschluss der ersten Spritzbetonlage mit einer bewusst unebenen Oberfläche, die eine bestmögliche Verzahnung ermöglicht,
- Vornässen der „alten“ Spritzbetonoberfläche im Bedarfsfall sowie
- Fertigstellung des Gewölbes noch am Tag des Betonierbeginns

positive Ergebnisse.

Die Verwendung der Gitterbögen zur Verbindung beider Lagen war nicht beabsichtigt. Spritzversuche zeigten, dass das vollständige Einspritzen der Gitterbögen in der ersten Lage eine bestmögliche Betonqualität im Bogenbereich liefert. Ein teilweises Einspritzen mit Schutz der Innengurtstäbe hatte sich als kontraproduktiv erwiesen. Die Maßnahme war sehr zeitaufwändig und lieferte einen örtlich schlecht verdichteten und übermäßig rauen Spritzbeton, der keine vollwertige Verbindung mit der nächsten Lage mehr ermöglicht. In der endgültigen als optimal erprobten Version wurde der Innengurt des Gitterträgers nach dem Spritzen der ersten Lage sofort mit Kratzwerkzeugen gereinigt. Die innere Bewehrung wurde mit Hilfe eingespritzter Rödeldrähte befestigt.

Im Kavernenbereich der Luftaustauschzentralen musste das Spritzbetongewölbe auf den bereits vorhandenen unteren Teil der Auskleidung gesetzt werden, der in Schalbeton hergestellt wurde. Dabei

war eine einwandfreie Verbundwirkung zu gewährleisten.

Als optimale Regellösung, hat sich wie bei den einschaligen Spritzbeton-Konstruktionen für die Anschlussausführung folgende Vorgehensweise bewährt:

- Vornässen des „alten“ Betons,
- händisches Aufbringen einer ca. 2 cm dicken Schicht des zum Spritzen angelieferten Betons ohne BE-Mittel.

Das Einspritzen von Rückprall konnte im Gewölbebereich durch konsequentes Spritzen in horizontalen Lagen von unten nach oben verhindert werden. Wichtig dabei war eine sofortige und im weiteren Verlauf regelmäßige Entfernung des Rückpralls von der Arbeitsfuge vor der planmäßig gespritzten ersten Lage.

### 5.2.2 Dichtheit

Hinsichtlich des Dichtheitsverhaltens war entsprechend der Regelbauweise die Klasse 1 nach der Tabelle 5.1.1 des Teils 5, Abschnitt 1 der ZTV-ING einzuhalten. Im Rahmen der Untersuchungen waren keine Undichtigkeiten zu beobachten. Hierbei ist zu erwähnen, dass aufgrund der dränierten Ausführung des Rennsteigtunnels entgegen den Ausführungen am Fernthal-Tunnel kein Wasserdruck auf die Tunnelkonstruktion im Endzustand zu berücksichtigen war.

### 5.2.3 Wirtschaftlichkeit

Die wirtschaftlichen Vorteile einer zweischaligen Spritzbetonkonstruktion gegenüber der Regelbauweise lassen sich nur objektspezifisch quantifizieren. Hierzu muss bedacht werden, dass zwar der hohe Schalungsaufwand durch den Einsatz von Spritzbeton vermieden wird und somit ein gewisses Einsparungspotenzial erreicht werden kann, allerdings Aspekte wie

- Zusatzmaßnahmen (s. Kapitel 5.1.2),
- Erfordernis einer „Einarbeitungsstrecke“ sowie
- die Einflüsse auf den Baubetrieb, die sich gerade in den arbeitsintensiven Kavernenbereichen am Rennsteigtunnel deutlich gemacht haben,

im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht unberücksichtigt bleiben dürfen.

### 5.3 Schlussfolgerungen

Die Beobachtungen während der Ausführung und nach deren Beendigung zeigen, dass bei einer entsprechenden Konzipierung und kontrollierten Ausführung durch qualifiziertes Personal die Herstellung einer tragfähigen und dauerhaften Tunnelauskleidung auch mit Spritzbeton möglich ist.

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte auf dem Gebiet der Spritzbetonverfahrenstechnik sowie -materialtechnologie haben im Straßentunnelbau zu der Überlegung geführt, Spritzbetonkonstruktionen nicht nur zur vorübergehenden Sicherung, sondern als endgültige Konstruktionen zu nutzen.

Dabei lassen sich im bergmännischen Tunnelbau prinzipiell zwei Anwendungsfälle unterscheiden:

- einschalige Spritzbetonkonstruktionen, dabei soll die Spritzbeton-Außenschale im Verbund mit einer zweiten Spritzbetonlage die endgültige Konstruktion darstellen, d. h., entgegen der zweischaligen Regelbauweise muss die Außenschale auch rechnerisch Tragfunktionen übernehmen, oder
- zweischalige Spritzbetonkonstruktionen, anstelle einer Ort beton-Innenschale wird eine Spritzbeton-Innenschale eingebaut.

Die Einsatzbereiche und -grenzen der beiden Anwendungsfälle sind für den Straßentunnelbau jedoch weitestgehend unklar. Inzwischen existieren zwar einige Anwendungen, wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse und Erfahrungen zu den Einsatzbereichen, aber auch -grenzen dieser Konstruktionen liegen allerdings bislang nicht vor. Ziel des Forschungsprojektes war es daher, diese Erkenntnisse zu erarbeiten, um daraus Empfehlungen zu den Einsatzbereichen endgültiger Spritzbetonkonstruktionen ableiten zu können. Das Hauptaugenmerk bei der 1-schaligen Bauweise lag in dem Dichtheitsverhalten der Konstruktionen im Hinblick auf einen dauerhaften Einsatz im Straßentunnelbau. Beim Einsatz als Spritzbeton-Innenschale stand primär die Ausführungsqualität im Vergleich zur Ort beton-Innenschale im Vordergrund.

Der bisherige Kenntnisstand zeigt, dass die für den Straßentunnelbau maßgebende ZTV-ING, Teil 5, als

Regelbauweise die 2-schalige Bauweise vorsieht. Dabei wird eine strikte Trennung der Außen- von der Innenschale gefordert. Anforderungen, die bei einem Einsatz 1-schaliger Spritzbetonkonstruktionen zu berücksichtigen sind, müssen daher zur Zeit noch objektspezifisch im Rahmen der Leistungsbeschreibung geregelt werden.

Für den Einsatz einer Spritzbeton-Innenschale werden bislang in den ZTV-ING, Teil 5, ebenfalls keine Anforderungen definiert, die Möglichkeit eines Einsatzes wird allerdings auch nicht explizit ausgeschlossen. Für die maßgebende Vorschrift der Deutschen Bahn AG, die Rili 853, gilt Entsprechendes, allerdings werden hier etwas konkretere Vorgaben für einen endgültigen Ausbau mit Spritzbeton gegeben.

Eine Analyse von bislang ausgeführten Bauwerken zur 1-schaligen Bauweise ergab, dass in Deutschland die meisten Anwendungen im U-Bahn- und Stadtbahnbau zu finden sind. Die Erfahrungen zum Dichtheitsverhalten fielen zum Teil sehr unterschiedlich aus. Eine wesentliche Erkenntnis war, dass Undichtigkeiten im Regelfall auf Spritzschattenbildungen im Bereich der Gitterträger zurückgeführt werden konnten. Die gravierendsten Mängel lagen dort vor, wo die Gitterträger als Verbundsicherung zwischen der ersten und zweiten Lage fungierten. Durchaus positive Erfahrungen mit endgültigen Spritzbetonkonstruktionen konnten nach mehr als zehn Jahren beim Baulos 2312 in Bielefeld gewonnen werden. Aufgrund der Querschnittsformen und -größen war eine Übertragung der Erfahrungen aus dem U-Bahnbau auf den Straßentunnelbau nicht ohne weiteres möglich. Zusätzlich kam hinzu, dass im U-Bahnbau entgegen dem Straßentunnelbau im Regelfall keine Entwässerung vorgesehen ist und somit drückendes Grundwasser die durchaus positiven Ergebnisse noch verfälschte.

In Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW), der Deutschen Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH (DEGES) wurde daher beschlossen, im Zuge der Ausführung des Rennsteigtunnels eine 1-schalige Versuchsstrecke auszuführen, in der verschiedene Varianten hinsichtlich ihres Trag- und Dichtheitsverhaltens untersucht wurden. Dazu waren neben den hydrogeologischen auch die straßentunnelspezifischen Randbedingungen aufzustellen, welche die Konzeption einer 1-schaligen, aber auch 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion beeinflussen. Es wurde deutlich, dass gerade im Stra-

Bentunnelbau die Oberflächengestaltung der Tunnelwände hohen Einfluss auf die Konzeption einschaliger Konstruktionen sowie deren Einsatzbereiche ausübt. In Abstimmung mit dem BMVBW und der DEGES wurden insgesamt fünf unterschiedliche 1-schalige Varianten entwickelt. Davon waren drei Varianten reine Spritzbetonkonstruktionen, bei zwei Varianten wurde die zweite Lage mit Schalbeton (unbewehrt und stahlfaserbewehrt) im Verbund mit der ersten Lage hergestellt. Damit waren ausreichende Vergleichsmöglichkeiten gegeben. Die Versuchsstrecke wurde in einem der beiden Zuluftstollen des Rennsteigtunnels (Zuluftstollen Kehltal) ausgeführt. Die Ausführung erfolgte in enger Abstimmung zwischen der DEGES, dem Prüfer, der ausführenden Arbeitsgemeinschaft, der Bauüberwachung und der BAST. Im Zuge der Ausführung der ersten Spritzbetonlage wurden zwei Messquerschnitte eingebaut, die mit Dehnungs- und Temperaturgebern bestückt waren. Durch die Messungen, die kontinuierlich während des Vortriebes und nach dessen Beendigung stattfanden, sollte der theoretisch optimale Zeitpunkt zum Einbau der zweiten Lage bestimmt werden. Dabei wurden die Stauchungs- bzw. Dehnungsbewegungen in der ersten Lage sowie die Hydratationswärmeeentwicklungen erfasst und ausgewertet. Es zeigte sich, dass ca. 10 Tage nach Einbau der ersten Spritzbetonlage die Bewegungen sowie Temperaturdifferenzen zwischen Beton-/Lufttemperatur im Regelfall weitestgehend abgeklungen sind.

Neben den messtechnischen Untersuchungen wurden zusätzlich visuelle Untersuchungen durchgeführt. Diese konzentrierten sich auf die Ausführung und das Dichtheitsverhalten der verschiedenen Konstruktionen. Durch die regelmäßige Begleitung der Ausführungsarbeiten konnten Empfehlungen abgeleitet werden, die zukünftig bei einem Einsatz 1-schaliger Konstruktionen im Hinblick auf eine optimierte Ausführungsqualität beachtet werden sollten. Dabei zeigte sich, dass neben allen konstruktiven Belangen ein besonderes Augenmerk auf die Ausführungsqualität zu legen ist, die maßgeblich durch die verfahrenstechnischen Fähigkeiten (Düsenführung und Auftragungstechnik) der ausführenden Mannschaft beeinflusst wird.

Die Untersuchungen zum Dichtheitsverhalten wurden nach Einbau der 2. Lage in regelmäßigen Abständen von ca. 3 Monaten durchgeführt. Es wurde deutlich, dass die erforderliche Dichtheit durch den Einbau ausschließlich einer Spritzbetonlage nicht gewährleistet werden kann. Erst durch die zweite

Lage konnte eine vergleichbare Dichtheit zur zweischaligen Regelbauweise erreicht werden. Bemerkenswert positive Ergebnisse lieferte dabei die Variante mit einer stahlfaserbewehrten geschalteten zweiten Lage. Hier waren während des gesamten Beobachtungszeitraumes keine Feucht- oder Nassstellen auf der Tunnelleibung zu beobachten. Ähnlich positiv zeigte sich das Dichtheitsverhalten der endgültigen Spritzbetonkonstruktionen mit einer stahlfaserbewehrten zweiten Spritzbetonlage. Hier wurden nur wenige, unbedenkliche Feuchtstellen beobachtet. Dagegen zeigte das Dichtheitsverhalten der Konstruktion mit einer geschalteten zweiten Lage ohne Bewehrung eher unbefriedigende Ergebnisse. Aufgrund der Untersuchungen lassen sich für die Konstruktionen mit Stahlfaserbewehrung die erreichbaren Dichtheiten in die Klassen 2 bis 3 nach Tabelle 5.1.1 des Teils 5, Abschnitt 1, nach ZTV-ING einordnen. Bei den Spritzbetonkonstruktionen mit Mattenbewehrung lässt sich die Dichtheitsklasse 3 nur bedingt, unter Beachtung einer hohen Ausführungsqualität, erreichen. Zusätzlich sollten günstige hydrologische Randbedingungen vorliegen.

Beim zweiten Anwendungsfall, die Ortbeton-Innenschale der zweischaligen Bauweise als Spritzbetonkonstruktion auszuführen, zeigte die Recherche der bislang ausgeführten Bauwerke, dass diese Konstruktion bereits bei je einem Bahn- und Straßentunnel in Deutschland zum Einsatz kam. Die in jüngerer Zeit ausgeführte Konstruktion erfolgte beim Fernthal-Tunnel der Neubaustrecke Köln-Rhein-Main. Die hier gewonnenen Erfahrungen flossen direkt in die Planung und Ausführung der Spritzbetonkonstruktionen des Rennsteigtunnels ein.

Die Entscheidung zur Anwendung der 2-schaligen Spritzbetonkonstruktion am Rennsteigtunnel war an bestimmte Zusatzmaßnahmen gekoppelt, die zwischen Auftraggeber, dem Prüfer und der ausführenden ARGE vereinbart wurden. Zur Festlegung der Zusatzmaßnahmen wurden die möglichen Fehlerquellen des Verfahrens einzeln erfasst und bewertet.

Die im Zuge der Ausführung gewonnenen Erfahrungen offenbaren, dass der Erfolg einer qualitativ gleichwertigen Ausführung zur geschalteten Regelbauweise wesentlich vom Spritzverfahren sowie der verwendeten Spritzbeton-Rezeptur abhängt. Dabei wurde deutlich, dass die Qualifikation der an der Ausführung Beteiligten eine hohe Priorität erfordert

und unabhängig davon generell eine gewisse „Einarbeitungsstrecke“ vorgehalten werden sollte.

Die Dichtheit der Konstruktion kann als gleichwertig zur Regelbauweise eingestuft werden, vorbehaltlich einer qualitativ hochwertigen Ausführung. Bei der Frage der Wirtschaftlichkeit ist nicht nur der eingesparte Schalungsaufwand zu berücksichtigen. Die erforderlichen Zusatzmaßnahmen im Vergleich zur Regelbauweise, das Erfordernis einer „Einarbeitungsstrecke“ sowie die Einflüsse auf den Baubetrieb, die sich gerade in den arbeitsintensiven Kavernenbereichen deutlich machen, dürfen im Rahmen einer vergleichenden Kostenkalkulation nicht unberücksichtigt bleiben. Dennoch haben die Ausführungen am Rennsteigtunnel gezeigt, dass die zweischaligen Spritzbetonkonstruktionen gerade in den schalungsaufwändigen Bereichen eine Alternative zur zweischaligen Regelbauweise darstellen.

Anhand der Untersuchungsergebnisse lassen sich die in der Tabelle 6-1 aufgeführten Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen empfehlen. Zur Vermeidung von Spritzschatten sollte der Einsatz einer Stahlfaserbewehrung anstelle einer Mattenbewehrung vorgesehen werden.

Aufgrund der durch die RABT 2003 geforderten Abschottung der Querstollenbereiche findet in diesen Bereichen im Regelbetrieb kein oder nur ein sehr geringer Luftaustausch statt. Dadurch wird die Verdunstung etwaiger Feuchtstellen auf der Tunnelleibung erschwert, was zu einer hohen Luftfeuchtigkeit und ggf. zu einer Schädigung der betriebstechnischen Anlagen führen kann. Der Einsatz einschaliger Spritzbetonkonstruktionen wird in diesen Bereichen daher grundsätzlich nicht empfohlen.

Zusätzlich zu den Spritzbetonkonstruktionen sind die Einsatzempfehlungen einschaliger Schalbetonkonstruktionen aufgeführt. Sie entsprechen im Prinzip denjenigen der einschaligen Spritzbetonkonstruktionen mit Stahlfaserbewehrung. Allerdings wird deren Einsatz in den Querstollenbereichen bedingt, aufgrund der positiven Versuchsergebnisse, empfohlen. Hierbei sei betont, dass es sich dabei ebenfalls um stahlfaserbewehrte Konstruktionen handeln sollte.

Gerade im Hinblick auf den evtl. geplanten Neubau paralleler Fluchtstollen im Zuge von Nachrüstungsmaßnahmen oder bei neuen Projekten stehen somit mit den einschaligen Spritzbetonkonstruktionen wirtschaftliche und zweckdienliche Alternativen zur zweischaligen Regelbauweise zur Verfügung.

Zweischalige Spritzbetonkonstruktionen werden für sehr schalungsaufwändige Bereiche, d. h. Kavernen und Aufweitungsbereiche, aber auch Querstollen, die immer einen zusätzlichen Schalungsaufwand erfordern, empfohlen. Die Empfehlung wird hier allerdings auf den für den laufenden Tunnelbetrieb wenig relevanten Bereich oberhalb der Zwischendecken eingeschränkt. Auch im Querstollenbereich, der wie beschrieben ähnlich wie die Haupttröhrenbereiche hohe Anforderungen an das Dichtheitsverhalten der Konstruktion aufweist, stehen mit dem Einsatz zweischaliger Spritzbetonkonstruktionen Alternativen zur Regelbauweise zur Verfügung.

Eine Empfehlung für einen Einsatz zweischaliger Spritzbetonkonstruktionen im Bereich der Haupttröhren bzw. Ein- und Ausfahrbereiche oberhalb von Zwischendecken, d. h. außerhalb des Sichtfeldes

	1-schalig (2. Lage Spritzbeton, mattenbewehrt)	1-schalig (2. Lage Spritzbeton, stahlfaserbewehrt)	1-schalig (2. Lage Schalbeton, stahlfaserbewehrt)	2-schalig (2. Lage Spritzbeton, matten-/stahlfaser- bewährt)
Fluchtstollen	(x)	x	x	-
Zuluftstollen	(x)	x	x	-
Querstollen	-	-	(x)	x
Aufweitungsbereiche (oberhalb von Zwischendecken)	-	-	-	x
Kavernen (oberhalb von Zwischendecken)	-	-	-	x
Ein-/Ausfahrbereiche	-	-	-	-
Haupttröhren	-	-	-	-
x = empfehlenswert, (x) = bedingt empfehlenswert - = nicht empfehlenswert				

**Tab. 6-1:** Empfohlene Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen



des Tunnelnutzers, wird nach dem derzeitigen Kenntnisstand und den Erfahrungen am Rennsteigtunnel zum jetzigen Zeitpunkt nicht gegeben, da sich hier ein wirtschaftlicher und qualitativer Vorteil gegenüber der Regelbauweise derzeit nicht erkennen lässt.

## Literatur

- [1] WESTHAUS, K.-H.; FLÖTTMANN, H.: Einschaliger Tunnel in Stahlfaserspritzbetonbauweise – Erfahrungsbericht und Empfehlungen für weitere Ausführungen. Forschung + Praxis, Heft 29, 1984
- [2] KUTSCHER, F. W.: Anforderungen an die Oberflächen von Straßentunnelwänden. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 12/ 1995
- [3] HEIMBECHER, F.: Konzeption einer einschaligen Versuchsstrecke in einem Zuluftstollen des Rennsteigtunnels. Mitteilungen der Bundesanstalt für Straßenwesen. Straße und Autobahn, 08/1999
- [4] KIRSCHKE, D.: Stellungnahme zur probeweisen Herstellung der Tunnelauskleidung in Spritzbeton. Unveröffentlicht, Ettlingen 04/2001
- [5] DIN-Fachbericht 100: Beton, Beuth-Verlag, 1. Auflage 2001
- [6] SCHIKORA, K.; EIERLE, B.: Bemessung mit Beschränkung der Rissbreiten hinsichtlich der Wasserundurchlässigkeit von Tunnelnenschalen. Vortrag anl. der DBV-Arbeitstagungen Tunnelschalen – Planung, Bemessung und Ausführung 1995, 1996
- [7] GÖHRE, D.: Nassspritzbeton im Dichtstrom – Betontechnologische Einflussgrößen. Beton- und Stahlbetonbau, H. 8/1995, S. 201-204
- [8] MAIDL, B.: Stahlfaserbeton. Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1991
- [9] WESTHAUS, K.-H.; FLÖTTMANN, H.: Einschaliger Tunnel in Stahlfaserspritzbetonbauweise – Erfahrungsbericht und Empfehlungen für weitere Ausführungen. Forschung + Praxis, Heft 29, 1984
- [10] SCHMIDT-SCHLEICHER, H.; SCHULTZ, H. G.: Stadtbahntunnel in Verbundbauweise – Untersuchungen und Erfahrungen. Tunnelbau-Taschenbuch 1988, S. 161-214
- [11] KÜBLER, P. et al.: Einschalige Bauweise beim Kehrtunnel Isenthal. Schweizer Baublatt Nr. 90, 10/94, S. 2-5
- [12] BROGI, E.: Neuere Entwicklungen beim Stadtbahnbau in Bielefeld. Beton 3/92
- [13] BRUX, G.: Einschalige Tunnelbauweise mit Stahlfaserspritzbeton im Sicherheitstunnel Mont Terri. Tunnel 2/93, S. 82-85
- [14] FISCHNALLER, G.; WESTERMAYR, H.: Spritzbetoninnenschalen in Zusammenhang mit Kunststoff-Dichtungsbahnen bei der Ausführung von Sonderquerschnitten am Beispiel des innerstädtischen Entlastungstunnels Bad Wildbad. Tagungsband zur Spritzbeton-Technologie 1999, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck, 1999
- [15] KIRSCHKE, D.: Stellungnahme zur probeweisen Herstellung der Tunnelauskleidung in Spritzbeton. Unveröffentlicht, Ettlingen 2001
- [16] ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5: Tunnelbau, Abschnitt 1: Geschlossene Bauweise. Verkehrsblatt-Verlag, Ausgabe 01/2003
- [17] Rili 853: Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten. DB Netz AG, Ausgabe 06/2002

<b>Schriftenreihe</b>			
<b>Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen</b>			
<b>Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“</b>			
<b>B 1: Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzone</b> H. Budnik, T. Laakkonen, A. Maaß, F. Großmann 28 Seiten, 1993	vergriffen		
<b>B 2: Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT 70/ BT 700</b> H. Haser 68 Seiten, 1993	kostenlos		
<b>B 3: Temperaturunterschiede an Betonbrücken</b> H. Knabenschuh 64 Seiten, 1993	vergriffen		
<b>B 4: Merkblatt zur Entnahme repräsentativer Strahlschuttpuben MES-93</b> 16 Seiten, 1993		€ 9,00	
<b>B 5: Spezielle Probleme bei Brückenbauwerken in den neuen Bundesländern</b> H. Haser, R. Kaschner 44 Seiten, 1994		€ 11,50	
<b>B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung</b> R. Kaschner 44 Seiten, 1995		€ 11,50	
<b>B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbahnbelägen für Brücken</b> S. Sczyslo 56 Seiten, 1995		€ 12,50	
<b>B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahnplatte</b> J. Krieger, E. Rath 140 Seiten, 1995		€ 17,50	
<b>B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden bei Betonbrücken</b> J. Krieger 60 Seiten, 1995		€ 13,00	
<b>B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln</b> A. Maaß, B. Krieger 60 Seiten, 1995		€ 12,50	
<b>B 11: Fahrbahnbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken</b> R. Wruck 44 Seiten, 1996			€ 12,00
<b>B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke</b> W. Goebel 96 Seiten, 1996			€ 15,30
<b>B 13: Strukturanalyse von Beton</b> Entwicklung eines Verpreßverfahrens mit fluoreszierendem Harz H.-P. Gatz, P. Gusia 28 Seiten, 1996			€ 11,00
<b>B 14: Verhalten von Fahrbahnübergängen aus Asphalt infolge Horizontallasten</b> J. Krieger, E. Rath 112 Seiten, 1997			€ 16,00
<b>B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonersatz beim Einbau von Abdichtungen</b> F. Großmann, J. Budnik, A. Maaß 88 Seiten, 1997			€ 14,50
<b>B 16: Seilverfüllmittel - Mechanische Randbedingungen für Brückenseile</b> M. Eilers, A. Hemmert-Halswick 288 Seiten, 1997			€ 27,50
<b>B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton</b> H.-P. Gatz, P. Gusia, M. Kuhl 48 Seiten, 1997			€ 14,00
<b>B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken</b> J. Krieger, M. Krause, H. Wiggerhauser 143 Seiten, 1998			€ 16,50
<b>B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Beschichtungen</b> Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilenerneuerung - Entwicklung eines Meßverfahrens M. Schröder 23 Seiten, 1998			€ 11,00
<b>B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl</b> M. Eilers, W. Ritter 46 Seiten, 1998			€ 12,50
<b>B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3</b> J. Krieger 19 Seiten, 1998			€ 10,50

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken**  
P. Haardt  
42 Seiten, 1999 € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Untergründe**  
Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teil-erneuerung  
M. Schröder, S. Sczyslo  
31 Seiten, 1999 € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl**  
Untersuchungen zur Empfindlichkeit der verschiedenen RHD-Belagsysteme unter ungünstigen Einbaubedingungen  
M. Eilers, G. Stoll  
25 Seiten, 1999 € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken**  
P. Haardt  
52 Seiten, 1999 € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerksprüfung**  
J. Krieger, E. Rath, G. Berthold  
18 Seiten, 1999 € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen**  
M. Eilers, W. Ritter, G. Stoll  
32 Seiten, 1999 € 11,00
- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen auf Stahl**  
M. Eilers  
28 Seiten, 2000 € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton**  
H.-P. Gatz, B. Quaas  
36 Seiten, 2000 € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone**  
F. Heimbecher  
33 Seiten, 2000 € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST**  
M. Eilers, G. Stoll  
24 Seiten, 2000 € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlust-raten**  
M. Schröder  
26 Seiten, 2000 € 11,50
- B 33: Bewährung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten**  
M. Eilers, S. Sczyslo  
115 Seiten, 2000 € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahnbeläge auf einem D-Brücken-Gerät**  
M. Eilers, W. Ritter  
47 Seiten, 2000 € 13,00
- B 35: Bewährung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken**  
R. Wruck  
28 Seiten, 2002 € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt**  
R. Wruck  
22 Seiten, 2002 € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität**  
H. J. Hörner, N. von Witzenhausen, P. Gatz  
24 Seiten, 2002 € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger**  
Durchführung von Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen  
M. Krause, H. Wiggenhauser, J. Krieger  
113 Seiten, 2002 € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken**  
M. Eilers, R. Wruck, B. Quaas  
48 Seiten, 2002 € 13,00
- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti**  
D. v. Weschpfennig  
26 Seiten, 2003 € 11,50
- B 41: Temperaturen an der Unterseite orthotroper Fahrbahntafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht**  
M. Eilers, E. Kuchler, B. Quaas  
42 Seiten, 2002 € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau**  
A. Städing, T. Krockner  
31 Seiten, 2003 € 12,00

---

**B 43: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2**

P. Haardt

56 Seiten, 2003 € 13,50

**B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung**

A. Hemmert-Halswick, S. Ullrich

34 Seiten, 2003 € 12,50

**B 45: 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 Brückenseilen und -kabeln

A. Hemmert-Halswick

51 Seiten, 2003 € 13,00

**B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau**

F. Heimbecher, W. Decker, H.-G. Faust

43 Seiten, 2004 € 12,50

---

**Zu beziehen durch:**

Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

Postfach 10 11 10

D-27511 Bremerhaven

Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0

Telefax: (04 71) 9 45 44 77

Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)

Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)