

Betonauskleidungen für Tunnel in geschlossener Bauweise

Empfehlungen des DAUB, Dezember 2000

1 Vorbemerkungen

Gegenstand dieser Empfehlung ist die Zusammenstellung von Anforderungen an endgültige Betonauskleidungen für Tunnel im Hinblick auf die Gebrauchseigenschaften, die Zusammensetzung, die Bauausführung und die Qualitätssicherung. Die hierzu bereits vorliegenden Vorschriften, wie die Richtlinie 853 [1], die ZTV-Tunnel [2, 3] und die entsprechenden österreichischen Richtlinien [28, 29], sowie darüber hinausgehende Erfahrungen mit Betonauskleidungen werden nachfolgend zusammengefasst und im Zusammenhang dargestellt. Damit werden Empfehlungen für die Herstellung qualitativ hochwertiger Tunnelauskleidungen gegeben, die die Gebrauchsfähigkeit über eine Lebenszeit von rund 100 Jahren bei geringen Unterhaltskosten sicherstellen. Die statische Berechnung ist nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung.

2 Funktion und Ausbildung der Tunnelauskleidung

Die endgültige Tunnelauskleidung hat eine Vielzahl von Einwirkungen aufzunehmen. Im Wesentlichen sind dies:

Aus dem Gebirge:

- Gebirgsdrücke aller Art (Eigenlast, Entspannungsdrücke, Kriechdrücke, Queldrücke usw.)
- Bergsenkungen, Erdfälle
- Erdbeben
- Wasserdrücke
- chemische Angriffe durch aggressives Wasser oder aggressive Baugrundbestandteile.

Aus Bauzuständen:

- Bauzustände wie Eigenlast im jungen Zustand, Zwischenbauzustände mit Teilauskleidung des Querschnitts
- Abfließen der Hydrationswärme, Schwinden
- Ringspaltverpressung, Firstverpressung
- Transportzustände bei Fertigteilen (Tübbinge, Fertigteilrohre)

Concrete Linings for Tunnels built by underground construction

Recommendations by DAUB

These recommendations relate to the compilation of demands applicable to permanent concrete linings for tunnels with regard to their characteristics for use, their composition, the execution of construction and quality assurance. Regulations that are already available in Germany such as Guideline 853 [1], the ZTV-Tunnel [2, 3] and the corresponding Austrian guidelines [28] as well as findings obtained in conjunction with concrete linings are summarised and presented in relation to one another. In this way, recommendations for producing qualitatively high-grade tunnel linings will be provided, which assure serviceability over a life span of around 100 years with low maintenance costs. Static calculations are not included. Owing to the length of this article, only the German text is published in this issue with the English version appearing in Tunnel 5/2001

■ Pressenkräfte, Nachläuferlasten.

Aus der Nutzung:

- Temperatureinwirkungen aus der Luft oder von Abwässern und dergleichen
- chemische Angriffe durch Gase, Abwasser, Tausalz und dergleichen
- Einwirkungen aus Verkehr
- Geschiebe- oder Steintransport bei Triebwasserstollen
- Feuer bei Verkehrsbauwerken.

Für diese Einwirkungen muss die endgültige Tunnelauskleidung in statischer und konstruktiver Hinsicht dimensioniert werden.

Die abdichtende Wirkung der Auskleidung kann sowohl durch die wasserundurchlässige Ausführung des Betons (wu-Beton) als auch durch eine auf der Außenseite der Schale aufgebrachte Hautabdichtung erzielt werden. Wu-Betonkonstruktionen erfordern in der Regel einen größeren Aufwand für die Betonherstellung und oft auch Nachbesserungen (Risseverpressung), haben aber den Vorteil, dass Fehlstellen in der Regel leichter zu lokalisieren und abzudichten sind. Außenabdichtungen halten das Wasser und damit auch eventuelle chemische Angriffe von der Betonschale fern, sind jedoch bei Undichtigkeiten schwer zu sanieren.

Die Anforderungen an die Abdichtungssysteme werden für Eisenbahntunnel in der Ril 853 [1] und für Straßentunnel in [2] und [3] im Detail genannt.

Planung und Herstellung der endgültigen Betonauskleidung ergeben sich aus dem Zusammenspiel von Tunnelquerschnitt, geologischen und hydrologischen Verhältnissen, Vortriebsverfahren und Tunnellänge.

DAUB

DEUTSCHER AUSSCHUSS
FÜR UNTERIRDISCHES
BAUEN E.V.

Die Empfehlungen wurden vom Arbeitskreis „Betoninnenschalen“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen erarbeitet. Als AK-Mitglieder wirkten mit:

- Dr.-Ing. A. Städing (Leiter des AK),
- Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bösch (ehem. Leiter AK),
- Dr.-Ing. Breitenbücher, Dr. G. Brem, Dipl.-Ing. H. Bretz,
- Dipl.-Ing. G. Denzer, Dipl.-Ing. Dietz,
- Prof. Dr.-Ing. H. Duddeck, Dipl.-Ing. Grüter,
- Dipl.-Ing. K. Kreuzberger, Dr.-Ing. K. Kuhnenn,
- Prof. Dr.-Ing. B. Maidl, Dipl.-Ing. M. Muncke,
- Dipl.-Ing. H. Petruschke, Dipl.-Ing. D. Stephan.

Betonauskleidungen Concrete linings

Nachfolgend werden die folgenden Ausführungsformen von endgültigen Tunnelauskleidungen behandelt:

- Schalbeton
- Spritzbeton
- Stahlbetontübbinge
- Stahlbetonrohre.

3 Tunnelauskleidung aus Schalbeton

3.1 Allgemeines

Tunnelauskleidungen aus Schalbeton werden in der Regel mit einem Schalwagen hergestellt. Zum Zeitpunkt des Einbaus der endgültigen Tunnelschale ist der Tunnelvortrieb entweder schon abgeschlossen, oder die Betonierstelle befindet sich weit hinter dem eigentlichen Vortrieb. Die vorläufige Sicherung ist fertig gestellt, und die Verformungen des Gebirges sind abgeklungen. Die luftseitige Kontur der endgültigen Auskleidung ist frei wählbar. Sie kann an die spätere Nutzung und an die statischen Erfordernisse angepasst werden. In der Regel wird die Innenschale in Blöcken von 8 bis 12 m Länge hergestellt, die durch Dehnfugen voneinander getrennt sind. Die einzelnen Blöcke werden in der Regel in zwei, bei sehr großen Querschnitten auch in mehr als zwei Betonierabschnitte unterteilt. Bei geeigneten Randbedingungen kommt auch die Herstellung eines Blockes in einem Arbeitsgang infrage. Hinsichtlich des Verbundes zwischen Außen- und Innenschale gibt es drei Lösungen:

- Innenschale ohne Verbund mit der Außenschale (zweischalige Bauweise)
- Innenschale in Verbund mit der Außenschale (einschalige Bauweise)

■ Innenschale in ungewolltem Verbund mit der Außenschale.

Bei der Innenschale ohne Verbund werden die Außenschale und die endgültige Tunnelauskleidung konstruktiv getrennt. Dies wird durch die Anordnung von Trennschichten erreicht (wie z. B. Kunststoffolien, Vliese oder Luftpolsterfolien). Dabei muss die Dicke der Trennschicht auf die Rauigkeit der Außenschale abgestimmt sein und die Außenschale großflächig hinreichend eben sein. Durch die Trennung wird die Übertragung von Schubkräften vermieden.

Bei der Lösung „Innenschale im Verbund mit der Außenschale“ soll ein statisch wirksamer Verbund zwischen Innen- und Außenschale erreicht werden. In diesem Fall sind an die Außenschale die gleichen Qualitätsanforderungen wie an die Innenschale zu stellen. Die Schubkraftübertragung in der Arbeitsfuge zwischen Außen- und Innenschale ist allein über den Verbund der Betonmatrix sicherzustellen. Verbundmaßnahmen, wie z. B. übergreifende Bewehrung oder Ähnliches, führen in der Regel zu

Wasserwegigkeiten und beeinträchtigen die Dichtigkeit des Tunnels. Bei der Herstellung der Innenschale ist die gegenüber zweischaligen Konstruktionen mit Trennfolie verstärkte Zwangbeanspruchung und die damit verbundene Rissentwicklung zu beachten. Hier ist eine sorgfältige Nachbehandlung von entscheidender Bedeutung. Für druckwasserhaltende Tunnelauskleidungen und bei stärkerem Sickerwasser ist diese Lösung nicht zu empfehlen.

Sofern keine besonderen Maßnahmen zur Trennung der Außen- und der Innenschale ergriffen werden und die Außenschale nicht als dauerhaft tragfähig angesetzt wird, ist davon auszugehen, dass jeweils der ungünstigere Fall vorliegt, d. h., die Innenschale ist in vollem Umfang schwindbehindert, trägt Einwirkungen aus Gebirgsdruck usw. jedoch als Einzelschale.

3.2 Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften

3.2.1 Festigkeiten

Die Betonfestigkeit der Innenschale wird nach statischen Erfordernissen festgelegt und beträgt mindestens B 25. Zur Rissevermeidung

sollte die erforderliche Festigkeit nicht unnötig überschritten werden, da die Beanspruchungen aus Abbinde-temperaturen mit zunehmender Festigkeit in der Regel anwachsen und das Arbeitsvermögen abnimmt, d. h. der Beton spröder wird. Die für das Ausschalen erforderliche Betonfestigkeit ist durch statische Berechnung zu ermitteln. Bei kreisförmiger Tunnelgeometrie mit Durchmessern bis zu 15 m muß die Betonfestigkeit in der Firste mindestens 3 MN/m² betragen.

3.2.2 Wasserundurchlässiger Beton

Wasserundurchlässiger Beton muss die Anforderungen nach DIN 1045, Abschn. 6.5.7.2 erfüllen. Für Eisenbahn- und Straßentunnel wird darüber hinausgehend eine Wassereindringtiefe von unter 30 mm gefordert, [1] und [2]. Hinsichtlich der zulässigen Rissbreite wird auf die Ril 853 [1] und die ZTV-Tunnel, Teil 1 [2], verwiesen, wonach als Rechenwert der Rissbreite $w_{k,cal} \leq 0,2$ mm [1] bzw. $w_{k,cal} \leq 0,15$ mm [2] einzuhalten ist.

3.2.3 Besondere Eigenschaften

Tunnelinnenschalen müssen im Portalbereich (im Allgemeinen auf den ersten 100 bis 500 m) einen hohen Frostwiderstand aufweisen und bei Straßentunneln zusätzlich einen hohen Tausalz-widerstand. Bei chemischem Angriff infolge sulfathaltiger Wässer (≥ 600 mg SO₄/l) oder sulfathaltigen Baugrundes (≥ 3000 mg SO₄/kg) ist Zement mit hohem Sulfatwiderstand zu verwenden. Bei Sulfatgehalten bis 1500 mg/l im Grundwasser kann alternativ dazu Flugasche entsprechend der

Tabelle 3.1: Qualitätssicherung durch begleitende Überwachung

Planung ↓	Festlegung der Betontechnik, der Bauausführung und der Qualitätssicherung unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Bauwerk
Eignungsprüfung ↓	Prüfung nach DIN 1045 (BII) und Punkt 3.6.2, ob und mit welchen Betonausgangsstoffen und Verfahren die Sollvorgaben der Planung realisiert werden können (ansonsten ist die Planung entsprechend zu ändern)
Stoffhersteller ↓	Ausgangskontrollen der Baustoffe nach einschlägigen Normen und Punkt 3.6.3
Betonhersteller ↓	Eingangs- und Ausgangskontrollen der Baustoffe nach einschlägigen Normen und Punkt 3.6.4
Baustelle ↓	Eingangskontrollen des Frischbetons nach DIN 1048 und Punkt 3.6.5. Überwachung der Bauausführung nach EN 206 und Punkt 3.6.5. Soll-Ist-Vergleich der ausgeführten Leistung nach Punkt 3.6.5
Auftraggeber	Kontrollen von Seiten des Auftraggebers



1 Gewölbeschalwagen im Engelberg-Basistunnel

DAfStb-Richtlinie [19] eingesetzt werden. Zu den Anforderungen an Beton mit besonderen Eigenschaften siehe DIN 1045, Abschnitt 6.5.7.

3.3 Herstellung

3.3.1 Schalung

Die Herstellung von Innenschalen sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Qualitätssicherung so weit wie möglich standardisiert werden. Hierzu bieten sich mechanisch und hydraulisch klapp- und verfahrbare Schalwagen an. Für Verkehrstunnel üblicher Größe und vergleichbare Bauwerke ist es zweckmäßig, die Schalung in einen Sohlchalwagen und einen Gewölbeschalwagen aufzuteilen und jeden Tunnelblock in zwei Schritten zu betonieren. Insbesondere für kleinere Tunnelquerschnitte kommt auch ein Rundumschalwagen infrage, mit dem jeder Tunnelblock in einem Schritt betoniert werden kann. Die Zweiteilung der Schalung hat den Vorteil, dass die Schalungsteile leichter und schneller

eingrichtet und fixiert werden können und die jeweils zu verarbeitende Betonmenge begrenzt ist. Als Nachteil sind die Arbeitsfugen zwischen Sohle und Gewölbe zu nennen.

Mit einer Rundumschalung werden Arbeitsfugen und die damit verbundenen Nachteile (Gefahr der Undichtigkeit, Zwangsbeanspruchung beim Abbinden) vermieden. Weiterhin ergibt sich gegenüber der Zweiteilung der Schalung eine Ersparnis hinsichtlich Zeit und Arbeitsaufwand beim Schalungseinrichten und Betonieren. Ebenso ergeben sich Einsparungen am Bewehrungsaufwand im Bereich der Arbeitsfugen. Diesen Vorteilen stehen in erster Linie die höheren Investitionskosten gegenüber. Die Schalungskonstruktion muss mindestens eine zweifache Blocklänge überspannen und außerhalb des zu betonierenden Blockes nach unten und nach oben (Auftriebssicherung) abgestützt werden. Im Falle einer Abdichtung mit

Kunststoffdichtungsbahnen sind hierbei besondere Schutzmaßnahmen für die Dichtungsbahnen zu ergreifen.

Die Länge der Schalwagen wird vor allem durch die Handhabbarkeit der Wagen selber, durch die Begrenzung der zu verarbeitenden Betonmenge auf ein zweckmäßiges Maß und durch konstruktive Vorgaben für die maximal zulässige Blocklänge bestimmt. Für Eisenbahn- und Straßentunnel mit Innenschalen aus wasserundurchlässigem Beton sind Blocklängen von ≤ 10 m vorgeschrieben. Bei einer Abdichtung mit Kunststoffbahnen sollte eine Blocklänge von 12,5 m nicht überschritten werden.

Anzahl und Größe der Betonierfenster in den Schalwagen sollten ausreichend dimensioniert werden, sodass das Einführen des Betonierschlauches ohne weiteres möglich ist, der Betoniervorgang durch benachbarte Fenster beobachtet werden kann und der Beton aus nicht mehr als 1 m Höhe frei fällt.

3.3.2 Blockfugen

Blockfugen in Tunnelbereichen, die größeren Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, sollten in der Regel als Dehnungsfugen mit geeigneten Einlagen hergestellt werden, um eindeutige konstruktive Verhältnisse zu schaffen. In Abschnitten mit kleinen Temperaturschwankungen können Pressfugen ausgeführt werden. Bei wu-Beton-Innenschalen sind die Blockfugen mit innen liegenden Dehnungsfugenbändern abzudichten. Die Breite der Dehnungsfugenbänder ist dem zu erwartenden Wasserdruck anzupassen, sie sollte jedoch 30 cm nicht unterschreiten. Bei der Anordnung der Fugenbänder ist darauf zu achten, dass die durch das Fugenband abgetrennten Schalendicken zwischen Fugenband und Schalenoberfläche mindestens so dick sind wie die Länge des in der Innenschale eingebetteten Fugenbandschenkels. Die Schalenträger sollten in radialer und in Ringrichtung konstruktiv hinreichend bewehrt werden. Für wasserdruckhaltende Tunnel mit Außenabdichtung empfehlen sich der Einbau von außenliegenden Fugenbändern im Bereich der Blockfugen und ein Verschweißen der Außenabdichtung mit diesen Fugenbändern, sodass in Tunnellängsrichtung eine Abschottung an jeder Blockfuge entsteht. Im Firstbereich sollten zur ausreichenden Verfüllung der Räume zwischen den Sperrankern der Fugenbänder besondere Vorkehrungen getroffen werden, vgl. [1].

3.3.3 Arbeitsfugen

Bei drückendem Wasser und Ausführung in wu-Beton empfiehlt sich die Einla-

ge eines Fugenbleches mit einer Breite von $b \geq 25$ cm und einer Dicke von $\geq 1,0$ mm. Im Bereich der Blockfuge sollte das Fugenblech an die Stahllasche des Blockfugenbandes wasserdicht angeschweißt werden. Die Fläche der Arbeitsfuge sollte möglichst bald nach dem Ausschalen von Zementschlamm befreit und vor dem Einschalen des zweiten Betonierabschnittes sorgfältig gereinigt werden. Die Schubkraftübertragung in der Arbeitsfuge zwischen der Sohle und dem aufgehenden Gewölbe sollte rechnerisch nachgewiesen werden. Kann der Nachweis mit einer glatten Fuge nicht geführt werden, ist die Arbeitsfuge aufgeraut oder verzahnt herzustellen.

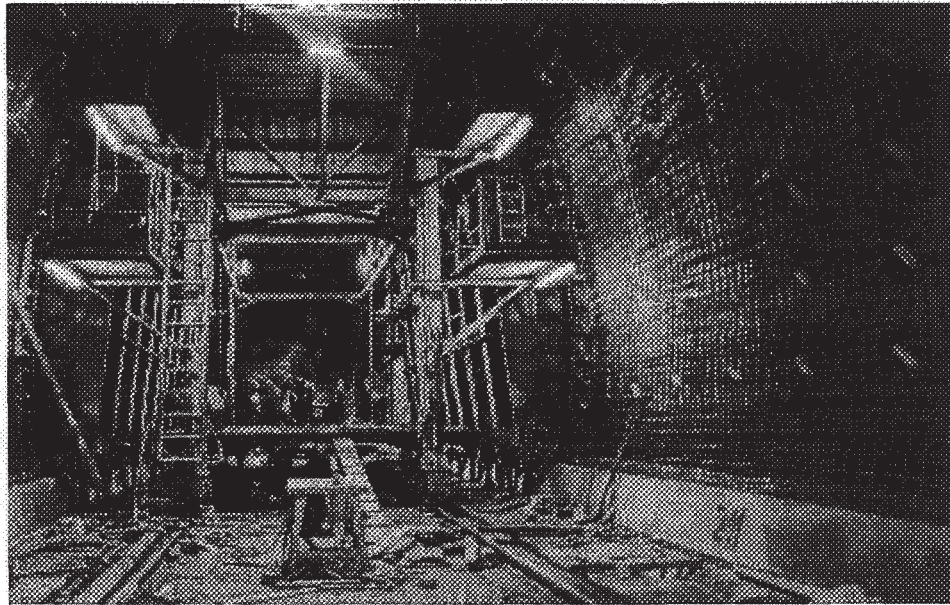
3.4 Betonzusammensetzung

3.4.1 Zement

Bei der Betonzusammensetzung müssen teilweise entgegenlaufende Forderungen nach hoher Festigkeit und insbesondere Frühfestigkeit (kurze Ausschalzeiten) einerseits und niedrigen Abbinde Temperaturen zur Rissevermeidung andererseits optimiert werden. Hierfür haben sich Portlandzemente 32,5 R, im Sohlibereich auch Hochofenzemente 32,5 bzw. 42,5 bewährt mit Mengen von 280 bis 320 kg/m³ im Sommer bzw. 300 bis 330 kg/m³ verdichteten Frischbetons im Winter.

3.4.2 Betonzusatzstoffe

Zur Ergänzung der Zementmenge und zur Erhöhung des Mehlkorngehaltes wird die Zugabe von Flugasche empfohlen. Sie verbessert die Verarbeitbarkeit, verringert die Gefahr des Entmischens und des Blutes des Betons, sorgt für ein dichteres Betongefüge und



2 Gewölbbewehrung der Innenschale mit Abstandhalter im Nebenwegtunnel Vaihingen/Enz

reduziert die Hydratationswärmeentwicklung. Deshalb ist abweichend von der ZTV-K auch eine Flugaschezugabe von mehr als 60 kg/m³ Frischbeton möglich.

3.4.3 Betonzusatzmittel

Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit ist es zweckmäßig, dem Frischbeton Fließmittel zuzugeben. Verzögerer sollten nur in Ausnahmefällen bei Lieferbeton angewendet werden. Beim Zusatz von Fließmitteln ist die Richtlinie für Fließbeton des DAfStb zu beachten [20].

3.4.4 Zuschläge

Die Sieblinie des Betonzuschlags soll zwischen den Sieblinien A und B nach DIN 1045 liegen. Damit sind sowohl hinreichende Dichtigkeit und Festigkeit als auch gute Verarbeitung bei geringem Wasseranspruch möglich. Das Größtkorn sollte so groß gewählt werden, wie es die Bewehrungsdichte zulässt, jedoch nicht größer als 32 mm. Anschlussmischungen unmittelbar über einem

vorhergehenden Betonierabschnitt sollten mit einem kleineren Größtkorn hergestellt werden. Um das Schwindmaß klein zu halten, sollte der Wassergehalt unter 170 l/m³ gehalten werden. Für ein Größtkorn von 32 mm empfiehlt sich ein Mehlkorn- und Feinsandgehalt von 400 kg/m³ und bei einem Größtkorn von 16 mm ein Mehlkorn- und Feinsandgehalt von 450 kg/m³ verdichteten Frischbetons. Zur Minimierung der Zwangsspannungen infolge Abbinde wärme sind Zuschläge mit niedriger Temperaturdehnzahl (Basalt, Kalkstein) günstiger als solche mit hoher Temperaturdehnzahl (z. B. quarzitische Zuschläge). Gebrochene Zuschläge (Splitte) vermindern auf Grund der etwas höheren Betonzugfestigkeit ebenfalls die Reißneigung. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Betonzusammensetzung sollte von der festgelegten Kornverteilung der Zuschläge um nicht mehr als 7,5 Gewichtsprozente abgewichen werden.

3.4.5 Stahlfasern

Stahlfaserbeton kann eine Alternative zu Stahlbeton sein. Die risseverteilende Wirkung der Stahlfasern im Beton übt einen positiven Einfluss auf die Rissbreitenentwicklung und damit auf die Gebrauchstauglichkeit der Tunnelschale aus. Auch verfahrenstechnisch bietet Stahlfaserbeton Vorteile, da die Arbeiten zum Einbau der Bewehrung entfallen [40]. Mit zunehmendem Stahlfasergehalt wird der Wirkungsgrad von Stahlfaserbeton erhöht. Herstellungsbedingungen sind auf Grund der schlechteren Verarbeitbarkeit des Frischbetons jedoch Grenzen gesetzt. Die verwendeten Stahlfasern müssen über eine Zulassung durch das Institut für Bautechnik in Berlin verfügen. Als Bemessungsgrundlage gilt das DBV-Merkblatt „Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau“ [26]. Die Gefährdung von Kunststoffdichtungsbahnen durch Stahlfasern ist vor deren Einsatz zu klären.

Betonauskleidungen

Concrete linings

3.4.6 Zugabewasser

Hinsichtlich des Zugabewassers wird auf das DBV-Merkblatt „Zugabewasser für Beton“, Fassung Jan. 1982 [24] hingewiesen. Bei Verwendung von Restwasser ist vor allem darauf zu achten, dass die Hydratation nicht durch eventuell enthaltene Verzögerer beeinträchtigt wird.

3.5 Bauausführung

3.5.1 Betonieruntergrund

Für wu-Beton-Innenschalen sind die Anforderungen an den Betonieruntergrund in Ril 853 [1] und in der ZTV-Tunnel [2] geregelt. Der Betonieruntergrund muss sauber und frei von losen Teilen aller Art sein.

3.5.2 Schalendicke, Bewehrung und Betondeckung

Innenschalen für übliche Tunnel sollten mindestens 30 cm dick sein. Für bewehrte Innenschalen und wu-Beton-Innenschalen wird eine Mindestdicke von 35 cm empfohlen. Für Verkehrstunnel sind die Schalendicke, die Bewehrung und die Betondeckung in der Ril 853 [1], in der ZTV-Tunnel [2] und in dem DBV-Sachstandsbericht [27] festgelegt.

Sofern die Beanspruchungen und Anforderungen es zulassen, kann die Innenschale unbewehrt ausgeführt werden.

3.5.3 Betonherstellung und Einbau

Ziel der Herstellung ist eine möglichst gute und gleichbleibende Betonqualität. Dazu müssen die Ausgangsstoffe genau abgemessen werden. Abweichungen von der Rezeptur sind auf $\leq 3\%$ der Zugabemengen bzw. bei Zusatzmitteln auf $\leq 5\%$ zu begrenzen. Alle Bestandteile, außer Wasser, werden nach Gewicht zugegeben.

Die Frischbetontemperatur soll am Einbauort $\leq 18^\circ\text{C}$ betragen. Sie darf auf keinen Fall 25°C überschreiten.

Beim Betonieren des Gewölbes sind die zulässigen Höhendifferenzen des Betonspiegels, die sich aus der Konstruktion und Verankerung des Schalwagens ergeben, zu beachten.

Insbesondere im Firstbereich ist darauf zu achten, dass der Beton hohlraumfrei eingebaut wird. Hierzu ist durch geeignete Maßnahmen dafür zu sorgen, dass die Luft beim Betoneinbau entweichen kann, z. B. durch steigendes Betonieren und visuelle oder andere geeignete Kontrollen (Kontrollrohr im höchsten Punkt).

Die Verdichtung des Sohlbetons erfolgt mit Innenrüttlern. Für die Sohloberfläche hat sich die Bearbeitung mit einer Rüttelbohle bewährt. Für das Gewölbe werden Schalungsrüttler empfohlen (ein Rüttler auf 3 bis 4 m^2) mit einer Wirkungstiefe von 40 bis 50 cm. Ergänzend zu den Schalungsrüttlern empfiehlt sich insbesondere im Fugenbereich, so weit möglich, der zusätzliche Einsatz von Innenrüttlern.

Bei der Anwendung von Stahlfaserbeton ist der in der Regel negative Einfluss der Stahlfasern auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei der Wahl der Betoniereinrichtungen zu beachten. Hier wird vor Beginn der Betonierarbeiten die Durchführung von verfahrenstechnischen Eignungsprüfungen mit der gewählten Stahlfaserbetonrezeptur und Gerätetechnik empfohlen.

3.5.4 Maßnahmen nach dem Betonieren

Betonrezeptur und angepasste Nachbehandlung ermöglichen in der Regel ein

Ausschalen nach 9 Stunden. Dies kommt einem wirtschaftlichen Arbeitstakt entgegen. Zur Vermeidung von Rissen und Ausbrüchen ist ein ruck- und stoßarmes Ausschalen unumgänglich. Vor dem Ausschalen ist die hinreichende Betonfestigkeit in der Firste zerstörungsfrei zu prüfen (z. B. mit einem Pendelhammer). Zur Kontrolle der Betonrezeptur und der Festigkeitsentwicklung wird empfohlen, die Betontemperatur während des Abbindens in regelmäßigen Abständen zu messen.

Ziel der Nachbehandlung ist es, den Beton vor zu raschem Austrocknen und Abkühlen zu schützen und damit der Rissbildung vorzubeugen. Dazu wird empfohlen, das Betongewölbe unmittelbar nach dem Ausschalen (≤ 1 Stunde) mit einem Nachbehandlungswagen mit Wärmedämmung vor dem Abkühlen zu schützen und durch Aufsprühen von fein vernebeltem Wasser das Austrocknen der Betonoberfläche zu verhindern. Anzustreben sind dabei $\geq 90\%$ relativer Luftfeuchtigkeit. Damit kann die Betontemperatur schonend innerhalb von 3 bis 4 Tagen auf die Umgebungstemperatur abgesenkt werden. Beim Aufsprühen von Wasser ist darauf zu achten, dass es nicht zu kalt ist, um schockartiges Abkühlen des Betons zu vermeiden. Weitere Anforderungen an den Nachbehandlungswagen sind in der ZTV-Tunnel [2] unter 5.1.3 angeführt.

Der Firstspalt sollte frühestens nach Erreichen der 28-Tage-Festigkeit des Betons mit gut fließfähigem Verpressmörtel, eventuell mit Quellzusatz, durch Injektionsstutzen fortlaufend vollflächig verpresst werden. Die Stutzen sind mit der Beweh-

rung im Abstand von ca. 3,0 m in der Firste einzubauen. Der Verpressdruck ist so einzustellen, dass weder Schäden an der Innenschale noch am Gebirge entstehen. Gemäß Ril 853 hat sich ein Verpressdruck von ≤ 2 bar bewährt.

Zum Verpressen von Rissen in bewehrten Innenschalen wird auf die ZTV-Riss [4] bzw. Ril 853 [1] verwiesen.

3.6 Qualitätssicherung

3.6.1 Übersicht

Zur Sicherung der Qualität der fertigen Innenschale wird eine die gesamte Planung und Herstellung begleitende Überwachung empfohlen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die durchgehenden begleitenden Kontrollen und die jeweilige Verantwortlichkeit im Zuge der Herstellung:

Die Kontinuität der Überwachung soll durch Eingangs- und Ausgangskontrollen an jeder Station und durch Übergabe der Überwachungsaufzeichnungen an den jeweils nächsten Beteiligten sichergestellt werden. Auf diese Weise können Abweichungen von der Eignungsprüfung frühzeitig erkannt, Fehler behoben und die Verantwortlichkeiten klar geregelt werden.

3.6.2 Eignungsprüfung

Für die Eignungsprüfung gilt DIN 1045, 7.4.2.

Es wird empfohlen, die Druckfestigkeiten zum angestrebten Ausschalzeitpunkt sowie nach 12, nach 24 Stunden, nach 3,7, 28 Tagen und ggf. zu einem späteren Zeitpunkt nach 56 oder 90 Tagen an jeweils 3 Betonwürfeln nachzuweisen. Weiterhin sollten bei der Eignungsprüfung die voraussichtlichen Einbautemperaturen und Transport- oder Wartezeiten berücksichtigt werden. Eben-

so wird die Aufzeichnung der Wärmeentwicklung empfohlen.

Die in der Eignungsprüfung ermittelten Kennwerte dienen als Sollwerte für die laufende Qualitätskontrolle während der Herstellung der Tunnelinnenschale.

3.6.3 Ausgangsstoffe

Die Ausgangsstoffe müssen die geltenden Normen erfüllen. Die diesbezüglichen Aufzeichnungen, die im Rahmen der Eigenüberwachung durchgeführt wurden, sind an die Betonhersteller weiterzugeben.

Für den Zement gelten DIN 1164 und das Prüfverfahren nach DIN EN 196.

Für den Zusatzstoff Flugasche gilt die DIN EN 450.

Die Zusatzmittel müssen vom Deutschen Institut für Bautechnik bauaufsichtlich zugelassen sein.

3.6.4 Betonhersteller

Im Betonwerk ist zu überprüfen, ob die vorhandenen Dosier- und Mischeinrichtungen eine reibungslose Herstellung der notwendigen Liefermengen erwarten lassen. Auf Grund der hohen Qualitätsanforderungen an Tunnelinnenschalen wird in der Regel eine computergesteuerte Mischanlage vorgeschrieben. Sie sollte die Betonrezeptur speichern können, den Wassergehalt des Sandes mit Durchmesser ≤ 4 mm messen und die Wasserzugabe bei Bedarf korrigieren. Weiterhin sollte die Mischanlage die Einwaage aller Betonkomponenten jeder Mischung kontrollieren und die Frischbetontemperatur automatisch messen. Der Datenausdruck soll ein Charpentenprotokoll inklusive Mischzeit, Frischbetontemperatur und ein Fehlerprotokoll mit Wiegeabweichungen enthal-

ten und ist mit dem Lieferschein der Baustelle bei Anlieferung zu übergeben. Die Funktion der Wiegeeinrichtungen ist täglich zu kontrollieren. Die Genauigkeit des Wasserzählers und der Dosiergeräte ist bei deren Aufstellung und danach monatlich zu prüfen. Die Funktion der Dosiergeräte ist bei der ersten Dosierung des Tages per Augenschein zu kontrollieren.

3.6.5 Baustelle

Auf der Baustelle ist vor dem Einbauen des Betons und gegebenenfalls dem Einbauen der Bewehrung der Betonieruntergrund hinsichtlich Sauberkeit und Ebenheit zu überprüfen.

Bei bewehrten Innenschalen ist zu überprüfen, ob die Einhaltung der planmäßigen Betonüberdeckung konstruktiv sichergestellt ist. Ebenso sind Lage und fester Sitz der Fugenbänder zu kontrollieren. Die erreichte Betondeckung ist sofort nach Herstellung der ersten Blöcke zu kontrollieren, um auf Systemfehler reagieren zu können.

Die Frischbetontemperatur jeder Betonlieferung ist vor dem Einbringen in die Schalung zu messen und zu dokumentieren.

Vor dem Ausschalen ist die Betonfestigkeit in der Firse an der freien Stirnseite zu überprüfen.

Die Funktion der Nachbehandlungswagen (Sprühdüsen, Temperatur) ist laufend zu kontrollieren.

3.6.6 Auftraggeber

Die Ausführung des Bauvorhabens sollte durch eine fachkundige Bauüberwachung des Auftraggebers kontinuierlich begleitet werden, um Mängel frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden.

4 Tunnelauskleidung aus Spritzbeton

4.1 Allgemeines, Herstellung

Spritzbeton ist kein Sonderbeton, sondern ein Beton nach DIN 1045, der lediglich nach einem besonderen Verfahren hergestellt und eingebaut wird. In Abhängigkeit von der Art der Förderung des Betons zur Spritzdüse unterscheidet man das Trockenspritzverfahren und das Nassspritzverfahren.

Beim Trockenspritzverfahren wird ein trockenes Betongemisch ohne oder mit geringem Wasseranteil (erdfeucht) mittels Druckluft (Dünnstromförderung) zur Spritzdüse gefördert. An der Düse werden Wasser und Erstarrungsbeschleuniger (BE) zugeführt. Bei Verwendung von Spritzzementen entfällt die Zugabe von BE. Das nun fertige Gemisch wird mit hoher Geschwindigkeit auf den Betonieruntergrund gespritzt.

Beim Nassspritzverfahren wird ein bereits fertiges Betongemisch mittels Treibluft (Dünnstromförderung) oder mit Betonpumpe (Dichtstromförderung) zur Spritzdüse gefördert. An der Düse wird der Beton unter Zugabe von flüssigen BE-Mitteln mit Treibluft auf die Auftragsfläche gespritzt [41, 42].

Für die Herstellung und Güteüberwachung des Spritzbetons gelten in Ergänzung zu DIN 1045 die DIN 18551 und die DIN 18314. Darüber hinausgehende Anforderungen enthält die Richtlinie 853, Modul 0017 [1]. Auf Grund seiner flexiblen Einbaumöglichkeiten, nämlich ohne Schalung und an beliebig geneigten Flächen, wird Spritzbeton im Tunnelbau in erster Linie als Sofortsicherung und als vorläufige Sicherung

des frisch ausgebrochenen Hohlraumes verwendet. Aber auch der Einsatz als dauerhafte Tunnelauskleidung und für Instandsetzungsaufgaben ist üblich.

Die Qualität der fertigen Spritzbetonschale ist in hohem Maße von der Geschicklichkeit des Spritzdüsenführers abhängig (Düsenabstand, Spritzrichtung, Berücksichtigung von Einbauteilen wie Bewehrung oder Ankerplatten). Weiterhin besitzt die Spritzbetonschale, die im Zuge des Vortriebs hergestellt wird, zahlreiche Fugen. Sie wird noch während des Erhärtens durch das Gebirge belastet, wodurch örtlich zwangsläufig Risse entstehen. Aus diesem Grund wird die vorläufige Spritzbetonschale im Allgemeinen und insbesondere bei Anfall von Gebirgswasser und im Grundwasser nicht als endgültige Tunnelauskleidung angesehen. Hierfür wird in der Regel eine zweite Schale eingebaut, an die wegen der dann einfacheren Einbaubedingungen höhere Anforderungen gestellt werden können. Aus Kostengründen wird hierfür in der Regel Schalbeton verwendet. Unter bestimmten Bedingungen kann jedoch die Verwendung von Spritzbeton die wirtschaftlich günstigere Lösung sein, die auch die technischen Anforderungen erfüllt.

4.2 Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften

4.2.1 Festigkeiten

Die Festigkeit der endgültigen Tunnelschale ist nach den statischen Erfordernissen festzulegen. Bei Spritzbetonen ist zu beachten, dass sie im Vergleich zu Schalbeton einen in der Regel größeren Feinkorn- und Zementanteil enthalten. Spritzbeton

mit Festigkeiten über 35 N/mm² ist wegen der damit verbundenen großen Kriech- und Schwindneigung nicht zu empfehlen.

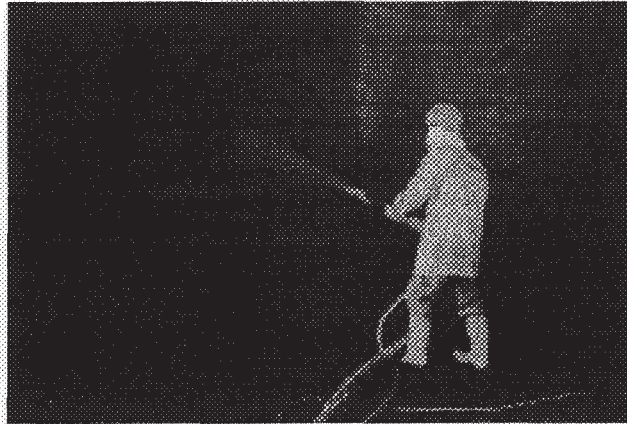
4.2.2 Wasserundurchlässiger Spritzbeton

Der Werkstoff Spritzbeton kann in wasserundurchlässiger Qualität hergestellt werden. Wegen der vorhandenen großen Schwindneigung, der Gefahr von Spritzschatten und der Problematik der wasserundurchlässigen Ausbildung von Dehnungsfugen (Einspritzen von Fugenbändern) sind Spritzbetonschalen jedoch in der Regel als wasserdruckhaltende Konstruktion nicht zu empfehlen.

4.2.3 Besondere Eigenschaften

Der in Tunneleingangsbereichen geforderte hohe Frostwiderstand kann auch von Spritzbeton erreicht werden. Durch den Einschluss von Spritzluft im Betongefüge (in Porenform) besitzt Spritzbeton ein größeres Porenvolumen als Normalbeton und in der Regel gleichzeitig eine hinreichend große Dichte [41]. Die Zugabe von Luftporenbildnern ist bei Spritzbeton nicht zweckmäßig, da sich die gewünschten Poren durch den Spritzvorgang nicht ausbilden können. Stattdessen kommt bei Spritzbeton die Zugabe von „Mikro-Hohlkugeln“ infrage. Dabei handelt es sich um winzige, in sich geschlossene hohle Kunststoffkugeln, die als vorgefertigte Luftporen zur Verbesserung des Frost- und Frosttausalz-Widerstandes der Bereitstellungsmischung zugegeben werden.

Der für Straßentunnel geforderte hohe Frost- und Tausalz-Widerstand kann durch



3 Herstellen einer Spritzbetonschale

Verwendung entsprechender Zemente (Portland-, Eisen-Portland-, Hochofen- oder Portland-Ölschieferzement) und Zuschläge ebenfalls mit Spritzbeton erfüllt werden.

Ebenso kann ein Spritzbeton mit hohem Widerstand gegen Sulfatangriff durch Verwendung entsprechenden Zementes hergestellt werden.

4.3 Betonzusammensetzung

4.3.1 Zement

Der Zement muss der Zementnorm DIN 1164 entsprechen oder muss bauaufsichtlich zugelassen sein. Im Übrigen sind die geforderten Gebrauchseigenschaften (Festigkeit, Sulfatbeständigkeit usw.) zu berücksichtigen.

Zur Bestimmung der Zementmenge kann von DIN 1045, Tabelle 4, ausgegangen werden. Als erste Abschätzung ist dieser Ausgangswert um 80 % des voraussichtlichen Rückprallanteils zu vermindern, da der Zementanteil im Rückprall nur etwa 20 % der Zementmenge der Ausgangsmischung beträgt. Einen wesentlichen Einfluss auf den Rückprall und damit auf den Zementanteil des fertigen Betons hat die Lage der Auftragsfläche. Für ge-

nauere Berechnungen der Zementmenge siehe Ruffert, [41].

4.3.2 Betonzusatzstoffe

Zur Erhöhung des Feinkornanteils wird die Zugabe von Flugasche oder Microsilika empfohlen. Dadurch werden die Dichte des Betons und sein Eluatverhalten verbessert und der Rückprall verringert. Die Zusatzstoffe müssen genormt sein, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder ein Prüfzeichen haben. Der Gesamtanteil an Zusatzstoffen zur Erhöhung des Feinkornanteils sollte 25 % des Bindemittels nicht überschreiten.

4.3.3 Betonzusatzmittel

Sofern kein Spritzzement zum Einsatz kommt, wird ein Erstarrungsbeschleuniger (BE-Mittel) zugegeben. Da Beschleuniger die Qualität des Spritzbetons (Endfestigkeit, Elastizitätsmodul, Kriechen und Schwinden, Auslaugbarkeit) negativ beeinflussen, ist die Zugabemenge so klein wie möglich zu halten. Die zulässige Höchstzugabe für BE-Mittel beträgt 5 Gewichtsprozent bezogen auf die Zementmengen der Mischung. Alle Zusatzmittel müssen ein gültiges Prüfzeichen besit-

zen und dürfen nur unter den im Prüfbescheid angegebenen Bedingungen verwendet werden. Das Zusammenwirken von Zement und Erstarrungsbeschleuniger ist in Eignungsprüfungen unter baustellenähnlichen Bedingungen zu untersuchen. Beim Nassspritzbeton werden zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit auch Verzögerer und Verflüssiger beigegeben.

4.3.4 Zuschläge

Für Spritzbeton können alle Zuschläge verwendet werden, die der Zuschlagsnorm DIN 4226 entsprechen. Das Größtkorn ist im Allgemeinen auf 16 mm begrenzt. Die Kornverteilung sollte zwischen den Sieblinien A und B liegen (DIN 1045, Bild 1 und 2, Bereich 3). Bei der Auswahl der Sieblinie ist zu beachten, dass sich die Sieblinie wegen des verstärkten Rückpralls der größeren Körner beim Aufspritzen nach oben verschiebt, z. B. vom Bereich 3 zum Bereich 4. Besonderes Augenmerk sollte auf eine stetige Sieblinie ohne Ausfallkörnung gelegt werden, da sich andernfalls der Rückprallanteil erhöht [41]. Für das Trockenspritzverfahren soll die Eigenfeuchte des Zuschlaggemisches 4 % nicht übersteigen, um ein einwandfreies Verarbeiten und Fördern zu gewährleisten.

4.3.5 Zugabewasser

Übliches Leitungswasser (Trinkwasser) ist im Allgemeinen als Zugabewasser für Spritzbeton geeignet. Bei Verwendung von Restwasser (oft beim Nassspritzverfahren verwendet) ist darauf zu achten, dass es den Anforderungen der Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwas-

Betonauskleidungen Concrete linings

ser, Restbeton und Restmörtel [21] entspricht. Bei Entnahme des Zugabewassers aus Flüssen oder Teichen ist eine Untersuchung über die Eignung zur Betonherstellung zu empfehlen. Hierzu können z. B. Erstarrungsversuche und Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt werden (DIN 1164, Blatt 5 und 7). In Zweifelsfällen ist eine chemische Untersuchung durchzuführen.

Hinsichtlich der Wassermenge gelten für das Bereitstellungsgemisch beim Nassspritzverfahren entsprechende Regeln wie für Pumpbeton. In der Regel ist ein Wasser-Zement-Wert um 0,5 anzustreben. Allerdings bestimmt beim Spritzbeton die Verarbeitbarkeit, insbesondere die Haftung auf der Auftragsfläche, die zweckmäßige Wassermenge, sodass enge w/z-Vorgaben wenig zweckmäßig sind.

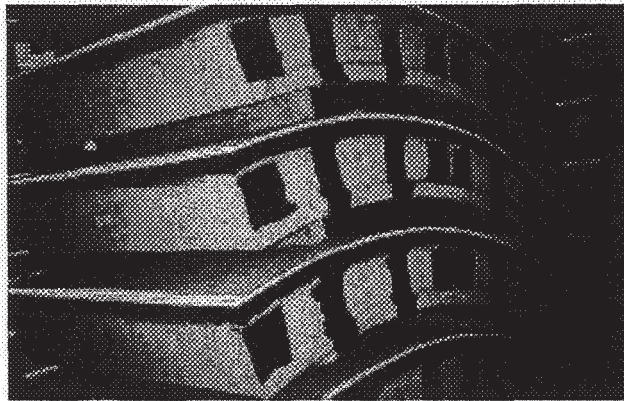
4.3.6 Stahlfasern

Die Angaben aus 3.4.6 gelten prinzipiell auch für Stahlfaserspritzbeton. Verfahrensbedingt werden bei einer Verarbeitung als Spritzbeton in der Regel kürzere Stahlfasern verwendet. Die Länge sollte 2/3 des geringsten Schlauchdurchmessers in der Spritzbetonanlage nicht überschreiten.

4.4 Bauausführung

4.4.1 Betonieruntergrund

Wenn ein kraftschlüssiger Verbund zwischen der endgültigen Spritzbetonschale und dem Untergrund gefordert wird, muss die Auftragsfläche frei von rinnendem Wasser und hinreichend rau sein. Der Untergrund muss außerdem selber eine ausreichende Oberflächenfestigkeit haben, um die in der Betonierfuge auftretenden Kräfte übertragen zu kön-



4 Blocktübginge mit Neoprenedichtung und Lastverteilungsplatten

nen. Bei erhärteten Betonoberflächen ist im Allgemeinen eine Vorbehandlung durch Hochdruckwasserstrahlen oder Sandstrahlen erforderlich. Weiterhin ist die Auftragsfläche ausreichend vorzunässen, damit dem frischen Spritzbeton kein Wasser entzogen wird. Wenn zwischen Auftragsfläche und endgültiger Spritzbetonschale eine konstruktive Trennung erwünscht ist, empfiehlt sich der Einbau einer Gittergewebefolie oder einer mit Gittergewebe beklebten Höckerfolie (Wasserablauf in der Zwischenschicht möglich).

4.4.2 Schalendicke, Bewehrung, Betondeckung

Die Dicke der Spritzbetonschale richtet sich nach den statischen Erfordernissen. Sofern die Schale keine statisch tragende Funktion hat und z. B. lediglich die Folie zur Ableitung von Sickerwasser zu tragen und zu schützen hat, bestimmt die hinreichende Betonüberdeckung von Bewehrung und Ankerköpfen usw. die erforderliche Schalendicke. Hierfür können Dicken von 15 cm ohne weiteres ausreichen.

Die Bewehrung in Spritzbetonschalen ist vor dem

Einspritzen so zu befestigen, dass es während des Spritzbetonauftrags nicht zu schädlichen Schwingungen kommt. Die Abstände der Bewehrungsstäbe sollten 10 cm nicht unterschreiten, die Stabdurchmesser sollten ≤ 16 mm gehalten werden. Die Betondeckung der Bewehrung sollte wegen der Rauigkeit der Spritzbetonoberfläche das Nennmaß von $\text{nom } c = 6$ cm nicht unterschreiten. Bei zweilagiger Bewehrung der Schale sollte die luftseitige Bewehrungslage erst nach Erreichen der entsprechenden Schalendicke eingebaut werden.

4.4.3 Spritzbetoneinbau

Die Qualität der fertigen Spritzbetonschale hängt in hohem Maße von der Erfahrung und dem Können des Düsenführers ab. Für die Ausführung von Spritzbeton-Tunnelauskleidungen ist daher darauf zu achten, dass hinreichend geschultes Personal eingesetzt wird. Die Spritzbetonschale wird verfahrensbedingt in mehreren Lagen hergestellt. Nach Herstellung der statisch erforderlichen Schalendicke kann erforderlichenfalls eine letzte dünne Ausgleichsschicht mit kleinerem Korndurchmesser aufgetragen werden,

um eine glattere, anstrichfreundliche Oberfläche zu erhalten. Beim Einbau von Stahlfaserspritzbeton ist der in der Regel negative Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Bereitstellungsgemisches zu beachten und bei der Wahl der Gerätetechnik zu berücksichtigen. Die Durchführung von Eignungsprüfungen mit der Spritzbetonanlage und der verwendeten Rezeptur wird rechtzeitig vor Beginn der Spritzbetonarbeiten empfohlen.

4.4.4 Nachbehandlung

Auf Grund des hohen Mörtelgehalts erfordert Spritzbeton eine besonders sorgfältige Nachbehandlung. Zur Minimierung von Schwind- und Temperaturrisse wird empfohlen, die Betonoberfläche nach Fertigstellung der Schale mindestens 3 Tage lang feucht nachzubehandeln.

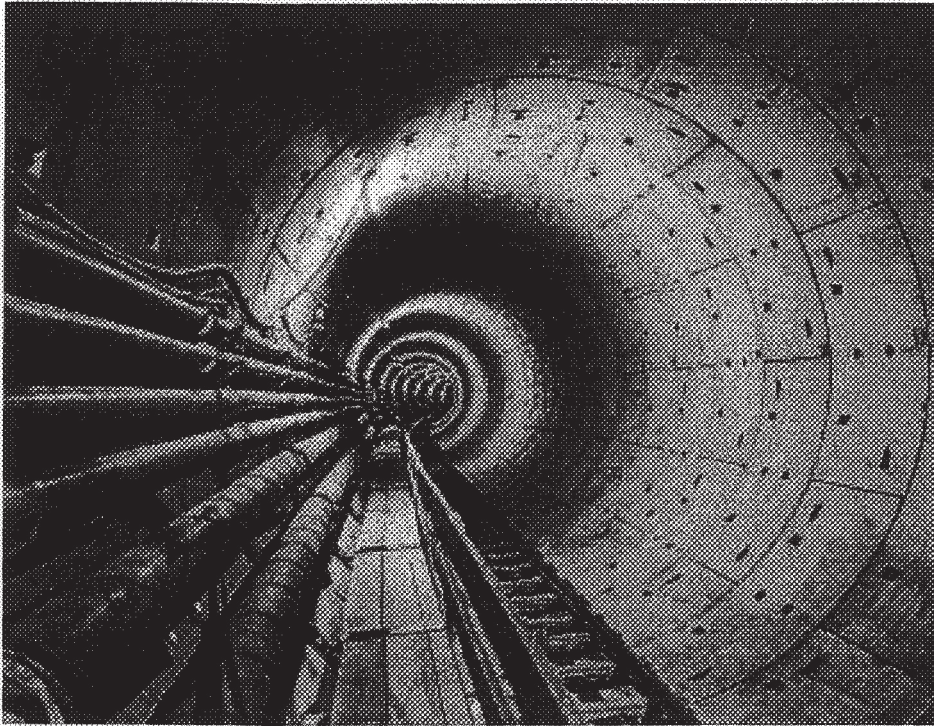
4.5 Qualitätssicherung

4.5.1 Allgemeines

Die Qualitätssicherung einer endgültigen Spritzbetontunnelschale sollte konsequenterweise der Qualitätssicherung einer Schalbetontunnelschale entsprechen. Hinsichtlich der herstellungsbegleitenden Überwachung wird demzufolge auf Abschnitt 3.6.1 „Qualitätssicherung, Übersicht“ und Tabelle 3.1 verwiesen.

4.5.2 Eignungsprüfung

Die Eignung der gewählten Betonzusammensetzung ist unter Baustellenbedingungen, am besten auf der Baustelle selbst, durch Herstellen von Prüfkörpern mit den für die Ausführung vorgesehenen Maschinen zu überprüfen. Die Probekörper sollten ausreichend groß sein (mindestens $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$) und entsprechend der spätere



5 Tübbingauskleidung im Ruhrtunnel Duisburg

ren Ausführung (horizontal oder über Kopf gespritzt) hergestellt werden. An diesen Probeplatten bzw. den daraus zu entnehmenden Bohrkernen sind sämtliche für die Ausführung geforderten Eigenschaften des Spritzbetons nachzuweisen.

4.5.3 Ausgangsstoffe

Die für den Spritzbeton ausgewählten Ausgangsstoffe müssen den geltenden Normen entsprechen oder vom Deutschen Institut für Bautechnik bauaufsichtlich zugelassen sein. Hierfür sind die jeweiligen Lieferanten verantwortlich. Die Einhaltung der Vorschriften bzw. die bauaufsichtliche Zulassung ist auf den jeweiligen Lieferscheinen von den Lieferanten auszuweisen.

4.5.4 Betonhersteller, Baustelle

Auf der Baustelle sind die Lieferscheine zu überprüfen

und bei Anlieferung eine Sichtkontrolle des Materials durchzuführen. Weiterhin wird empfohlen, bei der ersten Lieferung und danach in angemessenen Zeitabständen die Kornzusammensetzung der Zuschläge durch einen Siebversuch zu kontrollieren. Bei Lieferung von Transportbeton ist, um Verarbeitungsschwierigkeiten auszuschalten, bei Trockengemisch der Feuchtigkeitsgehalt und bei Nassgemisch das Ausbreitmaß zu überprüfen.

Wegen der zahlreichen Einflüsse auf die endgültige Zusammensetzung des Spritzbetons wird empfohlen, in regelmäßigen Zeitabständen und mindestens einmal je 100 m³ die Einhaltung der geforderten Eigenschaften an Probezylindern zu überprüfen.

Weiterhin sind auf der Baustelle baubegleitend die ausgeführte Schalendicke und die Einhaltung der vorgese-

henen Betonüberdeckung zu kontrollieren.

4.5.5 Auftraggeber

Die Ausführung des Bauvorhabens sollte durch eine fachkundige Bauüberwachung des Auftraggebers kontinuierlich begleitet werden, um Mängel frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden.

5 Stahlbetontübbinge

5.1 Allgemeines

Bei Tunnelauskleidungen mit Tübbing sind sowohl ein- als auch zweischalige Konstruktionen möglich. Zweischalige Tunnel erhalten in der Regel als endgültige Auskleidung eine Schalbetoninnenschale. Hierzu wird auf Kapitel 3 verwiesen.

Bei einschaliger Bauweise bilden die Tübbinge die endgültige Auskleidung, sodass sie alle Anforderungen, die aus den Bauzuständen, dem

Gebirge, den Grundwasser- verhältnissen und der Nutzung resultieren, erfüllen müssen. Üblicherweise werden die Tübbinge als Stahlbetonfertigteile hergestellt. Lediglich bei kleinen Tunneldurchmessern und geringen Qualitätsanforderungen werden unbewehrte Tübbinge verwendet. Für die Zukunft zeichnet sich der Einsatz von Stahlfaserbeton ab, wodurch die Stahlfaserbewehrung reduziert werden oder sogar ganz entfallen kann. Für Sonderbereiche, z. B. an Abzweigungspunkten für Querschläge, sind auch Stahl-tübbinge üblich.

5.2 Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften

Die Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften von Tübbingauskleidungen ergeben sich aus den Gebirgs- und Wasserdrücken, aus der Nutzung und hier in besonderem Maße aus den Bauzuständen. Sowohl konstruktionsbedingt (Kraftübertragung in den Fugen) als auch aus den Bauzuständen (Pressenkräfte, Nachläuferlasten) ergibt sich die Notwendigkeit hoher Betonfestigkeiten. In der Regel werden Stahlbetontübbinge in der Betonfestigkeitsklasse B 45, teilweise auch in B 55 oder höher ausgeführt.

Der Beton muss ein wasserundurchlässiges Gefüge nach DIN 1045 Abschnitt 6.5.7.2 und eine Wassereindringtiefe nach DIN 1048 ≤ 30 mm aufweisen.

Im Tunneleingangsbereich muss der Beton der Tübbinge einen hohen Frostwiderstand und bei Straßentunneln einen hohen Frost- und Tausalz-widerstand besitzen, vgl. DIN 1045 Abschnitte 6.5.7.3 und 6.5.7.4.

Bei chemischem Angriff infolge sulfathaltiger Wässer

(≥ 600 mg SO_4/l) oder sulfathaltigen Baugrundes (≥ 3000 mg SO_4/kg) ist für die Tübbingzement mit hohem Sulfatwiderstand zu verwenden, vgl. DIN 1045 Abschnitt 6.5.7.

5.3 Zur Konstruktion von Tübbing

5.3.1 Ringgeometrie

Ein Tübbingring besteht in der Regel aus 5 bis 7 Tübbing. Ausbauten, die keinen geschlossenen Ring bilden, haben sich in der Praxis nicht bewährt.

Die Ringteilung und die Tübbingabmessungen sind nach den projektspezifischen Vorgaben zu optimieren.

Zur Herstellung von Krümmungen der Tunnelröhre und zum Ausgleich von unvermeidlichen Abweichungen der Vortriebsspur von der Soll-Linie werden die Tübbingringe konisch hergestellt, sodass die Ringstirnflächen nicht parallel sind. In der Praxis hat sich sowohl die Herstellung von zwei einander ergänzenden konischen Ringen bewährt als auch der Bau nur eines konischen Ringes. Durch entsprechendes Verdrehen der Ringe kann jede räumliche Kurve hergestellt werden. Bei Verwendung nur eines Ringes vereinfachen sich die Lagerhaltung und Verwechslungen sind ausgeschlossen.

5.3.2 Längsfugen

In den Längsfugen werden Ringnormalkräfte und Biegemomente durch ausmittige Normalkräfte und Querkkräfte übertragen.

In der Praxis hat sich vor allem die Ausbildung ebener Fugen bewährt. Sie können die Normalkräfte flächig übertragen und entsprechend ihrer Breite in begrenztem Maß durch mögli-

che Ausmittigkeit der Normalkräfte auch Biegemomente übertragen. Die Querkkräfte werden durch Reibung übertragen.

Die Ausbildung von Nut und Feder in der Längsfuge bietet eine gute Führung bei der Montage und verbessert die Möglichkeit, Querkkräfte zu übertragen. Wegen der stärkeren Einschnürung der Kraftübertragungsfläche ist die Biegemomentenübertragfähigkeit kleiner als die der ebenen Fuge. Da Nutflanken und Feder kaum effektiv bewehrt werden können, besteht hier bereits bei geringer Überschreitung des Fugenspiels beim Ringbau die Gefahr von Betonabplatzungen.

Andere Fugenausbildungen, wie z. B. beidseitig konvexe Fugen oder konkav/konvexe Fugen, kommen für endgültige Tübbingauskleidungen wegen unzureichender Abdichtungsmöglichkeiten kaum in Betracht. Die Längsfugen benachbarter Ringe sollten zur Vermeidung von Dichtungsproblemen (Kreuzfugen) und zur Erhöhung der Steifigkeit der Tübbingröhre versetzt angeordnet werden.

5.3.3 Ringfugen

Die Ringfugen werden durch Normal- und Querkkräfte beansprucht. Die Normalkräfte resultieren im Bauzustand aus den Vortriebspresenkräften und im Endzustand aus dem Wasserdruck. Querkkräfte in den Ringfugen entstehen durch unterschiedliche Verformungen benachbarter Ringe.

Für die Ringfugen sind sowohl ebene Fugenflächen als auch Verzahnungen in Form von Nut- und Feder-Konstruktionen oder Topf-Nocke-Systemen üblich.

Ebene Fugen können Querkkräfte nur über Reibung und nur bei ausreichender Normalkraft aus den Vorschubpressen übertragen. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere bei Nichtvorhandensein elastischer Ringfugeneinlagen (s. u.) die Vorspannung der Tübbingröhre in Längsrichtung aus den Pressenkräften durch Schwinden und Kriechen des Betons vollständig abgebaut werden kann. Ebene Ringfugen sind weniger anfällig für Abplatzungen, lassen allerdings unter Umständen auch größere Differenzverschiebungen benachbarter Tübbingringe zu, sodass die Dichtigkeit der Ringfuge gefährdet werden kann. Fugen mit einer wirksamen Verzahnung verhindern unzulässig große Differenzverschiebungen benachbarter Ringe und können außerdem die Biegetragfähigkeit der Tübbingröhre vergrößern. Die zu erwartenden Koppelkräfte sind in der statischen Berechnung zu bestimmen und der Bemessung der Nut- und Feder-Konstruktion bzw. des Topf-Nocke-Systems (Abmessungen, Bewehrung) zu Grunde zu legen [46]. Zur Verringerung der Gefahr von Zwängungen und Abplatzungen sollten Nut und Feder bzw. Topf und Nocke mit ausreichend großem Spiel und die Randbereiche der Feder bzw. Nocke leicht zurückspringend ausgebildet werden.

Zur Vermeidung von Schäden infolge von Spannungsspitzen und zur Verbesserung der Kraftübertragung hat sich die Einlage von Kraftübertragungsplatten, z. B. aus Hartfaserstoffen, in den Ringfugen bewährt. Auch bei der Ausführung von Topf-Nocke-Systemen wird das Einkleben von Kaubitstreifen oder Gleichwertigem

empfohlen. Die Praxis zeigt, dass die Ausbildung von Nut- und Feder-Konstruktionen die Gefahr von Betonabplatzungen deutlich erhöht. Sofern es die Beanspruchungen zulassen, wird daher empfohlen, die Ringfugen eben auszuführen.

5.3.4 Tübbingverschraubung und -verdübelung

Zur Montage des Tübbingringes und zur Sicherung der planmäßigen Geometrie ist die Verschraubung der Tübbing untereinander über die Längs- und Ringfugen hinweg zweckmäßig. Für den Endzustand ist eine Verschraubung in der Regel nicht erforderlich, da die Längsfugen durch den Erd- und Wasserdruck überdrückt sind und in den Ringfugen mindestens die Vorspannung aus den Rückstellkräften des Dichtprofils vorhanden ist. Lediglich in Eingangsbereichen des Tunnels ist eine konstruktive Sicherung der Vorspannung der Fugenbänder in den Ringfugen erforderlich.

Zur Verbindung der Tübbing in Längs- oder in Ringrichtung können auch Dübel verwendet werden. In welchem Umfange Dübelverbindungen Zugkräfte (Vermeidung des Aufatmens) mit hinreichender Sicherheit übertragen können, ist in jedem Einzelfall zu klären und durch Versuche zu belegen. Für die Montage können Holz- oder Kunststoffdübel als Zentrierhilfe beim Ringbau hilfreich sein. Ebenso können sie als Sicherung gegen Herabfallen eingesetzt werden.

5.3.5 Tübbingdichtungsbänder

Die Abdichtung der Ring- und Längsfugen erfolgt durch Dichtungsbänder aus

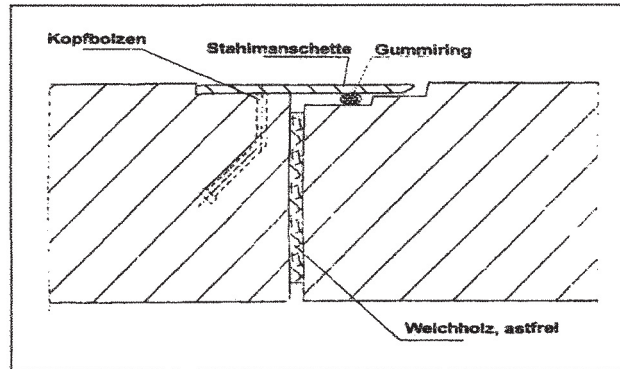
Betonauskleidungen Concrete linings

Kunstkautschuk, die als vorgefertigte Rahmen in die umlaufende Nut in den Fugenflächen eingeklebt werden. Die wirksame Wasserdichtigkeit der Fugenbänder ist durch Eignungsprüfungen nachzuweisen, die sowohl mögliche Verschiebungen der Dichtungsbänder gegeneinander als auch mögliche unvollständige Kompression der Bänder berücksichtigen müssen. Üblich und in der Regel ausreichend sind einfache Dichtungsrahmen. Doppelte Rahmen machen eine zusätzliche Nut in den Fugenflächen erforderlich, wodurch die Druckübertragungsflächen verkleinert und Abplatzgefahren vergrößert werden. Sie kommen daher nur für dickere Tübbinge $d \geq 60$ cm in Frage.

Zusätzlich sollten die Tübbinge am äußeren Rand mit Schaumstoffstreifen beklebt werden. Dadurch kann das Eindringen von Verpressmörtel in den äußeren Fugenraum verhindert und die Dichtigkeit zwischen Schildschwanz und Tunnelröhre verbessert werden.

5.3.6 Bewehrung

Auch wenn aus statischen Gründen nur ein sehr kleiner Bewehrungsquerschnitt erforderlich wird, empfiehlt es sich doch, eine Mindestbewehrung in den Tübbingen vorzusehen, um unplanmäßige Zwängungen, die insbesondere beim Ringbau auftreten können, abzudecken. Der Mindestbewehrungsquerschnitt sollte 0,10 % des Betonquerschnittes nicht unterschreiten. Insbesondere die Ringbewehrung im Bereich der Ringfugen sollte nicht zu knapp gewählt werden. Im Übrigen wird darauf hingewiesen, dass bei der Dimensionierung der Tübbingbewehrung in jedem



6 Rohrstoß ohne besondere Anforderungen

Fall die Spaltzug- und Randzugbeanspruchungen des Tübbings im Bereich der Fugen zu untersuchen sind.

Für die Herstellung der Bewehrungskörbe der Tübbinge bietet sich die werksmäßige Vorfertigung und Verschweißung der Bewehrungskörbe in Schalungsschablonen an. In der Regel werden dabei sowohl Stabstahl als auch speziell angefertigte Matten verwendet. Alle gebogenen Stäbe werden dabei vorgebogen eingebaut, um den Korb spannungsfrei herstellen zu können. Für die Betondeckung gelten folgende Empfehlungen:

Nennmaß: $\text{nom } c = 3,5 \text{ cm}$
Mindestbetondeckung:
 $\text{min } c = 3,0 \text{ cm}$

Zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Verzahnungen ist an den Fugenflächen auch eine kleinere Betonüberdeckung akzeptabel: etwa $\text{min } c \geq 2,0 \text{ cm}$.

Bei speziellen Anforderungen wurden auch bereits beschichtete Bewehrungsstäbe eingesetzt. Der Einsatz von Stahlfasern allein oder in Kombination mit Stabstahlbewehrung wird zurzeit erprobt.

5.4 Tübbingherstellung

5.4.1 Schalung, Toleranzen

In der Regel werden Tübbinge in einem bestehenden

Fertigteilwerk oder in extra für das Projekt aufgebauten Feldfabriken hergestellt. In jedem Fall gelten hinsichtlich Anforderungen an Ausstattung und Überwachung die Anforderungen an Fertigteilwerke, vgl. DIN 1045, Abschnitt 5.3. Zur Einhaltung der hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Tübbinge kommen in der Regel ausschließlich massive Stahlschalungen infrage. Sie sind nach jedem Einsatz fachgerecht zu reinigen und zu kontrollieren. Als Empfehlung für die einzuhaltenen Maßtoleranzen können folgende Werte genannt werden:

Tübbingbreite	$\pm 0,6 \text{ mm}$
Tübbingdicke	$\pm 3,0 \text{ mm}$
Tübbingbogenlänge	$\pm 0,8 \text{ mm}$
Längsfugenebenheit	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Ringfugenebenheit	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Verschränkungs- winkel in Längsfugen	$\pm 0,04^\circ$
Winkel der Längs- fugenkonizität	$\pm 0,01^\circ$

Die Maßtoleranzen können projektspezifisch festgelegt werden. Für die DB AG gilt Ril 853, Modul 19 [1]. Die Betonoberfläche der Nut für den Dichtungsrahmen muss vollständig lunckerfrei sein, um Wasserumlaufigkeiten zu vermeiden. Hier sind gege-

benenfalls Nachbearbeitungen im Werk erforderlich.

5.4.2 Betonzusammensetzung

An Zuschlag, Zement, Betonzusatzstoffe, Betonzusatzmittel und Zugabewasser werden die gleichen Anforderungen gestellt wie für den Innenschalenbeton, vgl. Kapitel 3.4.

Maßgebend für die Betonzusammensetzung ist im Allgemeinen die geforderte Abhebefestigkeit des Tübbings. Je nach Zeitpunkt des Abhebens aus der Schalung hat sich ein Zementgehalt zwischen etwa 340 und 380 kg/m^3 bewährt. Bei einem sehr früheren Abhebezeitpunkt fördert die Zugabe von Silicasuspension die Frühfestigkeitsentwicklung. Sie soll mit etwa 7 bis 8 % Feststoff, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben werden. Der Wasserzementwert muss in jedem Fall kleiner als 0,5 sein. In der Praxis haben sich Wasserzementwerte zwischen 0,43 und 0,48 bewährt. Das Zuschlaggrößtkorn soll unter Berücksichtigung der Bewehrungsdichte so groß wie möglich gewählt werden. Der Mehlkorngehalt sollte an das Größtkorn angepasst werden. Bei einem Größtkorn von 32 mm empfiehlt sich ein Mehlkorn- und Feinstsandgehalt (Korngröße $\leq 0,25 \text{ mm}$) von 450 bis 470 kg/m^3 .

Die Konsistenz des Frischbetons ist mittels Fließmittel auf den Bereich KP/KR einzustellen. Für Tübbinge mit hohem Frost- und Tausalz-widerstand ist dem Frischbeton ein Luftporenbildner zuzugeben, sodass der Luftgehalt im Frischbeton den Werten der Tabelle 5 in DIN 1045 entspricht.

Mit der Wärmebehandlung beim Erhärten des Be-

Betonauskleidungen

Concrete linings

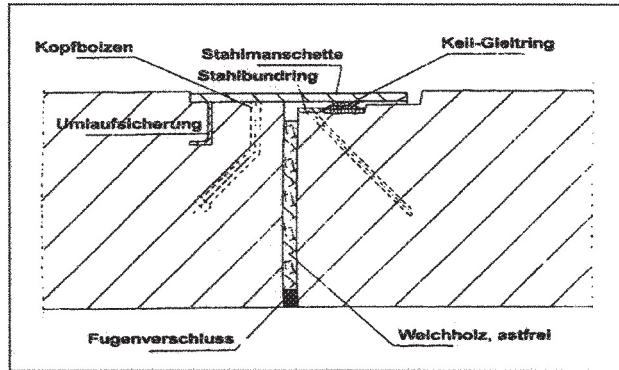
tons kann die Festigkeitsentwicklung maßgebend beeinflusst werden:

Sofern der Tübbing erst nach ca. 16 bis 20 Stunden aus der Schalung gehoben wird, reicht eine Frischbetontemperatur von 20 bis 25 °C aus. Eine zusätzliche Wärmebehandlung ist dann nicht notwendig. Wenn dagegen bereits nach 6 bis 8 Stunden ausgeschalt werden soll, sind Zusatzmaßnahmen zur Erzielung einer ausreichenden Ausschaltfestigkeit erforderlich. Für eine beschleunigte Erhärtung hat sich bewährt, den Frischbeton mit einer Temperatur von 30 bis 35 °C in die Schalung einzubringen und ihn anschließend in einer Wärmekammer auf dieser Temperatur zu halten, vgl. hierzu die Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton des DAfStb [22]. Dabei sind Tübbinge stets in die Feuchtigkeitsklasse WF einzustufen.

Nach dem Ausschalen ist der Tübbing sorgfältig nachzubehandeln, um Risse und Formänderungen des Fertigteils zu vermeiden. Für das Abheben des Tübbings aus der Schalung ist je nach Abmessungen des Fertigteils eine Festigkeit von etwa 15 bis 20 N/mm² notwendig. Beim Absetzen auf die Stapelhölzer ist auf erschütterungsfreies Arbeiten und die genaue Ausrichtung der Hölzer zu achten. Um einen kontrollierten und langsamen Wärmeabfluss sicherzustellen, hat sich die Abdeckung des Tübbings bzw. des Tübbingstapels mit einer Folie bewährt, die allseitig bis zum Boden reicht. Dadurch wird auch gleichzeitig die zu starke Austrocknung der Fertigteile verhindert.

5.5 Tübbingeinbau

Der Einbau der Tübbinge darf erst nach Erreichen der



7 Rohrstoß für drückendes Wasser

erforderlichen Festigkeit erfolgen. Unmittelbar vor dem Einbau sollten die Tübbinge auf Beschädigung und auf planmäßige Lage der Dichtungsbänder überprüft werden. Beschädigte Fertigteile dürfen nicht eingebaut werden. Der Ringbau hat so zu erfolgen, dass eine Beschädigung der Tübbinge vermieden wird und die planmäßige Geometrie des Tübbingrings im Schutz des Schildmantels erreicht wird. Geringfügige Betonabplatzungen infolge von Zwängungen beim Ringbau sind nicht immer zu vermeiden. Daher ist in der Regel eine Betonoberflächenreparatur erforderlich.

Die Ringspaltverpressung hat großen Einfluss auf das Tragverhalten der Tübbingröhre. Im Wesentlichen unterscheidet man zwei Verpressmethoden:

- die kontinuierliche Verpressung des Ringspalt durch den Schildschwanz der Schildmaschine und
- die nachträgliche Verpressung durch Verpressstützen in den Tübbingen.

Im Lockergestein ist die Verpressung des Ringspalt unmittelbar hinter dem Schildmantel derzeit Stand der Technik. Der Ringspalt wird dabei volumen- und druckgesteuert gefüllt, so

dass Setzungen an der Geländeoberfläche minimiert und die Tübbingröhre kraftschlüssig im Baugrund gebettet wird. Diese Verpressung ist so zu steuern, dass keine unzulässigen Verformungen der Tübbingringe und Schäden an den Tübbingen auftreten.

Die Verpressung durch Stützen in den Tübbingen erfolgt relativ spät, sodass in Lockergestein Bodennachfall in den Ringspalt nicht immer verhindert werden kann. Die Verpressung ist dadurch nicht immer gleichmäßig, und ein Druckaufbau im Verpressgut ist nur unzureichend kontrollierbar.

Im Festgestein ist das nachträgliche Verpressen durch den Tübbing oder die Rollkiesverfüllung des Ringspalt mit nachlaufender Mörtelverpressung Stand der Technik.

Wesentlich für die Beschränkung der Verformungen und das Tragverhalten des neu gebauten Tübbingrings ist die schnelle Stabilisierung des Verpressmörtels. Der Ringspaltverpressmörtel soll daher zunächst während der Verarbeitungsphase gute Fließeigenschaften besitzen und anschließend nach dem Verpressen möglichst schnell hohe Scherbeanspruchungen aufnehmen können und

zur Erzielung von Volumenkonstanz möglichst wenig Filtratwasser abgeben. Die Erhärtung des Verpressmörtels sollte allerdings nicht zu schnell erfolgen, um negative Auswirkungen auf den Betrieb der Schildmaschine zu vermeiden. Der Rezeptur des Verpressmörtels kommt daher große Bedeutung zu.

5.6 Qualitätssicherung

5.6.1 Allgemeines

Tübbinge dürfen nur in Fertigteilwerken hergestellt werden, die den Anforderungen der DIN 1045, Abschnitt 5.3, genügen. Der Beton ist nach den Regeln B II herzustellen und nach DIN 1048, Teil 2, zu überwachen.

5.6.2 Eignungsprüfungen

Die Eignung der Betonzusammensetzung und des Herstellverfahrens für die an die Tübbinge gestellten Anforderungen ist in Eignungsprüfungen unter werkmäßigen Bedingungen nachzuweisen. Hierzu wird empfohlen, an einem Probekörper auch den Temperaturverlauf während der Hydratation kontinuierlich zu messen und aufzuzeichnen. Des Weiteren wird empfohlen, vor Beginn der eigentlichen Produktion mit dem vorgesehenen Beton in der vorgesehenen Schalung mit Rüttelgeräten Probetübbinge herzustellen und an diesen unter anderem auch die Porenbildung an der Betonoberfläche zu prüfen.

5.6.3 Überwachung der Tübbingherstellung

Für die Überwachung der Tübbingherstellung gilt DIN 1084, Teil 2. Neben den darin vorgegebenen Prüfungen werden zusätzlich folgende Nachweise empfohlen:

Vor jedem Abheben einer Tübbingserie sollte stichpro-

benartig die tatsächlich vorhandene Frühfestigkeit zerstörungsfrei (Rückprallhammer) bestimmt werden.

Die Temperaturen im Tübbingkern und an der Tübbingoberfläche sollten mindestens einmal – am besten während der kalten Jahreszeit – gemessen und aufgezeichnet werden. Dabei darf der Temperaturgradient 20 K nicht überschreiten.

5.6.4 Überwachung der Maßhaltigkeit

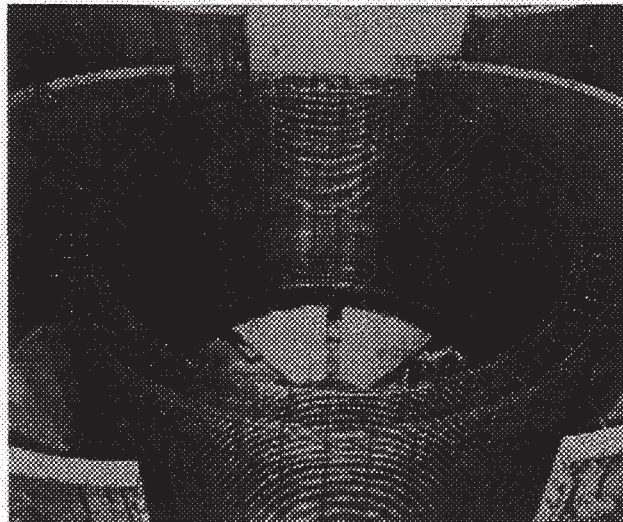
Zur Einhaltung der geforderten Toleranzen haben sich die Kontrolle der Schalungsform und der fertigen Tübbing durch regelmäßige Stichproben bewährt. In der Anfangsphase einer Serie ist eine 3-D-Vermessung der Tübbing empfehlenswert. Vor Beginn der Serienfertigung ist die Produktion von Proberingen und deren Zusammenbau zwecks Prüfung und Abnahme zweckmäßig.

6 Stahlbetonrohre

6.1 Allgemeines

Stahlbetonrohre werden in der Regel im Vorpressverfahren in den Baugrund eingebaut. Der Transport der Fertigteile zur Baustelle, der Einbauvorgang in der Pressbaugrube und die Reibungskräfte beim Vorpressen begrenzen die Größe der Fertigteile. Stahlbetonrohre werden daher für Tunnel mit kleinerem Querschnitt, überwiegend für Ver- und Entsorgungstunnel, eingesetzt. In Abhängigkeit von den Anforderungen werden sie hergestellt als:

- schlaff bewehrte Stahlbetonrohre nach DIN 4035
- vorgespannte Spannbetonrohre in Anlehnung an DIN 4035 und DIN 4227
- Stahlbetonrohre mit äußerem oder innerem Stahlmantel.



8 Geschweißter Bewehrungskorb

Eine zusammenfassende Darstellung des Rohrvortriebs gibt u. a. Scherle, M. [47]. Nachfolgende Empfehlungen gelten für Querschnitte mit $\geq 1,5$ m Innendurchmesser.

6.2 Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften

Die Angaben in 3.2 gelten entsprechend. Die Belastungen im Bauzustand (Pressenkräfte, Kurvenfahrt) sind bei der Dimensionierung der Rohre besonders zu berücksichtigen. Für Druckwasserleitungen sind zur Erzielung einer ausreichenden Wasserdichtigkeit eventuell besondere Maßnahmen nach Abschnitt 6.3.3 erforderlich.

6.3 Konstruktion von Stahlbetonrohren

6.3.1 Querschnittsform, Abmessungen

In geschlossener Bauweise einzubauende Stahlbetonrohre werden in der Regel mit kreisförmigem Querschnitt hergestellt. Die innere Kontur des Rohres kann an die Anforderungen der späteren Nutzung angepasst werden. Die Baulänge der Rohre sollte gemäß den

Vorgaben der DIN 4035 mindestens 2,5 m betragen. Die maximalen Abmessungen der Rohre hängen vor allem von den Transportbedingungen (Lichtraumprofil, Gewicht) und von den Bedingungen beim Rohreinbau und Rohrvortrieb (Kurvenfahrt, Reibungskräfte) ab.

6.3.2 Rohrverbindungen

Die Verbindung zwischen den einzelnen Rohren hat mehrere Aufgaben zu erfüllen:

- Weiterleitung der Pressenkräfte,
- Beweglichkeit benachbarter Elemente gegeneinander sicherstellen (Knickwinkel für Kurvenfahrt),
- Dichtigkeit sicherstellen,
- Übertragung von Scherkräften quer zur Rohrachse.

Für die Durchleitung der Pressenkräfte hat sich die Einlage von astfreien Weichholzringen zwischen den Rohrstirnflächen bewährt. Zur Vermeidung von Kantenabplatzungen an den Rohrenden sollte die Holzeinlage mindestens 20 mm dick sein und einen Abstand von jeweils mindestens 20 mm zur äußeren und inneren Schalenoberfläche einhalten.

Zur Abdichtung der Rohrfugen hat sich eine Konstruktion aus Stahlmanschette und elastischem Dichtungsring bewährt. Die Stahlmanschette ist mittels Kopfbolzen am Ende des jeweils vorlaufenden Rohres einbetoniert und ragt über das Ende des Stahlbetonrohres hinaus. Das entsprechend geformte vordere Ende des nachfolgenden Rohres (Spitzende) wird von der Manschette umfasst. Die Fuge zwischen dem Spitzende und der Manschette wird durch einen elastischen Dichtungsring wasserdicht verschlossen. Für eine zuverlässige Verankerung der Manschette sollten die o. g. Kopfbolzen einen Abstand von ≤ 25 cm haben und hinter der Bewehrung des Rohrendes verankert sein. Für einen wasserdichten Anschluss der Manschette an das Betonrohr ist weiterhin eine in den Betonquerschnitt hineinragende Sperre erforderlich, z. B. in Form eines stählernen Dichtungswinkels. Die Stahlmanschette ist in geometrischer Hinsicht für die zu erwartenden Knickwinkel und in statischer Hinsicht für die anzusetzenden Querkkräfte zu bemessen. Für das Spitzende des nachfolgenden Rohres, welches von der Manschette umfasst wird, hat sich die Bewehrung der äußeren Vorderkante mit einem stählernen Bundring bewährt. Der Ring sollte ebenfalls mit Kopfbolzen in der Rohrwand verankert werden. Der Bundring bildet gleichzeitig die vordere Flanke der Nut am Spitzende, in welche das Dichtungsgummi eingeklebt ist. Bei Wasserdrücken über 0,5 bar sind spezielle Dichtungsprofile zur Gewährleistung der Wasserdichtigkeit am Rohrstoß notwendig. Deren Dichtungs-

Betonauskleidungen Concrete linings

funktion ist in Anlehnung an die Nachweise für Tübbingdichtungen (siehe Kap. 5.3.5) nachzuweisen.

Bei Vorpressrohren ohne besondere Anforderungen wird der Rohrstoß in der Regel etwa entsprechend Bild 6 ausgeführt. Bild 7 zeigt einen

Rohrstoß, der auch höhere Anforderungen an die Dichtigkeit der Rohrverbindung erfüllt.

Hinsichtlich der Anforderungen an die Rohrverbindung, die Dichtungsringe und die diesbezüglichen Prüfungen wird auf DIN

4060 „Dichtungsmittel aus Elastomeren für Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und Leitungen“ und DIN 19453 „Allgemeine Anforderungen an Rohrverbindungen für Abwasserkanäle und -leitungen“ verwiesen.

6.3.3 Abdichtung

In der Regel werden die Stahlbetonrohre in wu-Beton hergestellt und benötigen keine zusätzlichen Abdichtungen. Lediglich bei besonderen Anforderungen, wie z. B. hohem Wasserinnendruck, kann eine zusätzliche Abdichtung erforderlich werden. Für diese Fälle kann ein zusätzlicher Stahlmantel eingebaut werden, der entweder an der Rohrinnen- oder -außenseite oder innerhalb der Rohrwandung angeordnet wird. An den Rohrstoßen wird die Dichtigkeit dann durch eine Ringschweißnaht oder über eine spezielle Falz-Muffen-Verbindung sichergestellt.

6.3.4 Bewehrung

Die Mindestanforderungen für die Bewehrung von Stahlbetonrohren werden in DIN 4035 genannt. Für Vorpressrohre im Bereich von Eisenbahnanlagen gelten darüber hinausgehende Forderungen gemäß Ril 853, Modul 9, [1].

6.4 Herstellung von Stahlbetonrohren

6.4.1 Herstellverfahren

Stahlbetonrohre werden in Europa im Wesentlichen nach vier Verfahren hergestellt, die sich vor allem durch den Schalungsaufwand und die eingesetzte Verdichtungsmethode unterscheiden. Die Verfahren werden in Tabelle 6.1 beschrieben. Insbesondere für größere Rohre (etwa > DN 2000) hat sich wegen guter Einhaltung der Genauigkeit der Rohrabmessungen und der Betonüberdeckung das Rüttelverfahren bewährt.

6.4.2 Betonzusammensetzung

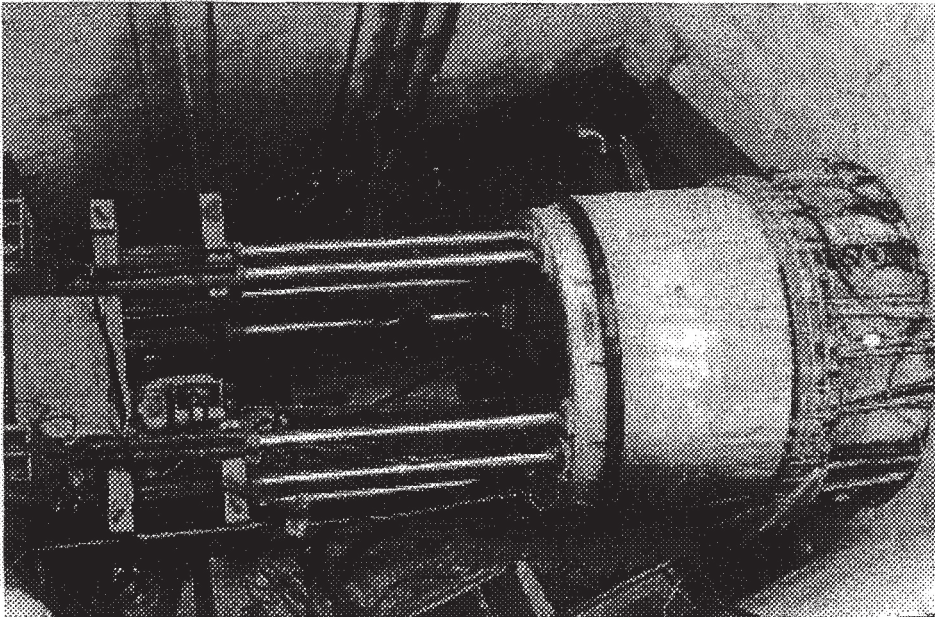
An Zuschlag, Zement, Betonzusatzstoffe, Betonzu-

Tabelle 1: Herstellverfahren für Stahlbetonrohre

Herstellverfahren	Rüttelverfahren		Schleuderverfahren	Rüttel-Press-Verfahren		Packerhead-Verfahren
Einsatzbereich bis Nennweite	DN 4400 und größer		DN 3500	DN 3000		DN 2500
Einsatzhäufigkeit	Bei VP-Rohren und bei Rohren mit Baulängen > 3,00 m sowie bei Rohren > DN 3000 vorwiegend eingesetzt		nur noch in Ausnahmefällen	DN 250 bis DN 3000 vorherrschend, auch bei VP-Rohren		DN 250 bis DN 1200 vorherrschend
Ausschalen	nach Abbinden des Betons		nach Abbinden des Betons	Sofortausschalung		Sofortausschalung
Lage beim Betonieren	vertikal		horizontal	vertikal		vertikal
Shalungsart	äußere und innere Stahlschalung		nur äußere Stahlschalung	äußere und innere Stahlschalung		nur äußere Stahlschalung
Verdichtungsmethode	Schalungsrüttler	Tauchrüttler	Fliehkraft infolge Rotation der Schalung	Rütteltisch, oberes Rohrende (i. a. Spitzende) durch Presswerkzeug geformt	Schalungsrüttler, oberes Rohrende (i. a. Spitzende) durch Presswerkzeug geformt	Schleudern, Walzen und Glätten durch einen rotierenden Verdichtungskopf (Packerhead)
Betonkonsistenz	KP (plastisch)		KR (weich)	KS (erdfeucht)		KS (erdfeucht)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - große Genauigkeit der Formen und Abmessungen - glatte Betonoberfläche - einfache Betontechnologie 		<ul style="list-style-type: none"> - große Genauigkeit der äußeren Formen und Abmessungen, - glatte äußere Betonoberfläche - einfache Variationsmöglichkeit der Rohrlänge und Wanddicke 	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Fertigungsgeschwindigkeit bei geringem Schalungsaufwand 		<ul style="list-style-type: none"> - hohe Fertigungsgeschwindigkeit bei geringem Schalungsaufwand
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - schalungsaufwändig und geringer Schalungsumsatz - kostenaufwändige Variationsmöglichkeit in Baulänge und Wanddicke 		<ul style="list-style-type: none"> - schalungsaufwändig und geringer Schalungsumsatz - aufwändiger Schleuderantrieb - Nacharbeit der inneren Form und Abmessungen - Entsorgung des Überschusswassers 	<ul style="list-style-type: none"> - geringere Genauigkeit der Formen und Abmessungen - Oberfläche rau und porig - Betontechnologie ist dem Verfahren anzupassen 		wie unter 3a und 3b

Betonauskleidungen

Concrete linings



9 Blick in einen Pressschacht

satzmittel und Zugabewasser werden die gleichen Anforderungen gestellt wie an den Innenschalenbeton, vgl. Kapitel 3.4. Die erforderliche Konsistenz und die Betonrezeptur sind abhängig vom gewählten Herstellverfahren der Rohre.

In DIN 4035 wird für Stahlbetonrohre eine Mindestbetonfestigkeit B 45 gefordert. Zur Erzielung eines dichten, früh- und hochfesten Betons wird der Wasser-Zement-Wert auf $w/z < 0,4$ eingestellt. In Abhängigkeit von der Zementart, der Zementfestigkeitsklasse und dem eingesetzten Verdichtungsverfahren lassen sich Würfeldruckfestigkeiten von bis zu 90 N/mm^2 und Ringbiegezugfestigkeiten zwischen 6 und 10 N/mm^2 erreichen.

6.5 Rohreinbau

6.5.1 Einbau im Vorpressverfahren

Die Herstellung einer Rohrleitung oder eines Rohrtunnels in geschlossener Bauweise erfolgt überwie-

gend im Vorpressverfahren. Dabei wird in einer Startbaugrube eine Pressstation aufgestellt, mit deren Hilfe die nach und nach aneinander gereihten Stahlbetonrohre in den Baugrund gepresst werden. An der Spitze der Rohrleitung erfolgt der Bodenabbau mit einem den Boden- und Wasserverhältnissen entsprechenden gängigen Abbauverfahren, z. B. im Schildvortrieb. In der Startbaugrube wird nach jedem Vorschubschritt ein neues Rohr an das Ende des Rohrstranges gesetzt. Die Reibung zwischen Baugrund und Rohrwand wird durch thixotrope Schmiermittel, z. B. Bentonitsuspension, vermindert. Das Schmiermittel wird über Verpressstutzen in den Betonrohren in den Ringspalt zwischen Baugrund und Rohrwand gepresst. Der Abstand der Verpressstutzen in Ring- und Längsrichtung ist von den Baugrund- und Wasserverhältnissen und von der Rauigkeit der Rohrwandung abhängig. In Ringrichtung sollte der Abstand im Allge-

meinen nicht größer als 3 m sein, in Längsrichtung sollte er in rolligem Material 10 m nicht überschreiten.

Zur Vermeidung von Schäden an den Vortriebsrohren sollten die Presskräfte der Haupt- und Zwischenpressstationen auf Vortriebskräfte begrenzt werden, die der Rohrbemessung zu Grunde gelegt wurden.

Zur Minimierung der Setzungen an der Geländeoberfläche und zur Gewährleistung der statisch erforderlichen seitlichen Bettung der Rohre wird empfohlen, den Ringspalt zwischen aufgefahretem Baugrund und Betonrohr so klein wie möglich zu halten. In der Regel reichen 10 bis 15 mm Ringspalt aus.

6.5.2 Einbau mit Rohrtransportfahrzeugen

In standfestem Gebirge ist es möglich, den gesamten Hohlraum einschließlich eines großzügigen Überprofils aufzufahren und die Stahlbetonrohre anschließend einzubauen. Die Rohrsegmente

werden dabei mit einem speziellen Rohrtransportfahrzeug in den Stollen gebracht und aneinander gekoppelt. Nach Herstellen der Rohrleitung muss der Ringspalt zwischen Gebirge und Tunnelrohr kraftschlüssig verfüllt werden.

6.6 Qualitätssicherung

6.6.1 Allgemeines

Die Herstellung von Stahlbetonrohren darf nur in stationären Werken und Feldfabriken erfolgen, welche die in DIN 4035 Abschnitt 7.1 festgelegten Anforderungen an Rohrwerke erfüllen. Für die Qualitätskontrolle auf Seiten des Stoffherstellers und des Betonherstellers gelten die Ausführungen unter 3.6.3 und 3.6.4. Die Eignung der Betonzusammensetzung und des Herstellverfahrens ist unter werkmäßigen Bedingungen durch Eignungsprüfungen nach DIN 1045 nachzuweisen.

6.6.2 Überwachung der Herstellung

Die in DIN 4035 festgelegten Qualitätsanforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit und Wasserundurchlässigkeit sind zu erfüllen. Hierfür ist die Kontrolle der Maßhaltigkeit der Schalung, der Verdichtung, der Bewehrung und der Betondeckung sowie der ordnungsgemäßen Nachbehandlung des Betons erforderlich.

6.6.3 Überwachung des Rohreinbaus

Während des Rohreinbaus sind die Lagegenauigkeit der Leitung, die Ausbildung der Fugen und die Verfüllung bzw. Verpressung des Ringspalt zu kontrollieren. Bei der Rohrvorpressung sind zusätzlich die Presskräfte zu kontrollieren, so-

dass die vom Rohr aufnehmbaren Längsdruckspannungen nicht überschritten werden.

Literatur

1. Vorschriften und Richtlinien

- [1] Deutsche Bahn AG: Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten, Ril 853, gültig ab 1. 10. 1998
- [2] Bundesministerium für Verkehr: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln, Teil 1, geschlossene Bauweise, 1995
- [3] Bundesministerium für Verkehr: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln, Teil 2, offene Bauweise, 1999
- [4] ZTV-Riss 93, Verkehrsblatt-Verlag 1993
- [5] DIN 1045, Ausgabe 7.88, Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- [6] DIN 1048, Ausgabe 6.91, Prüfverfahren für Beton
- [7] DIN 1084, Ausgabe 12.78, Überwachung (Güteüberwachung) im Beton- und Stahlbetonbau
- [8] DIN 1164, Teil 8, Ausgabe 11.78, Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Trasszement
- [9] DIN 4030, Ausgabe 6.91, Beurteilung betonangreifender Wasser, Böden und Gase
- [10] DIN 4035, Ausgabe 7.90, Stahlbetonrohre, Stahlbetondruckrohre und zugehörige Formstücke
- [11] DIN 4060, Ausgabe 12.88, Dichtungsmittel aus Elastomeren für Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und -leitungen
- [12] DIN 4226, Ausgabe 4.83, Zuschlag für Beton
- [13] DIN 18314, VOB Teil C, Allgemeine Technische Vorschriften für Spritzbetonarbeiten
- [14] DIN 18551, Ausgabe 3.92, Spritzbeton; Herstellung und Güteüberwachung
- [15] DIN 19453, Allgemeine Anforderungen an Rohrverbindungen für Abwasserkanäle und -leitungen
- [16] EN 206, Beton; Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis
- [17] DIN EN 196, Prüfverfahren für Zement
- [18] DIN EN 450, Ausgabe 1994, Flugasche für Beton; Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung
- [19] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau, September 1996
- [20] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie für Fließbeton, Herstellung, Verarbeitung und Prüfung, August 1995
- [21] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel, August 1995
- [22] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton, September 1989
- [23] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton, Juni 1996
- [24] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Zugabewasser für Beton, Fassung Januar 1982, redaktionell überarbeitet 1996
- [25] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons, Fassung August 1992, redaktionell überarbeitet 1996
- [26] Deutscher Beton-Verein: Merkblatt Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau, Fassung September 1992, redaktionell überarbeitet 1996
- [27] Deutscher Beton-Verein: Sachstandsbericht „Stahlbetoninnenschalen im U-Bahn-Bau“, Oktober 1994
- [28] Österreichischer Betonverein: Wasserundurchlässige Betonbauweise - Weiße Wannen, März 1999
- [29] Österreichischer Betonverein: Richtlinie Innenschalenbeton, März 1995
- [30] Österreichischer Betonverein: Richtlinie Spritzbeton, Oktober 1998

2. Literatur

- [40] Maidl, B.: Stahlfaserbeton, Berlin: Ernst und Sohn, 1991
- [41] Ruffert, G.: Spritzbeton, Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1991
- [42] Maidl, B.: Handbuch für Spritzbeton, Berlin: Ernst und Sohn, 1992
- [43] Philipp, G.: Schildvortrieb im Tunnel- und Stollenbau, Tunnelbau 1986, S. 309 bis 370 und 1987, S. 211 bis 274
- [44] Maidl, B.: Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb, Berlin: Ernst und Sohn, 1995
- [45] Baumann, T.: Tunnelauskleidungen mit Stahlbetontübbings. Bautechnik 69 (1992), Heft 1, S. 11 bis 20
- [46] Dahl, J., Nußbaum, G.: Neue Erkenntnisse zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Tübbings im Bereich der Koppelfugen. Tunnelbau 1997, S. 291 bis 319
- [47] Scherte, M.: Rohrvortrieb, Bd. 1 u. Bd. 2, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1988
- [48] Tirpitz, E.-R.: Zur Biegesteifigkeit von Tunnelröhren aus Stahlbetontübbings am Beispiel der 4. Röhre des Elbtunnels, Hamburg, 1. Dresdner Baustatik-Seminar, Dresden, 1997