

Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis „Unbewehrte Tunnelinnenschalen“ – Stand: 24. April 2007

Die vorliegenden Empfehlungen des DAUB sollen bei der Beantwortung der Frage helfen, unter welchen Bedingungen eine Tunnelinnenschale ohne Bewehrung ausgeführt werden kann. Im Einzelnen werden die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen unbewehrter Innenschalen dargestellt, Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise beschrieben und Hinweise zu Konstruktion, Betonrezeptur und Nachbehandlung sowie zur Bewertung und Behandlung von Rissen gegeben.

1 Vorbemerkungen

Die Innenschalen von Verkehrstunneln werden in Deutschland in der Regel in Stahlbeton ausgeführt. Bei fachgerechter Planung und sorgfältiger Ausführung führt diese Bauweise erfahrungsgemäß zu wartungsarmen und dauerhaften Bauwerken. Sie

bringt jedoch auch einige Nachteile und Risiken. Hier sind in erster Linie die höheren Kosten zu nennen, die aus der Bewehrung und aus der größeren Mindestdicke der Innenschale resultieren. Bei Abdichtung mit Kunststoffdichtungsbahn birgt der Bewehrungseinbau stets die Gefahr, die Kunststoffabdichtung zu beschädigen, was Undichtigkeiten des Bauwerks zur Folge hat. Des Weiteren können unzureichende Betondeckung oder Rissbildung zu Korrosion der Bewehrung führen und dadurch Betonabplatzungen verursachen.

Die Alternative zur Innenschale aus Stahlbeton ist die Innenschale aus unbewehrtem Beton. Die o. g. Kosten und Risiken entfallen hierbei. An-

Mitglieder des DAUB-Arbeitskreises „Unbewehrte Tunnelinnenschalen“:
Dr.-Ing. A. Städing (Leiter des AK),
Dr. G. Brem,
Dipl.-Ing. G. Denzer,
Dipl.-Ing. R. Harpf,
Prof. Dr.-Ing. D. Kirschke,
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. B. Maidl,
Dipl.-Ing. W. Schuck

Recommendations for Executing and Application of unreinforced Tunnel Inner Linings

German Committee for Underground Construction (DAUB) – Working Group for “Unreinforced Tunnel Inner Linings” – as of April 24th, 2007

These DAUB recommendations are intended to help in answering the question of under which circumstances a tunnel inner lining can be executed without reinforcement. The various possibilities of application and limits of unreinforced inner linings are presented, proof of sustainability and serviceability described and pointers for design, concrete mixes and curing provided along with the evaluation and treatment of cracks.

1 Preliminary Remark

The inner linings of transport tunnels in Germany are generally made of reinforced concrete. It has been demonstrated that given proper planning and careful execution this means of construction ensures permanent structures requiring little maintenance. However, there are certain disadvantages and risks involved. Firstly, there are the high costs resulting from the reinforcement and the major minimum thickness of the inner lining. When a plastic sealing membrane is used as waterproofing there is the danger that the membrane can be damaged when the reinforcement is installed, something which can lead to leaks in the structure. In addition, insuffi-

cient concrete covering or crack formation can lead to the reinforcement corroding so that concrete spalling is the outcome.

The alternative to the reinforced concrete inner lining is one made of unreinforced concrete. In this case, the above mentioned costs and risks are dispensed with. On the other

Members of the DAUB Working Group for “Unreinforced Tunnel Inner Linings”:
Dr.-Ing. A. Städing (Head of the WG),
Dr. G. Brem,
Dipl.-Ing. G. Denzer,
Dipl.-Ing. R. Harpf,
Prof. D. Kirschke,
Prof. B. Maidl,
Dipl.-Ing. W. Schuck

dererseits müssen die Randbedingungen aus Einwirkungen und Nutzung in der Art sein, dass eine Zugfestigkeit des Baustoffes nicht erforderlich ist und auch eine zu erwartende Rissbildung die Nutzung des Bauwerks nicht beeinträchtigt. Darüber hinaus kann unter Umständen eine ungünstige Rissbildung in unbewehrten Innenschalen die Betriebs- oder Verkehrssicherheit beeinträchtigen und daher zu erhöhtem Instandhaltungsaufwand führen.

Die vorliegenden Empfehlungen sollen bei der Beantwortung der Frage helfen, unter welchen Bedingungen eine Tunnelinnenschale ohne Bewehrung ausgeführt werden kann. Im Einzelnen werden die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen unbewehrter Innenschalen dargestellt, Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise beschrieben und Hinweise zu Konstruktion, Betonrezeptur und Nachbehandlung sowie zur Bewertung und Behandlung von Rissen gegeben.

2 Vorschriftenlage

Als Vorschriften und Regelwerke für Tunnel sind in erster Linie die ZTV-ING, Teil 5, Abschn. 1, für Straßentunnel und die Richtlinie 853 für Eisenbahntunnel zu nennen. Als untergeordnete, fachspezifische Vorschrift für die Bemessung der Betonschale ist der DIN-Fachbericht 102 zu beachten. Bei der Anwendung einzelner Bestimmungen dieser Regelwerke auf unbewehrte Innenschalen können Abweichungen erforderlich oder zweckmäßig sein, um das besondere Tragverhalten von Tunneln zu berücksichtigen.

Über die deutschen Regelwerke hinaus sei nachrichtlich auf die „Österreichische Richt-

linie Innenschalenbeton“, Ausgabe 5/2004 (Abschn. 4.1 und 5.6.1 und 5.6.2), verwiesen.

3 Einsatzbereiche und Grenzen unbewehrter Innenschalen

Die besonderen Eigenschaften unbewehrter Innenschalen, nämlich geringe Biegezugfestigkeit und Neigung zur Rissbildung, begrenzen ihre Einsatzmöglichkeiten. Im Wesentlichen sind die folgenden Randbedingungen bzw. Ausschlusskriterien für unbewehrte Schalen zu nennen:

- Eine Konstruktion aus wasserundurchlässigem Beton setzt eine Bewehrung voraus. Wenn unbewehrter Beton verwendet werden soll, muss als Abdichtung eine Kunststoffdichtungsbahn eingesetzt werden.

- Die sehr geringe Zugfestigkeit unbewehrten Betons kann bei Zwangsbeanspruchung sowie bei Verformung der Innenschale zu Rissen führen, die häufig durch die volle Schalendicke gehen. Die dadurch entstehenden Teilstücke eines Tunnelblockes sind nicht durch eine Bewehrung miteinander verbunden. Sie bleiben nur durch den Formschluss mit dem Gebirge und die damit einhergehende Stützung sowie durch gegenseitige Verzahnung in ihrer Position. Unbewehrte Innenschalen sind daher nur für Tunnelbauwerke geeignet, in denen Risse und die Zerlegung der Schale in Teilstücke keinen Nachteil für die Nutzung des Tunnels mit sich bringen.

- Durchgehende Längsrisse bilden Gelenke, an denen sich die Verformungen des Tunnels als Verdrehungen konzentrieren. Die Übertragung von Normalkräften in diesen Gelenken kann dabei örtlich zu großen Pressungen am Querschnittsrand und damit eventuell zu

hand, the general conditions pertaining to influences and utilization must be of such a nature that there is no need for tensile strength of the construction material and furthermore that any anticipated crack formation does not affect the structure. In addition, unfavourable crack formation can under certain circumstances impair the operational or traffic safety of unreinforced inner linings thus leading to an increased need for maintenance.

The recommendations presented here are intended to assist in responding to the question as to exactly when a tunnel inner lining can be executed without reinforcement. The various application possibilities and limits of unreinforced inner linings are presented individually, proof of sustainability and serviceability shown, and pointers for design, concrete mixes and curing provided along with the evaluation and treatment of cracks.

2 Regulations

First and foremost, the ZTV-ING, Part 5, Section 1 for Road Tunnels and Guideline 853 for Railway Tunnels are applied as regulations and codes of practice for tunnels. DIN Technical Report 102 must be taken into consideration as a subordinate, specific regulation for dimensioning the concrete lining. In applying individual regulations belonging to these codes of practice for unreinforced inner linings, deviations may be necessary or purposeful in order to take the specific bearing behaviour of tunnel linings into consideration.

In addition to the German codes of practice, the "Austrian Guideline on Inner Lining Concrete", Edition 05/2004 (Section 4.1 and 5.6.1 and 5.6.2) is referred to.

3 Fields of Application and Limits of unreinforced Concrete Linings

The special properties of unreinforced inner linings, namely low stiffness strength with an inclination towards crack formation, restrict their fields of application. By and large, the following general conditions or criteria for unreinforced linings have to be mentioned:

- A watertight concrete design calls for reinforcement. If unreinforced concrete is to be used a plastic sealing membrane has to be applied for waterproofing purposes.

- The extremely low tensile strength of unreinforced concrete can lead to cracks in the inner lining, which frequently extend over the complete lining thickness, in the event of constraints or deformation affecting the inner lining. The part-sections of a tunnel block thus formed are not connected with one another by means of a reinforcement. They merely remain in their position as a result of the bond adopted with the rock and the ensuing support from mutual interlocking. Unreinforced inner linings are as a consequence, only suitable for tunnels, in the case of which cracks and the division of the lining into part-sections do not bring about disadvantages for the use of the tunnel.

- Continuous longitudinal cracks form joints, at which tunnel deformations concentrate in the form of twists. The transference of normal forces into these joints can possibly lead to major local pressures at the perimeter of the cross-section and even in turn, to spalling. Even where minor spalling restricts serviceability or possibly leads to persons being placed in jeopardy, unreinforced inner linings are unsuitable. This applies in general to railway tunnels, es-

Abplatzungen führen. Wo selbst kleinere Abplatzungen die Nutzbarkeit einschränken oder sogar zur Gefährdung von Personen führen, sind unbewehrte Innenschalen nicht geeignet. Dies gilt allgemein für Eisenbahntunnel, insbesondere für Tunnel mit Hochgeschwindigkeitsverkehr.

■ Die Tragfähigkeit unbewehrter Innenschalen ist im Allgemeinen kleiner als diejenige bewehrter Schalen. Dies gilt besonders bei ausgeprägten Biegebeanspruchungen der Gewölbe, da durch das Aufreißen des unbewehrten Querschnittes hohe Randdruckspannungen auftreten können. Unbewehrte Innenschalen sind daher nur für Gebirgsbereiche geeignet, in denen mäßige und nicht nachdrängende Lasten zu erwarten sind.

■ Die Voraussetzung einer geringen Belastung ist z. B. offensichtlich bei Tunneln in festem Fels erfüllt, bei denen sich schon vor dem Einbau der Innenschale ein dauerhafter Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Dort dient die Innenschale in erster Linie zur Befestigung von Einbauten und als Abdichtungsträger. Nicht viel größer ist die Belastung, wenn es nach dem Einbau der Innenschale noch zu leichten Kriechverformungen und Umlagerungen im Gebirge kommt. Die daraus resultierende Beanspruchung der Innenschale hat eher den Charakter von Zwang und kann die Standsicherheit nicht infrage stellen.

■ Besonders ungünstig für unbewehrte Innenschalen sind hohe nachdrängende Lasten, z. B. aus dem Eigengewicht nicht tragfähigen Gebirges oder aus Wasserdruck, und die Einwirkungen aus stark druckhaftem Gebirge in tief liegenden Tunneln. Bei derartigen, oft verformungsunabhängigen und großen Lasten kann eine

örtliche Überschreitung der Betonfestigkeit einen fortschreitenden Bruchvorgang auslösen, der nicht mehr durch Selbststabilisierung (größere Verformung ruft verbesserte Bettung hervor) zum Stillstand kommt. In derartigen Fällen wären bei unbewehrten Innenschalen sehr große Querschnittsdicken erforderlich.

■ Vom Regelfall abweichende Tunnelblöcke wie beispielsweise Pannenbuchten und Verschneidungen mit Querstollen oder Nischen sind wegen ihrer statisch meistens ungünstigen Form grundsätzlich weniger gut für unbewehrte Innenschalen geeignet. Neben die statische Berechnung treten dabei als Entscheidungskriterium auch rein konstruktive Aspekte. Grundsätzlich ist auch die teilweise Bewehrung eines Blockes möglich.

■ Im Sinne der vorstehenden Darstellungen bieten sich unbewehrte Innenschalen vor allem für Regelblöcke von Straßentunneln an, wenn diese im festen Gebirge liegen oder die Belastung durch eine nicht zu große Tiefenlage begrenzt ist. Ansonsten sollte die Möglichkeit für den Entfall der Bewehrung aufgrund von statischen Berechnungen, Kostenvergleichen sowie Betrachtungen zur Bedeutung von Rissen in jedem Einzelfall sorgfältig geprüft werden.

4 Zu den Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen

4.1 Berechnungsgrundlagen

Grundlagen der Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind die im Abschnitt 2 genannten Regelwerke sowie die objektbezogenen Baugrundgutachten, tunnelbautechnischen Gutachten und Baubeschreibungen. Hieraus resultieren die Anfor-

derungen, die besonders für Tunneln, die speziell für hohe Geschwindigkeiten ausgelegt sind, gelten.

■ The bearing capacity of unreinforced inner linings is in general less than reinforced ones. This particularly applies to pronounced flexural strains caused by the vault, as high peripheral pressure stresses can occur as a result of the unreinforced cross-section being torn open. As a consequence, unreinforced inner linings are only suitable for zones of rock, in which moderate and non-recurring loads are to be expected.

■ The prerequisite for a low load is e.g. fulfilled by tunnels in solid rock, in which a lasting state of equilibrium has been established prior to the inner lining being installed. There the inner lining primarily serves to secure the installations and to bear the load. The load is not all that much greater should slight creeping deformations and redistributions in the rock occur after the inner lining is installed. The resultant load imposed on the inner lining has more the character of a constraint and does not affect the stability.

■ High recurrent loads, e.g. resulting from the intrinsic weight of non-bearing rock or from water pressure and the effects of strongly squeezing rock in deep-lying tunnels, are especially unfavourable for unreinforced inner linings. Given such loads, which are frequently not dependent on deformations and major loads, should the concrete strength be exceeded locally this can result in a progressive break process, which will not stabilise of its own accord (major deformation calls for improved bedding). In such cases extremely large cross-sectional thicknesses would be required for unreinforced inner linings.

■ Tunnel blocks, which deviate from the standard, such as breakdown bays and intersections with cross-passages or re-

cesses, are generally speaking less suited for unreinforced inner linings owing to their static form being mostly less favourable. In addition to the static analysis, pure constructional aspects have to be taken into account as criteria for reaching a decision. Basically speaking, the partial reinforcement of a block is possible as well.

■ As stated above, unreinforced inner linings are suitable first and foremost for standard blocks in road tunnels, providing these are located in solid rock or the load imposed is confined by dint of the fact that the tunnel is not built at too excessive a depth. Otherwise the possibility of dispensing with the reinforcement has to be examined in each individual case on the basis of static calculations, cost comparisons as well as contemplating the significance of cracks.

4 Stability and Serviceability Verification

4.1 Analytical Principles

The basic principles for stability and serviceability verification are the codes of practice contained in Chapter 2 as well as the subsurface reports relating to the project, tunnel construction technical appraisals and construction descriptions. The requirements posed on the stability investigations, the partial safeties on the side of both influences and resistances as well as the calculation parameters such as subsurface characteristic values, water levels etc. result from this. These calculation principles do not differ from those for reinforced tunnel inner linings. However, the special bearing behaviour – the low flexural stiffness – as described as follows, must be taken into account for calculating and dimensioning purposes.

derungen an die Standsicherheitsuntersuchungen, die Teilsicherheiten auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite sowie die Berechnungsparameter wie Baugrundkennwerte, Wasserstände usw. Diese Berechnungsgrundlagen unterscheiden sich nicht von denen für bewehrte Tunnelinnenschalen. Allerdings ist das besondere Tragverhalten – die geringe Biegesteifigkeit – wie nachfolgend beschrieben bei der Berechnung und Bemessung zu beachten.

4.2 Statisches System, Berechnungsverfahren

Das statische System für das unbewehrte Betongewölbe muss das besondere Materialverhalten der Schale erfassen. Für Stab- oder Schalenelemente des statischen Systems sind daher Stoffgesetze anzusetzen, welche die geringe Zugfestigkeit und die hohe Druckfestigkeit des Betons beschreiben. Die daraus resultierende Abhängigkeit der Biegesteifigkeit der Schale von der Risstiefe sollte durch das Berechnungsmodell in guter Näherung berücksichtigt werden.

Der sich für jede Lastfallkombination einstellende Gleichgewichtszustand sollte iterativ so ermittelt werden, dass etwa auftretende Risse sukzessive, der tatsächlich zu erwartenden Belastungsgeschichte entsprechend, entstehen.

Als Ergebnis sollten neben den Schnittgrößen und Verformungen auch Knickwinkel in den gerissenen Querschnitten angegeben werden, aus denen die zu erwartende Rissbreite ermittelt werden kann. Zur Abschätzung der sich langfristig einstellenden Rissbreiten wird empfohlen, auch Kriechinflüsse des Betons zu berücksichtigen.

Wegen des nicht linearen Tragverhaltens des gekoppelten Systems aus Tunnelchale

und umgebendem Gebirge sind das geometrisch-mechanische Modell und die Einwirkungen mit den charakteristischen Werten, d. h. ohne Teilsicherheiten, anzusetzen.

4.3 Einwirkungen

Die maßgebenden Einwirkungen auf die Tunnelchale sind Eigengewicht, Gebirgsdruck und Wasserdruck. Die Schnittgrößen aus diesen Einwirkungen erhalten gemäß DIN 1054 im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ1B) im Lastfall 1 die Teilsicherheit 1,35. Sofern darüber hinaus Einwirkungen mit anderen Teilsicherheiten zu berücksichtigen sind, sind mehrere Rechenläufe erforderlich, um den Schnittgrößenanteil einzelner Einwirkungen abzuschätzen. Eine genaue Beschreibung hierzu ist z. B. Ril 853, Modul 2001, Ausgabe Januar 2007, zu entnehmen.

Alternativ hierzu ist es auch möglich, stets vollständige Lastkombinationen der Einwirkungen anzusetzen und den Unterschied in den Teilsicherheitsbeiwerten durch entsprechende Erhöhung oder Verringerung dieser Einwirkungen bei der Schnittgrößenermittlung vorwegzunehmen. So ist z. B. die Temperatureinwirkung in den entsprechenden Lastfallkombinationen durch Multiplikation mit 1/1,35 zu berücksichtigen, sodass bei Ermittlung der Bemessungswerte der Schnittgrößen die Temperatureinwirkung letztlich die Teilsicherheit 1,0 erhält.

Gemäß ZTV-ING, Teil 5, Abschn. 1, Nr. 10.3.2, sind für Tunnelinnenschalen mit Gewölbequerschnitt keine zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen erforderlich, wenn die Anforderungen nach Nr. 7.2 eingehalten werden (Innenschalendicke ≥ 30 cm, Betondeckung 6 cm). Dies gilt ge-

4.2 Static System, Calculating Method

The static system for the unreinforced concrete vault must involve the special material behaviour of the lining. Consequently for rod or shell elements of the static system material laws have to be applied, which relate to the low tensile strength and the high compressive strength of the concrete. The resultant dependence of the lining's flexural stiffness on the crack depth should be taken into consideration by the calculation model as accurately as possible.

The state of equilibrium that results for every load case combination should be determined iteratively in such a manner that any cracks that might possibly occur do so successively in keeping with the load case that is actually expected.

Apart from the stress resultants and deformations in the cracked cross-sections, the kink angle, by means of which the expected crack width can be established, should also be provided. It is advisable to take the concrete's creep influences into consideration as well in order to determine the crack widths which are occurring in the long term.

Owing to the non-linear bearing behaviour of the coupled system consisting of tunnel lining and surrounding rock the geometrical-mechanical model and the influences have to be provided with the characteristic values, i.e. without partial safety factors.

4.3 Influences

The determining influences on the tunnel lining are intrinsic weight, rock pressure and water pressure. The stress resultants from these influences in keeping with DIN 1054 possess in ultimate state the bearing capacity (GZ1B) and the partial safety

1.35 in load case 1. Several computational runs are necessary in order to estimate the stress resultant percentage of individual influences should influences with other partial safety factors have to be taken into consideration over and above this. An exact description can be obtained e.g. from Guideline 853, Module 2001, Edition January 2007.

Alternatively it is also possible at all times to apply complete load combinations of the influences and to anticipate the difference in the partial safety coefficients by correspondingly increasing or decreasing these influences when determining the stress resultants. Thus e.g. the influence of temperature in the corresponding load case combinations is to be taken into account through multiplying by 1/1.35 so that the influence of temperature actually receives the partial safety 1.0 when determining the dimensioning values for the stress resultants.

In keeping with ZTV-ING, Part 5, Section 1, No. 10.3.2 no additional fire protection measures are necessary for tunnel inner linings with a vaulted cross-section providing that the requirements according to No. 7.2 are adhered to (inner lining thickness ≥ 30 cm, concrete covering 6 cm). This basically applies in accordance with Guideline 853, Module 1001, for railway tunnels as well. An unreinforced concrete vault also fulfils these requirements. As long as the application of unreinforced inner linings is restricted to tunnel sections without considerable water pressure and with only slight to moderate rock pressure, there is no need for a computational investigation of the unreinforced inner linings for the load case "fire".

4.4 Establishing the Stress Resultants and Deformations

Particularly those load case

mäß Richtlinie 853, Modul 1001, sinngemäß auch für Eisenbahntunnel. Ein unbewehrtes Betongewölbe erfüllt diese Anforderungen ebenfalls. Solange der Einsatz unbewehrter Innenschalen auf Tunnelstrecken ohne wesentlichen Wasserdruck und mit nur geringem bis mäßigem Gebirgsdruck begrenzt ist, kann auf eine rechnerische Untersuchung der unbewehrten Innenschalen für den Lastfall „Brand“ verzichtet werden.

4.4 Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen

Bei der Ermittlung der Schnittgrößen und Verformungen sind besonders die Lastfallkombinationen zu beachten, in denen sich kleine Ringdrücke in der Schale ergeben. Dies ist z. B. für die beiden Lastfallkombinationen „Eigengewicht der Schale und Temperatur Winter“ sowie „Eigengewicht der Schale, Temperatur Winter und aerodynamisch bedingte Druckänderungen durch Verkehr“ der Fall. Hierbei ergeben sich nämlich wegen der kleinen Ringdruckkräfte die größten Lastausmitteln und die größten Rissbreiten auf der Schaleninnenseite. Selbstverständlich sind auch die Lastfallkombinationen mit den größten Ringdruckkräften zu untersuchen.

Für den Tragfähigkeitsnachweis sind die charakteristischen Schnittgrößen mit dem Teilsicherheitsbeiwert für die Lasten zu multiplizieren.

Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis werden die charakteristischen Schnittgrößen bzw. – für die Temperatur – abgeminderte Schnittgrößen verwendet.

4.5 Tragfähigkeitsnachweise

Der Tragfähigkeitsnachweis der unbewehrten Innenschale ist für die gerissenen Querschnitte nach DIN-Fb 102 oder

DIN 1045 zu führen. Für den Nachweis der Ringdruckkraft darf dabei von einer gleichförmigen Spannungsverteilung am gedrückten Rand ausgegangen werden. Der Bemessungswiderstand N_{Rd} des gerissenen Querschnitts kann demnach wie folgt ermittelt werden:

$$N_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot (h - 2e)$$

mit:

f_{cd} = Bemessungswert der charakteristischen Betondruckfestigkeit

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \quad \text{mit: } \gamma_c = 1,8$$

b = Breite des Querschnitts

h = Höhe des Querschnitts

e = Exzentrizität von N_{Ed}

N_{Ed} = Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft

N_k = charakteristische Normalkraft,

$$\text{mit: } N_{Ed} = N_k \cdot \gamma$$

Für den Nachweis im Grenzzustand 1B muss erfüllt sein:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

Ein Querkraftnachweis ist in gebetteten Gewölben in der Regel nicht erforderlich, da sich durch die Gelenkbildung eine Stützlinie ausbildet, in welcher die Lasten nahezu ausschließlich über Gewölbedruck abgetragen werden. Sofern unter besonderen Bedingungen, z. B. bei Einleitung von Einzellasten in das Gewölbe, ein Nachweis der Querkrafttragfähigkeit geführt werden muss, gilt hierfür die DIN 1045-1 bzw. DIN-Fb 102, Kapitel V „Allgemeine Regeln für Tragwerke aus unbewehrtem Beton“.

Die Forderung im DIN-Fb 102, wonach der Betonquerschnitt höchstens bis zur Schwerachse aufreißen darf, gilt nicht für Tunnelgewölbe, da diese über den gesamten Umfang kontinuierlich gestützt sind. Aus diesem Grund und auch aus

combinations have to be considered, in which small ring pressures result in the lining, for determining the stress resultants and deformations. This applies e.g. for the 2 load case combinations “intrinsic weight of the lining, winter temperature and aerodynamically related pressure changes caused by traffic”. In this case, this results in the greatest load centring and the largest crack widths on the inner side of the lining on account of the small ring pressure forces. It goes without saying that the load case combinations with the greatest ring pressure forces also have to be investigated.

The characteristic stress resultants have to be multiplied by the partial safety coefficient

for the loads are order to establish proof of bearing capacity.

The characteristic stress resultants – or rather – for the temperature–diminished stress resultants have to apply for verifying the serviceability.

4.5 Proof of Bearing Capacity

The proof of bearing capacity for the unreinforced inner lining is to be supplied for the cracked cross-sections in accordance with DIN-Fb 102 or DIN 1045. In this connection, a uniform stress distribution on the edge subjected to pressure can be assumed for proving the ring pressure force. The dimensioning resistance N_{Rd} of the cracked cross-section can thus be determined as follows:

Geometriegründen (Dicke der Schale) kann ein Stabilitätsversagen ausgeschlossen werden.

4.6 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit besteht auch bei unbewehrten Innenschalen in der Abschätzung der zu erwartenden Rissbreiten. Ein Einfluss hierauf ist bei unbewehrtem Beton jedoch nur sehr begrenzt durch konstruktive Maßnahmen möglich, z. B. durch Verkürzung der Blocklänge. Die Gebrauchstauglichkeit ist gegeben, wenn die sich einstellenden Risse die Nutzung des Bauwerks nicht beeinträchtigen. Dies wird durch eine Bewertung und ggf. Behandlung der Risse sichergestellt (siehe Kap. 6).

5 Konstruktion, Betonrezeptur und Nachbehandlung

Blocklängen

Unbewehrte Innenschalen können mit den gleichen Blocklängen ausgeführt werden wie bewehrte. Sofern nicht geometrische Randbedingungen, z. B. aufgrund enger Radien, besondere Einschränkungen verlangen, betragen die maximalen Blocklängen für Straßentunnel 12 m (ZTV-ING, Teil 5) und für Eisenbahntunnel 12,50 m (RIL 853, Festlegungen für Bauwerke mit Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen).

Schalendicke

Die Mindestdicke der Innenschale beträgt für Straßentunnel und Eisenbahntunnel 30 cm. Die maximale Dicke der Schale aufgrund von Toleranzen des Abdichtungsträgers ist für Straßentunnel nach ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt Nr. 7.2.1, und für Eisenbahntunnel nach RIL 853, Modul 853.4004 be-

grenzt. Für kleinere Tunnelquerschnitte sind auch kleinere Schalendicken möglich.

Ausbildung von Blockfugen

Für Straßentunnel in geschlossener Bauweise sind Blockfugen in der Regel als Pressfugen mit trapezförmiger Sichtfuge auszubilden (ZTV-ING Teil 5 Abschn. 1 Nr. 7.2.4) und die Fugenflanken mit einem trennenden Anstrich zu versehen.

Für Eisenbahntunnel verlangt die RIL 853, dass Blockfugen so auszubilden sind, dass eventuelle Gebirgsbewegungen keine Schäden am Ausbau verursachen können. Blockfugen sind eben auszubilden. Pressfugen sind zugelassen, jedoch müssen Raumfugen angeordnet werden, wenn bauwerks- oder bauteilschädliche Versätze zu erwarten sind.

Die genannten Regeln gelten grundsätzlich auch für unbewehrte Tunnelinnenschalen. Allerdings ist zu beachten, dass in unbewehrten Schalen im Bereich der Blockfugen bei Scherbeanspruchungen parallel zur Fuge und bei Druckbeanspruchungen senkrecht zur Fugenfläche die Gefahr von Rissbildung und Abplatzungen im Fugenbereich größer ist als bei bewehrten Schalen. Es wird daher empfohlen, der Fugenausbildung bei unbewehrten Tunnelinnenschalen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. So sind Trennanstriche der Fugenflanken ausreichend dick auszuführen, um gegenseitige Bewegungen benachbarter Blöcke zu ermöglichen. Weiterhin sind die Stirnflächen eben und senkrecht zur Tunnelängsrichtung herzustellen und Verzahnungen zu vermeiden. Sofern Relativverschiebungen (Versätze) im Fugenbereich nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden können, sind Raumfugen mit

$$N_{rd} = f_{cd} \cdot b \cdot (h - 2e)$$

with:

f_{cd} = dimensioning value of the characteristic concrete compressive strength

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \quad \text{with: } \gamma_c = 1.8$$

b = width of the cross-section

h = height of the cross-section

e = eccentricity of N_{Ed}

N_{Ed} = dimensioning value of effective normal force

N_k = characteristic normal force,

$$\text{with: } N_{Ed} = N_k \cdot \gamma$$

The following has to be fulfilled for verification in limit state 1B:

$$N_{Ed} \leq N_{rd}$$

Verification of transverse force is generally speaking not required for embedded vaults as a supporting line is formed through hinge formation, in which the loads are almost exclusively diverted via vault pressure. Should proof of the transverse force bearing capacity be required under particular circumstances, e.g. when individual loads are transferred into the vault, then DIN 1045-1 or DIN-Fb 102, Chapter V "General Rules for Bearing Structures made of unreinforced Concrete" applies.

The demand in DIN-Fb 102 according to which the concrete cross-section may only crack up till the centre line, does not apply for tunnel vaults, as they are continuously supported over their entire circumference. As a consequence as well as for geometrical reasons stability failure can be precluded.

4.6 Serviceability Verification

Verification of serviceability is required for unreinforced inner linings with regard to estimating the expected crack

widths. However, in the case of unreinforced concrete constructional measures exert only a very limited influence, e.g. through shortening the block length. Serviceability is proven providing that the ensuing cracks do not impair the structure's utilisation. This is assured by evaluating and if necessary treating the cracks (please see Chapter 6).

5 Design, Concrete Mix and Curing Block Lengths

Unreinforced inner linings can be executed in the same block lengths as reinforced ones. Unless geometrical conditions e.g. on account of narrow radii call for special restrictions, the maximum block lengths for road tunnels amount to 12 m (ZTV-ING, Part 5) and 12.50 m for rail tunnels (RIL 853, Provisions for Structures with Seals made of Plastic Sealing Membranes).

Lining Thickness

The minimum thickness for the inner lining for road and rail tunnels amounts to 30 cm. The maximum thickness of the shell on account of tolerances for the seal carrier is restricted for road tunnels according to ZTV-ING, Part 5, Section 7.2.1 and for rail tunnels in keeping with RIL 853, Module 853.4004. Lesser lining thicknesses are possible for smaller cross-sections.

Execution of Block Joints

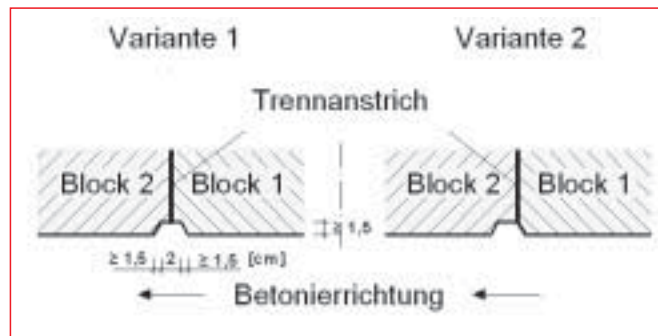
Generally speaking block joints are designed as contraction joints with a trapezoidal shaped exposed joint (ZTV-ING Part 5, Section 1 No. 7.2.4) and the joint flanks provided with a separating coating.

For rail tunnels the RIL 853 demands that block joints are formed in such a way that possible rock movements do not cause any damage to the sup-

Fugeneinlagen aus Baustoffen der Baustoffklasse A (nicht brennbar) nach DIN 4102 auszuführen. Die Fugeneinlagen müssen darüber hinaus feuchtigkeitsunempfindlich und formstabil sein. Für Tunneleingangsbereiche wird die Ausführung von Raumfugen empfohlen, da dort mit temperaturbedingten Druckbeanspruchungen in den Blockfugen zu rechnen ist. Die Sichtfuge im Gewölbe ist zweckmäßigerweise trapezförmig herzustellen (Bild 5.1).

Ausbildung von Details

Konsolen zur Auflagerung von Zwischendecken (z. B. bei Straßentunneln), Lasten aus Tunnelausstattungen, Querschnittsvergrößerungen (z. B. Pannenbuchten) und Verschnei-



Blockfuge als Pressfuge mit Trapezleiste

Block joint as grouted joint with trapezoidal strip

dungen zwischen Haupttunnel und Kavernen (Betriebszentrale) sind besonders zu untersuchen und verlangen in den meisten Fällen eine örtliche Bewehrung.

Betonrezeptur

Prinzipiell gelten für unbewehrte Innenschalen die glei-

porting structure. Block joints have to be level. Contraction joints are permitted but have to be provided with expansion joints if displacements are expected, which can damage the structure or parts of the structure.

The above-mentioned rules essentially apply for unrein-

forced tunnel inner linings as well. At the same time, it must be observed in the case of unreinforced shells that the danger of crack formation and spalling in the joint area is greater in the case of reinforced linings in the event of shear stresses parallel to the joint and given compressive stresses perpendicular to the joint area. It is thus advisable to take particular care in executing the joint for unreinforced tunnel linings. Separating coatings for the joint flanks have to be sufficiently thick to facilitate reciprocal movements of neighbouring blocks. In addition, the cross-sectional areas have to be produced in such a way that they are level and perpendicular to the tunnel's longitudinal direction and interlocking must

chen Anforderungen an die Betonzusammensetzung und die Verarbeitung des Betons wie für bewehrte Innenschalen. Allerdings brauchen die Expositionsklassen für Korrosionsgefahr nach DIN Fachbericht 100 nicht mehr beachtet zu werden. Zur Minimierung von Rissbildungen vor allem im Firstbereich und in den Ulmen über der Arbeitsfuge wird empfohlen, die Begrenzung der Maximaltemperatur aus dem Abbindevorgang und die daraus resultierenden Eigenspannungen, die auf den jungen Beton wirken, besonders zu beachten. Auf der anderen Seite besteht die Forderung nach einer kurzen Ausschalzeit, um einen täglichen Arbeitstakt für einen Tunnelblock zu erreichen. Insofern stellt die Auswahl geeigneter Betonrezepturen einen Optimierungsprozess im Rahmen der Eignungsprüfung dar, bei dem auch unterschiedliche Frischbetontemperaturen (Sommer/Winter) zu berücksichtigen sind. Zement-Flugasche-Kombinationen mit unterschiedlichen Anteilen je nach Jahreszeit haben sich dabei als vorteilhaft erwiesen. Die Zugabe von Steinkohlenflugasche reduziert die Hydratationswärmeentwicklung, verbessert die Verarbeitbarkeit, verringert die Gefahr des Entmischens und sorgt für ein dichteres Gefüge des Betons. Die Verwendung von Zusatzstoffen ist im DIN-Fachbericht 100 Abschnitt 5.2.5 festgelegt.

Firstspaltverpressung, Nachbehandlung

Hier gelten die gleichen Anforderungen wie bei bewehrten Innenschalen.

Abdichtung

Unbewehrte Innenschalen benötigen eine Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen. Be-

züglich der Abdichtung gelten die gleichen Kriterien wie bei bewehrten Innenschalen. Durch den Wegfall der Bewehrung entfällt auch eine Gefahrenquelle für eventuelle Beschädigungen der Abdichtung.

Scheinfuge in der Firste

Erfahrungen mit unbewehrten Tunnelinnenschalen zeigen, dass in der Firste sehr häufig ein unregelmäßig verlaufender Längsriss entsteht. Durch Einlegen einer Dreiecks- oder Trapezleiste auf dem Scheitel des Schalwagens kann ein gerader Rissverlauf erreicht werden. Dies bedeutet eine erhebliche Verbesserung der Kinematik und des Tragverhaltens des entstehenden Betongelenks. Zugleich wird der optische Eindruck verbessert.

6 Zur Bewertung und Behandlung von Rissen

In unbewehrten Innenschalen sind Risse nicht von vornherein als Mangel anzusehen, da keine Korrosionsgefahr besteht und die Schalen keine Abdichtungsaufgabe haben. Trotzdem sind Risse auch in unbewehrten Schalen zu bewerten. Dies kann nach folgenden Gesichtspunkten geschehen:

- Risse als optische, ästhetische Beeinträchtigung
- Beeinträchtigung der Haltbarkeit und des Aussehens von Beschichtungen und Anstrichen
- Gefährdung der Abdichtung durch Abplatzungen und scharfe Risskanten am bergseitigen Ende von Längsrissen
- Gefahr des Herausfallens von Betonstücken, die durch Längs- und Radialrisse von der übrigen Innenschale abgetrennt sind

be avoided. Should relative displacements (misalignments) in the joint area not be precluded with any degree of certainty then expansion joints with joint fillers made of materials from construction material class A (non-combustible) according to DIN 4102 should be executed. The joint fillers must in addition be unaffected by moisture and possess a stable form. Expansion joints are recommended for tunnel access zones as temperature-related compressive stresses can be reckoned with there. The exposed joint in the vault should be produced with a trapezoidal form (Fig. 5.1).

Execution of Details

Brackets for supporting intermediate ceilings (e.g. in the case of road tunnels), loads resulting from tunnel furnishings, cross-sectional enlargements (e.g. breakdown bays) and intersections between the main tunnel and caverns (control centre) should be investigated thoroughly and in most cases require local reinforcement.

Concrete Mix

Generally speaking the same requirements apply for the concrete composition and the processing of the concrete for unreinforced inner linings as for reinforced ones. At the same time, the concrete exposure classes relating to the danger of corrosion in keeping with DIN Report 100 no longer have to be observed. In order to minimise crack formation above all in the roof area and in the walls above the working joint, it is recommended to observe in particular, restriction of the maximum temperature derived from the setting process and the resultant internal stresses acting on the young concrete. On the other hand, a short stripping period is essential in order to arrive at a daily working cycle for a tunnel

block. Consequently, the choice of suitable concrete mixes represents an optimisation process within the scope of the suitability test, in the case of which various fresh concrete temperatures (summer/winter) also have to be taken into consideration. Cement/fly ash combinations with different proportions depending on the season have turned out to be advantageous in this respect. The addition of hard coal fly ash reduces the hydration heat effect, improves processability, diminishes the danger of demixing and caters for a denser concrete texture. The use of additives is laid down in DIN Report 100 Section 5.2.5.

Grouting the Roof Joint, Curing

The same demands apply here as in the case of reinforced inner linings.

Sealing

Unreinforced inner linings require a seal consisting of plastic sealing membranes. The same criteria apply to the seal as for reinforced inner linings. As no reinforcement is required a potential source of danger for damaging the seal is eliminated.

Dummy Joint in the Roof

Experiences with unreinforced tunnel inner linings reveal that frequently an irregularly running longitudinal crack is produced in the roof. A straight course for this crack can be arrived at by inserting a triangular or trapezoidal fillet at the apex of the formwork carriage. This signifies a considerable improvement in terms of the kinematics and the bearing behaviour of the concrete hinge that is produced. At the same time, the optical effect is improved.

6 Assessing and Treating Cracks

Cracks in unreinforced inner linings do not represent flaws

■ Gefährdung von Personen und Fahrzeugen durch Abplatzungen am luftseitigen Ende von Längsrissen, die sich zur Bergseite hin keilförmig öffnen

■ Gefährdung der Standsicherheit durch Überbeanspruchung des Betons bei Verdrehungen an Längsfugen.

Risse in unbewehrtem Beton sind z. T. systembedingt und können auch mit größerem Aufwand für die Betonrezeptur, für das Betonieren und für die Nachbehandlung nicht mit Sicherheit vermieden werden. Dies ist bei der Entscheidung für eine unbewehrte Innenschale bekannt und wird in Kauf genommen. Von daher wäre es unangemessen, vom Bauunternehmer eine generelle Rissebehandlung als Nachbesserung zu verlangen.

Risse sollten grundsätzlich behandelt werden, wenn dies für die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Tunnels sowie für die Ausführung nachfolgender Gewerke erforderlich ist. Die Kriterien hierfür sind vielfältig und lassen sich gesamtheitlich nicht im Voraus festlegen. In jedem Fall müssen alle Risse verpresst werden, die allein oder im Zusammenwirken mit anderen Rissen oder Begrenzungsflächen das Herausfallen von Bruchkörpern aus der Innenschale verursachen können. Ebenso sollten auch Risse mit Rissuferversätzen über 0,5 mm grundsätzlich behandelt werden.

Das Verpressen von sonstigen, statisch nicht relevanten Rissen liegt im Ermessen des Bauherren und ist möglichst im Voraus im Bauvertrag zu re-

from the very outset as there is no danger of corrosion and these linings have no sealing function to fulfil. Nonetheless, cracks in unreinforced linings have to be assessed as well. This can be undertaken in accordance with the following aspects:

■ Cracks as optical, aesthetic drawback

■ Impairing the durability and the appearance of coatings and layers

■ Endangering the seal through spalling and jagged crack edges at the uphill end of longitudinal cracks

■ Danger of pieces of concrete, which are separated from the remainder of the inner lining by longitudinal and radial cracks, falling down

■ Endangering persons and vehicles as a result of spalling at

the exposed end of longitudinal cracks, which open up in the shape of a wedge towards the uphill side

■ Endangering stability as a result of the concrete being overstrained owing to torsion in the longitudinal joints.

Cracks in unreinforced concrete are in some cases, caused by the system and cannot be avoided with any degree of certainty even when a great deal of care and attention is devoted to the concrete mix, placing and curing. This is known when the decision in favour of an unreinforced inner lining is made and is accepted. As a result, it would not be appropriate for the building contractor to demand general treatment of the cracks as a subsequent improvement.

Cracks should essentially be dealt with should this be neces-


geln. Als Empfehlung kann z. B. die Regelung in der DB-Richtlinie 853, Modul 4004, [2] übernommen werden, wonach linienförmige (nicht verzweigte) Radialrisse mit Rissbreiten >2 mm sowie linienförmige (nicht verzweigte) Firstlängsrisse, unregelmäßige Risse und Ulmenlängsrisse mit Breiten $>1,5$ mm zu verpressen sind. In diesem Sinne sollten im Bauvertrag für alle erfahrungsgemäß vorkommenden Fälle Vereinbarungen getroffen werden. Hierbei sollten auch die Abmessungen des Tragwerks und die Nutzung des Tunnels berücksichtigt werden.

Es wird empfohlen, für die Beseitigung systembedingter Risse Leistungspositionen vorzusehen, die bei Bedarf herangezogen werden. Der Bauherr sollte bei der Festlegung des erforderlichen Umfangs der Behandlung einen einschlägigen Fachmann zu Rate ziehen.

Neben systembedingten Rissen treten gelegentlich auch Risse auf, die auf Ausführungsfehlern beruhen und für deren Beseitigung daher der Auftragnehmer aufkommen muss. Für diese Risse können andere Kriterien und Regelungen zwischen den Vertragsparteien festgelegt werden als für systembedingte Risse. Ein Beispiel hierfür sind sichelförmige Risse an den Blockfugen, wie sie bei Überbeanspruchung durch Schalwagenkräfte entstehen können und die immer behandelt werden müssen. Auch Risse infolge falscher Nachbehandlung fallen in diese Kategorie.

So weit möglich, ist die Behandlung von Rissen zu einem Zeitpunkt durchzuführen, zu dem keine größeren Veränderungen des Rissbildes mehr zu erwarten sind. Hierzu wird empfohlen, die Veränderung der Risslänge und -weite zumindest einiger charakteristischer Risse systematisch zu

messen und zu dokumentieren. Diese Dokumentation dient zugleich der Beurteilung der Rissentstehung und -entwicklung, der Wahl des richtigen Zeitpunkts und der Bewertung des Erfolges der Behandlung.

Die Methoden der Rissebehandlung entsprechen den üblichen Verfahren, wie sie etwa in der ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 5, geregelt sind. Bei der Wahl der Materialien muss nicht auf die Aspekte des Korrosionsschutzes und der Wasserdichtigkeit geachtet werden. Im Vordergrund steht der Kraftschluss. Dementsprechend kommen bevorzugt Harze zur Anwendung, die eine hohe Festigkeit und Steifigkeit entwickeln. 

Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Stand 1.2003.
 [2] Deutsche Bahn Netz AG: Richtlinie 853, Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten. Ausgabe Januar 2007.
 [3] Hintzen, W.; Grube, H.: Verminderung der Rissbildung in Tunnelinnenschalen aus Ortbeton. Bauingenieur 75 (2000) 3, S. 123–130.
 [4] Ingenieurgesellschaft Maidl, B.; Maidl, R.; Springenschmid, R.: Betoninnenschalen für Tunnel an den Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn, Beurteilung und Behandlung von Rissen. September 1991. unveröffentlichter Forschungsbericht.
 [5] Maak, H.; Maidl, B.; Springenschmid, R.: Innenschalen im Felstunnelbau. Beton- und Stahlbetonbau. Heft 11, November 1987.
 [6] Maidl, B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus. Band I: Konstruktionen und Verfahren. Zweite, überarbeitete und ergänzte Auflage. Verlag Glück auf GmbH, Essen, 1994.
 [7] Pöttler, R.: Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standesicherheit und Verformung im Rissbereich. Beton- und Stahlbetonbau 88 (1993), Heft 6, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.
 [8] Richtlinie RVS 9.34 „Innenschalenbeton“. Neue Richtlinien der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Mai 2004.
 [9] Springenschmid, R.: Anforderungen an den Beton für Tunnelinnenschalen, nach einem Vortrag auf der Fachtagung „Aufgaben der beton-technologischen Forschung bei Großbauvorhaben“. Baustoffinstitut TU München, 1984.

sary for the tunnel's stability as well as for the execution of subsequent operations. There are manifold criteria for this, which cannot by and large, be established in advance. At any rate, all cracks have to be grouted, which could result in broken sections falling out of the inner lining either on their own or in conjunction with other cracks or adjacent zones. In addition, cracks with misalignments in excess of 0.5 mm should essentially be treated.

It is up to the client to decide on grouting other, statically non-relevant cracks and this should if possible be laid down in the construction contract. It is for instance, advisable to adopt the regulation contained in DB Guideline 853, Module 4004 [2], according to which linearly formed (non-complex) radial cracks with widths of >2 mm as well as linearly formed (non-complex) longitudinal cracks in the roof, irregular cracks and longitudinal cracks in the walls with widths of >1.5 mm should be grouted. Towards this end, agreements for all contingencies that can possibly occur should be included in the construction contract. In this connection, the dimensions of the bearing structure and the use of the tunnel should be taken into account.

It is advisable to provide item numbers, which can be referred to if necessary for remedying system-related cracks. The client should call on the services of an acknowledged expert for determining the necessary extent of the treatment.

Apart from system-related cracks, other cracks can occur, which are caused by errors in execution and it is the contractor's responsibility to rectify these. Different criteria and regulations between the contractual partners can be established for cracks of this kind than those applying for system-related

cracks. Sickle-shaped cracks on the block joints that can be caused by excessive stress through formwork carriage forces and which must always be treated represent one example of such. Cracks caused by faulty curing fall into this category.

As far as possible the treatment of cracks should be executed at a point-in-time when no further major changes in the crack pattern are expected. In this connection, it is recommended to systematically measure and document changes in the crack length and width at least for a number of characteristic cracks. This documentation at the same time helps appraise the creation and development of cracks, the choice of the proper point-in-time and the evaluation of how successful treatment actually was.

The methods for crack treatment correspond with the standard procedures as for instance, are to be found in ZTV-ING, Part 3, Section 5. There is no need to observe aspects of corrosion protection or watertightness when choosing the materials. The key here is frictional connection. As a result, resins are accorded preference, which develop high strength and stiffness. 