

# Spannbetonbrücken, von 1935 bis heute

## Anforderungen an die Brückenprüfung

Dipl.Ing. Michael BUSCHLINGER

BBV Systems GmbH, Industriestraße 98, 67240 Bobenheim-Roxheim

**Kurzfassung.** Nach mehr als 5 Jahrzehnten Massivbrücken und Spannbeton im konstruktiven Ingenieurbau erscheint ein Rückblick angebracht. Dabei sieht man, dass in dieser Zeit große Veränderungen stattgefunden haben. Die auf dem anfänglichen Erkenntnisstand basierenden Lastannahmen, Berechnungs- und Bemessungsverfahren sowie Bauweisen entsprechen teilweise nicht mehr den heutigen Anforderungen. Insgesamt haben sich die Spannbetonbrücken hinsichtlich Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bewährt. Bei fachgerechter Anwendung hat die Bauweise heute einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht.

### Entwicklung des Spannbetonbrückenbaus

Fast 70 % (Brückenfläche, Stand 2004) unserer Brückenbauwerke an Bundesfernstraßen sind als Spannbetonkonstruktionen errichtet. Durch die Kreativität der beteiligten Ingenieure entstand ab Anfang der 1930er Jahre eine im Bereich der Bautechnik beispiellose Erfolgsgeschichte. Aufgrund seiner technischen und wirtschaftlichen Vorteile konnte sich der Spannbetonbrückenbau in Deutschland bereits in der Wiederaufbauphase nach dem 2. Weltkrieg rasch durchsetzen.

1936: Erste Spannbetonbrücke in Aue, Sachsen

1938: Erste Spannbetonbrücke mit Spanngliedern im Verbund bei Oelde, Westfalen

1952: Erste Spannbetonbrücke über den Rhein bei Worms, Rheinland-Pfalz

1964: Taktschiebeverfahren, Brücke über den Rio Caroni, Venezuela

Wie bei allen Entwicklungsprozessen war auch in den Anfängen des Spannbetonbaus eine Erfahrungssammlung zur schrittweisen Weiterentwicklung und Verbesserung der Bauweise notwendig. Durch gezielte Ursachenforschung, regelmäßige Bauwerksprüfungen und die gleichzeitige Anpassung der technischen Regelwerke an die Erfahrungen konnten die erkannten Schwachstellen weitgehend ausgeräumt werden. Die Entwicklung des Spannbetonbrückenbaus verlief zeitgleich mit der Entwicklung der Normen des Spannbetonbaus.

### Konstruktions- und Bemessungsgrundsätze

1951 wurde erstmals ein Entwurf für „Richtlinien für die Bemessung und Ausführung von Spannbetonbauteilen“ veröffentlicht.

1953 wurde daraus die Norm „Spannbeton; Richtlinien für die Bemessung und Ausführung - DIN 4227“. Die Bezeichnung Richtlinie wurde zunächst beibehalten weil die Bauweise sich noch in der Entwicklung befand. 1955 wurde sie dann als Norm bauaufsichtlich eingeführt.

Die auf Grundlage der seinerzeit gültigen Normen entstandenen älteren Spannbetonbrücken im heutigen Bestand weisen folgende konstruktiven und bemessungstechnischen Besonderheiten auf:

- Unter Gebrauchslasten wurde planmäßig von „rissefreiem“ Spannbeton ausgegangen,
- Zwangsschnittgrößen / Eigenspannungen wurden nicht ausreichend berücksichtigt,
- ein linearer Temperaturunterschied  $\Delta T_M$  wurde in der Berechnung nicht angesetzt,
- Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite / Schwingbreite war nicht vorgegeben.

Als Folge wurde im Vergleich zu den heutigen Regelwerken in älteren Spannbetonbrücken zu geringe Spannstahl- und Betonstahlbewehrung eingebaut. Im Ergebnis waren bei den Bauwerken der 60er und 70er Jahre nicht selten ausgeprägte Rissbildungen im Beton mit unzulässig breiten Einzelrissen anzutreffen. Der heute als zulässig angesehene Grenzwert der Rissbreite von 0,2 mm wurde dabei teilweise deutlich überschritten. Die Risse bedürfen hinsichtlich Korrosions- und Ermüdungsgefahr für den Betonstahl und den Spannstahl einer besonderen Bewertung. In diesem Zusammenhang wären als weitere Schwachstellen zu nennen:

- zu geringe Betondeckung,
- Nester und Fehlstellen im Beton,
- freiliegende Bewehrung und freiliegende Hüllrohre,
- unzureichend verpresste Spannglieder,
- Teilweise gänzlich fehlende Abdichtung,
- Durchfeuchtungen
- Einsatz von Streusalzen ab Anfang der 1960er Jahre

Ein spezielles Problem kann die **Schubtragfähigkeit** von Spannbetonbrücken darstellen, deren Planung und Ausführung auf der Grundlage von DIN 4227 (1953) erfolgte.

Es wurde versäumt in der DIN eine Mindestschubbewehrung einzuführen oder die Aufnahme der schiefen Hauptzugspannung durch Schubbewehrung auch bei geringen schiefen Hauptzugspannungen zu verlangen. Dies führte in der Praxis dazu, dass die Stege so dick gemacht wurden, dass die schiefen Hauptzugspannungen im rechnerischen Bruchzustand, unter der Nachweisgrenze blieben und dann viel zu schwache Schubbewehrungen angeordnet wurden.

Diese Gefahr eines Sicherheitsdefizites wurde jedoch seinerzeit erkannt und durch die 1966 herausgegebenen „Zusätzlichen Bestimmungen zu DIN 4227 für Brücken aus Spannbeton“ behoben. In dieser Fortschreibung der Norm wurden vor allem die zulässigen Betonzugspannungen begrenzt und erstmals eine Mindestbewehrung für bestimmte Bauteile gefordert. Der Nachweis der Schubbewehrung war nun grundsätzlich zu führen.

Im Jahr 1977 kam es zum Schadensfall an der Hochstraße Prinzenallee in Düsseldorf, bei dem es zum Ermüdungsbruch einiger Spannstähle in der **Koppelfuge** gekommen war. Die Ermüdungsfestigkeit der Spanngliedkopplungen ist deutlich geringer als die auf der freien Spanngliedlänge. Von Rissbildungen betroffen sind insbesondere Hohlkastenbrücken, während sich Plattenbalkenbrücken günstiger verhalten. Die Ursachen der Rissbildung waren:

- Unvollständige Lastannahmen in der statischen Berechnung ( $\Delta T_M$  wurde nicht berücksichtigt).
- Die verminderte Betonzugfestigkeit in der Arbeitsfuge.
- Es wurde zu wenig Betonstahlbewehrung eingebaut, anfangs noch glatter Stahl I.
- Häufig wurden an den Koppelfugen die Spannglieder zu 100 % gestoßen.

Deshalb wurden Sofortmaßnahmen in Form von Änderungsbescheiden für die Spannverfahrenzulassungen ergriffen. Es musste der Nachweis der Dauerschwingfestigkeit

für die Spanngliedkopplungen unter Ansatz eines linearen Temperaturunterschiedes ( $\Delta T_M$  zunächst nur in der Koppelfuge) geführt werden. Die erhöhten Spannkraftverluste infolge Kriechens und Schwindens des Betons im Bereich der Spanngliedkopplungen waren ebenfalls zu berücksichtigen. Die Mindestlängsbewehrung in den Koppelfugen wurde deutlich erhöht.

Neuere Brücken sind daher von dieser Problematik nicht mehr betroffen. Ältere Brücken wurden gemäß der 1998 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen eingeführten Handlungsanweisung zur „Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonbrücken“ nachgerechnet und falls erforderlich verstärkt.

1980 wurden die vom Bundesverkehrsministerium erarbeiteten „Zusätzlichen Technischen Vorschriften für Kunstbauten (ZTV-K 80)“ als Ergänzung der Normen verbindlich für den Bereich der Bundesfernstraßen eingeführt.

1988 erschien die Spannbetonnorm DIN 4227, Teil 1 in einer weiteren Neuausgabe. Eine wesentliche Ergänzung bestand in einer sehr pauschalen und recht hohen Anhebung der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten. Als Ersatz wurde mit dem ARS Nr. 10/1990 „Ergänzende Bestimmungen für die Anwendung der DIN 4227, Teil 1“ ein genauerer Nachweis vorgegeben. 1995 wurde dieser Nachweis in die Änderung A1 zu DIN 4227, Teil 1 in etwas modifizierter Form übernommen.

Die Problematik der Spannstähle mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber **Spannungsrissskorrosion (SpRK)** kam in den 1990er Jahren durch einige Schadensfälle zutage. Unter Spannungsrissskorrosion versteht man die Rissbildung und Rissausbreitung unter bestimmten Korrosionsmedien bei gleichzeitiger Zugbeanspruchung. Bei den hochfesten Stählen ist die SpRK in der Regel wasserstoffinduziert. Geringe Feuchtigkeitsmengen auf der Stahloberfläche (vor dem Verpressen) reichen aus um den für die Rissausbreitung erforderlichen Wasserstoff zu bilden. Wie Untersuchungen zeigten, ist eine weitere Rissausbreitung der Anrisse auch im vollständig verpressten Hüllrohr noch nach Jahren möglich. Schadensfälle sind nur mit vergütetem Spannstahl St 145/160 bekannt. Zusammengefasst sind Bauwerke näher zu untersuchen die mit folgenden Spannstählen ausgeführt wurden:

- Produktion bis 1965:  
Neptun Stahl, Querschnitt: rund, oval, rechteckig  
Sigma Stahl, Querschnitt: rund, oval, rechteckig  
Nicht zu betrachten sind St 125/140 vergütet, St 135/150 vergütet und kalt gezogene oder warm gewalzte Stähle.
- Produktion ab 1965 bis 1978:  
Vergütete Stähle St 145/160 mit ovalem Querschnitt (Sigma oval), nicht zu betrachten sind runde Stähle St 145/160 vergütet und kalt gezogene oder warm gewalzte Stähle.
- Ein Sonderfall im Bereich der ehemaligen DDR ist der Henningsdorfer Spannstahl, St. 140/160 vergütet, der bis 1982 produziert wurde.

Für die Identifizierung von Spannstählen mit sehr hoher Empfindlichkeit gegenüber SpRK wurden 1978 die Prüf- und Überwachungsvorschriften für die Herstellung von Spannstählen geändert bzw. erweitert. Damit war sichergestellt, dass diese Spannstähle von der weiteren Verwendung ausgeschlossen waren.

1993 wurden vom Bundesverkehrsministerium „Empfehlungen für Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken mit vergüteten Spannstählen St 145/160 (Ankündigungsverhalten)“ herausgegeben.

Nach der Änderung A1 zur DIN 4227 Teil 1 von 1995 ist bei Spannbetonbrücken zusätzlich als weitere Vorkehrung eine Mindestbewehrung (Robustheitsbewehrung) anzuordnen, um bei einem etwaigen Ausfall von Spanngliedern durch Spannungsrissskorrosion das Ankündigungsverhalten durch Rissbildung sicherzustellen. Durch diese Robustheitsbewehrung soll bei den neueren Bauwerken ein plötzliches Spröbruchversagen des Querschnitts beim Erstriss ohne Vorankündigung ausgeschlossen werden.

Die vollzogenen Fortschreibungen der technischen Regelwerke sind eine erhebliche Verbesserung der Grundsätze für die Bemessung und Konstruktion von Spannbetonbrücken. Auch die Erhöhung der Robustheit gegen unplanmäßige und rechnerisch schwer erfassbare Einwirkungen gewährleisten eine bessere Dauerhaftigkeit der Bauwerke.

Die **Veränderungen auf der Einwirkungsseite** haben in einem so gewaltigen Ausmaß zugenommen, wie es seinerzeit nicht vorhersehbar waren. Das zulässige Gesamtgewicht nach der Straßenverkehrsordnung ist innerhalb von fünfzig Jahren von 22,5 Tonnen (1950) auf 44 Tonnen (2000) erhöht worden. Von Seiten der Güter- und Transportunternehmer wird seit längerem der Einsatz von Gigalinern mit 60 Tonnen Gesamtgewicht propagiert. Die in den Bestandsbauwerken ursprünglich enthaltenen Tragfähigkeitsreserven sind durch diese Entwicklung zu großen Teilen aufgebraucht worden.

In den 90er Jahren begannen die Vorarbeiten an der europäischen Harmonisierung aller Berechnungs- und Bemessungsvorschriften der EU- Mitgliedsländer. Die erarbeiteten Eurocodes sind weitestgehend fertiggestellt und werden mit entsprechenden nationalen Anpassungen und Anhängen einheitliche Grundlage für Spannbetonbrücken in Europa sein. 2003 wurde vom Bundesverkehrsministerium mit Einführung der DIN-Fachberichte die Umstellung auf den aktuellen europäischen Stand der Technik vollzogen.

## **Neuere Entwicklungen**

1998 wurde vom Bundesverkehrsministerium für neu zu bauende Hohlkastenbrücken die „Richtlinie für Betonbrücken mit externen Spanngliedern“ eingeführt. Im Hinblick auf die Vorteile bei der Bauwerksprüfung und Bauwerkserhaltung wurde die Bauweise mit externen Spanngliedern als Regelbauweise eingeführt. Anlass waren Erfahrungen und die Erkenntnis, dass eine durchgängige Prüfung der einbetonierten Spannglieder mit Verbund nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist. Ein Austausch dieser Spannglieder ist überhaupt nicht möglich. In der Bauweise werden folgende Vorteile gesehen:

- die externen Spannglieder sind kontrollierbar, nachspannbar und gegebenenfalls austauschbar,
- durch den Wegfall von einbetonierten Spanngliedern in den Stegen von Hohlkastenbrücken entsteht eine bessere Betonierqualität,
- bei Verwendung ausschließlich externer Spannglieder kann der Vorspanngrad abgesenkt und der Anteil an Betonstahl vergrößert werden, wodurch robuste Hohlkastenträger entstehen,
- Maßnahmen zur späteren Verstärkung und Instandsetzung sind möglich.

Für die Quervorspannung von Fahrbahnplatten wurden verbundlose, austauschbare Spannglieder in dauerhaft dichten Kunststoffröhren (Monolitzen) vorgeschrieben.

Daneben wurden einige Pilotprojekte mit Hochleistungsbeton ausgeführt, der gegenüber normal-festem Beton auch eine höhere Dauerhaftigkeit aufweist.

An Stelle von internen Spanngliedern mit Verbund werden neuartige interne Spannglieder ohne Verbund eingesetzt, die kontrollierbar, austauschbar und nachspannbar sein müssen.

## **Brückenüberwachung und Brückenprüfung**

Angesichts der zahlreichen nun in die Jahre gekommenen Brücken wird der Unterhaltsaufwand steigen. Hierzu gehören die großen Spannbetonbrücken der 60er und 70er Jahre, die mit den, auf dem damaligen Erkenntnisstand basierenden Lastannahmen, Berechnungs- und Bemessungsverfahren sowie Bauweisen teilweise nicht mehr den heutigen Anforderungen in allen Punkten entsprechen. Für heutige Bauwerksprüfungen ist es ein unabdingbares Muss, dass man diese Schwachstellen kennt und ein besonderes Augenmerk darauf richtet.

Schadenskosten nehmen in der zeitlichen Abfolge nicht linear, sondern überproportional zu. Technik und Technologie in der Diagnose und Früherkennung von Schäden – im Maschinenbau und in der Medizin Alltag – finden in der modernen Brückenprüfung noch zu wenig Beachtung. Eine regelmäßige und fachkundige Überwachung und Prüfung leistet einen Beitrag zur Sicherheit und Erhaltung der Bauwerke. Die aktuelle Schadensentwicklung und das frühzeitige Erkennen und Beurteilen der Schäden ist für die Gewährleistung der Sicherheit und Dauerhaftigkeit älterer Spannbetonbrücken sehr wichtig. Wesentliche Voraussetzungen dafür sind:

- Regelmäßige und gründliche Prüfungen der Bauwerke nach DIN 1076 mit erfahrenerm und geschultem Personal,
- differenzierte Betrachtung des Bauwerkbestands im Hinblick auf Weiterentwicklung und Fortschreibung der technischen Regelwerke (Lastannahmen, Berechnungs- und Bemessungsverfahren, Bauweisen),
- Überprüfung und Sicherstellung der im Entwurf festgelegten Nutzung der Bauwerke (insbesondere im Hinblick auf die Verkehrslasten und den Schwerlastverkehr),
- leistungsfähige, möglichst zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden und Technologien,
- zeitnahe Beseitigung der festgestellten Schäden und Schwachstellen,
- ausreichende Erhaltungsmittel zur Durchführung dieser Maßnahmen,
- leistungsfähige und wirtschaftliche Instandsetzungsverfahren.

## **Zusammenfassung**

Spannbetonbrücken haben sich als Anwendung einer genialen Erfindung bewährt. Auch im Laufe der Jahre zutage getretene Schwachstellen ändern nichts an dieser Feststellung. Wie die Erfahrung immer wieder gelehrt hat, ist jede neue technische Entwicklung in ihrer Anfangsphase mit gewissen Risiken und einer Erfahrungssammlung verbunden. Bei den Spannbetonbrücken wurden in den Anfängen auf Grund fehlender Erfahrungen mit der neuen Bauweise technische Unzulänglichkeiten eingebaut. Diese zeigten sich oft erst nach vielen Jahren in Form von Schäden an den Bauwerken.

Manche dieser Unzulänglichkeiten ergaben sich erst im Laufe der Zeit durch sich ändernde Nutzungsbedingungen. Die starke Verkehrszunahme, besonders des schweren Güterverkehrs, das seit Mitte der 60er Jahre eingesetzte Tausalz sowie stärkere Umwelteinwirkungen waren für die Erbauer der früheren Spannbetonbrücken nicht vorhersehbare Einflüsse, gegen die demzufolge auch keine gezielten konstruktiven Vorkehrungen getroffen werden konnten.

Durch Anpassung der technischen Regelwerke an die Erfahrungen aus der Praxis treten die an älteren Spannbetonbrücken festgestellten konstruktions- und bemessungsbedingten Schwachstellen bei jüngeren Bauwerken nicht mehr auf. Seit Ende der 1970er Jahre sind die Ursachen, welche in erster Linie zu Dauerhaftigkeitsschäden geführt haben, bekannt. Mängel und Schäden an bereits bestehenden Bauwerken können und müssen mit Hilfe der zur Verfügung stehenden leistungsfähigen Instandsetzungsverfahren beseitigt werden.

Insgesamt haben sich die Spannbetonbrücken im Hinblick auf Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit bewährt. Die Bauweise hat heute bei fachgerechter Anwendung einen sehr hohen Entwicklungsstand erreicht. Zur Überwachung und Prüfung stehen leistungsfähige Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Gleiches gilt für Instandsetzungsverfahren und die Möglichkeiten zur nachträglichen Verstärkung der Tragwerke.