

I Erhalt unserer Bausubstanz

Peter Mark, Bochum

Pia Neugebauer, Bochum

COPYRIGHTED MATERIAL

Beton-Kalender 2015: Bauen im Bestand, Brücken.

Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner
© 2015 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2015 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.



1 Einleitung¹⁾

Angesichts immer älter werdender Brücken in Deutschland gibt dieser Beitrag einen Überblick über den Erhaltungszustand ihrer Bausubstanz und gegenwärtige sowie zukünftige Aufgabenbereiche eines nachhaltigen Brückenmanagements. Näher beleuchtet werden Schädigungsumfang, Schadensursachen sowie Gegenmaßnahmen. Außerdem wird ein Einblick in den Stand von Nachrechnung, Lebensdauerabschätzung und -optimierung sowie des Monitorings gewährt. Neben Beispielen für die bautechnische und organisatorische Umsetzung von entsprechenden Maßnahmen wird auch das Kriterium der Wirtschaftlichkeit mit einbezogen. Die Ausführungen gehen bewusst nicht in die technischen Details, um einen breiten Überblick zu geben.

2 Einführung und Pressestimmen

Brückenbauwerke in Deutschland und Europa werden immer älter. Durch jahrzehntelange klimatische Einflüsse, Tausalze und den ständigen Verkehrsfluss sind sie – bei manchen mehr, bei manchen weniger sichtbar – „in die Jahre gekommen“. Wie die Wahrnehmung in der Öffentlichkeit hierzu ist, zeigen die gesammelten Überschriften von Zeitungsartikeln in Bild 1 deutlich. Pressestimmen in Tageszeitungen sprechen bereits von „Bröckelbrücken“ [2] oder „Urlauberbremsen“ [3] (Bild 1) und auch investigative Fernsehsendungen greifen die Thematik immer häufiger auf, z. B. [4].

Und tatsächlich befinden sich Deutschlands Brücken oftmals in einem verbesserungswürdigen Zustand. Ein Großteil der Straßenbrücken stammt aus den 1960er- und 1970er-Jahren, wie es Bild 2 mit einer chronologischen Darstellung für Brücken im Zuge von Autobahnen und Fernstraßen zeigt. Die Mehrzahl der Eisenbahnbrücken stammt sogar noch vom Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts [11] und wird auch heute noch intensiv genutzt. Durchschnittsalter von 40 und mehr Jahren bei Straßenbrücken und rund 80 Jahren bei Eisenbahnbrücken sind typisch, aber nicht ungewöhnlich, bedenkt man ihre planmäßige Nutzungsdauer von bis zu 100 Jahren und mehr.

¹⁾ Der vorliegende Beitrag basiert auf einer Veröffentlichung, die innerhalb der Schriftenreihe der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften beim Verlag Ferdinand Schöningh erschienen ist [1]. Verlag und Akademie sei an dieser Stelle für die freundliche Genehmigung der Verwendung gedankt.



Bild 1. Zeitungsausschnitte zu Erhaltungszuständen von Brücken (nach [2, 3, 5–10])

Dementsprechend treten bei vielen Brückenbauwerken Alterserscheinungen auf. Die über die Jahrzehnte stetig steigenden Verkehrslasten setzen den Bauwerken zu. Waren in den 1960er-Jahren die Bundesautobahnen noch weitgehend leer (Bilder 3a und b), so werden sie heutzutage stark frequentiert und sind für den Güterverkehr unerlässlich (Bild 3c). Bedeutsam ist insbesondere die enorme Zunahme an Schwerverkehr mit seinen hohen Gewichten und seinem oft nicht nur auf die rechte Fahrspur beschränkten, sondern mehrspurigen Auftreten.

Hieraus entsteht die schwierige Aufgabe, sowohl zweckmäßige Sanierungs- und Instandhaltungskonzepte als auch geeignete Nachrechnungsmethoden für Bestandsbrücken zu entwickeln, die die aktuellen Anforderungen und die zum Erbauungszeitpunkt angesetzten Konzepte gleichermaßen berücksichtigen. Dabei fließen sowohl das Alter der Brücken, ihre Eigenschaften und der Anspruch an die Nutzung als auch die bereits vorhandenen Schädigungen mit ein.

3 Zustand und Eigenschaften unserer Brücken

Typische Schäden an den Oberflächen von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken treten durch Korrosion der Bewehrung auf. In der Regel findet eine Volumenvergrößerung beim Korrodieren statt, an der Betonoberfläche entstehen Risse und mit der Zeit Abplatzungen. Hierbei ist grundsätzlich zwischen zwei Ursachen zu unterscheiden.

Ist das Bauteil direktem Spritzwasser von Verkehrsflächen ausgesetzt, kann es zu chloridinduzierter

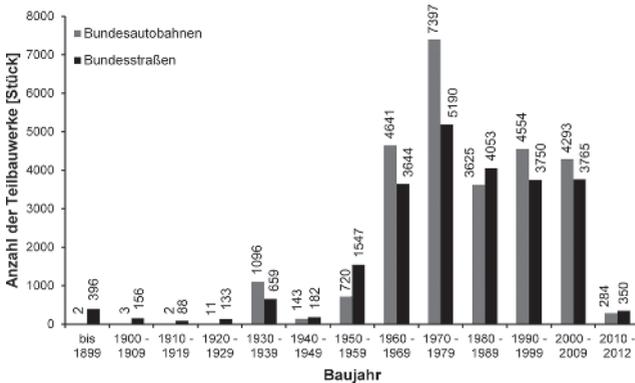


Bild 2. Altersstrukturen der Straßenbrücken im Zuge der Bundesfernstraßen (nach [12])

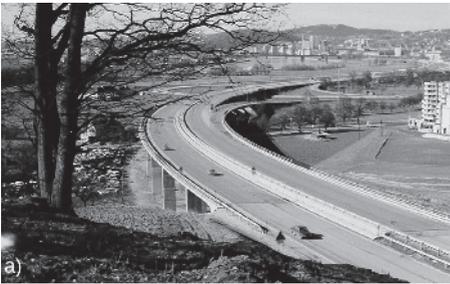


Bild 3. a) Österreichische Autobahn in den 1960er-Jahren (Dipl.-Ing. E. Holl), b) Blick auf die A 40 zwischen Essen und Mülheim Ende der 1950er-Jahre (M. Zils), c) die A40 bei Bochum heute

Korrosion kommen, wenn höhere Chloridkonzentrationen die Bewehrungslagen erreichen.

Ansonsten ist der Stahl im Beton normalerweise durch dessen Alkalität vor Korrosion geschützt. Über die Jahre jedoch reduziert sich der alkalische „Schutzschild“ durch Karbonatisierung von der Oberfläche aus und führt zu den beschriebenen Korrosions- und Abplatzungserscheinungen, wenn die Stahlebene erreicht ist. Bild 4a zeigt einen extremen, maßgeblich durch Chlorideinfluss entstandenen Korrosionsschaden, bei dem praktisch keine Betondeckung mehr vorhanden ist.

Besonders bei geringer Betondeckung – sei es geplant aufgrund des Erbauungsjahres oder unabsichtlich durch Ungenauigkeiten bei der Bauausführung erzeugt – kommt es zu den beschriebenen Schädigungen. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass ältere Bauteile eine zu geringe Betondeckung aufweisen, weil die Erkenntnis über die Notwendigkeit höherer Deckungswerte erst über die Zeit reifte.

Koppelstellen von Spannstählen bildeten zu Beginn der Spannbetonbauweise Schwachstellen, da sie zunächst an einigen wenigen Stellen konzentriert wurden [14–16]. Risse von zum Teil erheblicher Breite waren die Folge. Bild 4b zeigt einen typischen derartigen Risschaden, der sich über den gesamten Querschnitt durchzieht. Die heute übliche Verteilung der Koppelstellen verhindert dies, da genügend Mindestbewehrung vorgesehen ist und Restdruckspannungen die Zugspannungen des abschnittsweisen Bauprozesses überdrücken. In der Regel werden mindestens 30 % der Spannglieder ungestoßen durch eine Koppelstelle geführt [17].

Von außen nicht sichtbare Korrosionsschäden können an internen Spanngliedern auftreten. Sie entstehen beispielsweise, wenn die Hüllrohre der Spannglieder nicht vollständig verpresst wurden oder hohe Chloridkonzentrationen die Spannglieder er-

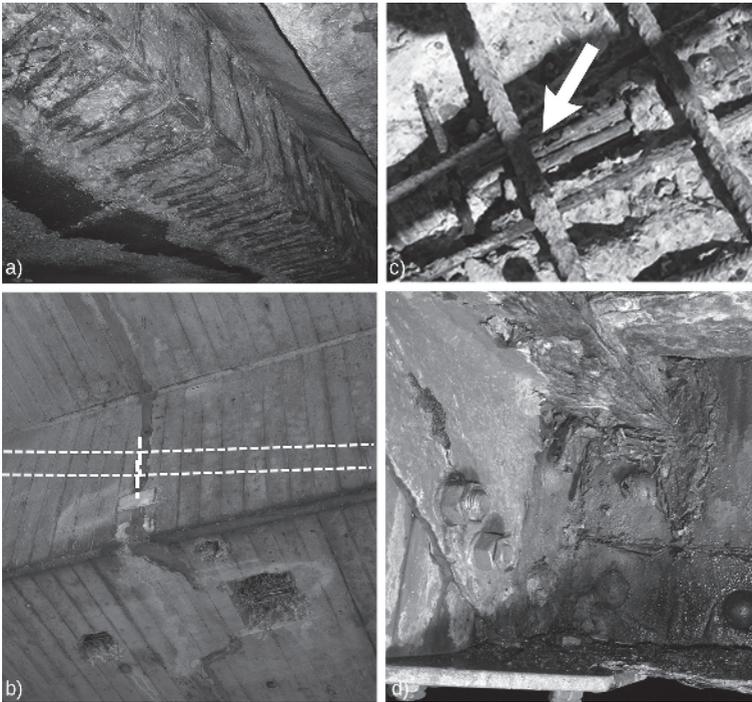


Bild 4. a) Starke Korrosionsschäden an Bewehrungsstäben eines Unterzugs, b) Risschaden an einer Koppelfuge, eingezeichnet sind der Spanngliederverlauf sowie die Koppelstellen, c) Korrosionsschäden an internen Spanngliedern, d) Blattkorrosion an einer Stahlbrücke (nach [13])

reichen, was aber eher selten vorkommt. Bild 4c zeigt ein solches Schadensbild. Schäden an Spanngliedern möglichst frühzeitig zu erkennen ist wesentlich, da die Spannglieder den maßgebenden Beitrag zum Tragwiderstand leisten und es bei oft fehlender Mindestbewehrung zu Versagensarten ohne Vorankündigung kommen kann.

Neben der durch andere Bemessungsvorschriften und Einwirkungen geprägten Bauteilausbildung und -konstruktion und dem damit einhergehenden, nicht wie heute konsequent verfolgten Duktilitätsprinzip stellen bei Bestandsbrücken die mittlerweile stark gestiegenen Verkehrslasten und die reduziert vorhandenen Bewehrungsgrade für Biege- und Schubbewehrung ein Defizit dar. Nach heutigen Maßstäben wären viele Bestandsbrücken unterbemessen. Sie weisen also ein geringeres Sicherheitsniveau im Vergleich zu heutzutage gebauten Brücken auf. Dabei sind allerdings die veränderte Restnutzungsdauer und ggf. vorhandene Umlagerungspotenziale zu berücksichtigen.

Bei reinen Stahlbrücken kann es bedingt durch mangelhafte Erneuerung des Korrosionsschutzes ebenfalls zu vielfältigen Schäden durch Korrosion kommen. Ein charakteristisches Beispiel zeigt Bild 4d. Zu sehen ist eine bereits ausgeprägte Blattrostbildung, die gerade an Verbindungsstellen (Nieten, Schrauben) mit Zutritt von Tausalzen und stehendem Wasser bzw. Feuchtigkeit vermehrt auftritt.

Neben Schäden am Bauwerk selbst, treten besonders an klassischen Verschleißbauteilen wie Lagern, Fahrbahnübergängen oder dem Entwässerungssystem und in Fugen zwischen Bauteilen Schäden auf, die auch Einfluss auf die Beschaffenheit und die Tragsicherheit der Gesamtkonstruktion haben können. Ein regelmäßiger Austausch bzw. eine Rehabilitation sind hier vonnöten.

Die Bilder 5a bis c zeigen einige Beispiele schadhafter Lager. So können Lagersockel durch hohe Pressungen und fehlende Bewehrungseinfassung weggebrochen, Gleitschichten verschoben sein bzw. Undichtigkeiten an Topflagern auftreten.



Bild 5. a) bis c) Beispiele für schadhafte Lager und Lagerpunkte, d) als Nistmöglichkeit genutzter Hohlraum einer Brücke mit Verschmutzungen durch Vogelkot und Nistmaterial (nach [13])

Einen Aspekt für sich stellt der Vogelkot dar, der besonders in unverschlossenen Hohlkastenquerschnitten und auf Auflagerbänken durch seine Menge und zum Teil aggressive chemische Wirkung problematisch werden kann (Bild 5d). Das gilt für die Brücke selber, aber auch für die Bauwerksprüfer und Inspektoren, die sich aufgrund der oft sehr beengten Platzverhältnisse derartigen Verunreinigungen kaum entziehen können. An vielen Brücken sind bereits Schutzkonstruktionen gegen nistende Vögel eingebaut. Für neue Brücken ist dies bereits Standard.

Einen Überblick über die Zustandsentwicklung und -verteilung von Brückenbauten gibt die Grafik in Bild 6. Dargestellt sind Bewertungen von Brücken der Bundesfernstraßen. Die Beurteilungsskala reicht nach RI-EBW-PRÜF [18] von 1 (sehr gut) bis 4 (ungenügend), wobei der Zustand ab der Note 3 für Brücken schon als „kritisch“ bewertet wird. Beurteilt werden im Rahmen der Brückenprüfungen nach DIN 1076 [12] Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit, wobei die Gesamtnote der schlechtesten Bewertung aus den drei Kriterien entspricht. Sie kann also eine eingeschränkte Dauerhaftigkeit aufweisen oder – durch die Gesamtnote allein nicht zu unterscheiden – eine einge-

schränkte Standsicherheit, was natürlich von erheblich differenzierter Bedeutung ist. Eine Note 4 bedeutet, dass eine oder mehrere der genannten Bedingungen nicht mehr gegeben sind. Der Trend geht eindeutig zu einem Anstieg in den befriedigenden bis ausreichenden Bereich, während die Bauwerke, die als sehr gut bis gut eingestuft werden, zahlenmäßig abnehmen und dann mit der Zeit in dem befriedigenden Bereich (2,0 bis 2,4) wiederzufinden sind. Ähnlich verhält es sich mit den Brücken der Einstufung von 3,0 bis 3,4 bzw. 3,5 bis 4,0. Ihre Zahl ist in den letzten Jahren leicht rückläufig und findet sich nach Instandsetzung in einer besseren oder bei weiterer Degradation in der nächstschlechteren Klasse wieder bzw. taucht nach Wirtschaftlichkeitsprüfung und daraus ggf. resultierendem Abriss bzw. Ersatzneubau nicht mehr bzw. in den vorderen Skalen auf [19].

Besondere Aufmerksamkeit verdient die sogenannte konzeptionelle Alterung, international unter dem Begriff „conceptual aging“ bekannt. Gemeint ist der Einfluss des ständigen technischen Fortschritts, sodass ältere technische Bauwerke automatisch gegenüber dem aktuellen Stand zurückfallen. Diese Eigenschaft ist praktisch jedem technischen Gerät oder Bauteil gemein und im kontinuierlichen Er-

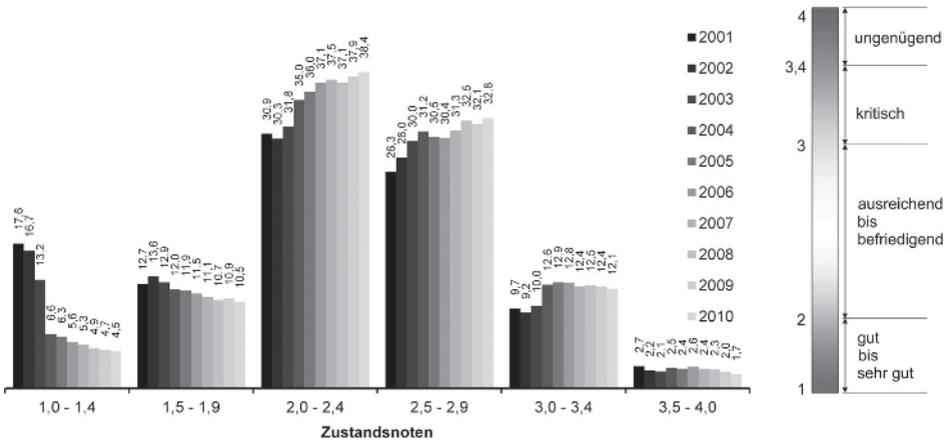


Bild 6. Entwicklung der Zustandsnoten für Brücken an Bundesfernstraßen mit Bewertung nach RI-EBW-PRÜF (nach [18, 19])

kenntnisgewinn und der Fortschreibung von Vorschriften begründet. Das heißt, dass nicht nur Brücken aus den 1970er-Jahren konzeptionell anders entworfen worden sind als heutige Brücken. Auch andere Gebrauchsgegenstände wie beispielsweise Automobile haben eine solche Entwicklung erfahren. Ein PKW von 1978 (Bild 7a) entspricht auch nicht mehr den Standards eines vergleichbaren Modells von 2014 (Bild 7b), auch wenn die Nutzungszeiten von Fahrzeugen und Bauwerken natürlich nicht vergleichbar sind.

Die Ansprüche, im Falle von Brücken beispielsweise die rechnerisch zu berücksichtigenden Verkehrslasten, sind gewachsen. Bis heute haben sich die Verkehrslasten etwa verdoppelt. Bild 8 zeigt ihre Entwicklung seit den 1950er-Jahren an einem Beispiel. Ebenso dargestellt sind wesentliche technische Weiterentwicklungen für Spannbetonbrücken mit Auswirkungen auf die Vorschriftenlage.

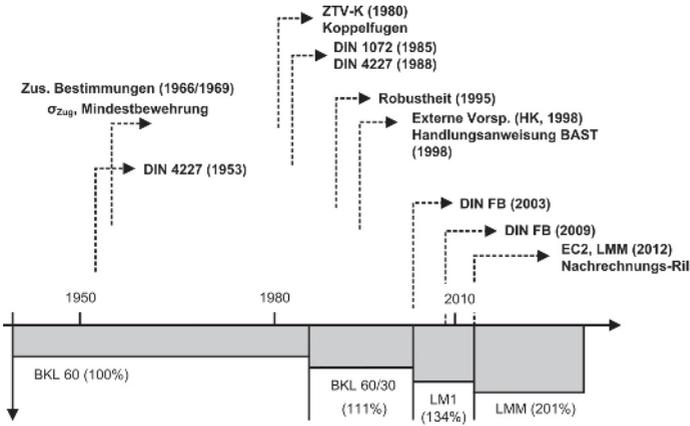
Um den wachsenden Ansprüchen gerecht zu werden, haben sich neue Bauverfahren – z. B. die Vorspannung – entwickelt und durchgesetzt, die bei

modernen Brücken heutzutage Standard sind, ähnlich wie bei Autos, in denen heute Sitzgurte, Airbags, elektronische Hilfen und höhere PS-Zahlen auch die Regel sind, weil die Ansprüche in vielerlei Hinsicht gestiegen sind bzw. man aus der Vergangenheit und Fehlern gelernt hat. So lassen sich zwei bezeichnende Aspekte der konzeptionellen Alterung ausmachen, nämlich die Ansprüche an die Nutzung und die an die Sicherheit. Bei Spannbetonbrücken liegen typische konzeptionelle Defizite [20] oft in

- Verkehrslastniveau,
- Temperaturlastansatz,
- Querkraftbewehrungsmengen,
- Mindestbewehrungsmengen/Duktilität,
- Spröbruchgefährdeten Spannstählen [21],
- Betondeckungswerten,
- Koppelfugenausbildung,
- Ermüdungswiderstand.



Bild 7. Vergleichbare PKWs eines deutschen Herstellers aus a) 1978 und b) 2014



Bsp. Gesamtverkehrslast aus 3 Spuren (9,00m), $l = 50m$

Bild 8. Ausgewählte Entwicklungsschritte der Verkehrslasten, Vorschriften und technischen Neuerungen für Spannbetonbrücken über die vergangenen Jahrzehnte

Beton sei an dieser Stelle noch einmal, dass es sich hierbei nicht um fehlerhafte Planung oder Ausführung handelt, sondern um einen Vergleich heutiger und vergangener Bemessungsanforderungen.

4 Erhaltungskreislauf

Um die Unterhaltung und den Erhalt von Brücken zu gewährleisten, ist ein speziell darauf abgestimm-

tes Zusammenspiel aus technischem Erhaltungskreislauf und strategischen Regelungen notwendig (Bild 9). Man kann hier von einem kombinierten Brückenmanagement sprechen, bei dem die Strategien zum Bauwerkserhalt den Zielsetzungen und Regelungen der Verkehrslastträger von Bund, Ländern und Kommunen unterworfen sind und diese wiederum den technischen Erhaltungskreislauf an sich steuern [22].

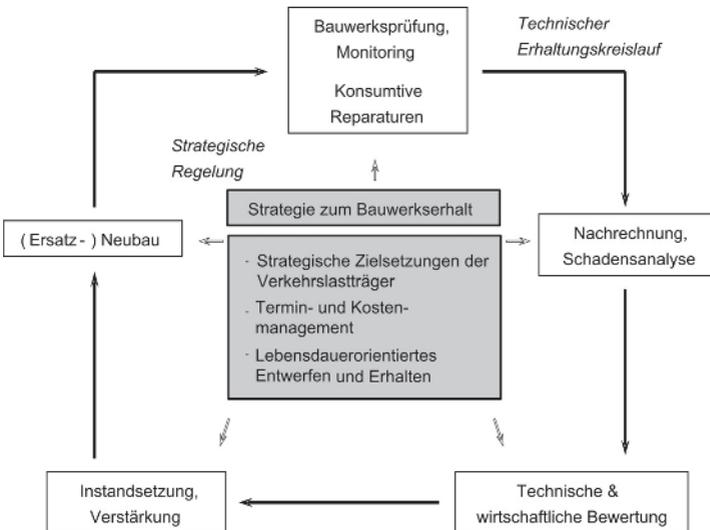


Bild 9. Kreislauf der Erhaltung und strategische Regelung (nach [17])

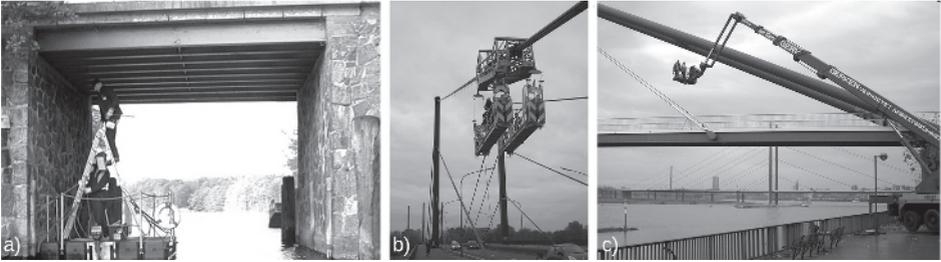


Bild 10. Hilfsgerätschaften zur handnahen Brückenprüfung; a) Leiter und Schwimmponton, b) Kabelbefahrergerät [25], c) Hubsteiger

Die strategischen Regelungen umfassen neben der Zielsetzung durch die Verkehrslastträger vor allem das für die Unterhaltung und den Erhalt von Brücken erforderliche Termin- und Kostenmanagement sowie bei Neubauten die Erstellung von lebensdauerorientierten Entwürfen und im Falle von Instandsetzungen die lebensdauerorientierten Erhaltungsmaßnahmen.

Im technischen Kreislauf geht es um die Umsetzung technischer Maßnahmen im Laufe der Nutzung einer Brücke. Bei einem Bestandsbauwerk sind dies ausgehend von der Bewertung des Ist-Zustandes (Bauwerksprüfung) im Falle von Auffälligkeiten eine Nachrechnung bzw. Schadensanalyse („Objektbezogene Schadensanalyse (OSA)“ [23]). Nach entsprechender Prüfung wirtschaftlicher bzw. technischer Konsequenzen können Instandsetzungen oder Verstärkungen, aber auch Ersatzneubau bzw. Rückbau folgen.

Brückenbauwerke sind regelmäßig in Bauwerksprüfungen zu untersuchen. Im Rahmen der DIN 1076 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung“ [24] werden diese Prüfungen spezifiziert, sodass zwischen Hauptprüfungen (H), Einfachen Prüfungen (E), Prüfungen aus besonderem Anlass (S) und Begehungen unterschieden werden kann.

Die erste Hauptprüfung wird bei Brücken vor der Abnahme der Bauleistung durchgeführt (H0), die zweite folgt bei Ablauf der Gewährleistungsfrist. Danach wird eine solche Hauptprüfung alle sechs Jahre durchgeführt. Von den zuvor genannten Prüfungen ist sie die umfangreichste und detaillierteste. Sie umfasst eine handnahe Überprüfung der Standicherheit, der Verkehrssicherheit und der Dauerhaftigkeit. Hierbei werden im Einzelnen Über- und Unterbauten, die Beschilderung, die Gründung, massive Bauteile, Stahlbauteile, Lager, Übergangskonstruktionen und Gelenke sowie Abdichtungen, Fahrbahnen und die Entwässerung geprüft. Außerdem werden etwaige Verkleidungen, Schutzvorrich-

tungen und falls erforderlich der Korrosionsschutz begutachtet. Die gesamte Prüfung ist auch an schwer zugänglichen Stellen, bei Bedarf mithilfe von Hubsteigern oder ähnlichem Gerät, durchzuführen. Vorhandene Verschmutzungen (z. B. Buschwerk oder Vogelkot), die die Begutachtung wichtiger Punkte behindern, müssen im Vorhinein entfernt sein [24].

Bild 10 zeigt die handnahe Prüfung verschiedener Brücken mithilfe unterschiedlicher Gerätschaften. Für kleine, nicht allzu hohe Brücken reichen meist einfache Zugangsmittel wie Leitern aus. Um größere Höhen zu überwinden, bieten sich Hubsteiger an, während für Schrägkabelbrücken ein eigens hierfür entwickeltes Kabelbefahrergerät [25] zur Kabelprüfung Anwendung finden kann.

Zur Prüfung selbst können neben klassischen visuellen Methoden beispielsweise auch die endoskopische Untersuchung der Innenseiten von Stahlbauteilen und die Messung der Betondeckung zählen (Bild 11).

Ein wesentlicher Bestandteil der Prüfung von Stahlbetonbauwerken ist die Erfassung und Dokumentation von Rissen und deren Rissweiten. Üblicherweise werden Rissweiten bei Bauwerksprüfungen manuell mithilfe von Risskarten (Bild 12a) bestimmt, wobei für feine Risse eine Einteilung in Schritten von 0,05 mm erfolgt. Hier hängt jedoch die genaue Einordnung mitunter stark von der Einschätzung des Betrachters ab. Daher kommen immer öfter die digitale Rissmessung mithilfe von Risskameras (Bild 12b) oder vergleichbare photogrammetrische Verfahren [26–29] zusätzlich zur manuellen zum Einsatz. Die Risskamera bietet die Möglichkeit, eine Messung der Rissbreite mit einer Genauigkeit von ca. 0,02 mm objektiv durchzuführen, ist georeferenzierbar und ermöglicht es außerdem, die fraktale Rissstruktur zu erfassen und zu dokumentieren [30].

Bild 13 zeigt ein exemplarisches Graustufenbild sowie die gesammelten, in einem Diagramm mithilfe

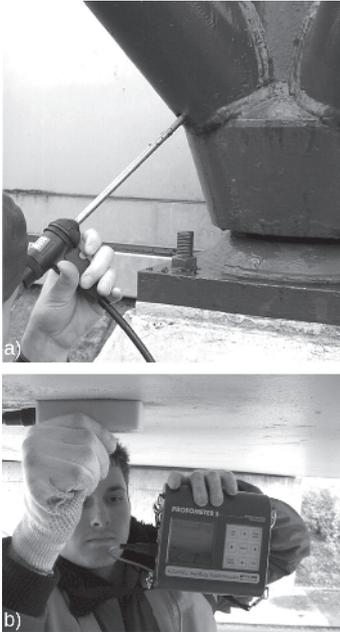


Bild 11. a) Endoskopische Untersuchung, b) Messung der Betondeckung (nach [13])

spezieller Software zusammengestellten Daten zur Rissbreitenbestimmung. Der zu messende Rissbereich ist im Graustufenbild zur besseren Sichtbarkeit weiß hervorgehoben.

Die Rissaufnahme am Bauwerk erfolgt durch direktes Aufsetzen der Kameraapparatur, bestehend aus einem Tubus und einer handelsüblichen Digitalkamera, auf die Bauteiloberfläche (Bild 12b). Der Innenraum des Tubus wird hierbei, von äußerem Streulicht abgeschirmt, durch LED-Lampen ausgeleuchtet [30].

Die eigentliche Bildanalyse erfolgt mithilfe einer Grauwertanalyse, um zwischen dem Riss, also Pixeln mit dunkler Farbe, und der übrigen Betonoberfläche mit hellerer Farbe über Schwellenwertabtrennungen zu unterscheiden. Die Rissbreite wird dabei ermittelt, indem senkrecht zu den Stationen die Helligkeitsänderung der Pixel analysiert und der Mittelwert dieser Abstände gebildet wird (Bild 13, Diagramm) [30].

Die auf diese Art gewonnenen Daten ermöglichen die detaillierte und vor allem objektive und reproduzierbare Beobachtung und Dokumentation von Rissen, ihrer Entstehung und ihrem Fortschreiten [31].

Zwischen zwei Hauptprüfungen erfolgt nach drei Jahren eine sogenannte Einfache Prüfung, die in der

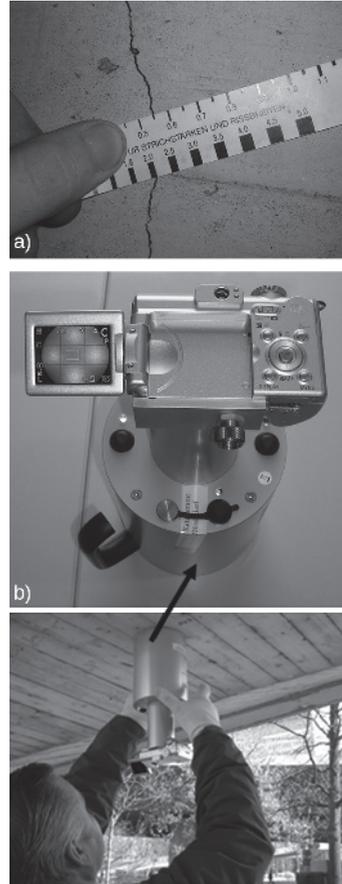


Bild 12. Rissweitenmessung mithilfe a) einer klassischen Risskarte und b) einer Risskamera [30]

Regel weniger aufwendig durchgeführt wird als eine Hauptprüfung. Beispielsweise ist nicht notwendigerweise der Einsatz von Hilfsgerät erforderlich, da es sich lediglich um eine „intensive, erweiterte Sichtprüfung“ [24] handelt. Trotzdem sollten alle angrenzenden Funktionsteile mitgeprüft werden. Außerdem werden die Ergebnisse der vorangegangenen Prüfung berücksichtigt und überprüft. Bei gravierenden Verschlechterungen der Schäden oder weitreichenden, ernst zu nehmenden Neuschäden kann eine Einfache Prüfung dann auch zum Umfang einer Hauptprüfung erweitert werden [24].

Zusätzlich zu den zeitlich geregelten Haupt- und Einfachprüfungen können bei Bedarf, beispielsweise bei tragfähigkeitsbeeinflussenden Ereignissen wie Unfällen auf oder unter der Brücke, Sonderprü-

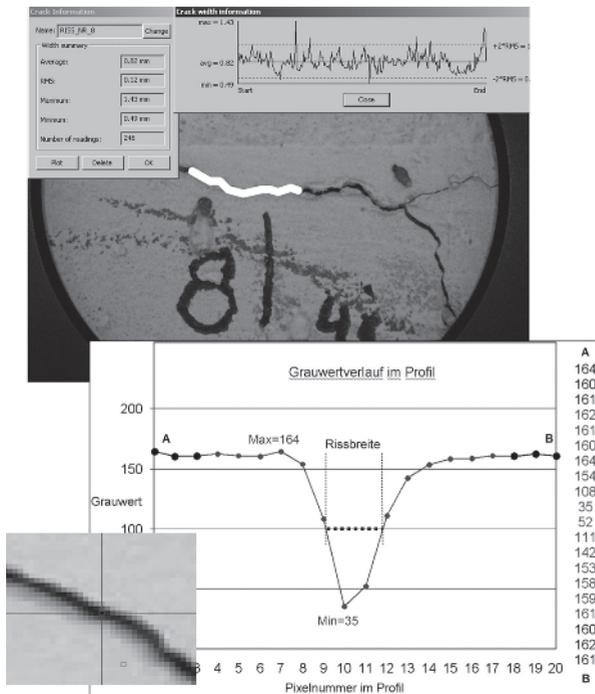


Bild 13. Aufnahmebereich und Auswertungsdiagramm einer Risskamera (nach [30])

fungen oder Begehungen angeordnet werden, die im Umfang an den jeweiligen Fall anzupassen sind. Sie ersetzen aber niemals eine Haupt- oder Einfachprüfung [24].

Im Allgemeinen können mithilfe von Bauwerksprüfungen alle sichtbaren Defizite identifiziert und lokalisiert werden, die anschließend bei der Entscheidung für oder gegen eine Handlungsnotwendigkeit oder auch innerhalb von Nachrechnungen Verwendung finden können. Sichtbare bzw. rechnerische Defizite können sich in der Biege- und Querkrafttragfähigkeit, an Gurtanschlüssen, bei der Torsionslängsbewehrung, an Koppelfugen aufgrund von Ermüdung und durch Spannungsrissskorrosion bemerkbar machen und wurden hinsichtlich ihrer derzeitigen und evtl. zukünftigen Berücksichtigung innerhalb der Nachrechnungsrichtlinie [32] diskutiert. Speziell zum Umgang mit Defiziten im Bereich der Querkrafttragfähigkeit von bestehenden Spannbe- tonbrücken wurden von *Hegger et al.* Grundlagen [33] sowie Empfehlungen bei Sichtung und Überprüfung [34] definiert. Hinsichtlich des Erhaltungskreislaufes speziell von Brückendecks stellten z. B. *Feldman et al.* Untersuchungen zur Kostenentwicklung und Instandsetzungsstrategien in [35] vor. Die

se aufgeführten Literaturhinweise sind nur einige Beispiele für Quellen, die das Thema Erhaltung und Lebensdauerorientierung diskutieren. Die Vielzahl an differenzierter Literatur zu vielen Unterpunkten der Erhaltung und Lebensdauer verdeutlicht einmal mehr die weltweite Aktualität dieses Themas sowie die Breite des für die Praxis, aber auch für die Forschung relevanten Spektrums.

5 Ansätze der Forschung, Bewertung und Nachrechnung von Bestandsbrücken

5.1 Monitoring

Neben der erläuterten, für alle Brücken gleich ablaufenden Prüfroutine gewinnt mittlerweile auch das (kontinuierliche) Monitoring maßgebender Tragwerksbereiche stetig an Bedeutung. Monitoring kennzeichnet ein gezieltes Beobachten und kann sich auf geschädigte Bereiche, besonders sensitive Tragelemente, aber auch auf neue Brückenbauteile gekoppelt an Einwirkungsmessungen beziehen [36, 37]. Es kann zeitlich andauernd, aber auch punktuell erfolgen. Zentraler Punkt ist es,

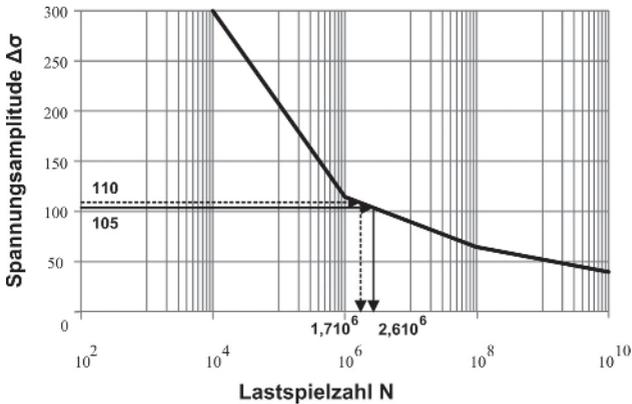


Bild 14. Beispiel zum Einfluss von Änderungen in der Spannungsamplitude auf eine Lastspielzahl

durch reale Messdaten zu genaueren Beurteilungsgrößen zu kommen, was gerade bei gealterten Brücken zum Erhalt entscheidend sein kann [38]. Hierbei kommen verschiedene technische Hilfsmittel zum Einsatz, um über einen längeren Zeitraum bestimmte Aspekte der Schadensentwicklung, beispielsweise die Rissbildung, zu beobachten, die Ergebnisse zu sammeln und anschließend zur Beurteilung der Restnutzungsdauer auszuwerten.

Das Monitoring kann außerordentlich vielfältig sein und umfasst ganzheitlich zuvor zu definierende Kriterien von Verformungen, Tragfähigkeit oder Ge-

brauchstauglichkeit. Zahlreiche Aufsätze und Forschungsinitiativen zeigen die große Bedeutung [39–43]. Beispiele sind die Untersuchung von Tragkabeln bei Brückenhängern [44], aber auch die direkte Interaktion von Verkehrslasten zu Spannungswerten in Spanngliedern, wie in Bild 16 dargestellt. Insgesamt bietet die in Abschnitt 4 erläuterte Brückenprüfstruktur eine sehr gute Möglichkeit, ein regelmäßiges und kontinuierliches (Basis)Monitoring in unterschiedlichen Bereichen durchzuführen. Bei Notwendigkeit von zeitlich kürzeren Beobachtungsintervallen können diese individuell angegliedert werden.

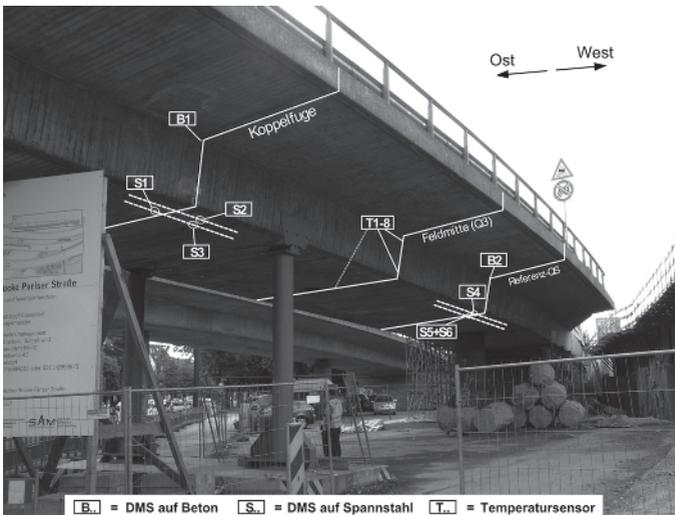


Bild 15. Messquerschnitte an der Brücke „Pariser Straße“ in Düsseldorf

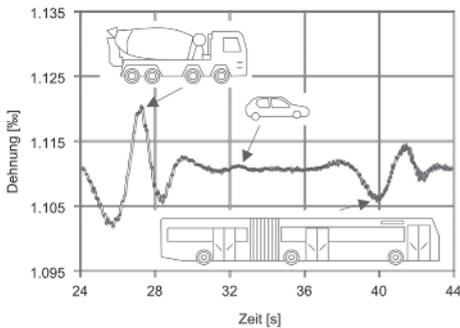


Bild 16. Videoabgleich von Verkehrseinwirkungen mit den Messwerten von Dehnungsmessstreifen [45]

Die Ermüdung von Spannstählen spielt bei Monitoringuntersuchungen mehr und mehr eine Rolle. Grund ist, dass ältere Spannbetonbrücken keine rechnerische Auslegung gegen ermüdungswirksame Einwirkungen besitzen und die Auswertung ertragbarer Spannungsschwingzahlen sehr sensitiv auf Änderungen reagiert. Bild 14 zeigt dieses Phänomen am Beispiel einer Wöhlerlinie mit um knapp 5 % unterschiedlichem Eingangsniveau im Spannungsspiel (y -Achse), das sich aufgrund der logarithmischen Darstellung in fast einer Halbierung auf die ertragbaren Lastwechsel N auswirkt. Weitere wesentliche Parameter mit Streuungen sind die ansetzbaren Verkehrslasten, die Modellbildung des Tragwerks und tatsächliche Materialparameter.

Misst man hingegen die tatsächlichen Belastungen am Spannstahl, kann die Differenz zwischen konventionellem Ermüdungswiderstand, ermittelt mit Berechnungsmodellen gängiger Vorschriften und realen Messungen am Bauwerk, mehrere Größenordnungen betragen. Ausgedrückt in einer Nutzungsdauer heißt das, Restnutzungsdauern von wenigen Monaten bis zu Jahren oder Jahrzehnten. Dass solch eine Erkenntnis für den wirtschaftlichen Brückenerhalt überaus wertvoll ist, liegt auf der Hand. Bild 15 zeigt für das Monitoringbeispiel einer Hochstraßenbrücke in Düsseldorf Messquerschnitte mit zugehörigen Messgrößen an der Brücke.

Auf der einen Seite wurde durch Probelastungen, Materialproben, Verkehrsmessungen und Klimadatenaufzeichnung die Modellbildung mehr und mehr verbessert. Auf der anderen Seite wurden diese Verbesserungen mit den Messdaten am Spannungsglied verglichen. Bild 16 zeigt solch einen Abgleich zwischen visuell aufgenommenen Verkehrslasten und den messbaren Spannstahldehnungen. Es zeigt sich aufgrund der vielen unsicheren Parameter, dass gerade bei Ermüdungsuntersuchungen Messungen um ein Vielfaches günstiger liegen können als Berech-

nungen, die inhärent Modellvereinfachungen beinhalten müssen.

Neben den hier beschriebenen, eher lokal orientierten Möglichkeiten des Monitorings kommen speziell für Verformungsuntersuchungen an Bauwerken in ihrer Gesamtheit mittlerweile auch neue, satellitengestützte Verfahren der Radarinterferometrie zur Anwendung. Hierbei werden Radardaten genutzt und innerhalb von mehreren Überflügen, wobei der Beobachtungszeitraum theoretisch beliebig über Jahre hinweg ausgedehnt werden kann, hinsichtlich „Verformungen“ (Phasenunterschieden) ausgewertet. Die Methodik ist zurzeit noch in der Entwicklung, besitzt aber großes Potenzial, zukünftig einfache Vermessungen großflächig durchzuführen [46, 47].

5.2 Nachrechnung

Die Nachrechnung von Bestandsbrücken muss nach speziellen Gesichtspunkten erfolgen, da sowohl den zum Erbauungszeitpunkt maßgebenden Modellvorstellungen als auch den damals angesetzten Einwirkungen und Materialwiderstandswerten Rechnung getragen werden muss. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurde im Mai 2011 die „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie)“ [48] eingeführt, siehe auch [49]. Sie vereint die Erfahrungen aus der Praxis, die bei der Nachrechnung von Bestandsbrücken gesammelt wurden, mit den Ergebnissen aus Forschungsvorhaben und Pilotprojekten, die speziell hierfür durchgeführt worden sind [50].

Ziel der Nachrechnungsrichtlinie ist es, dem anwendenden Ingenieur einen „erweiterten Handlungsrahmen“ [48] zu geben sowie ihm die Möglichkeit zu bieten, „Reserven des Tragwerks und der Baustoffe stärker auszunutzen, ohne das nach der DIN EN 1990 geforderte Zuverlässigkeitsniveau einzuschränken“ [48].

Bei der Nachrechnung wird zwischen vier Stufen unterschieden [51]:

Stufe 1: Nachweisführung nach den DIN-Fachberichten 102 bis 104 bzw. nach den Eurocodes DIN EN 1992 bis 1994 und 1996. Für Mauerwerk gilt DIN 1053-100.

Stufe 2: Nachweisführung unter Berücksichtigung spezieller, die Stufe 1 ergänzende Regelungen.

Stufe 3: Nachweisführung unter Berücksichtigung von am Bauwerk ermittelten Messergebnissen.

Stufe 4: Nachweisführung unter Einbeziehung wissenschaftlicher Methoden.

Die Anwendung der Stufen 3 und 4 muss mit dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtent-

wicklung abgestimmt werden bzw. bedarf dessen Zustimmung.

Bei der Modellierung des statischen Systems sollte auf die Modellbildung der Ursprungsstatik Rücksicht genommen werden, um die Bemessung und die Materialverteilung nicht durch eine geänderte räumliche Verteilung zu beeinflussen. Die Modellbildung hat also eine nicht unerhebliche Wirkung auf die Ergebnisse.

Prinzipiell sinken mit ansteigender Stufe die rechnerischen Anforderungen an das Tragwerk. Gleichzeitig steigt der Berechnungs- und Modellierungsaufwand, um Tragwerk und Beanspruchungen so genau wie möglich zu erfassen.

Bei der Wahl der Berechnungsmethode ist eine möglichst feine und detaillierte zu bevorzugen, um etwaige „Reserven“ des Systems aufzuspüren und nutzbar zu machen, die beispielsweise bei separater

Betrachtung und anschließender Überlagerung der Längs- und Querrichtung verborgen bleiben können [52–54]. Hier bieten sich räumliche Schalenabbildungen für eine höhere Lastausbreitung am Querrahmen (Bild 17a) oder materiell nichtlineare Berechnungen an, die besonders bei Temperatureinwirkungen auf Mauerwerksbrücken einen Vorteil bringen (Bild 17b) [52, 53]. Bild 17a zeigt dazu errechnete Bewehrungsmengen an einem „1-m“-Plattenstreifen, die im Bereich der Bodenplatte unterhalb der tatsächlich vorhandenen liegen. Die Prüfung am räumlichen System mit real deutlich günstigerer Ausbreitung der Einzelradlasten über den Kastenquerschnitt zeigt, dass tatsächlich noch Tragreserven vorhanden sind.

Welchen Einfluss das zugrunde gelegte Modell auf die Einstufung der Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitsreserven einer Bestandsbrücke innerhalb eines Nachrechnungsverfahrens hat, wird auch bei der

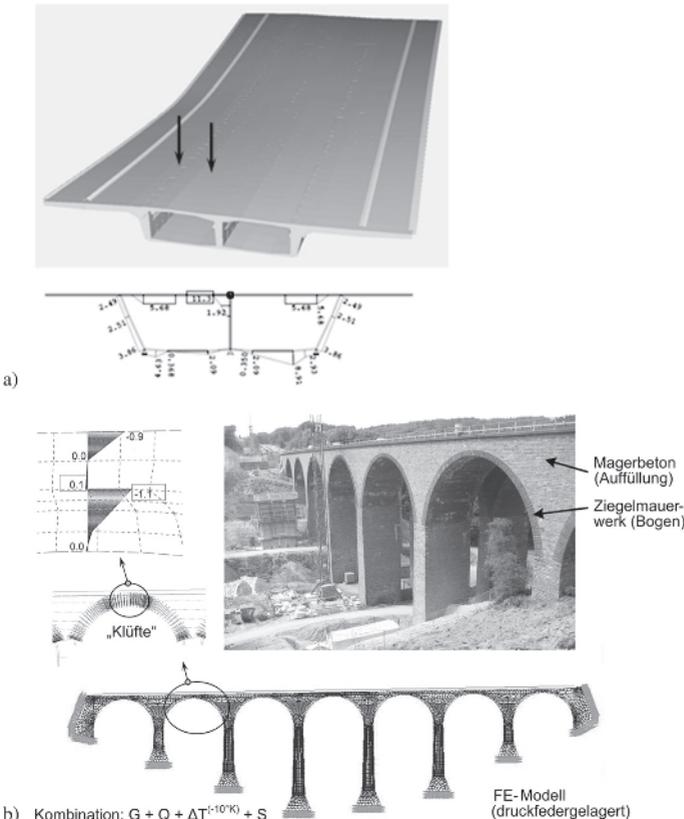


Bild 17. a) Räumliches Schalenmodell und Bewehrungsmengen eines „1-m“-Plattenstreifens und b) materiell nicht-lineares Finite-Elemente-Modell einer Brücke (nach [22, 52])

Kochertalbrücke (erbaut 1976–1979) im Zuge der Autobahn A6 deutlich [55]. Innerhalb der Nachrechnung auf Basis eines „Eingussmodells“, das sich an den Bestandsunterlagen orientierte, stellte sich zunächst heraus, dass die Brücke Brückenklasse 60 nur mit Einschränkungen erreichte. Nach Abwägung der Randbedingungen sowie des im Allgemeinen relativ guten Zustands der Brücke wurde die Berechnung überarbeitet und insbesondere auch die Bauzustände berücksichtigt, sodass die gestiegenen Beanspruchungen aus Verkehr zu einem großen Teil kompensiert werden konnten und eine wirtschaftliche Instandsetzung im Gegensatz zu einem Ersatzneubau möglich war [55].

Neben dem technischen Geschick des Ingenieurs sind vertiefte Kenntnisse über aktuelle und ehemals übliche Berechnungs- und Konstruktionsweisen nötig. Da Instandsetzungsmaßnahmen oder Änderungen an Bestandsbauwerken immer auch mit großem Aufwand verbunden sind, ist bei der Nachrechnung von Brücken unter Ausnutzung der heutzutage möglichen rechnerischen Finesse vorzugehen, um Verstärkungs- und Instandsetzungsmaßnahmen tatsächlich auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Folgende Punkte [22] haben sich für die Nachrechnung von Bestandsbrücken als günstig erwiesen, wobei grundlegende Rahmenbedingungen und weitere Hinweise in der Nachrechnungsrichtlinie [48, 50] zu finden sind:

- Ansatz geeigneter Materialkennwerte [56], oft mit reduzierten Festigkeiten und Bruchdehnungen, aber auch festigkeitssteigernder Nacherhärtungen.
- Ansatz geeigneter Größen von Einwirkungen, ggf. bauwerksspezifisch, beispielsweise
 - realistische Verkehrslastansätze, insbesondere bei Überprüfung von Materialermüdungen;
 - tatsächliche Kennwerte von Eigengewichten, Ausbaulasten, Lagerwiderständen, Temperaturranddaten oder eingetretener Setzungen anstelle einfacher Differenzansätze;
 - Berücksichtigung abgeschlossener, zeitabhängiger Umlagerungen und Zwangsabbau sowie Reserven aus Bauzuständen.
- Angepasste Modellierung des statischen Systems
 - Nachverfolgung der zum Zeitpunkt der Ursprungsstatik verwendeten Modellbildung (z. B. in Längs- und Querrichtung getrennte Stabsysteme), um am statischen Modell ausgerichtete Bemessungen und Materialverteilungen beizubehalten und nicht etwa rechnerische Defizite durch eine veränderte räumliche Verteilung erforderlicher Stahl-,

Beton- oder Bewehrungsmengen zu erzeugen.

- Verwendung von verfeinerten oder höherwertigen Rechenmodellen zur Ausnutzung „versteckter“ Reserven, wie räumliche Schalenabbildungen (höhere Lastausbreitung am Querrahmen) oder materiell nicht-lineare Berechnungen, z. B. bei zwangsbeanspruchten Mauerwerksbrücken (vgl. Bild 17).
- Einbezug von Schädigungen wie Abrostungen oder Lagerzwängungen, die sich i. d. R. nicht nennenswert steifigkeitsrelevant auf Über- und Unterbauten auswirken und dann nur bei den Widerstandsnachweisen und ggf. der Schnittgrößenermittlung Eingang finden.
- Sinnvolle Festlegung „akzeptabler“ Einschnitte in das für neue Brücken ausgelegte Sicherheitsniveau, nach Tragfähigkeits- bzw. Gebrauchstauglichkeitsrelevanz, angenommenen Einwirkungen und geplanter Restnutzungsdauer.
- Verwendung spezifisch verbesserter Bemessungsansätze, wie z. B. das Querkraftmodell nach *Hegger/Maurer*, welches bei hohen Drucknormalspannungen und geringen Bügelbewehrungsgraden günstig ist [57–60]. Erste Bemessungsvorschläge für die Ermüdung bei Querkraftbeanspruchung finden sich z. B. in [61].

Bezüglich der praktischen Anwendung der Nachrechnungsrichtlinie haben *Fischer et al.* in [32] Nachrechnungen von Brücken ausgewertet. Sie unterstreichen ihre Notwendigkeit, zeigen aber auch weiteren Verbesserungs- und Überarbeitungsbedarf auf.

5.3 Verstärkung mit externer Vorspannung

Zur nachträglichen Verstärkung von Spannbetonbrücken haben sich verschiedene Strategien entwickelt. Hierzu zählen neben anderen Verfahrensweisen die Ergänzung von nicht vorgespannten, z. T. aufgeklebten oder eingeschlitzten Armierungen in Längs-, Quer- oder geneigter Längsrichtung sowie verschiedene Vorspannmethoden, hauptsächlich extern und in Brückenlängsrichtung angeordnet, z. B. [54, 62–68].

Im Vordergrund aller Verstärkungsmaßnahmen sollte die Minimierung der Eingriffe und Schwächungen am Bestandsbauwerk und eine tatsächliche Entlastung der Konstruktion – besonders hinsichtlich der Verkehrsbelastungen – stehen. Hierbei ist zu beachten, dass zeitabhängige Umlagerungen häufig einen Großteil dieser Entlastungen wieder aufzehren.

Besonders bei Hohlkastenbrücken bietet sich eine externe Längsvorspannung an, da sie kontrollierbare, definierte Zusatzlängsspannungen erbringt und

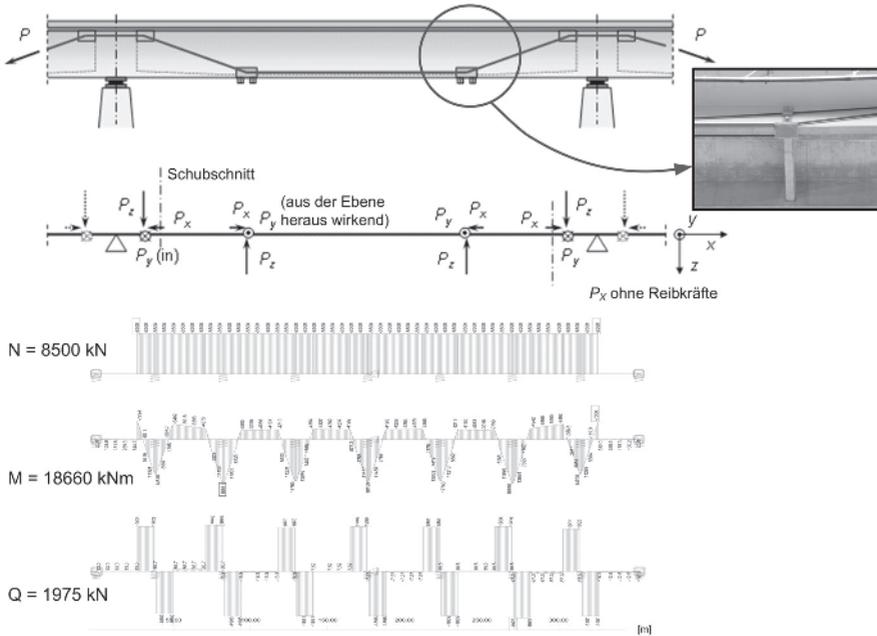


Bild 18. Verstärkung mit umgelenkten externen Spanngliedern und zugehörige Schnittgrößenverläufe (nach [69])

die Eingriffe ins Tragwerk für Endverankerung, Lastenleitung sowie Umlenkung an den Querträgern gering bleiben. Die Führung kann gerade oder polygonartig umgelenkt erfolgen (Bild 18). Ausgleichen lassen sich Defizite wie Normalspannungsüberschreitungen, zu geringe Biegetragfähigkeiten oder Unterschreitungen von Mindestbewehrungsmengen aus der Zugkeilabdeckung. Die auftretenden zusätzlichen Längsdruckspannungen sind in der Regel unproblematisch und durch die Wahl der Spanngliedführung beeinflussbar bzw. allein durch oft erhebliche Nacherhärtungen abgedeckt.

Externe Spannglieder tragen nicht nur zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit bei, sondern können ebenso zur Querkraftverstärkung genutzt werden. Daher bieten sich an Beton- oder Stahlelementen umgelenkt geführte Spanngliedverläufe mit entlastender Querkraftwirkung an [69, 70]. Bild 18 zeigt das Prinzip mit den Umlenkkraften in den Raumrichtungen x , y und z aus der Vorspannung P und errechneten Schnittgrößen. Die auftretende zusätzliche Drucknormalkraft wirkt sich – auch bei rein gerade geführten Strängen – zusätzlich widerstandserhöhend aus, da sie im Zusammenhang mit Querkraften hohe Bogentragswirkungen nahe der Auflager aktiviert [71, 72].

5.4 Lebensdaueranalysen und Optimierung

Nach DIN 1045-1:2008 [73] und DIN EN 1992-1-1 + NA [74] gilt ein Betontragwerk als angemessen dauerhaft, wenn die Anforderungen an

- Tragfähigkeit,
- Gebrauchstauglichkeit,
- konstruktive Durchbildung,
- geeignete Bauausführung und Beton-eigenschaften,
- Mindestbetondeckungs- und -betonfestigkeitswerte

erfüllt sind. Die angenommene Nutzungsdauer beträgt im Allgemeinen 50 Jahre, bei Brücken oder monumentalen Bauwerken 100 Jahre oder mehr. Eine explizite Berechnung einer Nutzungsdauer erfolgt nicht, sondern eine indirekte Abschätzung aus relevanten Parametern.

Nach europäischen Vorschriften der DIN EN 1990 [75] ist eine weitergehende Unterteilung je nach Planungsgröße der Nutzungsdauer in Klassen von 1 bis 5 vorgesehen (Tabelle 1). Brücken und auch andere Ingenieurbauwerke sind demnach der Klasse 5 mit einer Nutzungsdauer von 100 Jahren zuzuordnen.

Tabelle 1. Zuordnungstabelle der Klasse der Nutzungsdauern für unterschiedliche Bauwerkstypen nach DIN EN 1990 + NA [75]

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	10 bis 25	austauschbare Tragwerksteile, z. B. Kranbahnträger, Lager
3	15 bis 30	landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
	> 30	maschinentechnische Anlagen
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurtragwerke
	>100	strategische Bauwerke, Stau Mauern, wichtige Infrastrukturprojekte

Bis zum Ende einer Nutzungsdauer muss der Tragwerkswiderstand R mit einem akzeptablen Sicherheitsabstand im Sinne einer Fraktilwertanalyse die Einwirkungen S überschreiten. Bild 19 zeigt dieses Konzept im Prinzip über die Zeit t . Um dieses Ziel zu erreichen, können verschiedene Ansätze verfolgt werden. Entweder werden von vornherein höhere Tragwerkswiderstände angesetzt (durchgehende hellgraue Linie) oder es werden nachträgliche Instandsetzungsmaßnahmen in Kauf genommen (durchgehende dunkelgraue Linie), um zwischenzeitlich das Widerstandsniveau wieder zu erhöhen und am Ende die gleiche Nutzungsdauer zu errei-

chen, obwohl zu Beginn geringere Reserven eingeplant wurden.

Welcher Ansatz verfolgt werden sollte, ist von Fall zu Fall unterschiedlich. Im Fall nachträglicher Instandsetzungsmaßnahmen sollten diese schon zu Beginn in die Wirtschaftlichkeitsbeurteilung mit einfließen. Erhöhte primäre Baukosten können sich über die Lebensdauer als deutlich günstiger erweisen. Bei der Bewertung von Baukosten ist daher ein Blick über die Nutzungszeit dringend angeraten und immer häufiger Standard bei Neubauten [77–79].

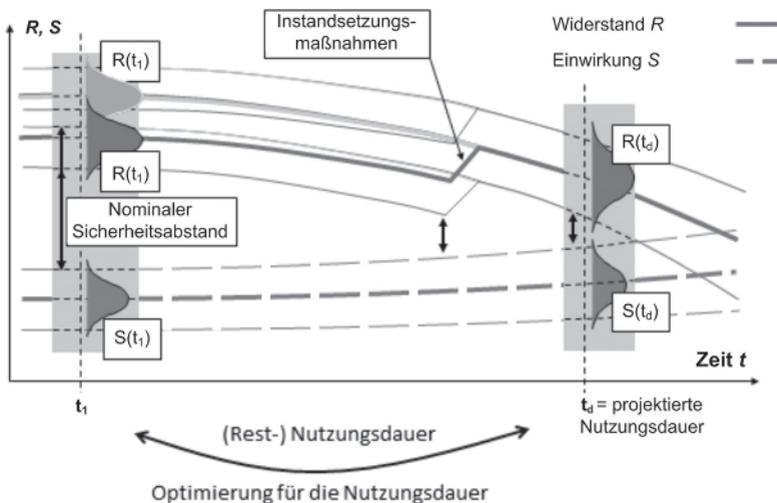


Bild 19. Entwicklung von Tragwiderstand R und Einwirkung S über die Zeit [76]

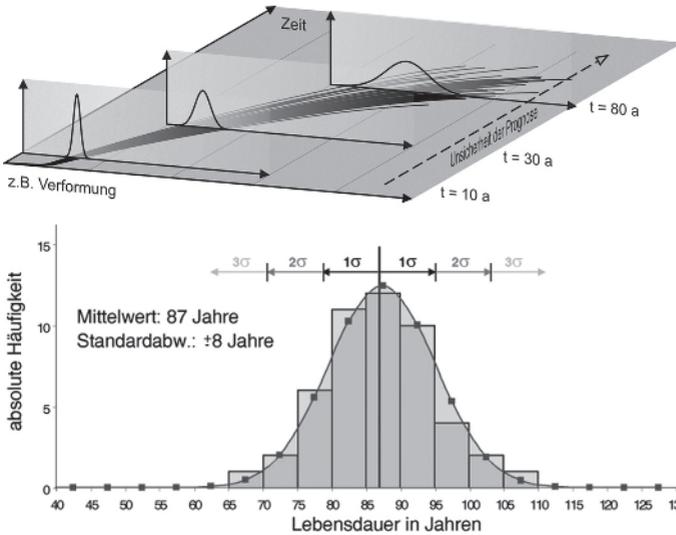


Bild 20. Entwicklung einer rechnerischen Brückenverformung über die Zeit mit Häufigkeitsverteilung einer rechnerischen Lebensdauer (vgl. [76])

Neben einer Degradation der Materialwiderstände über die Jahre sollte auch eine Zunahme der Einwirkungen S (gestrichelte Linie in Bild 19) berücksichtigt werden. Denn sowohl die Verkehrs(last)zahlen als auch z. B. die Windeinwirkungen (z. B. Stürme) und Temperaturextreme haben innerhalb der vergangenen Jahre und Jahrzehnte zugenommen und werden voraussichtlich auch in Zukunft weiter ansteigen.

Zur Abschätzung von Restnutzungsdauern sind Prognoseberechnungen notwendig [76, 80]. Solche Prognosen haben immanent mit Unschärfe zu tun,

werden also unsicherer, je weiter die Voraussage reicht und je schlechter Ausgangsdaten bzw. Einwirkungen bekannt sind. Bild 20 zeigt das Prinzip einer sich immer stärker aufweitenden Häufigkeitsverteilung einer errechneten Brückendurchbiegung über die Zeit. Ergebnis ist also die Abschätzung einer erwarteten Eigenschaft wie einer Nutzungsdauer, z. B. als Fraktil- oder Mittelwert einer Häufigkeitsverteilung. Dabei gibt es wenig sensitive Parameter, wie oft die Druckfestigkeit des Betons, aber auch die Lebensdauer stark einschränkende Einflüsse, wie eine Spannstahl- oder Bewehrungskor-

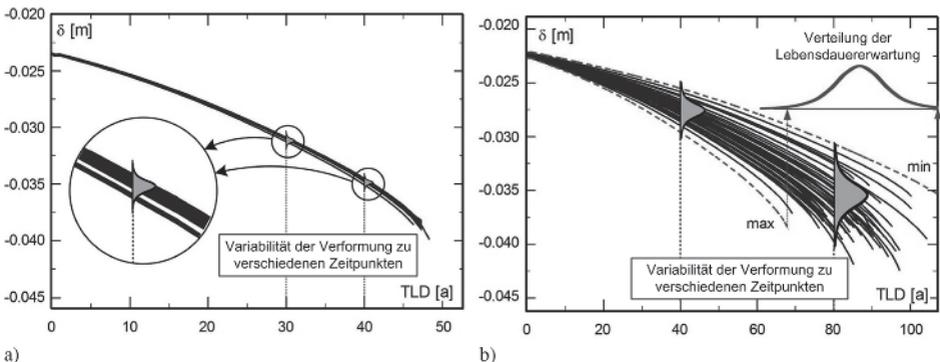


Bild 21. Aufweitung der rechnerischen Nutzungsdauer (TLD) am Beispiel a) der Betondruckfestigkeit und b) der Korrosionsrate (aus [76])

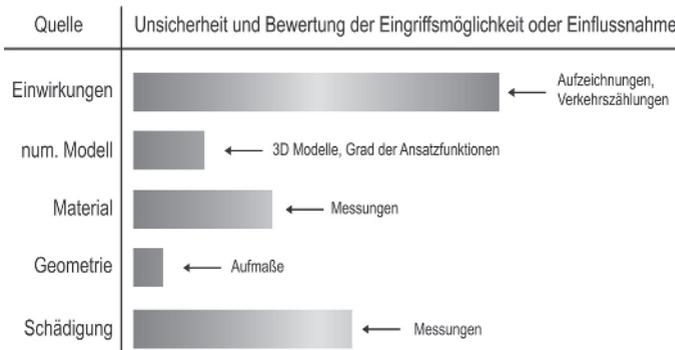


Bild 22. Einordnung der Unsicherheit und Bewertung der Eingriffsmöglichkeit oder Einflussnahme auf unterschiedliche Parameter (nach [80])

rosion. Dies gilt für das dabei angenommene Beispiel einer vorgespannten Bogenbrücke und kann von Tragwerk zu Tragwerk sehr unterschiedlich sein.

Bild 21 zeigt Beispiele von Simulationsberechnungen über die Zeit mit geringen Streuungen bzw. sehr hoher Streubreite. Kombiniert mit anderen Einflussgrößen wie beispielsweise der Verkehrseinwirkung kann es zu sehr ausgeprägten Streubreiten kommen.

Wichtig ist es, Quellen von Unsicherheiten – international als „sources of uncertainty“ [81–83] bezeichnet – zu reduzieren. Das betrifft die Ausgangslage eines Tragwerks (Initialzustand) über Material-, Geometrie- und Schädigungsuntersuchungen, die Einwirkungen im Sinne vorheriger und prognostizierter Werte über z. B. Verkehrszählungen sowie die Modellbildung über Kalibrierungen und Vergleichsdaten. Dabei sind gerade die Einwirkungen aus Verkehrslasten und die Schädigungen von zentraler Bedeutung, da sie von großem Einfluss sind. Bild 22 zeigt dies in einer qualitativen Bewertung.

Tragwerke werden in der Regel für Einwirkungen aus Lasten und Zwängen bemessen und nur indirekt für Lebensdauern dimensioniert. Simulationsbasiert und bislang nur für sehr einfache Szenarien können sie aber auch in ihren Grunddaten von Querschnitt, Materialien, Stützweiten o. Ä. für lange Nutzungszeiten optimiert werden [76, 84]. Sind relevante variable Parameter bekannt, können die Ergebnisse von Lebensdaueranalysen in sogenannte Antwortflächen der Freiwerte angenähert werden, die dann zur günstigeren Einstellung (Optimierung) variabler Werte wie z. B. einer Betondeckung oder einem Querschnittswert verwendbar sind.

Mit den Freiwerten x lässt sich die klassische Optimierungsaufgabe einer Minimierung einer Funktion Q unter Gleichheits- und Ungleichheitsrestrik-

tionen h bzw. g in eine Maximierung der Nutzungsdauer T_{ND} entwickeln.

$$\begin{aligned} & \min_{x \in SC\mathbb{R}^n} \left\{ Q(x) \begin{array}{l} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{array} \right\} \\ \rightarrow & \min_{x \in SC\mathbb{R}^n} \left\{ -T_{ND}(x) \begin{array}{l} g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei wird die Lebensdauer als Funktion der Freiwerte angenähert, als Beispiel hier mit linearem Ansatz.

$$\begin{aligned} T_{ND}(x) &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots \\ &+ \beta_k x_k + \varepsilon = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \\ &i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

Nun lassen sich mit Gl. (2) alle Freiwerte in ihrem Einfluss auf die untersuchte Lebensdauer auch mathematisch bewerten und in vorzugebenden Bereichen einstellen. Bild 23 zeigt als Visualisierung von derartigen Antwortflächen eine zweiparametrig mit einem Detailschnitt und den zugrunde liegenden Berechnungspunkten, aus denen über eine Minimierung von Fehlerquadraten die Antwortfläche bestimmt wurde.

Mit sich stetig verbessernden Berechnungsmethoden und Rechenleistungen sowie höherwertigen auch gekoppelten Schädigungsansätzen erscheinen tatsächliche Auslegungen von Tragwerken nach Optimierungskriterien einer Nutzung – z. B. Reduktion der Gesamtkosten aus Bau, Erhalt und Rückbau oder Lebensdauer jenseits von 200 Jahren [85] – in den kommenden Jahren mehr und mehr möglich.

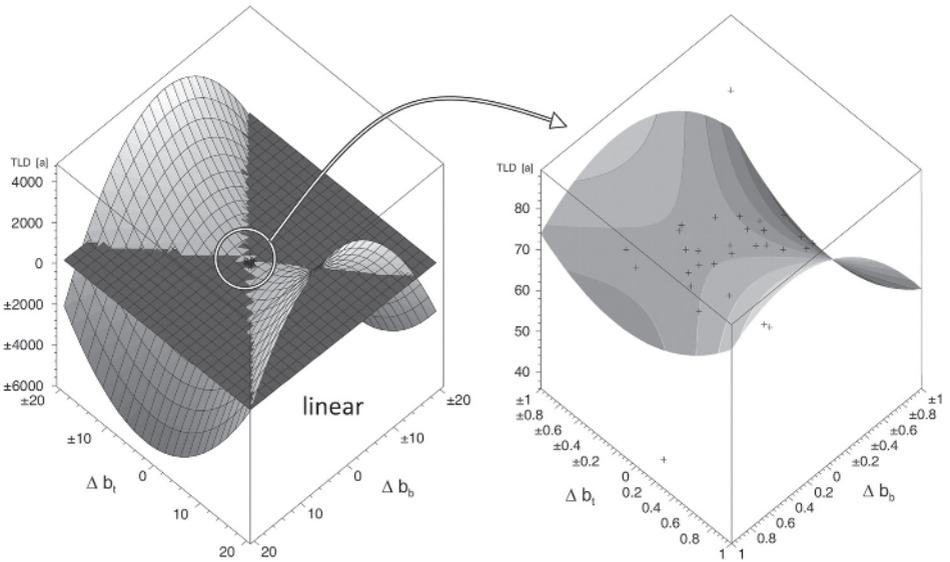


Bild 23. Zweiparametrische Antwortfläche mit Detailausschnitt

6 Schlussfolgerungen

Bauwerke zu erhalten ist unbestritten eine dringende Notwendigkeit, sei es aus wirtschaftlichem Betrachtungswinkel oder aus organisatorischem. Ein kompletter Ersatz alter Bauwerke durch Neubauten ist nicht möglich und vor dem Hintergrund von Verstärkungs- und Erhaltungspotenzial auch nicht sinnvoll. Gleichzeitig verdienen die Bauwerke respektvollen Umgang, zeigen sie doch die beeindruckenden bautechnischen und konstruktiven Fertigkeiten ihrer Planer und Erbauer, die gerade in den Berechnungsmöglichkeiten auf deutlich einfachere Methoden zurückgreifen mussten.

Der Erhalt der Brückenbausubstanz ist daher nicht nur eine volkswirtschaftlich wichtige und mobilitätssichernde Aufgabe, er ist zudem technisch höchst anspruchsvoll und facettenreich. Es gilt hierbei mit dem vorliegenden Bestand auszukommen, d. h. mit bestehenden Konstruktionen und Bemessungsauslegungen, die lediglich mit großem Aufwand merklich veränderbar sind. Dies betrifft jegliche Bereiche. Darunter sei besonders die Angleichung an höhere Verkehrslasten hervorgehoben, aber auch die Erneuerung von gealterten Materialien mit korrodierten – größtenteils nicht oder nur begrenzt schweißfähigen – Stählen und die Anpassung von Fahrbahnbreiten. Daher ist bei Überprüfung, Nachrechnung und Verstärkung besonderes ingenieurtechnisches Geschick gefragt. Regelmäßige Instandhaltungen sind unverzichtbar, wenn der

Brückenbestand seinen planmäßigen Nutzungszeitraum von 100 Jahren oder mehr erfüllen soll.

Umso mehr rückt eine weitblickende, auf Lebensdauer ausgelegte Strategie für neue Brückenbauwerke in den Fokus. Ziel ist es, nicht nur die zukünftigen Verkehrsentwicklungen – wie weitreichend erscheint heute die bereits vor rund 60 Jahren erfolgte Einführung eines 60-Tonnen-Bemessungsfahrzeugs in die Berechnungsvorschriften von Straßenbrücken – adäquat abzuschätzen und beim Entwurf zu berücksichtigen, sondern auch das Tragwerk insgesamt lebensdauerorientiert zu planen. Dies schließt eine Aufwandsminimierung über die Nutzungsdauer, also beim eigentlichen Bau, der Unterhaltung mit gezielten Möglichkeiten der Anpassung und dem Rückbau bzw. der Rezyklierung mit ein.

Monitoring bestehender, aber auch neu erbauter Brücken in ihren wesentlichen Tragelementen wird eine zentrale Aufgabe der kommenden Jahre sein. So lassen sich bessere Einschätzungen gewinnen und Brücken näher an tatsächlich mögliche Lebensdauern heranführen. Dies wird sicher auch die Akzeptanz von qualitativ hochwertigen Bauwerksprüfungen stärken, die sich nicht direkt messbar investiv auswirken, sondern wie beispielsweise Inspektionen von PKWs Voraussetzung für angemessene Nutzung, Instandsetzung und langfristige Planungssicherheit sind.

7 Danksagung

Viele der dargestellten Forschungsergebnisse wurden durch Förderer und Partner unterstützt. Gedankt sei daher der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die gewährten Förderungen im Rahmen der Sonderforschungsbereiche 398 und 837 sowie mehreren Einzelprojekten, dem Amt für Verkehrsmanagement der Landeshauptstadt Düsseldorf für die Möglichkeit, an Brücken und anderen Tragwerken Messungen durchzuführen und die Zurverfügungstellung vielfältiger Kenndaten für die Auswertungen sowie dem Ingenieurbüro Grassl für Bild- und Datenmaterial.

8 Literatur

- [1] Mark, P., Neugebauer, P.: Erhalt unserer Bausubstanz – Zentrale Forschungsaufgabe mit modernen Methoden (IW 41) / Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste (Hrsg.). Verlag Ferdinand Schoeningh, Paderborn 2014.
- [2] Vieweg, C.: Im Land der Bröckelbrücken. Welt am Sonntag, 07/2011.
- [3] Vieweg, C., Lutz, M.: Alte Brücken bremsen Urlaubser aus. Welt am Sonntag, 07/2011.
- [4] ZDF Zoom: Kaputt gespart – Droht uns der Verkehrsinfarkt? ZDF, 16.07.2014.
- [5] Paulsen, T.: Brückendämmung. ADAC Motorwelt, 06/2014, S. 10–12.
- [6] Jede vierte Bahnbrücke soll unsicher sein. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 12/2013.
- [7] Jede zweite Bahnbrücke in NRW ist marode. Westdeutsche Allgemeine Zeitung, 05/2014.
- [8] Mehr Geld für marode Brücken. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 05/2014.
- [9] Seher, D.: Autobahn-Brücken in NRW stark beschädigt. Westdeutsche Allgemeine Zeitung, 04/2011.
- [10] Hansmann, R.: Wenn Brücken in die Jahre kommen. Westdeutsche Allgemeine Zeitung, 07/2011.
- [11] Müller, J.: Planung und Ausschreibung typisierter Bauweisen bei der Deutschen Bahn AG. Deutsche Bahn AG, Frankfurt a. M. 2008.
- [12] Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Organisation, Kosten. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Berlin 2013.
- [13] Ingenieurbüro Grassl GmbH, Düsseldorf.
- [14] Ivány, G., Buschmeyer, W.: Risse in Spannbetonüberbauten – Erfassung, Bewertung. Bautechnik 79 (2002), Heft 5, S. 297–305.
- [15] Zilch, K., Hennecke, M.: Koppelfugenschäden – Beurteilung und Sanierung. Massivbau 2001 – Forschung, Entwicklung und Anwendung – 5. Münchner Massivbau-Seminar. Springer-VDI-Verlag, 2001, S. 196–206.
- [16] Zilch, K., Maurer, R., Weiher, H., Bäätjer, G.: Sicherheit von Spannbetonbrücken. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des BMVBS FE 15.0408/2004/HR. TU München und TU Dortmund, 2005.
- [17] DIN EN 1992-2:2010: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, Deutsche Fassung mit Nationalem Anhang. Beuth Verlag, Berlin 2010.
- [18] RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin 2013.
- [19] Naumann, J.: Brückenertüchtigung jetzt – Ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Mobilität auf Bundesfernstraßen. Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e. V. (Hrsg.) 2011.
- [20] Mark, P., Ahrens, M. A., Fust, C.: Maintenance of concrete bridges – from recalculations to lifetime predictions. Structural Engineer 4 (2011), Heft 8, S. 5–15.
- [21] Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009.
- [22] Mark, P., Ahrens, M. A.: Bauwerkserhalt im Brückenbau – eine vielfältige und komplexe Aufgabe, Seminarbeitrag. Ingenieurkammer-Bau NRW „Bauwerkserhalt im Brückenbau“, November 2010.
- [23] RI-ERH-ING: Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken – Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse OSA. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007.
- [24] DIN 1076:1999: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Deutschen Institut für Normung e. V., Berlin 1999.
- [25] Vollrath, F., Tathoff, H. (Hrsg.): Handbuch der Brückeninstandhaltung. Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf 2002.
- [26] Hegger, J., Görtz, S., Schwermann, R.: Analyse des Schubrissverhaltens unter Einsatz der Photogrammetrie. Bautechnik 79 (2002), Heft 3, S. 135–143.
- [27] Michler, H.: Messtechnische Erfassung der Rissentstehung und Rissbreitenentwicklung mittels 2D-Photogrammetrie. Special 2012 – Messtechnik im Bauwesen, S. 72–76.
- [28] Maas, H.-G.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen. Bautechnik 89 (2012), Heft 11, S. 789–793.
- [29] Koschitzki, R., Maas, H.-G.: Vergleich photogrammetrischer und akustischer Messverfahren zur Rissdetektion bei Belastungsversuchen im Stahlbetonbau. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN 119 (2012), Heft 1, S. 3–10
- [30] Stratmann, R., Birtel, V., Mark, P. et. al.: Digitale Erfassung und Bewertung von Rissen. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 4, S. 252–261.
- [31] Fust, C.: Zur Ermittlung eines Duktilitätskriteriums zur Beurteilung von Schubrisen auf Basis der

- Aufweitungsgeschwindigkeit. Tagungsband des 54. Forschungskolloquiums des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), 2013.
- [32] Fischer, O., Müller, A., Lechner, T. et al.: Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 2, S. 107–127.
- [33] Hegger, J., Karakas, A., Pelke, E., Schölch, U.: Zur Querkraftgefährdung bestehender Spannbetonbrücken – Teil I: Grundlagen. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 11, S. 737–746.
- [34] Hegger, J., Karakas, A., Pelke, E., Schölch, U.: Zur Querkraftgefährdung bestehender Spannbetonbrücken – Teil II: Empfehlungen zur Vorgehensweise bei Sichtung und Überprüfung. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 6, S. 390–398.
- [35] Feldman, L. R., Boulfiza, M., Zacaruk, J. et al.: Life cycle deterioration and cost comparison of bridge deck designs including rehabilitation strategies. In: Life-cycle Civil Engineering (IALCCE), Biondini, F., Frangopol, D. M. (Hrsg.). Taylor & Francis Group, London, UK 2008, S. 143–148.
- [36] Budelmann, H., Holst, A.: Brückenbaumonitoring im Rahmen des Lebensdauermanagement. 21. Dresdner Brückenbausymposium: Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken – TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2011, S. 149–165.
- [37] Budelmann, H., Holst, A.: Non-destructive Measurement Tool Kit for Corrosion Monitoring and Fracture Detection of Bridge Tendons. Structure and Infrastructure Engineering – Maintenance, Management, Life-Cycle Design & Performance, S. Taylor & Francis, 2013.
- [38] Stangenberg, F., Breitenbücher, R., Bruhns, O. T. et al. (Hrsg.): Lifetime-Oriented Structural Design Concepts. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg 2009.
- [39] Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 7.
- [40] Sonderforschungsbereich 524 Weimar: Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken.
- [41] Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN), 2014.
- [42] Glisic, B., Suksawang, N., Malhas, F. (Hrsg.): Structural Health Monitoring Technologies. ACI – American Concrete Institute SP-292, 2013.
- [43] Sonderforschungsbereich 477: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung – Abschluss-Symposium 2010. TU Braunschweig, 2010.
- [44] Jensen, J. S.: Cable supported bridges – design, maintenance, rehabilitation and management. In: Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization (IABMAS). Taylor & Francis Group, London, UK 2010, S. 18–25.
- [45] Sanio, D.: Accuracy of lifetime prediction determined by fatigue monitoring. In: Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics – EURODYN / Cunha, A., Caetano, E., Ribeiro, P., Müller, G. (Hrsg.). Porto, Portugal, 2014.
- [46] Mark, P., Niemeier, W., Schindler, S. et al.: Radarinterferometrie zum Setzungsmonitoring beim Tunnelbau – Anwendung am Beispiel der Wehrbahnlinie in Düsseldorf. Bautechnik 89 (2012), Heft 11, S. 764–776.
- [47] Schindler, S., Mark, P., Niemeier, W., Ziem, E.: Zur Genauigkeit der Radarinterferometrie im Setzungsmonitoring. EI-Eisenbahningenieur (2014), Heft 1, S. 41–45.
- [48] Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Ausgabe 05/2011.
- [49] ONR 24008:2006: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken. ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2006.
- [50] Marzahn, G.: Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken. Bauingenieur 85 (2010), Heft 5, S. 217–220.
- [51] RS vom 26.05.2011, Betreff: Nachrechnung und Ertüchtigung des Brückenbestandes der Bundesfernstraßen – Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn 2011.
- [52] Mauer, S., Rockenfelder, R.: Teilerneuerung der Talbrücke Einsiedelstein. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 2, S. 84–95.
- [53] Mark, P., Ahrens, M. A., Sanio, D., Fust, C.: Monitoring and maintenance strategies for aged engineering structures. MASE – Macedonian Association of Structural Engineers, 2013.
- [54] Pelke, E., Schölch, U.: Instandsetzung von Großbrücken in Hessen – Sofortmaßnahmen und Konzepte für die Sauerlandlinie. Brückenbau – Construction & Engineering, Nr. 4, S. 12–15, Dez. 2010.
- [55] Angelmaier, V.: Grundhafte Instandsetzung der Kochertalbrücke. 24. Dresdner Brückensymposium, S. 213–226, 2014.
- [56] Fingerloos, F.: Bauen im Bestand – Zuordnung historischer Festigkeiten. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 4, S. 214–220.
- [57] Hegger, J., Görtz, S.: Querkraftmodell für Bauteile aus Normalbeton und Hochleistungsbeton. Beton- und Stahlbeton 101 (2006), Heft 9, S. 695–705.
- [58] Görtz, S.: Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton. Aachen, Schriftenreihe des IMB, 2004.
- [59] Maurer, R., Zilch, K., Hegger, J. et al.: Erläuterungen und Hintergründe zur Nachrechnungsrichtlinie – Betonbrücken / Commentary and Backgrounds concerning the Structural Assessment Provisions – Concrete Bridges. Bauingenieur 87 (2012), S. 24–35.
- [60] Marzahn, G.: Zur Nachrechnung von Bestandsbrücken aus Beton – Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie. Beton 63 (2013), Heft 10, S. 397–398.

- [61] Teworte, F., Hegger, J.: Ermüdung von Spannbetonträgern mit Bügelbewehrung unter Querkraftbeanspruchung. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Heft 7, S. 475–486.
- [62] Erhaltung, Verstärkung, Instandsetzung. *Beton- und Stahlbetonbau Spezial 100* (Sonderheft), Ernst & Sohn, 2005.
- [63] Blaschko, A.: Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitz eingekeilten CFK-Lamellen. Dissertation, TU München, 2001.
- [64] Bergmeister, K.: Kohlestofffasern im konstruktiven Ingenieurbau. Ernst & Sohn, Berlin 2003.
- [65] Kleist, A., Krams, J.: Nachträgliche Rissbreitenbeschränkung mit CFK-Lamellen. *Beton- und Stahlbeton – Beton- und Stahlbetonbau* (2008), S. 38–39.
- [66] Curbach, M., Scheerer, S.: Carbon im Brückenbau. 24. Dresdner Brückenbausymposium, 2014, S. 15–30.
- [67] Haveresch, K.-H.: Neue Mischbauweise mit interner Vorspannung ohne Verbund – Pilotprojekt Mühlbergbrücke. *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004) Heft 11, S. 886–894.
- [68] Haveresch, K.-H.: Talbrücke Rümmecke – Vorspannung durch externe Spannglieder beim Bau auf Vorschubrüstung. *Beton- und Stahlbetonbau* 94 (1999), Heft 7, S. 295–305.
- [69] Mark, P., Bender, M., Strack, M. et al.: Shear resistance and strengthening of aged prestressed concrete bridges considering deterioration and fatigue effects. In: *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization (IABMAS 2010)* / Frangopol et al. (Hrsg.). Taylor & Francis, London 2010, S. 903–910.
- [70] Ponzel, U., Grebe, B., Eisler, R.: Verstärken von Spannbetonbrücken mit externen Spanngliedern. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), Heft 1, S. 57–61.
- [71] Leonhardt, F., Walther, R.: *DafStb Heft 151 – Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit und der oberen Schubspannungsgrenze*. Ernst & Sohn, Berlin 1962.
- [72] Bender, M.: Zum Querkraftverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Kreisquerschnitt. Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2010.
- [73] DIN 1045-1:2008: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Beuth Verlag, Berlin 2008.
- [74] DIN EN 1992-1-1:2011: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, Deutsche Fassung mit Nationalem Anhang. Beuth Verlag, Berlin 2011.
- [75] DIN EN 1990:2010: *Grundlagen der Tragwerksplanung*, Deutsche Fassung mit Nationalem Anhang. Beuth Verlag, Berlin, 2010.
- [76] Ahrens, M. A., Strauss, A., Bergmeister, K., Mark, P., Stangenberg, F.: *Lebensdauerorientierter Entwurf, Konstruktion und Nachrechnung – Grundlagen und numerische Simulation, Ingenieurwissenschaftliche und Baupraktische Methoden*. In: *Beton-Kalender 2013 – Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz* / Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. (Hrsg.). Ernst & Sohn, Berlin 2013, S. 17–222.
- [77] Strauss, A., Frangopol, D. M., Bergmeister, K. (Hrsg.): *Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2012)* / Strauss, A., Frangopol, D. M., Bergmeister, K. (Hrsg.). 2012.
- [78] Jodl, H. G.: *Lebenszykluskosten von Brücken – Teil 1: Berechnungsmodell LZKB*. *Bauingenieur* 85 (2010), Heft 5, S. 221–230.
- [79] Jodl, H. G.: *Lebenszykluskosten von Brücken – Teil 2 – Software LZKB*. *Bauingenieur* 85 (2010), Heft 5, S. 231–240.
- [80] Ahrens, M. A., Mark, P.: *Lebensdauersimulation von Betontragwerken – Stochastische Strukturberechnungen über die Zeit am Beispiel einer gealterten Bogenbrücke*. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Heft 4, S. 220–230.
- [81] Melchers, R. E.: *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 2. Aufl. John Wiley & Sons Ltd., Chichester 1999.
- [82] Proske, D.: *Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung*. 1. Aufl. / Proske, D. (Hrsg.). Dresden, 2004.
- [83] Spaethe, G.: *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*. 2. Aufl. Heidelberg, Wien, New York, Springer-Verlag, 1992.
- [84] Ahrens, M.A.: *Ein stochastisches Simulationskonzept zur Lebensdauerermittlung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken und seine Umsetzung an einer Referenzbrücke*. Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2010.
- [85] Bergmeister, K.: *Life-cycle design for the world's longest tunnel project. Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems (IALCCE 2012)*, S. 35–42, 2013.

