

Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

FA 15.524

Forschungsstellen: Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau (Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. O. Fischer)

Büchting + Streit AG, München

Bearbeiter: Müller, A. / Fischer, O. / Wild, M. / Lechner, T. / Kessner, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: März 2014

1 Aufgabenstellung

Die Altersstruktur der Spannbetonbrücken an Bundesfernstraßen zeigt, dass ein Großteil dieser Brücken in den 1960er- und 1970er-Jahren hergestellt wurde und damit seit über 40 Jahren (hohen) Verkehrs- und sonstigen Beanspruchungen ausgesetzt ist (BMVBS, 2013). Der erhebliche, immer noch andauernde Zuwachs im Bereich des Straßengüterverkehrs stellt insbesondere für ältere Brücken eine Nutzungsänderung dar, die dazu führt, dass "für jede einzelne der betroffenen Brücken zu prüfen ist, ob sie den Anforderungen des heutigen und zukünftigen Schwerverkehrs noch genügt" (Colditz, 2012). Seit Mai 2011 kann diese "Prüfung" unter Zugrundelegung der vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) veröffentlichten Nachrechnungsrichtlinie (= NR-Ril) (BMVBS, 2011a) erfolgen. Ziel des an den Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Büchting + Streit AG vergebenen Forschungsprojekts war es, die bisher vorliegenden Nachrechnungsergebnisse für Stahlbeton- und Spannbetonbrücken systematisch zu analysieren, hinsichtlich typischer rechnerischer Defizite zu bewerten, Empfehlungen für die Aufbereitung beziehungsweise zur Verbesserung der Aussagekraft der Ergebnisse zu geben und so einen Beitrag zur Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie zu liefern.

Nach einer Zusammenfassung der gewählten Vorgehensweise und der wesentlichen Nachrechnungsergebnisse werden im Rahmen des vorliegenden Kurzberichts die "Folgerungen für die Nachrechnungspraxis" aufgeführt.

2 Grundlagen und Vorgehensweise bei der Datenauswertung

Als wesentliche Grundlage für die spätere Auswertung und die Erarbeitung von Empfehlungen dienen die Nachrechnungsergebnisse, die dem Forschungsnehmer größtenteils in Form von ausgefüllten Ergebnistabellen (= "Formblätter" nach Anlage 2 der NR-Ril) zur Verfügung gestellt wurden.

Da in den Formblättern nur die Ergebnisse ausgewählter Nachweisschnitte aufgeführt sind, kann anhand der vorliegenden Daten nicht überprüft werden, ob nicht in anderen Überbaubereichen, zum Beispiel aufgrund von Bewehrungsabstufungen, sogar ungünstigere Verhältniswerte zwischen den relevanten Kenngrößen der Einwirkungs- und der Widerstands-

seite vorhanden sind. Zu beachten ist ebenfalls, dass in den Formblättern – unter anderem bedingt durch das vorgegebene Format – in der Regel nicht alle im Zuge einer Nachrechnung festgestellten "rechnerischen Defizite" aufgeführt sind. Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen können in Anbetracht der vorhandenen Datengrundlage daher kein vollständiges Bild von den Ergebnissen bisher durchgeführter Betonbrücken-Nachrechnungen vermitteln.

Die Nachrechnungsrichtlinie (BMVBS, 2011a) sieht eine bis zu vierstufige Nachrechnung vor. Von "rechnerischen Defiziten" ist im Rahmen dieses Forschungsprojekts die Rede, wenn in Nachrechnungsstufe 2 mindestens ein Nachweis nicht erfolgreich geführt werden konnte. Ein in Stufe 2 festgestelltes "rechnerisches Defizit" stellt nicht unbedingt ein tatsächliches, sicherheitsrelevantes Defizit dar, welches Kompensations-, Verstärkungs- oder Ersatzneubaumaßnahmen erforderlich macht. Durch verfeinerte Berechnungs- und Untersuchungsmethoden kann es im Rahmen der Nachrechnungsstufen 3 und 4 gelingen, bisher unberücksichtigte "Reserven" zu quantifizieren und damit die Standsicherheit eines Brückenbauwerks vollständig ohne bauliche oder verkehrsbeschränkende Maßnahmen nachzuweisen. Für Untersuchungen in den Nachrechnungsstufen 3 und 4 wird die ausdrückliche Zustimmung der zuständigen Straßenbaubehörde benötigt. "Rechnerische Defizite" in Nachweisstufe 2 führen demnach in jedem Fall zu einem Mehraufwand.

Als Grundlage für die Identifikation von systematisch auftretenden, rechnerischen Defiziten sind die dem Forschungsnehmer vorliegenden Nachrechnungsergebnisse zu insgesamt 146 Betonbrücken dennoch hilfreich (126 Spannbeton- und 20 Stahlbetonbrücken). Beim Vergleich der Zusammensetzung der vorhandenen Stichprobe mit den deutschlandweit ca. 1 200 vordringlich nachzurechnenden BAB-Betonbrücken zeigte sich eine gute Übereinstimmung. Betrachtet wurden hierzu die Altersstruktur der Bauwerke, die Bauweisen, die Querschnittstypen, die Tragsysteme, die Brückenfläche, die Brückenklasse, die Zustandsnoten, das Vorhandensein von Koppelfugen, die Spannungsrisskorrosionsgefährdung (bei Spannbetonbrücken) und die sogenannte "Prioritätszahl". Dies bedeutet, dass es sich bei der vorliegenden Stichprobe nicht um eine Auswahl von besonders "kritischen" Brücken handelt.

Die von Kaschner et al. 2009 eingeführte "Prioritätszahl Z" soll bei der Identifikation vordringlich nachzurechnender Bauwerke dienlich sein. Hinter den Berechnungen der Prioritätszahlen verbirgt sich eine mittel- und langfristig angelegte Strategie zur Ertüchtigung des Brückenbestandes, die sich in drei Phasen einteilen lässt. Die begonnene Phase I konzentriert sich auf die Ertüchtigung von Brücken der Brückenklasse 60 und kleiner. Die Phasen II und III sehen mittel- und langfristig die Ertüchtigung des Brückenbestands auf das Lastniveau "LMM" vor (siehe (Colditz, 2012) und (Goj, 2012)).

Vereinfacht ausgedrückt, werden in der ersten, das heißt aktuellen, Phase hauptsächlich (Beton-)Brücken nachgerechnet, für die folgende Kriterien zutreffen:

- Spannbetonbrücken, die vor 1985 gebaut wurden,

- Mehrfeldbauwerke mit Stützweiten > 30 m,
- Brücken mit Zustandsnote > 3,0,
- Spannbetonbrücken, die spannungsrissskorrosionsempfindlichen Spannstahl enthalten.

Unter Zugrundelegung des Priorisierungskonzepts wurden den Straßenbauverwaltungen insgesamt rund 2 200 vordringlich nachzurechnende Teilbauwerke benannt (= Bauwerke der BAST-Liste). Hierzu gehören 1 263 Teilbauwerke im Zuge von Autobahnen und 929 Teilbauwerke im Zuge von Bundesstraßen. Bezogen auf die vorhandene Gesamtbrückenfläche sind dies etwa 25 % des Brückenbestands, für den der Bund verantwortlich ist (Colditz 2012). Dadurch, dass von den zuständigen Straßenbauverwaltungen der Länder neben rein bauwerksbezogenen Kriterien auch andere, wie zum Beispiel "streckenbezogene" Kriterien bei der Auswahl berücksichtigt wurden, befinden sich unter den Brücken, zu denen dem Forschungsnehmer Nachrechnungsergebnisse vorliegen, auch Bauwerke, für welche die oben genannten Kriterien nicht zutreffen. Die erwähnten, vergleichenden Betrachtungen deuten dennoch darauf hin, dass die dem Forschungsnehmer vorliegende Auswahl an nachgerechneten Brücken die in Phase I zu untersuchenden Betonbrücken recht gut repräsentieren (Hinweis: Die Nachrechnungsergebnisse zu Stahl- und Verbundbrücken werden in einem separaten Forschungsprojekt (FE 15.0527/2011/FRB) ausgewertet.).

Die systematische Analyse der vorliegenden Nachrechnungsergebnisse ist nur möglich, wenn die Entwicklungsgeschichte der Betonbauweise in Kombination mit der Entwicklung relevanter normativer Regelungen/Richtlinien betrachtet wird. Besonders wichtig sind folgende Vorgänge/Vorkommnisse:

- 1956 wurde vom Deutschen Bundestag der erste Bedarfsplan zum Ausbau von Bundesfernstraßen verabschiedet. In der Folge kam es zu einer "sprunghaften" Weiterentwicklung und Verbreitung der Spannbetonbauweise.
- Erste bedeutende Änderungen der weltweit ersten Spannbetonnorm, der DIN 4227 (1953), wurden im Jahr 1966 über Zusatzbestimmungen des Bundesverkehrsministeriums (BMV) vorgenommen, nachdem in vielen planmäßig "voll vorgespannten" Überbauten Risse und Dauerhaftigkeitsschäden festgestellt worden waren. Von großer Bedeutung ist aus heutiger Sicht die erstmalig aufgenommene, konkrete Festlegung einer Mindestschubbewehrung, die einen spröden Schubbruch ohne Vorankündigung verhindern soll. Bis dahin wurde für Balkenquerschnitte zwar eine Mindestquerkraftbewehrung gefordert, jedoch ohne Angabe eines verbindlichen Mindestwerts.
- Im Oktober 1976 wurden Ermüdungsbrüche einiger Spannglieder in Koppelfugen der Hochstraße Prinzenallee am Heerdt Dreieck in Düsseldorf detektiert. Die Ergebnisse der Ursachensuche für diesen Schadensfall trugen maßgeblich zur Modifikation der "Bemessungsstrategie" bei. In der Folge waren statische Nachweise und Ermüdungsnachweise unter anderem unter Berücksichtigung des Lastfalls "linearer Tempe-

raturunterschied" zu führen. Des Weiteren galt es, eine Reihe neuer konstruktiver Vorschriften zu beachten.

- Nachdem verschiedene Schadensfälle durch Spannstahlbrüche infolge von Spannungsrissskorrosion aufgetreten sind, wurden im Jahr 1978 die Anforderungen hinsichtlich der Empfindlichkeit von Spannstählen sowie die Ausführungsbestimmungen für Spannbetonbauwerke verschärft.
- Aufgrund der Zunahme des schweren Güterverkehrs wurde 1985 die Brückenklasse 60/30 eingeführt.

Die Angaben in den (vollständig ausgefüllten) Formblättern erlauben quantitative Aussagen zur prozentualen Überschreitung einer Grenzzustandsbedingung. Nach dem in Tabelle 1 dargestellten Schema wurde daher eine "Einteilung in Defizitklassen" vorgenommen, die es ermöglichen soll, große und weniger große Überschreitungen von Nachweisgrenzen/Widerständen rasch identifizieren zu können. Grundlage für die Einteilung waren – bis auf wenige Ausnahmen, bei denen keine Unterscheidung zwischen Stufe 1 und 2 vorgenommen wurde – die Ergebnisse der Nachweisstufe 2.

Tabelle 1: Einteilung der Defizitklassen

Defizitklasse	Vorhandene Defizite
1	< 10 % (leichte Überschreitung)
2	10-20 %
3	20-50 %
4	50-100
5	> 100 % (große Überschreitung)

Die vorhandenen Angaben zu den nachgerechneten Bauwerken und zu den Nachrechnungsergebnissen (unter anderem "gewichtete, rechnerische Defizite") wurden strukturiert in einer elektronischen Datenbank zusammengestellt. Falls vorhanden, enthält die Datenbank auch Angaben zu den in Stufe 2 verwendeten "Stellschrauben", zur Nachweisklasse beziehungsweise zur weiteren Vorgehensweise (zum Beispiel Ertüchtigung, Ersatzneubau, detailliertere Nachweisführung).

3 Zusammenfassung wesentlicher Nachrechnungsergebnisse

Im Zuge der Datensammlung zeigte sich, dass insbesondere bei den in Tabelle 2 aufgeführten Nachweisen rechnerische Defizite festzustellen waren. Als rechnerisches Defizit werden Nachweise gewertet, die weder in Stufe 1 noch in Stufe 2 erbracht werden konnten.

Basierend auf den vorhandenen Nachrechnungsergebnissen und der im vorigen Abschnitt beschriebenen "Gewichtung von Überschreitungen" können folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei knapp der Hälfte aller nachgerechneten Betonbrücken wurde mindestens einer der in Tabelle 2 aufgeführten Nachweise in Stufe 2 bei weitem nicht erbracht (Überschreitung > 100 %, das heißt Defizit "5").

- Nur bei etwa 20 % der nachgerechneten Bauwerke wurden in Stufe 1 und 2 der NR-Ril alle Nachweise erbracht.

Rechnerische Defizite traten insgesamt gesehen am häufigsten beim Nachweis der Querkrafttragfähigkeit auf. Bei rund 60 % der nachgerechneten Brücken mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung wurden in Stufe 2 rechnerische Querkrafttragfähigkeitsdefizite festgestellt. Betroffen waren in erster Linie

die älteren, vor 1966 errichteten Spannbetonüberbauten. Die größten rechnerischen Defizite beim Gurtanschluss zeigten sich beim Nachweis der Druckgurte im Stützbereich von Durchlaufträgern. Die Auswertung der oftmals festgestellten Defizite bei der Torsionslängsbewehrung wurde dadurch erschwert, dass aus den Formblättern die verwendeten Stufe 2-Stellschrauben nicht hervorgehen, zum Beispiel der gewählte Druckstrebenwinkel.

Tabelle 2: Übersicht über typische, in Stufe 1 und 2 nicht erbrachte Nachweise

Nachweis	Erläuterung	Defizitermittlung [%]
V_{Rd}	Querkraft Längsrichtung (inkl. Anteil Korrosion)	$\frac{erfA_s - vorhA_s}{vorhA_s}$
$V_{Rd,Quer}$	Querkraft Querrichtung	$\frac{erfA_s - vorhA_s}{vorhA_s}$
GA	Gurtanschluss	$\frac{erfA_s - vorhA_s}{vorhA_s}$
TL	Torsionslängsbewehrung	$\frac{erfA_s - vorhA_s}{vorhA_s}$
Erm.	Ermüdung außerhalb von Koppelfugen	$\frac{vorh\Delta\sigma}{zul\Delta\sigma}$
Erm.-Kop.	Ermüdung in den Koppelfugen	$\frac{vorh\Delta\sigma}{zul\Delta\sigma}$
SpRK	Ankündigungsverhalten Spannungsrissskorrosion	Defizit 0 % oder 100 %
M	Biegetragfähigkeit in Längsrichtung	$\frac{erfA_s - vorhA_s}{vorhA_s}$
M_Q	Biegetragfähigkeit in Querrichtung	$\frac{erfA_s - vorhA_s}{vorhA_s}$
σ_D	Dekompression	$\frac{\sigma_{ct,vorh}}{f_{ctk;0,05}}$

Die älteste Brücke mit rechnerischen Defiziten beim Ermüdungsnachweis in den Koppelfugen wurde 1978 errichtet. Bei 12 von 24 Brücken, die spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahl enthalten, konnte unter Zugrundelegung der Handlungsanweisung (BMVBS, 2011b) ein ausreichendes Ankündigungsverhalten nachgewiesen werden. In vier Fällen liegen keine Angaben/Ergebnisse vor.

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit konnte spätestens in Stufe 2 bei allen Brücken, die nach 1980 errichtet wurden, erfolgreich geführt werden. Entscheidend scheint zu sein, ob der Lastfall "linearer Temperaturunterschied" in der ursprünglichen statischen Berechnung berücksichtigt wurde oder nicht.

Nur bei 4 von 146 Bauwerken konnten in Stufe 1 alle Nachweise erbracht werden. Bei 19 Bauwerken gelang dies in Nachweisstufe 2. 20 Brücken wurden in die Nachweisklasse C eingestuft. Zu den meisten nachgerechneten Brücken (etwa 70 %) liegen keine eindeutigen beziehungsweise abschließenden Angaben zur Nachweisklasseneinstufung vor.

4 Folgerungen für die Nachrechnungspraxis

Die Nachrechnungsergebnisse deuten darauf hin, dass konkrete Empfehlungen zum Umgang mit rechnerischen Nachweisdefiziten ab Stufe 2 sehr hilfreich sein können. Im ausführlichen

Schlussbericht werden mehrere Nachweisformate und Vorgehensweisen beschrieben, die für weiterführende rechnerische Betrachtungen in diesem Zusammenhang geeignet erscheinen. Festzustellen ist, dass es mit den dort genannten Verfahren, zum Beispiel mithilfe von physikalisch nichtlinearen Berechnungen durchaus möglich ist, die Standsicherheit von Brückenbauwerken ohne Modifikationen auf der Einwirkungsseite (Kompensationsmaßnahmen) und ohne Verstärkungen nachzuweisen, selbst wenn in Stufe 2 ein großes rechnerisches Defizit (> 100 %) festgestellt wird (siehe zum Beispiel (Müller et al., 2013)).

Von den vor 1966 errichteten und bisher nachgerechneten Spannbetonbrücken weisen etwa 90 % große rechnerische Querkrafttragfähigkeitsdefizite in Stufe 2 auf. Ob es sinnvoll ist, viele der vor 1966 errichteten Bauwerke nachrechnen zu lassen, bevor weitergehende Ansätze zur wirklichkeitsnäheren Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit (offiziell) zur Verfügung stehen, ist fraglich.

Nach Ansicht des Forschungsnehmers sollten vordringlich die Bemühungen intensiviert werden, Vorgehensweisen zu finden, mit denen die Tragfähigkeit existierender Betonbrücken wirklichkeitsnah und mit vertretbarem Aufwand beurteilt werden kann. Dies gilt auch für die Beurteilung vorhandener Anprallschutzvorrichtungen. Ziel sollte es sein, möglichst schnell zu

eindeutigen und vollständigen Ergebnissen zu kommen, um weitere Schritte (zum Beispiel Verstärkungen) verlässlich und umfassend durchführen zu können (das heißt inkl. von Ertüchtigungen der Anprallschutzvorrichtungen).

Solange keine vollständige Nachrechnung möglich ist (das heißt inkl. Anprallnachweisen) und keine ergänzenden Handlungsanweisungen zum Umgang mit rechnerischen Defiziten (zum Beispiel bei der Querkrafttragfähigkeit) zur Verfügung stehen, erscheint es angebracht, nur wenige Bauwerke nachzurechnen – evtl. nur diejenigen, die kurzfristig aufwendiger saniert oder geringfügig modifiziert werden müssen (zum Beispiel Instandhaltungskosten > 25 % der Neubaukosten). Die Nachrechnungen sind auf jeden Fall vollumfänglich durchzuführen, da Defizite häufig in relativ gering beanspruchten Bereichen zum Beispiel aufgrund von Bewehrungsabstufungen größer sind als im Bereich der (vermeintlich) "kritischen Schnitte". Anhand der Nachrechnungsergebnisse kann abgeschätzt werden, ob zusätzlich zu Erhaltungs- auch (größere) Ertüchtigungsmaßnahmen notwendig sind und die Umsetzung wirtschaftlich vertretbar ist. In diesen Fällen wäre es u. U. ausreichend, die "Grenzzustände der Tragfähigkeit" zu untersuchen – und zwar nicht erst in Nachrechnungsstufe 1, sondern gleich in Stufe 2. Schließlich können in Nachrechnungsstufe 1 nur in Ausnahmefällen (4 von 146) "alle geführten" Nachweise erfolgreich geführt werden.

Durch die Trennung zwischen Nachrechnungsstufe 1 und 2 wird der Rechen- und Dokumentationsaufwand in vielen Fällen unnötig vergrößert. Ob und welche "Stufe 2-Stellschrauben" letztlich verwendet werden/wurden, geht aus den Formblättern (Anlage 2 der NR-Ril) in der Regel nicht hervor.

In Anbetracht der vorliegenden ca. 140 "Formblattpakete" kann klar festgestellt werden, dass die tabellarische Auflistung von Einzelergebnissen gemäß Anlage 2 der NR-Ril keine optimale Form der Ergebnisaufbereitung darstellt. Die Tabellen sind in Summe (für ein Bauwerk) weder übersichtlich noch vermitteln sie ein umfassendes Bild von den Nachrechnungsergebnissen. Als Vergleichsgrundlage sind sie hilfreich, jedoch nicht ausreichend. Es fehlt eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.

Aus Gesprächen mit Mitarbeitern verschiedener Straßenbauverwaltungen und eigenen Überlegungen kristallisiert sich heraus, dass eine Ergebniszusammenstellung bestehend aus zwei Komponenten vorteilhafter sein könnte: eine Kurzzusammenfassung und ein ausführlicher Bericht (Details: siehe Schlussbericht).

Die formlose, ca. ein- bis zweiseitige Kurzzusammenfassung soll einen raschen Überblick über alle wesentlichen Aspekte der erfolgten Nachrechnung liefern. Hauptpunkte sind die Benennung von rechnerischen Defiziten und die empfohlenen Maßnahmen.

Platz für ausführlichere Ergebniszusammenstellungen und grafische Darstellungen bietet die zweite Komponente – der "Bericht zur Nachrechnung". Aus den grafischen Darstellungen sollte hervorgehen, dass die Nachweise über die gesamte Bauwerkslänge unter Berücksichtigung evtl. vorhandener Bewehrungsabstufungen durchgeführt wurden.

Die Nachrechnung von Brücken stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar, die im Vergleich zur Ausführungsplanung von Neubauten komplexer sein kann. So müssen zum Beispiel Stabwerkmodelle zur Nachrechnung von Querträgern aus den Bewehrungsplänen zu entnehmenden vorhandenen Bewehrung entwickelt werden. Es ist daher zu empfehlen, das "Vier-Augen-Prinzip" bei der Kontrolle von statischen Berechnungen durch einen Prüferingenieur, welches sich für Neubauten bewährt hat, auch bei Nachrechnungen anzuwenden. Die Schäden, die durch unvollständige Nachrechnungen (evtl. Vortäuschen von nicht vorhandenen Sicherheiten) oder durch unnötige Maßnahmen entstehen (zum Beispiel Ersatzneubau statt Ausnutzung von tatsächlich vorhandenen Tragreserven), können erheblich sein.

5 Literatur

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Ausgabe 05/2011 (2011a)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden; Ausgabe 2011 (2011b)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen. Vorlage an den Ausschuss für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages vom 22. Mai 2013. Berlin, 2013

Colditz, B.: Neue Strategien zur Ertüchtigung von Straßenbrücken. Tagungsband zur "Brücken- und Ingenieurbautagung 2012", 25.-27.04.2012, München (2012)

Goj, K.: DIN-Fachbericht 101 "Einwirkungen auf Brücken", Ausgabe März 2009. Ersatz des Lastmodells LM1 durch das Lastmodell LMM. Schreiben vom 21.03.2012

Kaschner, R. et al.: Stellungnahme – Ermittlung relevanter Bauwerke zur Ertüchtigung des Brückenbestandes der Bundesfernstraßen. Sachstand: Mai 2009. Datenerhebung und Priorisierung: September 2009. BASt, Bergisch Gladbach, September 2009 (Die Stellungnahme liegt dem Forschungsnehmer nur in Auszügen vor.)

Müller, A. et al.: Nachrechnung der Donaubrücke Ingolstadt (BAB A9) bis zur Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 9, S. 603-619