



## Lebenszyklusorientierte Bewertung von Segmentbrücken in Stahlverbundbauweise

Claus Berndorfer  
Martin Hierl  
Martin Mensinger  
Günter Seidl  
Tim Zinke

# Lebenszyklusorientierte Bewertung von Segmentbrücken in Stahlverbundbauweise

Innovationen bilden die Grundlage für Effizienzsteigerung. Im Brückenbau können innovative Bauweisen dazu beitragen, die in den nächsten Jahrzehnten anstehenden Sanierungs- und Ersatzbaumaßnahmen zu bewältigen. In diesem Beitrag wird der Schwerpunkt auf Segmentbrücken gelegt. Hierzu werden bereits erstellte Pilotprojekte beschrieben, Weiterentwicklungen erläutert und die Segmentbauweise hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit im Lebenszyklus mit den beiden „klassischen“ Bauweisen der Verbundfertigteilbrücken und Spannbetonbrücken verglichen. In die Gegenüberstellungen werden sowohl Herstellungs-, Nutzungs- und Rückbaukosten als auch die monetarisierten Auswirkungen auf Verkehrsteilnehmer und das Umfeld integriert. Die Ergebnisse stellen eine ganzheitliche Bewertungsgrundlage bereit, die in Entscheidungsfindungen von Bauherren, Planern und Ausführenden einbezogen werden können.

**Stichworte:** Vorfertigung; Analyse, ganzheitlich; Lebenszykluskosten; Kostenrechnung; Straßenbrücke; Segmentbrücke

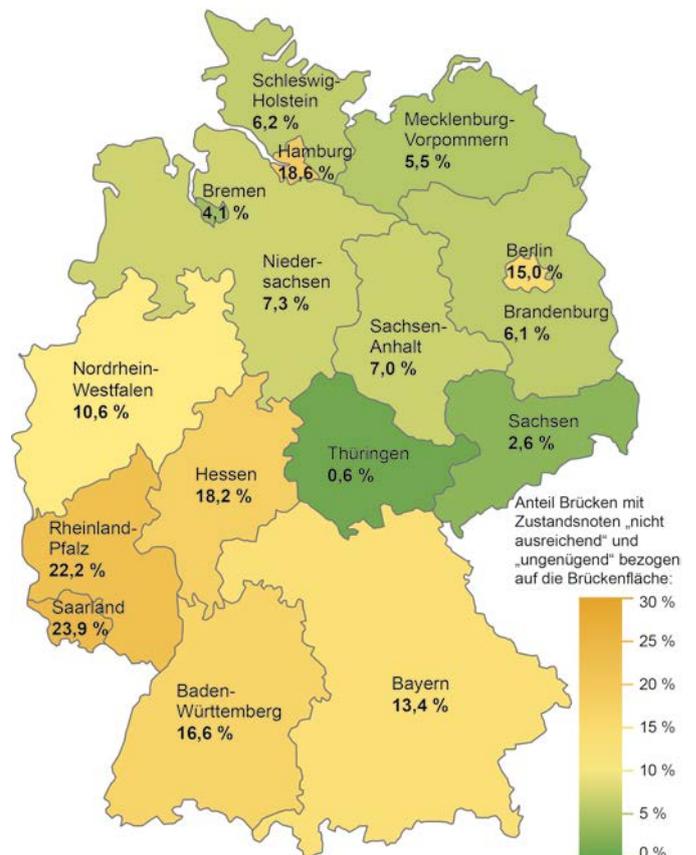
**Life-cycle oriented assessment of composite steel segment bridges.** *Innovations are a basic requirement for efficiency enhancements. Within bridge engineering innovative construction methods can help to handle the rehabilitation and renewal projects accruing in the next decades. For this purpose, already completed pilot projects are described, further developments are illustrated, and the segment construction method is compared with "classical" bridge structures using prefabricated steel-composite components and prestressed concrete. The comparisons focus on the performance of the bridges within the life-cycle and incorporate erection, utilization and removal costs as well as monetized effects on the road user and the community. The results provide a holistic decision basis which can be used within the decision-making process by clients, consultants and contractors.*

**Keywords:** prefabrication; holistic decision basis; life cycle cost; cost calculation; road bridge; segmental bridge

## 1 Bedeutung Straßenbrücken

Brücken sind ein nicht wegzudenkender Bestandteil der deutschen Verkehrsinfrastruktur. Insgesamt gibt es in Deutschland 120 000 Brücken und im Schnitt kommt so eine Brücke auf 690 Einwohner. Ein Drittel aller deutschen Brücken (ca. 39 000 Stück) sind Bestandteil des Fernstraßennetzes und verlaufen im Zuge von Autobahnen oder Bundesstraßen. Sie sind Grundvoraussetzung für

Mobilität sowie den überregionalen Warentransport und bilden ein Rückgrat für ein funktionierendes Wirtschaftssystem. Allerdings ist das Straßenbrückenportfolio in Deutschland in einem schlechten Zustand. Bild 1 zeigt den Anteil der Fernstraßenbrückenfläche pro Bundesland, die von den Straßenbauämtern mit einem nicht ausreichenden oder ungenügenden Zustand klassifiziert werden. In den nächsten Jahren wird daher eine große Anzahl an Sanierungs- und Neubaumaßnahmen erforderlich sein, um die Leistungsfähigkeit des Fernstraßennetzes zu erhalten.



**Bild 1.** Prozentualer Anteil der Brückenflächen von Fernstraßenbrücken pro Bundesland, bei denen aufgrund ihres Zustandes unmittelbarer Handlungsbedarf besteht, Datengrundlage BAST, SIB-Bauwerke (Stand März 2016)  
**Fig. 1.** Percentual share of the bridge deck area of highways and federal roads per state, which must be rehabilitated because of their condition state, data basis BAST, SIB-Bauwerke (March 2016)

Die Entscheidungskriterien, die zu einer Auswahl eines Brückentyps führen, basierten früher fast ausschließlich auf dem Herstellungspreis. Mittlerweile spielen zunehmend auch weitere Kriterien wie Kosten in der Nutzungsphase oder Auswirkungen auf den Verkehr eine Rolle (wenn auch meist in einem geringen Umfang). In Bezug auf diese Kriterien können neue, innovative Brückenbauweisen dazu beitragen, Lebenszykluskosten zu minimieren und externe Verkehrskosten zu senken. Die Segmentbauweise ist hierfür ein Beispiel und zeichnet sich durch sehr hohe Vorfertigungsgrade und eine gegenüber dem klassischen Fahrbahnaufbau deutlich veränderte konstruktive Ausbildung aus. Diese Bauweise wird in [1] zum ersten Mal vorgestellt, in diesem Beitrag wird die Konstruktionsweise sowie Weiterentwicklungen beschrieben und es findet eine Bewertung der Leistungsfähigkeit im Lebenszyklus statt.

## 2 Konstruktionsweise und Tragwirkung

Die Bauherren sind zunehmend mit Ersatzneubauten im bestehenden Streckennetz betraut. Dabei spielen neben den Kosten für den Neubau vor allem die verkehrlichen Belange der Maßnahme eine immer wichtigere Rolle. Modulare Bausysteme bieten dabei den Vorteil, kurze Bauzeiten realisieren zu können und die optimale Qualität der Bauteile durch die Vorfertigung im Werk zu garantieren.

Ein neuartiges Konstruktionsprinzip für den Brückenbau wurde durch Max Bögl in Zusammenarbeit mit dem Büro SSF Ingenieure entwickelt und im Pilotprojekt „Brücke Greißelbach“ umgesetzt. Die Bauweise weist eine hohe Qualität und dank der Vorfertigung sehr kurze Bauzeiten sowie eine große Nutzungsflexibilität auf.

Generell hat eine Fahrbahnplatte zwei Funktionen inne: Zum einen trägt sie die punktuellen Radlasten aus Verkehr in die Hauptträger ab. Die Betonfahrbahnplatte hat sich als Flächentragelement als einfach zu realisierende und wirtschaftliche Lösung im Brückenbau etabliert. Die zweite Funktion ist ihre Beteiligung an der Längstragwirkung des Brückentragwerks. Wird auf die Beteiligung an der Längstragwirkung verzichtet, können quer vorgespannte Segmente auf die Hauptträger aufgelegt werden, ohne eine Verbundfuge auszubilden. Nachteilig ist dabei, dass die Hauptträger, meist als VFT-Träger ausgebildet, höher ausgelastet werden.

Auf der anderen Seite überwiegen aber die Vorteile in der Funktionalität der Segmente. Die Segmente können in Längsrichtung vorgespannt werden, ohne dass Vorspannung über die Verbundfuge in die Hauptträger abfließt. Die Segmente bilden damit ein voll vorgespanntes Brückendeck, das, anders als bei konventionellen Verbundbrücken, auch unter Verkehrslasten ungerissen bleibt. Das Konzept einer Rahmenbrücke mit einer Fahrbahn aus Segmenten wurde erstmals bei der Brücke bei Greißelbach über die Bundesstraße B299 von Neumarkt in der Oberpfalz nach Neustadt an der Donau angewandt. Das Bauwerk gliedert sich in ein flach gegründetes Rahmenbauwerk mit VFT-Trägern mit 33,50 m Stützweite und der frei aufliegenden Fahrbahnplatte aus vorgespannten Beton-Segmenten. Der Querschnitt nimmt zwei Fahrstreifen, eine Abbiegespur und einen Geh- und Radweg auf (s. Bild 2).



*Bild 2. Brücke mit direkt befahrenen Segmenten aus der Vogelperspektive; der Übergang von der Asphalt- zur Betonfahrbahn ist gut zu erkennen (Max Bögl, Foto Reinhard Mederer)*

*Fig. 2. Bridge with directly usable segments from bird view; the transition from asphalt to concrete road is apparent (Max Bögl, photo Reinhard Mederer)*

Die zwölf Fahrbahnsegmente aus Selbstverdichtendem Beton haben eine Länge von 16,05 m, eine Breite von 2,66 m und eine Mindestdicke von 0,35 m. Die Breite wird durch die Pfosteneinteilung der Leitplanken bestimmt. Die Segmente liegen auf gevouteten Hauptträgern auf, die mit den Unterbauten das Haupttragssystem bilden. Die beiden Riegel bestehen aus Stahlverbundfertigteilträgern mit luftdicht verschweißten Hohlkästen, die über Verbunddübeln mit dem Betonfertigteilträgerflansch schubsteif verbunden sind. Die VFT-Träger weiten sich von 1,40 m im Feldbereich und auf 3,30 m an den Widerlagern auf, um die Zugkräfte aus dem Stützmoment über die Bewehrung in der Widerlagerwand zu verankern.

Die Segmente werden im Spannbett wirtschaftlich in Serie hergestellt. Die Passung der Segmente lässt sich ähnlich dem Match-Cast-Verfahren durch exaktes Schleifen und eine ausreichende Griffigkeit der Oberfläche durch mechanisches Stocken erreichen. Zur Auflagerung der Segmente werden Elastomerstreifen verwendet, die durch ein Edelstahlblech abgedeckt werden, um Verzerrungen im Elastomer infolge von Temperaturunterschieden auszuschließen. Die Segmente werden nach dem Verlegen vor Ort durch Spannglieder zusammengespannt. Ein präziser, geschliffener Querkraftdübel in der Stirnfläche sichert die Ebenflächigkeit zwischen den Segmenten. Ein Profil an den Stirnseiten, das im Tunnelbau zur Abdichtung gegen drückendes Wasser bei Tübbingern verwendet wird, dichtet die Segmentstoßfugen ab.

Die Betonsegmente werden aus selbstverdichtendem Beton mit sehr dichter Oberfläche gefertigt. Eine Abdichtung wird deshalb nicht mehr notwendig. Die Segmente können direkt befahren werden. Asphalt als Fahrbahn wird überflüssig. Mit dem Entfall der Abdichtung werden die Kappen im Konstruktionsbeton ausgebildet (s. Bild 3). Die Segmentfahrbahn ist an einer Widerlagerseite monolithisch eingebunden. Am anderen Widerlager gleicht eine Übergangskonstruktion die Bewegungen aus Temperatur aus.

Die Segmente und Verbundfertigteilträger werden im Werk hergestellt. Die Hauptträger mit rund 80 t Verlege-



*Bild 3. Blick auf die fertiggestellte Brücke Greißelbach (Quelle Max Bögl, Foto Reinhard Mederer)*  
 Fig. 3. View on the completed Greißelbach Bridge (source Max Bögl, photo Reinhard Mederer)



*Bild 4. Blick auf die Brücke Greißelbach während der Montage der Fahrbahnelemente (Quelle Max Bögl)*  
 Fig. 4. View on the Greißelbach Bridge during the assembly of the road elements (source Max Bögl)

gewicht werden nach dem Verlegen mit den Widerlagern über das Rahmeneck verbunden.

Das Verlegen der 35 t schweren Segmente fand für die Greißelbachbrücke im Dezember 2014 unter schlechten Wetterbedingungen statt (s. Bild 4). Durch die Vorfertigung ließ sich das Bauwerk in außergewöhnlich guter Qualität herstellen. Die Fahrbahnplatte zeigt keine Anzeichen von Wasserfahnen – ein Beweis für die Funktionsfähigkeit des Dichtprofils.

Durch die Trennung der Fahrbahnsegmente vom Haupttragwerk entsteht ein Bauwerk, das durch seine Modularität einen deutlich höheren Vorfertigungsgrad ausweist. Die Qualität in der Herstellung liegt deutlich über den Brücken, die vor Ort hergestellt werden und die Bauzeit verringert sich deutlich. Durch die aufgelegten Segmente kann die Anpassung oder Instandsetzung der Fahrbahnplatte mit einem geringen Einfluss auf den Verkehr sehr einfach durchgeführt werden. Die Nutzungsflexibilität ist durch die modulare Bauweise gegeben.

### 3 Weiterentwicklung – Segmentbrücke der 2. Generation

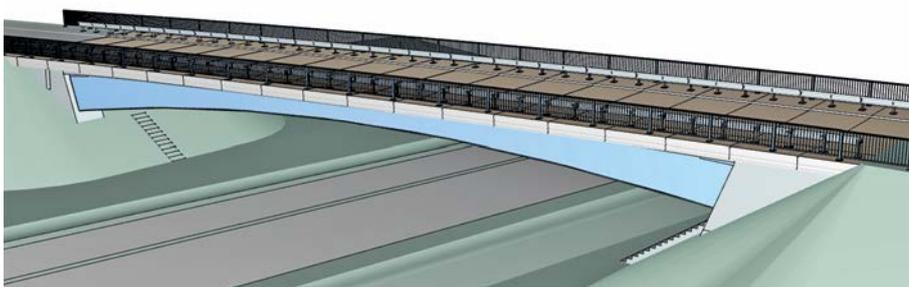
Im Zuge der Ortsumfahrung Mühlhausen wird eine weitere Segmentbrücke errichtet. Basierend auf den Erfahrungen aus der Segmentbrücke Greißelbach wurde die Konstruktion weiterentwickelt, um dem Ziel einer noch schnelleren, wirtschaftlicheren und weitgehend industriell vorgefertigten Bauweise gerecht zu werden. Bereits bewährte Konstruktionsprinzipien werden beibehalten und die conse-

quente Weiterentwicklung im Bereich der Unterbauten forciert.

Es werden weiterhin die vorgefertigten, direkt befahrenen Fahrbahnplattenelemente eingesetzt, die ohne zusätzliche Abdichtung und separater Kappenkonstruktion auskommen. Die Auflager und Fahrbahnelemente auf zwei in Brückenlängsrichtung verlaufenden Verbundfertigteilträgern ohne Schubverbund werden ebenso weiterverfolgt. Die Längsträger verlaufen jedoch jetzt in einer Flucht mit den Flügelwänden, so dass auf eine konventionelle Widerlagerstirnwand verzichtet werden kann. Gleichzeitig werden damit die Rahmeneckmomente direkt in den steifen Widerlagerflügel eingeleitet.

Die bei der Segmentbrücke Greißelbach gewählte Konstruktion der Widerlager mit hinterschnittenen Flügeln ist eine sehr zeitintensive Bauweise, die bei der Segmentbrücke im Zuge der Ortsumfahrung Mühlhausen nicht weiterverfolgt wird. Hier werden, wie in Bild 5 zu sehen, die Fahrbahnelemente bis an die Hinterkante der Flügel geführt, so dass auf der Baustelle keinerlei konventionelle Kappenarbeiten und Abdichtungsarbeiten notwendig werden. Gleichzeitig wird auf eine Einspannung des ersten Fahrbahnelementes in das Widerlager zur Abtragung von Längs- und Querkraften verzichtet.

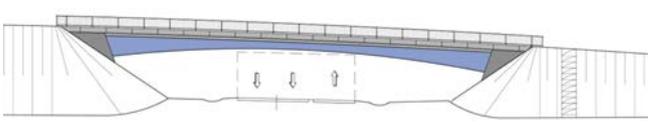
Bei der Segmentbrücke der zweiten Generation werden die Fahrbahnelemente schwimmend auf den Längsträgern gelagert und über eine vorgespannte Längsfesthaltung an den Widerlagern zwängungsfrei gelagert. Damit können einerseits die Kräfte aus Temperaturschwankungen kon-



*Bild 5. Computeranimation der Segmentbrücke OU Mühlhausen (Max Bögl)*

*Fig. 5. Computer animation of the segment bridge OU Mühlhausen (Max Bögl)*

Tabelle 1. Beschreibung der untersuchten Brückentypen skaliert auf eine einheitliche Länge von 52 m  
 Table 1. Description of the analyzed bridge types scaled on a uniform length of 52 m

Variante	Beispielbild	Bauwerkstyp	Beschreibung
1		Segmentbrücke Länge 52 m nach Bauart Greißelbachbrücke (Seg-Gr)	Rahmenbauwerk, 2 Längsträger geschweißt als Hohlkästen, Betonflansch
2		Segmentbrücke 2. Generation (Planungs- stadium), Länge 52 m (Seg-2.Gen)	Rahmenbauwerk, 2 Längsträger (geschweißt als Hohlkästen), Betonflansch
3		Verbundfertigteilbrücke (VFT-Brücke), Länge 52 m	Rahmenbauwerk, 4 VFT-Träger
4		Spannbetonbrücke, Länge 52 m	Zweifeld-Fertigteilbrücke, 8 FT-Träger

trolliert begrenzt und mögliche Blow-Up-Effekte verhindert werden. Andererseits werden Bremslasten sicher von der Fahrbahnebene in die Widerlager abgeleitet.

Die Fahrbahnelemente sind in Längsrichtung mit intern verlaufenden, verbundlosen Spanngliedern vorgespannt, wobei die Spannglieder nur in den Kappenbereichen angeordnet werden. So kann im Havariefall eines Fahrbahnelements ohne große bauliche Maßnahmen die Längsvorspannung gelöst und der Austausch eines Fahrbahnelements binnen kürzester Zeit durchgeführt werden.

Mit diesen Weiterentwicklungen der Brückenkonstruktion in Segmentbauweise wird das Ziel verfolgt, Brücken auf der Basis von industriell weitgehend vorgefertigten und qualitativ hochwertigen Bauteilen binnen kürzester Zeit zu errichten und dabei die Beeinträchtigung des Verkehrs während der Bauzeit auf ein Minimum zu reduzieren.

## 4 Grundlagen der lebenszyklusorientierten Bewertung

### 4.1 Untersuchte Varianten

Analysen unter Einbeziehung von Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus ergeben Sinn, wenn Ausführungsvarianten miteinander verglichen werden. Werden bei diesen Vergleichen dieselben Eingangswerte (Kostenansätze, Monetarisierungsansätze, etc.) für alle Varianten verwendet, liefern die prozentualen Ergebnisunterschiede der Varianten eine quantitative Entscheidungsgrundlage (Ergebnisdarstellung auf einer Kardinalskala). Die absolute Höhe der Berechnungsergebnisse spielt dann eine weniger bedeutende Rolle. Im Rahmen dieses Beitrags werden vier unterschiedliche Ausführungsvarianten verglichen, die in Tabelle 1 beschrieben sind.

Um einen einheitlichen Vergleich unterschiedlicher Brückentypen durchführen zu können, muss gewährleistet sein, dass alle zu vergleichenden Brücken für dieselbe Bauaufgabe einsetzbar sind. Daher werden alle Brücken auf

eine lichte Weite von 52 m (zwischen den Widerlagern) und eine Brückenbreite von 10,5 m skaliert, die Massenermittlung erfolgt für diese Abmessungen. Die Bilder in Tabelle 1 stellen exemplarisch die vier Ausführungsvarianten dar.

### 4.2 Angewendete Methoden

In den letzten acht Jahren sind in Deutschland Bewertungsmethodiken entwickelt worden, die eine ganzheitliche Bewertung bzw. eine Nachhaltigkeitsanalyse von Verkehrsinfrastrukturen und im speziellen Brücken ermöglichen. Eine Übersicht der existierenden Ansätze findet sich in [2] und [3]. Die in diesem Beitrag angewendeten Methoden basieren auf den Entwicklungen der Forschungsprojekte mit dem Akronym „NaBrü“, Nachhaltigkeitsanalysen von Brückenbauwerken ([4] bis [6]).

Ein Fokus wird im Folgenden auf die Anwendung der beiden modellgestützten Methoden der Lebenszykluskostenrechnung und der externen Kostenrechnung gelegt. Für beide Methoden werden aufeinander abgestimmte Eingangsdaten verwendet, so dass sich für die verschiedenen Konstruktionsvarianten ihre Vorteilhaftigkeit in Bezug auf bauwerksbezogene Kosten und externe Kosten quantifizieren lassen.

### 4.3 Lebenszykluskostenrechnung

Die Lebenszykluskostenrechnung ist in der ISO 15686-5 [7] verankert. Dort werden allgemeine Grundlagen für Systemgrenzen, einzubeziehende Komponenten und wichtige Einflussgrößen beschrieben, die sich auch auf Brückenbauwerke anwenden lassen. Darüber hinaus existiert die bisher als Entwurf veröffentlichte Framework-Norm E DIN EN 15643-5 für Ingenieurbauwerke [8], in der Randbedingungen für eine Lebenszykluskostenrechnung beschrieben werden. Beide Normen werden bei den Analysen berücksichtigt.

Die Umsetzung der Berechnungen findet auf Grundlage der Gl. (1) statt. Dort sind die berücksichtigten Kostenkomponenten spezifiziert und es wird deutlich, dass alle in der Nutzungsphase anfallenden Kosten der einzelnen Bauteilgruppen auf einer jährlichen Basis berechnet werden:

$$LZK = K_{He} + K_{VF} + \sum_{BG=1}^N \sum_{a=1}^{A-1} (1+i)^{-a} \cdot K_{IS,BG} + K_{VF} + K_I + (1+i)^{-A} \cdot K_R + K_{VF} \quad \text{Gl. (1)}$$

- mit
- LZK auf den Zeitpunkt  $t = 0$  diskontierte Lebenszykluskosten der gesamten Brücke (Barwert)
  - $K_{He}$  Herstellkosten zum Zeitpunkt  $t = 0$  inklusive Kosten für Planung und Baustelleneinrichtung
  - $K_{VF}$  Kosten für die Einrichtung, Vorhaltung, ggf. Umbau und Rückbau der maßnahmenabhängigen Verkehrsführung
  - $K_{IS,BG}$  Instandhaltungskosten unterteilt nach Bauteilgruppen (inklusive Baustelleneinrichtung)
  - $K_I$  Inspektionskosten (Brückenzwischen- und -hauptprüfung)
  - $K_R$  Rückbaukosten
  - BG einzelne Bauteilgruppen (insgesamt N-Stück)
  - a Zeitpunkt (Jahr) der jeweiligen Instandhaltungsmaßnahme im Lebenszyklus
  - A Analysezeitraum (für Brücken 100 Jahre)
  - i realer Diskontierungszinssatz (2%)

Es ist erkennbar, dass alle genannten Kostenarten (ohne Verwaltungskosten) auf das Erstellungsjahr diskontiert (abgezinst) werden. Als realer (inflationbereinigter) Diskontierungszinssatz wird ein Ansatz von 2% verwendet. Alle Kosten sind auf das Jahr 2016 bezogen.

#### 4.4 Externe Kostenrechnung

Im Zuge der externen Kostenrechnung werden Auswirkungen auf die Verkehrsteilnehmer, die Anwohner und die

Bevölkerung berechnet und in Geldeinheiten übersetzt (monetarisiert). Eine Einführung in die externe Kostenrechnung für Verkehrsinfrastrukturen findet sich in [9]. Im Rahmen der Analysen für die hier untersuchten Brücken werden Schadstoffausstöße, Fahrzeiten, Betriebs- und Treibstoffkosten in die Analysen einbezogen.

Als Randbedingungen wird hier davon ausgegangen, dass alle Brücken im Zuge einer Landesstraße verlaufen und eine dreistreifige Autobahn überspannen. Die Autobahn besitzt eine Verkehrsbelastung (DTV) von 70 000 Fz/Tag, einen Schwerverkehrsanteil von 13,6% und eine durchschnittliche Länge der Mehrkilometer im Fall einer Sperrung von 4 km. Für den oben liegenden Sachverhalt der Landesstraße wird angenommen, dass ein DTV von 6 000 Fahrzeugen und einen Schwerverkehrsanteil von 5,3% zugrunde liegt. Da es sich in dem Szenario um einen Ersatzneubau handelt, muss für die Bauzeit die oben liegende Landesstraße gesperrt werden. Die durchschnittliche, zusätzliche Länge für das Benutzen der Umleitungsstrecke wird hier mit 3 km angenommen.

Für die Berechnung der externen Kosten werden alle Effekte berücksichtigt, die durch die Einrichtung der Baustelle im Vergleich zum ungestörten (Normal-)betrieb entstehen. Dies ist in Bild 6 visualisiert. Bei Einrichtung einer Verkehrsführung für die Brückenerstellung wird im Baustellenbetrieb die Fahrgeschwindigkeit reduziert. Es entstehen Zeitverluste und die Schadstoffausstöße verändern sich durch die im Vergleich zur ungestörten Fahrt unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten. Wenn die Grenzkapazität der Baustelle bei zu starker Verkehrsbelastung überschritten wird, dann kommt es im Annäherungsbereich zu einer Stop&Go-Fahrweise, wodurch die negativen Effekte auf die Autofahrer deutlich ansteigen.

Die Auswirkungen auf den Verkehr hängen vor allem von der Bauzeit und Verkehrsführung ab. Da wie beschrieben eine Modellierung auf Bauteilebene stattfindet, basieren diese beiden Parameter auf Bauzeitenplänen, die auf Einzelmaßnahmenebene erstellt wurden. Daraus werden die in Tabelle 2 dargestellten Informationen abgeleitet.

Um die externen Kosten für den oben und unten liegenden Sachverhalt berechnen zu können, muss zwi-

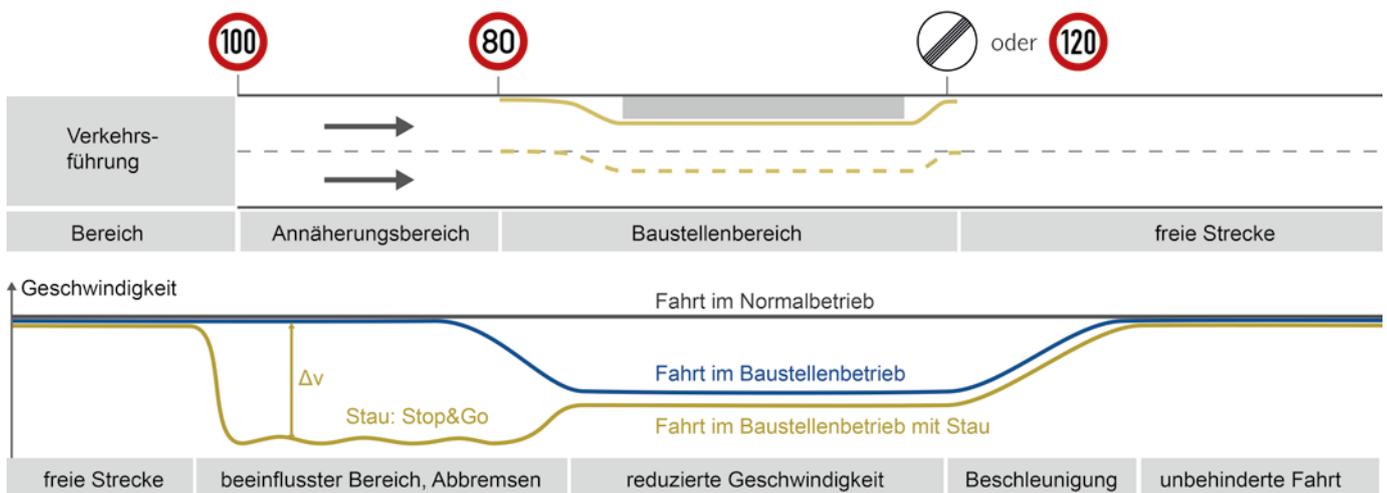


Bild 6. Baustellenlayout Brückenbaustelle (oben) und qualitativer Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten Normalbetrieb – Baustellenbetrieb (unten) [10]

Fig. 6. Bridge construction site layout (top) and qualitative comparison of the driving speed for normal operation and limited operation due to construction activities [10]

Tabelle 2. Einzelmaßnahmenbezogene Herstellungsschritte für alle Brückenbauteile mit Dauer und Verkehrsführung auf der untenliegenden Autobahn (AB) und der obenliegenden Landesstraße

Table 2. Erection steps based on single construction measures of all bridge components with period and traffic routing on the motorway below the bridge and the country road topside of the bridge

Einzelmaßnahme	Ansatz in Tagen	Wochenäquivalent in Wochen	Zeit Parallelaktivitäten in Wochen	Verkehrsführung AB	Verkehrsführung Überführung
Verkehrsführung einrichten	3	1	3	3+3	0+0
Freimachen, Abbruch Bestandsbauwerk	12	2		3+3*	0+0
Erdarbeiten, Fundamente	24	3	8	3+3	0+0
Widerlager	44	7		3+3	0+0
Überbausegmente herstellen	36	5	–	–	–
Montage	15	2	8	3+3 <sup>#</sup>	0+0
Schleppplatten	26	4		3+3	0+0
Brückenausstattung	41	6		3+3	0+0
Verkehrsführung rückbauen	3	1	1	3+3	0+0
Baustellenräumung	8	1	–	3+3	0+0
Gesamtwochen Herstellung			20	# zusätzlich Sperrung Samstag	
Sperrdauer Überführung Bauzeitenplan			18	* zusätzlich Sperrung WE	
Verkehrsführung BAB Bauzeitenplan			14		

Tabelle 3. Zusammenstellung der brückenbezogenen Bauzeiten, Sperrdauern und Verkehrsführungsdauern

Table 3. Compilation of the bridge dependent construction periods, blocked periods and traffic routing periods

Variante	Brücke	Gesamtwochen Herstellung	Sperrdauer Überführung oben liegend	Dauer der Verkehrsführung Autobahn unten liegend
1	Segmentbrücke Greißelbachbrücke	20 Wochen	18 Wochen (0+0)	14 Wochen (3+3)
2	Segmentbrücke 2. Generation	20 Wochen	18 Wochen (0+0)	14 Wochen (3+3)
3	Verbundfertigteilbrücke (VFT-Brücke)	23 Wochen	21 Wochen (0+0)	14 Wochen (3+3)
4	Spannbetonbrücke mit Fertigteilen	24 Wochen	22 Wochen (0+0)	8 Wochen (3+3), 6 Wochen (2+2)

schen der Herstellungsdauer, der Sperrdauer der Überführung für den Ersatzneubau und der Dauer, für die auf der unten liegenden Autobahn eine Verkehrsführung eingerichtet werden muss, unterschieden werden. Die Ergebnisse für die Errichtungsphase sind für die vier zu vergleichenden Brücken in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Bauzeiten und die damit zusammenhängenden Verkehrsführungen werden darüber hinaus für alle Baumaßnahmen in der kompletten Nutzungsphase und in der Rückbauphase bestimmt, wobei die Werte auf den im nächsten Abschnitt beschriebenen Lebenszyklusszenarien basieren.

#### 4.5 Szenarien zur Abbildung des Lebenszyklus

Für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen ist es erforderlich, dass die in der Nutzungsphase anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis eines Instandhaltungsszenarios definiert werden. Hier findet für alle Brücken eine zustandsbestimmte Instandhaltungsstrategie Anwendung, deren Ziel eine Durchführung von Erneuerungsmaßnahmen auf Grundlage von Inspektionsergebnissen ist. Charakteristisch ist die Zusammenfassung von mehreren Baumaßnahmen in der Nutzungsphase zu einem Zeitpunkt, so dass die Verkehrsauswirkungen, Bau-

stelleneinrichtungs- und Verkehrsführungskosten minimiert werden.

Für Standardbauteile werden die Ergebnisse aus [10] als Ansatz für die Erneuerungszyklen verwendet. Diese sind in Bild 7 verarbeitet. Für die Fahrbahnsegmente lassen sich aufgrund von nicht existenten Realdaten keine empirischen Ergebnisse ableiten. Da ein Beton mit der Qualität C 50/60 hergestellt im Werk verbaut wird, wird davon ausgegangen, dass eine Lebensdauer von 50 Jahren erreicht werden kann. Durch den Einsatz der Fahrbahnelemente und dem damit einhergehenden Wegfall vieler Brückenbauteile (Lager, Straßenaufbau), reduziert sich die Anzahl der durchzuführenden Erneuerungsmaßnahmen bei der Segmentbrücke gegenüber den VFT- und Spannbetonvarianten.

Da für die Segmentbrücke bisher keine Praxiserfahrungen in der Nutzung vorliegen, werden zwei zustandsbestimmte Strategien definiert, wobei die konservative Strategie bei dem Austausch der Fahrbahnübergänge sowie bei der Erneuerung der Ausstattung Standardwerte verwendet. Diese Werte funktionieren bei einer Maßnahmenbündelung im Jahr 33 und 66 sehr gut, führen aber bei der Segmentbrücke, bei der eine Maßnahmenbündelung im Jahr 50 vorteilhaft wäre, zu der Notwendigkeit eines zusätzlichen Bauteilaustauschs der beiden Bauteilgruppen

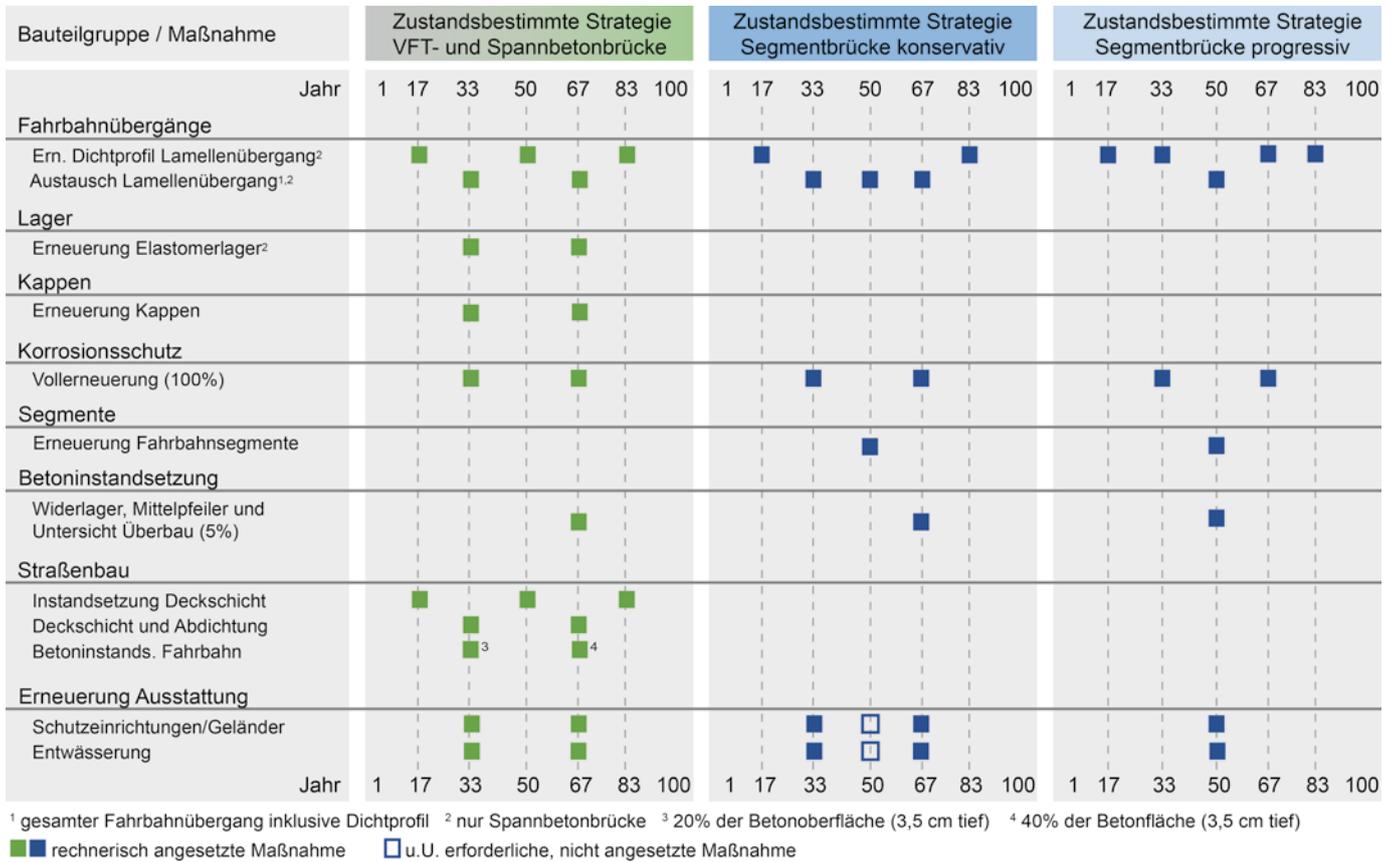


Bild 7. Bauteilbezogene Erneuerungszyklen der vier Brückenvarianten  
 Fig. 7. Element specific renewal cycles for the four bridge variants

innerhalb des Lebenszyklus von 100 Jahren. Daher wird in die Analysen zusätzlich die progressive Strategie integriert, die auf eine Durchführung von Erneuerungsmaßnahmen im Jahr 50 ausgerichtet ist.

**5 Ergebnisse**  
**5.1 Lebenszykluskosten**

Die Lebenszykluskosten beinhalten alle bauwerksbezogenen Kosten, die in der Herstellungs-, Nutzungs- und Rückbauphase anfallen. Sie lassen sich wie in Bild 8 als Summenlinie über den Lebenszyklus darstellen. Der sich mit zunehmenden Jahren leicht abflachende Verlauf der Kostenkurven resultiert aus der Anwendung des Diskontierungszinssatzes von 2%.

In Bild 8 ist erkennbar, dass die Unterschiede bezüglich der Herstellkosten gering sind. Auch die Kostenentwicklung in der Nutzungsphase weist vergleichsweise einheitliche Entwicklungen auf. Vor allem bei der Segmentbrücke in der Bauweise Greißelbachbrücke ist aber ersichtlich, dass im Jahr 50 eine große gebündelte Maßnahme durchgeführt wird, während bei den anderen beiden Brückenvarianten Maßnahmen in den Jahren 33 und 66 durchgeführt werden. Die insgesamt entstehenden Lebenszykluskosten liegen für alle drei Varianten sehr dicht beieinander, wobei durch die Segmentbrücke (unter Ansatz der progressiven Instandhaltungsstrategie) die geringsten Lebenszykluskosten entstehen, knapp gefolgt von der Spannbetonbrücke.

Der Vergleich aller vier Brückenvarianten mit aufsummierten Kosten für die drei Lebenszyklusabschnitte zeigt

Bild 9. Dort sind zusätzlich auch die Ergebnisse der konservativen und progressiven Instandhaltungsstrategie für die beiden Segmentbrücken ausgegeben, wobei sich hierbei nur die Kosten in der Nutzungsphase unterscheiden. Die Herstellungskosten sind identisch.

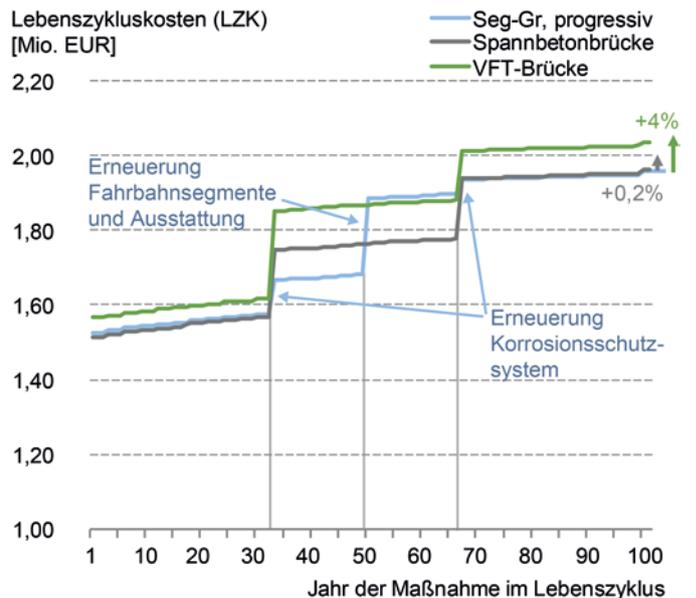


Bild 8. Summenlinie Lebenszykluskosten (LZK) der Brückenvarianten (Diskontierungszinssatz 2%)  
 Fig. 8. Summed Life-Cycle Costs of the bridge variants (discount rate 2%)

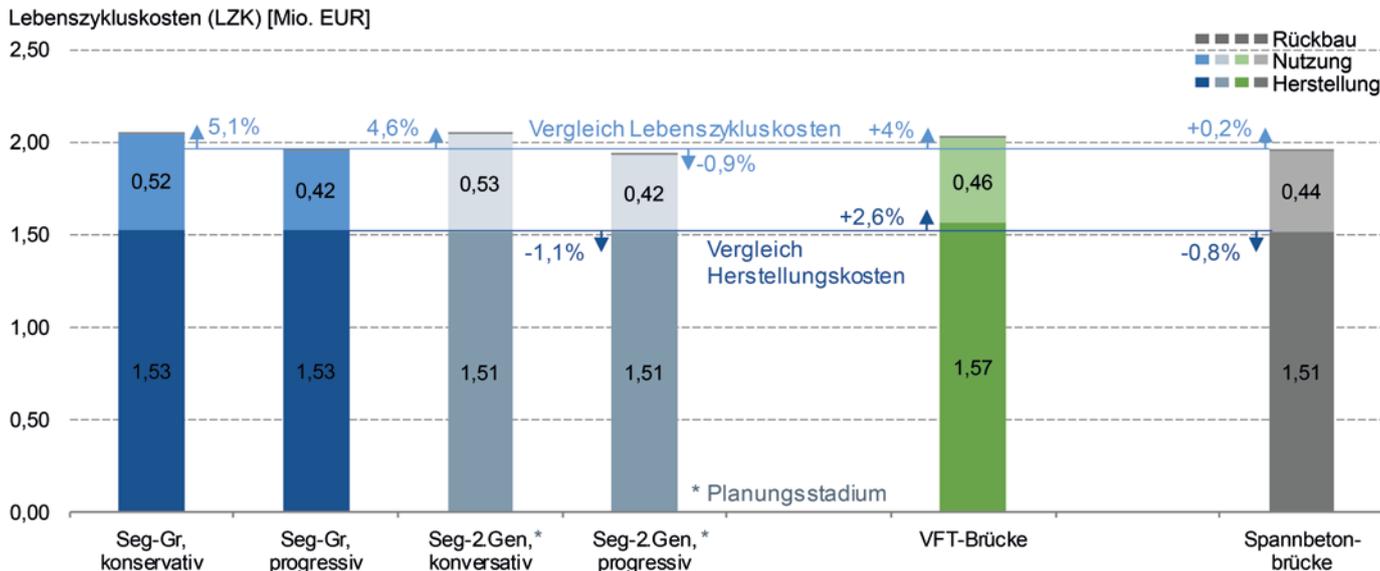


Bild 9. Lebenszykluskosten (LZK) unterteilt nach Lebenszyklusphasen (Diskontierungszinssatz 2%)  
 Fig. 9. Life-Cycle Costs grouped into life-cycle stages (discount rate 2%)

Insgesamt erzeugt die Segmentbrücke der 2. Generation die geringsten Herstellungskosten, wobei hier angemerkt werden muss, dass die Ergebnisse bei dieser Variante auf Planungsdaten beruhen, während die restlichen Varianten auf Grundlage von Ausführungsdaten berechnet wurden. Es liegt damit eine unterschiedliche Eingangsdatenqualität vor. Die Kosten in der Nutzungsphase liegen bei allen Varianten im Bereich von 0,42 und 0,53 Mio. € und weisen damit auch nur geringe Unterschiede auf. Durch die Diskontierung sind die Rückbaukosten bei einem Bezug auf das Herstellungsjahr in der Ergebnisgrafik kaum zu sehen und spielen für die Höhe der Lebenszykluskosten eine sehr untergeordnete Rolle.

### 5.2 Externe Kosten

Im Gegensatz zu den bauwerksbezogenen Kosten entstehen externe Kosten bei den Verkehrsteilnehmern und der Bevölkerung und müssen auch von diesen Parteien getragen werden. Bild 10 zeigt, dass die externen Kosten des gesamten Lebenszyklus mindestens doppelt so hoch sind wie die Brücken-Lebenszykluskosten. Sie sollten daher auf jeden Fall mit in die Entscheidungsfindungen einbezogen werden.

Für die aufsummierten externen Kosten spielen vor allem die externen Zeitkosten (Verspätungen) und die Betriebskosten (erhöhter Treibstoffverbrauch und Fahrzeug-

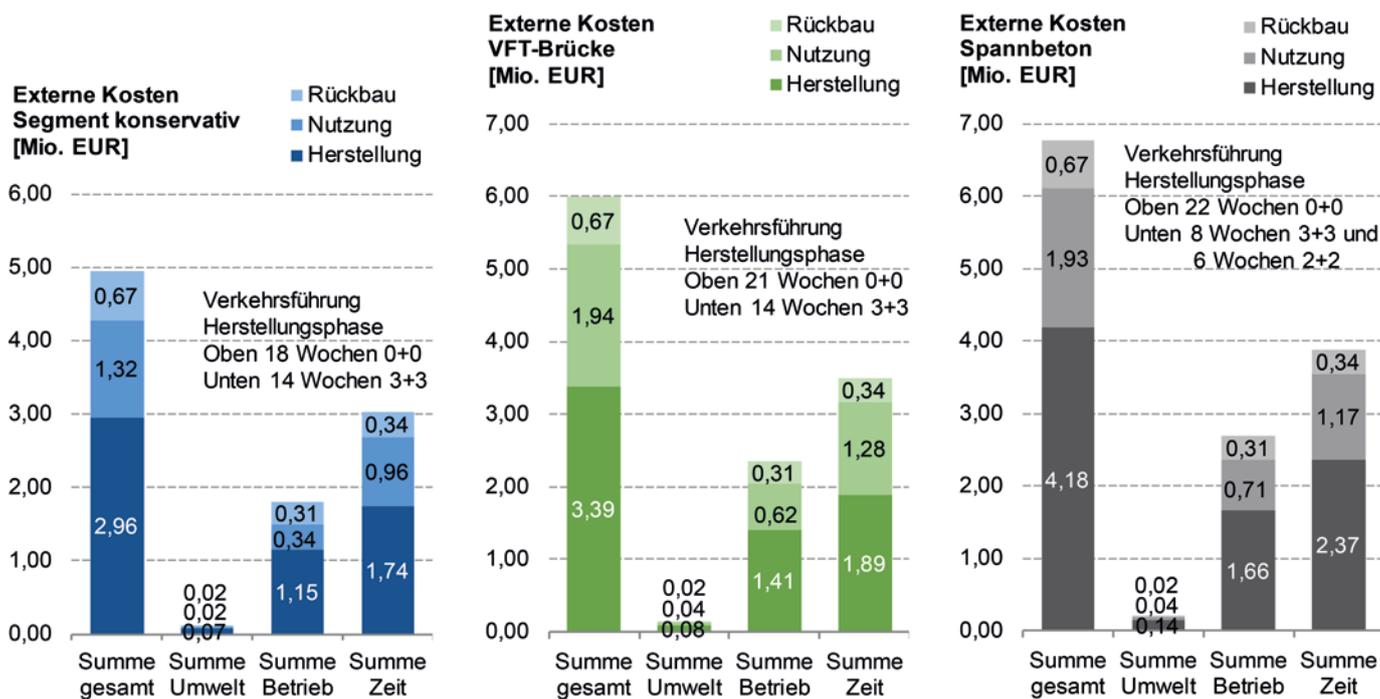


Bild 10. Vergleich der entstehenden externen Kosten unterteilt nach Lebenszyklusphasen  
 Fig. 10. Comparison of the resulting external costs grouped into life-cycle stages



Bild 11. Gegenüberstellung Lebenszykluskosten (LZK) und externe Kosten (ext. K.) für die Brückenvarianten  
 Fig. 11. Comparison of Life-Cycle Costs (left) and external costs (right) for the bridge variants

abnutzung) eine Rolle, monetarisierte Umwelteffekte sind von geringer Bedeutung. Die Herstellungsphase verursacht ca. 60% der gesamten externen Kosten des Lebenszyklus. Die Unterschiede der drei Brückenvarianten in der Herstellung resultieren aus den unterschiedlich langen Sperr- und Verkehrsführungszeiten und sind in Bild 10 noch einmal angegeben. Insgesamt ist erkennbar, dass durch die Bauzeitbeschleunigung der Segmentbrücken externe Kosten signifikant reduziert werden können und vor allem bei viel befahrenen Straßen deutliche Vorteile entstehen.

### 5.3 Ergebniszusammenführung

Der Vorteil der parallelen Berechnung von Lebenszykluskosten und externen Kosten ist, dass die Ergebnisse beider Methoden in Euro ausgegeben werden und somit eine Gegenüberstellung möglich ist. Es muss hierbei beachtet werden, dass beide Methoden unterschiedliche Kostenarten ausgeben, die von verschiedenen Parteien getragen werden müssen. Daher wird eine Addition nicht empfohlen.

Bild 11 stellt für die drei verschiedenen Brückenvarianten die Lebenszykluskosten (LZK, links) und die externen Kosten (Ext. K., rechts) gegenüber. Die Spannbetonbrücke weist beim Vergleich mit der ersten Generation der Segmentbrücke und der VFT-Integralbrücke die geringsten Lebenszykluskosten auf, erzeugt allerdings auch bei weitem die größten externen Kosten im gesamten Lebenszyklus. Vor allem durch die hohen Vorfertigungsgrade und schnelle Montagezeiten bei Ausführung einer Segmentbrücke können die externen Kosten um 27% gesenkt werden. Gleichzeitig steigen die LZK um ca. 5%, allerdings auch nur, wenn die erste Segmentbrückengeneration gebaut wird und von einer konservativen Instandhaltungsstrategie ausgegangen wird.

Erfolgen weitere Optimierungen, wie die Ausführung der Segmentbrückenbauweise der 2. Generation oder die Umsetzung einer progressiven Instandhaltungsstrategie, liegen die Lebenszykluskosten der Segmentbrücke sogar leicht unterhalb der Kosten der Spannbetonbrücke. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind in Bild 12 als Berechnungsergebnisse dargestellt. Durch Anwendung der progressiven Instandhaltungsstrategie ist auch eine leichte Senkung der externen Kosten möglich, da die Bauweise der Segmentbrücke allerdings schon erhebliche Bauzeitbeschleunigungen beinhaltet, ist die Verbesserung mit 2,4% gering.

### 6 Zusammenfassung

Neue Bauweisen mit hohen Vorfertigungsgraden bieten großes Potential, Baustein für die Lösung der anstehenden Erneuerungsmaßnahmen des deutschen Straßenbrückenportfolios zu werden. Der Zustand der deutschen Brücken macht es erforderlich, in den nächsten Jahren eine Vielzahl an Maßnahmen anzustoßen. Dieser Sachverhalt ist von der Politik erkannt worden, was u. a. daran ersichtlich ist, dass der Bund in dem im August 2016 beschlossenen Verkehrswegeplan 2030 Investitionen i. H. v. 133 Mrd. € in Bundesfernstraßen angekündigt hat. Das ist im Vergleich zu früheren Programmen eine deutliche Aufstockung.

Die Bereitstellung von Geldmitteln gewährleistet aber noch nicht ihre richtige Verwendung. Die Analyse verschiedener Ausführungsvarianten unter Anwendung von lebenszyklusorientierten Berechnungsmethoden kann in diesem Zusammenhang eine Entscheidungsfindung hervorragend unterstützen. Die in diesem Beitrag vorgestellten Segmentbrücken sind bezüglich der entstehenden Lebenszykluskosten vorteilhafter als klassische VFT-Brücken. Sie sind aus Kostensicht eine Alternative zu Spannbeton-



Bild 12. Gegenüberstellung Lebenszykluskosten (LZK) und externe Kosten (ext. K.) für die Variante Segmentbrücke  
Fig. 12. Comparison of Life-Cycle Costs (left) and external costs (right) for the segment bridges

brücken und führen darüber hinaus zu einer deutlichen Reduzierung der externen Kosten. Die Ergebnisse können von Planern, Bauherren und Behörden genutzt werden, um zukünftig in Ausschreibungen und Entscheidungsverfahren über den reinen Herstellungspreis hinausgehende Kriterien zu integrieren.

#### Literatur

- [1] Seidl, G., Hierl, M., Brey, M., Mensinger, M., Stambuk, M.: Segmentbrücke Greißelbach als Stahlverbundbrücke ohne Abdichtung und Asphalt. Stahlbau 85 (2016), Heft 2, S. 126–136.
- [2] Zinke, T., Ummenhofer, T.: Nachhaltigkeit und Resilienz – Zukünftige Kriterien bei der integrativen Bewertung von Brücken. Stahlbau 83 (2014), Heft 2, S. 74–82.
- [3] Fiedler, A., Offergeld, B., Funke, J., Eschenbruch, K., Fandrey, A., Röwekamp, H.: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur. Forschungsprojekt: FE 09.0163/2011/LRB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 271, 2016, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- [4] Kuhlmann, U., Maier, P., Zinke, T., Ummenhofer, T., Pfaffinger, M., Mensinger, M. et al.: Nachhaltigkeitsanalysen von Stahlverbundbrücken. Stahlbau 83 (2014), Heft 7, S. 476–486.
- [5] Kuhlmann, U., Maier, P., Zinke, T., Ummenhofer, T., Fischer, M., Schneider, S.: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 112, 2015, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- [6] Zinke, T., Ummenhofer, T., Schneider, S., Beck, T., Lenz, K., Neudeck, M., Koch, E.: Ganzheitliche Analyse von Stahl- und Verbundeisenbahnbrücken – Teil 2: Ökologische, ökonomische und betriebliche Bewertungen. Stahlbau 86 (2017), Heft 2, S. 112–122.
- [7] ISO 15686-5:2017: Hochbau und Bauwerke – Planung der Lebensdauer – Teil 5: Kostenberechnung für die Gesamtlebensdauer.
- [8] E DIN EN 15643-5:2016: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken – Teil 5: Rahmenbedingungen für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken; Deutsche und Englische Fassung prEN 15643-5:2016.

[9] Zinke, T., Schmidt-Thrö, G., Ummenhofer, T.: Entwicklung und Verwendung von externen Kosten für die Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastruktur. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 8, S. 524–532.

[10] Zinke, T.: Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, Dissertation, 2016. Online verfügbar unter <http://www.ksp.kit.edu/download/1000053695>.

#### Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Claus Berndorfer,  
MAX BÖGL,  
Lyoner Straße 14,  
60528 Frankfurt am Main,  
cberndorfer@max-boegl.de

Dipl.-Ing. Martin Hierl,  
MAX BÖGL,  
Leiter Technisches Büro Ingenieurbau,  
92301 Neumarkt i. d. OPf.,  
mhierl@max-boegl.de

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. (NDS) Martin Mensinger,  
Technische Universität München,  
Lehrstuhl für Metallbau,  
Arcisstraße 21,  
80333 München,  
mensinger@tum.de

Dr. Günter Seidl,  
SSF Ingenieure AG,  
Schönhauser Allee 149,  
10435 Berlin,  
gseidl@ssf-ing.de

Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tim Zinke,  
Karlsruher Institut für Technologie,  
Leiter Arbeitsgruppe Life-Cycle-Engineering,  
Otto-Ammann-Platz 1,  
76131 Karlsruhe,  
t.zinke@kit.edu

