

10

Bautechnik

Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau

85. Jahrgang
Oktober 2008
Heft 10, S. 687–695
ISSN 0932-8351

Sonderdruck
A 1556

Stephanie Heitel, Holger Koriath, Christoph S. Herzog, Günter Specht

Vergleichende Lebenszykluskostenanalyse für Fußgängerbrücken aus unterschiedlichen Werkstoffen



Stephanie Heitel
 Holger Koriath
 Christoph S. Herzog
 Günter Specht

Vergleichende Lebenszykluskostenanalyse für Fußgängerbrücken aus unterschiedlichen Werkstoffen

Bei Infrastrukturobjekten können im Laufe der Nutzungsdauer erhebliche Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen anfallen. Die Wahl der baulichen Variante sollte deshalb nicht nur anhand des Anschaffungspreises sondern unter Berücksichtigung der entstehenden Folgekosten erfolgen. Vor diesem Hintergrund wurde in einer Studie mit der Deutschen Bahn AG und der Peter Maier Leichtbau GmbH untersucht, welcher Werkstoff für Fußgängerbrücken die beste Gesamtwirtschaftlichkeit verspricht. Dabei wurde die Gesamtwirtschaftlichkeit anhand einer Lebenszykluskosten-Analyse beurteilt.

Untersucht wurden Fußgängerbrücken als sog. Personenüberführungen aus den konventionellen Brückenbaustoffen Holz, Stahl und Stahlbeton sowie aus dem Werkstoff Aluminium. Als Vergleichswert für die Lebenszykluskosten wurde die Annuität herangezogen. Unsicherheiten bei der Kostenprognose wurden mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen eingegrenzt. Für das im Rahmen der Untersuchung betrachtete System stellte sich die Aluminiumbrücke als die wirtschaftlichste Variante heraus.

Comparative life-cycle cost analysis of pedestrian bridges made from different materials.

Considerable maintenance costs may accrue during the life time of infrastructure objects. Therefore, the choice of construction options should not only be made based on purchase price, but also taking into account expected follow-up costs. Against this background, a study conducted with Deutsche Bahn AG and Peter Maier Leichtbau GmbH analyzed which construction material promises the best overall cost-effectiveness for pedestrian bridges. Cost-effectiveness was evaluated based on a life-cycle-cost analysis.

This study investigated pedestrian bridges built of conventional construction materials wood, steel and reinforced concrete, as well as bridges made of aluminium alloy. An annuity was chosen to be the comparison value for life-cycle costs. For coping with uncertainties in cost determination and forecasting, diverse sensitivity analyses were used to verify their effects on the final results. Aluminium alloy came out to be the most cost-effective option for the bridge system investigated within this study.

1 Problemstellung und Grundlagen

Entscheidungen über den Kauf von Infrastrukturobjekten werden auch heute noch nicht selten alleine aufgrund des Anschaffungspreises der Investition getroffen, während die Folgekosten für den Betrieb, die Unterhaltung, den Abriss und die Entsorgung unberücksichtigt bleiben. Eine solche Vorgehensweise führt zu suboptimalen Entscheidungen. Die Folgekosten machen über die gesamte Lebensdauer oft einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten aus. Niedrige Anschaffungspreise können ein Mehrfaches an Folgekosten mit sich bringen.

Sollen die Gesamtkosten einer Investition vor der Anschaffungsentscheidung abgeschätzt werden, so ist eine Analyse der Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Costs oder abgekürzt LCC) angebracht. Unter den LCC sind alle anfallenden Kosten eines Systems von der Anschaffung über den Betrieb bis zur Entsorgung zu verstehen [1]. Bei der Deutschen Bahn AG (DB) wird die Analyse der LCC bei Investitionsentscheidungen zunehmend herangezogen.

Beim Bau von Fußgängerbrücken steht speziell mit dem Werkstoff Aluminium eine innovative Alternative zu den konventionellen Werkstoffen Holz, Stahl und Stahlbeton zur Verfü-

gung. Aluminium verspricht vor allem aufgrund der Korrosionsbeständigkeit geringe Folgekosten. Fußgängerbrücken aus Aluminium, die in Systembauweise gefertigt werden, kommen seit den 90-er Jahren vermehrt zum Einsatz. Investitionen in Fußgängerbrücken aus Aluminium sind aber nach wie vor im Vergleich zur Gesamtzahl der gebauten Fußgängerbrücken gering. Diese Zurückhaltung könnte daran liegen, dass die Anschaffung von Fußgängerbrücken aus Aluminium als relativ teuer gilt. Auch andere technische und ökologische Barrieren könnten eine Rolle spielen, so z. B. fehlende Erfahrung, Bedenken wegen unzureichender Stabilität und Korrosionsbeständigkeit oder fehlende Normen und Richtlinien [2].

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen einer Studie mit der DB und der Peter Maier Leichtbau GmbH (pml) untersucht, welcher Werkstoff für Fußgängerbrücken bzw. Personenüberführungen (PÜ) die beste Gesamtwirtschaftlichkeit verspricht. Außerdem wurden technische Anforderungen geprüft, die an dieser Stelle nicht im Vordergrund stehen. Es wird davon ausgegangen, dass die technischen Anforderungen einer PÜ im Bereich der relevanten lichten Weiten und Längen voll erfüllt werden. Dies wurde bereits vielfach theoretisch und praktisch nachgewiesen und auch in dieser Studie nicht grundsätzlich in Frage gestellt. Primär ging es um die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von PÜ aus verschiedenen Materialien mit Hilfe einer Lebenszykluskostenanalyse (LCCA). Eine solche Analyse ist nicht nur für einen Eisenbahninfrastrukturbetreiber wichtig, sondern auch für Gebietskörperschaften und sonstige Infrastrukturinvestoren.

2 Verfahren der Lebenszykluskostenanalyse (LCCA)

Gemeinsam ist unterschiedlichen Verfahren der LCCA, dass sie Kosten über mehrere Lebenszyklusphasen eines Objekts hinweg aufsummieren, um einen möglichen Trade-Off zwischen Erst- und Folgekosten aufzuzeigen und darauf basierend die Gesamtkosten eines Systems aktiv zu gestalten (vgl. z. B. [1], [3], [4]). Während ursprüngliche Definitionen nur die Kosten für den Investor und den Betreiber berücksichtigten, schließen neuere Definitionen häufig zusätzlich Kosten für Dritte mit ein. Bei Infrastrukturmaßnahmen sind dies volkswirtschaftliche Faktoren, wie z. B. Kosten für reduzierte Fahrtgeschwindigkeit im Baustellenbereich sowie für verursachte Staus und Unfälle (vgl. z. B. [5], [6]). In diesem Fall setzen sich die LCC aus den direkten Kosten der Herstellung, den indirekten Kosten für die Nutzung und Beseitigung sowie aus externen Kosten zusammen [5].

Bei der LCCA handelt es sich nicht um eine eigenständige Methode. Die LCCA ist vielmehr eine „bestimmte Betrachtungsperspektive und systematische Vorgehensweise, die sich bekannter Methoden bedient“ [7]. Angewendet werden insbesondere Methoden aus der Investitionsrechnung, z. B. Methoden der Systembewertung, Verfahren der Kostenprognose (z. B. Kostenstrukturprognose, Kostenschätzbeziehungen, Identifikation von Kostentreibern), Methoden zur Berücksichtigung des Risikos (z. B. Risikoanalyse, Amortisationsrechnung, Sensitivitätsanalyse) sowie die Berücksichtigung der Zeitstruktur durch das Rechnen mit diskontierten Werten und Inflationsraten [3]. Ablauf und Methoden einer LCCA sind in Bild 1 dargestellt.

In der Studie wurden die verschiedenen Methoden der LCCA, inklusive der bei der DB angewendeten Methoden, intensiv analysiert und im Blick auf ihre Eignung für den Vergleich von Fußgängerbrücken evaluiert. Ein besonderer Schwerpunkt waren dabei die in Wissenschaft und Praxis für eine LCCA verfügbaren Verfahren der Investitionsrechnung. Tabelle 1 zeigt diese Verfahren mit Berechnungsformel bei Berücksichtigung der direkten und indirekten Kosten.



Bild 1. Ablauf und Methoden der LCCA
Fig. 1. Procedure and methods for the LCCA

Tabelle 1. Verfahren der Investitionsrechnung für die LCCA
Table 1. Investment appraisal methods used for the LCCA

Größe	Statische Verfahren	Dynamische Verfahren
Summe der Kosten	Kostenvergleichsrechnung $LCC = I + \sum U_t + A$	Kapitalwert (KW) $LCC = I + \sum_{t=1}^n \frac{U_t}{(1+i)^t} + \frac{A}{(1+i)^n}$
Kosten pro Nutzungsjahr	Durchschnittliche, jährl. LCC $LCC = \frac{I + A}{n} + \sum_{t=1}^n \frac{U_t}{n} = \frac{I + A}{n} + u$	Annuität (AN) $LCC = \frac{KW}{\sum_{t=0}^n (1+i)^t} = KW \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$
Break-Even-Zeitpunkt	Statische Break-Even-Analyse	Dynamische Break-Even-Analyse
<p>I = Investitionskosten, U_t = Unterhaltungskosten im Jahr t, A = Abbruchkosten n = Nutzungsdauer, u = durchschnittliche, jährliche Unterhaltungskosten i = Kalkulationszins</p>		

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden alle Zahlungen statisch, d. h. unabhängig vom Zahlungszeitpunkt, aufsummiert. Damit gehen sie zu den Preisen des Betrachtungszeitpunktes und ohne eine Berücksichtigung von Inflation oder Verzinsung in die Berechnung ein [8]. Vorteilhaft sind bei dieser Methode die mathematische Einfachheit und der geringere Aufwand für die Informationsbeschaffung [4].

Bei der Kapitalwertmethode werden dagegen alle Zahlungen eines Betrachtungszeitraums mit einem einheitlichen Zinssatz – dem sogenannten Kalkulationszinssatz (i) – auf einen Zeitpunkt auf- bzw. abgezinst. Die Summe dieser verzinnten Zahlungen ist der Kapitalwert (KW) [8].

Da bei der Betrachtung von Infrastrukturobjekten hauptsächlich Kos-

ten und keine Erlöse eingerechnet werden, ist es üblich, die Kosten als positive Werte in die Kapitalwertberechnung einzurechnen, während teilweise vorhandene Erlöse (z. B. durch Schrottverkauf am Ende der Nutzungsdauer) als mathematisch negative Einnahmen einfließen [9]. Somit ist die Alternative am vorteilhaftesten, bei der der Kapitalwert am kleinsten ist.

Bei der Kapitalwert-Formel in Tabelle 1 liegt die Annahme zugrunde, dass sämtliche Kosten und Kostenparameter (z. B. Löhne, Materialpreise) sowie der Kapitalzins gleichermaßen von der Geldentwertung betroffen sind. In der Realität unterscheiden sich die Preissteigerung der Baukosten und die inflationären Einflüsse auf den Kalkulationszinssatz.

Um unterschiedliche Preissteigerungen für verschiedene Kostenarten anzusetzen, kann die Berechnung entsprechend modifiziert werden. Aufgrund des erheblichen Mehraufwands, der dadurch entsteht, sowie aufgrund der schweren Vorhersagbarkeit der Preissteigerungen wird die Abweichung aber i. d. R. in Kauf genommen [9].

Die Berechnung des Kapitalwerts zum Vergleich von Investitionsalternativen eignet sich insbesondere dann, wenn die Nutzungsdauern aller Alternativen gleich sind. Bestehen Unterschiede, kommt die Annuitätenmethode zum Einsatz. Die Annuitätenmethode beruht auf demselben Modell wie die Kapitalwertmethode. Sie wandelt den Kapitalwert jedoch in eine andere Zielgröße, die Annuität (AN), um. Zur Berechnung werden die Investitionskosten und alle im Betrachtungszeitraum anfallenden Zahlungen unter Beachtung des Kalkulationszinseszinses so verteilt, dass durchschnittliche und über alle Perioden gleich hohe Zahlungen entstehen, die als Annuität bezeichnet werden. Die Annuität eines Investitionsobjekts und der Kapitalwert des gleichen Objekts sind äquivalent, und lassen sich finanzmathematisch ineinander überführen [8].

Während Kapitalwert und Annuität bei gleicher Nutzungsdauer der Alternativen zum selben Ergebnis führen, kann es bei unterschiedlichen Nutzungsdauern zu konträren Einschätzungen über die Wirtschaftlichkeit der Alternativen kommen [8]. Für die dynamische Investitionsrechnung wird deshalb bei unterschiedlichen Nutzungsdauern die Annuität als Vergleichswert herangezogen. Dasselbe gilt für die statischen Kennwerte der Kostensumme und der durchschnittlichen jährlichen Kosten.

In der Praxis wird allerdings häufig der Kapitalwert als Vergleichskennzahl bei den LCCA herangezogen, auch bei unterschiedlichen Nutzungsdauern (vgl. z. B. [4], [9], [10]). Grund könnte sein, dass mit dem Begriff der LCC die Summe aller im Lebenszyklus anfallenden Kosten assoziiert wird.

Um das Problem der unterschiedlichen Nutzungsdauern bei Verwendung des Kapitalwerts in den Griff zu bekommen, werden zwei verschiedene Taktiken angewandt: Üblicherweise wird ein Restwert für die Alternativen

angesetzt, deren Nutzungsdauer mit Ende des Betrachtungszeitraums noch nicht beendet ist. Bei Festlegung des Betrachtungszeitraums sollte darauf geachtet werden, dass für jede Alternative zumindest eine der größeren Instandhaltungsmaßnahmen innerhalb des Betrachtungszeitraumes anfällt [11]. Bei korrektem Ansatz des Restwertes führt die Berechnung zum selben Ergebnis wie die Annuität. Allerdings ist der korrekte Restwertansatz schwierig, so dass die Methode zur Restwertermittlung die Qualität der Berechnungsverfahrens maßgeblich beeinflusst [4]. Die übliche Berechnung als lineare Verteilung des Wertes über die Nutzungsdauer kann zu Verzerrungen führen, da dabei nicht berücksichtigt wird, dass die Wertminderung ggf. größer als eine lineare Abwertung war und erst eine Instandsetzungsmaßnahme, die nach dem betrachteten Zeitraum anfallen würde, den Wert des Objekts wieder anhebt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei den vorherrschenden LCC-Methodiken hauptsächlich die Kapitalwertmethode zum Einsatz kommt. Bei verschiedenen Nutzungsdauern ist allerdings die Anwendung der Annuität zu empfehlen. Statische Verfahren sollten nur für Investitionsentscheidungen mit geringem Wert bzw. kurzer Nutzungsdauer angewandt werden [10]. Bei der DB werden die Prämissen der Investitionsrechnung in DB Invest definiert [12].

Darüber hinaus können Verfahren im Hinblick auf die Art der Eingangswerte unterschieden werden. Für die Berechnung der LCC – und dabei insbesondere für die Folgekosten – können die Eingangswerte nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden. Daher ist ein Trend zu probabilistischen Verfahren, die für unsichere Parameter nicht diskrete Werte sondern Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwenden, erkennbar [13]. Die Durchführung einer solchen wahrscheinlichkeitbasierten Berechnung erfordert eine entsprechende Datenbasis, um die Wahrscheinlichkeitsverteilungen abschätzen zu können. Diese liegen aber nur in bestimmten Bereichen vor, so dass in der Praxis meist der deterministische Ansatz zur Anwendung kommt. Insbesondere bei Bauprojekten mit Unikatscharakter ist eine verlässliche Datenbasis für einen

wahrscheinlichkeitsbasierten Ansatz nicht immer verfügbar. Daher ist die Eingrenzung der Unsicherheit durch Sensitivitätsanalysen für die richtige Interpretation der berechneten Ergebnisse ausschlaggebend.

Bei der folgenden LCC-Analyse für Personenüberführungen wird dementsprechend die Annuität auf Basis deterministischer Eingangswerte als Vergleichswert herangezogen und das Ergebnis mit Hilfe verschiedener Sensitivitätsanalysen verifiziert.

3 Durchführung der LCC-Analyse für Personenüberführungen

3.1 Auswahl vergleichbarer Typen von Personenüberführungen

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die LCC von Fußgängerbrücken als Personenüberführungen (PÜ), bei der DB aus den Werkstoffen Aluminium, Holz, Stahl und Stahlbeton verglichen. Da die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Baustoffe von der Spannweite und dem konkreten System abhängig ist, wird zunächst das betrachtete System definiert.

Ein Brückenbauwerk setzt sich grundsätzlich aus dem Überbau und den Unterbauten zusammen. Beim Überbau handelt es sich vor allem um die überbrückende Konstruktion einschließlich der Lager, dem Brückenbelag und der Geländer. Zu den Unterbauten zählen alle sonstigen Konstruktionselemente, die der Stützung des Überbaus dienen. Sie setzen sich je nach örtlichen Gegebenheiten aus Fundamenten, Widerlagern und Stützen zusammen.

Bei Fußgängerbrücken kommen je nach Zweck und örtlichen Gegebenheiten Aufgänge über Treppen, Rampen oder Aufzüge hinzu. Die Wahl der Aufgänge richtet sich neben den örtlichen Gegebenheiten insbesondere nach der erwarteten Frequentierung der Brücke.

Für die Untersuchung wird eine typische PÜ über Gleise bei der DB herangezogen. Dafür werden die Infrastrukturdaten von bestehenden PÜ der DB Station & Service AG ausgewertet. Auf Grundlage dieser Auswertung wird als System eine PÜ über zwei Gleise ausgewählt, die über Treppen den Zugang zu zwei Bahnsteigen ermöglicht. Die Spannweite beträgt 20 m, die Breite 3 m. Um ein entsprechendes Lichtraumprofil für

den Schienenverkehr einzuhalten wird eine Treppenhöhe von ca. 6,50 m festgelegt. Bild 2 zeigt die betrachtete PÜ mit den genannten Abmessungen.

Da sich das Gewicht des Überbaus möglicherweise auf die Kosten für die Unterbauten auswirken kann, werden die Unterbauten aus Stützen und Fundamenten ebenfalls in das betrachtete System aufgenommen. Neben dem Träger des Brückenüberbaus und den Treppen werden die zentralen Ausbauelemente Lager, Gelände und Bodenbelag berücksichtigt. Bild 3 zeigt die Seitenansicht der Brücke mit den wesentlichen Bestandteilen, die bei der Untersuchung zum betrachteten System zählen.

Für die Analyse erfolgt eine ganzheitliche Betrachtung der anfallenden Kosten. Dadurch wird ermittelt, welchen Anteil die Kostenunterschiede der Werkstoffvarianten im Vergleich zu den Gesamtkosten ausmachen. Berücksichtigt werden sollen sämtliche

Kosten entlang des Lebenszyklus – ab der Entwurfsplanung bis hin zur Verwertung bzw. Entsorgung des Baustoffs beim Abbruch.

Als objektspezifische Randbedingungen werden „normale“ Verhältnisse angenommen, d. h. z. B. gute Untergrundverhältnisse, gute Zugänglichkeit der Baustelle sowie keine extreme Belastung der Atmosphäre während der Nutzungsphase. Die Instandhaltungsstrategie soll entsprechend einem Best-Practice-Ansatz angenommen werden.

Von der Betrachtung werden insbesondere ausgenommen:

- Auswirkungen durch Unfälle und Katastrophen
- Betriebskosten (z. B. für Schneeräumung, Beleuchtung), da sie als variantenneutral gelten und unabhängig von der Werkstoffwahl sind
- Kosten für spezielle Zulassungen durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) sowie Sonderaufwendungen

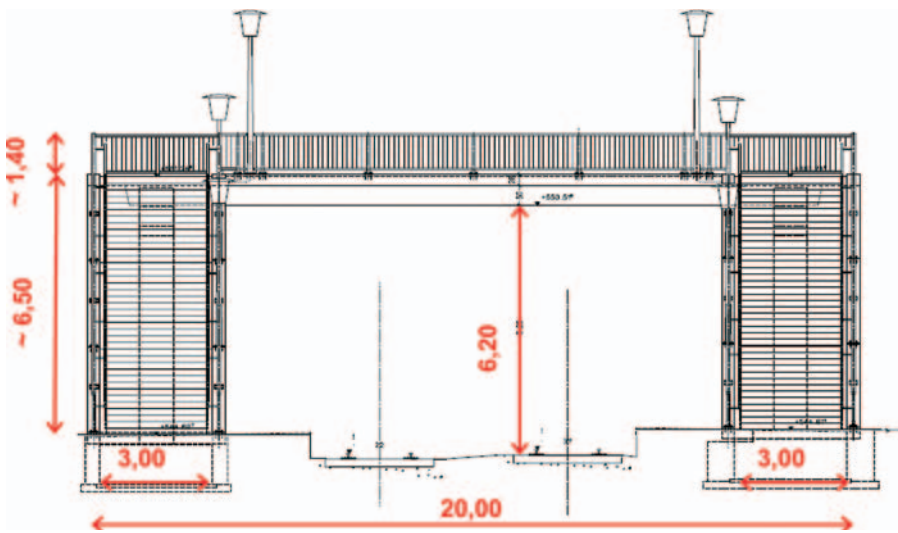


Bild 2. Abmessungen der betrachteten Personenüberführung
Fig. 2. Dimensions of the investigated pedestrian bridge

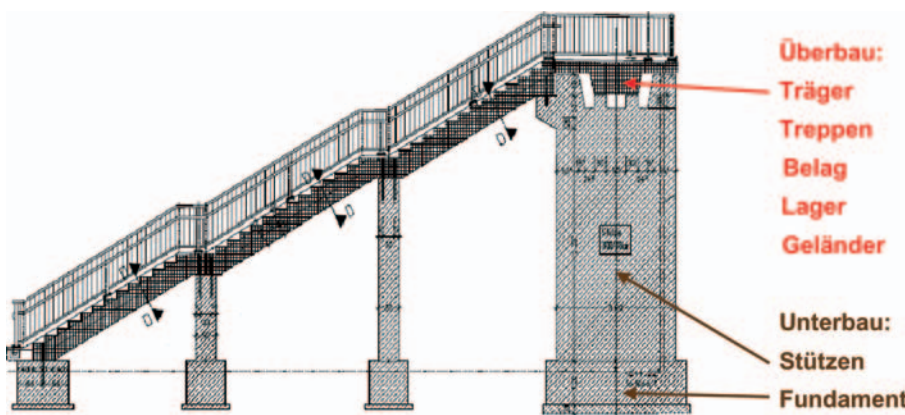


Bild 3. Seitenansicht der betrachteten Personenüberführung mit Bestandteilen
Fig. 3. Side view of the investigated pedestrian bridge with its components

für unternehmensinterne Genehmigungen

- sozioökonomische Kosten und Produktausfallkosten, die aufgrund notwendiger Verkehrssperrungen bei der Errichtung der Fußgängerbrücke, während Instandhaltungsmaßnahmen oder beim Abbruch entstehen

Aus den verfügbaren Brückensystemen wurde für jeden Werkstoff ein System gewählt, das in der Untersuchung analysiert wird (s. Bild 4). Als Aluminiumbrücke wurde das L-System im Gegensatz zum B-System der gleichen Firma für kurze Spannweiten optimiert. Für die Holzbrücke wurde eine Vollwand-Trogbrücke ausgewählt, da diese aufgrund der günstigeren Errichtungskosten und der längeren Lebensdauer gegenüber einer Fachwerkbrücke als wirtschaftlicher anzusehen ist. Bei Stahl eignet sich der Trogquerschnitt, da die Einhaltung des Lichtraumprofils bei einer niedrigeren Treppenhöhe besser realisiert werden kann als bei einer Deckbrücke. Die Vollwandausbildung ermöglicht eine geringere Konstruktionshöhe als eine Fachwerkbrücke. Für die Stahlbetonbrücke wurde ein Plattenbalken gewählt, welcher bei vergleichbaren Systemen üblicherweise zum Einsatz kommt.

Bei den Brücken aus Holz, Stahl und Stahlbeton wird eine Fertigteilmontage angenommen, da heutzutage nur eine Fertigung im Werk wirtschaftlich ist. Die Aluminiumbrücke kann ebenfalls als Fertigteil angeliefert werden. Aufgrund der leichten Konstruktion und der Systembauweise kommt aber häufig auch eine Montage vor Ort in Betracht. Für die durchgeführte Untersuchung wurde eine Montage vor Ort angenommen, da diese im betrachteten Fall günstiger ist.

Da die PÜ ganzheitlich betrachtet wird, erfolgt eine Festlegung der zugehörigen Ausbauteile. Hierbei wird eine möglichst typische Ausbildung unter Berücksichtigung der Regeln zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit festgelegt. Die getroffenen Annahmen sind in Bild 5 dargestellt.

Während im Treppensystem der Aluminiumbrücken bereits Aluminiumstützen integriert sind, die ebenfalls den Überbau mittragen, werden die Stützen für die anderen Brücken einheitlich aus Stahlbeton gewählt.

Bei der Holzkonstruktion wird für die Treppe eine Stahltreppe angenommen, da eine Holzterrasse aufgrund der geringen Widerstandsfähigkeit gegen Feuchte bei dieser Konstruktion nicht gebaut werden soll. Bei Holz sind wegen der minimalen Wärmeausdehnung zudem keine Lager erforderlich.

3.2 Datenerhebung und Kostenprognose

Obwohl Daten bestehender Brücken eine gute Ausgangsbasis für die Kostenfestlegung bilden, dürfen sie nicht kritiklos übernommen werden. Insbesondere sind Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt der jeweiligen Strategie sowie der Studien über die Dauerhaftigkeit im Zusammenhang mit der genauen Aufgabenstellung zu betrachten. Deshalb wird für die Kostenprognose einerseits auf historische Daten, vorhandene Studien und Richtlinien sowie andererseits auf Expertenwissen zurückgegriffen. Auf Grundlage der gesammelten Informationen und unter Ansatz verschiedener Annahmen für diverse Randbedingungen werden möglichst plausible Werte festgelegt, die als Eingangsdaten für die LCC-Berechnung dienen. Bild 6 stellt die Vorgehensweise bei der Datenerhebung und Kostenprognose schematisch dar.

Als Grundlage für die Herstellungskosten liegen verschiedene Preispiegel von PÜ der DB aus den letzten Jahren, aktuelle Angebotsspiegel von Brücken aus den Kommunen Lüneburg und Solingen sowie Baukosten von Fußgängerbrücken des Landes Schleswig-Holstein vor. Darüber hinaus wurde auf Basis der üblichen Kalkulation von pml ein Angebot für das untersuchte System erstellt. Zur weiteren Einschätzung der Unterhaltungskosten und Nutzungsdauern wird die Ablösungsrichtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [14], eine aktuelle Studie über Holzbrücken [15] sowie eine Studie über Brücken der Stadt Düsseldorf [16] herangezogen.

Des Weiteren wurden zahlreiche Gespräche mit Experten geführt. Dazu zählen Gespräche über die Planung und den Bau von Brücken mit Ingenieuren aus verschiedenen Bauunternehmen und Ingenieurbüros sowie ein Gespräch mit einem Brückeninspek-


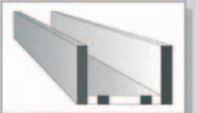


Aluminium	Holz	Stahl	Stahlbeton
L-System	Vollwand - Trog	Vollwand - Trog	Plattenbalken
			
bis 22 m	bis 35 m	bis 35 m	bis 40 m
L-System optimiert für kurze Spannweite	günstiger als Fachwerk sowohl bei Herstellung als auch bei Nutzung	Trogbrücke ermöglicht Einhaltung des Lichtraumprofils bei gleicher Treppenhöhe	Massive Trogwände nicht erwünscht, relativ geringe Konstruktionshöhe des Plattenbalkens

Bild 4. Für die Untersuchung ausgewählte Brückensysteme
Fig. 4. Bridge systems investigated in this study




Aluminium	Holz	Stahl	Stahlbeton
L-System	Vollwand - Trog	Vollwand - Trog	Plattenbalken
			
Eloxierung	Holzverkleidung	Beschichtung	-
Füllstabgeländer	Stahlhandlauf	Stahlhandlauf	Stahlgeländer (verz.)
PU-Beschichtung	Holzbohlenbelag	Gussasphaltbelag	Gussasphaltbelag
Aluminiumtreppe	Stahltreppe	Stahltreppe	Stahlbetontreppe
Aluminiumstützen	Stahlbetonstützen	Stahlbetonstützen	Stahlbetonstützen
Lager	Kein Lager	Lager	Lager

Bild 5. Für die untersuchten Brückensysteme ausgewählte Ausbauteile
Fig. 5. Required components for the investigated bridge systems

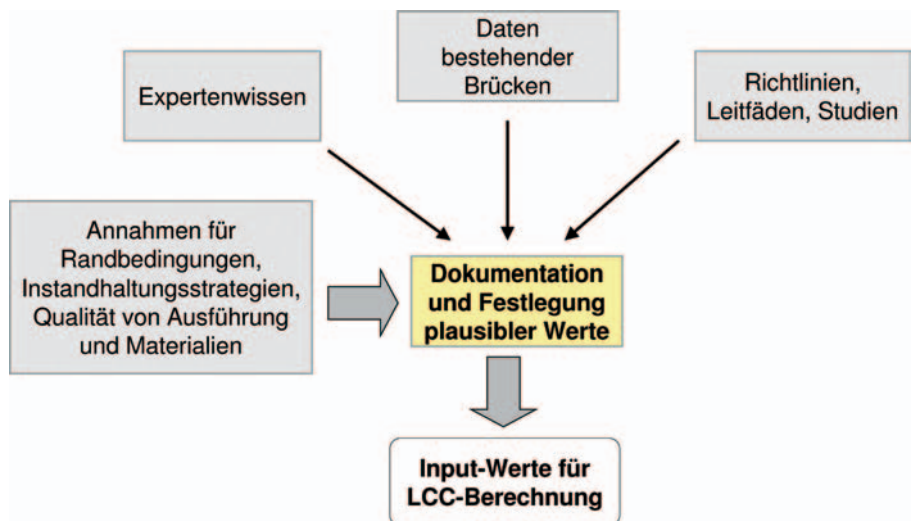


Bild 6. Vorgehensweise bei der Datenerhebung und Kostenprognose
Fig. 6. Procedure for data collection and cost projections

teur zu Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen bei der DB. Diese Gespräche dienen u. a. zur Überprü-

fung und Anpassung von Werten aus anderen Quellen und zur Ergänzung bei fehlender Datenbasis.

Die Datenanalyse und -aufbereitung sowie die Kostenprognose steht vor verschiedenen Herausforderungen. Durch den Unikatscharakter der PÜ mit den verbundenen objektspezifischen Randbedingungen (z. B. Zugänglichkeit, Untergrundverhältnisse) können sich die Kosten von Bauwerk zu Bauwerk selbst bei vergleichbaren Systemen erheblich unterscheiden. Kostenunterschiede ergeben sich auch durch konjunkturelle Schwankungen und standortbedingte Faktoren wie das regionale Preisniveau und die regionale Marktlage. Darüber hinaus ist es erforderlich, bei Kosten, die in früheren Jahren entstanden sind, die Preissteigerung zu berücksichtigen.

Vorliegende Preisspiegel zeigen auch, dass für bestimmte Leistungen teils sehr unterschiedliche Angebotspreise abgegeben werden. Dies wird insbesondere bei den Inspektionskosten deutlich. Im Hinblick auf eine homogene Datenbasis und mit dem Ziel, bei den verschiedenen Varianten gleiche Randbedingungen sowie gleichermaßen realistische Werte festzulegen, werden auf Grundlage der vorhandenen Informationen möglichst plausible ergänzende Annahmen getroffen.

So werden beispielsweise als Nutzungsdauern folgende Werte angenommen: 100 Jahre für die Aluminiumbrücke, 80 Jahre für die Stahl- und die Stahlbetonbrücke, sowie 40 Jahre für die Holzbrücke. Ein weiteres Beispiel stellt die Instandhaltungsstrategie von Stahlbrücken dar: Hier wird der Empfehlung von Vollrath und Tathoff gefolgt (vgl. [16]) – eine kurzperiodische präventive Instandhaltung des Korrosionsschutzes mit einer ersten Ausbesserung nach 15 Jahren, einer zweiten Ausbesserung nach weiteren 10 Jahren sowie einer Vollerneuerung des Korrosionsschutzes nach weiteren 20 Jahren.

3.3 Ergebnisse der LCC-Analyse

Für die LCC-Analyse wird entsprechend dem als geeignet identifizierten Verfahren die Annuität als Vergleichswert herangezogen. Somit wird mit den festgelegten Eingangswerten für jede Alternative die Annuität berechnet. Für öffentliche und private Bauvorhaben werden Kalkulationszinssätze im Bereich von 2,5 % bis 3 % empfohlen (vgl. [10]). Im Rah-

men dieser Studie wird dieser Empfehlung gefolgt und ein Kalkulationszins von $i = 3 \%$ angesetzt. Bild 7 zeigt das Ergebnis. Die LCC sind bei der Aluminiumbrücke am niedrigsten, bei der Holzbrücke am höchsten. Aus der Graphik ist deutlich zu erkennen, dass sich die hohen LCC bei Holzbrücken durch einen relativ großen Anteil an Unterhaltungskosten in der Nutzungsphase ergeben.

Eine erste Risikobetrachtung erfolgt anhand der Break-Even-Analyse. Bild 8 zeigt die diskontierten Summenlinien für jede Variante. Schnittpunkte ergeben sich nur zwischen der Holzbrücke und der Stahlbetonbrücke sowie der Holzbrücke und der Stahlbrücke. Da die Aluminiumbrücke

nicht nur die geringsten Folgekosten sondern zudem die geringsten Anschaffungskosten aufweist, stellt sie sich während des gesamten Betrachtungszeitraums als die wirtschaftlichere Variante dar, wobei sich der Abstand zu den Alternativen bis zum Ende des Betrachtungszeitraums vergrößert.

Da der Kalkulationszins große Auswirkungen auf das Ergebnis haben kann, wird eine Sensitivitätsanalyse für diesen Parameter durchgeführt. Bild 9 stellt das Ergebnis dieser Betrachtung graphisch dar. Am Gesamtergebnis ändert sich durch die Variation des Kalkulationszinses nichts: Die Aluminiumbrücke bleibt die wirtschaftlichste Variante. Aller-

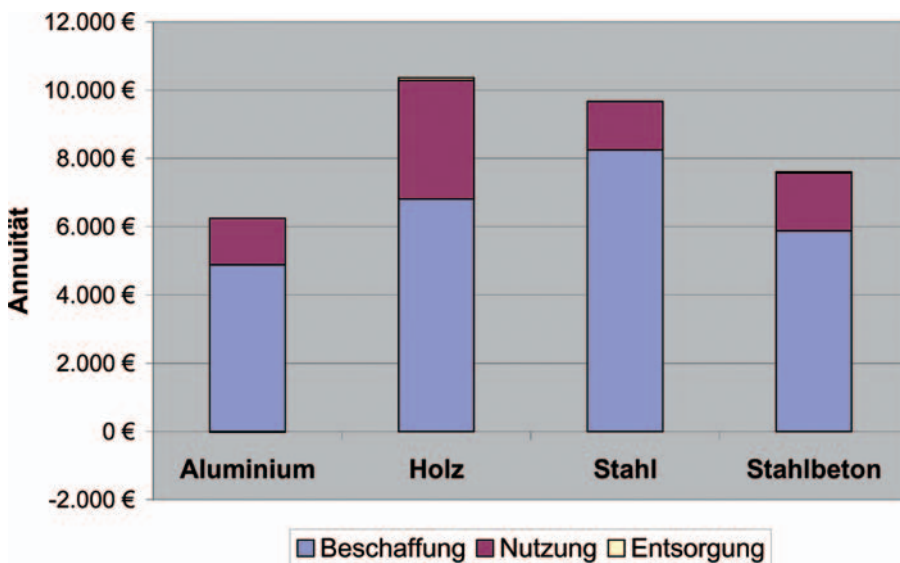


Bild 7. Ergebnis der LCCA bei $i = 3 \%$
 Fig. 7. Result of the LCCA with discount rate $i = 3 \%$

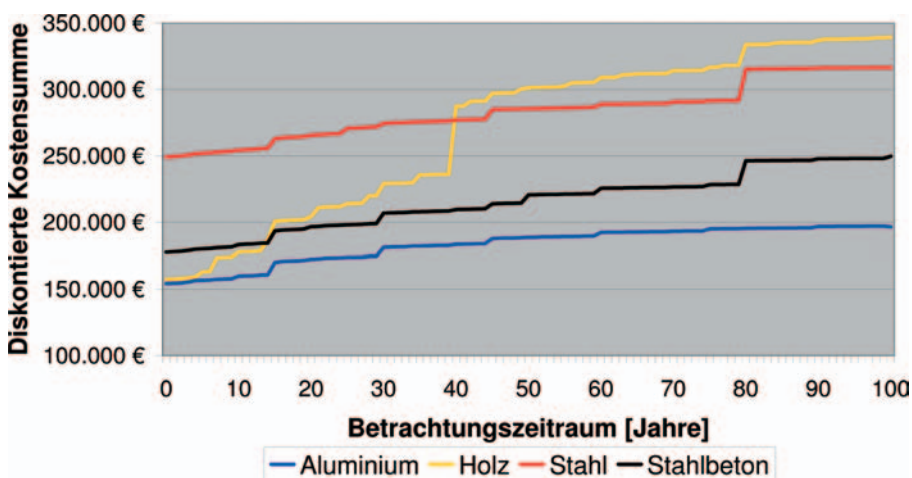


Bild 8. Break-Even-Darstellung bei $i = 3 \%$ und einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren
 Fig. 8. Break-Even-Illustration with $i = 3 \%$ over 100-year-period

dings erhält die Holzbrücke mit zunehmendem Kalkulationszins eine bessere LCC-Bewertung, was daran liegt, dass die Folgekosten mit zunehmendem Kalkulationszins mit einem niedrigeren Ansatz in die Betrachtung einfließen. Ab einem Kalkulationszins von knapp 4 % wird die Holzbrücke

wirtschaftlicher als die Stahlbrücke, bei ca. 10 % wird sie wirtschaftlicher als die Stahlbetonbrücke.

Zur Identifikation der notwendigen Herstellkosten für LCC-Gleichheit der Varianten wurde ein Zielpreis bestimmt, bei welchem die Brücken aus Holz, Stahl und Stahlbeton die-

selben LCC in Form der Annuität erreichen (vgl. Tabelle 2). Dabei werden die Kosten für den Überbau und den Unterbau angesetzt – allgemeine Planungs- und Verwaltungskosten werden nicht berücksichtigt. Die Holzvariante darf dann nur 39 % des angenommenen Preises kosten, die Stahlbrücke 59 % und die Stahlbetonbrücke 77 %.

Als weitere diskussionswürdige Annahmen können die angesetzten Nutzungsdauern für Holz und Aluminium gelten. Eine aktuelle Studie über Holzbrücken kommt zu dem Ergebnis, dass für geschützte Holzbrücken wie die untersuchte Trogbücke bei angemessener Pflege 80 Jahre als Nutzungsdauer angesetzt werden können [15]. Da noch keine älteren Fußgängerbrücken aus Aluminium existieren und zum Teil Skepsis über die Dauerhaftigkeit des Werkstoffs vorherrscht, wird zudem eine begrenzte Nutzungsdauer für Aluminiumbrücken von 50 Jahren angenommen. Die Bilder 10 und 11 zeigen, dass selbst bei dieser konservativ geschätzten Nutzungsdauer die Aluminiumbrücke am wirtschaftlichsten ist, während die LCC für die Holzbrücke bei Annahme einer Nutzungsdauer von 80 Jahren immer noch weit über den LCC für Aluminium und Stahlbeton liegen.

Über die Instandsetzungsstrategie für den Korrosionsschutz bei Stahlbrücken gibt es verschiedene Ansichten. Daher wird statt des bereits vorgestellten Best-Practice-Ansatzes zusätzlich eine Instandhaltungsstrategie betrachtet, die bei gleichbleibender Nutzungsdauer nur eine Maßnahme vorsieht, und zwar eine Vollerneuerung nach 60 Jahren. Obwohl sich dadurch verringerte LCC ergeben, hat dies aufgrund des hohen Anschaffungspreises der Stahlbrücke keine Auswirkung auf das Ranking der Alternativen (vgl. Bilder 10 und 11).

Betrachtet man die über den Lebenszyklus anfallenden Nutzungskosten, so zeigt sich, dass der Hauptanteil der Nutzungskosten bei Aluminiumbrücken durch die Erneuerung des Belags entsteht, gefolgt von den Kosten für Inspektionen. Bei Stahl- und bei Holzbrücken setzt sich dagegen der Hauptanteil aus Kosten für Instandsetzungsmaßnahmen sowie für Belagserneuerungen zusammen. Bild 12 stellt die Zusammensetzung der Nutzungskosten graphisch dar.

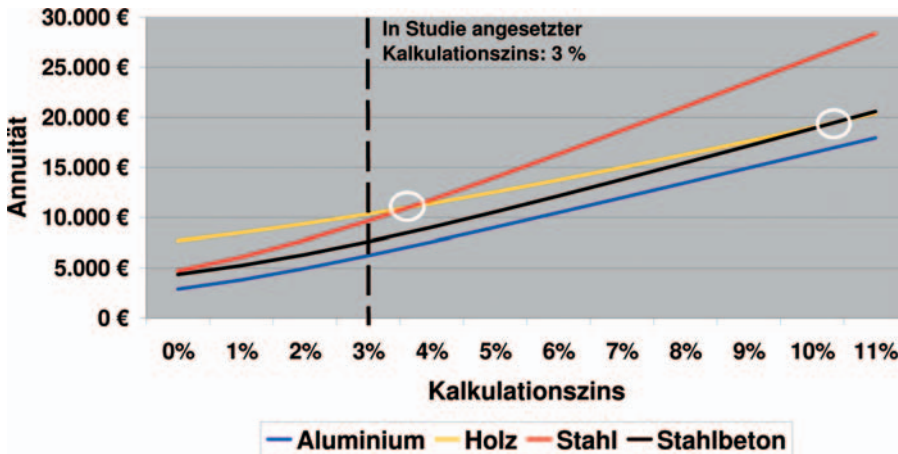


Bild 9. Sensitivitätsanalyse bzgl. des Kalkulationszinses i
Fig. 9. Sensitivity analysis for discount rate i

Tabelle 2. Zielpreisbestimmung für die Brücken aus Holz, Stahl und Stahlbeton
Table 2. Determination of target price for bridges made of wood, steel and reinforced concrete

Werkstoff	Angenommene Kosten	„Zielpreis“	Differenz	Verhältnis Zielpreis/Annahmen
Aluminium	132850 €	132850 €	0 €	100 %
Holz	136000 €	53495 €	82505 €	39 %
Stahl	215800 €	127508 €	88292 €	59 %
Stahlbeton	153600 €	117991 €	34609 €	77 %

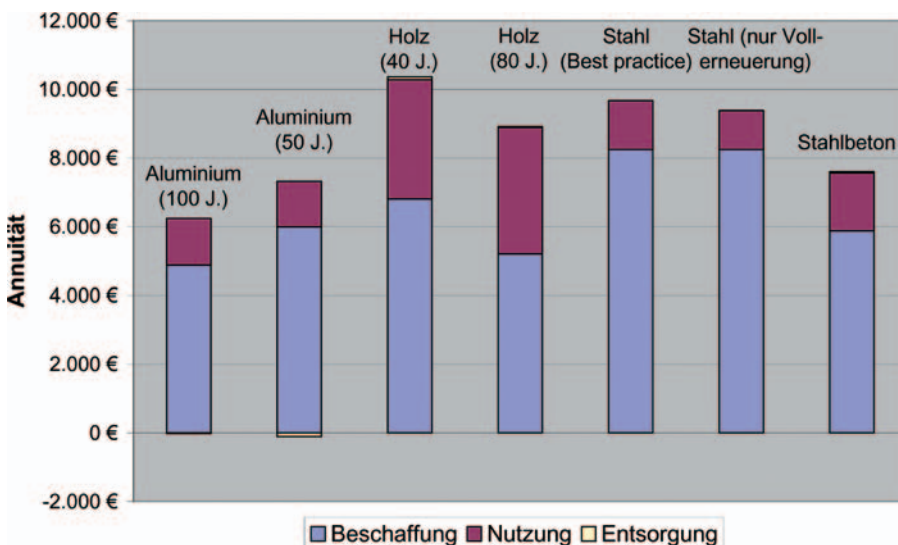


Bild 10. LCC bei Variation von Nutzungsdauern und Instandsetzungsstrategie (i = 3 %)
Fig. 10. LCC for variations of bridge life time and maintenance strategies (i = 3 %)

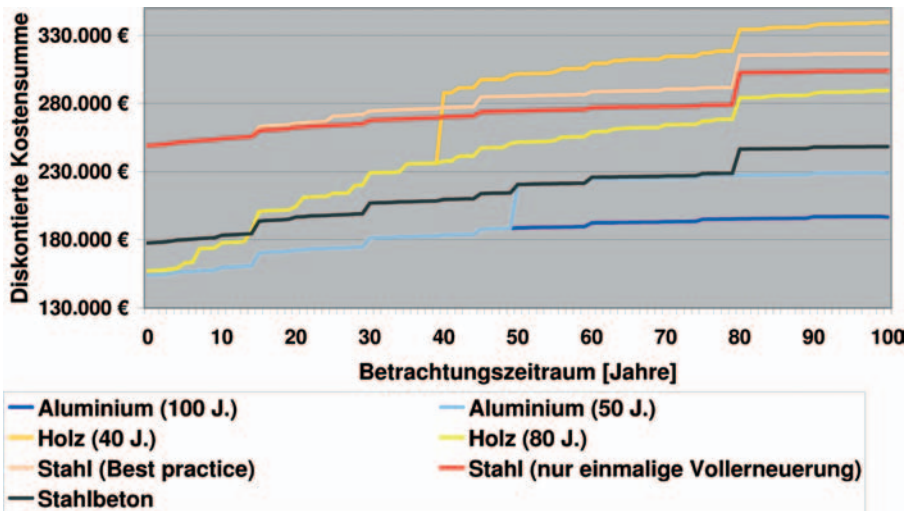


Bild 11. Break-Even-Darstellung der Variationen von Nutzungsdauern und Instandsetzungsstrategien

Fig. 11. Break-Even-Illustration for variations of bridge life time and maintenance strategies

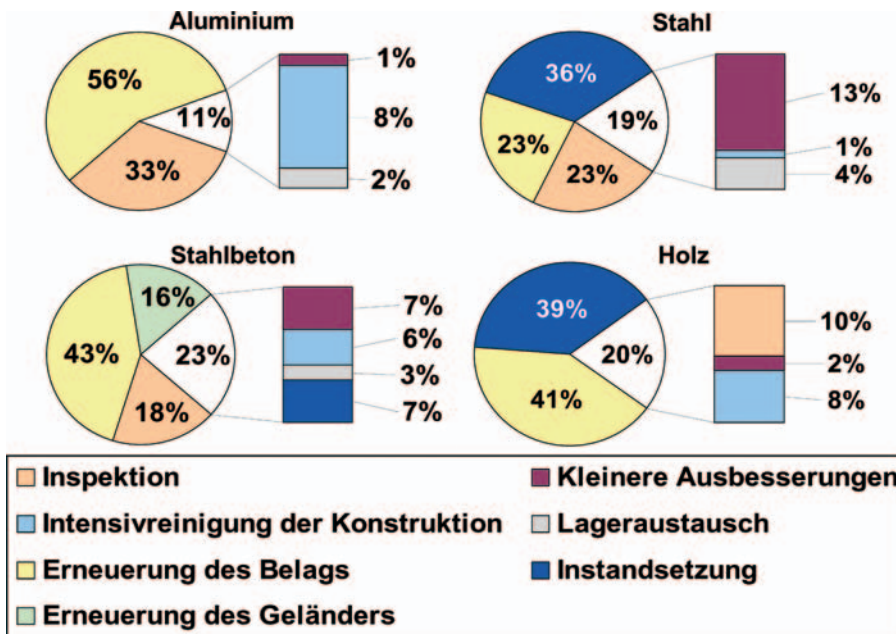


Bild 12. Zusammensetzung der Nutzungskosten (i = 0 %)

Fig. 12. Composition of maintenance costs during life time (i = 0 %)



Bild 13. Aluminiumbrücke über die Eisenbahnstrecke bei Mühlheim (Quelle: pml)

Fig. 13. Aluminium bridge over railroad tracks near Mühlheim (Source: pml)

4 Fazit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für die angenommenen Systembedingungen der Werkstoff Aluminium die wirtschaftlichste Variante ist. Bild 13 zeigt eine PÜ aus Aluminium über die Eisenbahnstrecke bei Mühlheim.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass als Alternative zu Aluminium unter LCC-Gesichtspunkten lediglich Stahlbeton in Betracht kommt. Kann die Stahlbetonbrücke um mindestens 23 % günstiger als in der Studie angenommen hergestellt werden, so hat sie die geringeren LCC. Da die Angebotspreise im Bauwesen stark von der Marktsituation abhängig sind, kann es also vorkommen, dass eine Stahlbetonbrücke gegenüber einer Aluminiumbrücke wirtschaftlicher ist. Die anderen untersuchten Varianten aus Stahl und Holz haben mit Abstand höhere LCC, so dass sie aus LCC-Gesichtspunkten bei derzeitigen Preisverhältnissen nicht in Betracht kommen. Bei Holzbrücken ergeben sich die hohen LCC aus hohen Nutzungskosten in Verbindung mit einer kurzen Nutzungsdauer, während bei Stahlbrücken der hohe Anschaffungspreis für die hohen LCC maßgeblich ist.

Da die Folgekosten bei einer dynamischen Betrachtung unter Einsatz des Zeitwertes vermindert in die Kostenbetrachtung eingehen, kann bei der Betrachtung von Stahl-, Stahlbeton- und Aluminiumbrücken der Anschaffungspreis als das entscheidende Kriterium gelten. Die Nutzungskosten während der ersten Jahrzehnte sind bei den drei Varianten relativ vergleichbar. Die hohen Folgekosten für Instandsetzungsmaßnahmen fallen bei Stahl- und Stahlbetonbrücken erst nach langer Nutzungsdauer (> 30 Jahre) an, so dass sie stark vermindert in die LCC-Bewertung eingehen und i. d. R. keine maßgeblichen Auswirkungen auf die LCC zeigen. Kommt allerdings eine Holzbrücke als Alternative in Frage, so müssen die gesamten LCC betrachtet werden, da die Kosten für die Holzpflege kontinuierlich schon in früheren Jahren entstehen und die Nutzungsdauer geringer ist.

Die Erhaltungskosten in der Nutzungsphase entstehen nicht nur durch die Erneuerung werkstoffspezifischer Schutzmaßnahmen sondern auch

durch die Erneuerung von Ausbauten wie Bodenbelägen und Geländern, die meist variabel gewählt werden können. Es bietet sich deshalb an, für die Wahl dieser Ausbauelemente eine getrennte LCC-Analyse durchzuführen.

Die gemachten Aussagen gelten für die in der Studie angenommenen Randbedingungen und Kosten. Diese können von den objektspezifischen Umgebungsbedingungen (z. B. ungünstige Untergrundverhältnisse, schlechte Zugänglichkeit, aggressive Atmosphäre, etc.) abweichen, so dass die Ergebnisse der Studie nicht eins zu eins auf ein spezifisches Projekt übertragen werden können. Insbesondere kann sich bei abweichenden Spannweiten aufgrund der unterschiedlichen Eignung der Werkstoffe ein anderes Ranking bei den Anschaffungspreisen ergeben. Die Methodik bei der durchgeführten LCC-Analyse und die Annahmen einzelner Kostenwerte der Studie können dagegen für die Durchführung einer LCC-Analyse unter anderen Randbedingungen als Grundlage herangezogen werden.

Literatur

- [1] Günther, T., Kriegbaum, C.: Life Cycle Costing. WISU – Das Wirtschaftsstudium 10 (1997), S. 900–912.
 [2] Meyer-Sternberg, M.: Aluminium im Brückenbau. Technische Universität München: Dissertation 2005.
 [3] Back-Hock, A.: Lebenszyklusorientiertes Produktcontrolling – Ansätze zur Computergestützten Realisierung

mit einer Rechnungswesen-Daten- und -Methodendatenbank. Berlin: Springer-Verlag 1988.

- [4] Pelzeter, A.: Lebenszykluskosten von Immobilien – Einfluss von Lage, Gestaltung und Umwelt. Köln: Müller 2006.
 [5] Hüske, K.: Nachhaltigkeitsanalyse demontagegerechter Baukonstruktionen: Entwicklung eines Analysemodells für den Entwurf von Gebäuden. Technische Universität Darmstadt: Dissertation 2001.
 [6] Kuhlmann, U. et al.: Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Verbundbrücken unter Berücksichtigung des Bauverfahrens und der Nutzungsdauer. Stahlbau 76 (2007), S. 105–116.
 [7] Riezler, S.: Lebenszyklusrechnung: Instrument des Controlling strategischer Projekte. Wiesbaden: Gabler 1996.
 [8] Götze, U., Bloech, J.: Investitionscontrolling – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben, 2. Aufl., Berlin: Springer-Verlag 1995.
 [9] Herzog, K.: Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen – Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden. Technische Universität Darmstadt: Dissertation 2005.
 [10] Radlbeck, C.: Ganzheitliche Analyse und Bewertung von tragenden Aluminiumkonstruktionen. Technische Universität München: Dissertation 2006.
 [11] U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration – Office of Asset Management: Life Cycle Cost Analysis Primer. Publication Number: FHWA-IF-02-047. 2002.
 [12] Deutsche Bahn AG: Projektcontrolling. Controlling Handbuch. Version 02/2008.

[13] Kirkham, R. J. et al.: EuroLifeForm: An Integrated Probabilistic Whole Life Cycle Cost and Performance Model for Buildings and Civil Infrastructure. The International Construction and Building Research Conference of the RICS, Leed, UK 2004.

- [14] Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): Ablösungsrichtlinien: Richtlinien für die Berechnung der Ablösungsbeträge der Erhaltungskosten für Brücken, Straßen, Wege und andere Ingenieurbauwerke – Stand 1988. Verkehrsblatt Verlag 1988.
 [15] Gerold, M.: Wirtschaftlichkeit moderner Holzbrücken – Lebenserwartung und Unterhaltungskosten. Bau-technik 82 (2005). S. 457–460.
 [16] Vollrath, F., Tathoff, H.: Handbuch der Brückeninstandhaltung. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik 2002.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stephanie Heitel, Siemens AG, Siemens Management Consulting, St.-Martin-Straße 76, 81541 München
 Stephanie.Heitel@siemens.com
 Dipl.-Ing. Holger Koriath, Dipl.-Ing. (FH) Christoph S. Herzog, MSc., Deutsche Bahn AG, Systemverbund Bahn – Beschaffung, Richelstraße 3, 80634 München
 Holger.Koriath@bahn.de
 Christoph.S.Herzog@bahn.de
 Prof. Dr. Günter Specht, Technische Universität Darmstadt, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Hochschulstraße 1, 64289 Darmstadt,
 Guenter.Specht@bwl.tu-darmstadt.de