

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Sonderflächen in Betonbauweise im Life Cycle

Prof. Dr.-Ing. Andreas Großmann und M.Eng. Lena Pauli

Hochschule Konstanz, University of Applied Sciences
Braunegger Str. 55, 78467 Konstanz
E-mail: agrossma@htwg-konstanz.de

Hochschule Konstanz, University of Applied Sciences
Braunegger Str. 55, 78467 Konstanz
E-mail: lpauli@htwg-konstanz.de

Kommunale Sonderflächen wie Bushaltestellen, Busspuren und Kreisverkehre werden innerorts häufig in Asphalt- oder Pflasterbauweise ausgeführt. Bei stark beanspruchten Sonderflächen tritt einhergehend mit dem in der Regel spurgeführten Verkehr eine zunehmende Verschlechterung des Zustands ein; Spurrinnen, Verformungen und Verdrückungen oder Oberflächenschäden treten bereits nach kurzer Liegezeit auf. Aus diesem Grund findet – auch in Deutschland – immer häufiger die Betonbauweise Anwendung. Es stellt sich allerdings die Frage, ob die Betonbauweise im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung über einen Zeitraum bis zu 30 Jahre auch wirtschaftlicher ist als die Asphalt- oder Pflasterbauweise.

Im Rahmen der Forschung an der HTWG Hochschule Konstanz, Technik Wirtschaft und Gestaltung, wurden zunächst für die o.g. Fragestellung die Rahmenbedingungen für die Ausführung von Sonderflächen in Betonbauweise aufgeführt. Neben der Dimensionierung sind es insbesondere erste Ansätze für die Entwicklung von Verhaltensfunktionen für diese Flächen. Grundlage hierzu sind nicht klassische deterministische Verhaltensfunktionen gemäß dem Technischen Regelwerk. Die Anwendung dieser Funktionen hat sich für solche Flächen nicht bewährt. Vielmehr zeigen Verhaltensfunktionen aus der Anwendung von Übergangswahrscheinlichkeiten basierend auf Markov-Ketten erste zielführende Ergebnisse. In diesem Zusammenhang werden auch erste Vorschläge für Eingreifzeitpunkte von weiteren Maßnahmen der Instandhaltung und Instandsetzung unterbreitet.

Abschließend wird anhand eines Beispiels für eine Busspur in Betonbauweise ein Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen der Asphalt- und Betonbauweise für einen Zeitraum von 30 Jahren geführt. Die Ergebnisse zeigen, dass für den konkreten Fall die Betonbauweise deutlich wirtschaftlicher ist. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf weitere Sonderflächen in Betonbauweise gegeben.

1. Einführung

1.1 Grundlagen

In vielen Städten werden Bushaltestellen, Busspuren oder Kreisverkehre in der Regel in Asphalt oder Pflasterbauweise ausgeführt. Die Straßenbauverwaltung sieht wesentliche Vorteile dieser Bauweisen bei der Planung, der Ausschreibung und dem Einbau basierend auf den langjährigen Erfahrungen der Mitarbeiter. Hochbelastete Bushaltestellen, Busspuren oder Kreisverkehre in Asphalt oder Pflasterbauweise zeigen allerdings, durch die schwere und in der Regel spurgeführte Belastung, erhebliche Schäden in Form von bspw. Spurrinnen oder Verformungen und Verdrückungen, so dass bereits nach kurzer Liegezeit erste Unterhaltungs- und Erhaltungsmaßnahmen durchzuführen sind (vgl. Bild 1).



Bild 1: Typische Schäden auf Busspuren und Bushaltestellen (Großmann et al., 2015)

Immer häufiger werden aus diesem Grund solche Verkehrsflächen in Betonbauweise ausgeführt. Die Betonbauweise hat gegenüber den Asphalt- und Pflasterbauweisen erhebliche Vorteile in der Standfestigkeit sowie Dauerhaftigkeit und damit geringere Aufwendungen bei

der Unterhaltung, aber auch Nachteile durch eine komplexere Planung und Ausführung. Generell haben die bisherigen Ausschreibungen gezeigt, dass innerörtliche Betonflächen in der Regel ca. 20 bis 25 % teurer in der Ausführung sind. Offen bleibt die Frage, ob im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung die Betonbauweise wirtschaftlicher als die standardmäßig zur Anwendung kommende Asphalt- oder Pflasterbauweise ist.

Im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchung an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung in Konstanz wurden folgende Schritte an einem konkreten Beispiel angegangen:

- Auswahl eines Pilotprojektes
- Ermittlung der Herstellungskosten
- Wirtschaftlichkeitsvergleich über die Kapitalwertmethode
- Life Cycle Betrachtung beider Bauweisen

1.2 Auswahl einer Pilotstrecke

Als Pilotstrecke wurde eine mit 366 Bussen am Tag beanspruchte Busspur in Asphaltbauweise in der Stadt Konstanz gewählt (vgl. Bild 2).



Bild 2: Pilotprojekt Busspur in Konstanz (Grossmann et al., 2014)

Die ca. 400 m lange und 3,50 m breite Busspur wurde 2008 grundhaft saniert und wie folgt ausgeführt:

- 4 cm Splittmastixasphalt
- 8 cm Asphaltbinder
- 14 cm Asphalttragschicht.

Im Jahr 2014 wurde eine visuell-sensitive Zustandserfassung durchgeführt. Hierbei wurden 10 m-Erfassungsabschnitte gebildet, die vereinfacht und zusammengefasst das in Bild 3 dargestellte Ergebnis zeigen:

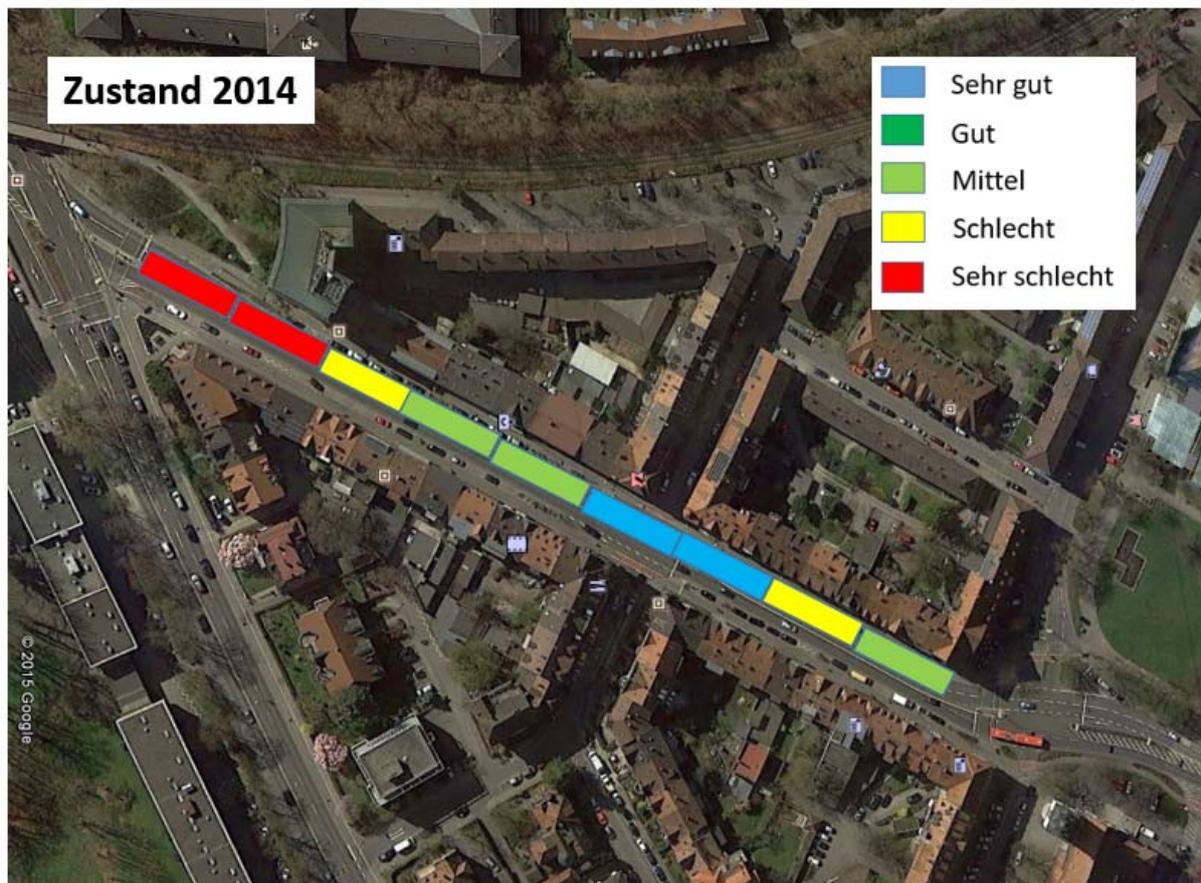


Bild 3: Ergebnis der Zustandserfassung der Busspur in Konstanz (Pauli, 2015)

1.3 Ermittlung der Herstellungskosten

1.3.1 Asphaltbauweise

Für die Ermittlung der Herstellungskosten der Busspur in Asphaltbauweise konnte auf eine umfangreiche Ausschreibung aus dem Jahr 2008 zurückgegriffen werden (Tiefbauamt Stadt Konstanz, 2008).

Dem Leistungsverzeichnis für die grundhafte Sanierung der Busspur in Asphaltbauweise im Jahr 2008 wurden als Herstellungskosten ca. 145.000 EUR entnommen.

1.3.2 Betonbauweise

Um einen vergleichbaren Barwert für die Ausführung in Betonbauweise zu ermitteln, musste zunächst die erforderliche Dicke der Betonbauweise berechnet und darauf aufbauend ein Leistungsverzeichnis erstellt werden.

1.3.2.1 Dimensionierung

Die Festlegung der erforderlichen Dicke der Betondecke basiert auf der Methode der freien Bemessung (FGSV 2008). Die Anwendung standardisierter Deckendicken (FGSV 2012) – wie dies ansonsten üblich ist – war vorliegend aufgrund der Rahmenbedingungen (Plattenlänge, Plattenbreite, Verankerung) nicht zielführend.

Für die Berechnung kam die an der HTWG verfügbare Software AWDSTAKO zur Anwendung. Für die Erzielung einer erforderlichen flächenhaften Homogenität der Tragschicht wird beim Bauen in Bestand bzw. beim abschnittsweisen Bauen die Anwendung einer Asphalttragschicht empfohlen (FGSV 2013). Eine Verankerung bzw. Verdübelung zum Bord bzw. zum benachbarten Fahrstreifen in Asphaltbauweise ist nicht möglich. Demnach wurde lediglich in Längsrichtung eine Verdübelung der Platten angesetzt. Folgende dimensionierungsrelevante Parameter kamen zur Anwendung:

- Normative Nutzungsdauer 30 Jahre
- Straßenbetonklasse StC 30/37 – 3,7
- Plattenlänge 4,00 m
- Plattenbreite 3,50 m
- Querfuge mit Dübel
- Unterlage 10 cm Asphalttragschicht

Im Ergebnis wurde eine von 26 cm dicke Betondecke auf einer 10 cm dicken Asphalttragschicht berechnet. Eine händische Vergleichsrechnung gemäß RDO Beton (Pauli, 2015).

1.3.2.2 Ermittlung des Barwertes der Buslinie in Betonbauweise

Für die Ermittlung eines belastbaren Barwertes der Betonbauweise wurde zunächst ein umfangreiches Leistungsverzeichnis erstellt (Pauli, 2015). Dieses wurde mit ausgewählten Experten der Baubranche besprochen und den einzelnen Positionen des Leistungsverzeichnisses realistische Preise hinterlegt.

Im Ergebnis wurde für die ca. 400 m lange Buslinie ein Barwert von ca. 182.000 EUR ermittelt. Demnach wäre die Ausführung in Betonbauweise um ca. 25,5 % teurer, was den bisherigen Erfahrungen entspricht.

2. Wirtschaftlichkeitsvergleich

2.1 Festlegungen

Für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich im Lebenszyklus mussten zunächst Erhaltungsmaßnahmen und deren Kosten festgelegt werden. Als Betrachtungszeitraum

wurden entsprechend der Anforderungen in Deutschland 30 Jahre angenommen (FGSV 2012). Hinsichtlich der Erhaltungsmaßnahmen wurden nachfolgende Festlegungen getroffen. Erhaltungsmaßnahmen der Asphaltbauweise:

- „Tiefereinbau der Deck- und Binderschicht“ Kosten: 50,00 EUR/qm

Als wesentliches Schadensmerkmal werden alle 10 Jahre Spurrinnen erwartet. Diese Erkenntnis ergibt sich aus der im Jahr 2014 und der wiederholend im Jahr 2016 durchgeführten visuell-sensitiven Zustandserfassung. Schäden an der Asphalttragschicht wurden im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nicht angesetzt und Maßnahmen der baulichen Unterhaltung wurden nicht berücksichtigt

Erhaltungsmaßnahmen der Betonbauweise:

Als wesentliches Schadensmerkmal wurde eine Fugensanierung im Heißverguss (alle 5 bis 8 Jahre) oder Kaltverguss (alle 15 Jahre) sowie eine Erneuerung geschädigter Betonplatten angesetzt. In Anlehnung an das bestehende Regelwerk (FGSV 2008) wurde für eine kommunale Straße in Betonbauweise eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 % über die Lebensdauer von 30 Jahren festgelegt. Folgende Kostensätze kamen zum Ansatz:

- Heiß- oder Kaltverguss Kosten: 5,00 EUR/m
- Austausch Betonplatten Kosten: 150,00 EUR/qm

Hinsichtlich der Vergleichbarkeit wurden sämtliche Preise mit 3 % diskontiert.

2.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich über die Kapitalwertmethode

Für einen ersten einfachen Vergleich wurde die Kapitalwertmethode angewendet. Die Kapitalwertmethode berechnet für eine Investition den Kapitalwert (Pauli, 2015). Basierend auf den o.g. Festlegungen und für den Nutzungszeitraum von 30 Jahren wurde basierend auf der Kapitalwertmethode folgender Vergleich der Kostenentwicklung gezogen (vgl. Bild 4).

Die blaue Linie zeigt die Kostenentwicklung der Asphaltbauweise, die türkisfarbene Linie die der Betonbauweise. Bereits nach kurzer Liegedauer ist basierend auf der Kapitalwertmethode die Asphaltbauweise im Vergleich teurer. Insgesamt liegen die Gesamtkosten der Asphaltbauweise über eine Liegezeit von 30 Jahren bei ca. 289.406,00 EUR, die der Betonbauweise bei ca. 226.757,00 EUR. Im Lebenszyklus wäre die Betonbauweise demnach um ca. 27,6% wirtschaftlicher.

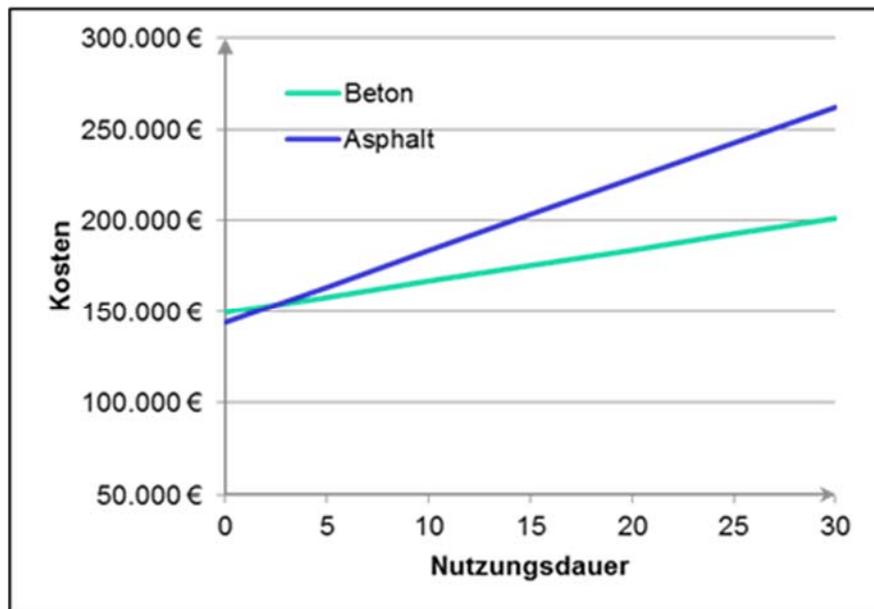


Bild 4: Vergleich der Konstruktionen in Asphalt (blaue Linie) und Beton (grüne Linie) (Pauli, 2015)

3. Wirtschaftlichkeitsvergleich im Lebenszyklus

3.1 Software DTIMS

Für die Strategieberechnung (strategisches Erhaltungsmanagement) wurde die PMS-Software mit der Bezeichnung VIAPMS®, Version 9.5, bzw. dTIMS_CT (Deighton Total Infrastructure Management System) herangezogen, welche aus der Produktpalette des kanadischen Softwarehauses Deighton Associates Limited stammt.

3.2 Verhaltensfunktionen

Wesentlicher Bestandteil der Prognose im Lebenszyklus einer Straße ist die Festlegung der Verhaltensfunktionen. Für die Asphaltbauweise konnte auf die bekannten Verhaltensfunktionen des Regelwerkes (FGSV, 2001) bzw. auf neuere Forschungsergebnisse für kommunale Straßen (FGSV, 2015) zurückgegriffen werden.

Nachfolgende Bild zeigt die Zustandsentwicklung des betrachteten Abschnittes der Busspur in Asphaltbauweise, welche für die Absicherung der o.g. Verhaltensfunktionen herangezogen wurde (vgl. Bild 5).

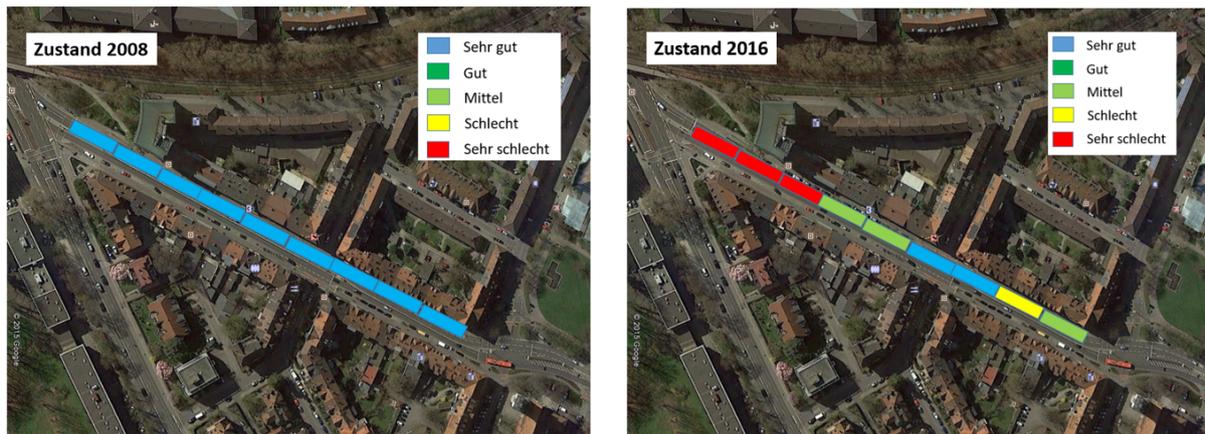


Bild 5: Zustandsentwicklung der Busspur (Pauli, 2015; Pauli, 2016)

Für die Betonbauweise konnte bereits bei der Dickenfestlegung nicht auf die standardisierten Bauweisen zurückgegriffen werden. Demnach wäre eine Anwendung der bekannten Verhaltensfunktionen für Betonbauweisen nicht zielführend. Insofern mussten alternative Überlegungen getroffen werden, zumal diesbezügliche Erfahrungen bislang nicht vorliegen.

Für die Strategieberechnung wurde ein probabilistischer – in Deutschland noch relativ unbekannt aber weltweit verstärkt in der Anwendung kommender – Ansatz gewählt (Weninger-Vycudil, 2016). Die Anwendung von probabilistischen Modellen ist vor allem dort sinnvoll, wo praktisch keine oder nur teilweise die Eingangsparameter von deterministischen Funktionen vorliegen, also primär im untergeordneten Straßennetz. Bei der Definition von Zustandsprognosemodelle werden in den meisten Fällen auf einzelne Eigenschaften oder Zustandsmerkmale bezogene Verhaltensfunktionen herangezogen, die über einen mathematischen Zusammenhang die Entwicklung des Zustandsmerkmals in Abhängigkeit von ein oder mehr Eingangsparametern (Zeit, Verkehr, Klima, etc.) beschreiben. Die Durchführung der Zustandsprognose ist natürlich mit gewissen Ungenauigkeiten bzw. einer Unschärfe verbunden, da in vielen Fällen die Entwicklung der Eingangsparameter (z.B. Verkehr) starken Schwankungen und Streuungen unterworfen sein kann.

Die in erster Linie für den Straßenoberbau angewendeten deterministischen Verhaltensfunktionen in der Lebenszyklusanalyse haben den Vorteil, dass sie relativ einfach über mathematische Zusammenhänge $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ definiert werden können, jedoch praktisch keine Aussage über die Streuung der Entwicklung zulassen. Um diesen Fehler zu reduzieren wurden zunehmend Kalibrierfaktoren verwendet, die mit einer Wahrscheinlichkeit versehen sind und dem Modell zumindest eine gewisse Wahrscheinlichkeit zuordnen. Ein weiteres Problem bei der deterministischen Prognose ist der Eingangswert, der für einen

„homogenen“ Abschnitt repräsentativ sein sollte und daher für die Einteilung der Straßen in homogene Abschnitte (Analyse von 10m bzw. 20m Abschnitten ist nicht sehr praxisorientiert) einen hoch-sensitiven Einfluss hat. Der Eingangswert (repräsentativer Wert des homogenen Abschnitts) ist der Ausgangspunkt der Prognose und wäre im vorliegenden Fall aufgrund der ungleichen Verteilung der Zustandswerte nicht zielführend. Die Anwendung von rein probabilistischen Modellen die es erlauben, die Verteilung bzw. Streuung über die Betrachtungsperiode zu prognostizieren. Dabei reicht ein funktionaler Zusammenhang nicht mehr aus und es müssen über sogenannte Übergangswahrscheinlichkeiten die Änderungen modelliert werden. Ist die Verteilung eines Zustandsmerkmals i (über einen bestimmten Bereich) zum Zeitpunkt t bekannt, so kann über die Angabe von Wahrscheinlichkeiten, dass dieses Zustandsmerkmal in diesem Zustand bleibt oder sich verändert (in der Regel schlechter wird), die Verteilung des Zustandsmerkmals i zum Zeitpunkt $t+1$ berechnet werden. Diese Übergangswahrscheinlichkeiten werden dabei in Form von Matrizen beschrieben und häufig als „Markov-Ketten“ bezeichnet (Weninger-Vycudil, 2016).

Die Ausgangsverteilung wird über einen Vektor, der in der Regel aus den Anteilen in den 5 Zustandsklassen besteht, mit der Matrize multipliziert so dass eine neue Verteilung (neuer Vektor) entsteht und zwar jene zum Zeitpunkt $t+1$. Die Eingangsgröße ist die Verteilung der Zustandsklassen der vorliegend erfassten einzelnen Werte je Abschnitte über die betrachteten 400 m, wobei im Vergleich zum repräsentativen (Mittel)Wert hier kein Verlust an Datengenauigkeit entsteht.

Aufbauend auf den o.g. Überlegungen wurden für das Szenario „Austausch Betonplatten“ folgende Verhaltensfunktionen abgeleitet (vgl. Bild 6)

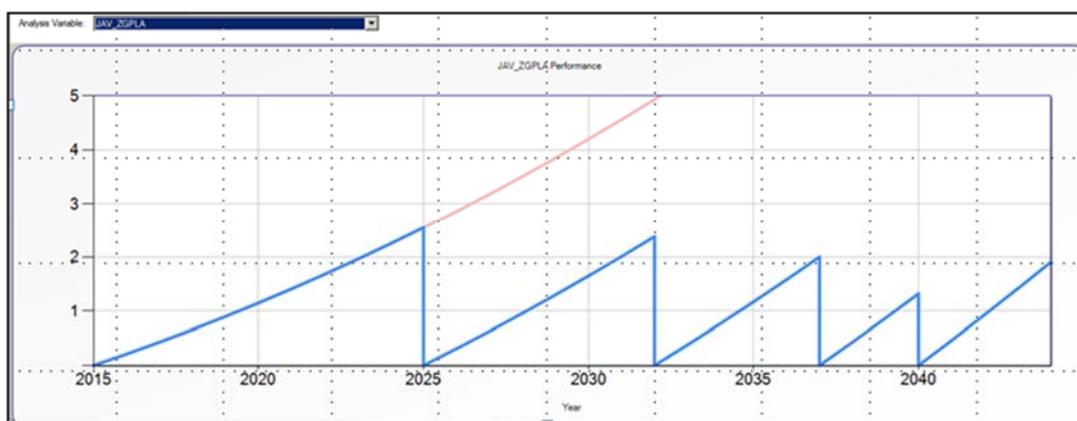


Bild 6: Szenario Plattenaustausch (Pauli, 2015)

3.2 Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleiches im Lebenszyklus

Nachfolgendes Bild (vgl. Bild 7) zeigt den Kostenvergleich der beiden Bauweisen unter Anwendung verfügbarer bzw. entwickelter Verhaltensfunktionen.

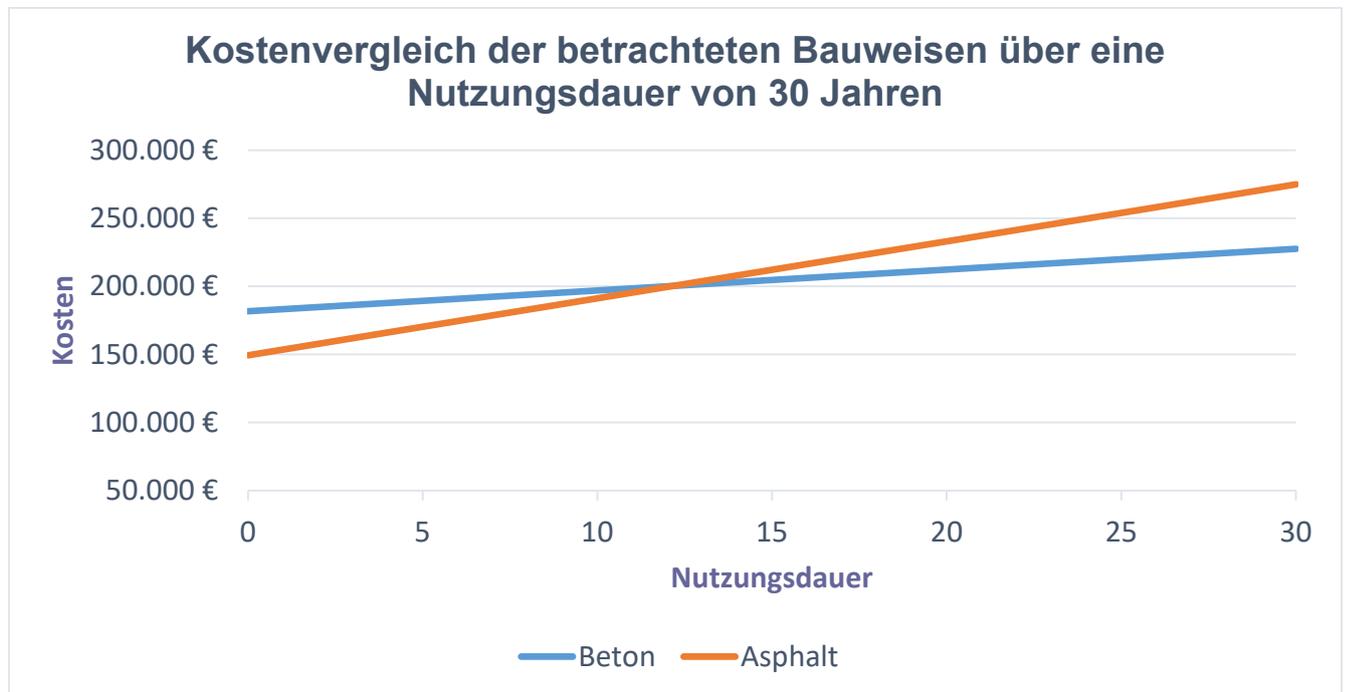


Bild 7: Kostenvergleich im Lebenszyklus (Pauli, 2015)

Die rote Linie zeigt die Kostenentwicklung der Asphaltbauweise, die blaue Linie die der Betonbauweise. Im Gegensatz zum Ergebnis basierend auf der Kapitalwertmethode ist beim Lebenszyklusansatz die Asphaltbauweise nach einer Liegezeit von über 10 Jahren teurer. Diese Betrachtungen erscheinen plausibler als die Erkenntnisse aus der Kapitalwertmethode. Die Analysen anhand der Software ergeben, dass die Anwendung der Betonbauweise (Kosten: 227.632,00 €) im Vergleich zur Asphaltbauweise (Kosten: 275.000,00 €) im Lebenszyklus um ca. 20,8 % wirtschaftlicher wäre.

4. Zusammenfassung und Fazit

In vorliegenden Untersuchungen wurde versucht, einen wirtschaftlichen Vergleich zweier Bauweisen für kommunale Sonderflächen vorzunehmen. Betrachtet wurde im konkreten Fall eine mit 366 Bussen täglich beanspruchte Busspur in Konstanz, die in Asphaltbauweise ausgeführt wurde. In einem ersten Schritt wurde ein Leistungsverzeichnis für die Ausführung in Betonbauweise erstellt und mit plausiblen und nachvollziehbaren Kostensätzen hinterlegt. Der ermittelte Preisunterschied von ca. 25,5 % entspricht den bisherigen Erfahrungen.

Die Anwendung der Kapitalwertmethode für einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren zeigt im Ergebnis eine um 27,6 % teurere Asphaltbauweise. Die Untersuchungen unter Anwendung

verfügbarer bzw. abgeleiteter Verhaltensfunktionen im Lebenszyklus unter Anwendung spezifischer Verhaltensfunktionen haben im vorliegenden Fall gezeigt, dass die Asphaltbauweise ca. 20,8% teurer als die Betonbauweise ist. Aus den Untersuchungen der zwei verschiedenen Betrachtungsweisen ist zu folgern, dass die Anwendung basierend auf abgeleiteter Verhaltensfunktionen plausibler ist. Planungskosten wurden vorliegend nicht berücksichtigt.

Hinsichtlich der Entwicklung bzw. Verifizierung der Strategieansätze für Sonderflächen in Betonflächen sind weitere Forschungen anzugehen. Die hier genutzten Übergangswahrscheinlichkeiten sind durch weitergehende Untersuchungen zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass hinsichtlich der Dimensionierung von kommunalen Sonderflächen immer eine freie Bemessung vorzunehmen ist.

5. Literaturverzeichnis

- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2001): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmassnahmen an Strassenbefestigungen, Ausgabe 2001 (RPE-Str. 01). FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2009): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Ausgabe 2009 (RDO Beton). FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus für Verkehrsflächen, Ausgabe 2012 (RStO 12). FGSV Verlag, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (2013): Merkblatt für Planung, Konstruktion und Bau von Verkehrsflächen aus Beton, M VaB, Teil 1, FGSV Verlag, Köln.
- Grossmann, Pauli (2015): Vortrag am Geostraßenkongress 2015, Workshop VI: Pavement construction and Asset Management
- Pauli L. (2015): Masterthesis: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Busspuren in Betonbauweise im Life Cycle
- Pauli L. (2016): Vortrag aus der Reihe FORUM ZUKUNFT BAUEN, Verkehrsflächen aus Beton: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Busspuren in Betonbauweise im Life Cycle.
- Oeser, et al (2014): Entwicklung von Prognosefunktionen für den Strassenzustand kommunaler Strassen.
- Tiefbauamt Stadt Konstanz: Leistungsverzeichnis Theodor-Heuss-Straße, 2008
- Weninger-Vycudil et al, (2016): Future oriented life-cycle approach on bridges in Austria