

Lebenskosten - Modell Brücke

Der Kostenverlauf im Lebenszyklus der Brücke

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Georg Jodl
Professur für Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Andreas Jurecka
Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement
Technische Universität Wien

Gliederung

1. Eingangsüberlegungen
2. Analyse bestehender Modelle
3. Lebenszykluskostenmodell Brücke
4. Schlussfolgerungen

Lebenszykluskosten

- Ganzheitliche Betrachtung der Kostenentwicklung eines Bauwerkes über seine gesamte Lebensdauer
- Beinhaltet:
 - Planungskosten am Beginn des Lebenszyklus
 - Errichtungskosten
 - Instandhaltungskosten
 - Unerwartete Zusatzkosten (optional)
 - Abtragskosten am Ende des Lebenszyklus
- Lebenszykluskosten gemäß Definition nach ÖN B 1801-1 und 2 sind:
 - Anschaffungskosten (→ Gesamtkosten zuzüglich Finanzierungskosten [→ Kosten der Finanzierung der Gesamtkosten]) zuzüglich Entwicklungskosten und Folgekosten.
 - Folgekosten → Nutzungskosten und Beseitigungskosten
 - Nutzungskosten → Kapitalkosten, Abschreibungen, Steuern und Abgaben, Verwaltungskosten, Betriebskosten, Erhaltungskosten, sonstige Kosten.
 - Erhaltungskosten → Instandhaltungs-, Instandsetzungs-, Restaurierungskosten)

Lebensphasen einer Brücke

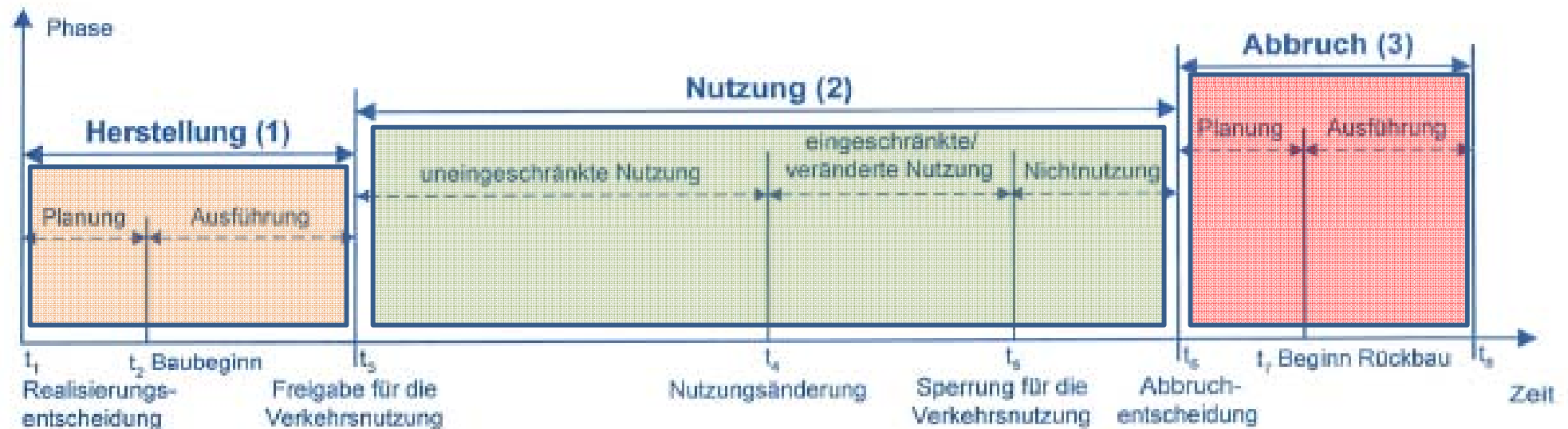


Bild 3. Lebenszyklusphasen eines Brückenbauwerkes
Fig. 3. Phases of the life-cycle of bridges

Schach et al., Bauingenieur Band 81, 2006

Herstellphase	ca. 5 Jahre
Nutzungsphase	ca. 100 Jahre
Abbruchphase	ca. 2 Jahre

Lebenszyklen - Kostenzyklen

Größenordnung der Kosten der Lebenszyklen

Errichtung 100%

Instandhaltung

Annahme: 1,5% p.a. – 100 a 150%

Abbruch 30%

Summe Lebenszykluskosten **280 %**

Zahlenspiel zur **Veranschaulichung der Bandbreite** der Instandhaltungskosten

Herstellkosten fiktive Brücke: 80 Mio. €

Instandhaltungskosten: 1,0 %/a = 0,8 Mio. €/a

1,5 %/a = 1,2 Mio. €/a

Literaturangaben liegen zwischen 0,4 % und 2,0 %

p = 1,0 % →	Lebensdauer:	50 a	40 Mio. €	50 %
		80 a	64 Mio. €	80 %
		100 a	80 Mio. €	100 %
p = 1,5 % →	Lebensdauer:	50 a	60 Mio. €	75 %
		80 a	96 Mio. €	120 %
		100 a	120 Mio. €	150 %

Aktuelle Optimierungsziele

- Überwiegender Teil der Investitionen findet **NACH** der Errichtung des Bauwerkes während der Nutzungsphase statt.
- Eine Kostenoptimierung findet jedoch meist nur für die Errichtung statt.
- Die Herstellkosten sind jedoch die einzig verlässlich vorliegenden Kosten und dienen daher als Basis für weitere Kostenermittlungen.

Vergabesituation

- Die konstruktive Leistungsbeschreibung führt im üblichen Vergabeverfahren zur Herstellung einer Brücke in der Regel zum **BILLIGSTBIETER**.
- Diese Vergabeüberlegung greift zu kurz, da keine optimierenden Auswirkungen auf die Erhaltungskosten zu erwarten sind.
- Mit der Betrachtung und Berücksichtigung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus kann ein **BESTBIETER** ermittelt werden und die Lebenskosten können optimiert werden.

Bauwerk Brücke?

- Systemwahl, Konstruktion und Materialqualität entscheiden neben der Ausführungsqualität über „*Wohl und Wehe*“ der Erhaltungskosten in der lange dauernden Nutzungsphase.
- Eine strategische Bauwerksplanung sollte bei der Kostenplanung ein erreichbares Lebensdauer-maximum mit einem Kostenminimum bei uneingeschränkter Funktionserfüllung anstreben.
- Ist „**Nachhaltigkeit**“ ein leeres Schlagwort ??



Das römische Aquädukt von Segovia, Provinz Segovia, Region Kastilien & Leon, Spanien wurde unter Kaiser Trajan im späten 1. Jhdt. n. Chr. errichtet. Mit 728 m Länge und 7 -28 m Höhe überquert es auf 166 Bögen aus Granitquadern ohne Mörtelbindung die Plaza del Azoguejo in Segovia.

In der Folge werden 5 Modelle von Lebenszyklus-Kosten diskutiert

ANALYSE BESTEHENDER MODELLE

Kostenmodell für den Funktionserhalt von Straßenbrücken

Wicke, Kirsch, Straninger, Scharitzer (1)

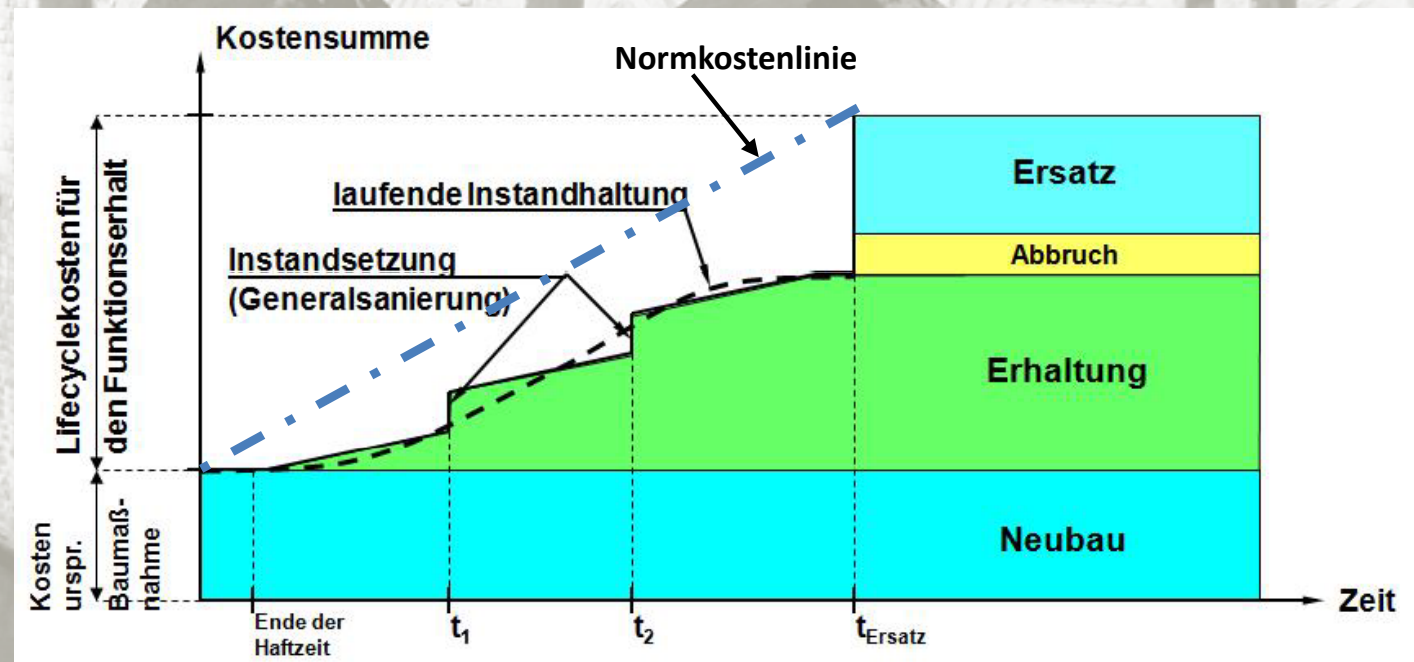
- Rechenmodell für die Ermittlung der Kosten des Funktionserhalts der Brücke an den österreichischen Bundesstraßen im Prognose Zeitraum 2001-2010.
- Berücksichtigt ca. 12.000 Objekte.
- Für jede Brücke werden je 9 Kostenstellen {Brückenelemente → Tragstruktur (2), Brückenausrüstung (5), Instandsetzungsmaßnahmen (2)} definiert.
- Grundlage sind Kennwerte aus Bauwerksdatenbank Österreich BAUT, Verkehrsstatistik (DTLV), Elementkosten durch Umfragen an Erhalter für rund 100 Baumaßnahmen ermittelt.

Kostenmodell für den Funktionserhalt von Straßenbrücken

Wicke, Kirsch, Straninger, Scharitzer (2)

- Darstellung des Lebenszyklus einer Brücke mit den offenen Fragen:
 - Wann ist das Ende der Lebensdauer zu erwarten ?
 - Wie hoch sind die einzelnen Anteile der Erhaltung ?
- Als Zeitmaßstab wird eine Ausfallswahrscheinlichkeit bestimmt
- Als Erhaltungskosten werden empirische Durchschnittswerte aus dem Bestand herangezogen

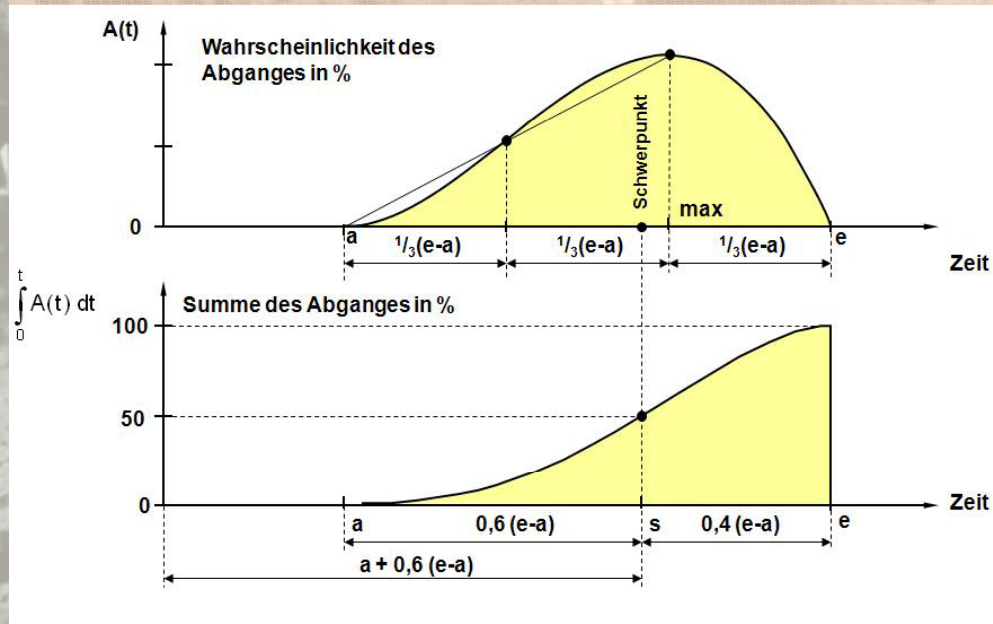
Darstellung des
Erhaltungsaufwands
bezogen auf die Zeit



Kostenmodell für den Funktionserhalt von Straßenbrücken

Wicke, Kirsch, Straninger, Scharitzer (3)

Abgangsfunktion und Summenbildung



Die Abbildung zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte und die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ausfalls (Abgang) der Brückenpopulation zwischen den Zeitpunkten Ausfallbeginn a und Ausfallende e .

Der Medianwert (50% Ausfälle, 50% Bestand) charakterisiert den Zeitpunkt der zu erwartenden mittleren Lebensdauer.

- Ausfall einer Brücke wird als „Abgang“ definiert.
- Als Abgangsfunktion wird dem Kostenmodell ein rechtsschiefes Polynom 3. Grades zu Grunde gelegt.
- Die Einflüsse auf die Lebenserwartung werden für eine bestimmte Brücke durch 4 Faktoren berücksichtigt.
- Ergebnis ist eine individuelle Ausfallswahrscheinlichkeit $A(t)$.

Kostenmodell für den Funktionserhalt von Straßenbrücken

Wicke, Kirsch, Straninger, Scharitzer (4)

- Schlussfolgerungen der Autoren
 - Instrumentarium für politische Entscheidungsträger.
 - Argument zur Gewährleistung auskömmlicher Budgetansätze.
 - Aussagekraft für heterogene Objektgruppen (Brückenpopulation), für Einzelobjekte nicht zufriedenstellend.
 - Eingeschränktes Lebenszyklusmodell, Lebenskosten einer einzelnen Brücke nicht ablesbar.
 - Erhaltungszustand wird als Kontrollwert verwendet.
 - Ersatzrate von ca. 2,0 %/a wird für die Zukunft als wahrscheinlich angesehen.

Gesamtkosten für Brücken

Stochastisches Alterungsmodell

Petschacher (1)

- Kostenprognose für Brückenpopulation (Gruppe von Brücken)
- Annahme der systematischen Reparatur
- Basiert auf Daten aus der Bauwerksdatenbank Österreich BAUT
- Analyse berücksichtigt Nutzer- und Erhaltungskosten
- Simulationen der Erhaltungsstrategien mit Hilfe des Kohorten-Modells (CSM) möglich
- Erhaltungszustand der Brücke dient nicht als Kontrollwert (wie bei Wicke) – sondern Stellgröße, nach der Investitionsentscheidungen auf Projektebene getroffen werden können.
- Es ist keine Kontrollmöglichkeit der Investitionen vorgesehen.

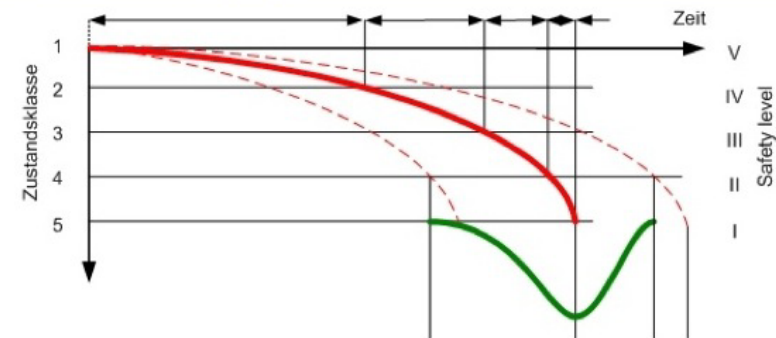
Gesamtkosten für Brücken

Stochastisches Alterungsmodell

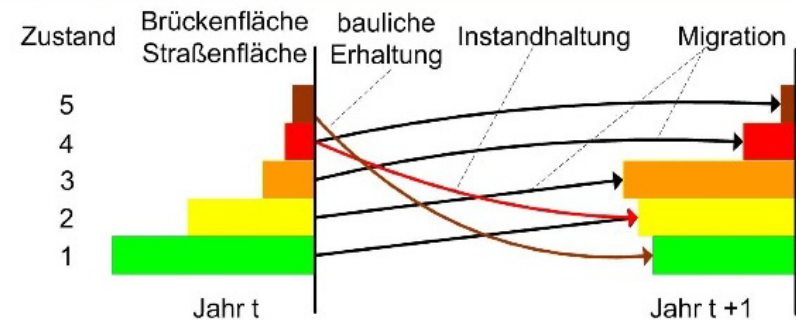
Petschacher (2)

- Alterungsverhalten von Brücken ist nicht linear
- Definiert ein eigenes Alterungsmodell $f(t)$ mittels stochastischer Ansätze
- Aktuelle Inspektions-ergebnisse werden berücksichtigt
- Modell greift auf ein definiertes Alterungsverhalten von Bauteilen zurück – Kohortenmodell

Lebensdauerverteilung $f(t)$



Kohorten-Verschiebung



Verfahren zur prognostizierenden Leistungsbestimmung der Zustandsverbesserung

Schach, Otto, Häupel, Fritzsche (1)

- Beeinflussbarkeit der Kosten (Herstellung, Erhaltung) in Planungs- und Herstellphase am höchsten.
- Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit durch integrale Betrachtung von Konstruktion, Instandhaltung, Dauerhaftigkeit bei voller Funktionserfüllung.
- Abschätzung Erhaltungskosten wegen Vielzahl an Randbedingungen besonders schwierig.

Verfahren zur prognostizierenden Leistungsbestimmung der Zustandsverbesserung

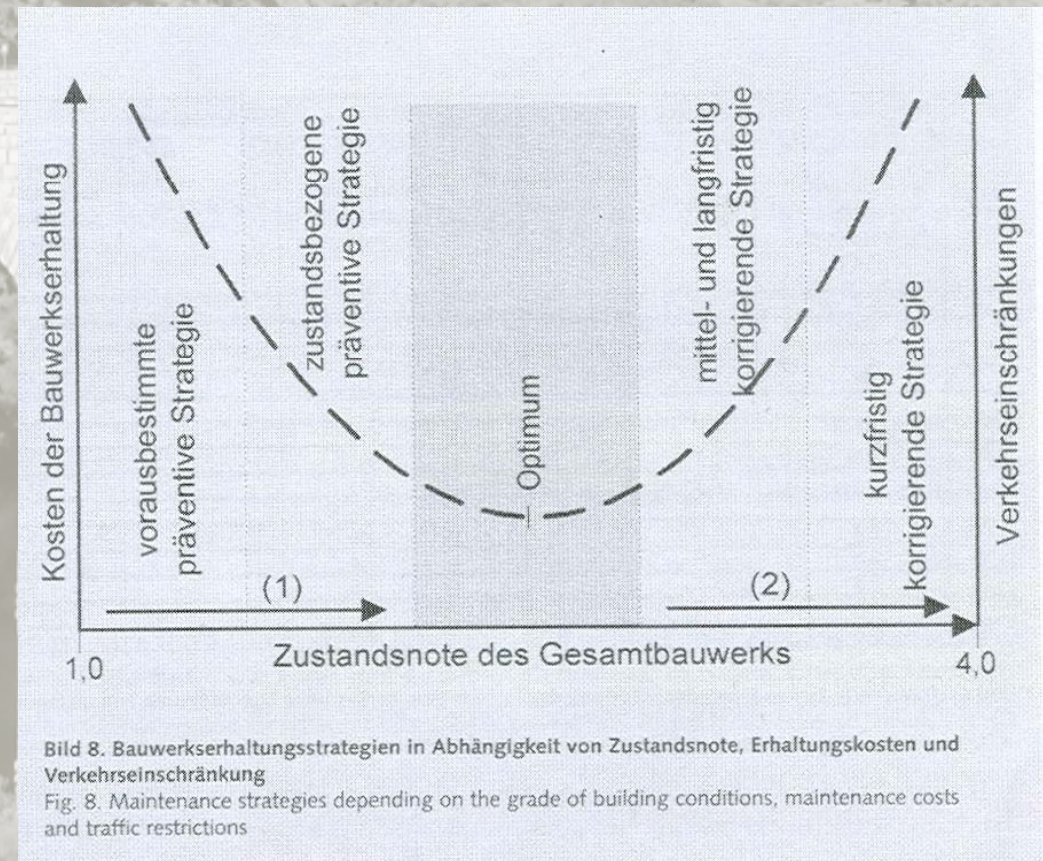
Schach, Otto, Häupel, Fritzsche (2)

- Prognose von Instandsetzungskosten auf Basis deterministischer Schadensverlaufsmodelle.
- Prognostizieren die Zustandsentwicklung von Bauteilen infolge Belastung und Einwirkung von Umgebungsbedingungen.
- Kennwert ist die Zustandsnotenentwicklung nach RI-EBW-PRÜF 2004.
- Gesamtzustand der Brücke entspricht der schlechtesten Bauteilnote (1,0 – 4,0).

Verfahren zur prognostizierenden Leistungsbestimmung der Zustandsverbesserung

Schach, Otto, Häupel, Fritzsche (3)

- Empfohlen wird eine weitsichtige und ökonomisch vertretbare Bauwerkserhaltung.
- Kombination aus präventiver und korrigierender Instandhaltung.
- Erhaltungskosten sollen bei voller Funktionserfüllung ein Minimum erreichen.



Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV^{*)}- Modell

Bewertung alternativer baulicher Lösungen

Girmscheid (1)

- Modell beruht auf dem Vergleich von alternativen baulichen Lösungen für den Hochbau.
- Ziel ist eine risikobasierte Entscheidungsbasis für Investoren.
- Grundlage ist eine Ausgaben/Einnahmen Betrachtung (ökonomisches Maximalprinzip).
- Berechnungsmodell ist die Barwertmethode (Net-Present-Value NPV- oder Discounted-Cash-Flow DCF-Method).
- Das Modell orientiert sich an den Hauptausgaben-gruppen des Bauwerks während seiner Lebensphasen.

Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV*- Modell

Bewertung alternativer baulicher Lösungen

Girmscheid (2)

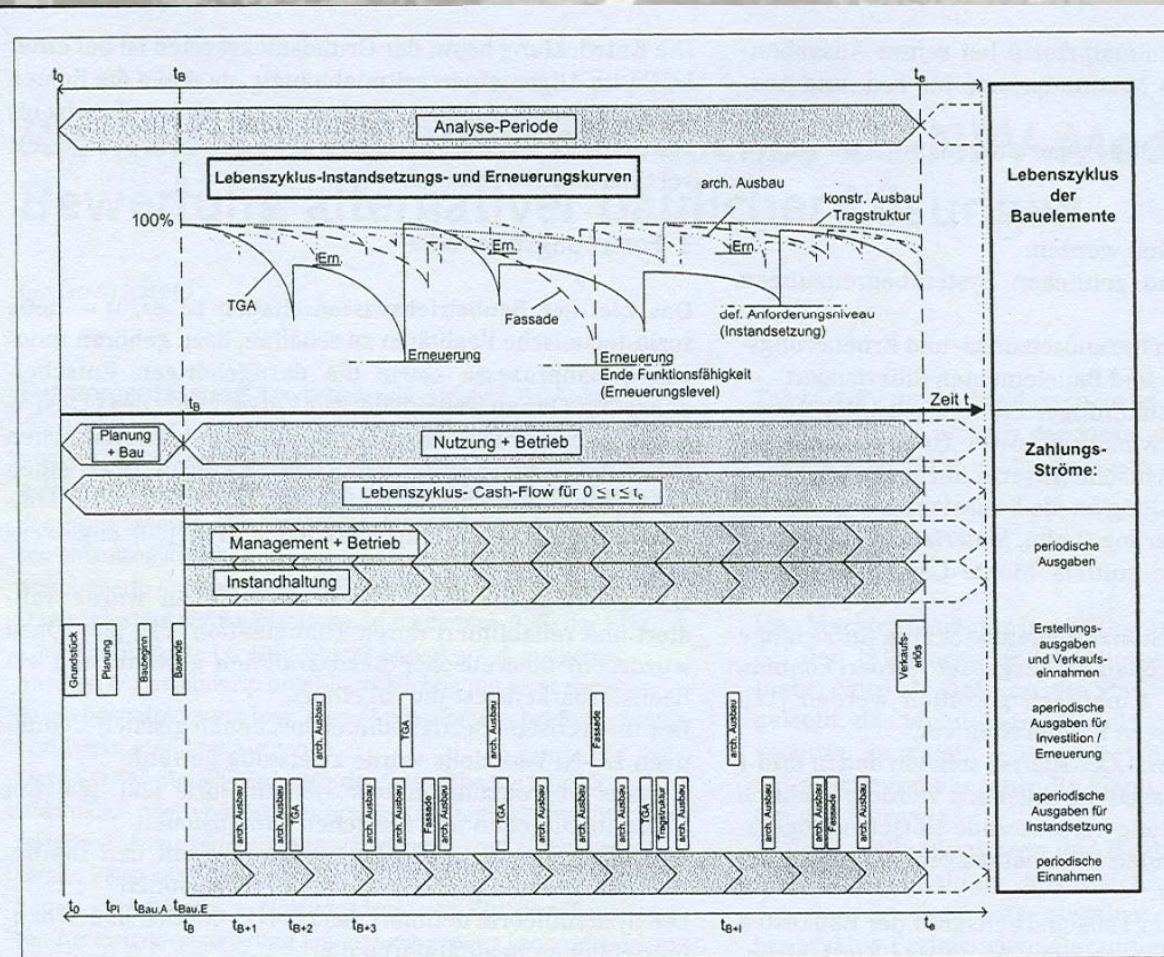


Bild 2. LC-NPV-Modell für Beurteilung alternativer baulicher Lösungen
Fig. 2. LC-NPV model for evaluation of alternative building or infrastructural solutions

- Vergleich alternativer baulicher Lösungen
- Zeitliche Abgrenzung muss für alle untersuchten Varianten gleich sein.
- (gleicher) Restwert wird, am Ende des Betrachtungszeitraumes, als Einnahme jeder Variante bewertet.
- Der Variantenvergleich erfordert Kauf (Anfang) und Verkauf (Ende) des baulichen Systems.

Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV^{*)}- Modell

Bewertung alternativer baulicher Lösungen

Girmscheid (3)

$$NPV_{\chi, t_B} = \sum_{t=1}^n C_{\chi, t} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}}$$

Barwert einer Variante χ
bezogen auf den
Betrachtungszeitpunkt t_B

$$E - NPV_{t_B}^{\max} = \max_{\chi=1}^{\chi=m} (NPV_{\chi, t_B}) \quad \text{mit } (1 \leq \chi \leq m)$$

Mathematische Modellierung nach Barwertmethode (NPV-Method)

Der Einnahmen bezogene Barwert nach dem ökonomischen Maximalprinzip bezogen auf die Einnahmen und Ausgaben zwischen m baulichen Lösungen χ (Varianten) bildet bei der probabilistischen Lebenszyklus-Barwert Analyse die Basis für die Wahl der wirtschaftlichsten baulichen Lösung aus dem Spektrum der Alternativen ($1 \leq \chi \leq m$).

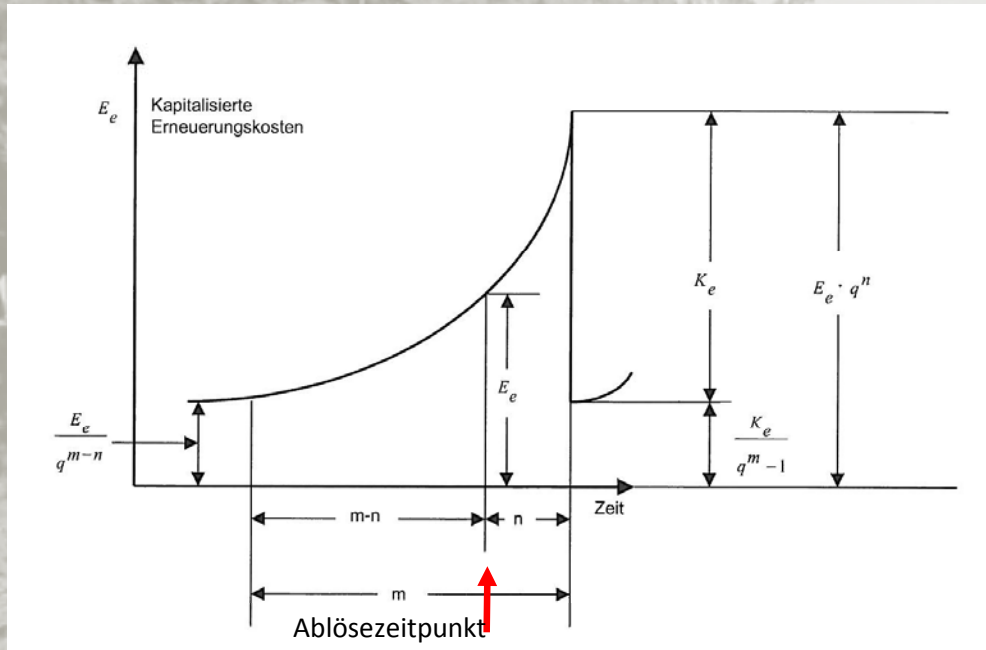
Richtlinie zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen

ÖBB 2006 [DB] (1)

- Als Ablösungsbetrag A werden die zukünftigen, kapitalisierten Erhaltungskosten einer (neuen) baulichen Anlage definiert.
- Bei Ersatz der bestehenden Baulichkeit ergibt sich der Ablösungsbetrag A als Differenz der kapitalisierten Erhaltungskosten E_{neu} und E_{alt} .
- Je nach Ergebnis der Differenzrechnung hat der künftig Erhaltungspflichtige den Ablösungsbetrag A
 - im Falle eines „Nachteils“ zu erhalten ($E_{\text{neu}} > E_{\text{alt}} \geq 0 \rightarrow A_{\text{Mehrkosten}}$),
 - im Falle eines „Vorteils“ zu bezahlen ($E_{\text{alt}} > E_{\text{neu}} \geq 0 \rightarrow A_{\text{Minderkosten}}$),
 - oder bei „Gleichstand“, wird A neutralisiert ($E_{\text{neu}} = E_{\text{alt}} \rightarrow A = 0$).

Richtlinie zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen

ÖBB 2006 [DB] (2)



$$E_e = \frac{q^{m-n}}{q^m - 1} K_e \quad \text{bzw.} \quad E_u = \frac{p}{z} K_u$$

$$E_{neu} = \frac{q^{m-n}}{q^m - 1} K_{e, neu}^{alt} + \frac{p}{z} K_{u, neu}^{alt}$$

$q = 1 + z/100$ mit $z = 4\%$

q^n ... Aufzinsungsfaktor für n Jahre

$1/q^n = q^{-n}$... Abzinsungsfaktor für n Jahre

Abbildung zeigt die Beziehung einer zeitlich unbegrenzten Unterhaltungsverpflichtung. Das Kapital E_u muss einen Zinsertrag bringen, der die laufenden jährlichen Unterhaltungskosten deckt.

$$E_u \frac{z}{100} \text{ jährlicher Zinsertrag des Kapitals } E_u = K_u \frac{p}{100} \text{ Unterhaltungskosten} \Rightarrow E_u = \frac{p}{z} K_u$$

Die kapitalisierten Erhaltungskosten E des Altbaus E_{Altbau} sowie des Neubaus E_{Neubau} werden nach der Barwert-/Endwertrechnung mit der Beziehung $E = E_e + E_u$ berechnet.

Richtlinie zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen ÖBB 2006 [DB] (3)

- Hauptzweck der ÖBB Ablöserichtlinie ist die Ermittlung von „Ablösungsbeträgen“ bei Eingriffen in den Lebenszyklus von baulichen Anlagen, deren Errichter/Verursacher einer Veränderung nicht zugleich der Erhalter ist.
- Die Berechnung der Erhaltungskosten des Altbaus und des Neubaus dienen lediglich als Grundlage für die daraus abgeleitete Differenzrechnung des Ablösungsbetrags einer baulichen Anlage/Brücke.

MODELL - LZKB

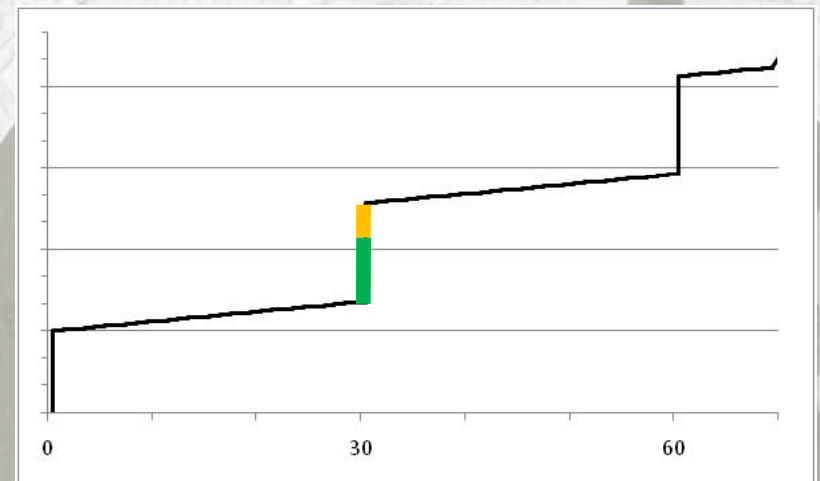
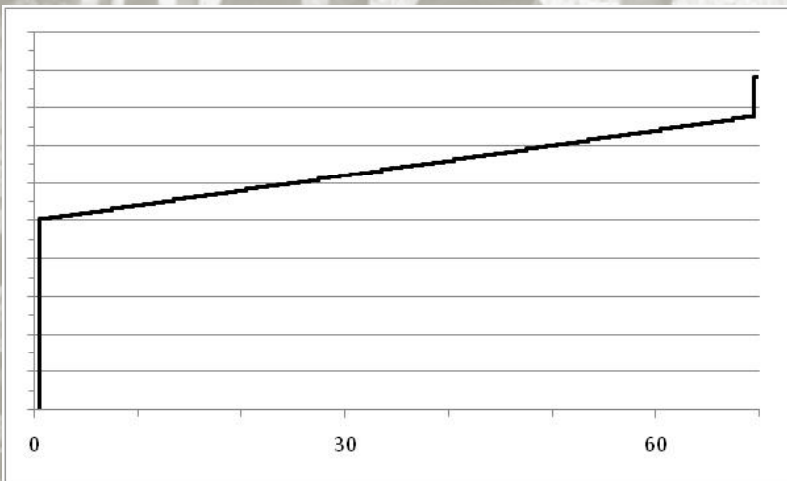
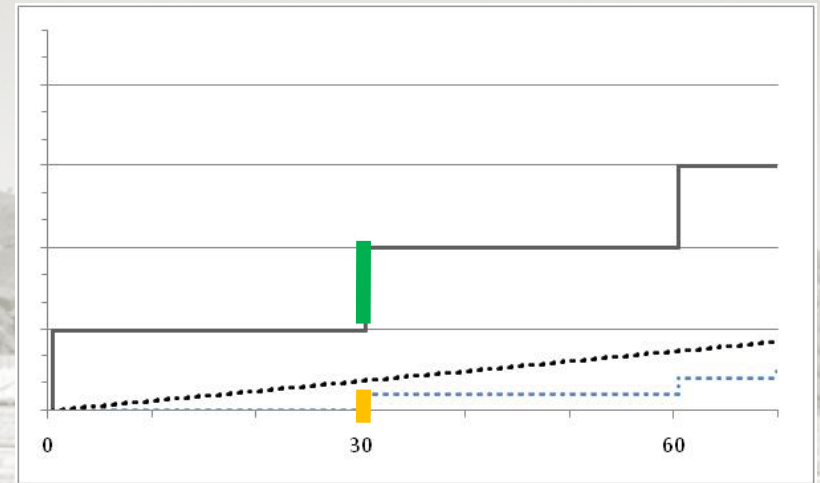
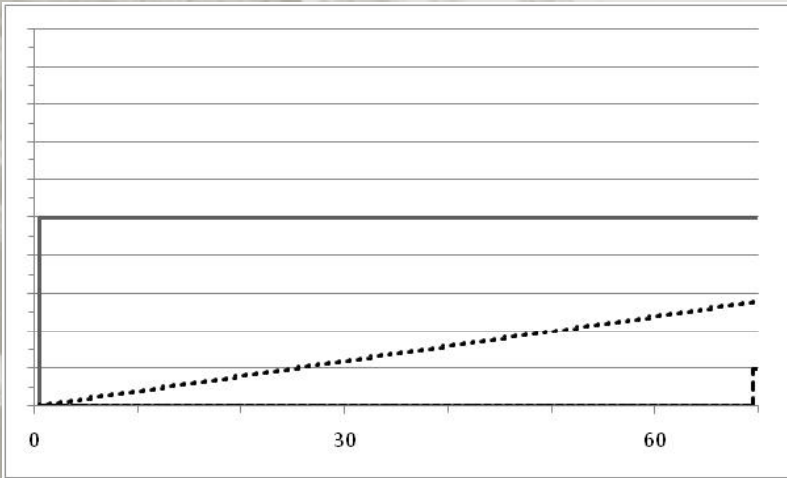
Laufendes Forschungsprogramm LZKB

- Programmentwicklung „Lebenszykluskosten-Brücke“ LZKB
- Basiert auf der Ablöserichtlinie der ÖBB
- Vergleichbarkeit durch Festlegungen gesichert
 - Festgelegter Zinssatz von 4 % p.A.
 - Festgelegte Werte für
 - Theoretische Nutzungsdauer m [a]
 - Jährliche Unterhaltungskosten p [%]
 - Abhängig von Tragsystem und Material der Brücke
- Orientiert sich am Layout des US Programms „Life-Cycle Costing Software for the Preliminary Design of Bridges“ BridgeLCC 2.0
- Dieses Programm basiert auf dem ASTM Standard und am Kosten-Klassifizierungssystem des „National Institute of Standards and Technology“ NIST

Auszug aus der Tabelle der theoretischen Nutzungsdauern und der Prozentsätze der jährlichen Unterhaltungskosten für den Überbau

	m [a]	p [%]
2 Überbau: Tragkonstruktionen (Balken, Platten, Bögen, Kastenquerschnitte)		
2.1 aus Stahlbeton	70	0,8
2.2 aus Spannbeton		
aus Spannbeton mit internen Spanngliedern	70	1,3
aus Spannbeton mit externen Spanngliedern	70	1,1
2.3 aus Stahl	100	1,5
2.4 aus Stahl-Beton-Verbundkonstruktionen		
Stahltragwerke mit Betonplatte	70	1,2
Walzträger in Beton	100	0,8
Stahlträger in Beton mit Doppelverband (z.B. Preflexträger)	100	0,5
2.5 aus Holz		
für Geh- und Radwege ohne Schutzdach	40	2,5
für Geh- und Radwege mit Schutzdach	50	2,0
für Straßen	40	2,5

Lebensdauer - Lebenszyklus



- Unterschiedliche Lebensdauern einzelner Brückenteile bezogen auf den Betrachtungszeitraum von 70 Jahren
- Lebensdauer der Ausrüstung normalerweise kürzer als Lebensdauer des Tragwerkes

Qualitätskriterien für die Planung von Brücken RVS 15.01

- Herleitung von bauteilbezogenen Auf- und Abminderungsfaktoren für
 - Theoretische Nutzungsdauer
 - Jährliche Unterhaltungskosten
- Anwendungsfälle
 - Neue Materialtechnologien
 - Versuchsprojekte
 - Zulassung
 - Beurteilung von Alternativangeboten
- Die Richtlinie definiert 4 in sich geschlossene Funktionsebenen
 - Tragwerksunterbau
 - Tragwerk
 - Nutzungsebene
 - Brückenausrüstung

Ziele für die Planung von Brücken

RVS 15.01

Entwurfsziele

- EZ-1 Tragsicherheit
- EZ-2 Gebrauchstauglichkeit
- EZ-3 Dauerhaftigkeit und Robustheit
- EZ-4 Erhaltungs- und Wartungsfreundlichkeit
- EZ-5 Herstellungsfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit
- EZ-6 Umweltverträglichkeit
- EZ-7 Gestaltung

Entwurfselemente

- EE-1 Herstellungsbedingungen
- EE-2 Systemwahl und Herstellungsmethodik
- EE-3 Materialzuordnung und ggf. Vorspannkonzent
- EE-4 Ständige und veränderliche Einwirkungen
- EE-5 Abmessungen
- EE-6 Längsschnittgestaltung
- EE-7 Parallel- und Nachnutzung

Auf- und Abminderungsfaktoren im LZKB

am Beispiel EZ-3 Dauerhaftigkeit und Robustheit des Tragwerkes

- *Bei negativen Umwelteinflüssen besonders ausgesetzter Bauteile ist die Betonqualität entsprechend darauf abzustimmen.*
- *Geringere Betondeckungen als 3,5 cm sind, abgesehen von Fertigteilen, nicht zulässig.*
- Fiktives Anwendungsbeispiel Betondeckung:

$$m_{\text{Stahlbeton}} = 70 \text{ Jahre}; \quad p_{\text{Stahlbeton}} = 0,8 \%$$

$$k_m = 1,00 \text{ und } k_p = 1,00 \text{ für } d = 3,5 \text{ cm}$$

- Eine Erhöhung der Betondeckung wirkt sich im Allgemeinen positiv auf die Dauerhaftigkeit von Betonbrücken aus. Sie weist jedoch auch einen höheren Aufwand in Form von Mehrmengen Beton als auch Bewehrungsstahl auf.
- Für eine Erhöhung der Mindestbetondeckung über 3,5 cm hinaus wird vorgeschlagen, einen Korrekturfaktor einzuführen.

$$k_m = 1,10 \text{ und } k_p = 0,85 \text{ für } d = 6,0 \text{ cm}$$

- dazwischen lineare Interpolation

Anforderungen - Anwendung

- Vergleich mehrerer Varianten (z.B.: Variantenstudien von Planern; Amtsprojekt und Varianten der Bieter).
- Vergleich einer sanierungs- oder überholungsbedürftigen Bestandsbrücke mit einer Neubaubrücke.
- Der Fall der reinen Ablöse (Übertragung der Brücke an einen anderen Brückenerhalter, z.B. eine Grenzbrücke, Brückentausch, ...).
- Leasing: Fall der Errichtung einer Brücke für einen Dritten, der für die Nutzung der Brücke entsprechende Leasingraten bezahlen muss.

Schlussfolgerungen

- Anforderung – Schaffung eines einfach zu handhabenden Berechnungsmodells für die Lebenskosten einer Brücke
- Ausgangswert sind die Errichtungskosten der Brücke
- Wiedererrichtungskosten von Bauteilen werden über die Lebensdauer vereinfacht gleichbleibend angesetzt
- Unterhaltungskosten werden auf die Errichtungskosten bezogen
- Berechnung nach Barwert-/Endwertmethode durch Auf- bzw. Abzinsung
- Kostenoptimierung für die Betriebsphase soll zur Optimierung der Gesamtkosten führen (Korrekturfaktoren)
- Einheitliche Berechnungsgrundlagen zwecks Vergleichbarkeit von Alternativen (Konstruktionen, Angebote)
- Ermittlung eines Bestbieters aus der Summe der Alternativen

Lebenskosten - Modell Brücke

Danke für Ihre Aufmerksamkeit