

Optimierung kombinierter Bauwerkserhaltungsmaßnahmen auf probabilistischer Grundlage



Univ.-Prof. Dr. Christian Bucher
bucher@uni-wiemar.de

Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Strukturmechanik
Marienstraße 15
99423 Weimar
Tel.: +49-364-358- 4511; Fax: +49-364-358- 4514

Die Erweiterungen in der Entwicklung aktueller Erhaltungs- und Instandsetzungsstrategien für Bauwerke basierend auf minimalen Kosten hinein in den Bereich nichtdeterministischer Beschreibung ermöglicht es, Unsicherheiten im Tragwerksverhalten, den Instandhaltungsmaßnahmen sowie der Kosten einzubeziehen. Ein dafür geeignetes Konzept sollte die Optimierung der Instandhaltungskosten die Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens von Grenzwerten der Sicherheit, des Tragwerkszustandes und der Kosten einbeziehen [1]. Im Folgenden werden Erweiterungen dieses Konzepts zusammenfassend dargelegt [2, 3]. Die Methode beruht auf der Monte-Carlo Simulation und benutzt ein regressionsbasiertes Glättungsverfahren.

1 Einführung

Der Entscheidungsprozess in vielen Ingenieurdisziplinen erfordert die Berücksichtigung von Unsicherheiten auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten. Dies gilt auch dann, wenn der mögliche Rahmen für die Entscheidungen mit Hilfe von Optimierungsverfahren genauer untersucht werden soll. In diesem Zusammenhang werden die Optimierungsvariablen häufig als Mittelwerte von Zufallsvariablen aufgefasst [4]. Demzufolge muss die Zielfunktion der Optimierung über Erwartungswerte bzw. Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens von Vorgabewerten wie Sicherheit, Zustand und Kosten definiert werden. In analoger Weise müssen die Nebenbedingungen der Optimierung formuliert werden. Beispiele für die Berücksichtigung verschiedener Beurteilungskriterien (Gebrauchstauglichkeit, Tragsicherheit) finden sich in [5] und [6].

Die Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen berücksichtigt in der Regel die Kosten von Erhaltung und möglichem Versagen zusammen mit Randbedingungen betreffend den Zustand bzw. die Sicherheit des betrachteten Bauwerks [7]. In diesem Optimierungsprozess wird die zufällige Streuung der Entwurfsparameter und ande-

rer Größen in der Form von Mittelwerten und Standardabweichungen berücksichtigt [8]. Wegen der stark nicht-Gaussischen Eigenschaften kann eine Beschreibung von Zielfunktion und Randbedingungen auf Grundlage von Wahrscheinlichkeiten besser geeignet sein.

In diesem Artikel werden Entwicklungen [1, 2, 3] zusammengefasst, die sich mit der Frage befassen, inwieweit diese Wahrscheinlichkeiten das Ergebnis der Optimierung beeinflussen können. Die Herangehensweise beruht auf der Monte-Carlo-Methode. Eine Glättung der unvermeidlichen Streuungen wird durch ein Regressionsverfahren erzielt.

Der Zustand eines Bauwerks wird beschrieben durch einen Zustandsindex c (z. B. 0 ist am besten, 3 ist am schlechtesten) und das Sicherheitsniveau s . Beide Indikatoren entwickeln sich mit der Zeit hin zu schlechteren Werten (Deterioration), sofern keine Erhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden [9]. Das Sicherheitsniveau s ist hier als traditionelle, deterministische Größe zu verstehen, d.h. für $s > 1$ ist das Bauwerk sicher, für $s < 1$ unsicher. Im Zusammenhang mit einer Zuverlässigkeitsanalyse wird das Sicherheitsniveau zum Zuverlässigkeitsindex β in Beziehung gesetzt:

$$\beta = s \cdot \beta_{\text{target}} \quad (1)$$

In dieser Gleichung ist β_{target} eine Zielvorgabe für die Zuverlässigkeit entsprechend des betrachteten Bauwerks oder Bauteils. Zahlenwerte dafür finden sich in aktuell entwickelten Normen. Der Zuverlässigkeitsindex kann zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit $P(F)$ genutzt werden:

$$P(F) = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

Darin ist $\Phi(\cdot)$ die standardisierte Normalverteilungsfunktion (CDF).

2 Berechnungsmodell

Die Deterioration von Sicherheit und Zustand wird im Folgenden einfachheitshalber als lineare Funktion der Zeit angenommen, wobei die Rate der Abnahme durch Erhaltungsmaßnahmen beeinflusst werden kann [10, 11, 12]. Somit ergibt sich für jedes Intervall von einem Jahr Dauer:

$$s_{t+1} = s - \alpha_s; \quad c_{t+1} = c_t + \alpha_c \quad (3)$$

Im Folgenden wird vorbeugende Instandhaltung von Betonbrückenbauteilen durch Behandlung mit Silan (Siliziumwasserstoff) berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Behandlung für eine gewisse Zeitdauer die Rate der Deterioration reduziert. Sowohl diese Zeitdauer als auch die Deteriorationsraten werden als Zufallsvariable angenommen. Die Kosten der Anwendung dieses Verfahrens werden ebenfalls zufällig angesetzt. Als Bedarfsinstandsetzung wird Neubau des Bauteils angenommen, der dann durchgeführt wird, wenn das Sicherheitsniveau einen kritischen Wert unterschreitet. Nach dem Neubau setzt zunächst die Deterioration aus und beginnt nach einer zufälligen Zeitdauer wieder. Bei Erreichen eines kritischen Zustandindex werden kleinere Betonreparaturen durchgeführt. Dadurch wird der Zustandsindex um ein zufälliges Maß verbessert und die weitere Deterioration verzögert, solange $c < 1$ ist. Probabilistische Modelle für vorbeugende und Bedarfsinstandsetzung sind in [13] und [14] gegeben. Die Instandsetzungskosten für die gesamte Nutzungsdauer werden mittels Monte-Carlo-Simulation durch die Summierung über alle Kostenanteile berechnet. Dabei werden die Kosten über die Zeit mit einem rechnerischen Zinssatz von $n = 0.03$ diskontiert. Die statistische Auswertung der Stichproben ergibt zusätzlich die erwarteten Versagensfolgekosten und die Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens vorgegebener Grenzwerte. Die erwarteten Versagenskosten werden unter der Annahme be-

rechnet, dass Versagensereignisse in den einzelnen Jahren voneinander unabhängig sind. Basierend auf dem durchschnittlichen Zuverlässigkeitsindex in jedem Jahr werden die Beiträge zu den erwarteten Versagenskosten über die Jahre diskontiert und addiert:

$$\bar{C}_F = c_f \sum_{t=1}^{T_S} \Phi(-\bar{\beta}_r) \frac{1}{(1+v)^t} \quad (4)$$

Der numerische Wert des Versagenskostenkoeffizienten c_f enthält dabei sowohl die direkten Versagenskosten als auch die indirekten Kosten (z. B. Nutzerkosten). Dieser Wert muss abhängig von betrachteten Bauwerk und seiner Bedeutung gewählt werden.

3 Numerisches Beispiel

Das oben angesprochene Konzept wird an einem Beispiel betreffend die Instandhaltung von Betonbauteilen illustriert. In diesem Beispiel werden sowohl (a) vorbeugende Erhaltung durch Anwendung von Silan als auch (b) Bedarfsinstandsetzung durch Neubau (wenn dies durch zu geringe Sicherheit erzwungen wird) und kleinere Betonreparaturen (wenn dies durch den aktuellen Zustand erforderlich wird) berücksichtigt. Die Silanbehandlung wird durch den Zeitpunkt der ersten Anwendung und das Zeitintervall zwischen aufeinander folgenden Anwendungen definiert. Beide Variablen werden zufällig mit einer dreiecksförmigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion angenommen (vgl. Tabelle 1). Aus den Untersuchungen in [1, 2] ist bekannt, dass der Zeitpunkt der ersten Silananwendung auf einem niedrigen Wert (d.h. 3 Jahre) fixiert werden kann. Der Modalwert des Intervalls bis zu nachfolgenden Anwendungen ist eine Optimierungsvariable. Ein Neubau wird ausgeführt, wenn das Sicherheitsniveau den Wert s_{cr} unterschreitet, kleinere Betonreparaturen werden ausgeführt, wenn der Zustandsindex größer als c_{cr} wird. Beide Grenzwerte sind Optimierungsvariable. Die Anfangswerte

Tabelle 1: Statistische Daten für die betrachteten Zufallsvariablen [2]

Variable	Unit	Lower Limit	Mode	Upper Limit
Initial application time of silane	yr	0	\bar{T}_{pi}	15
Subsequent application interval	yr	$\bar{T}_p - 2.5$	\bar{T}_p	$\bar{T}_p + 2.5$
Initial condition index	-	0	1.75	3.50
Initial safety index	-	0.91	1.50	2.50
Deterioration rate of condition	1/yr	0	0.08	0.16
Deterioration rate of safety index	1/yr	0	0.015	0.035
Delay in deterioration after rebuild	yr	10	15	30
Reduced deterioration rate of condition	1/yr	0	0.01	0.03
Duration of maintenance effect on condition	yr	7.5	10	12.5
Improvement of safety index by rebuild	-	1.00	1.25	1.50
Improvement of cond. index by minor concrete repair	-	2.00	2.50	3.00
Reduced deterioration rate of safety index	1/yr	0	0.007	0.018
Duration of maintenance effect on safety index	yr	7.5	10	12.5
Unit cost of silane treatment	k£	0.3	39	77
Unit cost of rebuild	k£	247	7410	28898
Unit cost of minor concrete repair	k£	16	3605	14437

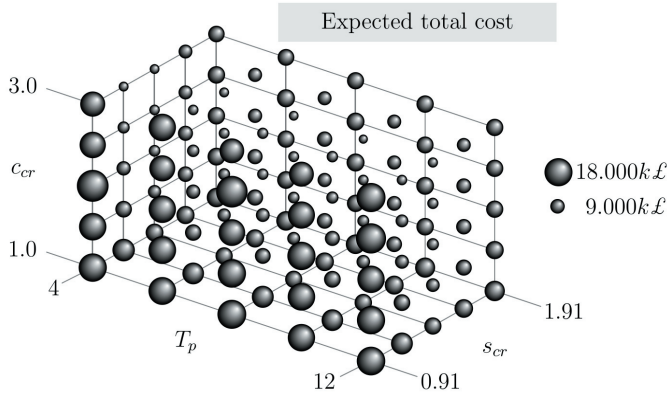


Bild 1: Erwartungswert der Gesamtkosten [k£] nach 50 Jahren

des Zustandsindex c und des Sicherheitsniveaus s sind Zufallsvariable, da das Bauwerk bereits ein gewisses Alter besitzt.

Die statistischen Kenngrößen für alle Zufallsvariablen sind in Tabelle 1 gegeben. Die darin angenommenen Werte beziehen sich auf eine große Anzahl von korrosionsgefährdeten Querhäuptern an Stahlbetonbrücken in Großbritannien (z. B. [9]).

Das Optimierungsproblem wird nun folgendermaßen formuliert: Minimiere die erwarteten Gesamterhaltungskosten (unter Einschluss von Reparaturmaßnahmen und Versagenskosten) bezüglich des mittleren Anwendungsintervalls der Silanbehandlung, des Grenzwerts für das Sicherheitsniveau und des Grenzwerts für den Zustandsindex. Paarweise Kombinationen wurden in [1, 2] untersucht, die Untersuchung der dreifachen Kombination ist aus [3] entnommen.

Die Optimierungsvariablen werden in einem gleichmäßig unterteilten Gitter der Größe $5 \times 5 \times 5$ diskret unterteilt. Dabei werden die Wertebereiche $4 \leq T_p \leq 12$, $1 \leq c_{cr} \leq 3$ und $0.91 \leq s_{cr} \leq 1.91$ abgedeckt. In jedem Gitterpunkt werden 1000 Monte-Carlo Simulationen durchgeführt und damit die benötigten Erwartungswerte und Wahrscheinlichkeiten ermittelt. Für die Berechnung der Versagenskosten

wird als Vorgabewert für den Zuverlässigkeitsindex $\beta_{target} = 2.0$ angesetzt. Dies impliziert einen Neubau, sobald der Zuverlässigkeitsindex den Wert von $\beta = 0.91$ $\beta_{target} = 1.82$ unterschreitet. Damit wird die Versagenswahrscheinlichkeit auf $P(F) < 3.4 \cdot 10^{-2}$ beschränkt. Die Versagenskosten werden mit $C_f = 500000$ k£ angenommen.

Auf dem untersuchten Gitter wurden die minimalen Gesamtkosten mit $C_{min} = 5000$ k£ ermittelt (Bild 1). Dieser Wert ergab sich für einen moderat niedrigen Sicherheitsgrenzwert von $s_{cr}^* = 1.41$ und einen hohen (schlechten) Grenzwert für den Zustandsindex $c_{cr}^* = 3.0$. Das optimale Zeitintervall für die Silananwendung ergab sich mit $T_p^* = 4.0$ Jahren. Die Abhängigkeit der Kosten von T_p ist allerdings sehr gering ausgeprägt. So ist der Wert der erwarteten Gesamtkosten bei $T_p = 8$ Jahren nur um 2% größer, was durchaus im Bereich der Stichprobenunsicherheit liegt.

Dies ist an den geglätteten Scheiben, herausgenommen bei $T_p = 4$ Jahre und $T_p = 8$ Jahre, zu erkennen. Sie sind in Bild 2 dargestellt. Darin wurde ein Regressionsverfahren genutzt, um die Einflüsse der Stichprobenunsicherheiten zu reduzieren. Die Bilder sind nahezu identisch und ergeben optimale Werte für den Grenzwert der Sicherheit bei $s_{cr}^* = 1.35$ und für den Zustandsindex bei $c_{cr}^* = 3$.

4 Schlussbemerkungen

Das dargelegte Konzept für die Optimierung von Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen erlaubt die Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens von Grenzwerten betreffend Sicherheit, Tragwerkszustand und Kosten. Für eine kombinierte Strategie aus vorbeugender Erhaltung und zwei bedarfsorientierten Instandsetzungsmaßnahmen wurde eine probabilistische Beschreibung der anfallenden Kosten mit Hilfe eines Monte-Carlo-Verfahrens bestimmt. Die zusätzliche Anwendung eines regressionsbasierten Glättungsverfahrens erlaubt die Reduktion statistischer Unsicherheiten infolge des beschränkten Stichprobenumfangs.

Im Vergleich der unterschiedlichen Maßnahmen zeigt sich, dass der Grenzwert für das Sicherheitsniveau (dessen

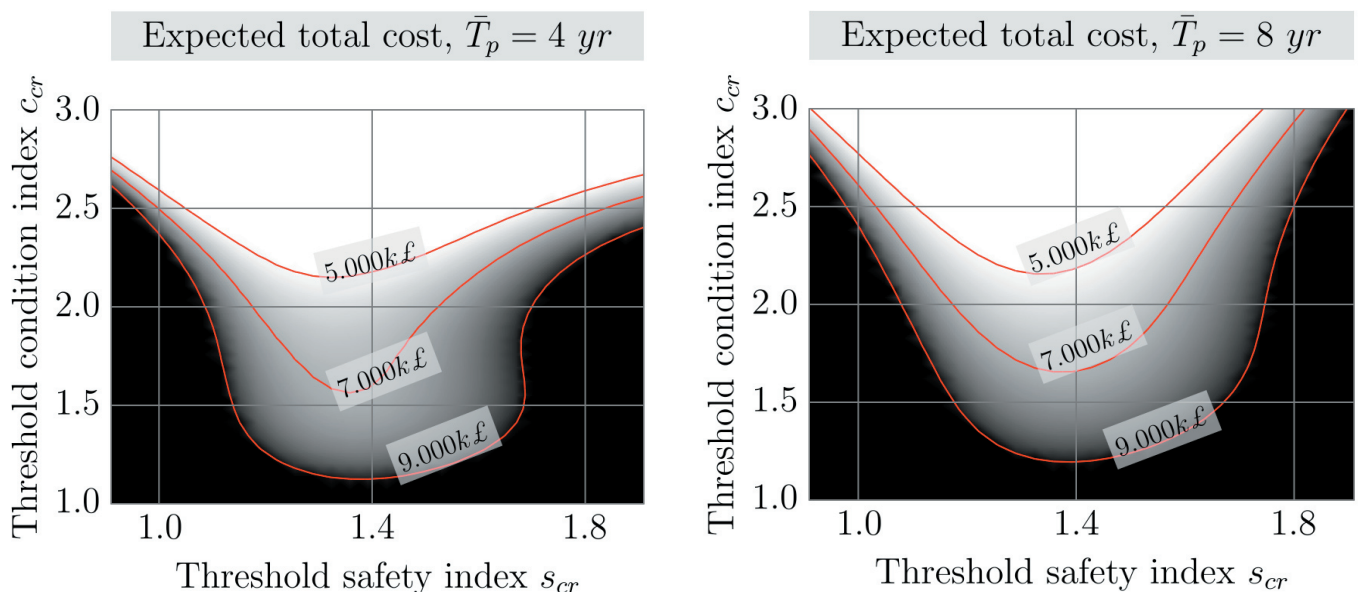


Bild 2: Erwartungswert der Gesamtkosten [k£] nach 50 Jahren für ausgewählte Werte des Intervalls für die Silananwendung

Unterschreitung den Neubau auslöst) eine ganz wesentliche Rolle für die Gesamtkosten im Lebenszyklus spielt. Der Einfluss der Silananwendung ist sehr gering, und der Einfluss des Grenzwerts für den Zustandsindex ist auch nur bei sehr kleinen Werten (also nahe dem perfekten Zustand aufgrund der damit verbundenen häufig anfallenden Kosten) ausgeprägt sichtbar. Außerhalb dieses Bereichs ist die Wahl des Grenzwerts des Zustandsindex ebenfalls nicht entscheidend.

Dank

Der Autor führte diese Arbeit im Rahmen einer Gastprofessur am Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering der University of Colorado, Boulder in enger Zusammenarbeit mit Professor *Dan M. Frangopol* durch. Die teilweise Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 524 wird dankend anerkannt.

Literatur

- [1] C. Bucher and D. M. Frangopol. Optimization of lifetime maintenance strategies for deteriorating structures considering probabilities of violating safety, condition, and cost thresholds. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21:1–8, 2006.
- [2] C. Bucher and D. M. Frangopol. On optimal lifetime maintenance strategies taking into account probabilities of violating performance and cost thresholds. In J. D. Sorensen and D. M. Frangopol, editors, *Advances in Reliability and Optimization of Structural Systems*, pp. 73–80. Taylor & Francis/Balkema, 2006.
- [3] C. Bucher and D. M. Frangopol. Optimization of combined lifetime maintenance strategies. In P. D. Spanos and G. Deodatis, editors, *Computational Stochastic Mechanics 5*, to appear, 2007.
- [4] D. M. Frangopol and K. Maute. Reliability-based optimization of civil and aerospace structural systems. In E. Nikolaidis, D. M. Ghiocel, and S. Singhal, editors, *Engineering Design Reliability Handbook*, pp. 24–1 to 24–32. CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [5] D. M. Frangopol. Multicriteria reliability-based structural optimization. *Structural Safety*, 3(1):23–28, 1985.
- [6] S. Higuchi and C. Bucher. Performance-based optimal design of structures. In *Proceedings, 9th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, 2004.
- [7] M. Liu and D. M. Frangopol. Optimal bridge maintenance planning based on probabilistic performance prediction. *Engineering Structures*, 26(7):991–1002, 2004.
- [8] A. C. Estes and D. M. Frangopol. Life-cycle evaluation and condition assessment of structures. In W.-F. Chen and E. M. Lui, editors, *Structural Engineering Handbook*, 2nd Edition, pp. 36–1 to 36–51. CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [9] L. C. Neves and D. M. Frangopol. Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges. *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier, 89(2):189–198, 2005.
- [10] D. M. Frangopol, J. S. Kong and E. S. Gharaibeh. Reliability-based life-cycle management of highway bridges. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 15(1):27–34, 2001.
- [11] L. C. Neves, D. M. Frangopol and P. S. Cruz. Cost of life extension of deteriorating structures under reliability-based maintenance. *Computers and Structures*, 82(13–14):1077–1089, 2004.
- [12] M. Liu and D. M. Frangopol. Probabilistic maintenance prioritization for deteriorating bridges using a multiobjective genetic algorithm. In *Proceedings, 9th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*, Albuquerque, NM. ASCE, on CD, 2004.
- [13] D. M. Frangopol. A probabilistic model based on eight random variables for preventive maintenance of bridges. Presented at the progress meeting *Optimum Maintenance Strategies for Different Bridge Types*, Highways Agency, London, U.K. 1998.
- [14] J. M. van Noortwijk and D. M. Frangopol. Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(4): 345–359, 2004.