

Dauerhaftigkeitsbemessung und Lebenszyklus von Stahlbetonbauwerken

Christoph Gehlen

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird vorgestellt, wie der Lebenszyklus eines Ingenieurbauwerkes hinsichtlich ökonomischer Qualität gesteuert und vergleichend beurteilt werden kann. Die zu erwartende Lebensdauer von Ingenieurbauwerken ist dabei ein Parameter, der maßgeblich die ökonomische Qualität des Bauwerkes bestimmt. Für die Steuerung der ökonomischen Qualität hat die Dauerhaftigkeitsbemessung insofern eine besondere Bedeutung. Mit Hilfe der vorgestellten Methodik, die sich auf ein Sicherheitskonzept auf probabilistischer Grundlage abstützt, wird aber nicht nur die ökonomische Qualität von Bauwerken transparent erfasst, sondern auch eine wichtige Datengrundlage für weitere Beurteilungen geschaffen, z. B. mit Blick auf ökologische Qualität des Bauproduktes.

1 Allgemeines

Die nachhaltige Entwicklung besitzt weltweit als Leitbild für die Zukunft eine herausragende Bedeutung. Das Bauwesen nimmt dabei eine besondere Stellung ein, da es wesentliche Bedürfnisse des Menschen wie Wohnen und infrastrukturelle Bedürfnisse befriedigt und zugleich große wirtschaftliche und für die Umwelt relevante Ressourcen damit verbunden sind.

Die Betonbauweise nimmt innerhalb des gesamten Bauwesens auf Grund der eingesetzten Mengen an Material, der großen Breite der Anwendungen und der in der Leistungsfähigkeit der Bauweise begründeten Entwicklungspotenziale eine herausragende technische und wirtschaftliche Stellung ein. Allein im Jahr 2008 wurden zum Beispiel rd. 41 Mio. m³ Transportbeton in Deutschland hergestellt. Dies entspricht einem Umsatz von rd. 2,6 Mrd. Euro. Der Umsatz in der Zementindustrie betrug im gleichen Jahr rd. 2,3 Mrd. Euro bei einem nationalen Zementabsatz von rd. 35 Mio. t. Diese exemplarisch ausgewählten Zahlen verdeutlichen, dass insbesondere im Betonbau eine nachhaltige Entwicklung umgesetzt werden muss, wenn sie im Bauwesen auf breiter Ebene Wirkung entfalten soll.

Zugleich stellt die Forderung nach nachhaltigem Bauen für die Bauwirtschaft eine Chance dar, um von einem kurzfristigen Kostenwettbewerb zu einem Qualitätswettbewerb zu kommen, der diesen langfristigen Zielen im Ergebnis gerecht wird. Nicht zuletzt die die Bauwirtschaft prägenden kleinen und mittleren Unternehmen (KMU's) können von einem solchen Wandel profitieren.

Mit Blick auf die Agenda 21 kommt es den am Betonbau beteiligten Industriepartnern darauf an, ökologische, ökonomische und soziale Bedürfnisse entlang der Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung über die Zement- und Betonherstellung bis zum Rückbau und Recycling insgesamt besser aufeinander abzustimmen.

Das übergeordnete Ziel von Systemen zur Bewertung von Nachhaltigkeit ist, die Qualität von Gebäuden und baulichen Anlagen in ihrer Komplexität zu beschreiben und zu bewerten. Die Bewertungssysteme sollen die Bedeutung gesellschaftlich anerkannter Ziele und Inhalte angemessen berücksichtigen und eine ausgewogene Bewertung ökologischer, ökonomischer, sozialer, funktionaler und technischer Aspekte bei gleichzeitiger Betrachtung der Qualität von Prozessen der Planung, Realisierung und Bewirtschaftung ermöglichen, vgl. hierzu Abb. 1. Des Weiteren können Standortmerkmale ausgewiesen werden.

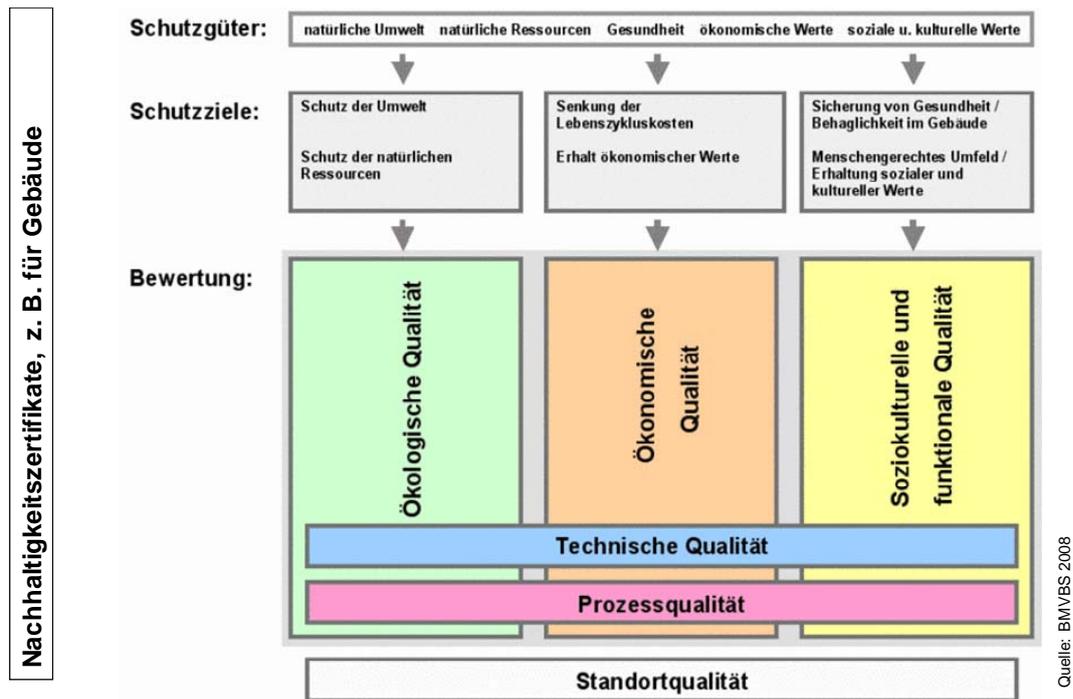


Abb. 1: Schema für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, BMVBS

Diese z.T. nun zu ordnenden Prozesse sollen mit der Planung beginnend über die Bauausführung, Nutzung, Wartung, Instandhaltung bis hin zum Abbruch von Gebäuden und baulichen Anlagen zu einer höheren Bauqualität führen.

In diesem Beitrag werden am Beispiel von Infrastrukturbauwerken die Aspekte ökologische und ökonomische Qualität beleuchtet. Bei letzterem steht ein Lebensdauermanagementinstrument im Fokus, mit Hilfe dessen ökonomischen Lösungen hinsichtlich Herstellung und Erhalt von baulichen Anlagen identifiziert werden können.

2 Ökonomische Qualität

Stahlbetonbauwerke können prinzipiell unter Verwendung unterschiedlicher Beton- und Stahlgüten hergestellt werden. U. a. durch die Wahl der Baustoffe wird festgelegt, wie hoch die Herstellungskosten auf der einen Seite und auf der anderen Seite wie widerstandsfähig das aus dem Materialien hergestellte Bauwerk gegenüber den zu erwartenden Last- und Umwelteinwirkungen ist. Das heißt, je höherwertig das verwendete Material, desto höher die Herstellungskosten, aber auch desto

niedriger die Kosten für den Erhalt (höhere Lebensdauer) [1, 2, 3].

Stahlbeton- und Betonbauwerke sind vielfältigen Last- und Umwelteinwirkungen ausgesetzt, die die Lebensdauer beschränken. Korrosion an der Beton- und Spannstahlbewehrung, Ermüdung durch wiederkehrende dynamische Belastungen oder Betonschäden verursacht durch Frost-Tausalz-Bearbeitung sind nur einige von vielen lebensdauerbeschränkenden Ereignissen, die z. T. im Ausmaß zeitabhängig sich entwickeln [4, 5].

In Abb. 2 ist dies schematisch dargestellt. Nach Planung (Design) und Erstellung (Construction) sinkt der zu Beginn hoch eingestellte Bauwerkszustand kontinuierlich auf niedrigere Werte ab. Um Hinweise auf die zunehmende Abnutzung und damit auch auf den vorhandenen Abnutzungsvorrat zu bekommen, werden Bauwerke z. T. regelmäßig inspiziert [6, 7, 8, 9, 10]. Durch Inspektionen wird der zunehmend sich verschlechternde Zustand überprüft und beurteilt (Assessment). Durch Instandsetzungsmaßnahmen (Intervention) kann bei Bedarf der Zustand des Bauwerks verbessert bzw. in seiner zeitlichen Weiterentwicklung beeinflusst werden. Solche Maßnahmen wirken sich i. d. R. lebensdauerverlängernd aus [11].

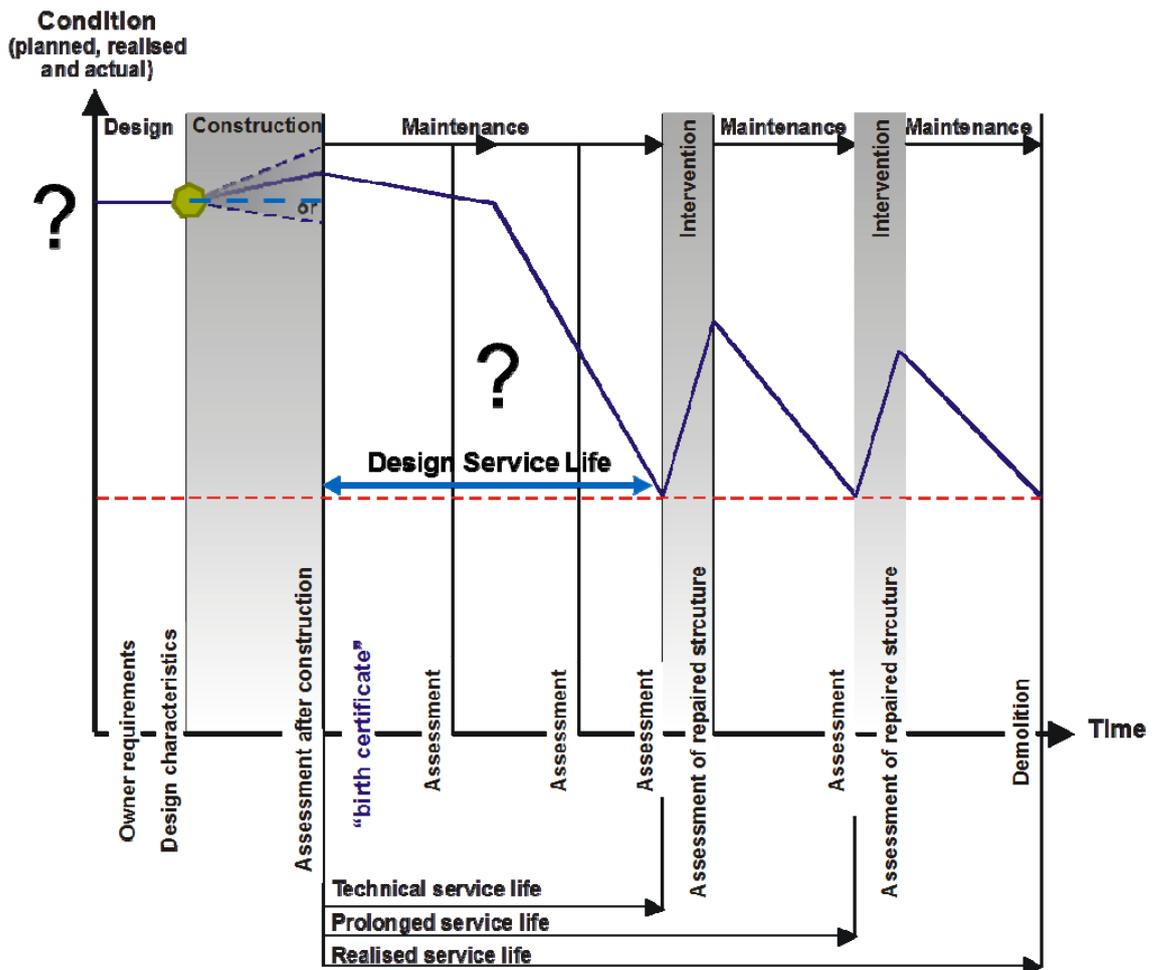


Abb. 2: Zustandsentwicklung von Bauwerken in Abhängigkeit der Zeit, [12]

Im deutschen Regelwerk werden dauerhaftigkeitsrelevante Angriffe den jeweilig erwarteten Umgebungsbedingungen entsprechend in Expositionsklassen eingeteilt.

Je nach Expositionsklasse sind verschiedene Anforderungen hinsichtlich Material, Materialzusammensetzung, vgl. Abb. 3, und Geometrie (Betondeckung) einzuhalten. Diese bauaufsichtlich eingeführten deskriptiven Regeln sollen sicherstellen, dass eine die Dauerhaftigkeit beeinträchtigende Schadreaktion unterdrückt bzw. vermieden wird. Die auf Erfahrungswerten beruhenden Regelungen sind zwar einfach handhabbar, erlauben jedoch keine gezielte Bemessung auf Dauerhaftigkeit. So bleibt

unbekannt, welche konkrete Zuverlässigkeit (Condition) das Bauwerk gegenüber einer spezifischen Einwirkung bei Inbetriebnahme hat und welche Lebensdauer danach (Design Service Life), vgl. hierzu Abb. 2. Darüber können nur leistungsbezogene Lebensdauerbemessungen Auskunft geben [11].

Voraussetzung zur Durchführung einer echten Lebensdauerbemessung, bei der Zuverlässigkeit und Lebensdauer individuell berechnet werden kann, sind realitätsnahe und validierte Modelle zur Beschreibung der Einwirkung und des Widerstandes sowie eine statistische Quantifizierung der Modellvariablen.

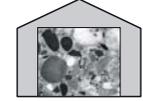
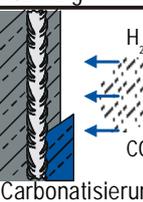
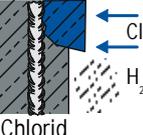
Expositionsklassen ("Einwirkungen")			Betontechnische Maßnahmen ("Widerstände")		
Klassenbez.	Einwirkung	und Beanspruchung	Max. w/z	Min. z	fck, cube
XO		kein Betonangriff	keine Anforderung	keine Anforderung	C8/10
XC		1 trocken	0,75	240	C16/20
		2 ständig nass	0,75	240	C16/20
		3 mäßig feucht	0,65	260	C20/25
		4 nass / trocken	0,60	280	C25/30
XD/ XS		1 mäßig feucht	0,55	300	C30/37
		2 ständig nass	0,50	320	C35/45
		3 nass / trocken	0,45	320	C35/45

Abb. 3: Expositionsklassen, deskriptive Regeln

Bei Expositionsbedingungen gemäß XC oder XD/XS beispielsweise wäre zu erwarten, dass nach gewissen Zeiträumen die im Beton eingebettete Bewehrung durch die Wirkung von CO_2 bzw. Chlorid depassiviert und anschließend korrosionsbereit vorliegt. Um dies zu verhindern, ist das Eindringen von CO_2 bzw. Chlorid soweit zu unterdrücken, dass eine Depassivierung und damit in der Folge ein Korrosionsschaden an der Bewehrung mit einer akzeptablen Wahrscheinlichkeit vermieden wird. Im Fall der Depassivierung der Bewehrung kann die Einwirkung S vereinfacht als die Eindringtiefe der Depassivierungsfrent (x_c) dargestellt werden und die Betondeckung, hier als geometrische Größe a bezeichnet, als der Widerstand R . Wird der Zustand erreicht, dass die Betondeckung a gleich der Eindringtiefe x_c des depassivierenden Mediums ist,

ist der Grenzzustand – Bewehrung depassiviert und damit korrosionsbereit - erreicht. Diesen ungewollten Bauteilzustand gilt es auf ein maximal vertretbares Maß zu beschränken [4].

Die Variablen a (Widerstand) und x_c (Einwirkung) sind in Abb. 4 als stochastische Modellparameter dargestellt, die unter Angabe von Verteilungsfunktion, Mittelwert und Standardabweichung zu jeder Zeit vollständig beschrieben werden können.

Wie in Abb. 4 ablesbar, nimmt die Eindringtiefe (x_c) mit der Zeit kontinuierlich zu. D. h., die Einwirkung wächst bei zeitlich gleichbleibend konstantem geometrischen Widerstand stetig. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit einer Depassivierung („Versagenswahrscheinlichkeit“) mit zunehmender Zeit, Abb. 4 und Abb. 5.

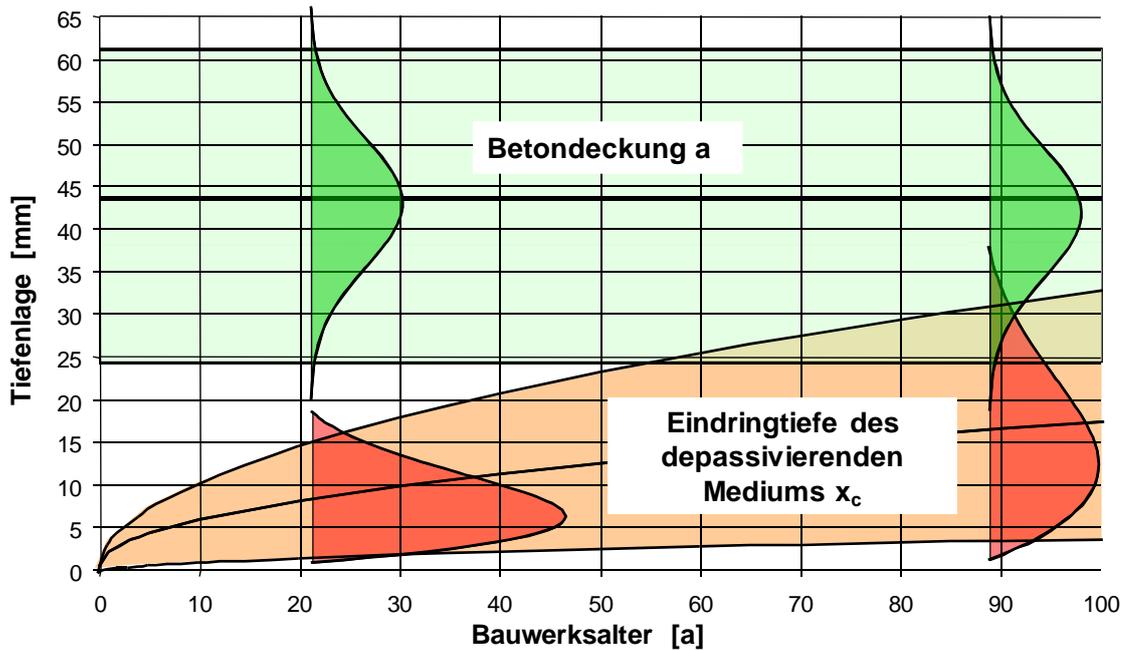


Abb. 4: Betondeckung vs. Eindringtiefe des depassivierenden Mediums [4]

Begrenzt man die Wahrscheinlichkeit einer Depassivierung auf ein gerade noch tolerierbares Maß, z. B. auf maximal 5 %, kann anhand solcher Kurven die zu erwartende Lebensdauer, hier mit der Variablen T bezeichnet, abgelesen werden, Abb. 5.

Mit Hilfe dieser modellgestützten Lebensdauerberechnungen kann nun, abhängig vom konkreten Bemessungsfall, im Rahmen der Planungsphase (Design) eine gewünschte Lebensdauer gezielt eingestellt werden, Abb. 5 und Abb. 6. Aus Abbildung 5 kann für ein maximal toleriertes Maß von $p_f = 5\%$ eine Lebensdauer von etwa $T = 95$ Jahre > 80 Jahre abgelesen werden. Die

zu diesem Zeitpunkt vorhandene Zuverlässigkeit läge bei diesem Beispiel bei etwa $\beta = 2,2$.

Nach Planung, Herstellung und Inbetriebnahme ist die Zustandsentwicklung mit geeigneten Methoden zu verfolgen, um die in der Planung prognostizierten SOLL-Zustände mit IST-Zustandsdaten abgleichen zu können. Nur in Kombination von Informationen aus Planung, Herstellung und Betrieb lassen sich Lebenszyklen von hoher ökonomischer Qualität erzeugen [13, 14, 15, 16].

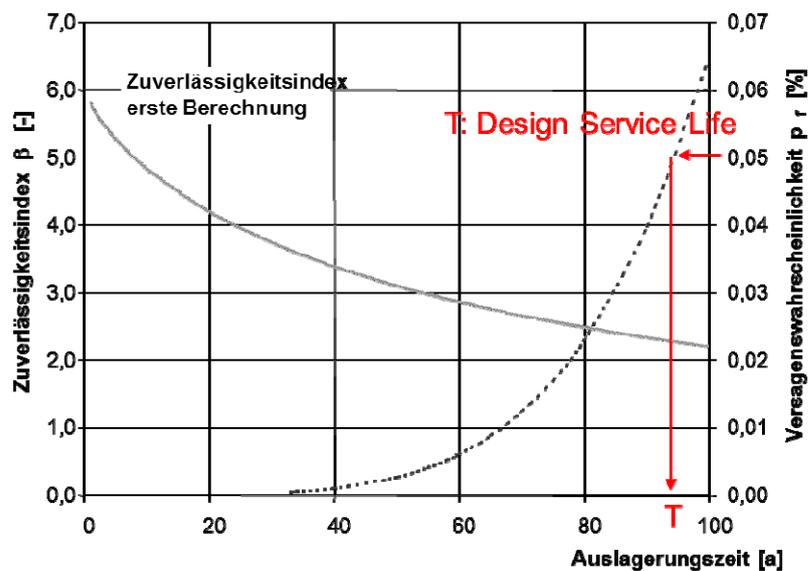


Abb. 5: Wahrscheinlichkeit einer Depassivierung bzw. Zuverlässigkeit des Bauwerkes gegenüber einer lebensdauerbeschränkenden Karbonatisierungseinwirkung in Abhängigkeit der Zeit

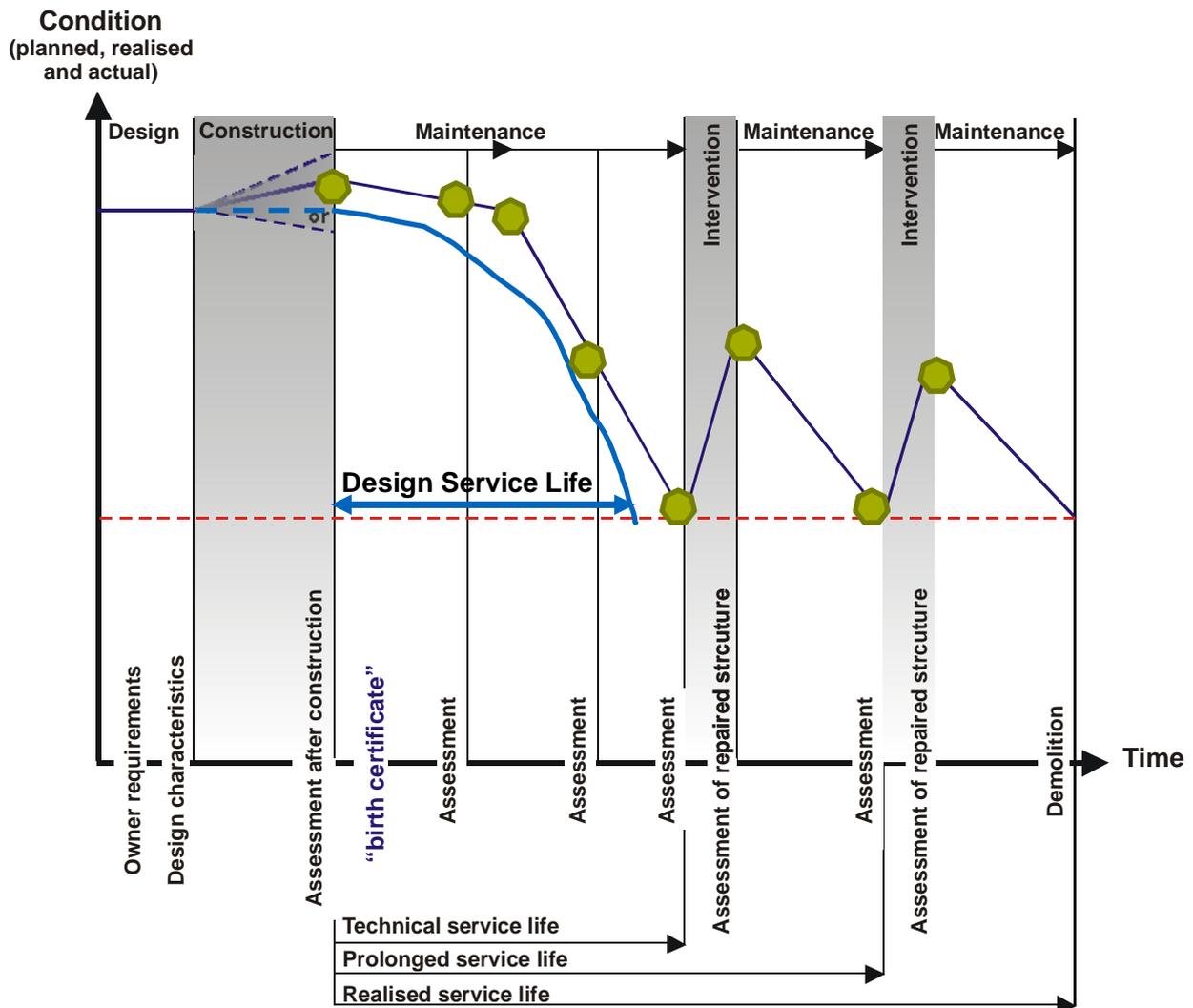


Abb. 6: Prognose der Lebensdauer im Rahmen der Planung, Erfassung des realen IST-Zustandes im Rahmen des Betriebs (durch Inspektion)

Bei der Verfolgung der weiteren Zustandsentwicklung ist entscheidend, dass Beobachtungen in einem integralen Ansatz bewertet werden und auch nur solche bewertet werden, die den Prozess des Bauwerksmanagements nachweislich unterstützen. Das heißt, erhobene Daten müssen entweder qualitativ oder quantitativ auch einer exakten Bewertung zugeführt werden können. Der IST-Zustand wird dabei unter Nutzung der Vorabinformation aus Planung und Herstellung mit Hilfe strukturierter Inspektions- und Messkonzepte festgestellt. Bei der Erstellung solcher Inspektionskonzepte ist vom erwarteten Zustand ausgehend festzulegen, was modellabhängig wo mit

welchem Messverfahren in welchem Umfang wann untersucht muss. Abb. 7 zeigt einige Fragestellungen auf, die bei der Planung strukturierter Inspektionen zu beantworten sind.

Was messen?

Wo messen? – Wie oft messen?

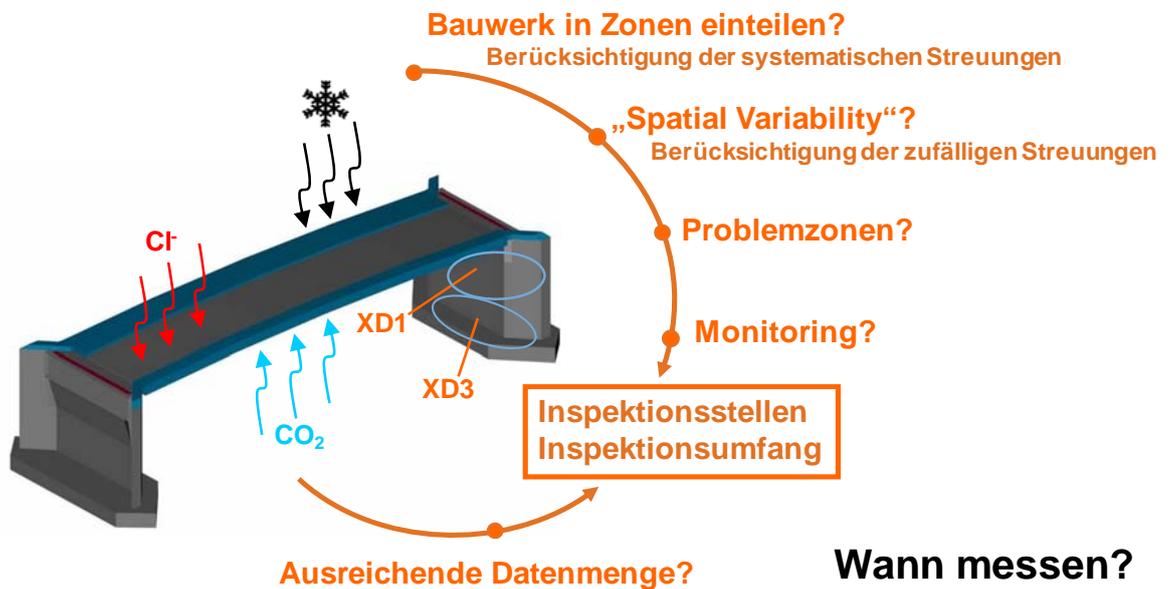


Abb. 7: Fragestellungen, die im Zuge der Inspektionsplanung zur Erfassung des realen IST-Zustandes zu beantworten sind

In Abb. 6 sind Zustandserfassungen entlang der Zeitachse mit „Assessment“ markiert. Im Rahmen dieser Überprüfungen kann der prognostizierte Zustand mit dem tatsächlichen Zustand ständig verglichen werden.

Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig bauen mit Beton“, [17], wurde im Teilprojekt D, u. a. der Frage nachgegangen, wie die vielfältig anfallenden Informationen aus Planung, Herstellung und Betrieb strukturiert gemeinsam verarbeitet werden können, so dass sie eine ökonomische Steuerung von Lebenszyklen baulicher Anlagen und Bauwerken ermöglichen.

Ziel war es u. a., die anfallende Information mit Hilfe einer zu entwickelnden Software zu vernetzen.

Der Aufbau des Software-Systems ist modular konzipiert. Die Module entsprechen den über die Lebensdauer eines Bauwerks notwendigen Datenerfassungs- und -verarbeitungsvorgängen. Die Optimierung der Dauerhaftigkeit von der Entwurfs- und Planungsphase bis hin zur Abnahme sowie der ökonomisch optimierte Bauwerksbetrieb in der anschließenden Nutzungsphase (vgl. hierzu Abb. 8) sind implementiert.

Im Mittelpunkt des prädiktiven Lebensdauermanagementsystems steht eine Datenbank, in der alle Bauwerksdaten erfasst werden, vgl. hierzu Abb. 9. Hierzu zählen allgemeine Informationen und Geometriedaten des Bauwerks sowie Angaben zu den charakteristischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe, Ergebnisse von Bauwerksuntersuchungen und Instandsetzungen. Alle Module sind in ihrer Basisfunktionalität im Software-Prototyp realisiert, d. h. die grundsätzliche Funktionsweise des Lebensdauermanagementsystems kann entlang der gesamten Prozesskette aufgezeigt werden. Die Umsetzung beschränkte sich in diesem Vorhaben exemplarisch auf zwei Schädigungsmechanismen (Bewehrungskorrosion durch Eindringen von Chloriden sowie durch Carbonatisierung). Die Ausweitung der Funktionalitäten auf andere Schädigungsmechanismen (auch Baustoffe) und Instandsetzungsverfahren kann Dank des dynamischen Kerns des Software-Tools zukünftig mit relativ geringem Aufwand erfolgen.

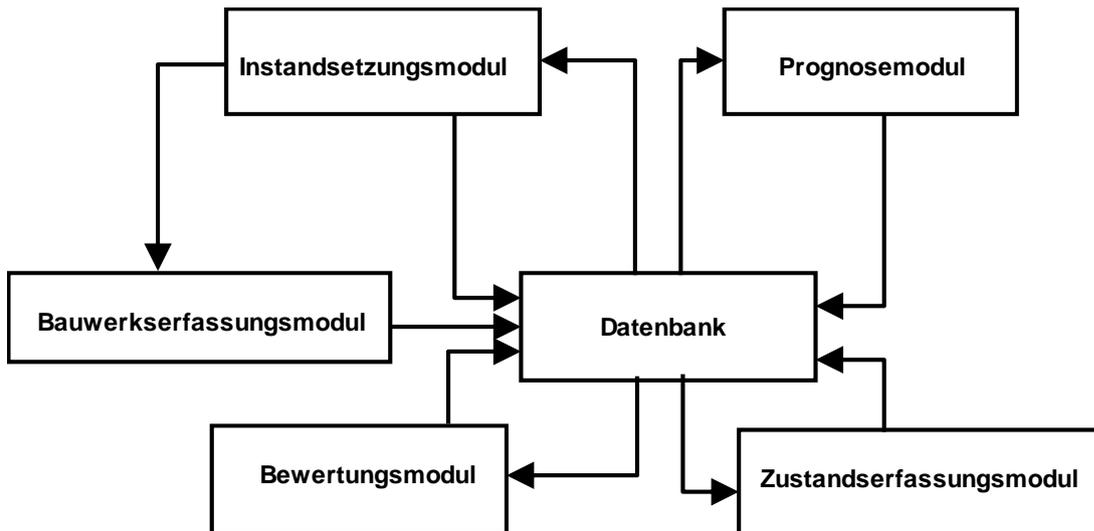


Abb. 8: Prognose der Lebensdauer im Rahmen der Planung, Erfassung des realen IST-Zustandes im Rahmen des Betriebs (durch Inspektion), aus [17]

Software-Prototyp: Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist in mehrere Bereiche unterteilt:

- Module:** Eine vertikale Liste von Modulen: Bauwerkserfassung, Zustandserfassung, Prognose, Bewertung, Instandsetzung und Datenbank.
- Erfassung der Geometrie:** Zeigt eine 3D-Modellansicht eines Bauwerks mit einer hierarchischen Gliederung des Bauwerks.
- Statistisches Diagramm:** Ein S-förmiges Diagramm, das die Summenhäufigkeit (-) über der Betondeckung (mm) darstellt. Die x-Achse reicht von 0 bis 100 mm, die y-Achse von 0,0 bis 1,0.
- Messwerte erfassen:** Ein Dialogfenster zur Erfassung von Messwerten mit verschiedenen Auswahlmöglichkeiten für die Verlebungsmittel.

Hierarchische Gliederung des Bauwerks

Flächenbezogene Zuordnung von

- Informationen über verwendete Baustoffe, Umwelteinwirkungen und Bauteilwiderstände
- Messdaten aus Zustandserfassungen (m.H. gezielter Inspektionsstrategien)

Abb. 9: Benutzeroberfläche Module „Bauwerkserfassung“ (Geometrien) und „Zustandserfassung“ (Inspektionsdaten), hier statistisch ausgewertete Daten zur Betondeckung der Bewehrung [17]

Unter der Voraussetzung, dass alle in Bild 10 exemplarisch dargestellten Optionen auf verschiedenen Wegen zu einer vergleichbaren technischen Qualität führen (vergleichbare Lebensdauer, vergleichbare Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit) liegen nun alle Informationen über jeweilig benötigte Materialeien, Massen und Prozesse für die Herstellung und Erhaltung eines Bauwerkes vor. Diese Informationen können jetzt nicht nur ökonomisch ausgewertet und verglichen (ökonomische Qualität), vgl. hierzu auch [18, 19],

sondern auch hinsichtlich ökologischer Qualität beurteilt werden (Ökobilanz).

3 Ökologische Qualität

Mit Hilfe von Ökobilanzen können alle potentiellen Umweltwirkungen des Bauwerkes über dessen gesamten Lebensweg zusammengestellt und beurteilt werden. Abb. 11 zeigt den üblichen Rahmen einer Ökobilanz und die Bereiche, in denen Ökobilanzen Orientierung geben können, z. B. bei

der Entwicklung von umweltfreundlichen Produkten oder bei der Vorbereitung von politischen

Entscheidungsprozessen.

Vorgehensweise:

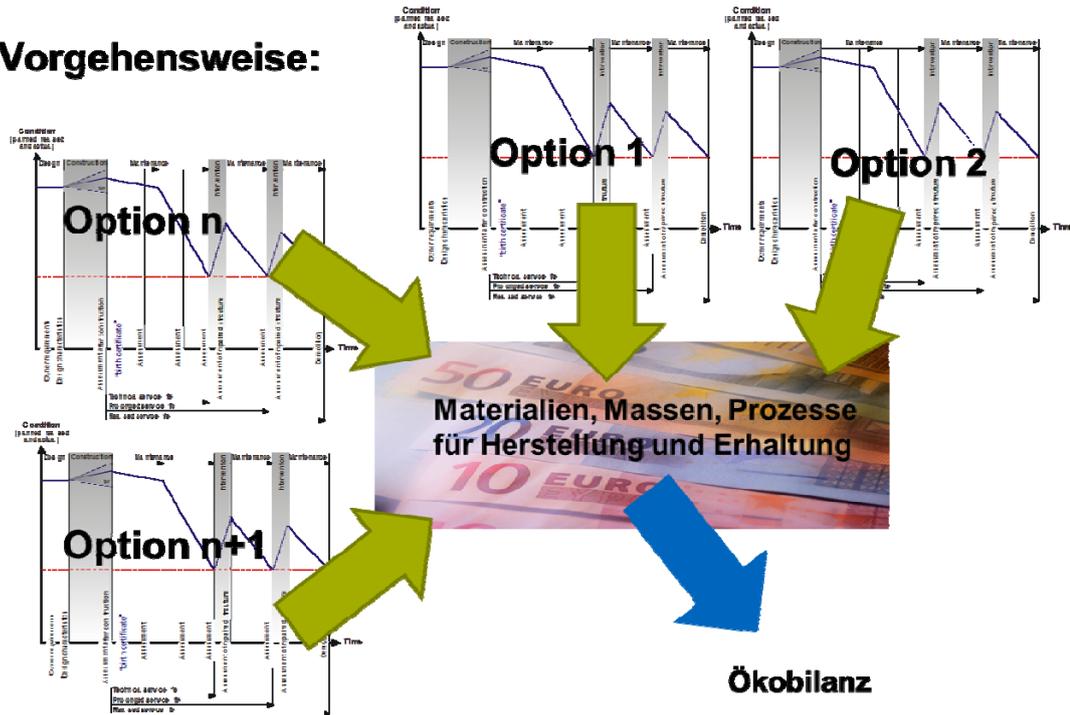


Abb. 10: Optionenvielfalt, die unter Kenntnis der beteiligten Materialien, Massen und Prozesse ökonomisch und ökologisch bewertet werden können

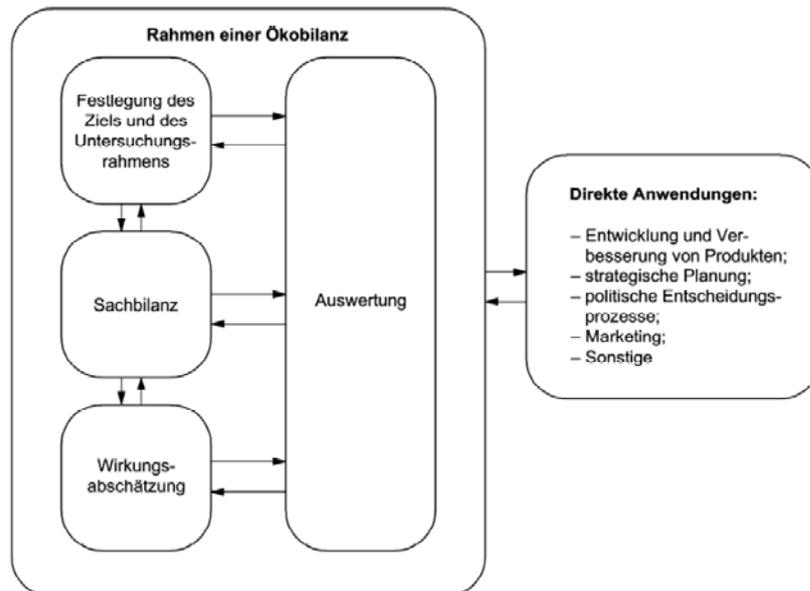


Abb. 11: Ökobilanz

4 Literatur

4.1 Literaturhinweise

- [1] DARTS (Durable and Reliable Tunnel Structures), 5th Framework Programme Projekt GRD1-25633, Contract G1RD-CT-2000-00467; Report 5.2: Integrated Design Examples, May 2004: "Integrated Design Examples", ISBN 90 37604730.
- [2] DURANET (Network for Supporting the Development and Application of Performance Based Durability Design and Assessment of Concrete Structures) & CEN TC 104, Joint Workshop: Design of Durability of Concrete, 15th-16th June 1999, Berlin.
- [3] CON REP NET (A Thematic Network on Performance Based Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures), 5th Framework Programme, Newsletters 1&2 (Sept. 2003) to 6 (March 2006).
- [4] Schießl, P. (convenor) et al.: fib Model Code for Service Life Design. fib bulletin 34, 2006.
- [5] ISO/CD 16204 (CD: Complete Draft, Version 16/03/2011); Durability -Service Life Design of Concrete Structures.
- [6] Gehlen, C.; Sodeikat, C.: Maintenance Planning of Reinforced Concrete Structures: Redesign in a Probabilistic Environment, Inspection, Update and Derived Decision Making. In: Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the 9th International Conference, Brisbane, Australia, 17 - 20th March 2002; Brisbane, Australien, 2002.
- [7] Gehlen, C.; von Greve-Dierfeld, S.: Optimierte Zustandsprognose durch kombinierte Verfahren. In: Beton- und Stahlbetonbau 5/10, Nr. 005. (In German)
- [8] Beutel, R., Reinhardt, H.-W., Große, Ch., Glaubitt, A., Krause, M., Maierhofer, Ch., Algernon, D., Wiggerhauser, H. and M. Schickert, Comparative Performance Tests and Validation of NDT Methods for Concrete Testing. in Journal of Nondestructive Evaluation 1 - 3 (2008) 27, 59 - 65, 2007
- [9] Große, C.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen - Möglichkeiten und Grenzen. In: VDI-Bautechnik, Jahresausgabe 2011/2012, Springer VDI-Verlag, S. 122-131. (In German)
- [10] Keßler, S., Gehlen, C., Ebell, G., Burkert, A.: Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung. In Beton und Stahlbetonbau, 7/11 (In German)
- [11] Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Dissertation, RWTH Aachen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 510, Beuth-Verlag, 2001. (In German)
- [12] Gehlen, C. (convenor) et al.: Condition Control and Assessment of Reinforced Concrete Structures, fib bulletin 59, (2011)
- [13] Straub, D.: Spatial reliability assessment of deteriorating reinforced concrete surfaces with inspection data. Proc. ICASP11, Zürich, Switzerland, 2011
- [14] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation (In German)
- [15] Faber M.H., Sørensen J.D. (2002). Indicators for inspection and maintenance planning of concrete structures. Structural Safety, 24(4), pp. 377 - 396.
- [16] Straub D., Faber M.H.: Risk Based Inspection Planning for Structural Systems. Structural Safety, 27(4), pp 335-355, 2005
- [17] Schießl, P. ; Gehlen, C.; Zintel, M. Keßler, S.; Rank, E.; Bormann, R.; Lukas, K.; Budelmann, H.; Empelmann, M.; Heumann, G.; Starck, T. Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton" Lebenszyklusmanagementsystem zur Nachhaltigkeitsbeurteilung - Teilprojekt D, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 586, Beuth-Verlag, Berlin, 2011. (In German)
- [18] De Sitter, W.R.: Costs for Service Life Optimization - The Law of Fives; Durability of Concrete Structures, CEB-RILEM International Workshop, Copenhagen 1983. CEB bulletin No. 152,
- [19] Stewart, M. G., D.V. Val (2003), Multiple Limit States and Expected Failure Costs for Deteriorating Reinforced Concrete Bridges, Journal of Bridge Engineering, Trans. ASCE, 8(6): 405-415.