



Von Bausteinen eines nachhaltigen Lebenszyklusmanagements für Ingenieurbauwerke

Christoph GEHLEN, Universität Stuttgart
Till Felix MAYER, Peter SCHIESSL, TU München

Kurzfassung. Vor dem Hintergrund immer älter werdender Bauwerksbestände und knapper Haushaltsmittel gewinnt die optimierte Instandhaltungsplanung von Stahlbetonbauwerken zunehmend an Bedeutung. Derzeit werden zu diesem Zweck vorwiegend reaktive Managementsysteme eingesetzt, die zur Beschreibung der Zustandsentwicklung von Bauteilen empirische oder deterministische Schädigungsmodelle in Verbindung mit visuellen Zustandserfassungen verwenden. In diesem Bericht wird ein Lebenszyklusmanagementsystem vorgestellt, in dem u. a. probabilistische Schädigungsmodelle für die Zustandsprognose Anwendung finden. Durch zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren können die Unsicherheiten bei Modellen und Eingangsparametern sukzessiv reduziert und die Prognose verbessert werden. Dabei bieten diese Verfahren gegenüber herkömmlichen, visuellen Zustandserfassungen den Vorteil, dass potentielle Schädigungen bereits frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden können. Weiterer Forschungsbedarf wird identifiziert.

1. Einleitung

Betreiber großer Bauwerksbestände (Gemeinden, Autobahndirektionen, Wohnungsverwaltungen) sehen sich in den letzten Jahren verstärkt mit der Aufgabe konfrontiert, immer älter werdende Bauwerke mit immer knapper werdenden Haushaltsmitteln unterhalten zu müssen. Um mit den vorhandenen Mitteln einen optimalen Zustand aller Bauwerke gewährleisten zu können, ist sowohl die genaue Kenntnis des derzeitigen Bauwerkszustands, als auch eine zuverlässige Prognose der zukünftigen Zustandsentwicklung erforderlich. Zudem müssen Kosten und Auswirkungen von Instandsetzungsmaßnahmen bekannt sein, um einen Vergleich verschiedener Instandhaltungsstrategien und eine Optimierung des Finanzeinsatzes zu ermöglichen.

Um die vielfältigen Anforderungen an die Instandhaltungsplanung von Bauwerksbeständen erfüllen zu können, wurden in den letzten Jahren sowohl national als auch international so genannte Bauwerksmanagementsysteme (BMS) entwickelt. Ein BMS ist ein systematischer Ansatz für die Planung und Durchführung aller Aktivitäten, die im Zusammenhang mit den Phasen der Planung, Ausführung, Überwachung, Instandhaltung bis zum Abriss inklusive Recycling stehen.

2. Bausteine eines nachhaltigen Lebenszyklussystems

2.1 Was verbindet man mit dem Begriff Lebenszyklusmanagement?

Ein Lebenszyklusmanagementsystem (LZMS) ist ein – in der Regel computergestütztes – System, das Bauwerksbesitzer in die Lage versetzt, Einzelbauwerke oder Bauwerksbestände in allen Lebenszyklusphasen eines Bauwerks gemäß den individuellen Anforderungen des Besitzers bzw. der Nutzer optimal zu betreiben. Der Lebenszyklus eines Bauwerks umfasst die Phasen der Planung, Ausführung, Instandhaltung bzw. –setzung bis hin zum Rückbau und Recycling des Bauwerks, Bild 1. Je nach den Anforderungen des Betreibers kann diese Optimierung unter Berücksichtigung ökologischer, ökonomischer oder nachhaltigkeitsorientierter Aspekte bzw. Kombinationen dieser erfolgen. Unabhängig von den Prioritäten des Betreibers ist eine ausreichende Standsicherheit und Funktionalität des Bauwerks zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen.

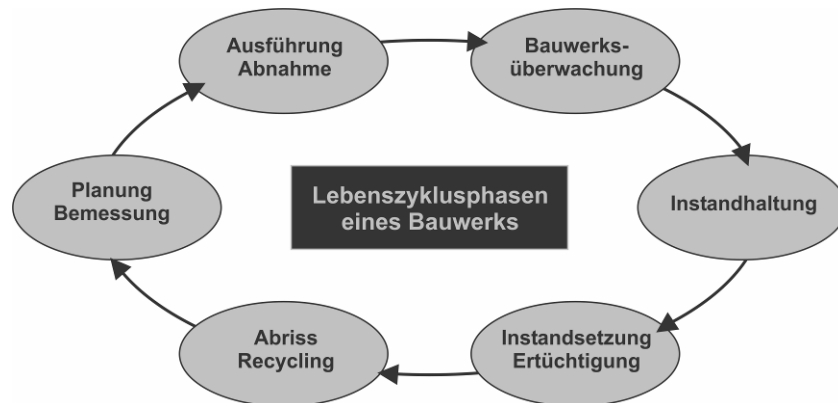


Bild 1. Lebenszyklusphasen von Bauwerken

Die Aufrechterhaltung eines optimalen Bauwerkszustands erfordert die Kenntnis der zu erwartenden Zustandsentwicklung des Bauwerks. Diesem Aspekt tragen Managementsysteme durch Einbeziehung von Schädigungsmodellen Rechnung, die eine Zustandsprognose über die geplante Restnutzungsdauer des Bauwerks ermöglichen. Durch gezielte Bauwerksuntersuchungen kann die Zuverlässigkeit der Zustandsprognose während jeder Lebenszyklusphase verbessert werden.

2.2 Anwendungsgebiete und Anwendungsgrenzen von LZMS

Ein differenziertes Bauwerksmanagement ist in erster Linie für Bauwerke relevant, bei denen die Nutzungsdauer vorrangig von der technischen Lebensdauer der Konstruktion bestimmt wird und die während ihrer Nutzung Umwelteinwirkungen ausgesetzt sind, durch die eine Beeinflussung der Lebensdauer bedingt werden kann. Zu diesen Bauwerken zählen Infrastrukturbauwerke wie Brücken und Tiefgaragen, aber auch Bauwerke mit repräsentativem Charakter, aufgrund deren Bedeutung Nutzungsdauern von bis zu hundert Jahren vorgesehen sind. Viele der oben genannten Infrastrukturbauwerke werden insbesondere durch Bewehrungskorrosion (carbonatisierungs- bzw. chloridinduziert), aber auch durch Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchungen geschädigt, vgl. hierzu Bild 2, Bild 3 und Bild 4.

Nicht sinnvoll ist ein derartiges LZMS für Bauteile, bei denen unabhängig von der Nutzungsdauer keine Schädigung zu erwarten ist (z. B. tragende Innenbauteile aus Stahlbeton) oder für Bauwerke, bei denen Entscheidungen über Instandsetzungs-, Umnutzungs- oder Rückbaumaßnahmen nicht aufgrund der Dauerhaftigkeit, sondern infolge veränderter ästhetischer Ansprüche, veränderter Nutzeransprüche oder als Reaktion auf gesellschaftli-

che, demographische oder ökonomische Entwicklungen getroffen werden. Dies trifft für den Großteil der Wohn-, Verwaltungs- und Geschäftsimmobilien zu.

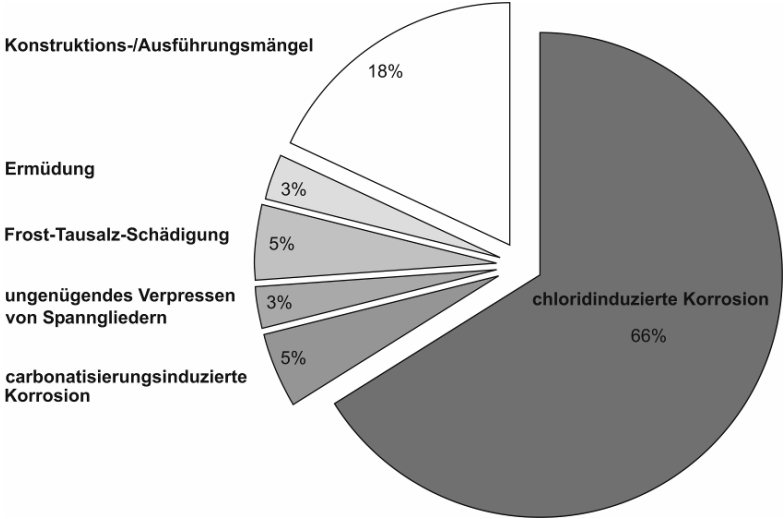


Bild 2. Schäden an Brückenbauwerken im deutschen Autobahnnetz

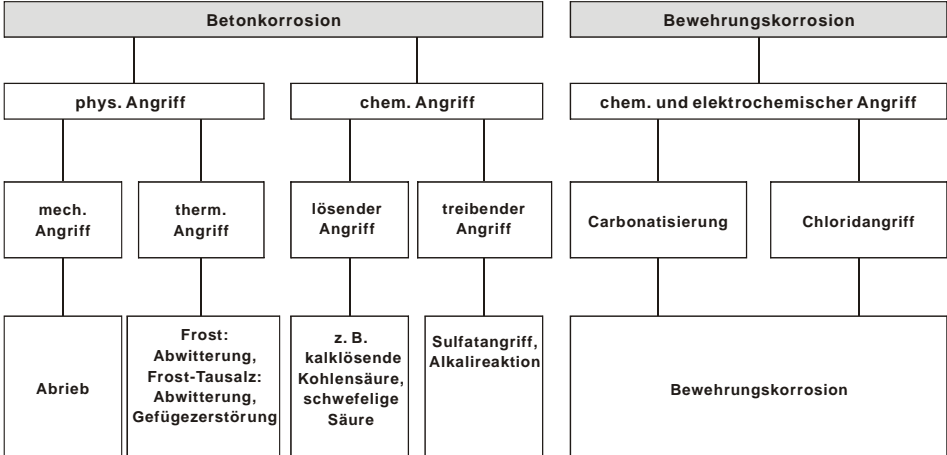


Bild 3. Schädigungsmechanismen von Stahlbetonbauteilen

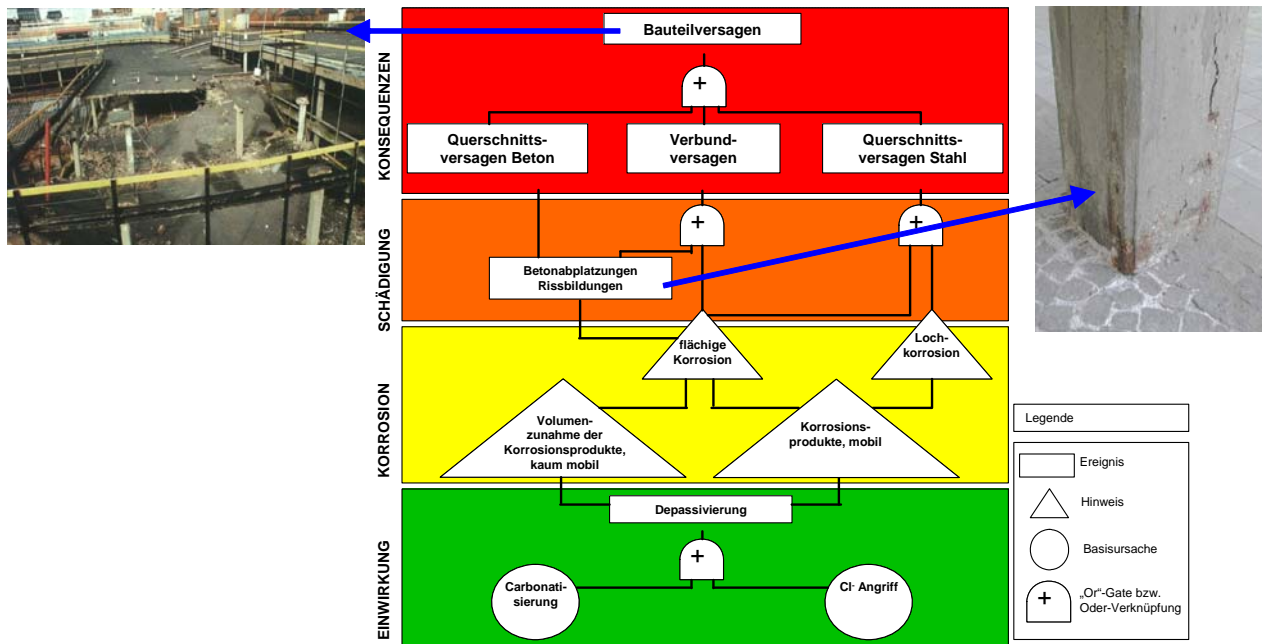


Bild 4. Fehlerbaum, von der schädigenden Einwirkung bis zu den Konsequenzen

2.3 Anforderungen an LZMS

Je nach gesellschaftspolitischer Relevanz, je nach Größe des Bauwerksbestands, Funktion der Bauwerke und Datenqualität werden von den Nutzern unterschiedliche Erwartungen und Anforderungen an Lebenszyklusmanagement-Systeme gestellt. Die wesentlichen Erwartungen bzw. Anforderungen sind:

- (i) Ressourcenschonende Materialherstellung (Rohstoffe, Energie)
- (ii) Energieeffizienter Materialeinsatz
- (iii) Umweltverträglichkeit des Baustoffes/Bauteiles/Bauwerkes
- (iv) Optimierung des Bauteilwiderstands gegenüber zu erwartenden Einwirkungen
- (v) Genaue Kenntnis des Bauwerkszustandes während der Nutzung
- (vi) Planbarkeit von Instandsetzungsmaßnahmen
- (vii) Minimierung von Instandhaltungskosten
- (viii) Hochwertige Wiederverwertung (Vermeidung von Bauschutt, Einsparung von Ressourcen, Rohstoffen)

2.4 Bausteine eines Lebenszyklusmanagementsystems

2.4.1 Struktur

Aufgrund der Vielzahl der Anforderungen, die von unterschiedlichen Nutzern an ein integratives und LZMS gestellt werden, ist ein modularer Aufbau sinnvoll. Bild 5 zeigt im Wesentlichen die Bestandteile des LZMS, die sich mit Fragen, die während der Nutzung der Immobilie sich stellen, befassen. Zentraler Baustein ist eine Datenbank, in der alle Informationen über die zu unterhaltenden Bauwerke und ihren Zustand gespeichert werden. Zur Planung und Budgetierung von Instandsetzungsprojekten enthält die Datenbank zusätzlich Kataloge möglicher Instandsetzungsvarianten, die mit Einheitskosten hinterlegt werden. Die von dem Nutzer benötigten Module greifen auf die Datenbank zu und ergänzen bzw. aktualisieren sie, vgl. hierzu Bild 5.



Bild 5. Wesentliche Bausteine eines modularen LZMS
(Module, die insbesondere im Zusammenhang mit der Nutzung der Immobilie stehen)

Da dieser Beitrag im Rahmen der Fachtagung „Bauwerksdiagnose“ vorgetragen wird, kann man sich hier darauf beschränken, lediglich auf drei der oben insgesamt acht erwähnten Erwartungen/Anforderungen an ein effektives Lebenszyklusmanagement einzugehen.

- (v) Genaue Kenntnis des Bauwerkszustandes während der Nutzung
- (vi) Planbarkeit von Instandsetzungsmaßnahmen
- (vii) Minimierung von Instandhaltungskosten

Bauwerksdiagnose unterstützt insoweit alle drei genannten Aspekte, da sie nicht nur zum Erkenntniszuwachs mit Blick auf v) beiträgt, sondern auch die Planbarkeit (auch durch Erkenntnisse über Schadensumfang) hilft zu verbessern, vi), um nicht zuletzt auch damit die Instandsetzungskosten minimieren zu können.

Bemüht man ein modular aufgebautes LZMS, vgl. hierzu wieder Bild 5, gibt es feste Verknüpfungen zwischen Bauwerksdiagnose und Einzelmodulen wie „Zustandsprognose“, „Zustandserfassung“ und „Zustandsbewertung“, die alle auf die Datenbank „Bauwerksdaten“ zugreifen, diese ergänzen bzw. aktualisieren.

2.4.3 Zustandsprognose

Wird ein Bauwerk unmittelbar nach seiner Fertigstellung in ein Managementsystem aufgenommen, kann unter Verwendung von Schädigungsmodellen eine Vorhersage der Zustandsentwicklung für alle Komponenten getroffen werden. Als Eingangsdaten für die Zustandsprognose dienen Daten, die während der Bauwerkserfassung in der Datenbank hinterlegt wurden. Wurden im Rahmen der Bauüberwachung und der Abnahme Bauwerksuntersuchungen (z. B. Betondeckungsmessungen) und Materialprüfungen (z. B. Ermittlung von Druckfestigkeiten oder Diffusionskoeffizienten) durchgeführt, können diese in der Prognose berücksichtigt werden. Anderenfalls wird auf Informationen aus Planunterlagen oder von vergleichbaren Bauwerken zurückgegriffen. Auch bei Bauwerken, die erst während ihrer Nutzung in das Managementsystem eingepflegt werden, kann die Vorhersage der Zustandsentwicklung auf Grundlage von Informationen, die in Bauwerksuntersuchungen ermittelt wurden, oder von Planunterlagen und Anhaltswerten von vergleichbaren Bauwerken erfolgen. Die Modelle, die zur Durchführung der Zustandsprognose verwendet werden, sind beispielsweise in [1] veröffentlicht. In Abhängigkeit von dem abzubildenden Schädigungsmechanismus sollten, falls vorhanden, möglichst sicherheitstheoretisch bewertbare

Modelle verwendet werden, z. B. vollprobabilistische Modelle. Die Ergebnisse der Vorhersage der Zustandsentwicklung, ein übliches zeigt Bild 6, werden nach Beenden der Prognose in der zentralen Datenbank hinterlegt.

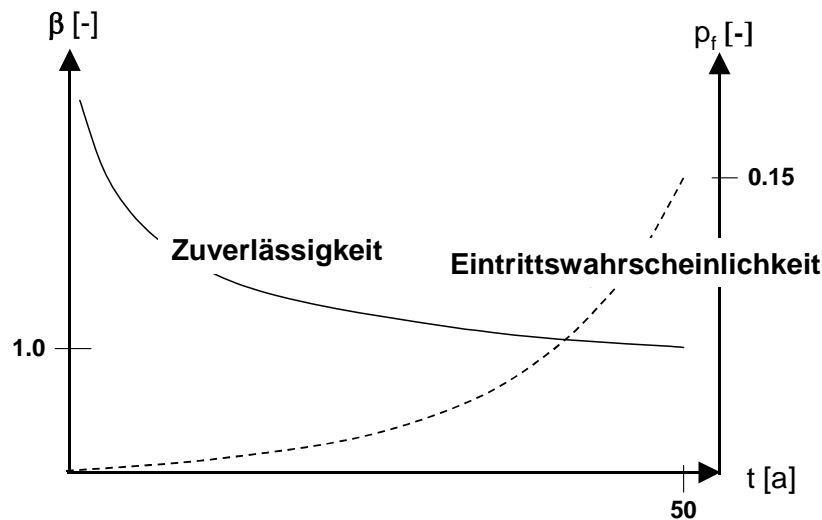


Bild 6. Zuverlässigkeit β , Eintrittswahrscheinlichkeit p_f

2.4.4 Zustandserfassung

Die Zustandsprognose liefert als Ergebnis Wahrscheinlichkeiten, mit denen einzelne Bauteile während der Nutzung in einen (diskreten,) nächst schlechteren Zustand übergehen. Diese Wahrscheinlichkeiten werden für die Planung von Zustandserfassungen genutzt, um Umfang und Zeitpunkt von Bauwerksinspektionen auf die zu erwartende Zustandsentwicklung abzustimmen. Die Festlegung möglicher Bauwerkszustände erfolgt in Abstimmung mit den Untersuchungsmethoden derart, dass für jeden Bauwerkszustand mindestens eine Untersuchungsmethode oder eine Kombination mehrerer Untersuchungsmethoden zur Verfügung stehen, so dass eine zuverlässige Zustandserfassung und Abgrenzung von benachbarten Bauwerkszuständen möglich ist. Da besonders bei Infrastrukturbauwerken Inspektionen häufig nur mit großem Aufwand durchführbar sind, werden bei der Planung von Zustandserfassungen Inspektionszeitpunkt und Umfang so festgelegt, dass mit minimalem Untersuchungsaufwand eine belastbare Prognose der Zustandsentwicklung ermöglicht wird. Die Ergebnisse der Bauwerksuntersuchung werden zum Update und zur Verbesserung der Zustandsprognose genutzt.

2.4.5 Zustandsbewertung

Zustandserfassung und Zustandsprognose erfolgen vorwiegend bauteilbezogen. Instandsetzungsmaßnahmen hingegen werden in der Regel auf Bauwerksebene geplant, um Kosten für Baustelleneinrichtungen und Behinderungen durch Sperrungen zu minimieren. Um den Zustand eines Bauwerks beurteilen zu können, ist folglich eine Aggregation der Bauteilzustände zu einem Bauwerkszustand erforderlich. Diese Aggregation kann auf Grundlage von Instandsetzungskosten oder von gewichteten Zustandsnoten unter Einhaltung von zulässigen Versagenswahrscheinlichkeiten für dauerhaftigkeitsrelevante Bauteile erfolgen.

Für Betreiber größerer Bauwerksbestände ist als Grundlage für die Verteilung limitierter Budgets eine weitere Bewertung auf Netzwerkebene zur Bildung von Prioritätenreihung erforderlich. Durch Budgetrestriktionen ergibt sich die Optimierungsaufgabe, einen möglichst guten Zustand des Bauwerksbestands sicherzustellen, ohne dass einzelne Bau-

werke geforderte Mindestzuverlässigkeiten unterschreiten. Neben der Kostenminimierung stellt die Aufrechterhaltung einer möglichst hohen Verkehrskapazität ein weiteres, vorrangiges Optimierungsziel dar. Je nach Anforderungen des Betreibers können jedoch auch andere Ziele (Minimierung der Umwelteinwirkungen, Anforderungen hinsichtlich der Bauwerksästhetik etc.) Eingang finden.

2.5 Ausblick

Nicht zuletzt auch zur Vorbereitung der Instandsetzung sind eine Vielzahl von Informationen zusammen zu tragen bzw. Fragen zu beantworten.

Im Vorfeld der Instandsetzungsmaßnahmen kommen verschiedene „diagnostische“ Untersuchungsmethoden zum Einsatz, z. B. Betondeckungsmessung, Bohrmehlanalyse zur Ermittlung der Chloridbelastung des Betons, Potentialfeldmessung. Die Ergebnisse müssen auf ihre Aussagegenauigkeit hin geprüft werden, z. T. vor dem Hintergrund immer verschiedener Randbedingungen auch interpretiert und bewertet werden, vgl. hierzu Bild 7.

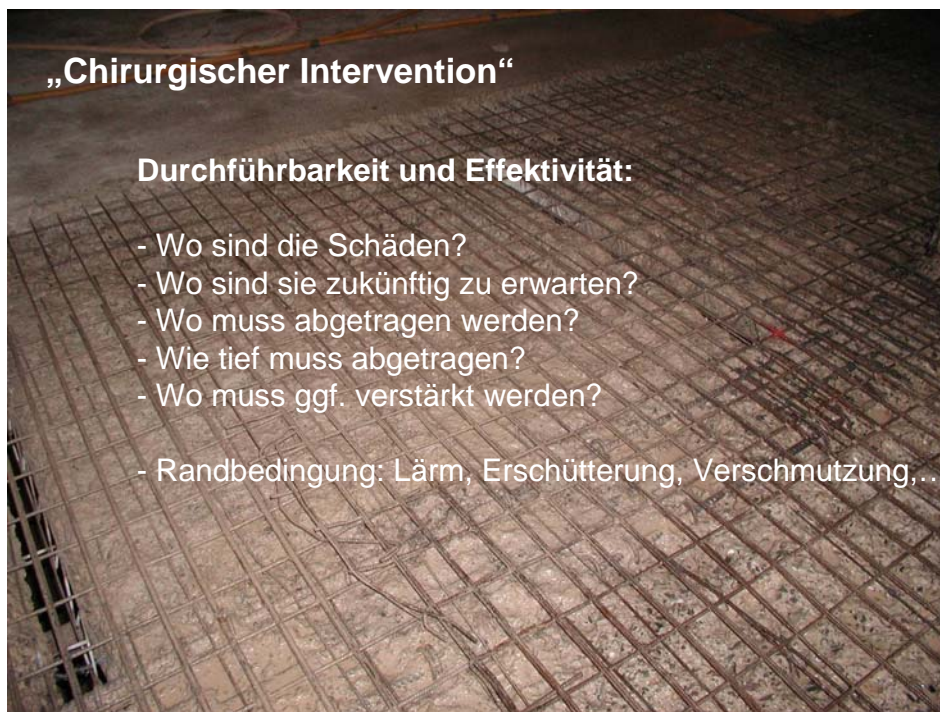


Bild 7. Fragestellungen, die im Zusammenhang mit üblichen betonabtragenden Instandsetzungsmaßnahmen mit anschließender Reprofilierung zu beantworten sind

Zukünftige Forschung wird sich diesen Themen annehmen müssen. Insbesondere ist zu erwarten, dass sehr viele Anstrengungen in Richtung zur Verbesserung von Dokumentationssysteme unternommen werden, dass die Bewertungswerkzeuge im Zuge der erforderlichen Digitalisierung durch Anlegen von Fehler- und/oder Ereignisbäumen zunehmend systematisiert werden, dass große Anstrengungen in Sachen Modellierung unternommen werden, die Zuverlässigkeit von Diagnostik im Rahmen von Inspektionen und Monitoring und deren Kompatibilität zur vorgenommenen Modellierung eine zunehmend größere Bedeutung haben wird, so dass letztendlich auch Ertüchtigungen und Instandsetzungen vor dem Hintergrund nachvollziehbarer Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen quantifiziert bewertet werden können.

Referenzen

- [1] Schießl, P.; Bamforth, P.; Baroghel-Bouny, V.; Corley, G.; Faber, M.; Forbes, J., Gehlen, C. et al.: Model code for service life design. fib bulletin 34, 2006, 110 pp