

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Nyobeu, François; Panenka, Andreas

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtkongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107211>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Nyobeu, François; Panenka, Andreas (2018): Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 34. Internationaler Schifffahrtkongress; Panama City, Panama, 07. - 11. Mai 2018. Bonn: PIANC Deutschland. S. 93-110.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

von François Nyobeu¹ und Andreas Panenka²

Zusammenfassung

Der Bauwerksbestand der Bundeswasserstraßen ist Alterungsprozessen und verschiedenen Schädigungsmechanismen ausgesetzt, die sich auf die strukturelle Zuverlässigkeit auswirken. Vor diesem Hintergrund gewinnen strategische Entscheidungen zur Bestimmung der Notwendigkeit von Instandsetzungsmaßnahmen zunehmend an Bedeutung. Im vorliegenden Beitrag werden verschiedene Fehlerursachen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit von Verkehrswasserbauwerken untersucht. Darüber hinaus wird eine Methode zur Gewichtung von Prioritäten vorgestellt, mit der verschiedene Fehlerursachen entsprechend dem mit ihnen verbundenen Risiko eines Bauwerkversagens in einer Rangfolge abgebildet werden können. Die Ergebnisse aus einer früheren qualitativen sowie quantitativen Analyse des sich abzeichnenden Risikos eines Bauwerksausfalls mittels der Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA) werden in ein Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) eingebracht, das nicht nur die Ungenauigkeit und Subjektivität des Expertenwissens in die Bewertung einbezieht, sondern auch die Unsicherheiten der verfügbaren Schadensdaten. In einer früheren Studie wurden mithilfe der Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA) die Kriterien Bedeutung (B) der Fehlerfolge, Auftretenswahrscheinlichkeit (A) des Fehlers und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) der Fehlerursache als vorrangige Kriterien für die Beurteilung des Risikos eines Bauwerksausfalls ausgemacht. Sie dienen als Eingangsdaten für eine Methode zur multikriteriellen Entscheidungsfindung, dem Analytic Hierarchy Process (AHP), zur Erhebung von Gewichtungen, die bei der Priorisierung der Instandsetzungsmaßnahmen als Entscheidungshilfe verwendet werden. Als Ergebnis der vorliegenden Studie wurden vier Kategorien von Fehlerursachen ermittelt, die sich zusammenfassend einteilen lassen in Schäden mit Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Infrastruktur und Schäden, die mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb kurzer Zeit Änderungen an der strukturellen Zuverlässigkeit des Bauwerks bewirken. Die vorgestellte Methode berücksichtigt bei der Bewertung auch Einflussfaktoren der verschiedenen Fehlerursachen sowie die

Subjektivität von Expertenurteilen. Dieser Beitrag soll genauer beleuchten, wie sich aus dem Datenbestand zu älteren Schäden in Kombination mit Expertenwissen Kennzahlen ableiten lassen, die bei der Ermittlung von Fehlerursachen für Instandsetzungsmaßnahmen hilfreich sind.

1. Einleitung

Nachhaltiges Wirtschaftswachstum, anhaltende Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft hängen in Zeiten wiederkehrender Wirtschaftskrisen in hohem Maße von der Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit der Verkehrswasserbauwerke des Landes ab. Zusätzlich ist eine zuverlässige Infrastruktur auch für den Wohlstand der Bevölkerung unabdingbar. Daher liegt der Instandsetzungsaufwand für das Bestandsnetz bei den deutschen Behörden, die für Verkehrswasserbauwerke zuständig sind und gewährleisten müssen, dass die geplanten Anforderungen an Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit, strukturelle Zuverlässigkeit und Sicherheit während der gesamten vorgesehenen Nutzungsdauer der Anlagen erfüllt sind. Das heterogene Bauwerksportfolio, das unter anderem Schleusen, Wehre, Hebewerke, Düker und Brücken umfasst, ist Schadensmechanismen verschiedenster Art ausgesetzt. Insbesondere die fortschreitenden Schädigungsmechanismen können sich auf die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit der Verkehrswasserbauwerke auswirken. Neben dem baulichen Verfall besteht die Gefahr eines Ausfalls oder vollständigen Versagens dieser Anlagen mit unabsehbaren Kettenreaktionen, deren Folgen weit über einen einfachen Funktionsverlust hinausgehen können.

Ein wesentlicher Faktor für die nachlassende strukturelle Zuverlässigkeit und Funktionalität der Bauwerke ist ihr Alter. Überalterte Bauwerke sind anfälliger für verschiedene Fehlerursachen aufgrund sich ändernder Umweltbedingungen, wiederholter Beanspruchungen oder unzureichender Instandsetzungsmaßnahmen bzw. Erhaltungsmaßnahmen. Auch aufgeschobene Erhaltungsmaßnahmen stellen eine massive Belastung dar. Hier besteht dringender Handlungsbedarf. Etwa 30 % der Schleusen und Wehre im Eigentum der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes wurden bereits vor dem Jahr 1900 gebaut. Diese Anlagen haben nicht nur die für sie vorgesehene Nutzungsdauer von etwa 100 Jahren weit überschritten, einige befinden sich sogar trotz dringenden Ersetzungsbedarfs und erheblicher Beeinträchtigung ihrer strukturellen Zuverlässigkeit durch zahlreiche Schädigungsprozesse noch immer im Einsatz. Alterungsprozesse und Schädigungsmechanismen senken das Leistungsniveau und die strukturelle

^{1,2} Bundesanstalt für Wasserbau (BAW),
francois.nyobeu@baw.de

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

Zuverlässigkeit und erhöhen damit das Risiko eines Ausfalls bzw. Versagens der Infrastruktur. Auch etliche der Anfang der 1960er Jahre errichteten Verkehrswasserbauwerke, etwa der Main-Donau-Kanal, zeigen unvorhergesehene Schadenserscheinungen mit erheblichen Auswirkungen nicht nur auf ihre Gebrauchstauglichkeit, sondern auch auf ihre strukturelle Zuverlässigkeit. Auch wenn für einige der Verkehrswasserbauwerke bereits Erneuerungsarbeiten begonnen haben, ist es wichtig anzuerkennen, dass Konstruktionsfehler sowie unzureichende oder aufgeschobene Instandsetzungsmaßnahmen die Hauptursachen für die Verschlechterung der Bausubstanz sind.

Infolge der begrenzten Investitionsmittel und personellen Kapazitäten wird die Instandsetzung von Stahlbeton- und Stahlwasserbauten der Bundeswasserstraßen bereits seit Jahrzehnten vernachlässigt, obwohl die Gebrauchstauglichkeit der Wasserbauwerke in hohem Maße von der Häufigkeit und Qualität der Erhaltungsmaßnahmen abhängt. Überalterte Materialien, unzureichende Erhaltungsmaßnahmen und übermäßig lange Nutzungsdauern tragen ebenfalls zur Schwächung von Verkehrswasserbauwerken bei und erhöhen ihre Anfälligkeit für andere umweltbedingte Stressfaktoren. In Anbetracht der großen Vielfalt der Bauwerke entwickelt die WSV seit 2008 ein Erhaltungsmanagementsystem (EMS-WSV), das den Entscheidungsprozess bei der Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen unterstützen soll. Der große Instandsetzungsrückstand führt zu einem unnötig schnellen Rückgang des Bauwerksbestands und das breit eingeführte EMS-WSV stößt allmählich an seine Kapazitätsgrenzen.

Im vorliegenden Beitrag wird eine Methode zur Optimierung von Entscheidungen bezüglich der Priorisierung verschiedener Fehlerursachen vorgestellt, die durch die Anwendung der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ermittelt werden. Dabei wird auch die potenzielle Gefährdung der Schäden für die funktionalen und strukturellen Anforderungen der Bauwerke berücksichtigt. Der in dieser Studie entwickelte analytische Hierarchieprozess (AHP) bietet die Möglichkeit, die kausalen Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Kriterien und Fehlerursachen zu erfassen und zu bewerten. Der AHP erlaubt darüber hinaus eine Gesamtbetrachtung des von den einzelnen Fehlerursachen ausgehenden absoluten Risikos, sodass eine Priorisierung der Fehlerursachen mit dem dringendsten Instandsetzungsbedarf möglich ist. Zur Veranschaulichung des Verfahrens wird hier eine vergleichende Analyse mehrerer Fehlerursachen mit Auswirkungen auf die Stahlbetonbauteile von Schleusen beschrieben. Der Rest des Beitrags

gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 wird das Erhaltungsmanagementsystem (EMS-WSV) der WSV in einem Überblick vorgestellt. In Abschnitt 3 wird insbesondere die Methode zur Entwicklung der für die Analyse benötigten Kennzahlen erläutert, und Abschnitt 4 erörtert die praktische Anwendung und Effektivität des vorgeschlagenen AHP anhand einer Fallstudie mit verschiedenen Fehlerursachen, die sich auf die Zuverlässigkeit von Stahlbetonbauwerken auswirken.

2. BAUWERKSINSPEKTION/ZUSTANDSBEWERTUNG

2.1 Inspektionsverfahren

Die Datengrundlage der aktuellen Instandsetzungsstrategien für Verkehrswasserbauwerke in Deutschland bilden Schadensdaten, die bei regelmäßigen Bauwerksprüfungen erfasst werden. Für die Festlegung von Art, Ausmaß und Umfang der Inspektionen wird ein zeitbasierter Ansatz verfolgt. Er deckt sich mit der Einteilung der Verkehrswasserbauwerke in die Kategorien A und B. Nach Kategorie A zu inspizierende Bauwerke sind einer Bauwerksprüfung, -überwachung und -besichtigung zu unterziehen. Bei Bauwerken der Kategorie B ist nur eine Besichtigung erforderlich (BMVI, 2009). Die Bauwerksprüfung findet alle sechs Jahre statt, die Bauwerksüberwachung drei Jahre nach der Bauwerksprüfung. Bei der Bauwerksprüfung beurteilt ein sachkundiger Ingenieur die strukturelle Zuverlässigkeit jedes einzelnen Bauteils des Bauwerks im Hinblick auf die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit (BMVI, 2009). Die ermittelten Schäden werden einzeln erfasst, bewertet, ausgewertet entsprechend ihren Auswirkungen auf die strukturellen Anforderungen (strukturelle Zuverlässigkeit und Gebrauchstauglichkeit) an die Bauteile und das gesamte Bauwerk und in das Programmsystem WSVPruf dokumentiert.

Ziel der Bauwerksprüfung ist die Erkennung und Beurteilung fortschreitender Schädigungsmechanismen als Grundlage fundierter strategischer Entscheidungen zum Erhaltungs-, Instandsetzungs- oder Ersetzungsbedarf. Im Einzelnen werden bei der Bauwerksprüfung der aktuelle Zustand der Bauwerke und die vorherrschenden strukturellen Mängel festgestellt. Werden im Zuge einer eingehenden Inspektion bestimmte Schäden (Risse, Bewehrungskorrosion usw.) nachgewiesen, die die Zuverlässigkeit oder Funktionsfähigkeit eines Objektteils bzw. Bauwerks gefährden könnten, sind Maßnahmen zu ergreifen, die den Schaden eingrenzen soll oder einen Ausfall des Bauteils bzw. einen nachfolgenden Einsturz des Bauwerks verhindern sollen.

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

Sämtliche bei einer eingehenden Inspektion festgestellten Schäden werden mit Zustandsnoten auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet (1 = guter Zustand (CGGen); 4 = schlechter bzw. „kritischer“ Zustand). Mithilfe des Erhaltungsmanagementsystems WSV-Pruf wird auf der Basis der erfassten Schäden eine Gesamtzustandsnote für jedes Bauwerk generiert. Die Zustandsnote dient als Grundlage für die Entscheidung über den Instandsetzungsbedarf des Bauteils/Bauwerks.

2.2 Ergebnisse der aktuellen Zustandsbewertung

Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der Gesamtzustandsnote für Schleusen und Wehre mit den Zustandsnoten verschiedener Stahlbetonkonstruktionen. Aus der Abbildung 1 wird deutlich, dass der Zustand der Mehrzahl der Verkehrswasserbauwerke (Schleusen und Wehre) als ausreichend oder

nicht ausreichend bewertet wird. Demzufolge sind die Bauwerke in ihrer Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beeinträchtigt und es besteht in naher Zukunft ein Bedarf für umfassende Instandsetzungsmaßnahmen. Ebenso wird der Zustand von 33,54 % der Schleusen und 12,55 % der Wehre bereits als „kritisch“ eingestuft. Diese Kategorie von Wasserbauwerken zeigen deutlich fortgeschrittene Schädigungsmechanismen. Diese Gruppe von Bauwerken repräsentiert den aktuellen Instandsetzungsrückstand der WSV, der dringend abgebaut werden muss. Zur Verbesserung der Entscheidungsprozesse in Bezug auf den Instandsetzungsbedarf hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) seit 2008 im Rahmen des EMS-WSV ein Prognosemodell eingeführt, mit dem sich der zukünftige Zustand eines Bauwerks unter Zugrundelegung der aktuellen Zustandsnoten vorausberechnen lässt.

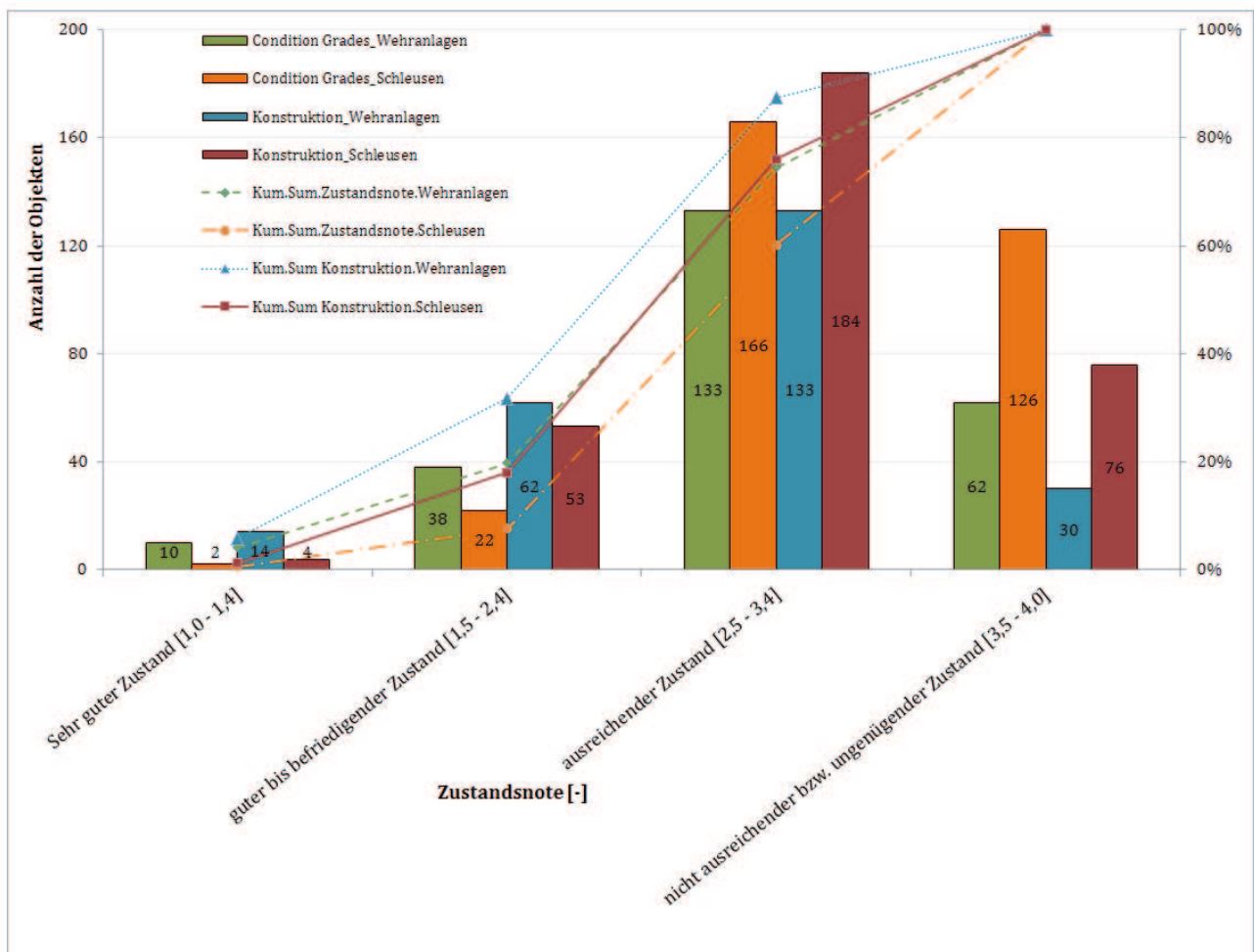


Abbildung 1: Verteilung der Zustandsnoten für ganze Bauwerke und Stahlbetonkonstruktionen („Konstruktion“) von Schleusenanlagen und Wehren in Deutschland (WSVPruf, 2018)

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

2.3 Nachteile des aktuellen Zustandsbewertungsverfahrens

Obwohl die aktuelle Gesamtzustandsnote lediglich als Entscheidungskriterium für die Notwendigkeit von Instandsetzung- oder Erneuerungsmaßnahmen dienen kann, werden die Auswirkungen von Schäden auf die strukturelle Zuverlässigkeit des Bauwerks nicht berücksichtigt. Daher ist keine weitere Differenzierung der großen Anzahl an Konstruktionen mit einer kritischen Zustandsnote zwischen 3,8 und 4 möglich. Zudem werden die Unsicherheiten und subjektiven Wahrnehmungen, die unweigerlich mit Inspektionen auf Basis von regelmäßigen visuellen Prüfungen und Expertenwissen verbunden sind, im Entscheidungsprozess nicht ernsthaft erachtet. Nicht zuletzt besteht der Nachteil, dass sich die Ausrichtung des aktuellen Zustandsbewertungssystems auf den schlimmsten Einzelschaden, der an Konstruktion oder Bauteil festgestellt wurde, konzentriert. Ein beträchtlicher Teil der bei Inspektionen erfassten Daten wird daher derzeit nicht in einer Form zur Verfügung gestellt, die Vergleichbarkeit ermöglicht. Aufgrund der genannten Nachteile sind die derzeitigen Entscheidungsprozesse im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen nicht transparent, umfassend und von ausreichender Beweiskraft. Weiterhin sollte das sich abzeichnende Risiko eines Infrastrukturausfalls in der aktuellen Zustandsnote einfließen.

3. Entscheidungen auf Basis einer qualitativen Risikoanalyse

Die zunehmende technische Komplexität großer Infrastrukturbauwerke und Industrieprodukte sowie die erheblichen Bedenken der Öffentlichkeit bezüglich der Sicherheit gaben den Anstoß für vermehrte Anstrengungen in der Forschung und Entwicklung neuer Risikoanalyse- und Sicherheitsbewertungsverfahren (Bhushan und Rai, 2004). Für die Modellierung und Analyse komplexer Risikoszenarien werden jedoch zunehmend historische Schadensdaten und fundiertes Expertenwissen mit ausreichender Aussagekraft für qualitative und quantitative Auswertungen benötigt. Bei der Risikobewertung großer Infrastrukturbauwerke können sich außerdem probabilistische Ansätze als schwierig erweisen, wenn die Daten überwiegend in Form von Expertenwissen oder qualitativen Informationen vorliegen.

3.1 Nutzung von Expertenwissen in Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA)

Die FMEA wurde bereits in den 1960er Jahren als formales Konstruktionsverfahren entwickelt, um die

strukturelle Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Luft- und Raumfahrt sicherzustellen. Inzwischen ist die FMEA auch in anderen Industriezweigen weit verbreitet, so zum Beispiel in der Automobilindustrie, Nukleartechnik, Elektronik, Chemie und Medizintechnik (Gilchrist, 1993; Bertolini et al., 2004; Bowles, 2004; Liu, 2016). Unserer Kenntnis nach wurde die Methode jedoch noch nicht explizit zur Bewertung der strukturellen Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken eingesetzt. In der umfangreichen Literatur existieren je nach Zielsetzung, Art der FMEA und Anwendungsbereich verschiedene Definitionen der FMEA. In Anlehnung an Stamatis (2003) wird die FMEA definiert als *„eine ingenieurwissenschaftliche Technik, mit der sich bekannte bzw. mögliche Defekte, Probleme, Fehler usw. in System, Konstruktion, Prozess und/oder Dienst definieren, identifizieren und beseitigen lassen, noch bevor sie vom Verbraucher bemerkt werden.“* Auf ähnliche Weise beschreibt Lui (2016) die FMEA als ein *„systematisches Verfahren zur Identifizierung bekannter und potenzieller Fehlerarten und ihrer Ursachen sowie der Auswirkungen von Fehlern auf das System oder den Endbenutzer mit dem Ziel, das mit den ermittelten Fehlerarten verbundene Risiko zu bewerten, hinsichtlich proaktiver Maßnahmen zu priorisieren und für die dringlichsten Probleme Korrekturmaßnahmen zu ergreifen, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Produkten, Prozessen, Entwürfen oder Diensten zu erhöhen.“*

Die FMEA ist in hohem Maße auf Expertenwissen angewiesen und gilt daher als qualitativer Ansatz zur Risikobewertung. Zur Erkennung potenzieller Bemessungs- und Prozessfehler im System noch vor ihrem Auftreten wird die FMEA durch die Ursache-Wirkungsketten unterstützt, sodass das Risiko eines Versagens durch Empfehlung von Konstruktionsänderungen oder gegebenenfalls Anpassung der Betriebsabläufe minimiert werden kann. Nach Lui (2016) besteht das übergeordnete Ziel der FMEA besteht darin die Analysten bei der Priorisierung der Fehlerarten in System, Bemessung, Prozess, Produkt oder Dienst unterstützen zu können, damit die begrenzten Ressourcen jeweils den Elementen mit dem höchsten Risikopotenzial zugewiesen werden können. Das traditionelle FMEA-Verfahren wird in zwei Stufen durchgeführt: Analyse des Systems (Schritte 1 bis 3) und Risiko- oder Kritikalitätsbewertung (Schritte 4 und 5). Die hier umgesetzte FMEA enthält die folgenden Schritte:

- Schritt 1: Beschreibung der Konstruktion und Komponenten des zu analysierenden Systems;
- Schritt 2: Definition der Funktionen ausgewählter Komponenten, Subsysteme oder Systeme;

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

- Schritt 3: Identifizierung der für die einzelnen Komponenten relevanten Fehlerarten und Fehlerursachen sowie ihrer Auswirkung auf Komponenten, Subsysteme und Gesamtsystem;
- Schritt 4: Berechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ); entsprechende Anordnung der Fehlerarten in einer Rangfolge und Ermittlung des Fehlers mit dem dringendsten Instandhaltungsbedarf;
- Schritt 5: Vorschlag von Verbesserungsmaßnahmen zur Risikominimierung und Verbesserung der Systemleistung.

Die Definition der Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen hängt in einer herkömmlichen FMEA von der Analyseebene und den Kriterien für die Beurteilung des Versagensrisikos ab. Die FMEA gilt daher als hierarchischer Modellierungsprozess zur Anordnung von Attributen in einer Baumstruktur nach der Top-Down- oder Bottom-Up-Methode. Eine wesentliche Aufgabe einer System- oder Infrastrukturanalyse besteht demzufolge in der hierar-

chischen Zerlegung eines Systems in seine Hauptbestandteile (siehe Panenka & Nyobeu, 2018b). Mit der Zerlegung wird grundsätzlich die Absicht verfolgt, die Hauptbestandteile zu ermitteln, die maßgeblich zur Erfüllung der strukturellen und leistungsbezogenen Anforderungen beitragen. Sobald diese Komponenten in einer Infrastruktureinrichtung ausfindig gemacht wurden, können mittels der FMEA Fehlerarten, die sich auf die strukturelle Zuverlässigkeit der Komponenten auswirken, ermittelt, bewertet und minimiert werden.

Die FMEA bietet sowohl qualitative als auch quantitative Maßnahmen zur Ermittlung von Fehlerarten und ihrer Auswirkungen auf die Qualität bzw. strukturelle Zuverlässigkeit von Produkten/Systemen. In einer konventionellen FMEA wird das Fehlerrisiko mithilfe der Risikoprioritätszahl (RPZ) bestimmt. Sie ist das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit oder Häufigkeit des Auftretens (A) eines Fehlers, der Wahrscheinlichkeit der Entdeckung (E) des Fehlers vor Eintreten der Fehlerfolge und der Bedeutung (B) bzw. des Schweregrads der Fehlerfolge (siehe Abbildung 2).

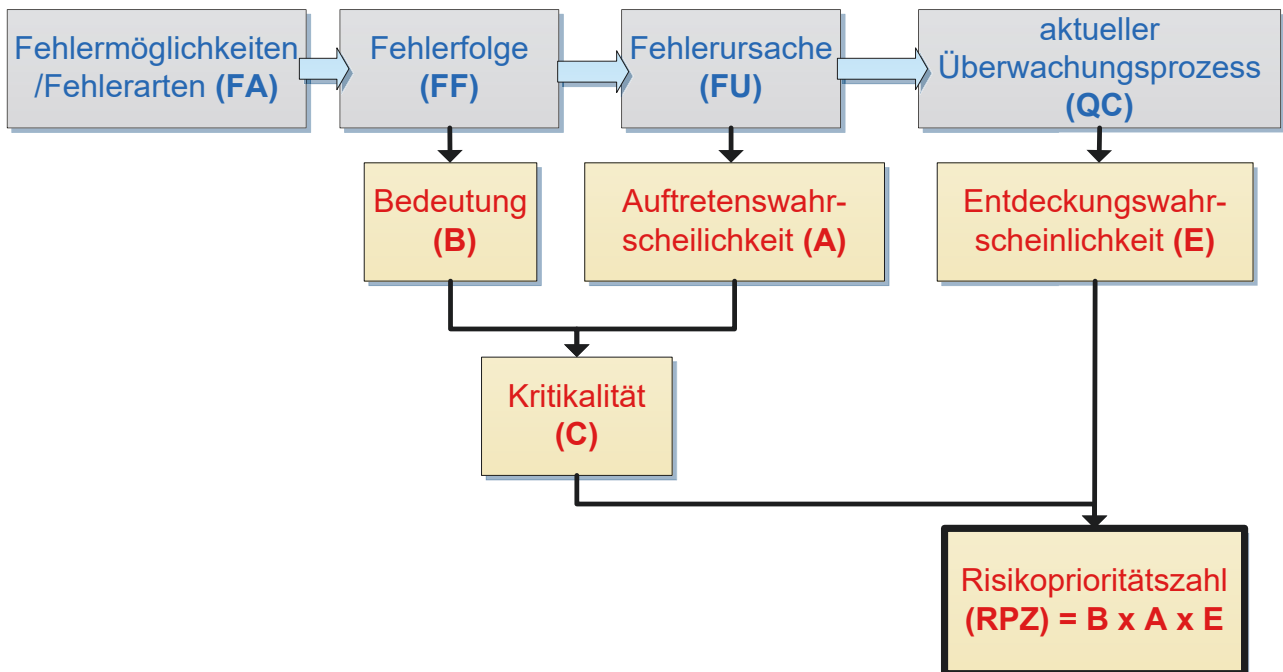


Abbildung 2: Ursache-Wirkungskette in einer konventionellen FMEA

In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass weitere relevante Risikokriterien wie wirtschaftliche Aspekte, Sicherheitsfragen, Relevanz von Ausstattung/System, Erhaltungskosten, Versagensrate, mittlere Instandsetzungszeit und Betriebsbedingungen bei der Fehlerrisikoanalyse häufig außer Acht

gelassen werden. Die Berechnung der RPZ erfolgt durch Zuordnung von Werten zwischen 1 und 10 zu den drei ausgewählten Risikokriterien. Die so ermittelten RPZ-Ergebnisse liegen zwischen 1 und 1000. Je höher die RPZ, desto größer ist das Risiko eines Konstruktionsversagens (Lui, 2016).

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

3.2 Erweiterung der Risikopriorisierung mit dem analytischen Hierarchieprozess (AHP)

In die FMEA können zwar Intuition, Urteil und Erfahrung der Entscheidungsverantwortlichen mit einfließen, es ist jedoch nicht möglich, der subjektiven Wahrnehmung Rechnung zu tragen, eine Fehlerart (FA) oder ein Risikofaktor sei wichtiger für die Risikobewertung als andere. Dies ist eine der größten Schwachstellen der FMEA. Die RPZ kann kein subjektives Urteil abbilden, da ihre Berechnung traditionell mittels Multiplikation der Einzelwerte der drei Risikofaktoren A, B und E erfolgt. Um diese Schwachstelle auszugleichen und die klassische FMEA durch Berücksichtigung dieser potenziellen Beziehungen zwischen den Fehlerursachen oder Risikokriterien (d. h. A, B und E) zu erweitern, kommt in dieser Studie der im Jahr 1980 von Saaty entwickelte analytische Hierarchieprozess (Analytical Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 2008) zum Einsatz. Anstelle einer Bewertung jeder Fehlerart durch separate Bestimmung der RPZ, wird nun mithilfe des AHP der Einfluss der einzelnen Fehlerarten gewichtet und als Kriterium für die Priorisierung verwendet.

Der AHP ist eine leistungsstarke, flexible und auf mehreren Kriterien basierende Entscheidungshilfe. Komplexe Entscheidungsprobleme werden in verschiedene Entscheidungsebenen aufgegliedert, die neben quantitativen auch qualitative Aspekte abbilden. Subjektive und objektive Bewertungen werden zudem in einem integrativen Analyserahmen kombiniert, der auf Verhältnisskalen aus einfachen paarweisen Vergleichen basiert. Dies vereinfacht die Analyse, weil die kritischen Aspekte eines Problems in einer hierarchischen Struktur angeordnet werden können (Saaty, 1990 & 2008). Saaty (1987) beschreibt den AHP als einen „nichtlinearen Rahmen für induktives und deduktives Denken ohne Verwendung eines Syllogismus. Mehrere Faktoren werden gleichzeitig berücksichtigt, Abhängigkeiten und Feedback werden einbezogen und die Synthese oder Schlussfolgerung erfolgt durch numerische Trade-offs.“ Da die Kombination aus zwei oder mehreren Fehlerarten in der Regel zu signifikanten Fehlern oder Ausfällen führt, werden die Einflussgrößen der verschiedenen Fehlerarten bestimmt und als Kriterium für ihre Priorisierung herangezogen. Im AHP wird von einer unidirektionalen hierarchischen Beziehung zwischen den Entscheidungsebenen ausgegangen. Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten werden jedoch

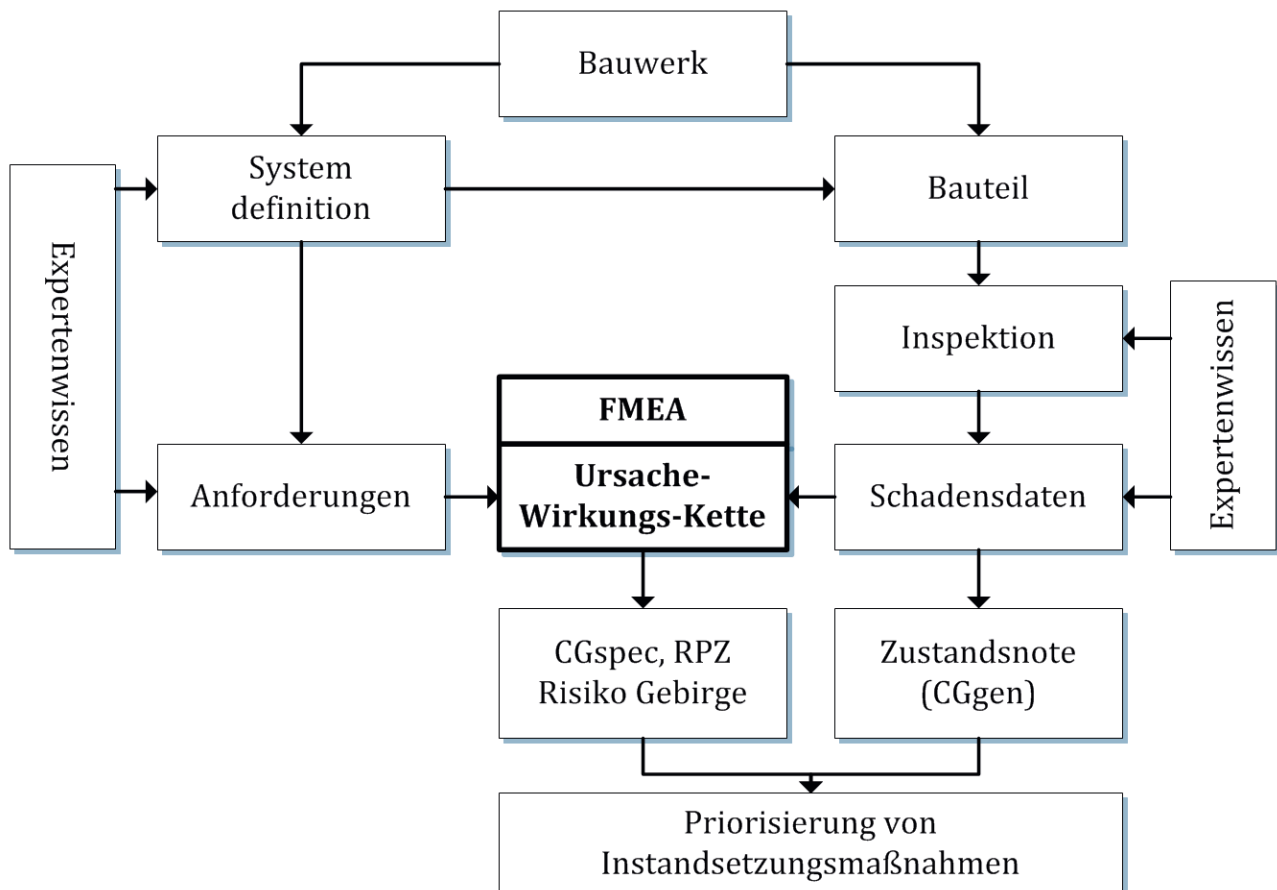


Abbildung 3: Einsatz der FMEA in der Zustandsbewertung von Verkehrswasserbauwerken (Panenka & Nyobeu, 2018b)

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

auch berücksichtigt. In einer „*Supermatrix*“ können gewichtete Prioritäten kombiniert werden (Saaty, 2008). Der AHP ist ein dreistufiges Verfahren zur hierarchischen Aufgliederung eines komplexen Problems. An oberster Stelle steht das allgemeine Entscheidungsziel, die verschiedenen Kriterien, Unterkriterien und Entscheidungsalternativen sind jeweils untergeordnet. Die Entscheidungsverantwortlichen bzw. Entscheidungsträger vergleichen die einzelnen Faktoren in einer Paarvergleichsmatrix mit allen anderen Faktoren auf derselben Hierarchieebene und ermitteln so die gewichtete Priorität oder relative Bedeutung der Faktoren. Die optimale Lösung ist die Alternative mit der größten kumulierten Gewichtung (Saaty, 1990). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass in diesem Kontext das Adjektiv „relativ“ verwendet wird, weil die Prioritäten der Kriterien immer im Verhältnis zueinander bewertet werden.

3.3 Die vorgeschlagene FMEA-AHP-Methode

Mit der vorgeschlagenen Methode soll die Aussagekraft der im EMS-WSV erfassten aktuellen Zustandsnote verbessert werden. Zu diesem Zweck wird eine Einflussbeziehung zwischen den strukturellen Systemanforderungen und den möglichen Risiken eines Systemversagens hergestellt. Zusätzlich werden neue Kennzahlen generiert, die die Entwicklung gemeinsamer Erhaltungs- und Ausbaustrategien unterstützen können (siehe Abbildung 3, Panenka und Nyobeu, 2018b).

Eine Entscheidung kann als Wahl einer Alternative aus einer Menge an Alternativen unter Beachtung eines übergeordneten Ziels oder Kriteriums angesehen werden. Für eine Entscheidung können folglich statt nur eines Kriteriums auch mehrere Kriterien zugrunde gelegt werden. Dazu müssen

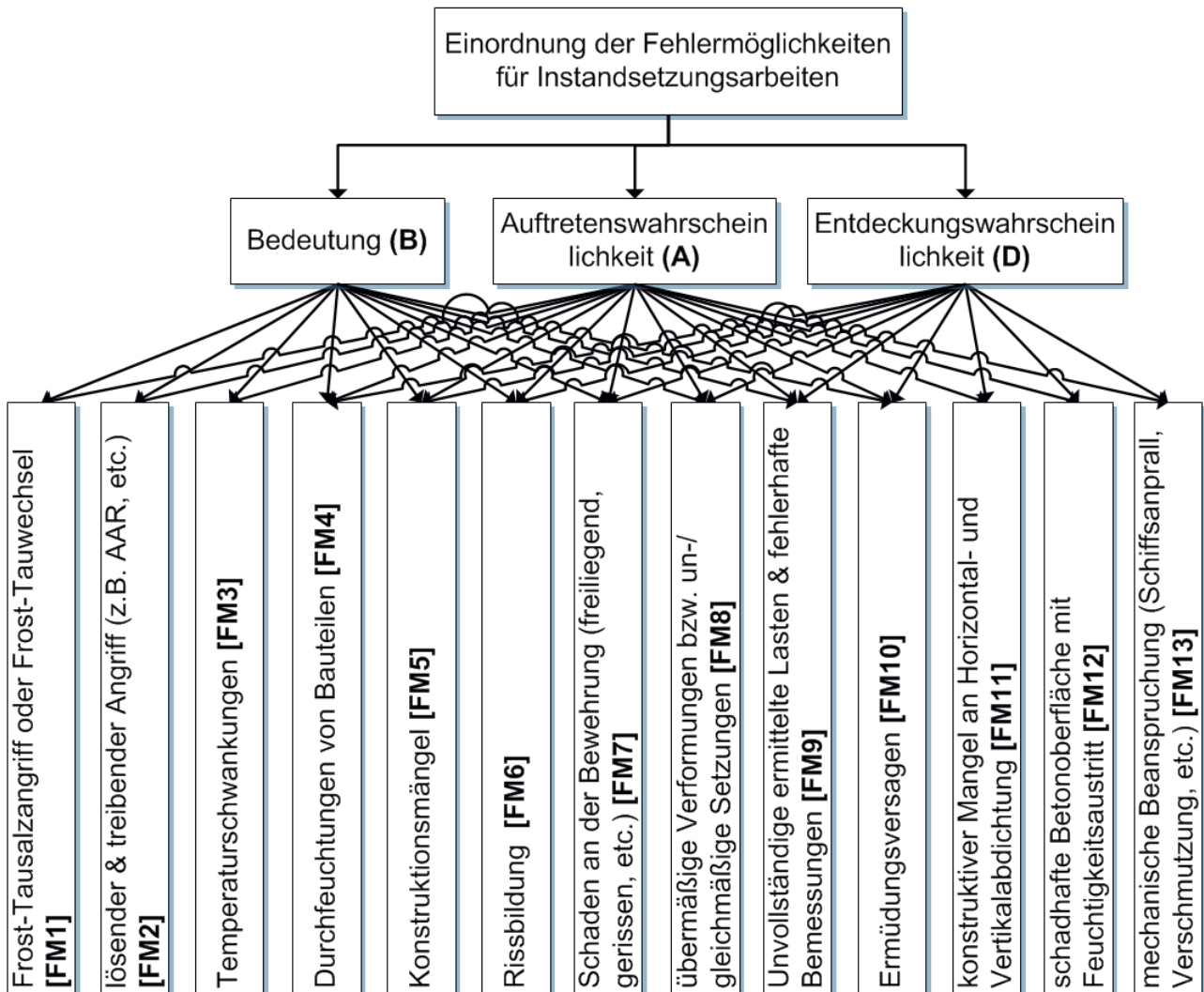


Abbildung 3: Einsatz der FMEA in der Zustandsbewertung von Verkehrswasserbauwerken (Panenka & Nyobeu, 2018b)

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

zunächst verschiedene Kriterien beurteilt und dann die Alternativen auf Grundlage jedes einzelnen Kriteriums bewertet werden. Am Ende des Prozesses werden die Bewertungen aggregiert und die bewerteten Alternativen hinsichtlich des verfolgten Ziels in eine relative Rangfolge gebracht. Saaty (2008) hat die zwingende Notwendigkeit der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung klar erkannt und wies darauf hin, dass „*wir für Entscheidungen auch Wissen benötigen über Problemstellung, Entscheidungsziel und -zweck, Entscheidungskriterien, untergeordnete Kriterien, Beteiligte, betroffene Gruppen sowie Alternativmaßnahmen.*“ Er stellte weiter fest, dass Ermittlungsverfahren zur Wahl der besten Alternative oder, im Falle von Ressourcenverteilungen, des geeigneten Anteils an der begrenzten Ressourcenmenge, durch Prioritäten gestützt werden müssten. Wenn konkret das vorrangige Ziel der Erhaltungsmanagementstrategie darin besteht, die verschiedenen Fehlerarten hinsichtlich der Instandsetzungsmaßnahmen zu kategorisieren, so können die Risikokriterien/-faktoren der FMEA als Bewertungskriterien und die identifizierten Fehlerarten als Alternativen gelten. Die Entscheidung für ein Ranking mehrerer Fehlerarten in Bezug auf Instandsetzungsmaßnahmen wird in eine hierarchische Struktur mit mehreren Ebenen zerlegt, wobei das Ziel auf der oberen Ebene, die Entscheidungskriterien in der Mitte und die identifizierten Alternativen auf der unteren Ebene angeordnet sind (siehe Abbildung 4). Ein strukturiertes Entscheidungsverfahren für die Generierung von Prioritäten für Alternativen muss

in diesem Zusammenhang die Entscheidung in die folgenden Schritte aufgliedern:

- a) Durchführung einer FMEA zur Identifizierung der möglichen Fehlerursachen;
- b) Erstellung einer hierarchischen Struktur. Der Entscheidungsprozess, der das zu lösende Problem beschreibt, wird in eine Hierarchie aus Zielen, Kriterien, Unterkriterien und Alternativen (d. h. Fehlerarten) zerlegt. Dieses Verfahren wird auch als Entscheidungsmodellierung bezeichnet; es geht dabei lediglich darum, eine Hierarchie als Grundlage für die Analyse der Entscheidung anzulegen (siehe Abbildung 4);
- c) Erstellung mehrerer Paarvergleichsmatrizen für die Präferenzanalyse. Mit Blick auf das gewünschte Ziel sollen die relative Wichtigkeit der einzelnen Kriterien in einem paarweisen Vergleich ausgewertet und die relativen Prioritäten daraus abgeleitet werden. Um eine akzeptable Konsistenz der Beurteilungen in Bezug auf Proportionalität und Transitivität sicherzustellen, wird eine Konsistenzprüfung vorgenommen. Da jedes Kriterium eine andere relative Wichtigkeit oder Gewichtung aufweisen kann, werden die relativen Prioritäten mittels paarweiser Vergleiche auf einer von Saaty (1987) eingeführten numerischen Vergleichsskala hergeleitet (siehe Tabelle 1).

Intensität der Wichtigkeit	Definition	Erläuterung
1	Gleichwertige Bedeutung	Zwei Aktivitäten tragen gleichermaßen zum Ziel bei
3	Mittlere Bedeutung	Erfahrung und Urteilsvermögen begünstigen eine Tätigkeit leicht gegenüber einer anderen
5	Starke Bedeutung	Erfahrung und Urteilsvermögen begünstigen eine Tätigkeit stark gegenüber einer anderen.
7	Sehr stark oder nachgewiesene Bedeutung	Eine Aktivität wird sehr stark gegenüber einer anderen bevorzugt; ihre Dominanz zeigt sich in der Praxis.
9	Extreme Bedeutung	Die Beweise, die eine Aktivität gegenüber einer anderen bevorzugen, sind von der höchstmöglichen Bestätigungsordnung..
2,4,6,8	Für Kompromisse zwischen den oben genannten Werten	Manchmal muss man ein Kompromissurteil numerisch interpolieren, weil es kein gutes Wort gibt, um es zu beschreiben.

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

Reziproke der oben genannten Werte	Wenn Aktivität i im Vergleich zu Aktivität j eine der obigen ungleich Nullzahlen zugeordnet hat, dann hat j den Kehrwert im Vergleich zu i.	Ein Vergleich, der durch die Wahl des kleineren Elements als Einheit erforderlich ist, um das größere Element als ein Vielfaches dieser Einheit zu schätzen.
Rationalen	Kennzahlen, die sich aus der Skala ergeben	Wenn die Konsistenz erzwungen werden soll, indem n numerische Werte erhalten werden, um die Matrix zu überspannen.
1.1 – 1.9	Für geknüpfte Aktivitäten	Wenn die Elemente nahe beieinander liegen und fast nicht unterscheidbar sind, ist moderat 1,3 und extrem 1,9.

Tabelle 1: Bewertungsskala zur Ermittlung der relativen Präferenz für den paarweisen Vergleich (Saaty, 2008)

- d) Ableitung lokaler Prioritäten oder relativer Präferenzen für die Alternativen. In der Paarvergleichsskala von Saaty werden die Prioritäten der Alternativen für jedes Kriterium getrennt abgeleitet (in einem Prozess ähnlich wie im vorherigen Schritt, das heißt, die Alternativen werden hinsichtlich jedes Kriteriums paarweise verglichen). Auch hier wird die Konsistenz der Expertenurteile geprüft und gegebenenfalls angepasst.
- e) Ableitung allgemeiner Prioritäten oder Gewichtungen für die Kriterien (Modellsynthese). Verschiedene aus der vorherigen Analyse gewonnene Prioritäten werden unter Einbeziehung der Gewichtung jedes Kriteriums zu einer gewichteten Summe aggregiert, die die Gesamtprioritäten der Alternativen wiedergibt. Anschließend wird die Alternative mit der höchsten Gesamtpriorität identifiziert, die gleichzeitig das kritischste Problem oder die bevorzugte Wahl für Instandsetzungsmaßnahmen darstellt.
- f) Durchführung einer Sensitivitätsanalyse. In dieser Analyse wird untersucht, welche Auswirkung eine Veränderung in den Gewichten des einflussreichsten Kriteriums auf die allgemeinen Prioritätsgewichte verschiedener Alternativen hat, um den logischen Zusammenhang der erzielten Ergebnisse zu verstehen.
- g) Endgültige Entscheidung. Basierend auf den Ergebnissen der Synthese und der Sensitivitätsanalyse kann eine Entscheidung getroffen werden.

4. Fallstudie

4.1 Ganzheitliche Zuweisung von Prioritäten durch Paarvergleiche

Die für die Erhaltung von Wasserstraßen zuständigen Fachleute müssen sich mit den verschiedensten Fragestellungen auseinandersetzen, zum Beispiel, welche der Fehlerursachen ein besonders hohes Risiko für die strukturelle Zuverlässigkeit von

Verkehrswasserbauwerken darstellen und welche Einflussbeziehungen zwischen den verschiedenen Fehlerursachen bestehen. Eines ihrer vorrangigen Ziele ist daher die Ausarbeitung einer zustands- und risikobasierten Erhaltungsstrategie, mit der sich der riesige aufgestaute Instandsetzungsbedarf bestmöglich bewältigen lässt. Daher wird in der Fallstudie des vorliegenden Beitrags ein Lösungsansatz für das heikle Problem der Bewertung von Risikoprioritäten für verschiedene Fehlerursachen entwickelt, bei dem der AHP zum Einsatz kommt. Mithilfe der Prioritäten können die dringlichsten Schäden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die strukturelle Zuverlässigkeit herausgearbeitet und die entsprechenden Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet werden. Hierfür werden in erster Linie die drei Entscheidungskriterien Bedeutung (B) der Fehlerfolge, Auftretenswahrscheinlichkeit (A) sowie Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) verwendet. Zur Ableitung der relativen Prioritäten (Gewichtungen) und zur Bestimmung ihrer relativen Wichtigkeit für die Erfüllung des Gesamtziels einer Klassifizierung verschiedener Fehlerursachen mit Instandsetzungsbedarf müssen diese Kriterien einem Vergleich unterzogen werden.

Auf der Basis der grundlegenden Skala werden Vergleiche angestellt, die die relative Stärke von Präferenzen und Eindrücken wiedergeben. Die Ergebnisse dienen als Kerne für Fredholm-Operatoren, aus denen sich Verhältnisskalen in Form von Haupteigenvektoren oder Eigenfunktionen ableiten lassen (Saaty, 1987 und Saaty, 1990). Diese Vergleiche sind die Grundlage für die Anwendung des AHP. Zunächst muss die relative Priorität jedes der drei Kriterien in einer paarweisen Gegenüberstellung festgestellt werden, sodass eine Paarvergleichsmatrix generiert wird. Die Vergleiche basieren auf Beurteilungen, die durch Zahlen aus der grundlegenden Skala repräsentiert werden.

Aus den nachstehenden Matrizen lässt sich ablesen, dass jeweils ein Elementpaar (ij) aus einer Hierar-

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

chriebene Ebene in Bezug auf ein unmittelbar übergeordnetes Element verglichen wird, das als gemeinsame Eigenschaft oder gemeinsames Kriterium dient. Dabei wird beurteilt, in welchem der Elemente mehr oder weniger von der Eigenschaft vertreten ist und in welchem Ausmaß. Eine typische Fragestellung für einen Eintrag in der Vergleichsmatrix würde wie folgt lauten: Welches der beiden Elemente i (linke Spalte der Matrix) und j (obere Zeile der Matrix) hat mehr von der Eigenschaft oder erfüllt die Kriterien besser, das heißt, welches Element hat in Bezug auf das betreffende Kriterium eine größere Bedeutung und um wie viel größer ist die Bedeutung (hierfür werden die Werte der grundlegenden Skala aus Tabelle 1 verwendet)? Das Ergebnis ist a_{ij} (oder a_{ji}). Der Reziprokwert für die transponierte Matrix wird automatisch eingefügt. Die Fragestellung beim paarweisen Vergleich kann einen Einfluss auf die Beurteilungen und damit auf die Prioritäten haben (siehe Tabelle 2).

4.2 Zuweisung der Bewertung verschiedener Kriterien/Ableitung von Prioritäten (Gewichtungen) für die Kriterien

Zur Ableitung der Prioritätsgewichte der Kriterien wird die Wichtigkeit der verschiedenen Kriterien hinsichtlich des gewünschten Ziels einem paarweisen Vergleich unterzogen (siehe Tabelle 2). Da der Anteil der Inkonsistenz $CR = 0,0036$ kleiner als 0,1 ist, kann von einer hinreichenden Konsistenz der verwendeten Bewertungsmatrix ausgegangen werden.

Die normalisierten Prioritäten können auch in ihrer Idealform ausgedrückt werden, indem jede Priorität durch die höchste Priorität 0,6479 (für das Kriterium Bedeutung der Fehlerfolgen) dividiert wird. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen grundsätzlich die folgenden Anteile an der Gesamtgewichtung: Bedeutung 64,79 %, Auftreten 22,99 % und Entdeckung 12,22 %. Im Anschluss wird das Kriterium Bedeutung als das wichtigste Kriterium für das Ranking der verschiedenen

Fehlerursachen im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen eingestuft. Danach kann der Anteilswert für Auftreten und Entdeckung abgeleitet werden. Die Ergebnisse dieser Kriterienbewertung zeigen deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Fehlerursache etwa 35,48% so hoch ist wie die Bedeutung seiner Fehlerfolge und die Wahrscheinlichkeit, dass ein potenzieller Fehlerart erkannt wird, etwa 18,86% so hoch ist wie die Bedeutung seiner Fehlerfolgen.

4.3 Ableitung lokaler Prioritäten (Präferenzen) für die Alternativen: Auswertung von Alternativen auf Basis der bewerteten Kriterien

Im nächsten Schritt werden Vergleichsmatrizen für die Fehlerursachen (Alternativen) erstellt, die in Bezug auf jedes der ermittelten Kriterien verglichen werden. Da die abgeleiteten Prioritäten nur in Bezug auf das spezifische Kriterium Gültigkeit haben, werden sie häufig als lokale Prioritäten bezeichnet. Es werden somit drei weitere Paarvergleichsmatrizen erstellt, um auf Basis der Gewichtung der Alternativen bezogen auf ein gemeinsames Kriterium für jede Alternative lokale Prioritäten abzuleiten.

	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung/ Erhaltung (E)	Normalisierte Prioritäten (Gewichtungen)	Idealisierte Prioritäten (Gewichtungen)
Bedeutung (B)	1	3	5	0.6479	100%
Auftreten (A)	1/3	1	2	0.2299	35.48%
Entdeckung/ Erhaltung (E)	1/2	1/2	1	0.1222	18.86%
$\lambda_{\max} = 3.004$				CI = 0.0018	CR = 0.0036

Tabelle 2: Paarvergleichsmatrix für Entscheidungskriterien bezogen auf das Hauptziel

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

Bedeutung (B)	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13	Prioritätsvektoren (Gewichtungen)	Rang
FM1	1	2	3	3	1/3	1/7	1/7	1/5	2	1/3	3	2	3	0.05785	7
FM2	1/2	1	1/2	2	1/3	1/6	1/6	1/3	1/5	1/5	1/2	2	3	0.02804	10
FM3	1/3	2	1	3	1/2	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	2	2	4	0.04144	8
FM4	1/3	1/2	1/3	1	1/5	1/8	1/8	1/5	1/5	1/5	1/2	2	2	0.02036	11
FM5	3	3	2	5	1	1/3	1/3	3	1/3	3	3	5	7	0.10159	4
FM6	7	6	5	8	3	1	1/2	3	3	3	5	7	8	0.18428	2
FM7	7	6	5	8	3	2	1	3	3	2	5	8	8	0.20406	1
FM8	5	3	3	5	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	3	5	5	0.07988	6
FM9	1/2	5	3	5	3	1/3	1/3	3	1	3	5	5	7	0.12346	3
FM10	3	5	3	5	1/3	1/3	1/2	3	1/3	1	3	5	5	0.09419	5
FM11	1/3	2	1/2	2	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/3	1	2	2	0.03139	9
FM12	1/2	1/2	1/2	1/2	1/5	1/7	1/8	1/5	1/5	1/5	1/2	1	2	0.01907	12
FM13	1/3	1/3	1/4	1/2	1/7	1/8	1/8	1/5	1/7	1/5	1/2	1/2	1	0.0144	13
$\lambda_{\max} = 14.4037$ CI = 0.11698 CR = 0.07499															

Tabelle 3: Paarweiser Vergleich von Alternativen bezogen auf das Kriterium „Bedeutung“

Die Konsistenzprüfung ($CR = 0,07499 < 0,1$) zeigt eine recht gute Konsistenz der subjektiven Beurteilungen bei den paarweisen Vergleichen. Daraus folgt eine relativ gute Verlässlichkeit der Bewertungsmatrix und der berechneten Prioritätsgewichtungen. Weitere Berechnungen betreffen die Prioritäten der angegebenen Fehlerursachen bezogen auf die Bedeutung ihrer Folgen und ihren jeweiligen Beitrag zur Nichterfüllung der Bemessungsanforderungen des Systems (siehe die beiden äußersten rechten Spalten in Tabelle 3). Die Fehlerursachen

Bewehrungskorrosion (**FM7**), Risse im Stahlbeton (**FM6**) sowie Unvollständige ermittelte Lasten & fehlerhafte Bemessungen (**FM9**) sind mit Prioritätsgewichtungen von jeweils 0,204, 0,184 und 0,123 die drei dringlichsten Fehlerursachen, deren Folgen die strukturelle Zuverlässigkeit des Systems beeinträchtigen können. Die nachstehenden Tabellen 4 und 5 zeigen jeweils einen Vergleich verschiedener Fehlerursachen hinsichtlich der Auftretens- und der Entdeckungswahrscheinlichkeit.

Auftreten (A)	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13	Prioritätsvektoren (Gewichtungen)	Rang
FM1	1	2	3	3	3	1/2	1/2	5	5	8	1/2	1/2	2	0.09828	4
FM2	1/2	1	3	3	1/3	1/3	3	3	4	6	1/2	1/2	2	0.08912	6
FM3	1/3	1/3	1	3	2	1/3	1/4	3	3	7	1/3	1/3	2	0.05993	8
FM4	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1/3	2	2	2	1/2	1/8	1/3	0.02945	10
FM5	1/3	3	1/2	3	1	1/3	1/4	4	3	5	1/3	1/3	2	0.06749	7

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

FM6	2	3	3	3	3	1	2	6	8	8	3	1/3	3	0.14795	2
FM7	2	1/3	4	3	4	1/2	1	5	5	8	3	1/2	2	0.12121	3
FM8	1/5	1/3	1/3	1/2	1/4	1/6	1/5	1	2	2	1/4	1/8	1/3	0.02131	11
FM9	1/5	1/4	1/3	1/2	1/3	1/8	1/5	1/2	1	3	1/4	1/7	1/3	0.01967	12
FM10	1/8	1/6	1/7	1/2	1/5	1/8	1/8	1/2	1/3	1	1/7	1/8	1/5	0.01235	13
FM11	2	2	3	2	3	1/3	1/3	4	4	7	1	1/2	1/2	0.09191	5
FM12	2	2	3	8	3	3	2	8	7	8	2	1	3	0.18193	1
FM13	1/2	1/2	1/2	3	1/2	1/3	1/2	3	3	5	2	1/3	1	0.05941	9
$\lambda_{\max} = 14.4772$ CI = 0.1231 CR = 0.07891															

Tabelle 4: Paarvergleichsmatrix von Alternativen bezogen auf das Kriterium „Auftreten“

Entdeckung (E)														Prioritätsvektoren (Gewichtungen)	Rang
	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13		
FM1	1	3	5	3	1/3	1/3	1/3	3	5	5	3	1/3	1/3	0.07606	6
FM2	1/3	1	3	3	1/3	1/4	1/3	1/3	3	3	1/3	1/4	1/5	0.03677	9
FM3	1/5	1/3	1	1/2	1/3	1/6	1/5	1/3	2	1/2	1/5	1/8	1/8	0.01801	12
FM4	1/3	1/3	2	1	1/3	1/6	1/4	1/3	1/2	3	1/3	1/6	1/8	0.02307	10
FM5	3	3	3	3	1	1/2	1/2	4	6	8	3	2	1/2	0.11743	4
FM6	3	4	6	6	2	1	3	4	8	8	3	1/4	1/2	0.14141	3
FM7	3	3	5	4	2	1/3	1	3	5	8	1/3	1/2	1/2	0.10125	5
FM8	1/3	3	3	3	1/4	1/4	1/3	1	3	4	2	1/3	1/3	0.05414	8
FM9	1/5	1/3	1/2	2	1/6	1/8	1/5	1/3	1	2	1/3	1/7	1/8	0.01937	11
FM10	1/5	1/3	2	1/3	1/8	1/8	1/8	1/4	1/2	1	1/4	1/8	1/8	0.0151	13
FM11	1/3	3	5	3	1/3	1/3	3	1/5	3	4	1	1/3	1/3	0.06836	7
FM12	3	4	8	6	1/2	4	2	3	7	8	3	1	1/2	0.15362	2
FM13	3	5	8	8	2	2	2	3	8	8	3	2	1	0.17541	1
$\lambda_{\max} = 14.5436$ CI = 0.12863 CR = 0.08246															

Tabelle 5: Paarvergleichsmatrix von Alternativen bezogen auf das Kriterium „Entdeckung“

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche in Bezug auf die Kriterien Auftreten und Entdeckung werden in eine reziproke Vergleichsmatrix eingegeben wie in den Tabellen 4 und 5 dargestellt. Für die Kriterien Auftreten und Entdeckung wird ein Konsistenzverhältnis von 0,07891 bzw. 0,08246 geschätzt. Damit kann von einer hinreichenden Konsistenz der Bewertungsmatrizen ausgegangen werden. Es ist jedoch wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Fehlerursachen **FM12**, **FM6**, **FM7** und **FM1** die größten negativen Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit von Verkehrswasserbauwerken aus Stahlbeton haben. Die Fehlerursachen **FM13**, **FM12**, **FM6**, **FM5** und **FM7** sind am einfachsten

zu entdecken, während die Fehlerursachen **FM10**, **FM3** und **FM9** am schwierigsten zu entdecken sind und wahrscheinlich erhebliche Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit des Bauwerks haben.

4.4 Modellsynthese: Aggregation der lokalen Prioritäten zur Ableitung der Gesamtprioritäten der Alternativen in Bezug auf das zu lösende Problem

Zur Bestimmung der endgültigen Prioritäten der verschiedenen Fehlerursachen unter Beachtung des Hauptziels der Fallstudie, nämlich die Klassi-

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

fizierung von Fehlerursachen im Hinblick auf Instandsetzungsmaßnahmen, müssen die einzelnen Beurteilungen auf der Ebene der Kriterien und Alternativen aggregiert werden. Die verschiedenen Analysen werden zu diesem Zweck in einer Synthese zusammengeführt. Dabei wird jedes Ranking mit der Priorität seines Kriteriums oder untergeordneten Kriteriums multipliziert und die resultierenden

Gewichtungen der einzelnen Alternativen addiert, um die endgültigen Prioritäten der 13 Fehlerursachen zu erhalten. Anders ausgedrückt: Zur Aggregation der Prioritäten der 13 Fehlerursachen wird durch Berechnung des arithmetischen Mittels nach Forman und Peniwati (1998) eine Aggregationsmatrix erstellt (siehe Tabelle 6 unten).

	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung (E)	Globale Prioritäts- gewichte	Rang
Kriterien Prioritätsgewichte (KW)	0.6479	0.2299	0.1222		
Frost-Tausalzangriff oder Frost-Tauwechsel (FM1)	0.05785	0.09828	0.07606	0.069	6
lösender & treibender Angriff (z.B. AAR, etc.) (FM2)	0.02804	0.08912	0.03677	0.043	11
Temperaturschwankungen (FM3)	0.04144	0.05993	0.01801	0.043	12
Durchfeuchtungen von Bauteilen (FM4)	0.02036	0.02945	0.02307	0.023	13
Konstruktionsmängel (FM5)	0.010159	0.06749	0.11743	0.096	3
Rissbildung (FM6)	0.18428	0.14795	0.14141	0.171	2
Schaden an der Bewehrung (freiliegend, gerissen, etc.) (FM7)	0.20406	0.12121	0.10125	0.172	1
übermäßige Verformungen bzw. un-/gleichmäßige Setzungen (FM8)	0.07988	0.02131	0.05414	0.063	8
Unvollständige ermittelte Lasten & fehlerhafte Bemessungen (FM9)	0.12346	0.01967	0.01937	0.087	4
Ermüdungsversagen (FM10)	0.09419	0.01235	0.0151	0.066	7
konstruktiver Mangel an Horizontal- und Vertikalabdichtung (FM11)	0.03139	0.09191	0.06836	0.05	9
schadhafte Betonoberfläche mit Feuchtigkeitsaustritt (FM12)	0.01907	0.18193	0.15362	0.073	5
mechanische Beanspruchung (Schiffsanprall, Verschmutzung, etc.) (FM13)	0.0144	0.05941	0.17541	0.044	10
Gesamt-CR der Hierarchie = 0.05849					

Tabelle 6: Synthese der Modellprioritäten

Das Gesamtkonsistenzverhältnis (CR) von etwa $0,05849 < 0,1$ zeigt eine hinreichend zufriedenstellende Korrektheit und Konsistenz der durchgeführten paarweisen Vergleiche. Auf der Grundlage der berechneten aggregierten/kombinierten Prioritätsgewichtungen werden die verschiedenen Alternativen (Fehlerursachen) entsprechend ihrer Gewichtungswerte sortiert (siehe Tabelle 6). Die Analyse der Prioritätsgewichtungen zeigt, dass die Verfallsprozesse Risse im Stahlbeton und Bewehrungs-

korrosion die wichtigsten Verfallsprozesse sind, die wahrscheinlich dazu führen, dass Verkehrswasserbauwerke die strukturellen Anforderungen nicht mehr erfüllen. Ein weiteres Ergebnis der Analyse zeigt, dass in der Planungs- und Konstruktionsphase auch Baumängel in Verbindung mit Betongüte und Bemessungsverfahren großer Aufmerksamkeit bedürfen, wenn weitere Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit von Anlagen ausgeschlossen werden sollen.

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

4.5 Sensitivitätsanalyse

Die Frage der Sensitivität der Ergebnisse ist in vielen Bereichen, in denen die Prozess- oder Systemoptimierung immer wieder ein wichtiges Thema ist, von zentraler Bedeutung. Entscheidungsverantwortliche können mithilfe von Sensitivitätsanalysen die Glaubwürdigkeit ihres analytischen Modells steigern, denn sie liefern passende Antworten auf „Was-wäre-wenn“-Fragen und ermöglichen eine quantitative Bestimmung der Robustheit der optimalen Lösung gegenüber veränderten Problemparametern (Erkut und Tarimcilar, 1991). Mit der Sensitivitätsanalyse kann konkret geprüft werden, ob kleinere Verschiebungen bei den Beurteilungen zu signifikanten Veränderungen der gesamten Prioritätsrangfolge führen und wie empfindlich die Alternativen auf geänderte Prioritäten der Kriterien reagieren, die der Ebene des Hauptziels unmittelbar untergeordnet sind.

Konkret bedeutet dies, dass sich die Gesamtrangfolge der Alternativen mit Verschiebungen bei der Bewertungslogik der Analysten verändern wird, obwohl die Kriterienbewertung eindeutig „Bedeutung“ als wichtigstes Kriterium (siehe Tabelle 2) zur Klassifizierung der Fehlerursachen ergeben hat. Grundsätzlich weist jedes Kriterium ein erhebliches Maß an Sensitivität auf, die über das gesamte Gewichtungsspektrum zu einer erheblichen Modifizierung der Rangfolge der Alternativen führen kann (Erkut und Tarimcilar, 1991). Die Unempfindlichkeit der aktuellen Lösung gegenüber möglichen Verschiebungen kann in mehreren seriellen Sensitivitätsanalysen untersucht werden, bei denen jeweils Prioritätsgewichtungen (relative Wichtigkeit) der einzelnen Kriterien geändert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die in diesem Beitrag vorgeschlagene Sensitivitätsanalyse nur für die Prioritäten der drei in der Studie ausgewählten Kriterien relevant ist. Mit den vorgegebenen Fragen werden darüber hinaus verschiedene Szenarien simuliert:

- Welche Veränderungen ergeben sich, wenn alle Kriterien dieselbe Prioritätsgewichtung erhalten?
- Welche Alternative wird als beste Alternative ermittelt, wenn die Wichtigkeit eines einzelnen Kriteriums geändert wird?

Wie von Bevilacqua und Braglia (2000) empfohlen, sollen bei der Analyse des Einflusses eines geänderten Kriteriums auf die Gesamtrangfolge der Alternativen nur die „wichtigsten Auswirkungen“ berücksichtigt werden. Daher bleiben „Interaktionseffekte“ von Änderungen an den anderen beiden Gewichtungen unberücksichtigt. Diese Vereinfachung erfolgt in Anlehnung an Bevilacqua und Braglia (2000), die der Ansicht sind, dass eine Sensitivität der endgültigen Lösung vor allem gegenüber den Änderungen besteht, welche die Prioritäten auf der höchsten Hierarchieebene betreffen. Bei der Analyse wird ferner davon ausgegangen, dass der AHP als Entscheidungsverfahren Anwendung findet und das Ziel der Entscheidungsverantwortlichen lediglich die Klassifizierung der verschiedenen Alternativen ist. Daher ist hier vor allem die Sensitivität der Alternative mit dem höchsten Ranking von Interesse.

4.5.1 Zuweisung derselben Prioritätsgewichtung zu den drei Kriterien

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Sie basieren auf der Annahme, dass die drei Kriterien dieselbe relative Wichtigkeit haben und ihnen dieselbe Prioritätsgewichtung von 1/3 zugewiesen wurde. Dadurch verringert sich auch die relative Wichtigkeit des Kriteriums Bedeutung um 50 %. Es zeigt sich außerdem, dass die erheblich veränderten Gewichtungswerte des ersten Kriteriums zu einer starken Veränderung der Gesamtprioritätsgewichtungen führen und auch das endgültige Ranking mehrerer Alternativen (**FM8**, **FM10**, **FM12** und **FM13**) beeinflussen. Darüber hinaus verändert sich die ursprüngliche Rangfolge der Alternativen, sodass nun Risse im Stahlbeton sowie Bewehrungskorrosion die relevanten Fehlerursachen sind. Schließlich lässt sich auch eine Verschiebung um ca. 17 % zwischen der ursprünglichen Prioritätsgewichtung der Schadensart **FM7** (0,172) und dem aktuellen Wert 0,1422 ablesen.

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung/ Erhaltung (E)	Prioritäts- gewichte	Rang
KW	0.3333	0.3333	0.3333		
FM1	0.0579	0.0983	0.0761	0.0774	6
FM2	0.0280	0.0891	0.0368	0.0513	10
FM3	0.0414	0.0600	0.0180	0.0398	12
FM4	0.0204	0.0295	0.0231	0.0243	13
FM5	0.0102	0.0675	0.1174	0.0955	4
FM6	0.1843	0.1480	0.1414	0.1579	1
FM7	0.2041	0.1212	0.1013	0.1422	2
FM8	0.0799	0.0213	0.0541	0.0518	9
FM9	0.1235	0.0197	0.0194	0.0542	8
FM10	0.0942	0.0124	0.0151	0.0405	11
FM11	0.0314	0.0920	0.0684	0.0639	7
FM12	0.0191	0.1820	0.1536	0.1182	3
FM13	0.0144	0.0594	0.1754	0.0831	5

Tabelle 7: Szenario 1: Drei Kriterien mit derselben Prioritätsgewichtung

4.5.2 Zuweisung unterschiedlicher Prioritätsgewichtungen zu den drei Kriterien

In der nachstehenden Tabelle 8 wird das Ergebnis des nächsten Sensitivitätstests gezeigt, bei dem die ursprüngliche Prioritätsgewichtung der Bedeutung um etwa 25 % auf einen Wert von 0,4859 verringert wurde. Daraus ergibt sich für die Gesamtprioritätsgewichtungen der einzelnen Fehlerursachen eine Verschiebung von etwa 5 bis 8 % gegenüber den

ursprünglichen Werten. Wichtiger noch ist, dass der Rang verschiedener Fehlerursachen (**FM2**, **FM3**, **FM4**, **FM5** und **FM11**) von der Änderung der ursprünglichen Gewichtung unberührt bleibt. Die Fehlerursachen Risse im Stahlbeton, Schäden an den Stahlbewehrungen und bauliche Mängel in Verbindung mit Betongüte und Bemessungsverfahren sind weiterhin die Fehlerursachen, die in Bezug auf Instandsetzungsmaßnahmen zu priorisieren sind.

	Bedeutung (B)	Auftreten (A)	Entdeckung/ Erhaltung (E)	Prioritäts- gewichte	Rang
KW	0.4859	0.257	0.257		
FM1	0.0579	0.0983	0.0761	0.0729	5
FM2	0.0280	0.0891	0.0368	0.046	11
FM3	0.0414	0.0600	0.0180	0.0402	12
FM4	0.0204	0.0295	0.0231	0.0234	13
FM5	0.0102	0.0675	0.1174	0.0969	3
FM6	0.1843	0.1480	0.1414	0.1639	1
FM7	0.2041	0.1212	0.1013	0.1563	2

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

FM8	0.0799	0.0213	0.0541	0.0582	8
FM9	0.1235	0.0197	0.0194	0.070	6
FM10	0.0942	0.0124	0.0151	0.0528	10
FM11	0.0314	0.0920	0.0684	0.0564	9
FM12	0.0191	0.1820	0.1536	0.0955	4
FM13	0.0144	0.0594	0.1754	0.0674	7

Tabelle 8: Unterschiedliche Prioritätsgewichtungen der drei Kriterien

Aus der Sensitivitätsanalyse wird deutlich, dass nur erhebliche Änderungen der Gewichtungen des Kriteriums Bedeutung zu einer Verschiebung der Prioritäten der Fehlerursachen führen. Jedoch ergibt sich durch die Reduzierung der Gewichtung des Hauptkriteriums Bedeutung um 25 % ein Wechsel beim Spitzenplatz in der endgültigen Rangfolge der Alternativen. Diese Ergebnisse belegen eine inhärente Robustheit der mit dem AHP entwickelten endgültigen Prioritätsgewichtungen, selbst unter Berücksichtigung der Sensitivität der Rangfolge der Alternativen gegenüber veränderten Kriteriengewichtungen auf der zweiten Ebene der Entscheidungshierarchie.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

In diesem Beitrag wird eine Methode zum Ranking von Fehlerursachen vorgestellt. Die Methode ermöglicht die Auswahl der wichtigsten Fehlerursachen, deren Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit eines Bauwerks eine Instandsetzung besonders dringlich machen. Vor dem Hintergrund des überalterten Bauwerksbestands an den Bundeswasserstraßen und der verschiedenen auftretenden Schädigungsmechanismen erhält das Risiko eines Infrastrukturversagens zunehmende Bedeutung. Daher ist ein rationaler Entscheidungsprozess, der sich auf Kennzahlen zur Beschreibung der strukturellen Zuverlässigkeit von Bauwerken stützt, zwingend erforderlich. Von diesem profitieren auch die für die Infrastrukturerhaltung zuständigen Fachleute, die bei ihren regelmäßigen Sichtprüfungen häufig entscheiden müssen, welche Schäden die strukturelle Zuverlässigkeit der Bauwerke besonders gefährden. Methoden der Risikobewertung spielen eine wichtige Rolle in Entscheidungsfindungsprozessen, denn mit ihren Verfahren können die aktuellen Schädigungsmechanismen systematisch identifiziert, analysiert, bewertet und mögliche Folgen, bis hin zum vollständigen Versagen des Bauwerks, minimiert werden. Mithilfe des primär von Saaty (1990) entwickelten analytischen Hierarchieprozesses werden aus verschiedenen, in einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ermittelten Kriterien Prioritätsgewichtungen abge-

leitet, mit denen sich die Fehlerursachen in eine Rangfolge bringen lassen. Dabei können Unsicherheiten, die mit der Subjektivität von Expertenwissen einhergehen, ebenfalls berücksichtigt werden. Im Vergleich zu anderen traditionellen Methoden zur Lösung des MCDM-Problems gelangt die hier vorgeschlagene Methode aufgrund der Vermeidung subjektiver Einflüsse auf die Prioritätsgewichtungen nicht nur zu einer objektiveren Bewertung multi-kriterieller Entscheidungsprobleme, sondern dient gleichzeitig als Werkzeug für qualitative und quantitative Analysen der verfügbaren Daten. Die Prioritätsgewichtungen der verschiedenen, aus dem FMEA-AHP-Modell gewonnenen Fehlerursachen werden in Tabelle 8 in der folgenden Rangfolge dargestellt: **FM6 > FM7 > FM5 > FM12 > FM1 > FM9 > FM13 > FM8 > FM11 > FM10 > FM2 > FM3 > FM4**. In dieser Studie werden darüber hinaus vier wesentliche Kategorien von Fehlerursachen ermittelt (siehe Abbildung 5). Zur ersten Kategorie gehören die Fehlerursachen **FM1, FM2, FM3** und **FM4**. Sie haben eine verhältnismäßig geringe Auftretenswahrscheinlichkeit, sind einfach zu erkennen und haben, zumindest unmittelbar, keine weiteren Folgen für die strukturelle Zuverlässigkeit der Anlage. Ihre Langzeitfolgen können sich dennoch negativ auf die Dauerhaftigkeit einer Anlage auswirken.

In der zweiten Kategorie befinden sich die Fehlerursachen mit einer sehr hohen Auftretenswahrscheinlichkeit, die wahrscheinlich einfach zu entdecken sind und schwerwiegende und inakzeptable Folgen für die strukturelle Zuverlässigkeit der Anlage haben können. Zu dieser Kategorie gehören die Fehlerursachen FM5, FM6 und FM7. Da sie die Tragfähigkeit des Bauwerks gefährden und dringend Maßnahmen bedürfen, stellen sie die größten Anforderungen an die entsprechenden Fachleute für Instandsetzungsmaßnahmen. Die dritte Kategorie umfasst lediglich die Fehlerursachen FM8, FM9 und FM10 mit einer sehr geringen Auftretenswahrscheinlichkeit. Diese sind häufig nur sehr schwer zu entdecken und haben nachteilige Auswirkungen auf die strukturelle Zuverlässigkeit des Systems. Die Fehlerursachen der vierten Kategorie, FM11, FM12 und FM13, haben eine sehr hohe Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit und relativ geringfügige Folgen.

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

Ihre Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit der Infrastruktur sind wahrscheinlich eher langfristiger Art. Betrachtet man die Kategorien unter dem Aspekt des Zusammenwirkens verschiedener Fehlerursachen, so ist herauszustellen, dass die kombinierten Langzeitfolgen der Fehlerursachen aus der ersten

und vierten Kategorie unweigerlich zum Verlust der strukturellen Zuverlässigkeit der Infrastruktur führen können. So können beispielsweise Horizontal- oder Vertikalabdichtungen in einer bereits durch Konstruktionsmängel geschwächten Anlage zu übermäßigen Verformungen/Setzungsdifferenzen führen.

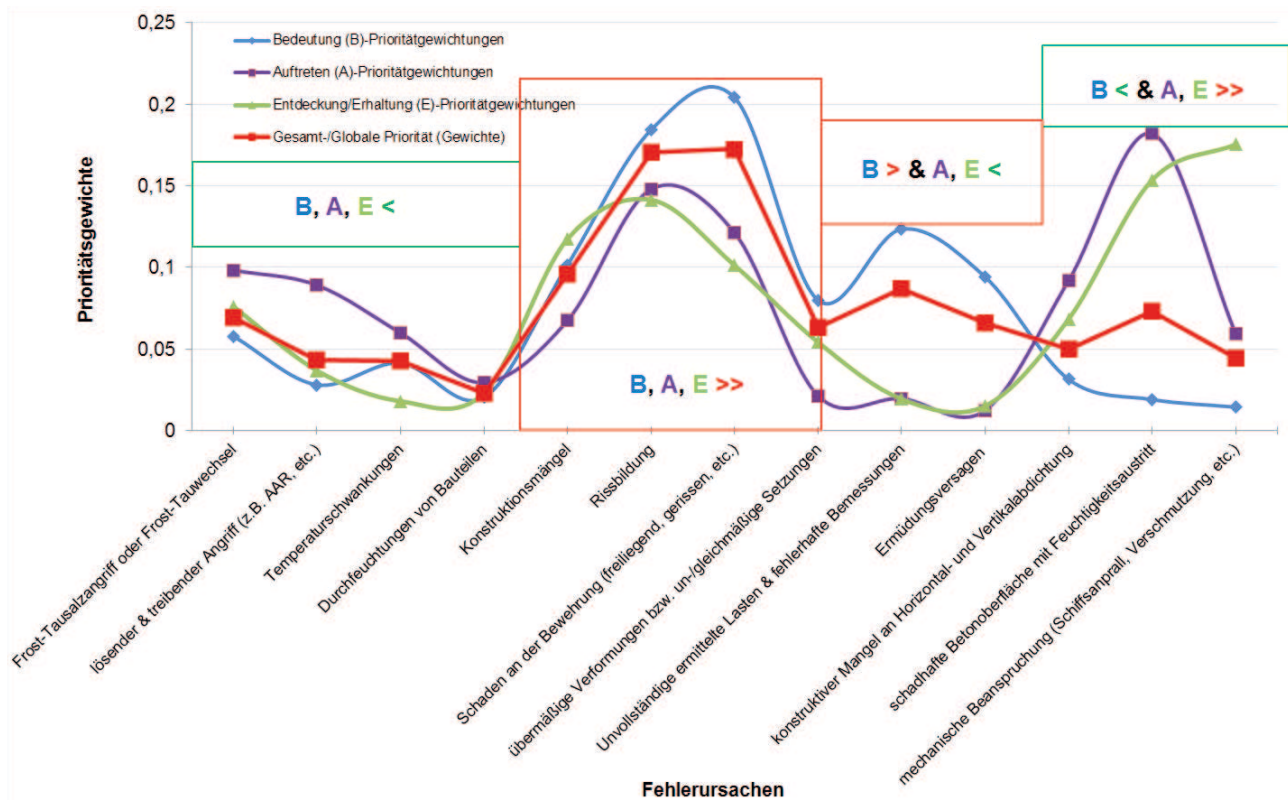


Abbildung 5: Berechnung von Prioritätsgewichten verschiedener Fehlerursachen

Der hier vorgestellte Ansatz weist einige Beschränkungen auf, die erwähnt werden müssen. So ist der Ansatz weitgehend von Expertenwissen und Schadensdaten abhängig, was zu beträchtlichen Unsicherheiten führt. Darüber hinaus gilt die AHP-Methode aufgrund der hohen Zahl der für ihre Ausführung erforderlichen Clustermatrizen als zeitaufwändig und somit teuer. Mit dem Ansatz wird jedoch versucht, eine Lücke zu schließen, die sich in der Praxis immer wieder zeigt: Der strukturierte Analyserahmen kann zur Klassifizierung und Auswahl verschiedener Fehlerursachen im Hinblick auf nötige Instandsetzungsmaßnahmen dienen. Darüber hinaus wird dieses Auswahlmodell verwendet, um das Entscheidungsfindungsprozess zu strukturieren. Das auf dem analytischen Hierarchieprozess basierende alternative Risikobewertungsmodell ist ein Hilfsmittel zur Priorisierung der Risikoprioritätszahl (RPZ) für jede bewertete Schadensart und ermöglicht die Identifizierung der kritischsten Fehlerursachen im System. Dieser Aspekt kann letztlich als Unterstützung von Investitionsentscheidungen im Hinblick auf die Verbesserung der Zuverlässigkeit

des gesamten Systems dienen. Die hier ermittelten Ergebnisse zeigen generell, dass die Bedeutung möglicher Fehlerfolgen das wichtigste Kriterium zur Identifizierung des Schadens mit dem höchsten Risiko und damit dem dringendsten Instandsetzungsbedarf ist.

Um die sprachliche Unschärfe bei der Entwicklung unserer Vergleichsmatrizen zur Ableitung präziser Prioritätsgewichtungen vollständig erfassen zu können, kann in zukünftigen Studien ein Fuzzy-AHP verwendet werden. Zusätzlich kann die Technik TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) zur Bewertung und Klassifizierung verschiedener Fehlerursachen eingesetzt werden. Zukünftige Arbeiten könnten sich auf die Entwicklung qualitativer und quantitativer Ansätze konzentrieren und zur Untersuchung des Versagensrisikos einer Infrastrukturanlage auch Methoden des Multi-Criteria Decision Making (MCDM) verwenden (Schmidt-Bäumler, 2017). Ein erster Schritt könnte der von Bowles & Peláez (1995) in ihrer Studie vorgeschlagene Fuzzy-Logik-Ansatz sein, mit

Strategie zur Auswahl von Fehlerursachen für Reparatur- und Instandsetzungsarbeiten

dem sich auch unklar, mehrdeutige, qualitative oder unpräzise Informationen für die Priorisierung von Fehlerursachen im Hinblick auf Korrekturmaßnahmen verarbeiten lassen. Mit den Ergebnissen solcher Forschungsprojekte können Aussagekraft und Schlüssigkeit der aktuellen Zustandsnoten optimiert und die Entscheidungsfindung zur Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen verbessert werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiierte BMVI-Expertennetzwerk für die Finanzierung und Unterstützung dieser Arbeit.

6. Literatur

- Bertolini, M., Bevilacqua, M., Braglia, M., and M., Frosolini. (2004). An analytical method for maintenance outsourcing service selection. *International Journal of Quality & Reliability* 21 (7): 772 – 788.
- Bevilacqua, M., and M., Braglia. (2000). the analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety* 70: 71 – 83.
- Bhushan, N., and K., Rai. (2004). Strategic Decision making: Applying the analytic hierarchy process. Springer, Berlin, 11 – 21.
- Bowles, J. B. (2004). An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. *Journal of the IEST* 47: 51 – 56.
- Bowles, J. B. & Peláez, E. C. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety* 50 (2): 203 – 213.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). 2009. VV-WSV 2101-Bauwerksinspektion, Einführungslerlass: WS 13/5257.15/4 vom 27.02.2009.
- Erkut, E. and M. Tarimcilar. (1991). On sensitivity analysis in the analytic hierarchy process. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry* 3: 61 – 83.
- Forman, E. and K. Peniwati. 1998 untersucht. Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 108 (1): 165 – 169.
- Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability* 10 (5): 16 – 23.
- Lui, H. C., You, J. X., Ding, X. F., & Su, Q. (2015). Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. *International Journal of Quality & Reliability* 32 (7): 763 – 782.
- Panenka, A., Nyobeu, F. (2018b). Condition assessment based on results of qualitative risk analyses. Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering of the International Association for Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE), Ghent, 28 -31 October 2018; not yet published
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process - What is it and how it is used. *Mathl Modelling* 9 (3-5): 161 – 176.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48 (1990): 9 – 26.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences* 1(1): 83 – 98.
- Schmidt-Bäumler, H. (2017). Risk-based maintenance management system for waterway infrastructures in Germany. In Bakker, J. et al. (ed.) *Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure*: 559 – 566. London: Taylor & Francis Group
- Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications* 36 (2009): 1195 – 1207.