

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Nyobeu Fangué, François Marie; Panenka, Andreas
Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen.
FuE-Abschlussbericht B3951.04.04.70003

BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107687>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2021): Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen. FuE-Abschlussbericht B3951.04.04.70003. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln).

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
Tragfähigkeitskennzahlen für
bestehende Konstruktionen
B3951.04.04.70003



Juli 2021



Zusammenfassung

Die Bauwerke an den Bundeswasserstraßen werden aufgrund ihrer Bedeutung für die Verkehrsinfrastruktur kontinuierlich überwacht und bei Bedarf instandgesetzt, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten. Aus den Inspektionsergebnissen werden Zustandsnoten abgeleitet, die zur Priorisierung von Erhaltungsmaßnahmen dienen. Aufgrund der Vielzahl der Bauwerke in einem ungenügenden Zustand stößt das derzeitige Vorgehen an seine Grenzen. Ziel des FuE-Projektes „Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen“ ist daher die Entwicklung eines Konzeptes für eine Zustandsbenotung, die explizit einen Bezug zur Tragfähigkeit als Schlüsselindikator für die Sicherheit der Bauwerke herstellt und dadurch die Aussagekraft der derzeitigen Zustandsbewertung erhöht.

Das entwickelte Konzept basiert auf dem systematischen Ansatz zur Analyse komplexer Systeme, den eine Fehlermöglichkeiten- und Ausfallanalyse (FMEA) bietet. Das Ziel der FMEA ist in diesem Fall die Bildung eines Modells der Wirkzusammenhänge, die zu einem Verfehlen der Anforderungen, die an die Funktionen des Bauwerks gestellt werden, führen. Für die Modellbildung wird in einer Strukturanalyse das Bauwerk in seine Komponenten zerlegt und in einer Funktionsanalyse deren Beitrag für das anforderungsgerechte Funktionieren des Bauwerks beschrieben. In der Fehleranalyse werden durch die Auswertung der zur Verfügung stehenden Datengrundlage schließlich die Ursache-Wirkungsketten (UWK) erstellt. Die Ursache-Wirkungsketten stellen ein unabhängiges Kategoriensystem dar, durch das sich die Inspektionsergebnisse anforderungsspezifisch sortieren und auswerten lassen. Für die abschließende Bewertung des Risikos, dass die Nachweisbarkeit einer Anforderung aufgrund der vorhandenen Schäden gefährdet sein könnte, werden für die im Rahmen des Forschungsprojektes berücksichtigten Bauwerkstypen die Fehlerfolge auf die Nachweisführung bewertet, die Häufigkeit von Fehlern ausgewertet und die Effektivität durchgeführter Erhaltungsmaßnahmen bestimmt. Aus den drei Bewertungskriterien wird die Risikoprioritätszahl berechnet, die als Kenngröße der Ursache-Wirkungsketten dient.

Durch diese zusätzliche Information lässt sich die Zustandsbewertung der Bauwerke näher charakterisieren und vergleichen. Andererseits stellt die Risikoprioritätszahl eine zusätzliche, sowohl anforderungs- als auch bauwerksspezifische Kenngröße dar, die eine differenzierte Betrachtung der mit Schäden verbundenen Risiken für die Nachweisbarkeit der an das Bauwerk gestellten Anforderungen erlaubt.

Zur Erfassung der Unsicherheit in den Risikobewertungen kommt das Konzept der Fuzzy-Mengen-Theorie (FST) zum Einsatz. Die semantische Bedeutung einer Bewertung findet Ausdruck in linguistischen Variablen, die die Werteskalen der Bewertungskriterien anhand von linguistischen Begriffsreihen beschreibt, (z. B. „gut – mittel – schlecht“). Da sie am ehesten dem menschlichen Naturell für die Beschreibung von Risiken entspricht, kommen linguistische Variablen der Interpretation von Risikobewertungen und deren Kommunikation gegenüber Dritten zu Gute.

Mehrere Pilotstudien zeigen die Anwendbarkeit des Bewertungskonzeptes und den Mehrwert für die zustandsbedingte Reihung von Bauwerken.

Dieses FuE-Vorhaben wurde im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks, das 2016 durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde, erarbeitet.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	1
1.1	Aufgabendarstellung und Ziel	1
1.2	Gliederung der Arbeit	3
2	Sachstand	4
2.1	Schadensbewertung für Bauwerke an Bundeswasserstraßen	4
2.2	Bewertung der Sicherheit von bestehenden Konstruktionen	8
2.2.1	Quantitative Verfahren	9
2.2.2	Qualitative Verfahren	10
3	Konzept für die tragfähigkeitsbezogene Bewertung	12
3.1	Grundlagen	12
3.2	Problemverständnis	13
3.2.1	Detaillierungsgrad	13
3.2.2	Systemverhalten	13
3.2.3	Eingangsgrößen	13
3.3	Datensammlung und Datenanalyse	14
3.3.1	Datensammlung	14
3.3.2	Datenanalyse	14
3.3.3	Modellbildung	15
3.3.3.1	Grundlagen	15
3.3.3.2	Strukturanalyse	18
3.3.3.3	Funktionsanalyse	18
3.3.3.4	Feheranalyse	22
3.4	Bewertung	23
3.4.1	Tragfähigkeitsbezogene Zustandsnoten	23
3.4.1.1	Vorgehensweise	23
3.4.1.2	Beispiel: Spezifische Zustandsnote eines Wehrverschlusses	25
3.4.2	Risikobewertung tragfähigkeitsrelevanter Fehlerursachen	26
3.4.2.1	Grundlagen	26
3.4.2.2	Bewertungskriterien	27
3.4.2.3	Risikoprioritätszahl (RPZ)	34
3.4.2.4	Risikoprofile	35
3.4.2.5	Beispiel: Risikobewertung mittels RPZ	36
4	RPZ-Berechnung anhand der Fuzzy-Logik	39
4.1	Kritik an der klassischen RPZ	39
4.2	Fuzzy-Logik in Entscheidungssituationen	39
4.3	Berechnen einer Ergebnisgröße mittels Fuzzy-Logik	41
4.3.1	Überblick	41

4.3.2	Fuzzifizierung	42
4.3.2.1	Erläuterung	42
4.3.2.2	Fuzzy-Mengen-Partitionierung	42
4.3.2.3	Anwendung auf die Bewertungskriterien einer FMEA	43
4.3.3	Fuzzy-Inferenzverfahren	46
4.3.3.1	Allgemeines	46
4.3.3.2	Regelbasis	46
4.3.3.3	Implikation	49
4.3.3.4	Akkumulation der Zugehörigkeitsgrade der Fuzzy-Ergebnisgrößen	49
4.3.4	Defuzzifizierung	51
4.3.4.1	Allgemeines	51
4.3.4.2	Fuzzy-Ergebnisgrößen	51
4.3.4.3	Berechnung eines numerischen Wertes	52
4.4	Erläuterndes Beispiel	53
4.4.1	Berechnung der Fuzzy RPZ	53
5	Pilotstudien	56
5.1	Modifizierte Zustandsnote	56
5.1.1	Stahlwasserbau	56
5.1.2	Massivbau	57
5.2	Risikobasierte Zustandsbewertung mittels RPZ und Risikoprofilen	59
5.3	Vergleich mehrerer Anlagen mittels erweiterter Zustandsbewertung	63
6	Fazit	65

Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Zustands- und Teilnoten für Schleusen- und Wehranlagen (Stand 2016)	2
Bild 2: Zuordnung der Objektteilkategorien zu den Teilnoten	6
Bild 3: Definition der Zustandsnotenbereiche (Bundesanstalt für Wasserbau 2018)	7
Bild 4: Ermittlung des notwendigen Investitionsbedarfs	8
Bild 5: Quantitative und qualitative Analyseverfahren (Mehdianpour et al. 2004)	9
Bild 6: Vorgehen zur Bewertung bestehender Bauwerke (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020)	12
Bild 7: Darstellung des strukturierten Ablaufs einer FMEA	17
Bild 8: Schema zur Ermittlung der anforderungsspezifischen Zustandsnote	24
Bild 9: Systematik einer Risikobewertung mittels FMEA	27
Bild 10: Ergebnisse der FEM-Analyse einer Wehrwalze	30
Bild 11: Verteilung der Häufigkeit der Fehlerursachen je Bewegungsart des Verschlusstyps	31
Bild 12: Verteilung der Häufigkeit der Fehlerursachen je Konstruktionstyp	32
Bild 13: Risikoprofil der stahlwasserbaulichen Anlagenteile einer Wehranlage	36
Bild 14: Übersicht zu den Begriffen der Fuzzy-Logik	41
Bild 15: Bausteine der Ermittlung einer Ergebnisgröße mit Hilfe von Fuzzy-Logik	42
Bild 16: Darstellung der Fuzzifizierung der Eingangsgröße B	43
Bild 17: Darstellung der Fuzzifizierung der Eingangsgröße A	44
Bild 18: Darstellung der Fuzzifizierung der Eingangsgröße E	45
Bild 19: Darstellung der Fuzzifizierung der Ergebnismenge RPZ	46
Bild 20: Wirkung der Mamdani-Implikation auf die Ergebnisgröße	49
Bild 21: Berechnung des resultierenden Erfüllungsgrads einer Ergebnismenge	50
Bild 22: Akkumulation der Fuzzy-Ergebnismengen	51
Bild 23: Linguistische Interpretation einer Fuzzy-Ergebnisgröße	51
Bild 24: Defuzzifizierung einer Ergebnisgröße R mit WMoM	52
Bild 25: Berechnung der RPZ mittels des entwickelten Fuzzy-Verfahrens	55
Bild 26: RPZ in Abhängigkeit des E-Kriteriums	60
Bild 27: Risikobewertung verschiedener Verschlusstypen	61
Bild 28: Risikobewertung verschiedener Bauwerkstypen	62
Bild 29: Risikoprofile der betrachteten Schleusen	64

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Beispielhafte Merkmale zur Charakterisierung eines Schadens	15
Tabelle 2: Begriffsdefinitionen in einer FMEA	18
Tabelle 3: Kausale Zusammenhänge der OTK Stahlbau	20
Tabelle 4: Kausale Zusammenhänge der OTK Konstruktion	21
Tabelle 5: Schäden am Wehrverschluss in Feld 2 der Wehranlage Neckarsulm	25
Tabelle 6: Wertebereiche für die Bewertungsskala des B-Kriteriums.	28
Tabelle 7: Bewertung des Kriteriums „Bedeutung“ für den Stahlbau	29
Tabelle 8: Bewertung des Kriteriums „Bedeutung“ für die Konstruktion	29
Tabelle 9: Wertebereiche für die Bewertungsskala des A-Kriteriums.	31
Tabelle 10: Wertebereiche für die Bewertungsskala des E-Kriteriums.	34
Tabelle 11: Schäden am Wehrverschluss der Wehranlage Wieblingen, Feld 1	37
Tabelle 12: Risikobewertung der Wehrwalze in Feld 1 der Wehranlage Wieblingen	38
Tabelle 13: Zugehörigkeitsfunktionen des Bewertungskriteriums B	43
Tabelle 14: Zugehörigkeitsfunktionen des Bewertungskriteriums A	44
Tabelle 15: Zugehörigkeitsfunktionen des Bewertungskriteriums E	45
Tabelle 16: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Ergebnismenge RPZ	46
Tabelle 17: Regelsatz des verwendeten Fuzzy-Inferenzverfahrens	48
Tabelle 18: Regelsatz zur Ermittlung der aktivierten Ausgangsmengen für UWK T.2	53
Tabelle 19: Modifizierte Zustandsnote und Reihung	56
Tabelle 20: Modifizierte Zustandsnoten von massiven Schleusen	58
Tabelle 21: Zustandsbewertung der untersuchten Schleusen	63

Wichtige Formelzeichen und Variablen

A	Auftretenswahrscheinlichkeit einer Fehlerursache
B	Bedeutung einer Fehlerfolge
D	Dauerhaftigkeit
DoF _i	Erfüllungsgrad (engl.: <i>Degree of Fulfilment</i>)
E	Entdeckungswahrscheinlichkeit einer Fehlerursache bzw. Erhaltung
G	Gebrauchstauglichkeit
m	Anzahl der Schäden innerhalb einer Objektteilkategorie
n	Anzahl der geschädigten Objektteilkategorien
OTK	Objektteilkategorie
RPZ	Risikoprioritätszahl
RPZ _{UWK,Fehler,i}	RPZ der i-ten UWK, die diesen Fehler betrifft
R _{WMoM}	Ergebniswerte nach der Defuzzifizierung
SK	Schadensklasse
T	Tragfähigkeit
UWK	Ursache-Wirkungskette
X	Grundmenge bzw. Grundbereich von Elementen bzw. Objekten
x	Element einer Grundmenge
Z _{Bauwerk}	Allgemeine Zustandsnote des Bauwerks über alle Objektteilkategorien
Z _{Teil}	Teilnote
Z ₁	Schadensklasse eines erfassten Schadens
Z ₂	modifizierte Schadensklasse unter Berücksichtigung des Schadensausmaßes
Z ₃	modifizierte Schadensklasse unter Berücksichtigung des Schadensausmaßes
Z _{3,OTK}	Zustandsnote der jeweiligen Objektteilkategorien (OTK)
Z _{3,UWK}	Zustandsnote einzelner UWK
Z _{Bauwerk}	allgemeine Zustandsnote des Bauwerks über alle OTK
ΔZ ₁	Beiwert für das Schadensausmaß in Abhängigkeit vom Schadensmerkmal „Menge“
ΔZ ₂	Beiwert für die Anzahl m der Schäden innerhalb einer Objektteilkategorie
ΔZ ₃	Beiwert für die Anzahl n der geschädigten Objektteilkategorien
β	Zuverlässigkeitsindex
μ(x)	Zugehörigkeitsgrad des Elements x
μ ^A (x).	Zugehörigkeitsgrad des Elements x zu der unscharfen Menge A

1 Einleitung

1.1 Aufgabendarstellung und Ziel

Die Bundeswasserstraßen sind neben den Straßen und den Schienen einer der Hauptverkehrsträger in Deutschland. Aufgrund ihrer Bedeutung für den Warenverkehr werden die Bauwerke an den Bundeswasserstraßen kontinuierlich überwacht und bei Bedarf instandgesetzt, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten. Der Bedarf für eine Instandsetzung wird von den dafür verantwortlichen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) maßgeblich aus einer Zustandsbewertung abgeleitet. Anhand des Ausmaßes der Schäden, die bei den in regelmäßigen Abständen durchgeführten Bauwerksinspektionen festgestellt werden, wird die Zustandsnote des Bauwerks ermittelt. Die Zustandsnote dient als das Maß für die allgemeine Dringlichkeit von Instandhaltungsmaßnahmen am jeweiligen Bauwerk. Die Ermittlung der Zustandsnote basiert auf einem leitfadengestützten, regelbasierten Indexsystem, das anhand verschiedener Merkmale der erfassten Schäden die Bewertung mit einem von vier Notenbereichen festlegt (Bundesanstalt für Wasserbau 2015). Die Systematik der Zustandsbenotung hat sich im Rahmen des Instandhaltungsmanagements einzelner Bauwerke als effiziente Entscheidungshilfe bei der Erfassung des Instandsetzungsbedarfs und der Planung entsprechender Maßnahmen bewährt. Bei der Entwicklung bauwerksübergreifender und übergeordneter Investitionsstrategien stößt die Aussagekraft des derzeitigen Benotungssystems aus verschiedenen Gründen an ihre Grenzen. Aufgrund der Gleichstellung von Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs ist für die verantwortlichen Personen bei der Planung von Instandsetzungsmaßnahmen an einzelnen Bauwerken eine Unterscheidung der Auswirkungen von Schäden in dieser Hinsicht nicht relevant. Bei der Schadenskategorisierung wird dementsprechend auf eine Unterscheidung nach den normativen Anforderungen bezüglich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit verzichtet. Obwohl die Abwägung hinsichtlich tragfähigkeitsbezogener Belange von den mit der Bauwerksprüfung betrauten Personen bei der Schadensbewertung verlangt wird und somit implizit bereits Teil davon ist, geht sie derzeit nicht als eigenständiges Ergebnis aus der Zustandsbenotung hervor. Die Information über den Einfluss der Schäden auf die Tragfähigkeit der Bauwerke steht daher als Kriterium für eine Reihung und ggf. Priorisierung von bauwerksübergreifenden Instandsetzungsmaßnahmen nicht zur Verfügung. Außerdem werden derzeit lediglich vier Notenbereiche für die Benotung bereitgestellt. Die geringe Auflösung der Benotungsskala führt zu einer Häufung von Bauwerken in den einzelnen Notenbereichen. Bild 1 zeigt die Verteilung der Zustandsnoten der Schleusen- und Wehranlagen auf Ebene der Gesamtanlagen sowie für die Teilnoten Stahlbau und Konstruktion (Stand 2016). Beispielsweise befinden sich 196 Wehr- und Schleusenanlagen im Notenbereich „ungenügend“, der einen dringenden Handlungsbedarf anzeigt. Bei der großen Anzahl an Bauwerken, für die die WSV verantwortlich ist, liefert eine solch grobe Unterteilung lediglich einen ersten Überblick über den allgemeinen Zustand des Bauwerkssportfolios, um daran beispielsweise eine überschlägige Ermittlung von vorrangigen Bauwerken durchzuführen.

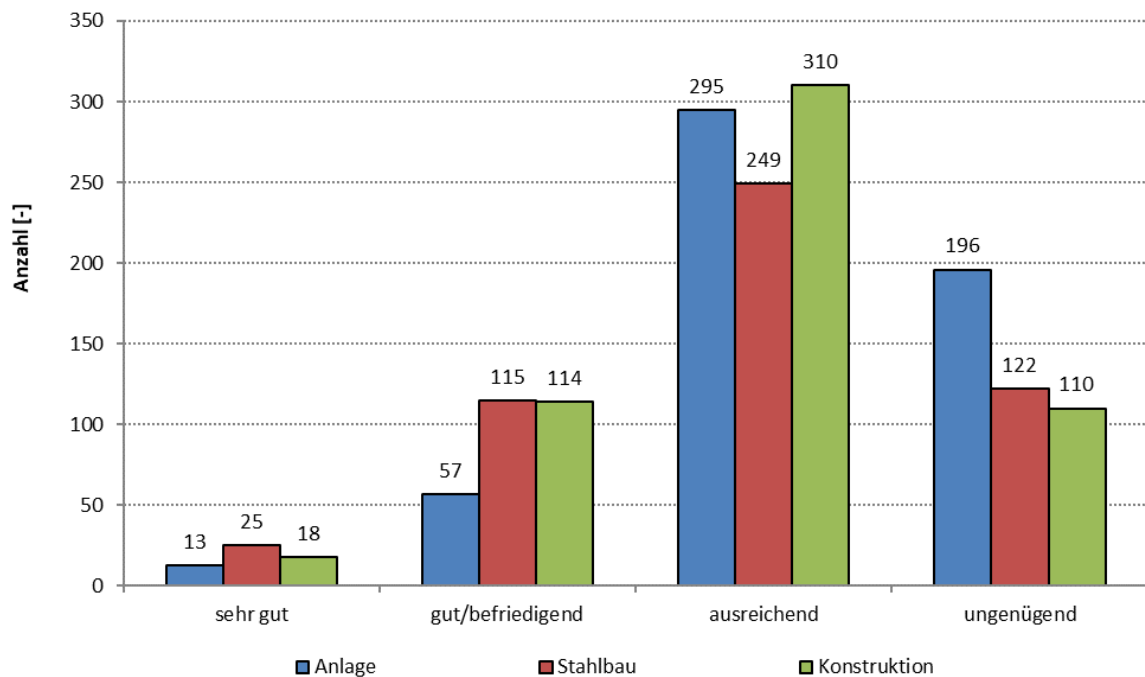


Bild 1: Zustands- und Teilnoten für Schleusen- und Wehranlagen (Stand 2016)

Aufgrund dieser eingeschränkten Aussagekraft des derzeitigen Bewertungssystems ist das Ziel des FuE-Projektes „Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen“ die Entwicklung eines Konzeptes zur expliziten Berücksichtigung tragfähigkeitsbezogener Informationen in der Zustandsbewertung und der Nachweis dessen Anwendbarkeit anhand von Beispielen. In diesem Zusammenhang wird die Tragfähigkeit als Schlüsselindikator für die Sicherheit eines Bauwerks angesehen. Darüber hinaus soll ein Werkzeug entwickelt werden, das es Akteuren in der Praxis ermöglicht, den Einfluss von Schädigungen auf die grundlegenden Anforderungen einfach und realitätsnah zu ermitteln. Dadurch kann ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung der Aussagefähigkeit der bisherigen Zustandsbenotung geleistet werden. Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass eine Bestandsstatik für das Bauwerk vorliegt, die belegt, dass das Bauwerk im Hinblick auf seine Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit den aktuellen, in Regelwerken verankerten Anforderungen rechnerisch genügt. Im Fokus des Konzeptes steht die Nachweisbarkeit der Sicherheit eines Bauwerks und inwieweit die Nachweisbarkeit durch eventuell vorhandene Schäden gefährdet werden könnte. Mithilfe tragfähigkeitsbezogener Kenngrößen wird die bestehende Zustandsbenotung ergänzt und Auskunft über die substanziellen Defizite der jeweiligen Bauwerke gegeben. Ein auf diese Weise erweitertes Erhaltungsmanagement ermöglicht eine differenziertere Zustandsbenotung und vereinfacht dadurch den Entscheidungsprozess in der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen einer großen Anzahl von Bauwerken unterschiedlicher Art.

Dieses FuE-Vorhaben wurde im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks, das 2016 aus einer verkehrsträgerübergreifenden Zusammenarbeit von sieben Behörden des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) initiiert wurde, erarbeitet.

1.2 Gliederung der Arbeit

Kapitel 1 beinhaltet eine kurze Einführung in die Problemstellung und beschreibt die Zielsetzung sowie den Aufbau der Arbeit.

Kapitel 2 zeigt, wie Schäden im Rahmen der Bauwerksprüfung erfasst und bewertet werden. Die wesentlichen Schritte zur Ermittlung der Teilnoten und der Zustandsnote werden herausgestellt. Ferner erfolgt eine Beschreibung quantitativer und qualitativer Methoden zur Beurteilung der Sicherheit von Ingenieurbauwerken.

In Kapitel 3 wird zunächst das Problem detaillierter analysiert. In der Folge werden die Inspektionsergebnisse als Eingangsgröße hinsichtlich ihrer Struktur und Qualität bewertet. Basierend auf der FMEA-Methodik werden im Anschluss an ihre Beschreibung kausale Wirkzusammenhänge zwischen den Bauwerksschäden aus der Datenbasis und normativen Anforderungen an das Bauwerk entwickelt. Die so entstehenden Ursache-Wirkungsketten (UWK) ermöglichen eine Sortierung von Schäden im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die normativen Anforderungen an das Bauwerk (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit).

Damit das Risikopotenzial einzelner UWKs abgeschätzt werden kann, wird in Kapitel 4 die Risikoprioritätszahl (RPZ) mittels zuvor festgelegter Bewertungskriterien quantifiziert. Nach einem Überblick über das Konzept der Fuzzy-Logik wird in einem weiteren Schritt die Methodik zur Erhöhung der Aussagefähigkeit der RPZ einer exemplarischen Anwendung unterzogen.

Anschließend wird in Kapitel 5 die Anwendbarkeit des Gesamtkonzeptes anhand repräsentativer Beispiele untersucht.

In Kapitel 6 werden die vorgestellten Untersuchungen und die entwickelten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und ein Ausblick auf potentielle Erweiterungen des bisher entwickelten Konzeptes gegeben.

2 Sachstand

2.1 Schadensbewertung für Bauwerke an Bundeswasserstraßen

Wasserbauwerke wurden und werden mehrheitlich für eine sehr lange Nutzungsdauer von aktuell bis zu 100 Jahren ausgelegt (DIN 19702:2013-02). Rund die Hälfte der Bauwerke an den Bundeswasserstraßen weist bereits ein Alter von mehr als 80 Jahren auf. Schädigungen und Verfallsprozesse, die die Verlässlichkeit der Bauwerke reduzieren, häufen sich mit zunehmendem Alter und treten in der Folge auch deutlicher zu Tage. Infolgedessen nehmen die Anzahl und der Umfang der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen zu.

Von Beginn an müssen alle Bauwerke und Konstruktionen der Inspektionskategorie A an den Bundeswasserstraßen in einem Intervall von 6 Jahren einer ausführlichen Bauwerksprüfung und jeweils dazwischen im Abstand von 3 Jahren einer eingehenden Bauwerksüberwachung unterzogen werden (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2010). Zur Inspektionskategorie A gehören solche Bauwerke, die aufgrund ihrer Komplexität eine Inspektion durch sachkundiges Ingenieurpersonal erfordern.

Im Rahmen der Bauwerksprüfung findet eine handnahe Sichtprüfung aller Bauwerksteile durch einen sachkundigen Ingenieur statt. Um über die Dringlichkeit einer Instandsetzung urteilen zu können, wird jeder Schaden anhand eines leitfadengestützten, regelbasierten Verfahrens beschrieben und bewertet. Dabei werden überwiegend die an einzelnen Bauteilen gemachten Befunde katalogbasierten Schadensbeispielen zugeordnet. Die Beschreibung und die Bewertung der Schäden beruhen hauptsächlich auf visueller Wahrnehmung. Quantifizierbare Untersuchungen (z. B. durch zerstörungsfreie Prüfungen oder Messungen) werden nur bei Bedarf durchgeführt. Zur Charakterisierung der Schäden dienen qualitative Merkmale wie beispielsweise die Schadensgruppe und die Schadensart. Zur Bewertung des Schadens steht eine von vier Schadensklassen (SK) zur Verfügung. Je höher die Schadensklasse festgelegt wird, desto dringender sind diesbezüglich Instandsetzungsmaßnahmen anzugehen. Während davon ausgegangen wird, dass Schäden in SK 1 keinen Einfluss auf die normativen Anforderungen an das Bauwerk haben, werden Schäden mit SK 4 als Gefahr für die Tragfähigkeit und/oder die Gebrauchstauglichkeit angesehen (Bundesanstalt für Wasserbau 2015). Mithilfe des Programmsystems WSVPruf werden die erfassten Schäden systematisch dokumentiert (Bundesanstalt für Wasserbau 2010). Die Datenbank umfasst sämtliche Schäden, die seit der Inbetriebnahme des Programmsystems im Jahr 2006 erfasst worden sind. Die gesammelten Datensätze dienen als Grundlage für dieses Forschungsprojekt. Bei der Auswertung der Inspektionsergebnisse innerhalb des Projektes ist zu beachten, dass die verwendeten Daten aus dem Programmsystem WSVPruf im Jahr 2016 zusammengestellt wurden. Dementsprechend wurden für die Datenauswertung ausschließlich die in der Periode von 2006 bis 2016 entworfenen und geltenden Vorschriften und BAW-Merkblätter berücksichtigt.

Auf Grundlage der einzelnen Schadensbewertungen wird programmintern die Zustandsnote des Bauwerks Z_{Bauwerk} mit den Gleichungen (1) bis (5) ermittelt.

$$Z_1 = SK_{Schaden} \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_1 + \Delta Z_1 \quad (2)$$

$$Z_{3,OTK} = \max(Z_1 + \Delta Z_1) + \Delta Z_2 = \max Z_2 + \Delta Z_2 \quad (3)$$

$$Z_{Teil} = \max Z_{3,OTK} \quad (4)$$

$$Z_{Bauwerk} = \max[\max(Z_1 + \Delta Z_1) + \Delta Z_2] + \Delta Z_3 = \max Z_{3,OTK} + \Delta Z_3 \quad (5)$$

mit:

$$1 \leq Z_i, SK \leq 4$$

SK	Schadensklasse
Z ₁	SK eines erfassten Schadens
Z ₂	modifizierte SK unter Berücksichtigung des Schadensausmaßes
Z _{3,OTK}	Zustandsnote der jeweiligen Objektteilkategorien (OTK)
Z _{Teil}	Teilnote
Z _{Bauwerk}	allgemeine Zustandsnote des Bauwerks über alle OTK

ΔZ ₁	Beiwert für das Schadensausmaß in Abhängigkeit vom Schadensmerkmal „Menge“:
	klein, gering o. ä. ΔZ ₁ = -0,1
	groß, häufig o. ä. ΔZ ₁ = +0,1
	für alle anderen ΔZ ₁ = 0,0

ΔZ ₂	Beiwert für die Anzahl m der Schäden innerhalb einer Objektteilkategorie:
	m < 3 ΔZ ₂ = -0,1
	3 ≤ m ≤ 5 ΔZ ₂ = 0,0
	m > 5 ΔZ ₂ = +0,1

ΔZ ₃	Beiwert für die Anzahl n der geschädigten Objektteilkategorien:
	n < 4 ΔZ ₃ = -0,1
	5 ≤ n ≤ 8 ΔZ ₃ = 0,0
	n > 8 ΔZ ₃ = +0,1

Basis des Algorithmus ist die vom Prüfer vergebene Schadensklasse, die als Bewertung Z₁ in die Berechnung eingeht. Der vom Prüfer zwingend zu vergebende Begriff zum Schadensausmaß wird in einen Beiwert ΔZ₁ umgewandelt. In der Folge gibt es für jeden Schaden eine modifizierte Schadensnote Z₂. Die Schäden werden anschließend dem betroffenen Objektteil einer von elf Objektteilkategorien (OTK) zugeordnet. Die Objektteilkategorien sind wiederum fünf Teilnotenkategorien zugeordnet. In Bild 2 sind die Zusammenhänge veranschaulicht.

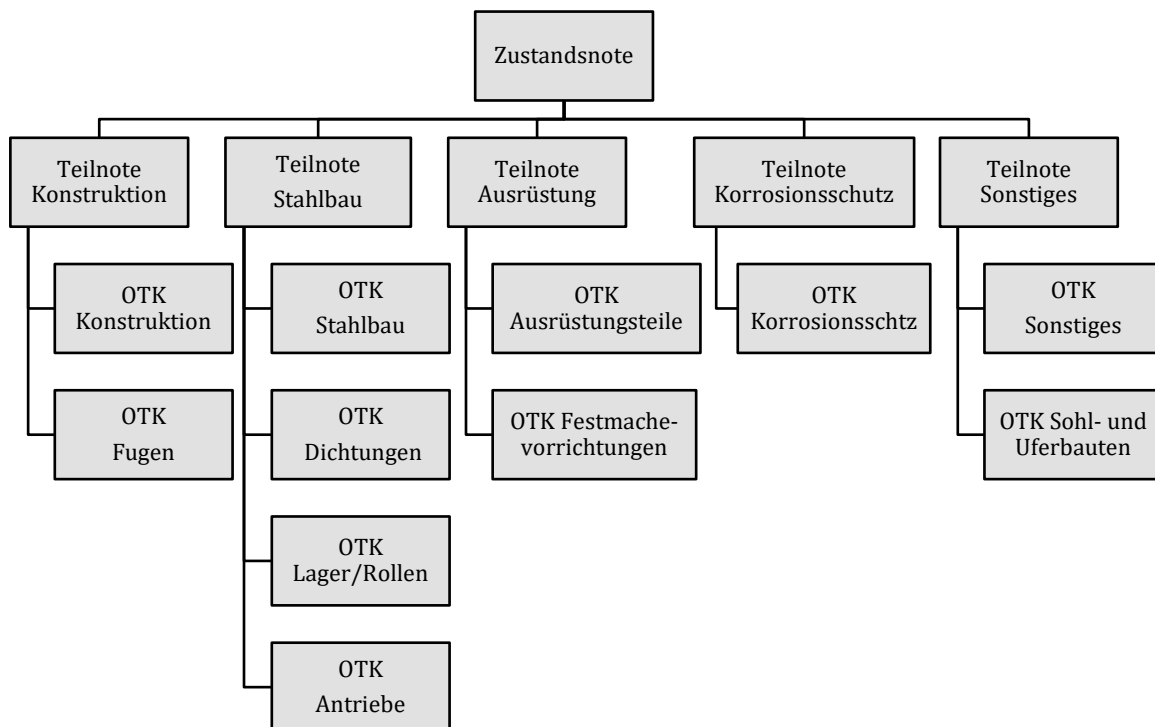


Bild 2: Zuordnung der Objektteilkategorien zu den Teilnoten

Für jede OTK wird zunächst mithilfe der modifizierten Schadensnote Z_2 und eines weiteren Beiwerts, der die Anzahl der Schäden in der OTK berücksichtigt (ΔZ_2), eine individuelle Zustandsnote ($Z_{3,OTK}$) ermittelt. In der Folge existiert für jede OTK, in der Schäden erfasst wurden, eine Note $Z_{3,OTK}$.

Die am höchsten bewertete OTK einer jeden Teilnotenkategorie bestimmt dann die jeweilige Teilnote Z_{Teil} . Ebenso wird schließlich aus den $Z_{3,OTK}$ unter Verwendung des Beiwerts ΔZ_3 , der die Anzahl der OTK, in denen Schäden verzeichnet sind, berücksichtigt, die resultierende Zustandsnote des Bauwerks $Z_{Bauwerk}$ ermittelt. Sie dient als Schlüsselindikator für die Dringlichkeit längerfristiger Instandsetzungsmaßnahmen. Sie wird dazu einem von vier Notenbereichen zugeordnet, siehe Bild 3 (Bundesanstalt für Wasserbau 2018). Der Algorithmus stellt sicher, dass die schlechteste, vergebene Schadensklasse final den Zustandsnotenbereich des Bauwerks bestimmt. Diese einheitliche Vorgehensweise ermöglicht eine Dringlichkeitsreihung innerhalb des Bauwerksbestandes. Die führt jedoch gleichzeitig zu einer starken Pauschalisierung, bei der objektspezifische Aspekte nicht oder nur untergeordnet einfließen können.

Für den gesamten Algorithmus gilt, dass in keinem Berechnungsschritt die Note von 1,0 unterschritten und die Note von 4,0 überschritten wird.

1,0 – 1,4	sehr guter Zustand
	<p>Das Objekt weist keine Schäden auf, die eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit darstellen.</p> <p>Der vorgegebene Inspektionszyklus kann beibehalten werden.</p>
1,5 – 2,4	guter bis befriedigender Zustand
	<p>Das Objekt weist mindestens einen Schaden auf, der für ein Objektteil eine geringfügige Beeinträchtigung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit darstellen kann.</p> <p>Der vorgegebene Inspektionszyklus kann beibehalten werden.</p>
2,5 – 3,4	ausreichender Zustand
	<p>Das Objekt weist mindestens einen Schaden auf, der für ein Objektteil eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit darstellt, beides ist aber noch gegeben. Eine Auswirkung auf das gesamte Objekt ist möglich.</p> <p>Mittelfristig ist eine bauliche Maßnahme an einem Objektteil/an dem Objekt zu erwarten.</p> <p>Eine Anpassung des Inspektionszyklus ist gegebenenfalls erforderlich.</p>
3,5 – 4,0	nicht ausreichender bzw. ungenügender Zustand
	<p>Das Objekt weist mindestens einen Schaden auf, der für ein Objektteil zu fehlender Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit führt. Eine Auswirkung auf das gesamte Objekt ist möglich.</p> <p>Wenn die Funktionsfähigkeit des Objektes erhalten bzw. wiederhergestellt werden soll, sind sofortige Maßnahmen einzuleiten. Eine Anpassung des Inspektionszyklus ist gegebenenfalls erforderlich.</p>

Bild 3: Definition der Zustandsnotenbereiche (Bundesanstalt für Wasserbau 2018)

Durch die Verwendung einer ordinalen Bewertungsskala (d. h., der Zustandsnote wird keine messbare Größe zugeordnet) lässt Z_{Bauwerk} jedoch nur relative Aussagen über die Dringlichkeit von Instandsetzungsmaßnahmen zu. Beispielsweise sollten Bauwerke mit einer Zustandsnote von $Z_{\text{Bauwerk}} = 4$ mit hoher Dringlichkeit instandgesetzt werden, während für ein Bauwerk mit Zustandsnote $Z_{\text{Bauwerk}} = 2$ kein akuter Handlungsbedarf besteht. Der Rückschluss, dass für die Instandsetzung der Bauwerke mit Zustandsnote 2 deshalb doppelt so viel Zeit zur Verfügung steht, ist jedoch nicht zulässig. Das hierarchisch gestaffelte Bewertungssystem ($Z_2 \rightarrow Z_{\text{OTK}} \rightarrow Z_{\text{Teil}} \rightarrow Z_{\text{Bauwerk}}$; vgl. Gl. (1) bis (5)) erlaubt die Identifizierung der für die Zustandsbewertung maßgebenden Schäden und der betroffenen Objektteile am Bauwerk. Aus dem daraus abgeleiteten Instandsetzungsbedarf lässt sich der notwendige Investitionsbedarf ableiten (Bild 4).

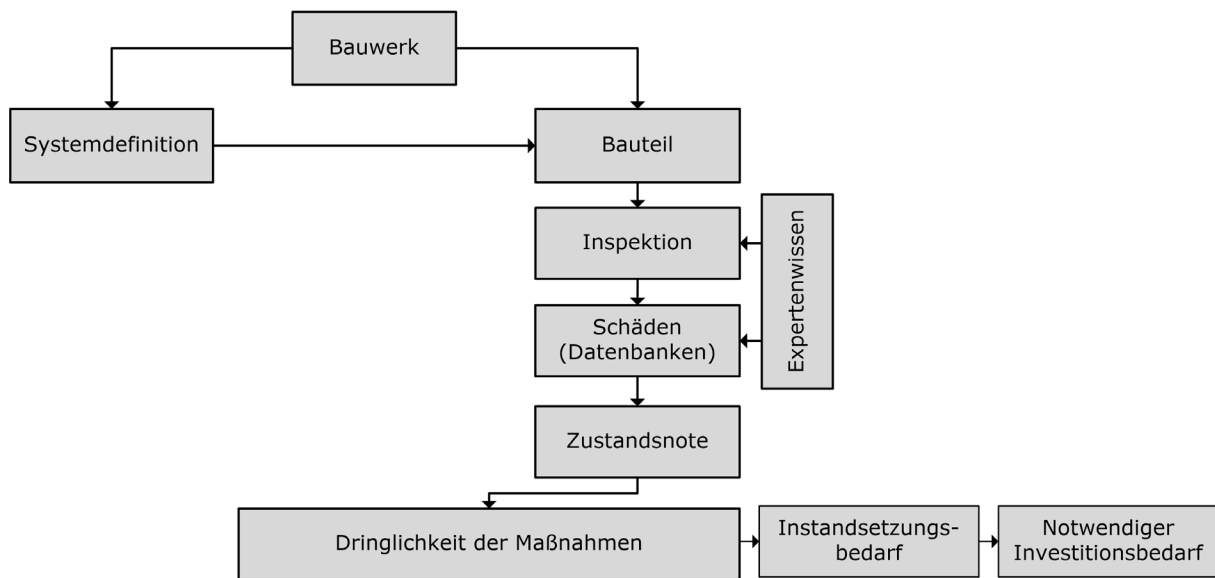


Bild 4: Ermittlung des notwendigen Investitionsbedarfs

2.2 Bewertung der Sicherheit von bestehenden Konstruktionen

Die Bewertung der zustandsbedingten Sicherheit von bestehenden Konstruktionen dient im Erhaltungsmanagement von Ingenieurbauwerken im Allgemeinen und von Verkehrsinfrastruktur im Besonderen als Entscheidungskriterium bei der Priorisierung und Reihung von Instandhaltungsmaßnahmen. Ein umfassender Überblick über weltweit angewendete Verfahren im Erhaltungsmanagement von Verkehrsinfrastruktur findet sich in Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt 2018).

Im Bauingenieurwesen wird die Sicherheit eines Tragwerks durch seine Zuverlässigkeit ausgedrückt (Geißler 2019). Die Zuverlässigkeit ist definiert als „Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils, die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen.“ (DIN EN 1990:2010-12, S. 16). Die Anforderungen betreffen die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerkskomponenten. Obwohl die Zuverlässigkeit in der Regel in probabilistischen Größen ausgedrückt wird, stehen für die Bewertung der Zuverlässigkeit von technischen Systemen neben quantitativen auch qualitative Verfahren zur Verfügung, die je nach vorhandener Datengrundlage und erforderlicher Genauigkeit der Ergebnisse zur Anwendung kommen. Bild 5 zeigt quantitative und qualitative Analyseverfahren für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von technischen Systemen, sortiert nach zunehmendem Aufwand bzw. zunehmender Genauigkeit.

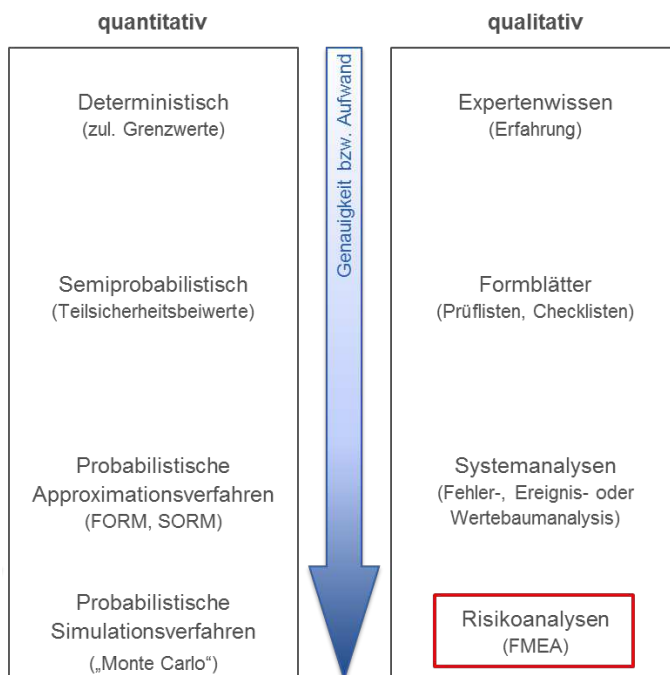


Bild 5: Quantitative und qualitative Analyseverfahren (Mehdianpour et al. 2004)

2.2.1 Quantitative Verfahren

Als quantitativer Kennwert für die Zuverlässigkeit dient die Versagenswahrscheinlichkeit innerhalb eines gewissen Zeitraums. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird über den Zuverlässigkeitsindex β ausgedrückt. In quantitativen Verfahren wird das Erreichen einer Zielzuverlässigkeit nachgewiesen, die in der Regel in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraums und gegebenenfalls unter Berücksichtigung der möglichen Konsequenzen bei einem Versagen ermittelt wird (vgl. DIN EN 1990:2010-12). Werden mögliche Konsequenzen bei der Wahl der Zielzuverlässigkeit berücksichtigt, kann von einem risikobasierten Ansatz für den Nachweis der Sicherheit gesprochen werden.

Deterministische Methoden beruhen auf der Einhaltung zulässiger Grenzwerte, wodurch aufgrund von empirisch erlangtem Wissen das Erreichen einer erforderlichen Zielzuverlässigkeit angenommen wird. Bei der Dimensionierung von Bauwerken entspricht dies der Verwendung globaler Sicherheitsbeiwerte, die über die Jahrzehnte, in denen sie zum Einsatz gekommen sind, immer wieder an den Stand des Wissens der jeweiligen Zeit angepasst wurden.

Das semiprobabilistische Konzept hielt mit der Einführung der Teilsicherheitsbeiwerte Einzug in die Bautechnik. Anders als mit globalen Sicherheitsbeiwerten wird durch die Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte bei der rechnerischen Auslegung von Bauwerken der Versuch unternommen, den Einfluss von Unsicherheiten in den getroffenen Annahmen auf Seiten der Einwirkungen und der Widerstände explizit zu berücksichtigen (z. B. Streuung und Mittelwert der Lastgrößen bzw. Materialkennwerte). Unter der Voraussetzung, dass die Teilsicherheitsbeiwerte auf eine Zielzuverlässigkeit kalibriert sind, wird mit dem Erbringen der rechnerischen Nachweise die Einhaltung der geforderten Zuverlässigkeit als gegeben angesehen.

Eine direkte Ermittlung der rechnerischen Zuverlässigkeit findet weder in der deterministischen noch in der semiprobabilistischen Methode statt. Dies wird erst bei der Verwendung von probabilistischen Verfahren notwendig. Die Berechnung der Zuverlässigkeit beruht auf der Auswertung probabilistischer Modelle, die Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses treffen. Zur Analyse des Modells stehen eine Reihe approximativer Verfahren (z. B. FORM und SORM) und Simulationstechniken (z. B. Monte-Carlo-Simulationen) zur Verfügung. Die probabilistische Berechnung der Zuverlässigkeit ist gerade für bestehende Konstruktionen ein vielversprechender Ansatz (vgl. Straub 2018), der bisher in der Praxis jedoch noch keine weite Verbreitung gefunden hat. Dies liegt unter anderem daran, dass der Aufwand für die Datenerhebung zur Quantifizierung der Unsicherheiten auf Einwirkungs- und Widerstandsseite in der Regel sehr groß ist. Oftmals besteht nicht die Möglichkeit, für alle notwendigen Informationen die erforderlichen Daten lückenlos zu erheben, sodass die Wissenslücken mit Annahmen und Näherungswerten gefüllt werden müssen. Beispielsweise können Materialkennwerte nur punktuell erhoben werden. Ihre Gültigkeit wird jedoch für das gesamte Bauwerk angenommen. Außerdem steigen die Komplexität der Berechnung und der Ergebnisinterpretation mit der Anzahl der Komponenten eines Modells überproportional an. Daher beschränkt sich die quantitative Berechnung der Zuverlässigkeit oftmals auf das maßgebende Bauteil (Mix 2016) oder ein maßgebendes Szenario (z. B. Versagen eines Brückenpfeilers nach Anprall eines LKW, DIN EN 1991-1-7:2010-12). Trotz der Entwicklung spezieller Verfahren, die dabei helfen, die Rechenzeit zu reduzieren (z. B. *linear programming bounds, matrix-based system reliability, sequential computing method*; Byun und Song 2017), ist bis auf einige generische Beispiele (Lee 2012) über eine praxistaugliche Analyse komplexerer Systeme im Bauwesen derzeit nichts bekannt.

Der Zuverlässigkeitsindex β ist aufgrund der unausweichlichen Einschränkungen bei der Datenerhebung und Modellanalyse ein operativer Wert, der für einen rudimentären tragfähigkeitsbezogenen Vergleich von Konstruktionen herangezogen werden kann. Über die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit kann jedoch auch mit den aufwändigsten Verfahren der quantitativen Zuverlässigkeitsanalyse keine konkrete Aussage getroffen werden.

2.2.2 Qualitative Verfahren

Im Gegensatz zu quantitativen Ansätzen sind qualitative Verfahren induktiv und erlauben ausgehend von den Analysen an einigen wenigen Fallbeispielen Rückschlüsse auf die Allgemeinheit. Qualitative Verfahren zeichnen sich durch eine relativ übersichtliche Verfahrensdarstellung und einen begrenzten Datenerhebungsaufwand aus. Sie befassen sich hauptsächlich mit Informationen, die auf Expertenwissen und Erfahrungen beruhen. Experten sind dabei all diejenigen, die aufgrund ihres Wissens und ihrer Erfahrung in der Lage sind, die ihnen vorgelegte Fragestellung thematisch zu durchdringen und bei der Beantwortung zu unterstützen. In den einfachsten Fällen reicht die Nutzung von Expertenwissen, um Aussagen zur Zuverlässigkeit treffen zu können. Mithilfe von Formblättern wird Expertenwissen Dritten zugänglich gemacht. Beispielsweise dienen Checklisten und Prüflisten als Kontrollmöglichkeit, ob alle Merkmale, die vonseiten der Experten als zuverlässigkeitsrelevant gelten, berücksichtigt und eingehalten wurden.

Zu den aufwändigeren qualitativen Methoden auf Ebene der Systemanalysen gehören beispielsweise die Fehlerbaumanalyse oder die Ereignisablaufanalyse. Die Verfahren dienen zur syste-

matischen Beschreibung, wie sich die Auswirkungen eines Fehlers bzw. Ereignisses in einem System fortpflanzen.

Die detailliertesten Methoden befassen sich mit der Risikoanalyse. Mithilfe dieser Verfahren wird ausgehend von Erfahrungswerten, Expertenwissen oder auch quantitativen Werten das Risiko abgeschätzt, das von einem Fehler in einem System ausgeht. Aufgrund des qualitativen Charakters der Bewertung wird vereinzelt auch von einer Risikoempfehlung gesprochen (Bowles und Peláez 1995). Das Risiko hängt von der Eintrittswahrscheinlichkeit des Fehlers und dem daraus folgenden Ausmaß der Konsequenzen ab. Für die Fälle, in denen die Eingangsgrößen der Risikoanalyse nur sehr schwer oder überhaupt nicht quantifizierbar sind, stehen matrixbasierte Verfahren zur Verfügung, die anhand vordefinierter Schadensfolgeklassen und Schadensszenarien eine Abschätzung des resultierenden Risikos ermöglichen. Solche Verfahren werden beispielsweise bei der Festlegung der zu erzielenden Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken (vgl. DIN EN 1991-1-7:2010-12) oder auch bei der Konzeptionierung von Signalanlagen für den Bahnverkehr (vgl. VDE V 831-101:2011-05) verwendet. In Industriezweigen mit hohem Sicherheitsniveau wie beispielsweise der Medizin, der Chemie oder der Kernenergie wird unter anderem die Fehlermöglichkeiten- und Ausfallanalyse (FMEA) eingesetzt. Sie bietet im Vergleich zu rein deskriptiven Methoden den Vorteil, dass neben der Beschreibung der kausalen Wirkzusammenhänge zwischen einem Ereignis und dessen Ursachen auch eine systematische Bewertung der entsprechenden Ursache-Wirkungsketten anhand ihrer Kritikalität durchgeführt werden kann (Linß 2016). Obwohl die FMEA aufgrund der Flexibilität ihres analytischen Ansatzes bereits in vielen Industriezweigen eine etablierte Methode zur Risikobewertung und Analyse der Zuverlässigkeit von technischen Systemen und Prozessen ist, wird sie im Bereich des Ingenieurbaus jedoch eher selten eingesetzt (Kamarianakis 2013).

3 Konzept für die tragfähigkeitsbezogene Bewertung

3.1 Grundlagen

Das Verfahren zur Zustandsbewertung mit den größtenteils visuell durchgeführten Bauwerksinspektionen, dem System zur qualitativen Schadensbewertung und der daraus abgeleiteten Zustandsnote ist fester Bestandteil der Instandhaltungsplanung der WSÄ, die für die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs auf den Bundeswasserstraßen verantwortlich sind. Zusätzliche Kenngrößen, die möglichst nahtlos in das bestehende Verfahren integriert werden können, erweitern den Informationsgehalt, der anhand der zur Verfügung stehenden Grundlagen bereitgestellt werden kann, ohne dabei die etablierten Arbeitsabläufe anpassen zu müssen.

Das Konzept einer tragfähigkeitsbezogenen Kenngröße für bestehende Konstruktionen zielt darauf ab, die Grundlagen, die im Rahmen der Zustandsbewertung in den WSÄ bereits bekannt sind, zu nutzen und durch neue Methoden der Datenauswertung den verfügbaren Informationsgehalt für das Bewertungsverfahren in größerem Umfang als bisher zugänglich zu machen. Die Entwicklung des Konzeptes für die tragfähigkeitsbezogene Bewertung bestehender Konstruktionen folgt einem schrittweisen Vorgehen, indem auf Grundlage eines fundierten Problemverständnisses (Kap. 3.2) die für eine Modellbildung erforderlichen Daten gesammelt und analysiert werden (Kap. 3.3), um daraus die notwendigen Kenngrößen für eine Bewertung der analysierten Gegebenheit zu generieren (Kap. 3.4) (siehe Bild 6).

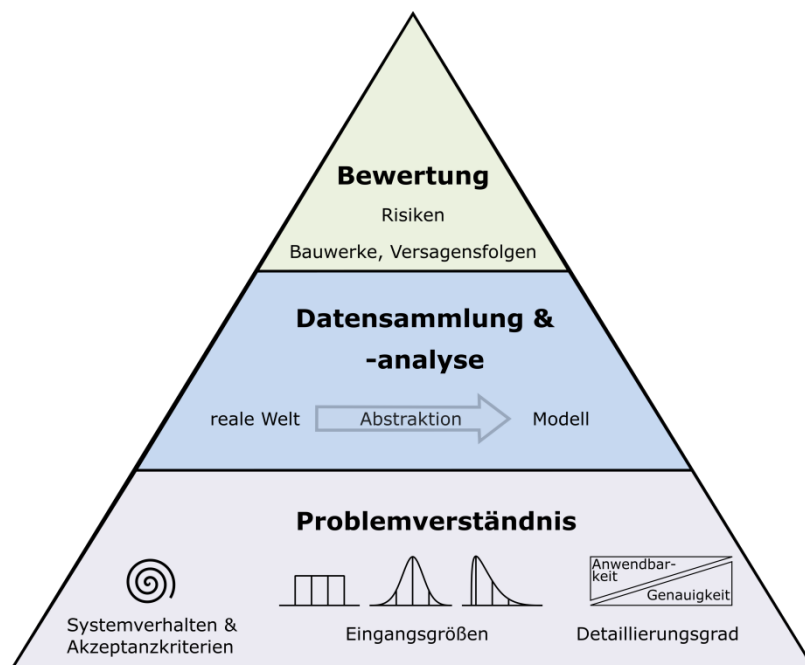


Bild 6: Vorgehen zur Bewertung bestehender Bauwerke (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2020)

3.2 Problemverständnis

3.2.1 Detaillierungsgrad

Das bestehende System zur Bewertung von Schäden an den Bauwerken der Bundeswasserstraßen beruht auf dem Expertenwissen der mit der Bauwerksprüfung betrauten Personen und den quasi standardisierten digitalen Formblättern, die die Eingabemaske der zur Schadenserfassung eingesetzten Software WSVPruf darstellt. Um im Konzept für die tragfähigkeitsbezogene Bewertung von bestehenden Konstruktionen eine weitere Differenzierung zu ermöglichen, sind Verfahren mit höherem Detaillierungsgrad der Analyse erforderlich, deren genauere Ergebnisse zusätzliche oder ergänzende Informationen für die Zustandsbewertung bereitstellen.

Es ist zu berücksichtigen, dass quantitative Verfahren wie z. B. Simulationen oder statistische Auswertungen im Normalfall vielschichtiger und umfangreicher sind und deshalb mehr Aufwand als qualitative Verfahren erfordern. Weiterhin benötigen quantitative Verfahren spezielle angepasste (quantitative) Eingangsdaten, die nicht in der erforderlichen Güte vorhanden sind. Ein quantitatives Verfahren wird wegen der überwiegend qualitativen Daten, auf die im Rahmen dieses Forschungsprojektes zurückgegriffen werden soll, und dem existierenden Bewertungsverfahren, das bereits auf Expertenwissen zurückgreift, nicht weiterverfolgt.

3.2.2 Systemverhalten

Tragfähigkeit ist neben Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit eine der drei grundlegenden Anforderungen, die ein Bauwerk innerhalb normativ vorgegeben Grenzzuständen erfüllen muss, um als sicher zu gelten. Neubauten werden als sicher eingestuft, wenn die normativen Vorgaben zur Bemessung des Bauwerks nachgewiesen sind. Das System zur Gewährleistung der Sicherheit ist somit die normgerechte Nachweisführung. Im Falle von bestehenden Konstruktionen besteht die Möglichkeit, dass durch den täglichen Betrieb oder außergewöhnliche Ereignisse Schäden am Bauwerk entstehen, die in ihrer Konsequenz einen Einfluss auf das Ergebnis der Nachweisführung haben. In diesem Zusammenhang ist ein Schaden eine Veränderung am Bauwerk, durch welche die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit oder die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird als Schaden eine visuell erfassbare und messbare Veränderung der Struktur des Bauwerks verstanden, die bei Bauwerksprüfungen entdeckt und erfasst werden kann (z. B. Korrosion an Stahlbauteilen, Risse im Beton).

Das entwickelte Konzept berücksichtigt über die im Rahmen der Schadenserfassung erfolgende Zustandsbewertung hinaus eine Risikobewertung der Konsequenzen, die durch die Schädigung für die Nachweisführung entstehen. Angewendet auf die Bewertung bestehender Konstruktionen entsteht unter Beschränkung auf die Schäden, die für die Nachweise der Tragfähigkeit relevant sind, eine tragfähigkeitsbezogene Kenngröße der Konstruktion.

3.2.3 Eingangsgrößen

Die Ermittlung des Risikos, dass die Nachweisführung aufgrund des ungenügenden Zustands eines Bauwerks nicht gelingen könnte, erfordert die Bewertung der Konsequenzen eines Schadens auf die Nachweisführung und die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens.

Während beispielsweise eine Veränderung des tragenden Querschnitts durch Korrosion oder Ab-
rasion sowohl auf die Nachweise der Festigkeit, der Stabilität und der Ermüdung Einfluss hat,
spielen Abweichungen der Lagegenauigkeit in der Regel nur bei den Stabilitätsnachweisen eine
Rolle. Die Konsequenzen einer Querschnittsänderung auf die Nachweisführung sind dementspre-
chend größer als die der Lageabweichung. In der Regel soll der Beton einerseits gemeinsam mit
der Bewehrung die Anforderungen im Hinblick auf die Tragfähigkeit der Konstruktion erfüllen,
hat aber andererseits auch die Aufgabe die Bewehrung dauerhaft vor Korrosion zu schützen. Dem-
entsprechend kann ein flächiger Oberflächenabtrag unerwartete Folgen haben, die weit über die
Beeinträchtigung der Anforderung an die Dauerhaftigkeit hinausgehen.

Des Weiteren sind die Konstruktionen an den Bundeswasserstraßen je nach Bauwerkstyp und
Einsatzgebiet unterschiedlich komplex ausgebildet. Infolgedessen unterscheiden sich sowohl die
Nachweisführung als auch die Häufigkeit bestimmter Schäden. So unterliegen beispielsweise
Schleusenbauwerke bei jedem Schleusungsvorgang Lastwechseln, die in der Form an Wehranlagen
nicht auftreten. Ermüdungsrisse treten daher wesentlich häufiger an Schleusenbauwerken als
an Wehranlagen auf. Darüber hinaus bestimmt die Schadensanfälligkeit einer bestehenden Kon-
struktion die Wahrscheinlichkeit, dass sich die möglichen Konsequenzen eines Schadens auf die
Nachweisführung überhaupt erst einstellen.

Hinsichtlich des Risikos eines Schadens betreffen die Eingangsgrößen

- den Einfluss eines Schadens auf die Nachweisführung für eine der grundlegenden Anfor-
derungen, die an das Bauwerk gestellt werden (Kap. 3.4.2.2.2),
- die Häufigkeit der relevanten Schäden (Kap.3.4.2.2.3) sowie
- die Effektivität der auf die Konstruktion eingeleiteten Maßnahmen zur Abwendung eines
Schadens (Kap. 3.4.2.2.4).

Im Sinne des Risikos beschreiben die Effektivität der Abwehrmaßnahmen eines Schadens auf die
Konstruktion und die Häufigkeit der Schäden die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens und
der Einfluss auf die Nachweisführung die Konsequenzen eines Schadens.

3.3 Datensammlung und Datenanalyse

3.3.1 Datensammlung

Der Umfang der Datensammlung beschränkt sich im Rahmen des Forschungsprojektes auf die
Schäden an stählernen Verschlüssen von Wehren und am Massivbau von Schiffsschleusen. Die
Datensammlung umfasst rd. 6.500 Schäden (Wehre) bzw. rd. 19.000 Schäden (Schiffsschleusen).
Der verwendete Datensatz entspricht dem Stand im Mai 2016. Im Laufe des Forschungsprojektes
wurde der Datensatz teilweise aktualisiert und von fehlerhaften Einträgen bereinigt. Eine Erhe-
bung neuer Daten ist für die Konzeptentwicklung und die beispielhaften Anwendungen auf einige
wenige Bauwerke nicht notwendig.

3.3.2 Datenanalyse

Im Rahmen der Inspektionen von Bauwerken an den Bundeswasserstraßen werden Schäden na-
hezu ausschließlich anhand von qualitativen Merkmalen beschrieben. Die derzeitige Struktur der
Schadensdatenbank ist einerseits hierarchisch objektorientiert, um die Lokalisierung des

jeweiligen Schadens am Bauwerk zu erleichtern. Andererseits wird jeder Schaden anhand von mehreren Merkmalen charakterisiert. Die Merkmale stellen die Kategorien dar, anhand deren die Schäden unterschieden, gefiltert und sortiert werden können (vgl. Tabelle 1). Die Schäden lassen sich mithilfe der charakteristischen Merkmale zu typischen Schadensbildern zusammenfassen, die ein einheitliches Verhalten gegenüber den an das Bauwerk gestellten Anforderungen aufweisen. Die Schadensbilder dienen als Grundlage für die Modellbildung.

Tabelle 1: Beispielhafte Merkmale zur Charakterisierung eines Schadens

objektorientiert	schadensorientiert	bauwerksspezifisch
Objekt	Materialgruppe	Bauweise
Objektteilkategorie	Schadensgruppe	Baumaterial
Objektteil; Ebene 1-7	Schaden	Verwendungszweck
Teilnotenkategorie	SK	Antriebsart
	Größe 1	Bewegungsrichtung
	Größe 2	Baujahr
	Menge	
	Schadenstext	

Darüber hinaus lässt sich ein weiteres Kategoriensystem anhand bauwerksspezifischer Merkmale definieren. Für die Kategorisierung der Massivbauten von Schiffsschleusen bietet sich die Unterscheidung nach der Bauweise an:

- Halbrahmen aus Stahlbeton
- Gewichtsstützwände aus Beton
- Gewichtsstützwände aus Mauerwerk
- Gewichtsstützwände aus Mauerstein

Die stahlwasserbaulichen Verschlüsse von Wehranlagen werden nach der Bewegungsrichtung unterschieden:

- verschiebbar vertikal (Hubtor, Senktor)
- verschiebbar horizontal (Schiebetor)
- Drehachse horizontal (Zugsegment, Drucksegment, Fischbauchklappe)
- Mischform (Walzenwehr)

3.3.3 Modellbildung

3.3.3.1 Grundlagen

Die Modellbildung ist aufgrund des induktiven Vorgehens von qualitativen Methoden eng mit der Datenanalyse verknüpft. Unter der Voraussetzung eines hohen erforderlichen Detaillierungsgrades und der vorwiegend qualitativen Datengrundlage wird im Rahmen des Konzeptes für die tragfähigkeitsbezogene Bewertung bestehender Konstruktionen auf das strukturierte Verfahren

einer qualitativen Risikoanalyse zurückgegriffen. Mit der FMEA existiert ein analytisches Verfahren, das sowohl mithilfe systematischer Analyseschritte die Modellierung der kausalen Zusammenhänge zwischen Bauwerksschaden und deren tragfähigkeitsbezogenen Auswirkungen ermöglicht als auch die daraus resultierenden Risiken mit Bezug zu einem Akzeptanzkriterium bewertet.

Als eine umfassende, aber aufwändige Methode hat sich die FMEA in vielen Industriebereichen als Werkzeug der Qualitätssicherung etabliert. Mithilfe einer FMEA wird der Aufbau und die Funktionsweise eines Systems analysiert und die Risiken eines Funktionsfehlers hinsichtlich einer Zielgröße bestimmt (Linß 2016). Die FMEA stammt ursprünglich aus dem Bereich der Qualitätssicherung. Sie wurde 1949 vom US-Militär als formale Analysetechnik zur Bewertung der Auswirkungen von System- und Produktausfällen auf das Personal oder auch die Instandhaltbarkeit von Ausrüstungsteilen verwendet. In den 1950er Jahren wurde die FMEA von der NASA als Werkzeug zur Qualitätssicherung von Zulieferteilen für das Apollo-Programm eingesetzt. Die Methodik diente hauptsächlich zur Ermittlung der Auswirkungen von Systemfehlern, die die Zuverlässigkeit von Bauteilen beeinflussen könnten. In den 1960er Jahren wurde die Anwendung der FMEA im Bereich der Raumfahrttechnik verstärkt, bis sie in den 1970er Jahren auch in der Automobilbranche Einzug hielt. Die Methode wird seitdem in Industriezweigen mit hohem Sicherheitsniveau, wie beispielsweise der Medizin, der Chemie oder der Kernenergie, eingesetzt. Im deutschen Sprachraum ist die Anwendung der FMEA branchenbezogen geregelt, z. B. DIN EN 60812:2006-11 in der Elektrotechnik oder DIN EN 16602-30-02:2014-12 für die Raumfahrtproduktsicherung.

Eine FMEA ist insofern ein wichtiges Werkzeug zur Modellbildung, als dass anhand eines iterativen Prozesses aus den vorhandenen Informationen die kausalen Zusammenhänge, die zu einem Fehler in einem System führen können, identifiziert werden und die damit verbundenen Wahrscheinlichkeiten sowohl hinsichtlich des Auftretens eines Fehlers als auch die Wahrscheinlichkeit seines Entdeckens quantifiziert werden. Das Modell besteht aus den Ursache-Wirkungsketten (UWK), die die theoretisch möglichen Fehler mit deren Ursachen und Folgen beschreiben.

Generell gliedert sich die FMEA in drei Analyseschritte und die abschließende Risikobewertung (Bild 7). In einer Strukturanalyse wird das System zunächst in seine Komponenten zerlegt. Besteht ein Objekt aus sehr vielen Komponenten, ist das Erstellen einer Vorauswahl der wichtigsten Komponenten ratsam. In der darauffolgenden Funktionsanalyse werden die Haupt- und Nebenfunktionen der nach der Voranalyse verbleibenden Komponenten beschrieben und die Kenngrößen festgelegt, mittels derer das planmäßige Wirken der Komponenten festgestellt werden kann. Eine Funktion entspricht einem Merkmal, das einem Objektelement eine Aufgabe oder Wirkung zuweist. In der anschließenden Fehleranalyse werden die möglichen UWK identifiziert, die zu einer Abweichung von den planmäßigen Funktionskennwerten führen können. Es wird vom untersuchten Objektelement ausgegangen und eine Fehleranalyse aufgebaut, die Fehler des betrachteten Objektelements, Fehlerursachen und Fehlerfolgen einschließt. Mögliche Fehler sollen erkannt und lokalisiert werden, um geforderte Funktionen sicherzustellen. Ein Fehler lässt sich somit als das Verfehlen des spezifizierten Zielwerts der jeweiligen Kenngröße oder die Nichterfüllung einer festgelegten Anforderung definieren. Mehrere Fehler können dabei einer Funktion zugeordnet werden.

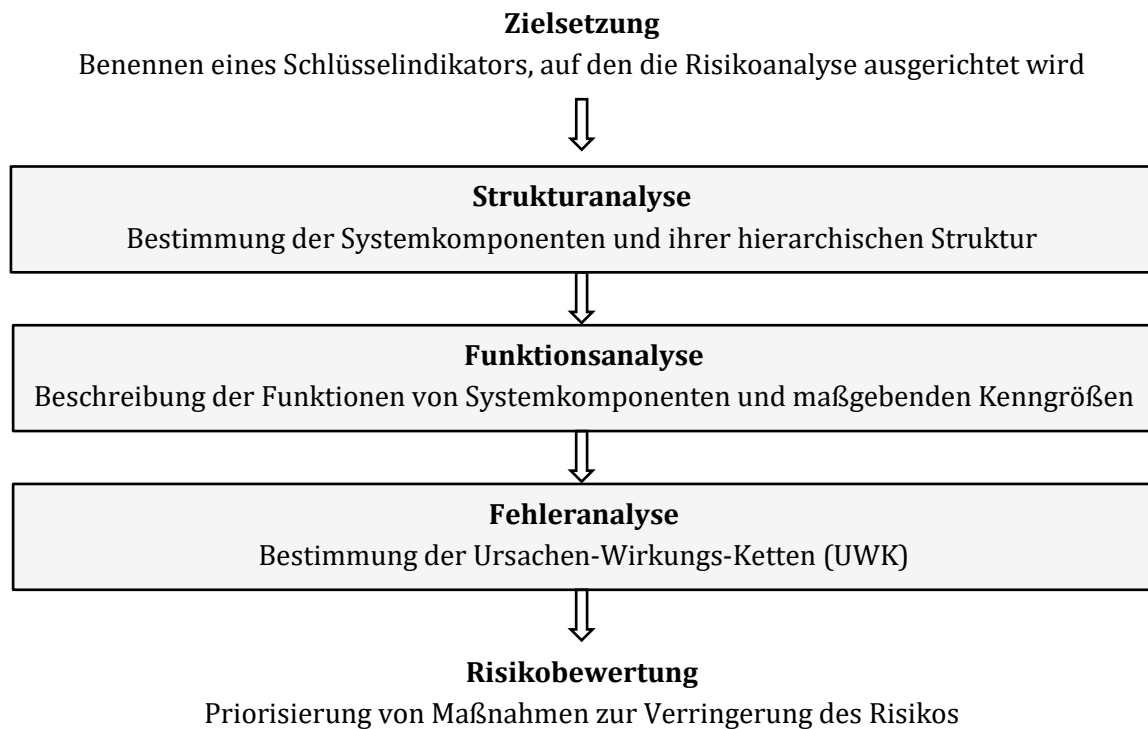


Bild 7: Darstellung des strukturierten Ablaufs einer FMEA

Der vielfältige Einsatz der FMEA in unterschiedlichen Industriezweigen zeigt die generelle Anpassungsfähigkeit der Methode. Je höher das Risiko eingeschätzt wird, desto dringender werden Maßnahmen entweder zur Beseitigung der zugrundeliegenden Ursachen oder zur Abminderung der Fehlerfolgen. Die Zielsetzung einer FMEA deckt sich in dieser Hinsicht mit dem Bestreben einer Zustandsbewertung, die dringendsten Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu identifizieren.

Die Zielgröße ist dabei nicht, wie beispielsweise im industriellen Bereich, der Erhalt der Kundenzufriedenheit, sondern die Einhaltung normativ vorgegebener Anforderungen. Das Konzept zur tragfähigkeitsbezogenen Bewertung bestehender Konstruktionen macht sich die Ähnlichkeit in der Zielsetzung für die Modellbildung im Zuge der Datensammlung und Datenanalyse zunutze. Die notwendigen Anpassungen für den Einsatz der FMEA im Rahmen der Zustandsbewertung von bestehenden Konstruktionen sind in Tabelle 2 zusammengefasst und der Anwendung im Rahmen der Qualitätssicherung gegenübergestellt.

Bei der Übertragung der FMEA-Methodik aus der industriellen Produktion in die Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen wird im Folgenden die Begrifflichkeit und die Systematik des Aufbaus beibehalten. In der Folge steht der Fehler als ausschlaggebendes Element im Fokus, in der industriellen Produktion wird der Fehler am Ende des Produktionsprozesses zum Einstieg in die Formulierung der UWK. Ausgehend davon wird über die Fehlerfolge die Fehlerursache beschrieben.

Tabelle 2: Begriffsdefinitionen in einer FMEA

Einsatzgebiet	Zustandsbewertung	Qualitätssicherung
Zielgröße	Einhalten der normativen Anforderungen	Erhalten der Kundenzufriedenheit
Gefahr	Anforderung eingeschränkt oder gar nicht mehr erfüllt	Kunde ist unzufrieden oder wird ganz verloren
System	Nachweisführung passend zur Anforderung	Produkte/Prozesse
Funktionale Anforderungen	Gebrauchstauglichkeit (G) Dauerhaftigkeit (D) Tragfähigkeit (T)	Je nach Funktion des Systems
Fehler	Verfehlen einer normativen Anforderung	Einschränkung der Funktionsweise

3.3.3.2 Strukturanalyse

In der Strukturanalyse wird auf den bestehenden hierarchischen Aufbau der Objektteilkategorisierung zurückgegriffen. Für die Kategorisierung der Massivbauteile eines Objekts sind die OTK Konstruktion und Fugen relevant. Für die stahlbaulichen Objektteile stehen die OTK Stahlbau, Antriebe, Dichtungen und Lager/Rollen zur Verfügung. Die verbleibenden OTK beziehen sich auf andere, untergeordnete Elemente der Anlagen wie Ausrüstungsteile oder Festmachervorrichtungen.

Da die Entwicklung einer tragfähigkeitsbezogenen Kenngröße im Fokus des Konzeptes steht, wird im Weiteren für die massivbaulichen Aspekte der Schleusenanlagen auf die OTK Konstruktion und für die stahlwasserbaulichen Aspekte der Wehranlagen auf die OTK Stahlbau fokussiert.

Die OTK Konstruktion umfasst bei Schleusen Bauteile wie die Häupter, die Schleusenammern, die Sparbecken, das Füll- und Entleersystem und das Tosbecken. Die OTK Stahlbau umfasst bei Wehranlagen Bauteile wie die Wehrschlüsse und Revisionsverschlüsse.

Die anderen OTK spielen für die Tragfähigkeit eine untergeordnete Rolle, können aber bei der Weiterentwicklung bzw. Ausbreitung des Konzeptes problemlos berücksichtigt werden.

3.3.3.3 Funktionsanalyse

Im Rahmen der Funktionsanalyse werden die Funktionen des Gesamtbauwerks und die jeweiligen Teilaufgaben der OTK bestimmt und beschrieben.

Zur Erläuterung werden die Begriffe Funktion und Teilaufgabe am Beispiel der Wehranlage exemplarisch beschrieben:

Eine wesentliche Funktion der Wehranlage ist die Stauhaltung, d. h. die Sicherstellung der Fallhöhe zwischen Oberwasser und Unterwasser. Die eingeführten OTK leisten zur Erfüllung dieser Funktion bestimmte Teilaufgaben. So gewährleistet die OTK Dichtungen die Dichtigkeit im Bewegungsspielraum zwischen Wehrverschluss und Wehrwange. Die OTK Stahlbau gewähr-

leistet in Form des Wehrverschlusses die starre Lagerung der Dichtung. Die Wehrwange als Teil der OTK Konstruktion sichert die korrekte Lage des Wehrverschlusses, so dass die Dichtung korrekt abdichten kann.

Die Festlegung der Funktionen und der Teilaufgaben erfolgten im Rahmen von Experten-gesprächen und können im Rahmen einer Weiterentwicklung des Konzeptes modifiziert und ergänzt werden, ohne den grundsätzlichen Ansatz zu verlassen. Im Folgenden werden nur die Funktionen betrachtet, die im Rahmen des Konzeptes (Entwicklung einer tragfähigkeits-bezogenen Kennzahl) eine Relevanz haben.

Für die Schleusenanlagen sind die im Kontext relevanten Funktionen die Lastabtragung und die Stauhaltung. Für die Funktion Lastabtragung werden als Teilaufgaben der OTK Konstruktion

- die Aufnahme der Belastungen aus Erd- und Wasserdruck, aus Einbauteilen sowie dem Verkehr und deren Weiterleitung in den Boden und
- die Lagesicherheit des Gesamtobjektes bzw. einzelner Objektteile

fomuliert.

Unter der Funktion Stauhaltung werden als Teilaufgaben der OTK Konstruktion

- das Halten der Wasserstände, d. h. die dichte Trennung von Unterwasser und Oberwasser bzw. von Grundwasserstand und Kammerwasserstand auf unbestimmte Zeit sowie
- das Maßhalten für die Stahlwasserbau-Einbauteile (Verschlüsse)

subsummiert.

Beide Funktionen haben auch bei den Wehranlagen eine entsprechende Bedeutung. Zusätzlich ist dort die Funktion Stauregulierung relevant. Die Teilaufgabe der OTK Stahlbau für die Funktion Lastabtragung ist die Verteilung der auftretenden Kräfte aus z. B. Wasserdruck, Eisdruck und Temperaturschwankungen. Die entsprechende Teilaufgabe der OTK Stahlbau für die Funktion Stauhaltung ist die starre Lagerung der Dichtung. Für die Funktion Stauregulierung ist die Teilaufgabe der OTK Stahlbau die starre Lagerung der Anschlagpunkte für Antriebe und anderer Anbauten sowie die starre Lagerung auf den Auflagern. Um den schematischen Aufbau der Modellbildung zu verdeutlichen, wird das kausale Zusammenwirken zwischen den identifizierten Fehlern und den von den OTK Stahlbau und Konstruktion zu erfüllenden Funktionen in Tabelle 3 und Tabelle 4 zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Funktionen Lastabtragung, Stauhaltung sowie Stauregulierung die maßgebenden Funktionen der OTK Stahlbau und Konstruktion sind, die in dieser Studie weiterhin berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Kausale Zusammenhänge der OTK Stahlbau

				Ursache- Wirkungskette (UWK)			
	Funktion	Teilaufgabe	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	Nr.
Objektkategorie "Stahlbau"	Lastabtragung	Verteilung der auftretenden Kräfte aus Wasserdruck, Erddruck, Eis, Temperaturschwankungen, etc.	Dauerhaftigkeit (D)	Dauerhaftigkeit betroffen	Schadensakkumulation/-vergrößerung	konstruktiver Mangel Ermüdung	D.1
						(konstruktiver) Mangel Ko-Schutz und Korrosion ohne Materialverlust	D.2
					optischer Mangel	Schäden an einem konstruktiven Element	D.3
						lokale Formänderung	D.4
			Tragfähigkeit (T)	Tragfähigkeit betroffen	kontinuierlicher Versagensverlauf	Korrosion mit Querschnittsveränderung	T.1
						Verlust Verbindungsmittel	T.2
					plötzliches Versagen	Toleranzabweichung	T.3
						Gewalteinwirkung	T.4
					statischer Zustand	grundsätzliche Fehler/Abweichungen in Lastannahmen oder Konstruktion	T.5
						Zwangszustände (Lageabweichung, etc.)	T.6
	Stauhaltung	Starre Lagerung der Dichtungen	Gebrauchstauglichkeit (G)	Gebrauchstauglichkeit betroffen	Stauhaltung eingeschränkt	belastungsabhängige Verformung betriebs-relevanter Bauteile	G.1
						lokale äußere Einwirkung (Anprall, Verklemmen,...)	G.2
	Stauregulierung	Starre Lagerung auf der Auflager, Anschlagpunkte für Antriebe und andere Anbauten			Abflusskapazität eingeschränkt	Verschmutzung	G.3
						Betriebseinrichtung beschädigt	G.4

Tabelle 4: Kausale Zusammenhänge der OTK Konstruktion

				Ursache- Wirkungskette (UWK)					
	Funktion	Teilaufgabe	Anforderungen	Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	Nr.		
Objekteilkategorie "Konstruktion"	Lastabtragung	Lagesicherheit Objektteil bzw. Gesamtobjekt bzw. Verteilung der auftretenden Kräfte aus Wasserdruck, Grundwasserdruck, Erddruck, Verkehrslast, Schiffsreibung, etc.	Dauerhaftigkeit (D)	Dauerhaftigkeit betroffen	geschädigte Bauteiloberfläche	Oberflächenabtrag	D.1		
						Offenporige Oberfläche	D.2		
						Risse SK 1/2 Massivbau	D.3		
						Sonstige dauerhaftigkeitsrelevante Schäden	D.4		
					Feuchtigkeits- bzw. Wassereintritt	Undichtigkeiten	D.5		
								Fugenschäden	D.6
			Tragfähigkeit (T)	Tragfähigkeit betroffen	sprödes Bauteilversagen	Risse Bewehrung/Metall	T.1		
						Sonstige tragfähigkeitsrelevante Schäden	T.2		
					duktils Bauteilversagen	Korrosion	T.3		
						Risse SK 3/4 Massivbau	T.4		
	Setzungen und Unterspülungen	T.5							
	Stauhaltung	Halten des Wasserstands auf unbestimmte Zeit Maßhalten der Einbauteile für Stahlwasserbau normgerechte Ausführung für Betriebsgebäude und andere relevante Elemente (z. B. Treppenhaus, etc.)	Gebrauchstauglichkeit (G)	Gebrauchstauglichkeit betroffen	eingeschränkte Funktionsfähigkeit	Verformung	G.1		
						Ablagerung	G.2		
Sonstige gebrauchstauglichkeitsrelevante Schäden						G.3			
Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes					Verschmutzung	G.4			

3.3.3.4 Fehleranalyse

Damit die OTK die Teilaufgaben erfüllen können, müssen bestimmte Anforderungen erfüllt sein. Bei Ingenieurbauwerken sind die Anforderungen durch die Normung eindeutig festgelegt. Reicht die Tragfähigkeit eines Riegels im Wehrverschluss nicht aus, kann die OTK Stahlbau die Anforderung Lastabtragung nicht erfüllen. Die Nichterfüllung eines Nachweises wird im Rahmen des auf der FMEA basierenden Konzeptes als Fehler beschrieben. Folglich können drei Fehler abgeleitet werden: Tragfähigkeit betroffen, Dauerhaftigkeit betroffen, Gebrauchstauglichkeit betroffen.

Aufbauend auf den identifizierten Fehlern werden mögliche Fehlerfolgen und deren mögliche Fehlerursachen ermittelt. Fehlerursachen sind im Kontext dieses Konzeptes die im Rahmen der Inspektion festgestellten Schäden, die zu gleichartigen Schadensbildern zusammengefasst werden. Fehler, Fehlerfolgen und Fehlerursachen werden in einer baumartigen Struktur dargestellt, die das Modell der kausalen Zusammenhänge, die zu einem Verfehlen einer der Anforderungen führen können, abbilden.

Die FMEA beruht auf der Auswertung vorhandenen Wissens, das Informationen über die Ursachen von Fehlern enthält. Hinsichtlich der Fehlermöglichkeiten an bestehenden Konstruktionen sind die Berichte über die Bauwerksinspektionen und die darin enthaltenen Beschreibungen der Schadensfälle sowie die typischen Schadensbilder bei Stahl- und Massivbauten die maßgebende Datenquelle. Die erfassten Schäden stellen bei der Zusammenstellung der UWK das Expertenwissen darüber dar, in welcher Form sich die UWK am Objekt äußern. Aufgrund der außerordentlichen Vielfalt der Schadensursachen und -erscheinungsformen stellen Schäden mit ähnlichen Auswirkungen auf eine Anforderung eine einheitliche Fehlerursache dar. In einem iterativen Prozess werden die Anzahl der UWK und die Begrifflichkeiten, die den Fehler, die Fehlerfolge und die Fehlerursache benennen, solange angepasst und modifiziert bis eine möglichst große Anzahl der erfassten Schäden einer UWK zugeordnet werden kann. Eine ausreichende „Sättigung“ an UWK kann als gegeben angenommen werden, wenn jedem identifizierten Fehler idealerweise zwei potentielle Fehlerfolgen zugeordnet werden, für die wiederum jeweils zwei Fehlerursachen formuliert werden. Jedem Fehler werden somit bis zu vier UWK zugeordnet (vgl. Tabelle 3 und Tabelle 4).

Mithilfe des iterativen Abgleichs zwischen UWK und Schadensdatenbank werden die zunächst nach Ingenieurverstand und Expertenwissen festgelegten Fehlerfolgen und Fehlerursachen validiert. Da im Zuge der Schadenserhebung auch das betroffene Objektteil erfasst wird, wirken die UWK als Bindeglied zwischen dem Schaden und der an das Objektteil gestellten Anforderung. Die zugewiesene UWK dient neben Merkmalen, die gemäß BAWMerckblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV)“ (Bundesanstalt für Wasserbau 2015) bei der Schadenserhebung erfasst werden, als zusätzliches Kriterium, mit dessen Hilfe Schäden sortiert und gefiltert werden können.

In der OTK „Stahlbau“ liegt beispielsweise ein Fehler vor, wenn ein Tragfähigkeitsnachweis nicht erbracht werden kann. Dies könnte als potentielle Folge haben, dass das Objekt(-teil) einem kontinuierlichen Versagensverlauf unterliegt, plötzlich versagt oder in einem unveränderlich geschädigten (d. h. „statischen“) Zustand verbleibt. Die potentiellen Fehlerursachen, die einen kontinuierlichen Versagensverlauf zur Folge haben könnten, sind Korrosion mit Querschnittsveränderung oder der schrittweise Verlust von Verbindungsmitteln. Plötzliches Versagen könnte

auf eine übermäßige Formabweichung oder Gewalteinwirkung zurückzuführen sein, wodurch ein tragendes, auf Druck belastetes Bauteil beult oder ausknickt. Ein statischer Zustand herrscht dann vor, wenn die festgestellten Schäden auf grundsätzliche Fehler bzw. Abweichungen in Lastannahmen oder der Konstruktion zurückzuführen sind oder wenn durch veränderte Auflagerbedingungen unvorhergesehene Zwangszustände auftreten (vgl. Tabelle 3).

In der OTK „Konstruktion“ liegt ein Fehler vor, wenn z. B. die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit oder an die Tragfähigkeit nicht eingehalten sind. Risse in der Betondeckung sind bei der Beanspruchung von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen in den meisten Fällen nicht zu vermeiden. Risse können die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen beeinträchtigen (Weber 2013). Sofern Risse im Beton einen bestimmten, für das Bauteil vorgegebenen Grenzwert der Rissbreite nicht überschreiten, ist im Normalfall keine wesentliche Beeinträchtigung der Tragfähigkeit gegeben, obwohl die optische Erscheinung des Bauteils beeinträchtigt ist. Ohne Chlorideinwirkung stellen Risse mit einer Rissbreite bis zu 0,3 mm und bei einer ausreichend dicken und dichten Betondeckung grundsätzlich noch keine Korrosionsgefahr für den Bewehrungsstahl dar (Weber 2013). Diese Art von Rissen wird gemäß den Richtlinien zur Schadensklassifizierung mit SK 1 oder SK 2 bewertet. Schäden dieser Ausprägung werden unter der Fehlerursache „Risse SK1/2 Massivbau“ zusammengefasst. Mit steigender Rissbreite ist mit einer erhöhten Gefährdung bzw. einer möglichen Beeinträchtigung der Tragfähigkeit zu rechnen. Treten Risse mit größerer Rissbreite als zulässig auf, die möglicherweise noch mit Bodenaustrag oder Feuchtigkeitzutritt einhergehen, ist eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit der Konstruktion anzunehmen. Solche Risse können zu einem duktilen Versagen des Bauteils führen und werden in der Regel mit SK 3 oder SK 4 bewertet. Die entsprechende Fehlerursache ist mit „Risse SK3/4 Massivbau“ bezeichnet (vgl. Tabelle 4).

Durch den Aufbau der kausalen Zusammenhänge auf Basis der FMEA können letztendlich UWK aufgestellt werden, die es ermöglichen, die in der Bauwerksinspektion erfassten Schäden den normativen Anforderungen zuzuordnen. Damit ist ein erster wesentlicher Schritt im Hinblick auf die Entwicklung einer tragfähigkeitsbezogenen Kennzahl vollzogen.

3.4 Bewertung

3.4.1 Tragfähigkeitsbezogene Zustandsnoten

3.4.1.1 Vorgehensweise

Ausgehend von den eindeutigen Definitionen der Funktionen und Teilaufgaben der OTK Konstruktion und Stahlbau werden mithilfe der UWK die Schäden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die normativen Anforderungen, die an die OTK gestellt werden, kategorisiert. Durch die Kategorisierung anhand der UWK lassen sich Schäden anforderungsspezifisch sortieren und filtern. Es ist dann möglich, innerhalb jeder Anforderung mit den sortierten Schäden mit dem bekannten Algorithmus (vgl. Kap. 2.1) eine Zustandsnote zu ermitteln. Nach Anwendung des Algorithmus zur Berechnung der modifizierten Zustandsnote Z_2 (vgl. Gl. (2)) ergeben sich anforderungsspezifische Zustandsnoten $Z_{OTK,Anforderung}$ (Gl. (6); vgl. Bild 8), die nach der OTK unterschieden werden können. Somit wurden innerhalb der vorliegenden Arbeit für die betrachteten Objektteilkategorien Stahlbau und Konstruktion im Hinblick auf die Anforderung an die Tragfähigkeit die spezifischen

Zustandsnoten $Z_{Stb,T}$ bzw. $Z_{Ko,T}$ ermittelt. Sie ergänzen die Aussage der allgemeinen Zustandsnote um die Information über die maßgeblich betroffene Anforderung:

$$Z_{OTK,Anforderung} = \max(Z_1 + \Delta Z_1) + \Delta Z_{2,Anforderung} \quad (6)$$

mit:

$$1,0 \leq Z_1 \leq 4,0$$

$$0,8 \leq Z_{OTK,Anforderung} \leq 4,2$$

Z_1 SK eines Schadens mit der Zuordnung zur jeweiligen Anforderung

$Z_{OTK,Anforderung}$ Spezifische Zustandsnote hinsichtlich einer Anforderung

ΔZ_1 Beiwert für das Schadensausmaß in Abhängigkeit vom Schadensmerkmal „Menge“:

klein, gering o. ä. $\Delta Z_1 = -0,1$

groß, häufig o. ä. $\Delta Z_1 = +0,1$

für alle anderen/neutral $\Delta Z_1 = 0,0$

$\Delta Z_{2,Anforderung}$ Beiwert für die Anzahl m der zugeordneten Schäden je Anforderung:

$m < 3$ $\Delta Z_{2,Anf.} = -0,1$

$3 \leq m \leq 5$ $\Delta Z_{2,Anf.} = 0,0$

$m > 5$ $\Delta Z_{2,Anf.} = +0,1$

Die spezifischen Zustandsnoten, die nur Schäden berücksichtigen, die im Stahlbau und in der Konstruktion mit den Anforderungen an die Tragfähigkeit in Verbindung gebracht werden, lassen sich als tragfähigkeitsbezogene Kenngrößen des Bauwerks interpretieren ($Z_{Stb,T}$ bzw. $Z_{Ko,T}$). Somit stehen neben der allgemeinen Zustandsnote $Z_{Bauwerk}$ bzw. den Teilnoten für die Konstruktion Z_{Ko} und den Stahlbau Z_{Stb} zwei zusätzliche Kennwerte in der Zustandsbewertung eines Bauwerks zur Verfügung ($Z_{Stb,T}$ bzw. $Z_{Ko,T}$).

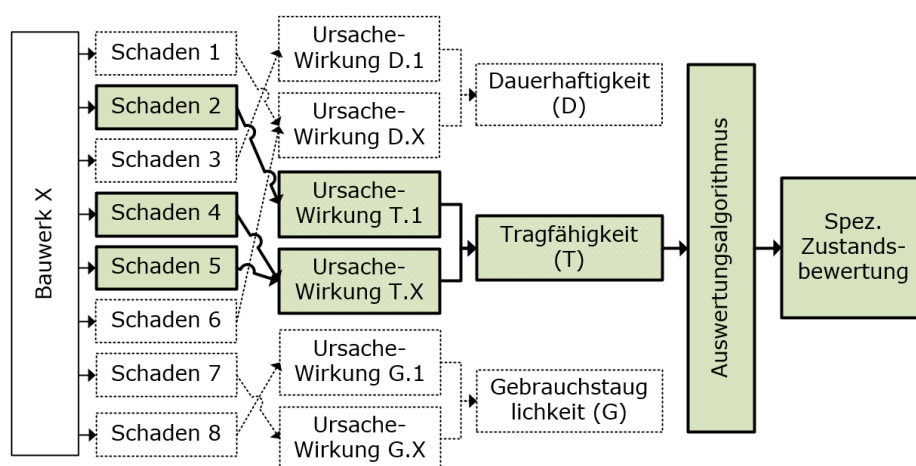


Bild 8: Schema zur Ermittlung der anforderungsspezifischen Zustandsnote

Bei der Strukturanalyse ist zu beachten, dass im vorliegenden Konzept die OTK Stahlbau und die OTK Konstruktion als relevant für eine tragfähigkeitsbezogene Kennzahl identifiziert wurden. Die aus den UWK für die OTK Stahlbau und die OTK Konstruktion für die Tragfähigkeit ermittelten spezifischen Zustandsnoten sind daher stringent im Konzept hergeleitet. Die aus der OTK Stahlbau und der OTK Konstruktion ermittelten UWK für die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit decken aber die Anforderungen nicht ausreichend ab, da weitere Fehlerursachen (Schäden) und Funktionen (normative Anforderungen) aus anderen OTK für eine stringente Betrachtung zusätzlich betrachtet werden müssen. Dies ist auf Basis des Konzeptes problemlos möglich, aber nicht Gegenstand der Betrachtungen hier, da auf eine tragfähigkeitsbezogene Kennzahl fokussiert wird.

3.4.1.2 Beispiel: Spezifische Zustandsnote eines Wehrverschlusses

Am Beispiel des Wehrverschlusses in Feld 2 der Wehranlage Neckarsulm wird die Ermittlung der tragfähigkeitsbezogenen Zustandsnote für die OTK Stahlbau verdeutlicht. Der Wehrverschluss ist zum Zeitpunkt der Bewertung in einem ungenügenden allgemeinen Zustand, wie die Teilnote für den Stahlbau anzeigt ($Z_{Stb} = 4$). Eine Abfrage der Datenbank ergibt, dass insgesamt elf Schäden am Wehrverschluss erfasst sind (vgl. Tabelle 5; Stand Mai 2016).

Tabelle 5: Schäden am Wehrverschluss in Feld 2 der Wehranlage Neckarsulm

Schaden Nr.	OTK	Schaden	SK	Größe 1	Größe 2	Menge	Schadenstext	Nr. UWK
1	Stahlbau	Verschleiß	2	-	-	stellenweise	An mehreren Stellen hat die Stauhaut 3-4mm tiefe Riefen durch schleifende Nietköpfe des Unterschützes. Kein weiterer Verschleiß durch Neubeschichtung.	D.2
2	Stahlbau	nicht funktionsfähig	4	-	-	vollständig	Das Oberschütz ist zum Unterschütz nicht mehr versenkbar (Brustdichtung mußte umgebaut werden um wieder Dichtigkeiten zu erreichen). Dadurch keine Feinregulierung mehr möglich.	G.4
3	Stahlbau	deformiert	2	-	-	gesamtes Bauteil	Oberschütz in sich über die Längsachse verdreht. 3 von 4 Laufrollen liegen an der Schiene an. Klemmlagen unter Wasserdruck.	T.6
4	Stahlbau	deformiert	2	-	-	gesamtes Bauteil	Unterschütz in sich über die Längsachse verdreht. 3 von 4 Laufrollen liegen an. Klemmlagen unter Wasserdruck.	T.6
5	Lager, Rollen	schadhaft	3	-	-	2 Stück	Die seitlichen Führungsrollenkonsolen stehen an der Führungsschiene an wegen des Verschleißes aus den Schäden 19 und 60. Funktion nicht mehr vollständig gegeben.	
6	Lager, Rollen	unterrostet	2	-	-	stellenweise	Maßänderung zwischen Schienen und Laufrollen. Klemmlagen möglich.	
7	Lager, Rollen	Verschleiß	3	-	-	gesamtes Bauteil	Der Abstand zwischen seitlicher Führungsrolle und Schiene ist zu groß. Verschleiß 2-3cm.	
8	Lager, Rollen	Verschleiß	3	-	-	ausgeprägt	Die Hauptlaufrollen sind stark verschlissen (2-3cm).	
9	Lager, Rollen	Verschleiß	3	-	-	bereichsweise	Im unteren Bereich sind die Laufschiene korrodiert und verschlissen.	
10	Dichtungen	Verschleiß	3	-	-	ausgeprägt	Seitendichtung stark undicht.	
11	Dichtungen	abgerissen	3	-	-	2 Stellen	Das linke und rechte Kopfstück (Oberkante Seitendichtung zum Übergang Oberschütz) ist ab- bzw. angerissen.	

Vier der Schäden (Nr. 1 bis 4) betreffen die OTK Stahlbau, für die im Rahmen des Forschungsprojektes die UWK aufgestellt wurden. Die restlichen Schäden (Nr. 5 bis 11) betreffen andere OTK, die im Rahmen der Konzeptentwicklung nicht weiter behandelt werden.

Zwei der vier Schäden (Nr. 3 und 4) sind einer UWK zugeordnet, die die Anforderung der Tragfähigkeit (T) betreffen. Die zwei Schäden sind beide mit SK 2 bewertet und betreffen das gesamte Bauteil.

Somit gilt gem. Gl. (6) für eine spezifische, die Tragfähigkeit des Stahlbaus beschreibende Zustandsnote:

für Menge „gesamtes Bauteil“: $\Delta Z_1 = +0,1$

für $m = 2$: $\Delta Z_{2,T} = -0,1$

$$Z_{Stb,T} = \max\{2; 2\} + 0,1 + (-0,1) = 2$$

Der für die Teilnote des Stahlbaus Z_{Stb} maßgebende einzelne Schaden Nr. 2 mit SK = 4 wird aufgrund der Schadensbeschreibung UWK G.4 zugeordnet und betrifft somit die Funktion der Stau- regulierung und damit die Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit.

Zur Ermittlung einer spezifischen, die Gebrauchstauglichkeit des Stahlbaus beschreibende Zustandsnote müssten aber die Schäden der anderen OTK (Lager/Rollen, Dichtungen) ebenfalls UWKs zugeordnet werden, was aber nicht Gegenstand dieses Forschungsberichtes ist.

Durch die differenzierte Aufteilung der Schäden anhand der betroffenen Anforderungen enthält die Zustandsbewertung nun neben der Aussage über die allgemeine Dringlichkeit einer Instand- setzung ($Z_{Stb} = 4$) auch die Information, dass der der Bewertung zugrundeliegende Schaden aller Voraussicht nach die Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit betrifft ($Z_{Stb,G} = 4$; vgl. Beispiel: Risikobewertung mittels RPZ). Schäden, die mit der Tragfähigkeit in Verbindung gebracht werden, sind dagegen lediglich im Notenbereich „gut bis befriedigend“ angesiedelt ($Z_{Stb,T} = 2$). Aus Sicht des Nachweises der Tragfähigkeit besteht daher eine deutlich geringere Dringlichkeit für Instandsetzungen. Diese Informationen stehen nun bei der Priorisierung von Instandsetzungs- maßnahmen zusätzlich zur Verfügung.

3.4.2 Risikobewertung tragfähigkeitsrelevanter Fehlerursachen

3.4.2.1 Grundlagen

Die FMEA mündet in eine Risikobewertung, mit deren Hilfe die ermittelten UWK in eine Rangfolge gebracht werden, um die erforderlichen Maßnahmen zur Risikominimierung entsprechend zu priorisieren. Das im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelte Konzept macht sich dieses Verfahren zunutze, um damit eine weitere Kenngröße für eine tragfähigkeitsbezogene Bewertung von bestehenden Konstruktionen zu erzeugen.

Risiko ist in einer FMEA definiert über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Fehlers und der damit verbundenen negativen Auswirkung auf die Funktion. Es wird in der FMEA über eine Risiko- prioritätskennzahl (RPZ) beschrieben, die eine Kenngröße für das zu vertretende Risiko einer UWK ist. Weiterhin wird die RPZ als grobes Maß für die Dringlichkeit von Abwehrmaßnahmen verwendet. Sie wird in der klassischen FMEA ermittelt über die Bewertung

- der Bedeutung B der Fehlerfolge für die Funktion,
- der Auftretenswahrscheinlichkeit A der Fehlerursache und
- der Entdeckungswahrscheinlichkeit E des Fehlers.

Die RPZ ergibt sich aus der Multiplikation der Bewertungskriterien B, A und E. Bild 9 verdeutlicht den Prozess schematisch. Sowohl eine hohe Gesamtzahl der RPZ als auch ein hoher Wert einzelner Risikokriterien sollten hierbei Anlass zum Handeln geben. Mittels eines Ergebnisvergleichs lässt sich das Verhältnis der einzelnen UWK anhand der ermittelten RPZ zueinander darstellen. Fehler, Fehlerfolgen und Fehlerursachen mit den höchsten RPZ oder den schwerwiegendsten einzelnen Bedeutungen sollten im Hinblick auf die Dringlichkeit der Instandsetzungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

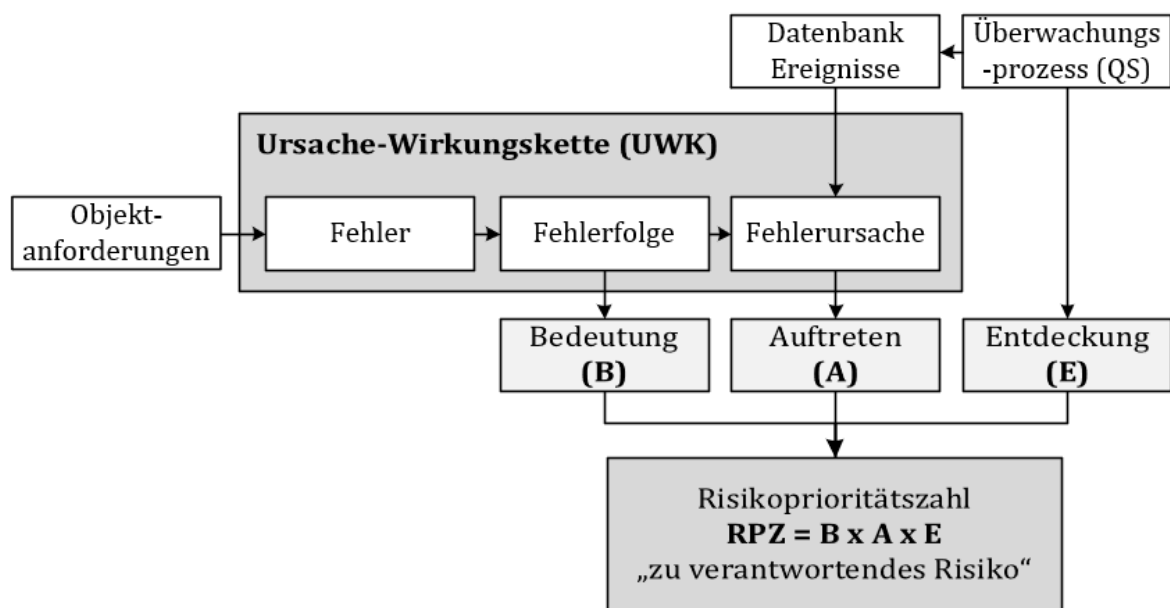


Bild 9: Systematik einer Risikobewertung mittels FMEA

3.4.2.2 Bewertungskriterien

3.4.2.2.1 Allgemeines

Das Bewertungsverfahren der klassischen FMEA ist auf die Daten und Erfahrungen im Bereich der industriellen Massenproduktion ausgerichtet, in der aufgrund von hohen Stückzahlen und maschineller Fertigungstechniken das Auftreten von Fehlern und die Effizienz der Fertigungsüberwachung bei der Entdeckung des Fehlers durch entsprechende qualitätssichernde Maßnahmen auf einfache Weise statistisch erfasst werden können. Diese Art der Daten stehen im Rahmen eines Einsatzes bei der Zustandsbewertung von bestehenden Konstruktionen, die im Allgemeinen als Unikate gelten, nicht zur Verfügung. Entsprechend der Zielsetzung (siehe Kap. 3.3.3) werden die Bewertungskriterien angepasst. Die Einteilung der Bewertungsskalen der Bewertungskriterien in vier Bereiche orientiert sich an der Anzahl der Notenbereiche für die Zustandsnote Z_{Bauwerk} (vgl. Kap. 2.1).

3.4.2.2.2 Bedeutung (B) der Fehlerfolge

Das B-Kriterium bewertet die Auswirkungen einer Fehlerfolge (d. h. die Konsequenzen eines unentdeckten Fehlers) auf die Anforderung. Das B-Kriterium ist damit ein Maß für den Einfluss des Fehlers auf die Anforderung. Hinsichtlich einer tragfähigkeitsbezogenen Zustandsbewertung bezieht sich das Maß auf die Nachweisführung im Rahmen der Anforderung. Je mehr Einfluss ein Fehler auf die Nachweisführung hat, desto höher fällt die Bewertung des Kriteriums aus (Tabelle 6). Die Bewertung des B-Kriteriums ist abhängig von der erwarteten Fehlerfolge und den Objekteigenschaften wie beispielsweise dem Objekttyp, der Konstruktionsweise und den Baumaterialien. Die Grundlagen des B-Kriteriums stammen aus der FMEA und den Objektdatenbanken WADABA/WInD.

Tabelle 6: Wertebereiche für die Bewertungsskala des B-Kriteriums.

B-Bewertung	Wertebereich
1 - 2	Die Fehlerfolge hat geringen Einfluss auf den Ausgang der relevanten Nachweisformate
2 - 5	Die Fehlerfolge hat einen eher geringen Einfluss auf den Ausgang der relevanten Nachweisformate
5 - 8	Die Fehlerfolge hat einen eher hohen Einfluss auf den Ausgang der relevanten Nachweisformate
8 - 10	Es ist nahezu sicher, dass der hohe Einfluss der Fehlerfolge relevante Nachweisformate scheitern lässt

Die Bewertung wird im Rahmen des Forschungsprojektes in erster Linie anhand des Bauwerktyps und unter Berücksichtigung von entsprechendem Expertenwissen festgelegt (Tabelle 7 und Tabelle 8). Die Einstufung erfolgt für alle Anforderungen, obwohl im Konzept auf die Tragfähigkeit fokussiert wird.

Tabelle 7: Bewertung des Kriteriums „Bedeutung“ für den Stahlbau

Funktion	Anforderung	Fehlerfolge	Stahlbau		
			horizontale Drehachse	vertikal verschieblich	vertikal verschieblich mit horizontaler Drehachse
Lastabtragung	D	Schadensakkumulation/-vergrößerung	3	4	3
		optischer Mangel	1	1	1
	T	kontinuierlicher Versagensverlauf	9	10	7
		plötzliches Versagen	7	5	7
		"statischer" Zustand	8	9	8
Stauhaltung	G	Stauhaltung eingeschränkt	1	1	2
Stauregulierung		Abflusskapazität eingeschränkt	3	4	4

Tabelle 8: Bewertung des Kriteriums „Bedeutung“ für die Konstruktion

Funktion	Anforderung	Fehlerfolge	Konstruktion	
			Stahlbeton	Beton
Lastabtragung	D	geschädigte Bauteiloberfläche	5	5
		Feuchtigkeits- bzw. Wassereintritt	5	5
	T	Sprödes Bauteilversagen	10	10
		Duktiles Bauteilversagen	10	1
Stauhaltung	G	Eingeschränkte Funktionsfähigkeit	7	6
		Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes	1	1

Im Einzelfall kann die Bewertung als Schnittstelle zu detaillierten Analysen dienen. Beispielsweise ergaben umfassende Traglastanalysen an der Normalwalze der Wehranlage Randersacker eine große Schädigungstoleranz der Tragfähigkeitsnachweise gegenüber lokalen Korrosionsschäden, weil die durch Schäden verursachten Spannungserhöhungen über alternative Lastpfade abgetragen werden. In Bild 10 ist die lokale Auswirkung von zunehmender Korrosion in einem Blechfeld dargestellt. Die Spannungserhöhung ist beschränkt auf die direkt angrenzenden Blechfelder. Der unbeschädigte Bereich des Walzenköpers kann den Verlust des Blechfelds vollständig kompensieren. Der Einfluss des Fehlers Korrosion auf die Anforderung Tragfähigkeit ist in diesem Fall gering. Eine Bewertung im Notenbereich 1 bis 2 scheint gerechtfertigt zu sein.

Im Massivbau müssten die schlanken Stahlbetonschleusen des Main-Donau-Kanals für Schäden an der Bewehrung eine höhere Bewertung des B-Kriteriums erfahren als die Schwergewichtswände aus Stampfbeton der Schleusenanlagen am Neckar, die, wenn überhaupt, nur mit konstruktiver Bewehrung ausgestattet sind.

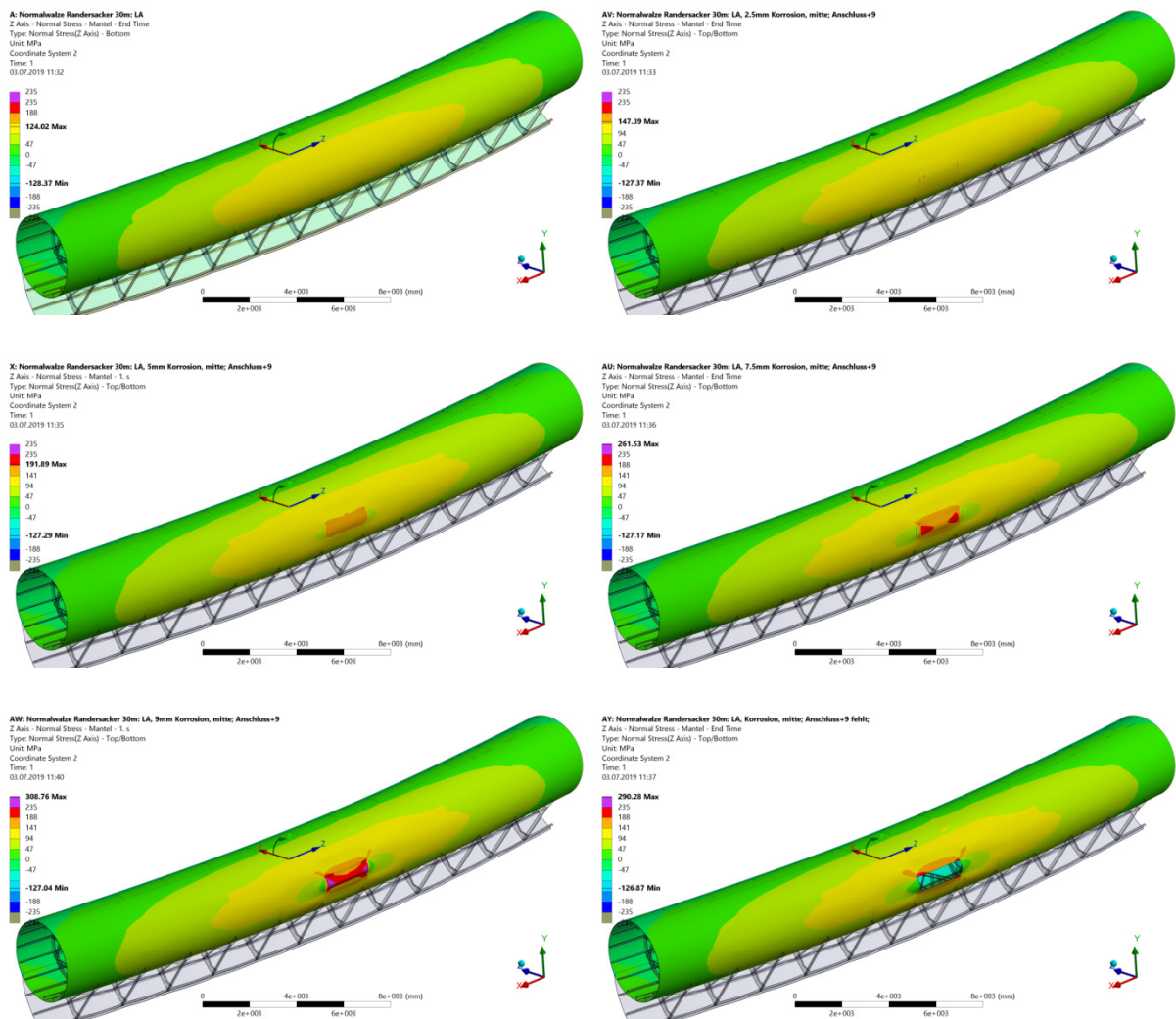


Bild 10: Ergebnisse der FEM-Analyse einer Wehrwalze

3.4.2.2.3 Auftreten (A) der Fehlerursache

Das A-Kriterium bewertet die relative Häufigkeit einer Fehlerursache. Da die FMEA ursprünglich aus dem Bereich der industriellen Fertigung und dem Maschinenbau kommt, finden sich für dieses Kriterium in der Literatur fast ausschließlich Bewertungsskalen, die auf wesentlich geringere Häufigkeiten kalibriert sind als für eine Anwendung im Bereich der Zustandsbewertung von bestehenden Konstruktionen sinnvoll wäre. Für die Entwicklung einer passenden Bewertungsskala (Tabelle 9) wird eine Auswertung der prozentualen Verteilung von Fehlerursachen je Bauwerkstyp und Konstruktionsweise durchgeführt. Durch weitere Kriterien bei der Auswertung, beispielsweise durch eine Beschränkung auf bestimmte Zeiträume der Herstellung, können die Bewertungen des A-Kriteriums bei Bedarf über die Abhängigkeit vom Bauwerkstyp hinaus diversifiziert werden.

Tabelle 9: Wertebereiche für die Bewertungsskala des A-Kriteriums.

Häufigkeit	A-Bewertung	Wertebereich
5%	1 - 2	Fehlerursachen an ähnlichen Konstruktionen sind selten oder nicht bekannt; d. h. unwahrscheinlich, dass eine Fehlerursache auftritt.
10%	2 - 4	Die Konstruktion entspricht generell früheren Entwürfen, bei denen eher selten , aber nicht in größerem Maße Fehlerursachen aufgetreten sind.
15%	4 - 7	Die Konstruktion entspricht generell früheren Entwürfen, die in der Vergangenheit eher oft Fehlerursachen verursachten
20%		
30%		
40%	7 - 10	Es ist nahezu sicher, dass Fehlerursachen oft auftreten werden
50%		
60%		
> 70%		

Die Unterscheidung der Stahlwasserbauten findet anhand der Bewegungsart statt, da die Verschlüsse sich in ihrer Konstruktionsweise stark unterscheiden. Bild 11 stellt die Verteilung der Häufigkeit der Fehlerursachen aller UWKs für die OTK Stahlbau dar. Obwohl beispielsweise Korrosionsschäden mit rd. 70 % unabhängig vom Bauwerkstyp die häufigste Fehlerursache ist, weisen Verschlüsse mit einer horizontalen Drehachse relativ zu den anderen Verschlussstypen etwas weniger oft Korrosionsschäden auf (< 70%). Dies rechtfertigt eine geringfügig bessere Bewertung des A-Kriteriums.

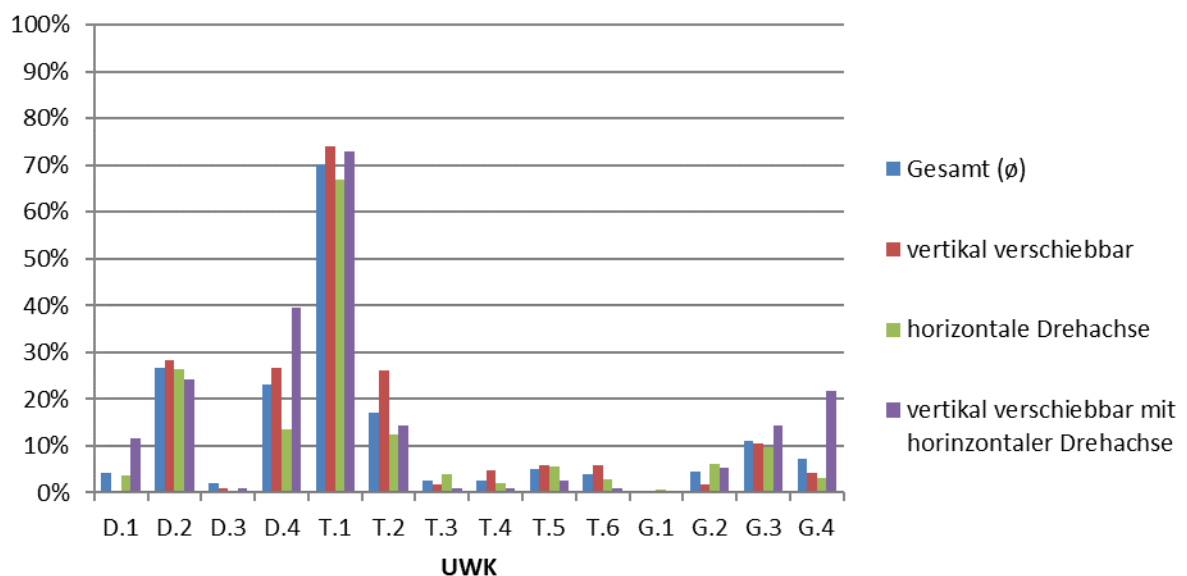


Bild 11: Verteilung der Häufigkeit der Fehlerursachen je Bewegungsart des Verschlussstyps

Die Unterscheidung der Massivbauten beruht hauptsächlich auf den in der Bauzeit geltenden Normanforderungen, der Weiterentwicklung der verwendeten Baumaterialien (Mauerwerk, Beton, Stahlbeton etc.) sowie den Bauausführungsregeln. So wurden im 20. Jahrhundert immer komplexere Schleusenbauwerke in Bezug auf Struktursysteme, Fallhöhe, Länge usw. errichtet. Beispielsweise wurden die vor 1900 errichteten Schleusen, von denen einige heute noch in Betrieb sind (z. B. Schleuse Kiel-Holtenau), entweder aus Stampfbeton oder aus Mauerwerk hergestellt. Von ihrer sehr massiven Bauwerkstruktur scheinen diese Anlagen im Vergleich zu den nach 1950 entworfenen Schleusen der neueren Generation, die hauptsächlich aus Stahlbeton errichtet wurden, weniger schadensanfällig zu sein. Hinsichtlich der Bauart bzw. des Tragsystems bestehen die an den Bundeswasserstraßen hergestellten Schleusen aus Gewichtsstützwänden, Halbrahmen, Spundwänden oder Sonderformen (Sonstiges) (siehe Bild 12). Obwohl der Oberflächenabtrag (D.1) und Risse SK 1/2 Massivbau (D.3) mit jeweils rd. 80 % und 75 % unabhängig vom Bauwerkstyp die häufigsten Fehlerursachen sind, weisen Gewichtsstützwände relativ zu den anderen Konstruktionstypen etwas weniger oft Oberflächenabtrag (< 65%) und Risse SK 1/2 Massivbau (<55 %) auf.

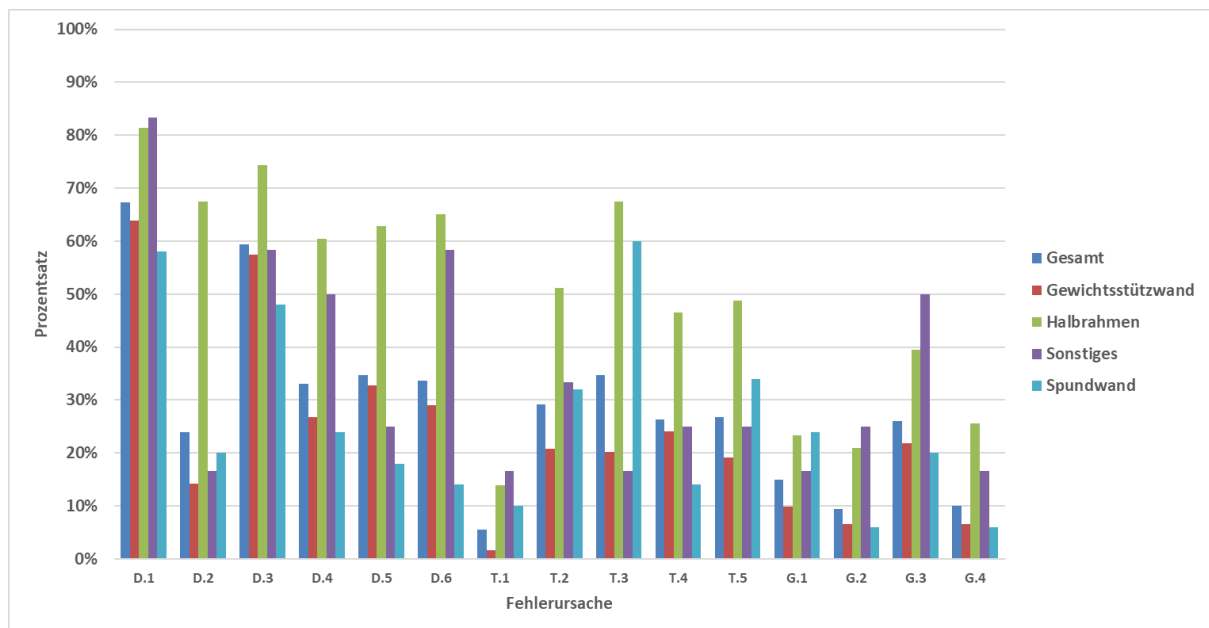


Bild 12: Verteilung der Häufigkeit der Fehlerursachen je Konstruktionstyp

3.4.2.2.4 Erhaltung (E) des Bauwerkszustands in Abhängigkeit einer Fehlerursache

Das E-Kriterium bewertet die Effektivität bzw. die Wirksamkeit der eingeleiteten Maßnahmen zur Abwendung eines Fehlers. Als Messgröße dient im Allgemeinen die Wahrscheinlichkeit, dass die vorhandenen Maßnahmen zur Entdeckung und Beseitigung des Fehlers führen. Da im Rahmen von Bauwerksinspektionen nicht erhoben werden kann, wie viele Schäden unentdeckt bleiben, wird anstelle der Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers der Zustand des Bauwerks in Bezug auf jede UWK bewertet, womit ein Bezug zu den Anforderungen an das Bauwerk (Einhaltung der normativen Anforderungen) gegeben ist. Die Bewertung des E-Kriteriums hängt damit von der Effektivität der in der Vergangenheit bereits durchgeführten Maßnahmen ab und bezieht sich auf das individuelle Einzelbauwerk bzw. Bauwerksteil. Ist beispielsweise das Bauwerk zum Zeitpunkt einer Nachrechnung aufgrund seines Zustands im Notenbereich „ungenügend“, lässt dies den

Rückschluss zu, dass die Anstrengungen zur Erhaltung des Bauwerkszustands in der Vergangenheit nicht ausreichend gewesen sind oder aufgrund von örtlichen Gegebenheiten unmöglich waren. Der Einfluss der UWK auf die Nichteinhaltung von Anforderungen ist dann als hoch einzustufen.

Als Messgröße des E-Kriteriums wird eine Zustandsnote je UWK ($Z_{3,UWK}$) verwendet. Nach Anwendung des Algorithmus zur Ermittlung der Zustandsnote (vgl. Kap. 2.1) ergeben die nach UWK sortierten und gefilterten Schäden eine Zustandsnote, die in Abhängigkeit von den UWK und den jeweils zugeordneten Schäden ermittelt wird (Gl. (7)). Zur Verdeutlichung des Bezugs zum Bewertungskriterium Erhaltung wird $Z_{3,UWK}$ im Folgenden auch Erhaltungsnote genannt. Tabelle 10 zeigt die sich aus den Erhaltungsnoten ergebenden E-Bewertungen.

$$Z_{3,UWK} = \max(Z_1 + \Delta Z_1) + \Delta Z_{2,UWK} \quad (7)$$

mit:

$$1,0 \leq Z_1 \leq 4,0$$

$$0,8 \leq Z_{3,UWK} \leq 4,2$$

Z_1	SK eines Schadens mit der Zuordnung zur jeweiligen UWK
$Z_{3,UWK}$	Ursachenspezifische Zustandsnote bzw. Erhaltungsnote unter Berücksichtigung der m Schäden, die einer UWK zugeordnet sind

ΔZ_1	Beiwert für das Schadensausmaß in Abhängigkeit vom Schadensmerkmal „Menge“:
	klein, gering o. ä. $\Delta Z_1 = -0,1$
	groß, häufig o. ä. $\Delta Z_1 = +0,1$
	für alle anderen/neutral $\Delta Z_1 = 0,0$

$\Delta Z_{2,UWK}$ Beiwert für die Anzahl m der zugeordneten Schäden je UWK:

$m < 3$	$\Delta Z_{2,UWK} = -0,1$
$3 \leq m \leq 5$	$\Delta Z_{2,UWK} = 0,0$
$m > 5$	$\Delta Z_{2,UWK} = +0,1$

Tabelle 10: Wertebereiche für die Bewertungsskala des E-Kriteriums.

Erhaltungsnote $Z_{3,UWK}$	E-Bewertung	Wertebereich
0,8	1 - 2	Die Instandsetzungsbemühungen sind effektiv , wodurch auf eine geringe Verletzlichkeit geschlossen werden kann: die Erhaltung ist daher gut
1,8		
2	2 - 4	Die Instandsetzungsbemühungen sind überwiegend effektiv , wodurch auf eine eher geringe Verletzlichkeit geschlossen werden kann: die Erhaltung ist daher eher gut.
2,2		
2,8	4 - 7	Die Instandsetzungsbemühungen sind weniger effektiv , wodurch auf eine eher hohe Verletzlichkeit geschlossen werden kann: die Erhaltung ist eher schlecht.
3,2		
3,8	7 - 10	Die Instandsetzungsbemühungen sind nicht effektiv , wodurch auf eine hohe Verletzlichkeit geschlossen werden kann: die Erhaltung ist schlecht.
4,2		

3.4.2.3 Risikoprioritätszahl (RPZ)

Die RPZ als Ergebnis der Risikobewertung ist ein Maß für das zu vertretende Risiko, das mit der jeweiligen UWK und damit der Fehlerursache bzw. den Schäden in Verbindung steht. Anhand der RPZ werden die Maßnahmen zur Vermeidung der Fehler, die mit der jeweiligen UWK verbunden sind, priorisiert, um möglichst effektiv die Verlässlichkeit des Systems zu steigern. Maßnahmen zur Vermeidung der Fehler (Nichteinhaltung von normativen Anforderungen) sind damit Instandsetzungsmaßnahmen der zu den entsprechenden UWK gehörenden Fehlerursachen (Schäden). Der Ansatz ermöglicht damit eine Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen.

Die RPZ errechnet sich im klassischen Verfahren durch die Multiplikation der drei Bewertungskriterien B, A und E (Gl. (8)):

$$RPZ = B \times A \times E \quad (8)$$

Je größer die RPZ, desto höher ist die Priorität, mit der Maßnahmen zur Vermeidung des Fehlers ergriffen bzw. verbessert werden sollten. Bei der Verwendung der eingeführten Skala von 1 bis 10 für die drei Bewertungskriterien liegen die möglichen Werte der RPZ zwischen 1 (d. h. vernachlässigbares Risiko) und 1000 (d. h. kritisches Risikoniveau).

In den Fällen, in denen einem Fehler in Abhängigkeit von der Anzahl der zugehörigen UWK mehr als eine RPZ zugeordnet wird, folgt die abschließende Ermittlung der resultierenden RPZ (RPZ_{Fehler}) nach dem Maximalprinzip:

$$RPZ_{Fehler} = \max RPZ_{UWK,Fehler,i} \quad (9)$$

mit:

$$1 \leq RPZ_i \leq 1000$$

RPZ_{Fehler} maßgebende RPZ eines Fehlers

$RPZ_{\text{UWK,Fehler},i}$ RPZ der i-ten UWK, die diesen Fehler betrifft

Das Bewertungsverfahren schafft mit dem Wert RPZ_{Fehler} die Möglichkeit, eine konkrete Aussage über die Risikopriorität des Fehlers zu treffen. Da ein Fehler als das Verfehlen einer geforderten Anforderung definiert ist, stellt die RPZ_{Fehler} einen Kennwert für den anforderungsspezifischen Zustands des Bauwerks dar. Im Kontext des Konzeptes kann damit eine RPZ für die Anforderung Tragfähigkeit als tragfähigkeitsorientierte Kennzahl ermittelt werden. Aus der RPZ wird unmittelbar erkannt, mit welchen Objekten die Erhaltungsmaßnahmen vornehmlich begonnen werden sollten.

3.4.2.4 Risikoprofile

Neben der Risikopriorität einzelner UWK bzw. einzelner Anforderungen erlaubt die Auswertung der Risikobewertung einen Vergleich mehrerer Bauwerke anhand von Risikoprofilen, in denen die RPZ je UWK in einem Diagramm dargestellt werden (Bild 13). Die Risikoprofile ermöglichen eine rudimentäre Abschätzung des erreichten Risikoniveaus. Je höher die Umhüllende der einzelnen RPZ liegt, desto höher liegt das Risikoniveau des Bauwerks. Das Risikoprofil einer größeren Menge an vergleichbaren Anlagenteilen (z. B. die Verschlüsse von 6 Wehrfeldern) wird aus der Überlagerung der Risikoprofile der bewerteten Einzelobjekte erstellt. Die Umhüllende aller Einzelprofile stellt das Risikoprofil der Gesamtmenge dar.

Allerdings wird die Auswertung umso schwieriger, je mehr Objekte in den Vergleich aufgenommen werden. Die Auswertung der Risikoprofile eignet sich daher eher für die Identifikation von Ausschlusskandidaten und weniger zur Reihung einer Vielzahl von Bauwerken.

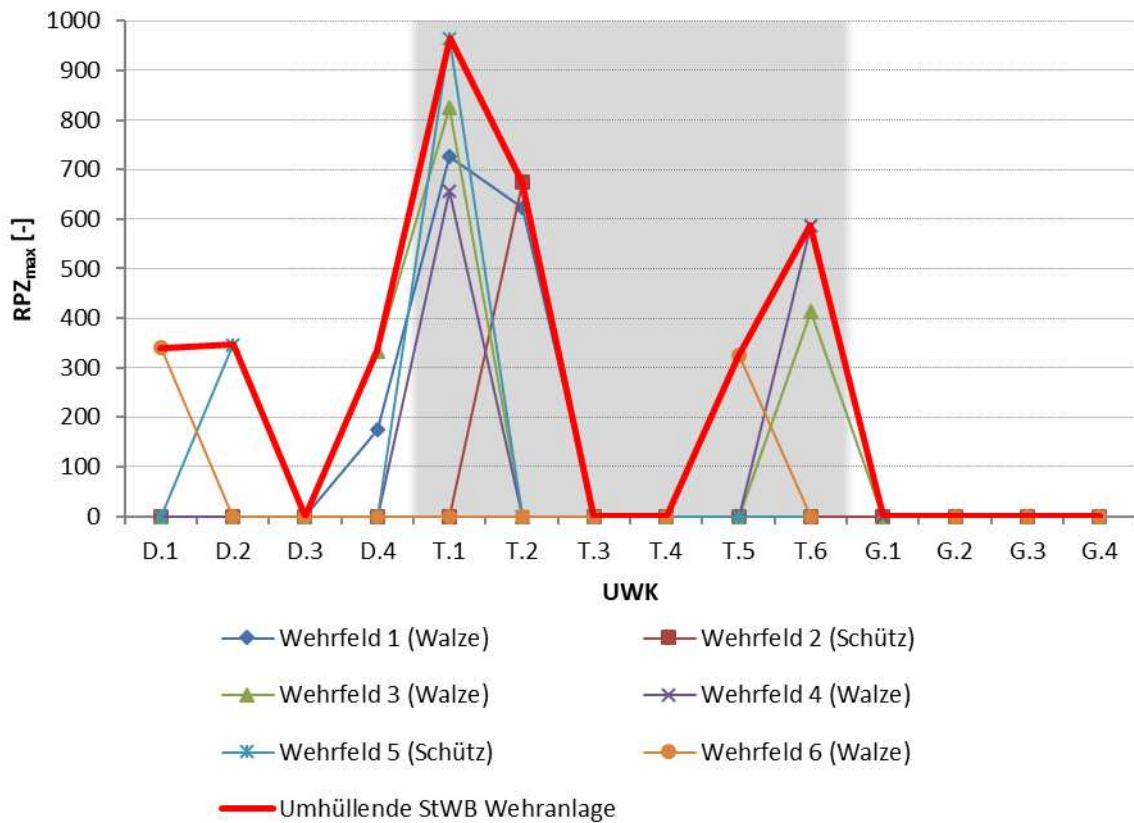


Bild 13: Risikoprofil der stahlwasserbaulichen Anlagenteile einer Wehranlage

3.4.2.5 Beispiel: Risikobewertung mittels RPZ

Die Risikobewertung mittels RPZ wird am Beispiel der Wehrwalze in Feld 1 der Wehranlage Wieblingen für die Anforderung Tragfähigkeit veranschaulicht. In Tabelle 11 sind mit Stand Mai 2016 die Schäden der OTK Stahlbau aufgelistet. Fünf Schäden (Nr. 1 bis Nr. 4 und Nr. 7) sind einer tragfähigkeitsrelevanten UWK zugeordnet. Von der Anforderung Tragfähigkeit sind nur die beiden UWK T.1 (Korrosion mit Querschnittsveränderung) und T.2 (Verlust Verbindungsmittel) betroffen.

Tabelle 11: Schäden am Wehrverschluss der Wehranlage Wieblingen, Feld 1

Nr.	OTK	Schaden	Menge	Schadenstext	UWK	SK	$\Delta Z1$	$\Delta Z_{2,UWK}$	$Z_{3,UWK}$
1	Stahlbau	Kontaktkorrosion (elektrolytische Korrosion)	stellenweise	Der Anschlagpunkt der Edelstahlhubkette ist an den Kontaktstellen ca. 1 mm tief korrodiert.	T.1	2	-0,1	0,1	4,2
2	Stahlbau	angerostet	bereichsweise	Im Innenbereich sind insbesondere im Wasserwechselbereich die Staubleche stellenweise korrodiert.	T.1	2	0,0		
3	Stahlbau	Spaltkorrosion	stellenweise	Rechte Seite.	T.1	2	-0,1		
4	Stahlbau	angerostet	flächendeckend	Die Profile der Kettenauflagekonstruktion (U-Profile) auf eine Bogenlänge von ca. 5 m sind durch flächige Korrosion stark beschädigt. Hier ist stellenweise ein Querschnittsverlust von > 25% festzustellen.	T.1	4	+0,1		
5	Stahlbau	deformiert	eine Stelle	Am linken Seitenschild ist die Oberseite des Versteifungswinkel deformiert.	D.4	1	-0,1	-0,1	0,8
6	Stahlbau	deformiert	eine Stelle		D.4	1	-0,1		
7	Stahlbau	fehlt	bereichsweise	Im Innenbereich sind die Riegel abgängig und zu ersetzen.	T.2	2	0,0	-0,1	1,9

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der RPZ-Ermittlung.

Die Bewertung des B-Kriteriums findet anhand von Expertenwissen unter Zuhilfenahme von Tabelle 6 und Tabelle 7 statt. Beiden betroffenen Fehlerfolgen wird ein hoher Einfluss auf die Nachweise zur Tragfähigkeit unterstellt (B=8).

Aufgrund der statistischen Auswertung der Daten ist die relative Häufigkeit der UWK für den Bauwerkstyp „vertikal verschiebbar mit horizontaler Drehachse“ bekannt (vgl. Bild 11). Die Bewertung des A-Kriteriums findet anhand der Zuordnung gem. Tabelle 9 statt. Während die Korrosion als Fehlerursache oft auftritt (A=10) ist der Verlust von Verbindungsmitteln eher selten (A=4).

Aus der Schadensdatenbank zu dem Bauwerk gehen die Grundlagen für die Ermittlung der Erhaltungsnote $Z_{3,UWK}$ nach Gl. (7) hervor. Die Berechnung der Erhaltungsnoten ist in Tabelle 11 dargestellt. Für die UWK T.1 (Korrosion) ergibt sich an der Wehrwalze ein schlechter Erhaltungszustand mit einer Erhaltungsnote von 4,2, was gemäß Tabelle 10 zu einer Bewertung E=10 führt.

Die UWK T.2 weist demgegenüber eine Erhaltungsnote von 1,9 auf, was auf einen guten Erhaltungszustand schließen lässt und eine Bewertung E=2 ergibt (Tabelle 10).

Aus der Multiplikation der Bewertungskriterien nach Gl. (8) ergeben sich für die beiden UWK T.1 und T.2:

$$RPZ_{T.1} = 8 \cdot 10 \cdot 10 = 800$$

$$RPZ_{T.2} = 8 \cdot 4 \cdot 2 = 64$$

Damit existieren für die Anforderung an die Tragfähigkeit bzw. für den Fehler „Tragfähigkeit betroffen“ zwei RPZ, was zur Anwendung des Maximalprinzips führt. Mit Gl. (9) ergibt sich die RPZ_T für die Anforderung „Tragfähigkeit betroffen“ zu

$$RPZ_T = \max[800, 64] = 800$$

Tabelle 12: Risikobewertung der Wehrwalze in Feld 1 der Wehranlage Wieblingen

		Ursache- Wirkungskette (UWK)			Wehrwalze Feld 1 Wieblingen				
Anforderung	Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	Nr.	B	A	E	RPZ	RPZ _{Fehler}
Tragfähigkeit (T)	Tragfähigkeit betroffen	kontinuierlicher Versagensverlauf	Korrosion mit Querschnittsveränderung	T.1	8	1	1	800	800
			Verlust Verbindungsmittel	T.2	8	4	2	64	
		Plötzliches Versagen	Toleranzabweichung	T.3	7	1	-		
			Gewalteinwirkung	T.4	7	1	-		
		„statischer“ Zustand	grundsätzliche Fehler/Abweichungen in Lastannahmen oder Konstruktion	T.5	8	1	-		
			Zwangszustände (Lageabweichung, etc.)	T.6	8	3	-		

Im Wertebereich der RPZ von 1 bis 1000 ist dies ein relativ hoher Wert, der im Vergleich mit den Ergebnissen anderer Bauteile bzw. Bauwerke zu einer Priorisierung im Rahmen des Erhaltungsmanagements ergänzend berücksichtigt werden kann.

4 RPZ-Berechnung anhand der Fuzzy-Logik

4.1 Kritik an der klassischen RPZ

Die klassische Vorgehensweise zur Berechnung der RPZ als Produkt der Bewertungskriterien (siehe Gl. (8)) und die damit verbundenen Einschränkungen werden an vielen Stellen in der Literatur kritisiert (z. B. Liu 2016). Mit zu den am häufigsten erwähnten Kritikpunkten zählen:

- In der klassischen Risikobewertung mittels Multiplikation lassen sich bei drei Risikokriterien mit einer jeweils 10-teiligen Bewertungsskala lediglich 120 Werte für die RPZ generieren, was die Interpretation der Bedeutung der Unterschiede zwischen verschiedenen RPZs sowie die Differenzierung der UWK hinsichtlich der Risikopriorität einschränkt. Mit vielen nicht möglichen Werten in der Skala sind die RPZ nicht kontinuierlich. Obwohl die Werte der RPZs einen Bereich von 1 bis 1000 abdecken, sind 88 % des Wertebereichs nicht gefüllt (Bowles 2004). Ebenso sind die RPZ-Werte ungleich verteilt. Beispielsweise ist 1000 die höchste Zahl auf der Skala, aber 900 ist die zweithöchste, gefolgt von 810, 800, 729 und 720.
- Aufgrund der ordinalen Bewertungsskalen der Kriterien B, A und E entbehrt die Berechnung der RPZ mittels Multiplikation jeglicher mathematischen Grundlage. Ordinale Bewertungsskalen geben den Rang eines Kriteriums in einer Reihe an, aber sie liefern keine Hinweise über den Abstand zwischen den Kriterien. Mit ordinalen Bewertungsskalen kann angegeben werden, dass ein Kriterium mehr oder weniger von einer Eigenschaft hat als ein anderes, aber nicht, wie viel mehr oder wie viel weniger (Bowles 2004).
- Eine unterschiedliche Wichtung der Eingangsgrößen ist nicht vorgesehen. Die Ergebnisgröße ist somit linear abhängig von den Eingangsgrößen.
- Unvermeidbare Unsicherheiten bei der qualitativen Bewertung der Risikokriterien auf Grundlage von Expertenwissen bleiben unberücksichtigt.

Als alternatives Berechnungsverfahren hat sich die Fuzzy Logik etabliert, die neben der Subjektivität und Vagheit bei der Entscheidung über eine Bewertung auch eine relative Wichtung und eine flexiblere Struktur für die Kombination der Bewertungskriterien erlaubt (Bowles und Peláez 1995).

4.2 Fuzzy-Logik in Entscheidungssituationen

In Entscheidungssituationen, wie die Bewertung eines Sachverhalts anhand vorgegebener Kriterien, werden oftmals Experten zu Rate gezogen, die aufgrund ihres Wissensschatzes eine subjektive Einschätzung der Situation abgeben können. Die Vagheit, die bei der Beschreibung der semantischen Bedeutungen solcher Aussagen entsteht, wird mit Unschärfe (engl.: *fuzziness*) bezeichnet und kann durch stochastische Methoden in der Regel nicht erfasst werden (Möller und Beer 2004). Unschärfe als Form der Unsicherheit tritt demzufolge immer dort auf, wo menschliche Urteilskraft, individuelle Bewertungen und persönliche Entscheidungen wichtig sind (z. B. Entscheidungsfindung, Argumentation, Lernvorgänge, ungenaue Daten, verbal formulierte Bewertungen).

Zur Berücksichtigung dieser Formen von Unsicherheit steht die von Zadeh (1965) entwickelte Fuzzy-Mengen-Theorie zu Verfügung. Sie stellt eine Erweiterung der klassischen Mengenlehre dar und geht davon aus, dass jedes präzise Element eines Betrachtungsraums gleichzeitig einer jeden Teilmenge dieses Betrachtungsraums zu einem unterschiedlichen Grad zugehörig ist. Der Zugehörigkeitsgrad μ eines Elements zu den Teilmengen (d. h. der Wahrheitsgehalt der Aussage „Element x liegt in Teilmenge A “) wird über die Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt und mit einer Zahl aus dem Intervall zwischen 0 und 1 beziffert. Der größte Unterschied zwischen einer scharfen und unscharfen Menge besteht darin, dass die scharfe Menge genau eine einzige Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ besitzt. Die unscharfe Menge hingegen kann durch eine unendliche Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen repräsentiert werden.

Eine unscharfe Menge A ist auf einer von vorneherein gegebenen Grundmenge X durch eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu^A(x)$ charakterisiert, welche jedem Objekt x der Grundmenge X einen Zugehörigkeitsgrad zur Menge A im Intervall $[0, 1]$ zuordnet. Die Verwendung einer numerischen Skala erlaubt eine einfache und übersichtliche Darstellung der Zugehörigkeitsgrade. Je näher der Funktionswert $\mu^A(x)$ bei 1 liegt, desto größer ist der Grad der Zugehörigkeit von x zur unscharfen Menge A . Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, ist zu beachten, dass Zugehörigkeitswerte stets Ausdruck der subjektiven Einschätzung von Individuen oder von Gruppen sind. Die Zugehörigkeitswerte hängen darüber hinaus von der Grundmenge X ab. Werden die Teilmengen mit linguistischen Begriffsreihen benannt, erlauben die fließenden Übergänge in der Zugehörigkeit eines Elements zu den Teilmengen unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten der semantischen Bedeutung eines vermeintlich präzisen Werts.

Bild 14 zeigt eine Bewertungsskala für eine Variable V , deren Wertebereich mit einer linguistischen Begriffsreihe ausgedrückt werden kann. Hinter jedem Begriff steht eine Fuzzy-Menge, die durch ihre Zugehörigkeitsfunktion eindeutig beschrieben wird (hier: dreiecks- und trapezförmig). Der Zugehörigkeitsgrad $\mu^V(x)$ beschreibt, inwieweit ein präziser Wert auf der Bewertungsskala mit den Fuzzy-Mengen und den damit verbundenen Begriffen beschrieben werden kann. Fuzzy-Mengen werden über ihre Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Aufstellung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausprägungen der linguistischen Variablen nicht nur das Wissen von Experten des Anwendungsgebietes, sondern, soweit vorhanden, auch das in Datenbanken gespeicherte Wissen herangezogen werden sollte.

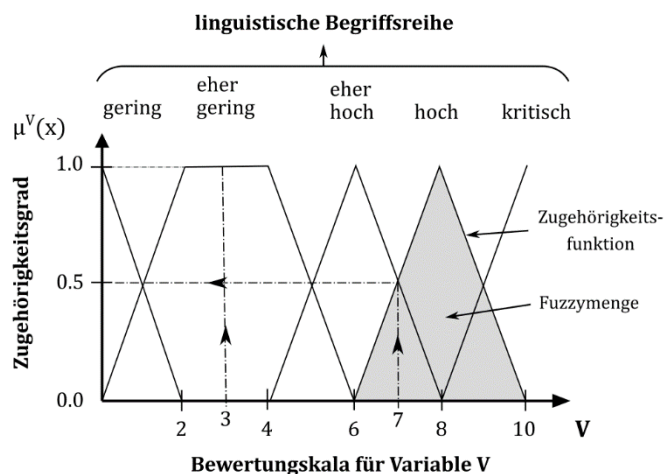


Bild 14: Übersicht zu den Begriffen der Fuzzy-Logik

Auf diese Weise ermöglicht die Fuzzy-Logik die Berücksichtigung von Unsicherheit im Umgang mit qualitativen Informationen (Zimmermann 2001). Die Übermittlung des Zugehörigkeitsgrades bestimmter Werte einer linguistischen Variablen wird anhand der beiden Werte 3 und 7 veranschaulicht.

$$\mu_{gering}^V(3) = 0; \mu_{eher\ gering}^V(3) = 1; \mu_{eher\ hoch}^V(3) = 0; \mu_{hoch}^V(3) = 0; \mu_{kritisch}^V(3) = 0$$

$$\mu_{gering}^V(7) = 0; \mu_{eher\ gering}^V(7) = 0; \mu_{eher\ hoch}^V(7) = 0,5; \mu_{hoch}^V(7) = 0,5; \mu_{kritisch}^V(7) = 0$$

Die beiden Vektoren, die den Zugehörigkeitsgrad der Werte 3 und 7 für die Variable V aus dem Beispiel beschreiben, sind $\overline{\mu^V}(3) = (0; 1; 0; 0; 0)$ und $\overline{\mu^V}(7) = (0; 0; 0,5; 0,5; 0)$.

4.3 Berechnen einer Ergebnisgröße mittels Fuzzy-Logik

4.3.1 Überblick

Die Fuzzy-Mengen-Theorie ermöglicht die transparente und nachvollziehbare Abbildung einer erfahrungsgestützten Entscheidungslogik. Die Berechnung der Fuzzy-RPZ im Rahmen des Konzeptes für die tragfähigkeitsbezogene Bewertung bestehender Konstruktionen baut auf den Verfahren von Bowles und Peláez (1995) und Rommelfanger und Eickemeier (2002) auf.

Der grundlegende Ablauf eines auf Fuzzy-Logik basierten Verfahrens besteht in der Regel aus drei Schritten (vgl. Bild 15). Die durch Fuzzifizierung der scharfen Eingangsgrößen ermittelten fuzzifizierten Eingangsgrößen werden mithilfe von Fuzzy-Inferenzverfahren zu einer fuzzifizierten Ergebnisgröße kombiniert. Durch Defuzzifizierung werden fuzzifizierte Ergebnisgrößen in eine präzise bzw. scharfe Ergebnisgröße rückgerechnet.

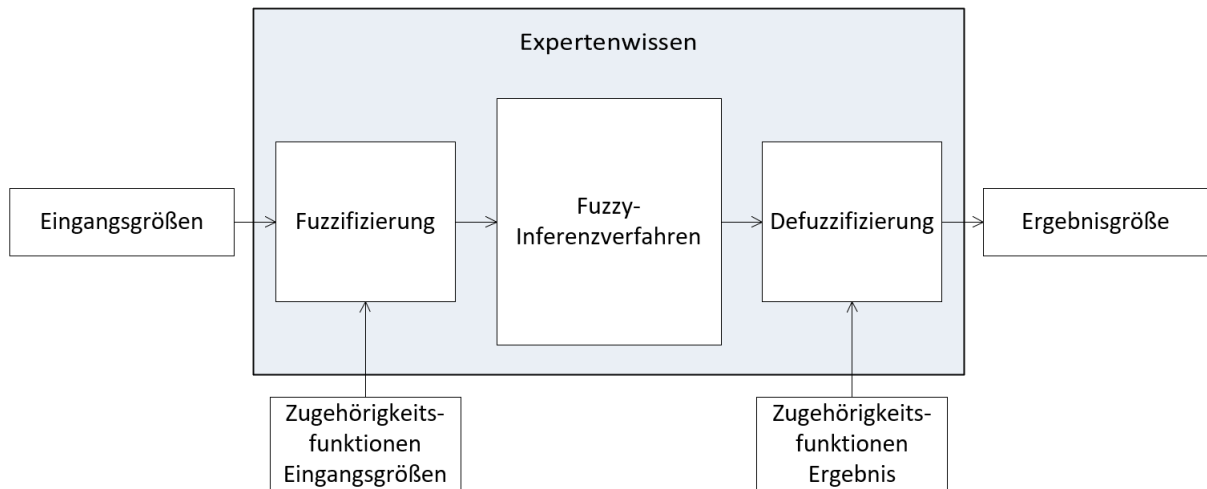


Bild 15: Bausteine der Ermittlung einer Ergebnisgröße mit Hilfe von Fuzzy-Logik

4.3.2 Fuzzifizierung

4.3.2.1 Erläuterung

Unter Fuzzifizierung versteht man das Überführen von präzisen Werteskalen in Fuzzy-Variablen. Damit die Fuzzy-Logik in ein bestehendes Verfahren eingeführt werden kann, sind die Wertebereiche jeder Eingangs- und der Ergebnisgröße lückenlos anhand von Fuzzy-Mengen und deren Zugehörigkeitsfunktionen zu beschreiben. Die Gestaltung der Fuzzy-Mengen beruht auf Expertenwissen und spiegelt die subjektive Wahrnehmung der befragten Personen zum jeweiligen Sachverhalt wider. In der Regel geschieht dies im Rahmen von Experteninterviews oder Gruppendiskussionen, damit die erzeugten Fuzzy-Variablen auf einem breiten Wissensfundament beruhen und die Ergebnisse auf möglichst große Akzeptanz stoßen. Obwohl die Zugehörigkeitsfunktionen theoretisch einem beliebigen Verlauf folgen können, beschränkt man sich in der Praxis auf eine Dreiecks-, Glocken- oder Trapezform, die mathematisch einfach zu beschreiben und zu verarbeiten sind.

4.3.2.2 Fuzzy-Mengen-Partitionierung

Die Zugehörigkeitsfunktionen bzw. -werte werden im Hinblick auf die festgelegte Zielgröße der Risikobewertung stets an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst. Die gewählte Form einer Zugehörigkeitsfunktion spielt bei der Wahl der Fuzzy-Mengen und für die Bildung des Endergebnisses eine wesentliche Rolle.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sind die Fuzzy-Mengen der Bewertungskriterien und der RPZ so gewählt, dass sie zur Veranschaulichung des Konzeptes dienen. Zur praktischen Anwendung des Konzeptes bedürfen die Annahmen über die Gestalt der Fuzzy-Mengen einer eingehenden Überprüfung und Diskussion. Dabei wird der Empfehlung gefolgt, die scharfen Eingangsgrößen in lediglich drei bis vier Fuzzy-Mengen aufzulösen, da ansonsten die Gefahr besteht, dass der Bedeutungsunterschied zwischen den einzelnen linguistischen Termen nicht deutlich genug ist und die Bewertung dadurch willkürlich erfolgt.

Da durch die Anwendung eines Fuzzy-Verfahrens mathematisch nicht kompatible Einheiten miteinander verschränkt werden können, müssen die Bewertungskriterien nicht wie in einer klassischen FMEA zwangsläufig in eine einheitenlose Bewertungsskala übertragen werden.

4.3.2.3 Anwendung auf die Bewertungskriterien einer FMEA

Die Aufgabe besteht in einem ersten Schritt darin, die scharfen Eingangsgrößen in Form der drei Bewertungskriterien B, A, E und der RPZ zu fuzzifizieren.

Bis bessere Ergebnisse zur Bewertung einzelner Objekttypen vorliegen, werden für eine Fuzzifizierung des B-Kriteriums die vier Zugehörigkeitsfunktionen gleichmäßig über die Bewertungsskala verteilt (siehe Tabelle 13 und Bild 16).

Tabelle 13: Zugehörigkeitsfunktionen des Bewertungskriteriums B

		Bedeutung (B)			
$\mu^B(x)$	gering	eher gering	eher hoch	hoch	
0		1	4	7,5	
1		2,5	6	9	
1	1	4	7,5	10	
0	2,5	6	9		
Form:	Dreieck	Trapez	Trapez	Trapez	

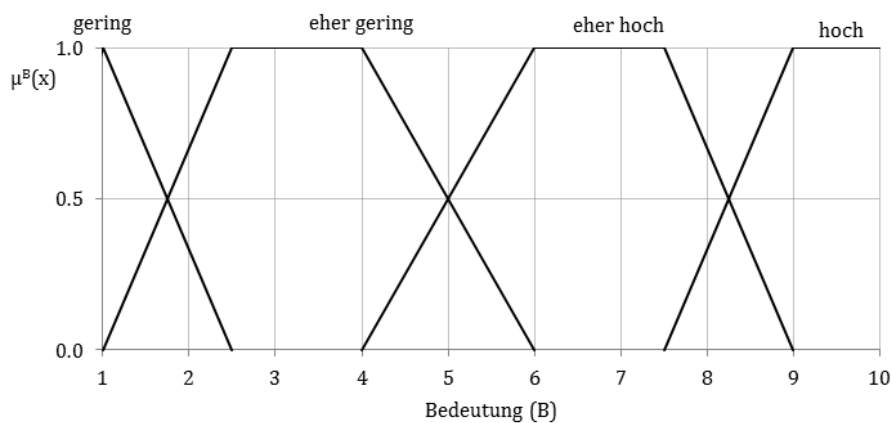


Bild 16: Darstellung der Fuzzifizierung der Eingangsgröße B

In Tabelle 14 sind die Zahlenwerte für die Unterteilung der vier Fuzzy-Mengen des A-Kriteriums angegeben, in Bild 17 grafisch dargestellt. Wie bereits in Kapitel 4.3.2.2 beschrieben, werden die Wertebereiche einzelner Fuzzy-Mengen der drei Risikokriterien an ihre scharfen Eingangsgrößen angepasst. Da der wesentliche Teil der Fehlerursachen tatsächlich mit einer relativen Häufigkeit von weniger als 40 bis 50 % auftritt, besteht die Aufteilung der linguistischen Variablen „Auftreten“ aus einer Kombination von sowohl dreieckigen als auch trapezförmigen Fuzzy-Mengen.

Tabelle 14: Zugehörigkeitsfunktionen des Bewertungskriteriums A

Auftreten (A)				
$\mu^A(x)$	selten	eher selten	eher häufiger	häufig
0		0 %	10 %	35 %
1		10 %	25 %	70 %
1	0 %	10 %	35 %	100 %
0	10 %	25 %	70 %	
Form:	Dreieck	Dreieck	Trapez	Trapez

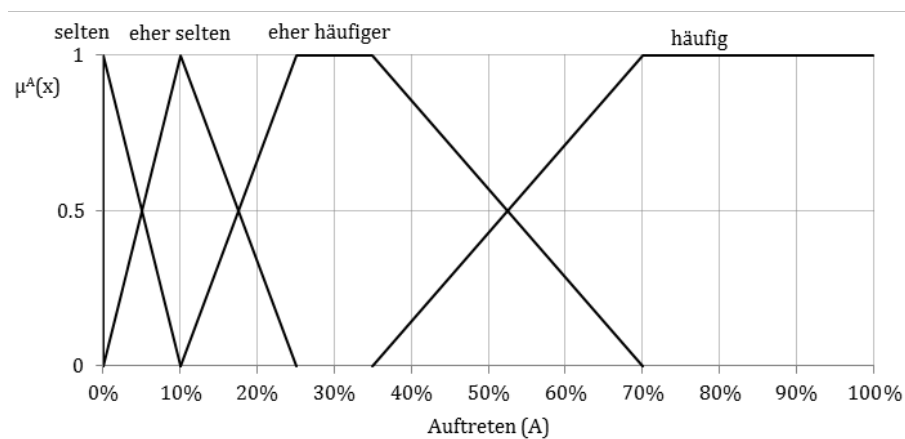


Bild 17: Darstellung der Fuzzifizierung der Eingangsgröße A

Das E-Kriterium richtet sich nach dem aktuellen Zustand des Bauwerks. Der Systematik der Zustandsbenotung folgend entsprechen die Schadenklassen 1 bis 4 den Maxima der Fuzzy-Mengen. Die Anpassungen durch die Modifikationsbeiwerte ΔZ_1 und ΔZ_2 ändern dagegen nur geringfügig etwas an der Aussagekraft einer Schadensklasse. Die Anpassung von $Z_{3,FU} = 4.0$ auf $Z_{3,FU} = 3.8$ zum Beispiel ändert nur geringfügig etwas an der Aussage, dass die Instandhaltungsbemühungen nicht effektiv waren und das Bauwerk in einem schlechten Zustand ist. Tendenziell sind sie jedoch etwas effektiver als bei einer Bewertung mit $Z_{3,FU} = 4$. Dies wird in der Form einer Glockenkurve beschrieben (siehe Tabelle 15 und Bild 18).

Tabelle 15: Zugehörigkeitsfunktionen des Bewertungskriteriums E

Erhaltung (E)				
$\mu^E(x)$	gut	eher gut	eher schlecht	schlecht
0		1.0	2.0	3.0
0,05		1.1	2.1	3.1
0,1		1.2	2.2	3.2
0,9		1.8	2.8	3.8
0,95		1.9	2.9	3.9
1	0.8	2.0	3.0	4.0
1	1.0	2.0	3.0	4.2
0,95	1.1	2.1	3.1	
0,9	1.2	2.2	3.2	
0,1	1.8	2.8	3.8	
0,05	1.9	2.9	3.9	
0	2.0	3.0	4.0	

Form: "Glocke" "Glocke" "Glocke" "Glocke"

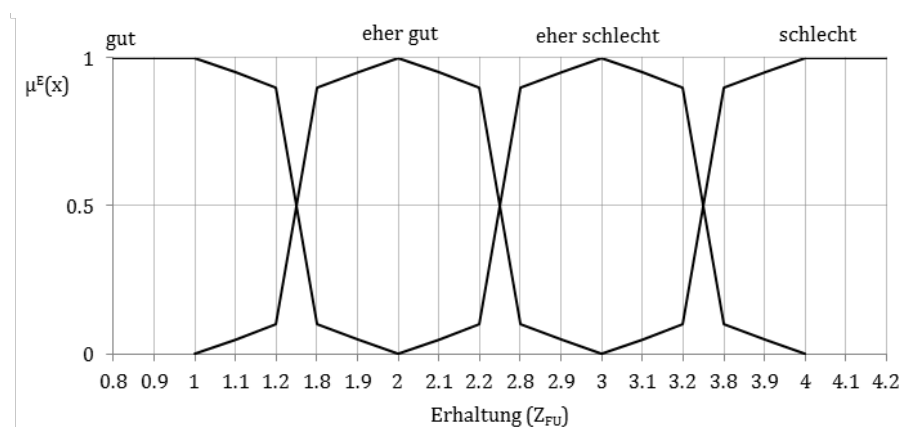


Bild 18: Darstellung der Fuzzifizierung der Eingangsgröße E

In einem nächsten Schritt ist auch die Ausgangsgröße in Form der RPZ zu fuzzifizieren. Die fuzzifizierte scharfe Ergebnisgröße für die Ausgangsvariable „Risikopriorität“ besteht in diesem Fall aus sieben dreieckförmigen Fuzzy-Mengen (siehe Tabelle 16).

Die im Vergleich zu den fuzzifizierten Eingangsgrößen relativ feine Auflösung des Ergebnisraums erlaubt eine differenzierte Aussage über das Resultat der Risikobewertung. Bild 19 zeigt die grafische Darstellung der für die Ergebnismenge RPZ gewählten Fuzzifizierung.

Tabelle 16: Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzy-Mengen der Ergebnismenge RPZ

$\mu_{RPZ}(x)$	RPZ						
	vernachl.	gering	eher gering	moderat	eher hoch	hoch	kritisch
0		0	175	325	500	675	825
1	0	175	325	500	675	825	1000
0	175	325	500	675	825	1000	
Form:	Dreieck	Dreieck	Dreieck	Dreieck	Dreieck	Dreieck	Dreieck

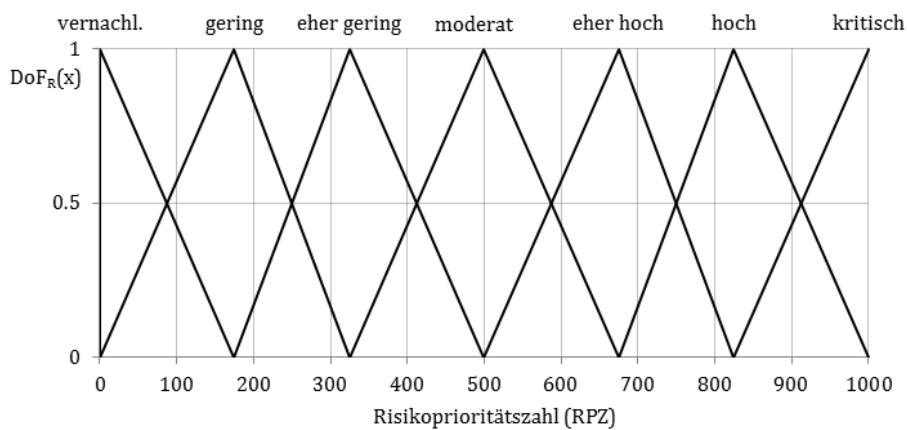


Bild 19: Darstellung der Fuzzifizierung der Ergebnismenge RPZ

4.3.3 Fuzzy-Inferenzverfahren

4.3.3.1 Allgemeines

Um zu ermitteln, wie aus den fuzzifizierten Eingangsgrößen eine Fuzzy-Ergebnisgröße ermittelt wird, steht eine Reihe von Fuzzy-Inferenzverfahren zur Verfügung (Rommelfanger 1994). Als Fuzzy-Inferenz bezeichnet man den Abbildungsprozess der gegebenen Eingangsvariablen auf einen Ausgangsraum über einen auf Fuzzy-Logik basierenden Ableitungsmechanismus. Fuzzy-Mengen werden in diesem Zusammenhang zur inhaltserhaltenden formalen Abbildung von menschlichem Wissen eingesetzt. Auf diese Weise gelingt es, menschliches Erfahrungswissen elektronisch zu verarbeiten.

Da die Verwendung linguistischer Variablen mathematische Operationen ausschließt, geschieht in den Fuzzy-Inferenzverfahren die Verarbeitung der Fuzzy-Eingangsgrößen zu einer Fuzzy-Ergebnisgröße mit Hilfe von logischen Operatoren und Regelsätzen, durch die das unscharfe Wissen von Experten über kausale Zusammenhänge und Abhängigkeiten einzelner Größen des Problems in der natürlichen Sprache abgebildet werden kann. Darüber hinaus sind Regeln zur Festlegung des Wahrheitsgehalts der resultierenden Aussage notwendig.

4.3.3.2 Regelbasis

Die Verwendung von WENN-DANN-Regeln entspricht im Umgang mit Entscheidungen der Art des menschlichen Denkens und zeigt, wie sich Fuzzy Logik die linguistischen Gewohnheiten von Menschen zu Nutze macht (Rommelfanger und Eickemeier 2002). Die Regeln legen fest, welche

Kombination aus Fuzzy-Eingangsgrößen welche Fuzzy-Ergebnisgröße aktiviert („WENN Eingangsgröße X den Wert i UND Eingangsgröße Y den Wert j einnimmt, DANN erhält die Ergebnisgröße Z den Wert k“). Die Anwendung von Entscheidungshilfen bei der Ermittlung einer Ergebnisgröße, die auf Matrizen basieren, verdeutlicht diese regelgebundene Denkweise, die sich auch das Fuzzy-Inferenzverfahren zu eigen macht: WENN die Schadensfolgen für Menschleben „hoch“ sind UND die Eintrittswahrscheinlichkeit „gering“, DANN ist das zu vertretende Risiko im Bereich „moderat“.

In der Regelbasis kann sich die Wichtung der einzelnen Bewertungskriterien widerspiegeln und anhand von Meta-Regeln festgelegt werden (z. B. „Eingangsgröße X lässt die Ergebnisgröße Z schneller ansteigen als die Eingangsgröße Y“).

Die Anzahl der benötigten Regeln (n_{Regel}) richtet sich dabei nach der Anzahl der Eingangsvariablen (n_{in}) und der Anzahl der Elemente in der entsprechenden Begriffsreihe ($n_{\text{term},i}$). Wenn alle Eingangsvariablen die gleiche Anzahl n_{Term} von Elementen in der Begriffsreihe haben, vereinfacht sich die Formel zu (Rommelfanger und Eickemeier 2002):

$$n_{\text{Regel}} = n_{\text{term}}^{n_{\text{in}}} \quad (10)$$

Im vorliegenden Fall sind folglich $n_{\text{Regel}} = 4^3 = 64$ Regeln erforderlich.

Die 64 Kombinationsregeln sind in Tabelle 17 dargestellt. Die Regeln sind so gestaltet, dass sie einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den Bewertungskriterien widerspiegeln. Beispielsweise hat das Kriterium „Bedeutung“ einen größeren Einfluss auf die RPZ als das Kriterium „Erhaltung“. Während für die Kombination B = niedrig, A = selten der Wechsel des E-Kriteriums von „gut“ zu „schlecht“ den Notenbereich der RPZ von „vernachlässigbar“ nach „eher gering“ verschiebt (vgl. Regeln Nr. 1 bzw. 49), geschieht über den Bewertungsbereich des B-Kriteriums eine Erhöhung der Risikopriorität von „vernachlässigbar“ hin zu „moderat“ (vgl. Regel Nr. 1 und 4).

Tabelle 17: Regelsatz des verwendeten Fuzzy-Inferenzverfahrens

Regel-Nr.	Eingangsgrößen			Ergebnisgröße
	Bedeutung	Auftreten	Erhaltung	Risiko
1	gering	selten	gut	vernachlässigbar
2	eher gering	selten	gut	gering
3	eher hoch	selten	gut	eher gering
4	hoch	selten	gut	moderat
5	gering	eher selten	gut	gering
6	eher gering	eher selten	gut	eher gering
7	eher hoch	eher selten	gut	moderat
8	hoch	eher selten	gut	eher hoch
9	gering	eher häufiger	gut	gering
10	eher gering	eher häufiger	gut	eher gering
11	eher hoch	eher häufiger	gut	moderat
12	hoch	eher häufiger	gut	eher hoch
13	gering	häufig	gut	eher gering
14	eher gering	häufig	gut	moderat
15	eher hoch	häufig	gut	moderat
16	hoch	häufig	gut	eher hoch
17	gering	selten	eher gut	gering
18	eher gering	selten	eher gut	eher gering
19	eher hoch	selten	eher gut	moderat
20	hoch	selten	eher gut	eher hoch
21	gering	eher selten	eher gut	gering
22	eher gering	eher selten	eher gut	eher gering
23	eher hoch	eher selten	eher gut	moderat
24	hoch	eher selten	eher gut	eher hoch
25	gering	eher häufiger	eher gut	eher gering
26	eher gering	eher häufiger	eher gut	moderat
27	eher hoch	eher häufiger	eher gut	eher hoch
28	hoch	eher häufiger	eher gut	hoch
29	gering	häufig	eher gut	eher gering
30	eher gering	häufig	eher gut	moderat
31	eher hoch	häufig	eher gut	eher hoch
32	hoch	häufig	eher gut	hoch
33	gering	selten	eher schlecht	gering
34	eher gering	selten	eher schlecht	eher gering
35	eher hoch	selten	eher schlecht	moderat
36	hoch	selten	eher schlecht	eher hoch
37	gering	eher selten	eher schlecht	eher gering
38	eher gering	eher selten	eher schlecht	moderat
39	eher hoch	eher selten	eher schlecht	eher hoch
40	hoch	eher selten	eher schlecht	hoch
41	gering	eher häufiger	eher schlecht	eher gering
42	eher gering	eher häufiger	eher schlecht	moderat
43	eher hoch	eher häufiger	eher schlecht	eher hoch
44	hoch	eher häufiger	eher schlecht	hoch
45	gering	häufig	eher schlecht	moderat
46	eher gering	häufig	eher schlecht	eher hoch
47	eher hoch	häufig	eher schlecht	hoch
48	hoch	häufig	eher schlecht	kritisch
49	gering	selten	schlecht	eher gering
50	eher gering	selten	schlecht	moderat
51	eher hoch	selten	schlecht	eher hoch
52	hoch	selten	schlecht	hoch
53	gering	eher selten	schlecht	eher gering
54	eher gering	eher selten	schlecht	moderat
55	eher hoch	eher selten	schlecht	eher hoch
56	hoch	eher selten	schlecht	hoch
57	gering	eher häufiger	schlecht	moderat
58	eher gering	eher häufiger	schlecht	eher hoch
59	eher hoch	eher häufiger	schlecht	hoch
60	hoch	eher häufiger	schlecht	kritisch
61	gering	häufig	schlecht	moderat
62	eher gering	häufig	schlecht	eher hoch
63	eher hoch	häufig	schlecht	hoch
64	hoch	häufig	schlecht	kritisch

Die Eingangsvariablen können ein oder zwei linguistische Variable ansprechen. Z. B. führt eine Bedeutung von 3 zu einer fuzzifizierten Eingangsgröße von „1,0 eher gering“, eine Bedeutung von 5 zu „0,5 eher gering“ und „0,5 eher hoch“. Bei der Anwendung der Wenn-Dann-Regeln müssen alle Anteile berücksichtigt werden, sodass im ungünstigsten Fall, wenn alle drei Eingangsgrößen zwei linguistische Variablen ansprechen, fünf Wenn-Dann-Regeln anzuwenden sind. In der Folge können maximal fünf verschiedene linguistische Variable des Ausgangsraumes aktiviert werden.

Zu beachten ist, dass die Wenn-Dann-Regeln nur die linguistische Variable berücksichtigen, nicht den Zugehörigkeitsgrad.

4.3.3.3 Implikation

Der Übertrag der Zugehörigkeitsgrade der beteiligten Fuzzy-Eingangsgrößen auf die durch die Kombinationsregeln aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen legt den Zugehörigkeitsgrad der Ergebnisgröße fest. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird auf die bei Entscheidungsfindungen bevorzugte Kombination aus der Mamdani-Implikation und der max-Prod-Inferenz zurückgegriffen (Rommelfanger und Eickemeier 2002).

Wesentlich für das Verständnis der Mamdani-Implikation ist die Interpretation der Regeln. Die Mamdani-Implikation basiert auf der Idee, dass der Erfüllungsgrad des DANN-Teils (Konklusion) nicht größer als der Erfüllungsgrad des WENN-Teils (Prämisse) sein sollte. Daher wird der Erfüllungsgrad der Prämisse für die vorliegenden Eingangswerte in Form des Minimums der jeweiligen Erfüllungsgrade zu den entsprechenden Fuzzy-Mengen bestimmt. Bild 20 veranschaulicht diese Vorgehensweise an einem fiktiven Beispiel. Eingangsgröße A hat einen größeren Zugehörigkeitsgrad zum Begriff (eh) und Eingangsgröße B einen kleineren Zugehörigkeitsgrad zum Begriff (eg). Ausgehend von dem entsprechenden Regelsatz „Wenn A (eh) ist und B (eg) ist, dann ist R (eh)“ wird die linguistische Ergebnisgröße bestimmt (eh), der Zugehörigkeitsgrad ist auf Basis der Mamdani-Implikation der kleinere Wert des Zugehörigkeitsgrades, in diesem Fall der Zugehörigkeitsgrad der Eingangsgröße B.

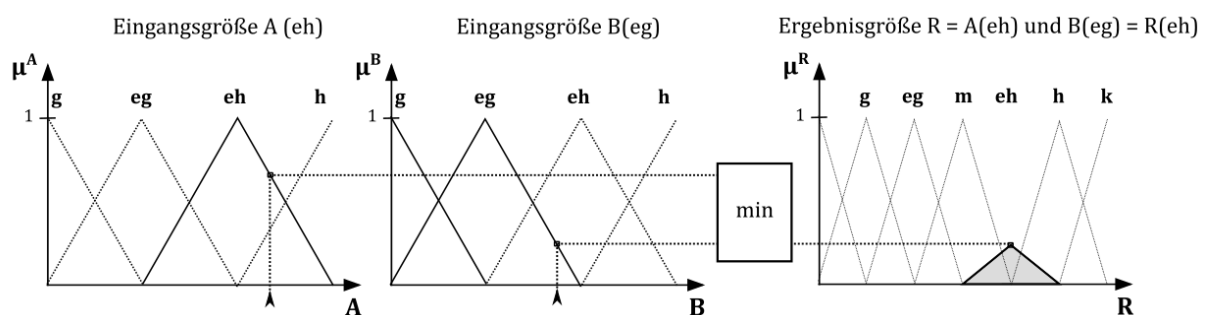


Bild 20: Wirkung der Mamdani-Implikation auf die Ergebnisgröße

4.3.3.4 Akkumulation der Zugehörigkeitsgrade der Fuzzy-Ergebnisgrößen

Im Laufe des Inferenzverfahrens kann eine Fuzzy-Ergebnisgröße in Abhängigkeit von den fuzzifizierten Eingangsgrößen und der Kombinationsregeln mehr als einmal aktiviert werden. In diesen Fällen wird der resultierende Zugehörigkeitsgrad (DoF_{sum}) über die algebraische Summe der Einzelwerte (DoF_i) bestimmt (Rommelfanger 1994). Durch die Verwendung der algebraischen Summe fließen die Erfüllungsgrade sämtlicher aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen in das Ergebnis

ein und unsinnige Werte von größer 1,0 als Zugehörigkeitsgrad werden verhindert. Die Berechnung erfolgt mit Gl. (11).

$$DoF_{sum} = 1 - \prod_i (1 - DoF_i) \quad (11)$$

Bild 21 zeigt dazu ein Beispiel, bei dem die Ergebnisgröße „eher hoch“ durch Anwendung der Kombinationsregel mit dem Zugehörigkeitsgrad 0,27 und ein zweites Mal mit dem Zugehörigkeitsgrad 0,33 ermittelt wird. Der Zugehörigkeitsgrad $DoF_{eh,sum}$ und damit die resultierende Form der Ausgangsmenge ergibt sich aus der algebraischen Summe der beiden Einzelwerte $DoF_{eh,24}$ bzw. $DoF_{eh,28}$. Die algebraische Summe daraus ergibt den endgültigen Erfüllungsgrad $DoF_{eh,sum} = 0,51$.

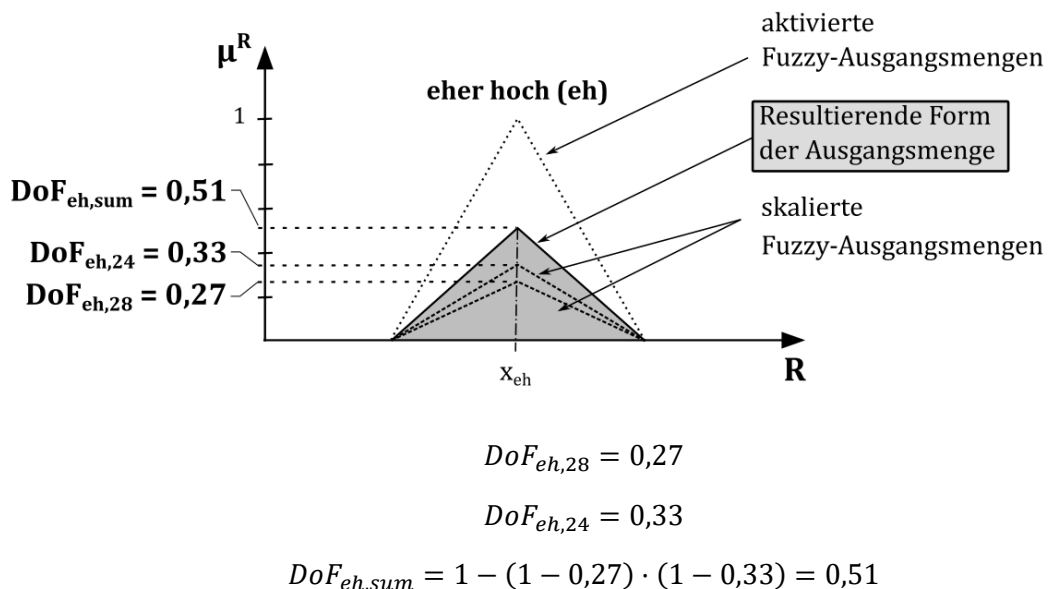


Bild 21: Berechnung des resultierenden Erfüllungsgrads einer Ergebnismenge

Im Weiteren können mehrere Fuzzy-Ergebnisgrößen aktiviert sein, aber jede Ergebnisgröße mit einem einzigen Zugehörigkeitsgrad. Zur Akkumulation der Fuzzy-Ergebnismengen wird eine Skalierung der aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen mit der max-prof-Inferenz durchgeführt. Dadurch bleibt die Information über die ursprüngliche Form der Fuzzy-Ergebnisgröße auch nach der Akkumulation erhalten. Bild 22 veranschaulicht die Vorgehensweise. Die durch die Kombinationsregeln aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen „eh“ und „h“ werden dem ermittelten Erfüllungsgrad DoF_{eh} und DoF_h gemäß in der Höhe skaliert. Im Überschneidungsbereich definiert das Maximum der Zugehörigkeitsfunktionen $\mu^R(eh)$ und $\mu^R(h)$ die Form der Ergebnismenge.

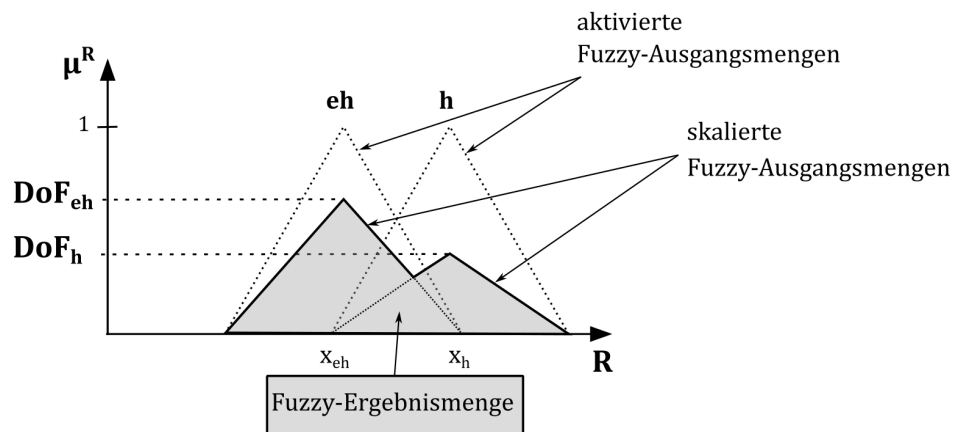


Bild 22: Akkumulation der Fuzzy-Ergebnismengen

4.3.4 Defuzzifizierung

4.3.4.1 Allgemeines

Das Ergebnis des Inferenzverfahrens ist kein scharfer Wert, sondern eine Fuzzy-Ergebnisgröße, die in ihrer Aussage interpretiert werden muss. Eine Defuzzifizierung der Fuzzy-Ergebnisgröße liefert einen scharfen Wert. Das Ergebnis einer auf Fuzzy-Logik basierten Berechnung kann je nach Bedarf in unterschiedlichen Formaten wiedergegeben werden: grafisch in Form der resultierenden Fuzzy-Ergebnisgrößen, als deren linguistische Interpretation oder numerisch als Zahlenwert auf einer Werteskala der Ergebnisgröße.

4.3.4.2 Fuzzy-Ergebnisgrößen

Bild 22 zeigt eine grafische Darstellung der aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen und deren Zugehörigkeitsgrad. Je nach aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen und der Skalierung ergeben sich unterschiedliche Formen für die Fuzzy-Ergebnisgrößen, die linguistisch ausgedrückt werden können. Bild 23 zeigt beispielhaft zwei verschiedene Formen der Ergebnisgrößen einer Risiko-Betrachtung und deren linguistische Interpretationen.

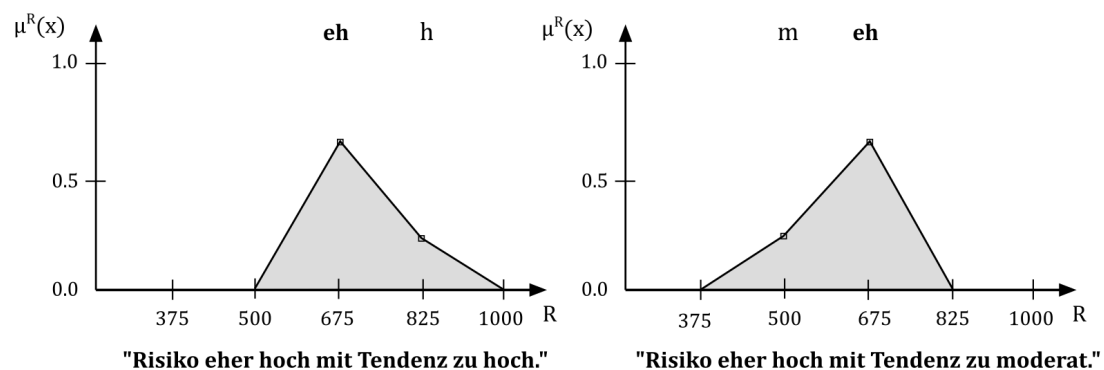


Bild 23: Linguistische Interpretation einer Fuzzy-Ergebnisgröße

4.3.4.3 Berechnung eines numerischen Wertes

Für die Defuzzifizierung der Ergebnisgröße stehen eine Reihe von Verfahren zur Verfügung, um die Rückrechnung der Fuzzy-Ergebnisgröße in einen präzisen Zahlenwert zu ermöglichen. Dazu gehören relativ einfache Verfahren wie die Berechnung des gewichteten Mittelwerts der Maxima der aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen (engl. *weighted mean of maxima*; WMoM) oder aufwändigere Ansätze, wie beispielsweise die Lage des Schwerpunkts der Fuzzy-Ergebnisgröße. Letztere sind vor allem geeignet für den Einsatz in automatisierten Auswerteverfahren und werden an dieser Stelle nicht weiterverfolgt. Bei sorgfältiger Durchführung des Fuzzy-Inferenzverfahrens hat die Methode der Defuzzifizierung einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes findet die Defuzzifizierung anhand der WMoM statt, mit dem die Ergebnisgröße R_{WMoM} vereinfachend anhand der Zugehörigkeitsgrade DoF_i und der Maximalwerte x_i der aktivierten Fuzzy-Ergebnisgrößen i berechnet wird:

$$R_{WMoM} = \frac{\sum_i x_i DoF_i}{\sum_i DoF_i} \quad (12)$$

Bild 24 veranschaulicht die Vorgehensweise an einem Beispiel. Gegeben sind drei aktivierte Ergebnismengen mit den Ergebnisgrößen x und ihren Zugehörigkeitsgraden DoF :

$$x_m = 500; DoF_{eh} = 0,67$$

$$x_{eh} = 675; DoF_{eh} = 0,51$$

$$x_h = 825; DoF_h = 0,267$$

Mit Gleichung 12 ergibt sich für die Ergebnisgröße R_{WMoM} :

$$R_{WMoM} = \frac{\sum x_i DoF_i}{\sum DoF_i} = \frac{500 \cdot 0,67 + 675 \cdot 0,51 + 825 \cdot 0,267}{0,67 + 0,51 + 0,267} \cong 622$$

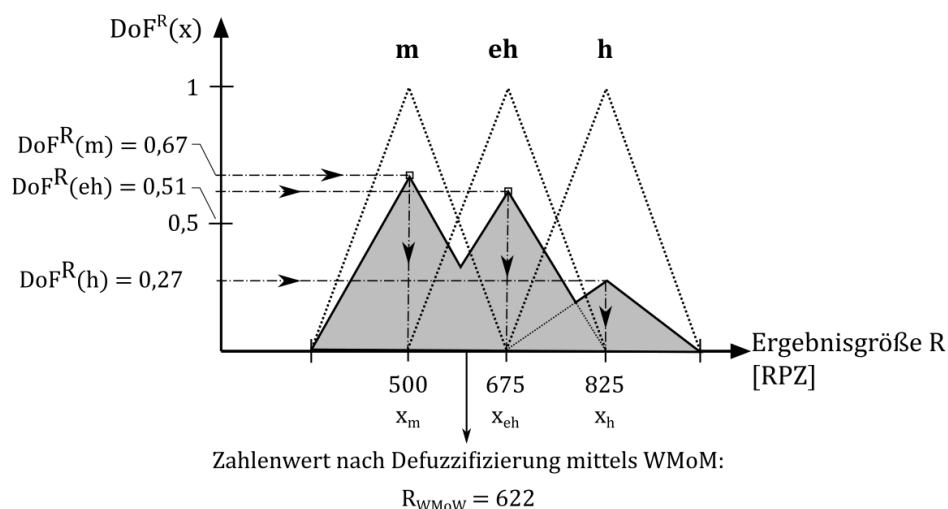


Bild 24: Defuzzifizierung einer Ergebnisgröße R mit WMoM

4.4 Erläuterndes Beispiel

4.4.1 Berechnung der Fuzzy RPZ

Im Rückgriff auf das Beispiel in Kapitel 3.4.2.5 wird für die Wehrwalze in Feld 2 der Wehranlage Wieblingen die RPZ der UWK T.2 mittels Fuzzy-Logik ermittelt. Der vollständige Ablauf der Ermittlung für UWK T.2 ist in Bild 25 dargestellt. Die RPZ von UWK T.1 wird analog dazu ermittelt.

Im Rahmen einer Gruppendiskussion sind sich die befragten Experten einig, dass die Bedeutung der UWK T.2 für die Nachweisführung der Tragfähigkeit des Bauwerktyps „eher hoch“ bis „hoch“ ist und entscheiden sich für eine B-Bewertung von 8.

Aufgrund der statistischen Daten ist bekannt, dass die UWK T.2 an 14 % aller Bauwerke desselben Typs und somit „eher selten“ mit einer Tendenz zu „eher häufiger“ an diesem Bauwerkstyp auftritt.

Aus der Schadensdatenbank zu dem Bauwerk geht hervor, dass die Erhaltungsnote $Z_{3,T.2}$ bei 2,0 liegt. Die Instandhaltungsmaßnahmen am Bauwerk scheinen hinsichtlich dieser UWK „eher gut“ zu funktionieren. Entsprechend dieser Prämissen werden die Regelsätze 23, 24, 27 und 28 aktiviert (Tabelle 18).

Tabelle 18: Regelsatz zur Ermittlung der aktivierten Ausgangsmengen für UWK T.2

Regel-Nr.	Eingangsvariablen						Ergebnisgröße	
	Bedeutung	$\mu_B(x)$	Auftreten	$\mu_A(x)$	Erhaltung	$\mu_E(x)$	Risiko	DoF
23	eher hoch	0,667	eher selten	0,733	eher gut	1,0	moderat	0,667
24	hoch	0,333	eher selten	0,733	eher gut	1,0	eher hoch	0,333
27	eher hoch	0,667	eher oft	0,267	eher gut	1,0	eher hoch	0,267
28	hoch	0,333	eher oft	0,267	eher gut	1,0	hoch	0,267

Während die Regeln 23 und 28 nur die Ausgangsmengen „moderat“ bzw. „hoch“ aktivieren, aktiviert sowohl Regel 24 als auch Regel 27 die Ausgangsmenge „eher hoch“. Die DoF der aktivierten Ausgangsmengen werden entsprechend der Mamdani-Implikation als der minimale Zugehörigkeitsgrad der beteiligten Eingangsgrößen gewählt. Es ergibt sich für den Regelsatz 24 ein Zugehörigkeitsgrad von $DoF_{eh,24} = 0,333$ zur Ergebnismenge „eher hoch“ und für den Regelsatz 27 ein Zugehörigkeitsgrad von $DoF_{eh,27} = 0,267$ zur gleichen Ergebnismenge.

Der endgültige $DoF_{eh,sum}$ wird mittels der algebraischen Summe aus den Einzelwerten der DoF_i für die beteiligten Regeln berechnet:

$$DoF_{eh,sum} = 1 - \prod_i (1 - DoF_i) = 1 - (1 - 0,27) \cdot (1 - 0,33) = 0,51$$

Aus den drei resultierenden Ausgangsmengen wird der Zahlenwert $R_{WMoM,T.2} = 622$ mittels WMoM berechnet (vgl. Bild 24):

$$x_m = 500; DoF_{eh} = 0,67$$

$$x_{eh} = 675; DoF_{eh} = 0,51$$

$$x_h = 825; DoF_h = 0,267$$

$$R_{WMoM,T.2} = \frac{\sum x_i DoF_i}{\sum DoF_i} = \frac{500 \cdot 0,67 + 675 \cdot 0,51 + 825 \cdot 0,267}{0,67 + 0,51 + 0,267} \cong 622$$

Für die UWK T.1 ergibt sich bei analoger Vorgehensweise ein Zahlenwert der RPZ von $R_{WMoM,T.1} = 883$. Im Vergleich zur klassischen Berechnung mittels Multiplikation wird für UWK T.2 ein deutlich höherer RPZ-Wert erreicht ($RPZ_{klassisch,T.2} = 64$, $R_{WMoM,T.2} = 622$). Auch der Wert für die UWK T.1 erhöht sich leicht von $RPZ_{klassisch,T.1} = 800$ auf $R_{WMoM,T.1} = 883$.

Dies liegt vor allem an der starken Wichtung des Bewertungskriteriums Bedeutung in den Regelsätzen, was dem Sachverhalt, dass die Bedeutung eines Schadens für die Nachweise (hier die Tragfähigkeit) die RPZ dominieren sollte, gerecht wird.

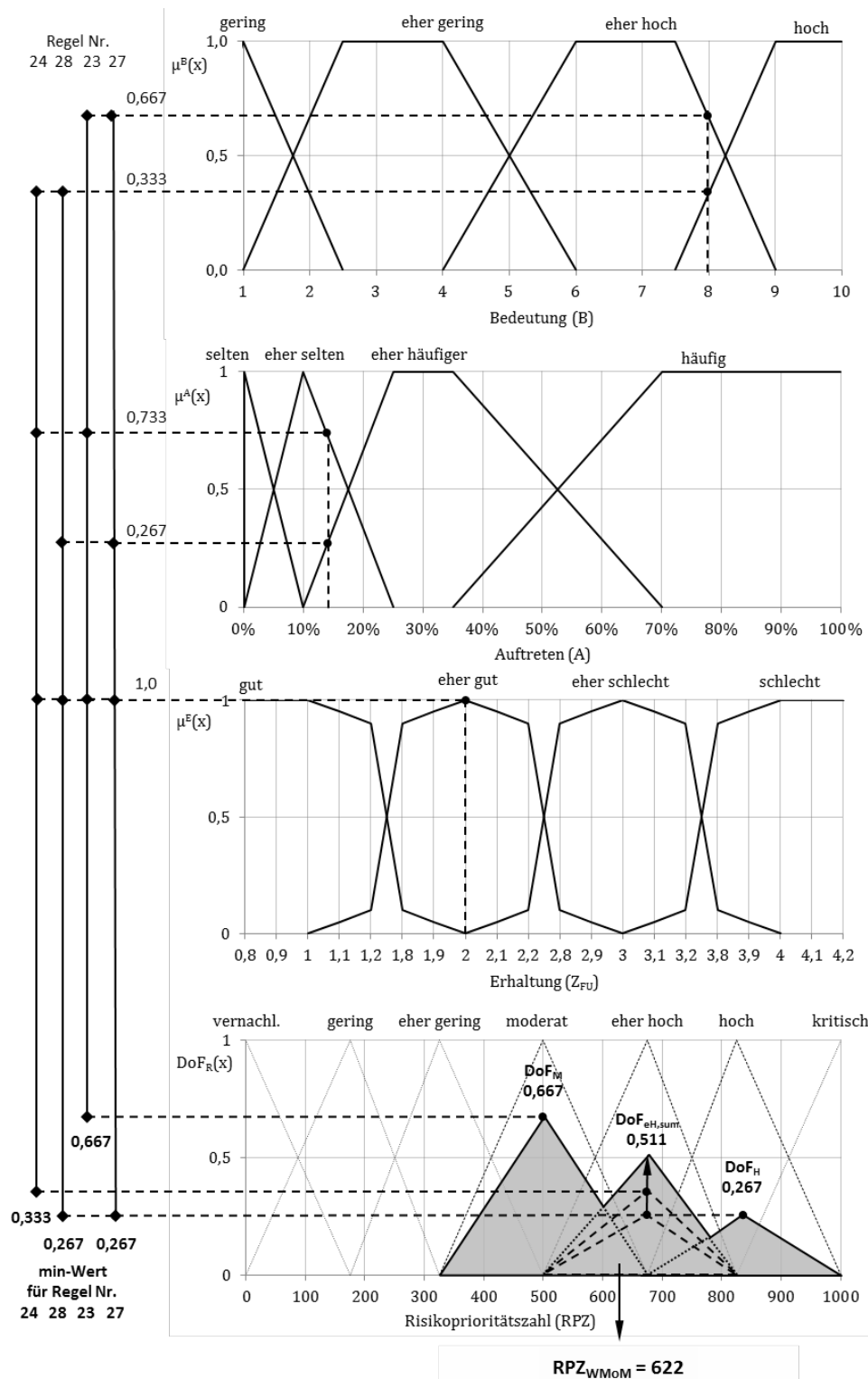


Bild 25: Berechnung der RPZ mittels des entwickelten Fuzzy-Verfahrens

5 Pilotstudien

5.1 Modifizierte Zustandsnote

5.1.1 Stahlwasserbau

Die in der Pilotstudie behandelten Verschlüsse wurden so gewählt, dass sich die Auswirkungen der tragfähigkeitsbezogenen Zustandsbenotung deutlich belegen lassen. Eine vertiefte Betrachtung der Schäden an den betrachteten Verschlüssen zeigt, dass die maßgeblichen Schäden der vier Verschlüsse aus der OTK „Stahlbau“ stammen und daher einer der Funktionen Lastverteilung, Stauregelung oder Stauhaltung betreffen. Zur übersichtlicheren Darstellung sind nur die maßgebenden Schäden aufgeführt.

Tabelle 19: Modifizierte Zustandsnote und Reihung

Verschluss	maßgebender Schaden	SK	UW K	Anf.	Z _{Stb}	Rang (Z _{Stb})	Z _{LV,T}	Rang (Z _{LV,T})
Neckarsulm; Feld 2	Obertor lässt sich nach Umbau der Dichtung nicht mehr vollständig absenken	4,0	G.4	G	4,0	1	2,0	3
	Schütz in sich über die Längsachse verdreht. Laufrollen liegen an der Schiene an. <u>Klemmlage!</u>	2,0	T.6	T				
Cannstatt; Feld 2	Strahlaufreißer beschädigt	3,1	G.4	G	3,1	2	2,2	2
	Korrosion	2,2	T.1	T				
Erlabrunn; Feld 2	Aussteifung Seitenschild Aufsatzklappe verbogen	2,9	D.4	D	2,9	3	1,9	4
	Korrosion	1,9	T.1	T				
Bad Abbach; Feld 3	deformierten Bauteil	1,0	D.4	G	2,9	3	2,9	1
	Aussteifung Klappenlager beschädigt	2,9	T.4	T				

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Wehrverschlüsse detaillierter beschrieben.

- Im Feld 2 der Wehranlage Neckarsulm betrifft der für $Z_{3, \text{Stahlbau}}$ maßgebende Schaden in SK 4 die durch Umbaumaßnahmen bedingte eingeschränkte Beweglichkeit des Oberschützes und somit die Anforderung „Gebrauchstauglichkeit“ (G). Der maßgebende Schaden für die Anforderung „Tragfähigkeit“ (T) ist mit SK 2 deutlich besser bewertet. Die Teilnote Z_{Stb} für dieses Wehrfeld wird somit durch die Gebrauchstauglichkeit bestimmt (vgl. Kap. 3.4.1.2).

- Der maßgebende Schaden am Wehrverschluss in Feld 2 der Wehranlage Cannstatt betrifft die Strahlaufreißer der Wehrwalze. Die Schäden an den Strahlaufreißern beeinflussen durch ihre Funktionsweise den Betrieb der Wehrwalze und nicht die Anforderung an die Tragfähigkeit des Tragwerks. Dies gilt auch unter der Voraussetzung, dass die Wehrwalze bei schlecht belüftetem Abfluss zu Schwingungen angeregt wird, da dann die Betriebsweise auf eine Weise eingeschränkt werden sollte, die diese kritischen Zustände von vornherein vermeidet. Der maßgebende Schaden kann daher der Anforderung „Gebrauchstauglichkeit“ (G) zugeordnet werden. Im Vergleich zur Zustandsnote $Z_{3,\text{Stahlbau}}$ fällt die spezifische Zustandsnote für die Funktion der Lastverteilung $Z_{LV,T}$ geringer aus. Die Teilnote Z_{Stb} der Wehranlage wird auch in diesem Fall durch die Gebrauchstauglichkeit bestimmt.
- Bei der Wehranlage Erlabrunn ist der maßgebende Schaden der OTK „Stahlbau“ auf eine verbogene Aussteifung des Seitenschilds für die Aufsatzklappe des Wehrverschlusses zurückzuführen. Eine starke Verformung des Seitenschilds könnte den Betrieb der Aufsatzklappe einschränken, hat aber in der Regel keinen Einfluss auf die Funktion der Lastverteilung des Haupttragwerks. Da in der Beschreibung des Schadens jedoch nicht weiter auf die Auswirkungen des Schadens eingegangen wird und durch die übermäßige Verformung in den meisten Fällen der Korrosionsschutz an dieser Stelle beschädigt sein wird, betrifft der Schaden als „optischer Mangel“ die Anforderung der „Dauerhaftigkeit“ (D). Für die Ermittlung der tragfähigkeitsbezogenen Zustandsnote ist dieser Schaden daher nicht maßgebend. Dadurch fällt auch in diesem Fall $Z_{LV,T}$ geringer aus als Z_{Stb} .
- Im Feld 3 der Wehranlage Bad Abbach betrifft der maßgebende Schaden den Auflagerbereich der Aufsatzklappe. Dadurch ist die Lastverteilung hin zum Auflager gefährdet und der Schaden wird der Tragfähigkeit bzw. $Z_{LV,T}$ zugeordnet.

Unter der Annahme, dass für eine Instandhaltungsplanung Bauwerke mit gefährdeter Tragfähigkeit höhere Bedeutung zugemessen wird, hat die Information über die maßgeblich betroffene Anforderung einen deutlichen Einfluss auf die Reihung der Objekte und damit auf die Entscheidung, welches der Bauwerke vorrangig behandelt werden müsste. Anstelle des Wehrverschlusses in Feld 2 der Wehranlage Neckarsulm, der auf Rang 3 abrutscht, steht aufgrund der höheren Dringlichkeit hinsichtlich der Instandhaltung der Tragfähigkeit der Wehrverschluss in Feld 3 der Wehranlage Bad Abbach auf Rang 1 der Reihung. Ebenfalls ist die Instandsetzung der Tragfähigkeit des Verschlusses in Feld 2 der Wehranlage Bad Cannstatt wichtiger.

5.1.2 Massivbau

Zur Validierung der bisherigen Methodik an Schleusen wurden die Stahlbetonschleusen Strullendorf, Sülfeld und Nürnberg sowie die Betonschleusen Besigheim, Obertürkheim und Kleinstheim analysiert und die Ergebnisse in Tabelle 20 gegenübergestellt. Das einzige Kriterium für die Auswahl dieser Anlagen ist ihr baulicher Zustand jenseits von 3,0.

Tabelle 20: Modifizierte Zustandsnoten von massiven Schleusen

Schleuse	maßgebender Schaden	SK	Anf.	Z _{Kon}	Rang (Z _{Kon})	Z _{LA,T}	Rang (Z _{LA,T})
Strullendorf	Verformung; Sonstige gebrauchstauglichkeitsrelevante Schäden	3	G	4	1	3,2	3
	Risse SK3/4 Massivbau/ Korrosion	3,2	T				
	Undichtigkeiten	4	D				
Sülfeld	Sonstige gebrauchstauglichkeitsrelevante Schäden	4	G	4	1	4	1
	Sonstige tragfähigkeitsrelevante Schäden/ Risse SK3/4 Massivbau	4	T				
	Fugenschäden; Oberflächenabtrag	4	D				
Uelzen	Sonstige gebrauchstauglichkeitsrelevante Schäden	4	G	4	1	4	1
	Korrosion/Setzungen und Unterspülungen/ Sonstige tragfähigkeitsrelevante Schäden	4	T				
	Oberflächenabtrag/Undichtigkeiten/Fugenschäden	4	D				
Besigheim	Verformung	2,9	G	3,2	2	3,2	2
	Risse SK3/4 Massivbau	3,2	T				
	Oberflächenabtrag	3,2	D				
Obertürkheim	Sonstige gebrauchstauglichkeitsrelevante Schäden	4	G	4	1	3,1	3
	Setzungen und Unterspülungen / Risse SK3/4 Massivbau	3,1	T				
	Oberflächenabtrag	3,2	D				
Kleinostheim		-	G	3,2	2	-	4
		-	T				
	Fugenschäden	3,2	D				

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die einzelnen Bauwerke detaillierter betrachtet.

- Die Schleuse Strullendorf weist für die Objektteilkategorie „Konstruktion“ eine Teilnote 4 auf. Der ungenügende Zustand ist vor allem auf dauerhaftigkeitsrelevante Schäden bzw. Undichtigkeiten zurückzuführen. Durch Auswertung der tragfähigkeitsrelevanten UWKs wurde die erzeugte spezifische Zustandsnote auf 3,2 verbessert.

- Der ungenügende Zustand der Schleuse Sülfeld ist auf Risse der Schadensklasse 3/4 zurückzuführen, die den tragfähigkeitsrelevanten UWKs zugeordnet werden. Gleichzeitig beeinflussen sowohl Fugenschäden als auch Oberflächenabtrag die Anforderungen der Dauerhaftigkeit.
- Analog zur Schleuse Sülfeld wird der ungenügende Zustand der Schleuse Uelzen auf zahlreiche Fehlerursachen zurückgeführt, die die Nachweisführung der Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit des Bauwerks beeinflussen können.
- Der ausreichende Zustand des OTK „Konstruktion“ der Schleuse Besigheim ist weitestgehend durch die Fehlerursache „Oberflächenabtrag“ begründet. Geringfügige Verformungsschäden weisen keine signifikanten Auswirkungen auf Anforderungen an die Tragfähigkeit des Bauwerks auf, sondern beeinflussen die Gebrauchstauglichkeit. Daher wurde hinsichtlich der Tragfähigkeit eine spezifische Zustandsnote von 3,2 ermittelt.
- Der ungenügende Zustand der Schleuse Obertürkheim ist auf sonstige dauerhaftigkeitsrelevante Schäden zurückzuführen. Obwohl unterschiedliche Schäden im Zusammenhang mit Setzungen und Unterspülungen sowie Risse der Schadensklasse 3/4 erkennbar sind, weist das Bauwerk in Bezug auf die anforderungsspezifische Zustandsnote Tragfähigkeit eine Note von 3,2 auf.
- Die erfassten Schadensbilder an der Schleuse Kleinostheim wurden anhand der entwickelten UWKs als dauerhaftigkeitsrelevante Schäden eingeordnet. Es wurden keine Schäden mit spezifischen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit festgestellt.

Auch hier zeigt sich die veränderte Priorisierung der Bauwerke in einem veränderten Rang. Durch die Fokussierung auf tragfähigkeitsrelevante Schäden reduziert sich die Priorität der Schleusen Strullendorf und Obertürkheim deutlich, da die für die schlechte Zustandsnote relevanten Schäden nicht den für die Tragfähigkeit relevanten UWKs zuzuordnen sind.

5.2 Risikobasierte Zustandsbewertung mittels RPZ und Risikoprofilen

Die RPZ hängt über die Bewertungskriterien „Bedeutung“ und „Auftreten“ vom Bauwerkstyp ab und berücksichtigt die bisherigen Instandhaltungsbemühungen über das Bewertungskriterium „Erhaltung“. Ändert sich der Zustand des Objekts, ändern sich dementsprechend auch die Erhaltungsnoten $Z_{3,UWK}$ der betroffenen UWK. Die beispielhafte Berechnung der RPZ in Bild 26 zeigt für zwei verschiedenen Bauwerkstypen den Einfluss des E-Kriteriums auf die Risikopriorität.

UWK T.2: Fehler: Tragfähigkeit betroffen
Fehlerfolge: kontinuierlichem Versagensverlauf
Fehlerursache: Verlust Verbindungsmittel

Objekt: Verschlussstyp "vertikal verschieblich"

Situation	"Erhaltung" gut			"Erhaltung" schlecht		
Kriterium	"Bedeutung"	"Auftreten"	"Erhaltung"	"Bedeutung"	"Auftreten"	"Erhaltung"
Wert	10	26%	1,0	10	26%	4,0
Fuzzy-Eingang	hoch	eher oft	gut	hoch	eher oft	schlecht
$\mu(x)$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Regel-Nr.	12,00			60,00		
Fuzzy-Ausgang (DoF)	eher hoch			kritisch		
DoF _{alg.sum}	1,00			1,00		
RPZ_{WMoM}	675			1000		

Objekt: Verschlussstyp "vertikal verschieblich mit horizontaler Drehachse" (Wehrwalze)

Situation	"Erhaltung" gut			"Erhaltung" schlecht		
Kriterium	"Bedeutung"	"Auftreten"	"Erhaltung"	"Bedeutung"	"Auftreten"	"Erhaltung"
Wert	8	14%	1,0	8	14%	4,0
Fuzzy-Eingang	eher hoch hoch	eher selten eher oft	gut	eher hoch hoch	eher selten eher oft	schlecht
$\mu(x)$	0,67 0,33	0,70 0,30	1,00	0,67 0,33	0,70 0,30	1,00
Regel-Nr.	7; 8; 11; 12			55; 56; 59; 60		
Fuzzy-Ausgang (DoF)	moderat (0,67; 0,30); eher hoch (0,33; 0,30)			eher hoch (0,67); hoch (0,67; 0,33); kritisch (0,30)		
DoF _{alg.sum}	0,77; 0,53			0,67; 0,75; 0,30		
RPZ_{WMoM}	452			797		

Bild 26: RPZ in Abhängigkeit des E-Kriteriums

Aus den Risikoprofilen für die Verschlussstypen, die in Wehrfeldern typischerweise vorkommen, wird ersichtlich, dass selbst bei guter Instandhaltbarkeit (d. h. $E = 1$) ein grundsätzliches Risiko dafür besteht, dass eine Nachweisführung für die bestehenden Konstruktionen durch bestimmte UWKs betroffen ist (Bild 27).

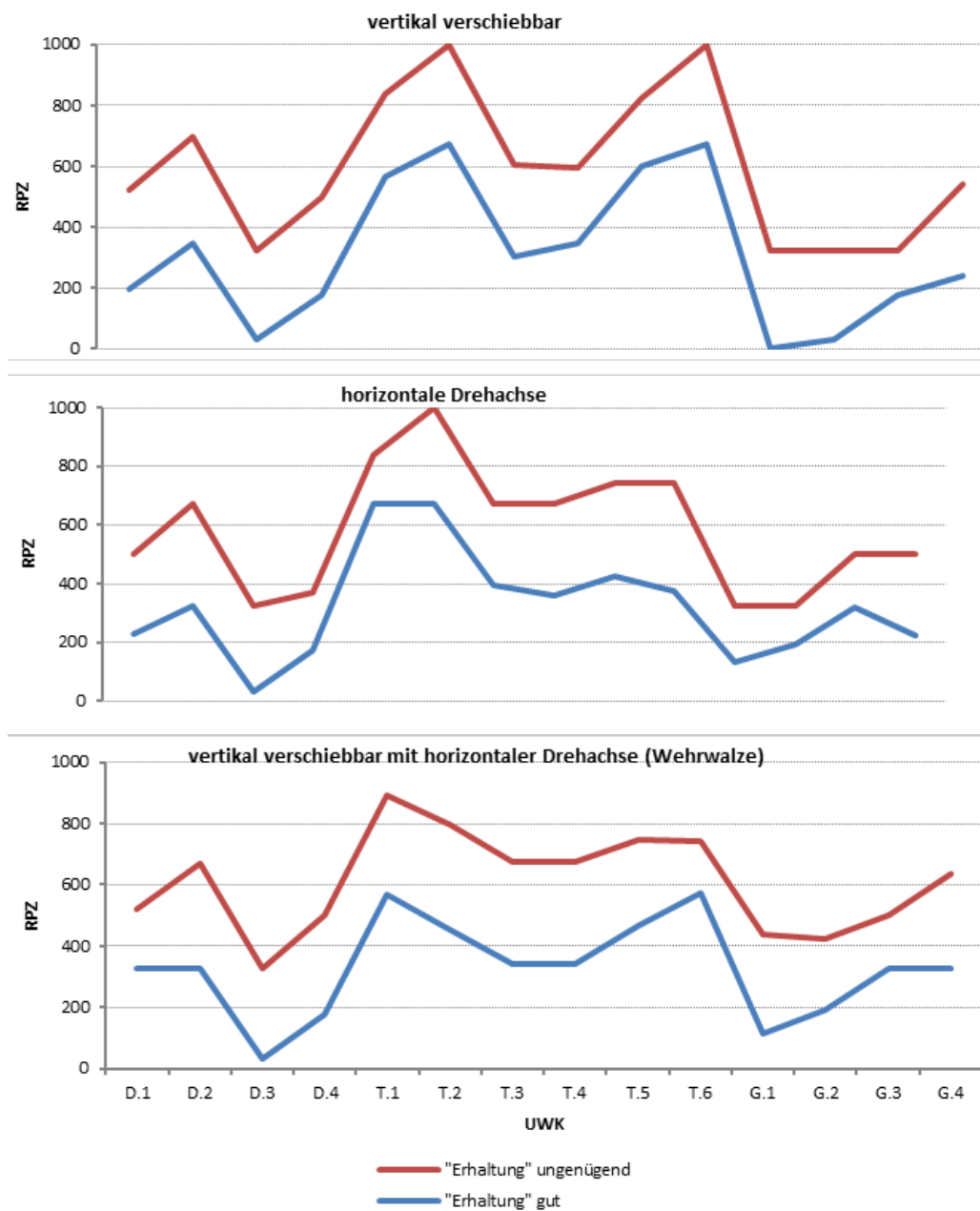


Bild 27: Risikobewertung verschiedener Verschlusstypen

Unabhängig vom Verschlusstyp weisen im Stahlwasserbau vor allem die UWK, die auf Korrosion (UWK T.1) und den Verlust von Verbindungsmitteln zurückzuführen (UWK T.2) sind, selbst bei einer Bewertung des E-Kriteriums mit 1,0 hohe RPZ-Werte auf. Verschlüsse mit horizontaler Drehachse haben in der Regel fest im Massivbau verbaute Auflager, sodass Zwangszustände aufgrund von Fehlstellungen der Auflager (UWK T.6) quasi ausgeschlossen sind.

Aus diesem Grund fällt die A-Bewertung sehr gering aus und die RPZ ist im Vergleich zu den anderen Verschlusstypen deutlich geringer. Dieses Ergebnis plausibilisiert die gewählten Wertebereiche für die Bewertungskriterien „Bedeutung“ und „Auftreten“. Im direkten Vergleich der Verschlusstypen ist unter den im Rahmen des Forschungsprojektes getroffenen Annahmen für die

Nachweisführung von Walzenverschlüssen tendenziell ein geringeres Risiko zu erwarten als für andere Verschlussstypen.

Entsprechend den Betrachtungen für die Verschlüsse von Wehranlagen wurde das technische Risiko sowohl für Beton- als auch für Stahlbetonkonstruktionen abgeschätzt (Bild 28). Für Betonbauwerke weisen die UWK T.4 und UWK T.2 ein hohes Risiko für die Nichterfüllung der baulichen Anforderungen auf. Abgesehen von konstruktiven Bewehrungen enthalten Betonkonstruktionen sehr wenig oder fast keine Bewehrung. Daher ist das Risiko, das von der Bewehrungskorrosion (UWK T.3) ausgeht, für Betonkonstruktionen sehr gering im Vergleich zu Stahlbeton, der auch stark anderen Fehlerfolgen ausgesetzt ist, die die Nachweisführung der Tragfähigkeit beeinflussen können.

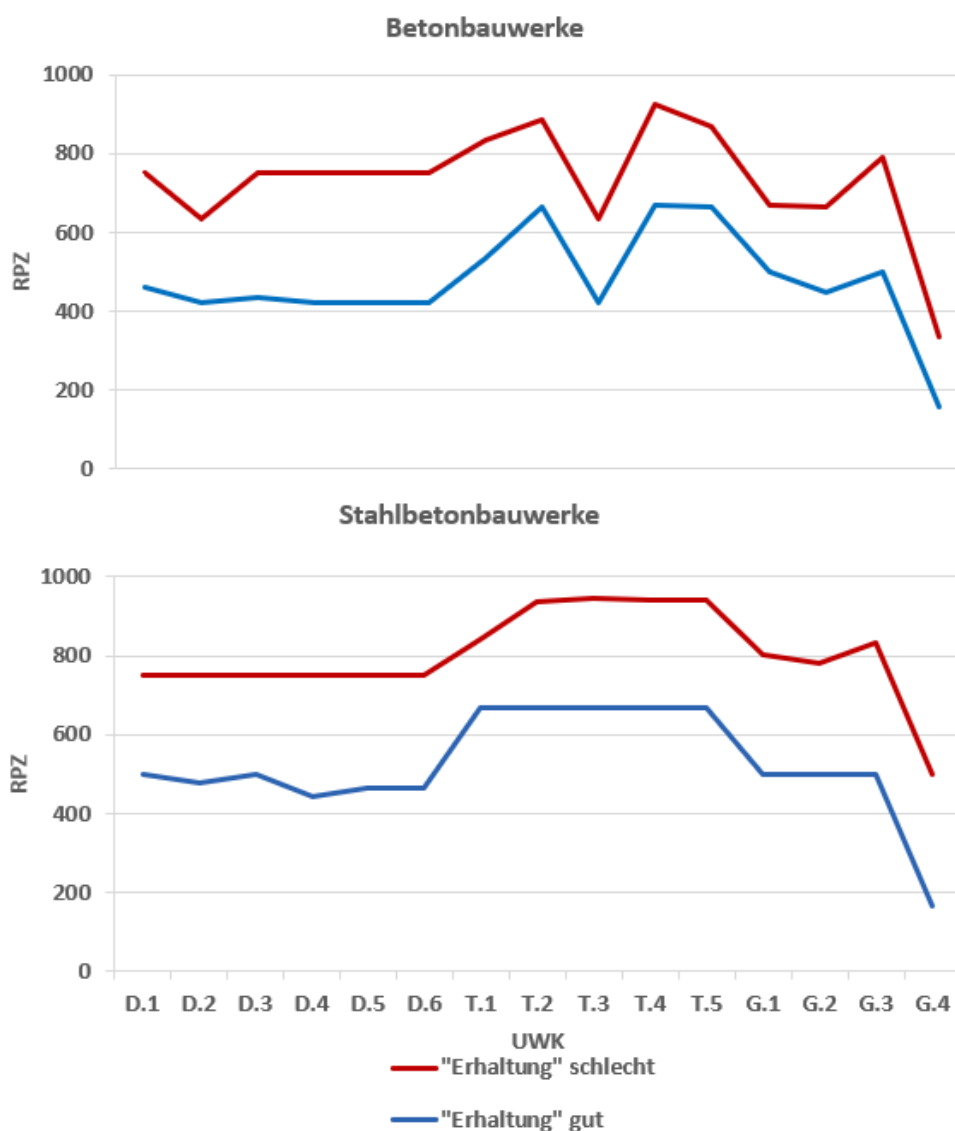


Bild 28: Risikobewertung verschiedener Bauwerkstypen

5.3 Vergleich mehrerer Anlagen mittels erweiterter Zustandsbewertung

Eine geeignete Strategie zur Priorisierung verschiedener Bauwerke für Erhaltungsmaßnahmen besteht darin, die bisher ermittelten Kennzahlen zu kombinieren. So wird z. B. anhand der vorhandenen Teilnote, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten tragfähigkeitsbezogenen Zustandsnote und der Risikoprioritätszahl versucht, die in Kap. 5.1.2 betrachteten Schleusen in eine Dringlichkeitsreihung zu bringen (vgl. Tabelle 21). Für diesen Vergleich wird lediglich die UWK mit der höchsten RPZ berücksichtigt. Anhand der Risikoprofile der Anlagen (Bild 29) wird abschließend auch das Kritikalitätsniveau des gesamten Bauwerks in die Reihung der Bauwerke mit einbezogen. Da die Schleuse Kleinostheim keine tragfähigkeitsrelevanten Schäden aufweist, wird sie von vornherein bei diesem Vergleich nicht berücksichtigt.

Mit einer Teilnote für die OTK „Konstruktion“ von $Z_K = 4$ weisen die drei Stahlbetonschleusen sowie die Betonschleuse Obertürkheim einen ungenügenden baulichen Zustand auf. Allerdings fällt die tragfähigkeitsbezogene Zustandsnote der Schleusen Strullendorf und Obertürkheim deutlich besser aus als die Teilnote ($Z_{LA,T} = 3,2$ bzw. $3,1$). Dies wiederum impliziert, dass der ungenügende Zustand dieser Bauwerke nicht mit den UWK verbunden ist, die die Nachweisführung der Anforderung an die Tragfähigkeit beeinträchtigen. Weiterhin ist jedoch zu beachten, dass die UWK mit den höchsten RPZ-Werten für alle fünf Anlagen den Nachweis der Tragfähigkeit betreffen. Wie gezeigt wurde, kann der Einfluss des Erhaltungszustandes, der von der Teilnote beeinflusst wird, gering sein (siehe Bild 28).

Der Vergleich der Risikoprofile festigt weiterhin die Erkenntnis, dass die Instandsetzung der Schleusen Besigheim und Obertürkheim von untergeordneter Dringlichkeit sind. Die Schleusen Uelzen, Strullendorf und Sülfeld zeigen im Bereich der UWK, die die Dauerhaftigkeit und die Tragfähigkeit betreffen, ein ähnlich hohes Niveau.

Tabelle 21: Zustandsbewertung der untersuchten Schleusen

Schleuse	Konstruktionsweise	Z_K	$Z_{LA,T}$	RPZ _{max}	UWK	Rang
Sülfeld	Stahlbeton	4	4	939	T.4	2
Strullendorf	Stahlbeton	4	3,2	921	T.3	3
Uelzen	Stahlbeton	4	4	944	T.3	1
Obertürkheim	Beton	4	3,1	834	T.5	4
Besigheim	Beton	3,2	3,2	833	T.4	5

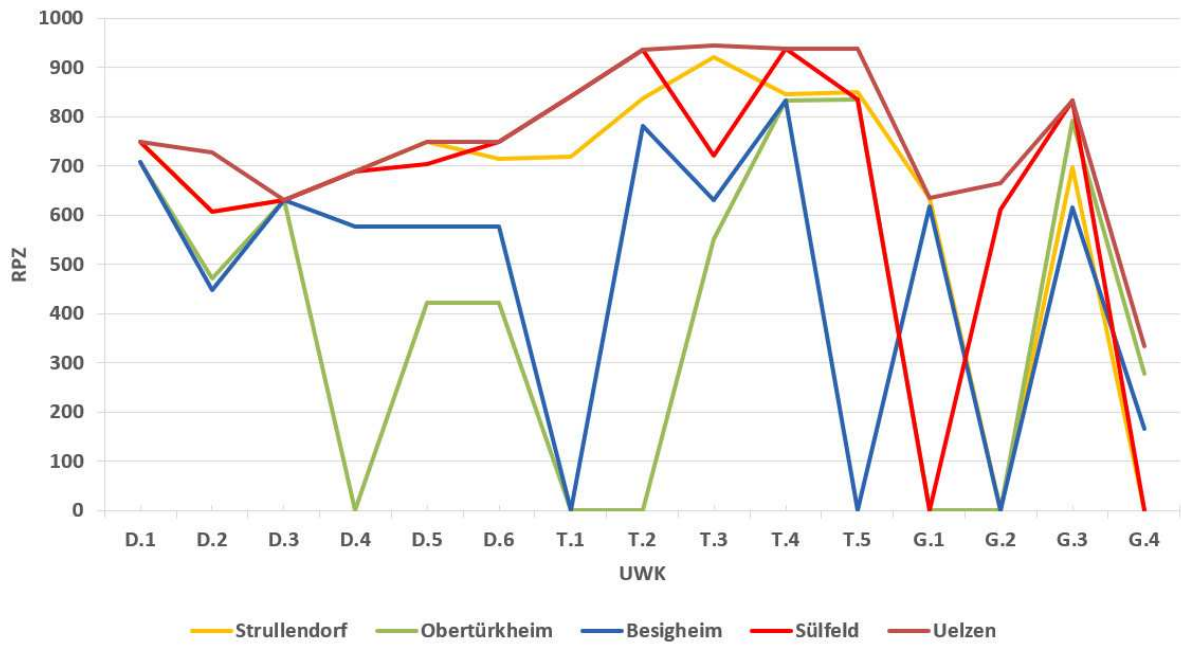


Bild 29: Risikoprofile der betrachteten Schleusen

6 Fazit

Das entwickelte Konzept für eine tragfähigkeitsbezogene Bewertung bestehender Konstruktionen baut auf dem systematischen Ansatz einer FMEA auf. Die FMEA wird dazu genutzt, den Einfluss von Schäden auf die Nachweisführung der normativ festgelegten Anforderungen im Allgemeinen und der Tragfähigkeit im Besonderen zu analysieren und die damit verbundenen Risiken zu bewerten. In diesem Sinne wird nicht die Tragfähigkeit selbst bewertet (z. B. über die Bestimmung des Auslastungsgrads), sondern die Möglichkeit, dass ein Schaden die Nachweisführung scheitern lassen könnte. Ausgangspunkt der Analyse ist die Identifizierung der Bauwerkskomponenten, die eine wichtige Funktion im Sinne der Tragfähigkeit erfüllen. Darauf aufbauend werden die Ursache-Wirkungsketten ermittelt, die zu einer Beeinträchtigung der Funktion führen können und die Anforderungen an die Funktionserbringung verletzen. Schäden am Bauwerk werden als Indiz für die Ausbildung von Ursache-Wirkungsketten verstanden. Durch diesen Zusammenhang entsteht ein Modell darüber, wie Schäden auf die Nachweisführung der Tragfähigkeit Einfluss nehmen. Das Modell der Wirkzusammenhänge erzeugt ein Kategoriensystem, das die Sortierung und Filterung von Schäden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Anforderungen, die an die Bauwerke gestellt werden, ermöglicht. Durch die Sortierung und Filterung anhand der betroffenen Anforderung entsteht die Möglichkeit einer anforderungsspezifischen Zustandsbenotung unter Beibehaltung der etablierten Algorithmen für die Zustandsbewertung. Die anforderungsspezifische Zustandsnote ergänzt die bisherige Zustandsbewertung in WSVPruf durch die Bereitstellung der Informationen über die normativen Anforderungen, deren Einhaltung durch die Schäden an einem Bauwerk gefährdet sein könnte. Auf diese Weise lassen sich Schäden, die speziell die Tragfähigkeit betreffen, identifizieren und gesondert in der Zustandsbewertung berücksichtigen, wodurch die Aussagekraft der Zustandsbewertung erhöht wird.

Darüber hinaus berücksichtigt die Risikobewertung der Ursache-Wirkungsketten bauwerkstypische Merkmale, die neben der Schädigung Einfluss auf die Nachweisbarkeit der normativen Anforderungen wie die Tragfähigkeit haben. Das Risiko hängt im Rahmen der Bewertung von bestehenden Konstruktionen von der Bedeutung einer Ursache-Wirkungskette für die Nachweisführung, der relativen Häufigkeit der Schäden, die eine Ursache-Wirkungskette auslösen, und der Möglichkeit, das Auslösen einer Ursache-Wirkungskette zu verhindern, ab. Die Bewertungskriterien sind so gewählt, dass sowohl bauwerkstypische Merkmale als auch zustandsbedingte Einflüsse berücksichtigt werden. Die Risikoprioritätszahl als Endergebnis der Risikobewertung stellt eine Kennzahl in Abhängigkeit von den Bauwerksmerkmalen und der Effektivität der bisherigen Maßnahmen zur Instandhaltung der Bauwerke dar. Ergänzend zur Information der anforderungsspezifischen Zustandsnote über die Dringlichkeit der Instandsetzung gibt die Risikoprioritätszahl darüber Auskunft, wie stark damit gerechnet werden muss, dass die Nachweisführung für die jeweilige Anforderung aufgrund des aktuellen Zustands erschwert sein könnte.

Die anforderungsspezifische Zustandsnote und die Risikoprioritätszahl einzelner Ursache-Wirkungsketten stellen ergänzende Informationen für die Zustandsbewertung bereit und erlauben somit einen differenzierteren Vergleich von Bauwerken und gesamten Anlagen.

Für den Entscheidungsprozess hinsichtlich einer Reihung von Bauwerken im Rahmen einer Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen stehen durch die zusätzlichen Kenngrößen wichtige Informationen zur Verfügung, die durch die bisherige Zustandsbewertung anhand der

allgemeinen Zustandsnote nicht zugänglich waren. Die Ergebnisse der Beispiele zeigen, dass die untersuchten Konstruktionen unter Anwendung der zusätzlichen Kenngrößen leichter als bisher in eine Rangordnung gebracht und objektübergreifend verglichen werden können.

Des Weiteren lässt sich die Aussagekraft der erzielten Erkenntnisse im Hinblick auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten anhand der Fuzzy-Mengen-Theorie deutlich verbessern. Das entwickelte Verfahren zur Ermittlung der RPZ mittels Fuzzy-Logik bedarf einer Validierung anhand von Gruppendiskussionen oder Experteninterviews, bevor die Kennzahl in der Zustandsbewertung eingesetzt werden kann. Dies betrifft vor allem die Fuzzy-Mengen der Eingangs- und Ergebnisgrößen, aber auch die Wichtung der Bewertungskriterien innerhalb des Regelsatzes zur Ermittlung der Ergebnismenge. Das Fuzzy-Inferenzverfahren muss darüber hinaus insgesamt auf Konsistenz bei den Ergebnissen geprüft und bei Bedarf angepasst werden.

Die drei vorliegenden Kenngrößen (d. h. die allgemeine und die anforderungsspezifische Zustandsnote sowie die maßgeblich betroffene Anforderung) lassen ein multikriterielles Entscheidungsproblem entstehen, das mit einem geeigneten Bewertungsverfahren gelöst werden kann, womit weiterer Entwicklungsbedarf gegeben ist.

Bundesanstalt für Wasserbau

Karlsruhe, Juli 2021

Literaturverzeichnis

Bowles, John B. (2004): An Assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis. In: *Journal of the IEST* 47 (1), S. 51–56. DOI: 10.17764/jiet.47.1.y576m26127157313.

Bowles, John B.; Peláez, C.Enrique (1995): Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. In: *Reliability Engineering & System Safety* 50 (2), S. 203–213. DOI: 10.1016/0951-8320(95)00068-D.

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hg.) (2018): Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung. Konzeption und fachliche Lösung. Schlussbericht. Unter Mitarbeit von Rade Hajdin, Beda Büchel, Blathasar Novák und Matthias Bunz. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt).

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2010): BAWMerkblatt Bauwerksinspektion (MBI). Unter Mitarbeit von Jörg Bödefeld und Katrin Kloé. Karlsruhe (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2015): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Unter Mitarbeit von Bödefeld Jörg und Kloe Katrin. Karlsruhe (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Karlsruhe (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien). Online verfügbar unter https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/105197/BAWMerkblatt_Schadensklassifizierung_an_Verkehrswasserbauwerken_MSV_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hg.) (2020): Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 3 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019. Unter Mitarbeit von Kalliopi Anastassiadou, Martin Friese, Iris Hindersmann, Ralph Holst, Viktoria Malárics-Pfaff und Andreas Panenka. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.) (2010): Bauwerksinspektion. VV-WSV 2101. Berlin, Deutschland (Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (VV-WSV)).

Byun, Jieun; Song, Junho (2017): Structural System Reliability, Reloaded. In: Paolo Gardoni (Hg.): Risk and reliability analysis: theory and applications. In honor of Prof. Armen Der Kiureghian. Unter Mitarbeit von Armen Der Kiureghian. Cham: Springer (Springer series in reliability engineering), S. 27–46.

DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit.

DIN EN 16602-30-02:2014-12: Raumfahrtproduktsicherung - Fehlermöglichkeits-, Einfluss- (und Kritikalitäts-)Analyse (FMEA/FMECA).

DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.

DIN EN 1991-1-7:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006 + AC:2010.

DIN EN 60812:2006-11: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und auswirkungsanalyse (FMEA) (IEC 60812:2006); Deutsche Fassung EN 60812:2006.

Geißler, Karsten (2019): Sicherheit, Robustheit, Duktilität, Ermüdungssicherheit und Dauerhaftigkeit der Tragwerke – eine Grundsatzdiskussion. In: *Stahlbau* 88 (3), S. 270–293. DOI: 10.1002/stab.201800048.

Kamarianakis, Sissis (2013): Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Bau- und Umweltingenieurwissenschaften. Online verfügbar unter <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/KamarianakisSissis/diss.pdf>, zuletzt geprüft am 19.01.2017.

Lee, Young-Joo (2012): Finite-Element-based system reliability analysis and updating of fatigue-induced sequential failures. Dissertation. University of Illinois, Urbana, Illinois. Civil Engineering. Online verfügbar unter https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/30920/Lee_YoungJoo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Linß, Gerhard (2016): Qualitätssicherung – technische Zuverlässigkeit. Lehr- und Arbeitsbuch. Unter Mitarbeit von Michael Krüger, Marion Zumpf, Elske Linß, Stephan Sommer und Axel Sichardt. München: Hanser.

Liu, Hu-Chen (2016): FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. Singapore: Springer Science+Business Media (Engineering).

Mehdianpour, Milad; Rücker, Werner; Rohrman, Rolf Günter (2004): Zur Tragfähigkeitsbewertung bestehender Bauwerke. In: *Stahlbau* 73 (4), S. 236–241. DOI: 10.1002/stab.200490067.

Mix, Matthias (2016): Probabilistische Nachweisführung bestehender Hochspannungstahlgittermaste. In: *Stahlbau* 85 (5), S. 317–326. DOI: 10.1002/stab.201610376.

Möller, Bernd; Beer, Michael (2004): Fuzzy Randomness. Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics. Berlin: Springer (Engineering online library).

Rommelfanger, Heinrich J. (1994): Fuzzy Decision Support-Systeme. Entscheiden bei Unschärfe. Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-57929-5>.

Rommelfanger, Heinrich J.; Eickemeier, Susanne H. (2002): Entscheidungstheorie. Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-56252-5>.

Straub, Daniel (2018): Reliability assessment of deteriorating structures: Challenges and (some) solutions. In: Robby Caspeele, Luc Taerwe und Dan M. Frangopol (Hg.): Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision. 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering. Ghent, Belgium, 29.-31.10.2018. International Association for Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE). London: Taylor & Francis Group, S. 73–87.

VDE V 831-101:2011-05: Elektrische Bahn-Signalanlagen - Teil 101: Semi-quantitative Verfahren zur Risikoanalyse technischer Funktionen in der Eisenbahnsignaltechnik.

Weber, Silvia (2013): Betoninstandsetzung. Baustoff – Schadensfeststellung – Instandsetzung. 2. Aufl. Wiesbaden, s. l.: Springer Fachmedien Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2261-1>.

Zadeh, Lofti A. (1965): Fuzzy sets. In: *Information and Control* 8, S. 338–353.

Zimmermann, H.-J. (2001): *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 4th Edition. New York: Springer Science + Business Media, LLC.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de