

# **Multikriterielle Entscheidungsunterstützung in der risiko-basierten Instandhaltungsplanung am Beispiel der Verkehrswasserbauwerke**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
genehmigte

## **DISSERTATION**

von  
Dipl.-Wi.-Ing. Heike Schmidt-Bäumler

Referent:

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Kunibert Lennerts

Tag der mündlichen Prüfung:

28.05.2020



*Unser Entscheiden reicht weiter als unser Erkennen.*

Immanuel Kant (1724-1804)



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	5
Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis .....	13
Abkürzungsverzeichnis .....	15
1 Einleitung und Inhaltsübersicht.....	17
2 Grundlagen für eine risiko-basierte Instandhaltungsplanung .....	23
2.1 Risikobetrachtung und Schadensanalysen im Hochwasserschutz .....	23
2.1.1 Risikobegriff und Risikomanagement.....	23
2.1.2 Ermittlung von Hochwasserschäden.....	26
2.1.2.1 Überflutungssimulation.....	28
2.1.2.2 Werte und Schadenspotenzialanalyse .....	29
2.1.2.3 Schadensfunktion.....	30
2.1.3 Anwendungsbeispiele .....	31
2.1.3.1 Risikoanalysen im Bevölkerungsschutz.....	31
2.1.3.2 Schadensanalysen extremer Naturereignisse .....	35
2.1.4 Zusammenfassung.....	37
2.2 Instandhaltungsplanung für Verkehrswasserbauwerke.....	38
2.2.1 Verkehrswasserbauwerke des Bundes .....	38
2.2.1.1 Aufbau und Funktion von Wehranlagen .....	41
2.2.2 Bauwerksinspektion in der WSV.....	46
2.2.2.1 Schadensbewertung und Ermittlung der Zustandsnote .....	48
2.2.2.2 Zustandsprognosen.....	50
2.2.3 Priorisierung von Investitionsprojekten in der WSV .....	51
2.2.4 Zusammenfassung.....	53
2.3 Entscheidungstheoretische Grundlagen.....	54
2.3.1 Systeme zur Entscheidungsunterstützung .....	54
2.3.2 Der Prozess einer Entscheidungsfindung .....	56
2.3.3 Multikriterielle Entscheidungen.....	57
2.3.3.1 Elemente multikriterieller Entscheidungsproblem .....	59
2.3.3.2 Klassifizierung multikriterieller Entscheidungsprobleme.....	59
2.3.3.3 Auswahl einer Methode der MCDA .....	61
2.3.4 Zusammenfassung.....	69

3	Risiko-basierte Priorisierung und Entscheidungsunterstützung .....	71
3.1	Spezifizierung des Risikobegriffs .....	71
3.2	Ex-ante-Schadensanalyse und Ableitung von Indikatoren .....	73
3.2.1	Zeitliche und räumliche Strukturierung der Konsequenzklassen .....	73
3.2.2	Auswahl der Indikatoren und Datenanalyse .....	80
3.2.2.1	Kosten durch Verkehrsunterbrechung .....	85
3.2.2.2	Ermittlung der Flächengrößen und -nutzungsarten .....	88
3.2.2.3	Hydraulische Analysen.....	91
3.2.2.4	Wiederherstellungskosten für das Objekt .....	99
3.2.3	Zusammenfassung und Visualisierung der Ergebnisse .....	101
3.3	Risiko-basierte Prioritätsbewertung der Verkehrswasserbauwerke .....	105
3.3.1	Konzept und Anwendung der Methode PROMETHEE II .....	105
3.3.2	Festlegung der Gewichtungsfaktoren und der Präferenzfunktion .....	112
3.3.3	Sensitivitätsanalyse .....	115
3.3.3.1	Bestimmung von Insensitivitätsintervallen .....	116
3.3.3.2	Partitionierende Clusteranalyse mit dem k-medoid-Algorithmus.....	119
3.3.4	Zwischenergebnis.....	126
3.4	Planungsinstrument für die Instandhaltungsplanung .....	129
3.4.1	Modellierung zeitveränderlicher Eigenschaften.....	129
3.4.1.1	Alterungsprozesse.....	129
3.4.1.2	Instandhaltungsmaßnahmen .....	132
3.4.1.3	Rücksetzwerte.....	134
3.4.1.4	Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen.....	135
3.4.2	Aggregation und Analyse langfristiger Entwicklungen .....	135
3.4.2.1	Aufbau der Simulation .....	135
3.4.2.2	Erläuterungen zu den Ergebnissen.....	137
3.4.2.3	Einfluss der Nutzungsdauer der Verkehrswasserbauwerke.....	146
3.4.2.4	Veränderungen der Höhe des verfügbaren Budgets.....	152
3.4.2.5	Optionales Vorziehen von Maßnahmen.....	157
3.4.2.6	Zwischenergebnis.....	161
3.4.2.7	Ergänzende Analyse der Wirkung der Gewichtungsfaktoren .....	163
3.4.3	Zusammenfassung.....	166
4	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	169
4.1	Schlussfolgerungen.....	169
4.1.1	Schlussfolgerungen aus der Ex-ante-Schadensanalyse.....	169
4.1.2	Schlussfolgerungen zur Priorisierungsmethode .....	170
4.1.3	Schlussfolgerungen aus den Langzeitsimulationen.....	171

4.2	Kritische Würdigung und zukünftiger Forschungsbedarf.....	172
4.2.1	Datengewinnung und Datenaufbereitung.....	172
4.2.2	Bewertung der Priorität.....	174
4.2.3	Planungsinstrument für die Instandhaltung.....	175
5	Zusammenfassung.....	177
6	Literaturverzeichnis.....	181
7	Anhang .....	189



## Kurzfassung

Altersstruktur und Zustand der Verkehrswasserbauwerke an den Bundeswasserstraßen machen einen gezielten Einsatz von Ressourcen zwingend notwendig. Die Verkehrswasserbauwerke werden bislang unabhängig voneinander hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Schiffsverkehr sowie ihres Zustands bewertet und einer der Prioritätsstufen zugeordnet, sodass die Anzahl der Bauwerke mit hoher Priorität und der Instandhaltungsrückstau beständig steigt.

Potenzielle Folgen für die Bevölkerung, die Wirtschaft und die Umwelt durch Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen bleiben in der Entscheidungsfindung bislang weitestgehend unberücksichtigt. Methoden wie bspw. standardisierte Risikobewertungen, Nachrechnungen oder Gutachten liefern präzise Ergebnisse für Einzelbauwerke, sind in der Umsetzung für einen großen Bauwerksbestand allerdings ressourcenintensiv und somit eher hinderlich bei der Beschleunigung von Entscheidungsprozessen. Eine vorausschauende Instandhaltungsplanung unter Berücksichtigung bauwerksspezifischer Risiken und langfristiger Entwicklungen für einen großen Bauwerksbestand gestaltet sich zunehmend komplex.

Diese Dissertation stellt ein Planungsinstrument für die Instandhaltung von Verkehrswasserbauwerken vor, welches eine risiko-basierte Bewertung der Priorität in die Instandhaltungsplanung für einen großen Bauwerksbestand integriert sowie aktuelle und zukünftige Ressourcenbedarfe sowie Entwicklungen im Instandhaltungsrückstau quantifiziert.

Da aufgrund der Zustandsentwicklungen der Verkehrswasserbauwerke zunehmend mit einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen zu rechnen ist, werden für jedes untersuchte Bauwerk mögliche Versagensfolgen für dieses Extremereignis erfasst. Dafür werden Geoinformationsdaten sowie Daten verschiedener statistischer Ämter ausgewertet. Mit einem angepassten hydraulischen Ansatz wird die Höhe einer Schwallwelle nach einem plötzlichen Bauwerksversagen berechnet. Die in der Ex-ante-Schadensanalyse neu ermittelten Daten werden als Kriterien für die risiko-basierte multikriterielle Entscheidungsanalyse herangezogen. Bei der verwendeten Outranking Methode werden die Ergebnisse aus paarweisen Vergleichen zwischen den Bauwerken in Präferenzwerte überführt und mithilfe der Aggregation der Präferenzwerte wird für jedes Bauwerk ein risiko-basierter Prioritätswert ermittelt.

Für die Instandhaltungsplanung in Form einer Langzeitprognose werden Alterungsprozesse und Instandhaltungsmaßnahmen modelliert, sodass für jedes Bauwerk bestimmt werden kann, wann das Ende der Nutzungsdauer erreicht wird, welche Instandhaltungsmaßnahme notwendig ist und wie hoch der Investitionsbedarf ist. Da in einem großen Bauwerksbestand immer mehrere Bauwerke zeitgleich das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen, werden Bauwerke mit höheren Prioritätswerten bevorzugt in der Instandhaltungsplanung berücksichtigt. Das Planungsinstrument kann an unterschiedliche Rahmenbedingungen wie die Nutzungsdauer der Bauwerke oder das jährlich verfügbare Budget angepasst werden. In der Szenarioanalyse werden für die unterschiedlichen Instandhaltungspläne langfristige Trends im Bauwerksbestand und die Entwicklung des Instandhaltungsrückstaus aufgezeigt.



## Abstract

The ageing and structural condition of the waterway infrastructures of German federal waterways make a targeted use of resources absolutely essential. To date, the waterway infrastructures have been independently assessed with regard to their importance for freight traffic and their structural condition. Thereafter, different priority levels are assigned to these structures according to the assessment of their current structural condition. Meanwhile, the number of high-priority structures has significantly increased and forms the existing maintenance backlog. Potential consequences for the population, the economy and the environment due to functional or structural failure have not always been taken into account in decision-making. Methods such as standardized risk assessments, structural analysis or expert opinions provide precise results for individual infrastructure assets. However, these approaches are resource-intensive when implemented for a significant number of structures, and thus, are likely to curb the decision-making processes. Foresighted maintenance planning, taking into account structure-specific risks and long-term developments for a considerable number of structures, is becoming increasingly complex.

This thesis presents a planning tool for the maintenance of waterway infrastructure assets, which integrates a risk-based evaluation of the priority into the maintenance planning for a wide range of structures. It quantifies current and future resource requirements as well as improvements to remediate the maintenance backlog.

Since a functional or structural failure is increasingly becoming a high concern due to the unsatisfactory structural condition of many waterway structures, possible failure consequences for such unpredictable extreme event are recorded for each investigated structure. Geo-information data and data from various statistical agencies are evaluated for this purpose. With an adapted hydraulic approach, the height of a surge wave after a sudden structural failure is calculated. The data newly determined in the ex-ante damage analysis are used as criteria for the risk-based multi-criteria decision analysis. Using an outranking method, the results of pairwise comparisons between the examined structures are converted into preference values and a risk-based priority value is determined for each structure by aggregating the preference values.

Within the framework of a long-term forecasting of maintenance, ageing processes and maintenance measures are modelled. The aim of such modeling is to establish for each structure the time by which the structure will have reached its useful lifetime, which maintenance measure is necessary and how much investment is required. Since many infrastructure assets of the vast portfolio of facilities are likely to reach their useful lifetime at the same time, structures with higher priority values are preferably considered for maintenance planning. The planning tool is adapted to different framework conditions, such as the useful lifetime of the structures or the annually available budget. The scenario analysis describes long-term trends in the infrastructure portfolio and the development of the maintenance backlog for the different maintenance plans.



## Danksagung

Fragestellung und Umsetzung der vorliegenden Arbeit sind Ergebnisse eines Forschungsprojekts während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und parallel als Doktorandin am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann für die Möglichkeit zur Promotion als Gast-Doktorandin am IIP und die freundlich-beharrliche Förderung meiner Fähigkeiten als Wissenschaftlerin.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Kunibert Lennerts vom Institut für Management und Technologie (TMB) am KIT danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Unterstützung durch die stets wohlwollend-kritischen Fragen.

Beim Leiter des Referats „Infrastrukturmanagement“ Dr. Jörg Bödefeld bedanke ich mich für die Betreuung meiner Arbeit seitens der BAW und die eingeräumten Freiheiten, was die Realisierung meines Promotionsvorhabens gefördert hat.

Herrn Dr. Marcus Wiens, Leiter der Forschungsgruppe Risikomanagement am IIP, danke ich für die Offenheit gegenüber neuen Themen und die vielen freundlich-konstruktiven Gespräche.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei allen, die mich während der vergangenen Jahre – teilweise auch schon weit vor der Promotion – als Freunde und/oder Kollegen begleitet haben und mir in allen Lebenslagen helfend zur Seite standen: Vanessa, Mariana, Francesca, Sarah, Viki, Harald. Mein Dank geht zudem an meine ehemaligen Kollegen in der BAW und am IIP für eine Arbeitsatmosphäre, die mir für das Gelingen meines Vorhabens den notwendigen Rahmen gegeben haben.

Zu guter Letzt bedanke ich mich für die uneingeschränkte Unterstützung bei meinem Lebenspartner und besten Freund Frank, meinen Töchtern Rike, Anja und Frieda, bei meinen und Franks Eltern sowie bei unserem Hund Theo, der während unserer gemeinsamen Streifzüge durch die Weinberge diverse Vorträge in Dauerschleife anhören musste.

29.05.2020

Heike Schmidt-Bäumler



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	21
Abbildung 2: Etymologie des Risikobegriffs	23
Abbildung 3: Hierarchische Struktur des Risikobegriffs	24
Abbildung 4: Der Risikomanagementprozess	25
Abbildung 5: Elemente von Risikoanalysen im Hochwasserschutz	27
Abbildung 6: Kategorien von Hochwasserschäden	29
Abbildung 7: Auftreten tangibler, direkter Hochwasserschäden in Raum und Zeit	30
Abbildung 8: Ergebnisse einer Hochwassersimulation	32
Abbildung 9: Ganzheitlicher Ansatz des Risiko- und Krisenmanagementzyklus	33
Abbildung 10: Risikoverständnis nach CEDIM	36
Abbildung 11: Kategorisierung der Bundeswasserstraßen	39
Abbildung 12: Unterschied zwischen Talsperre und Wehranlage	41
Abbildung 13: Aufbau fester und beweglicher Wehranlagen	43
Abbildung 14: Schlauchwehr am Tempe Town Lake, USA, Arizona	44
Abbildung 15: Verteilung der 245 Wehranlagen auf die Zustandsnotenbereiche	49
Abbildung 16: Zustand eines Bauwerks in Abhängigkeit der Nutzungsdauer	50
Abbildung 17: Grundstruktur von Entscheidungsunterstützungssystemen	55
Abbildung 18: Auswahl von Verfahren des Multi Criteria Decision Making	61
Abbildung 19: Übersicht zu den Methoden der MCDA	63
Abbildung 20: Entscheidungsbaum für die Auswahl von Methoden der MCDA	65
Abbildung 21: Modell der Methoden der MCDA	66
Abbildung 22: Der spezifizierte Risikobegriff	71
Abbildung 23: Analyse der Ereignis-Konsequenzen-Zusammenhänge für Wehranlagen	73
Abbildung 24: Erstellung der Flächennutzungsanalyse entlang einer Wasserstraße	90
Abbildung 25: Verlauf bis zum Einstellen der neuen Wasserspiegellage	93
Abbildung 26: Prinzipskizze zur Höhe einer Schwallwelle	94
Abbildung 27: Diagramm zu den ermittelten Indikatoren der Wehranlage 2136304003	102
Abbildung 28: Diagramm zu den ermittelten Indikatoren der Wehranlage 2136706006	103
Abbildung 29: Diagramm zu den ermittelten Indikatoren der Wehranlage 2136908001	103
Abbildung 30: Grafische Darstellung der Sensitivitätsanalyse	118
Abbildung 31: Plot zur Bestimmung der optimalen Anzahl Cluster	120
Abbildung 32: Rangwechsel durch Veränderung der Gewichtung des Kriteriums Menschen	122
Abbildung 33: Entwicklung der Zustandsnoten für zwei Verfallsprozesse	130
Abbildung 34: Bestimmung des Eingreifzeitpunkts mittels der Prognosefunktion	131

Abbildung 35: Entscheidungsbaum für Instandhaltungsmaßnahmen	133
Abbildung 36: Teilschritte der Simulation	137
Abbildung 37: Plot der Simulation für das Ausgangsszenario	140
Abbildung 38: Plot der Simulation für das Vergleichsszenario	141
Abbildung 39: Plot zu Szenario 2.2.3 (robuste Wehranlagen)	150
Abbildung 40: Plot zu Szenario 3.2.3 (mittlere Wehranlagen)	151
Abbildung 41: Plot zu Szenario 1.1.3 (Budget 1,25 % des Anlagevermögens)	155
Abbildung 42: Plot zu Szenario 1.3.3 (Budget 1,75 % des Anlagevermögens)	156
Abbildung 43: Plot zu Szenario 1.2.1 (Kein Vorziehen von IH-Maßnahmen)	159
Abbildung 44: Plot zu Szenario 1.2.4 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 15 Jahre)	160
Abbildung 45: Corine land cover classes	196
Abbildung 46: Verteilung und Boxplot zu Hydraulischer Parameter	198
Abbildung 47: Verteilung und Boxplot zu Menschen im Untersuchungsgebiet	199
Abbildung 48: Verteilung und Boxplot zu Größe der Siedlungsflächen	200
Abbildung 49: Verteilung und Boxplot zu Größe der Naturflächen	201
Abbildung 50: Verteilung und Boxplot zu Größe Industrie- und Gewerbeflächen	202
Abbildung 51: Verteilung und Boxplot zu Wirtschaftliche Folgekosten	203
Abbildung 52: Plot zu Szenario 4.2.3 (anfällige Bauwerke)	221
Abbildung 53: Plot zu Szenario 1.2.2 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 5 Jahre)	222

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Informationsquellen für verschiedene Schutzgüter .....	34
Tabelle 2: Beispiele für Schadensparameter .....	35
Tabelle 3: Transportmengen in Tonnen pro Jahr für die Netzkategorisierung .....	38
Tabelle 4: Anzahl Objekte ausgewählter Objektuntergruppen .....	40
Tabelle 5: Zuordnung von Schadenspotenzialen im Hochwasserfall .....	44
Tabelle 6: Klassifizierung der Staustufen .....	45
Tabelle 7: Auszug aus VV-WSV 2101 - Objektartenzuordnung zu Inspektionskategorien.....	46
Tabelle 8: Inspektionsformen der WSV .....	47
Tabelle 9: Klassifizierungsmöglichkeiten für Entscheidungsprobleme .....	61
Tabelle 10: Klassifikation der MADM-Verfahren .....	62
Tabelle 11: Eingrenzung der Methoden der MCDA (Eigene Darstellung).....	68
Tabelle 12: Differenzierung zeitlicher Wirkungshorizonte .....	75
Tabelle 13: Differenzierung räumlicher Wirkungshorizonte .....	75
Tabelle 14: Grundstruktur der Wirkungshorizonte und Konsequenzenklassen .....	77
Tabelle 15: Kernprozesse – Objektarten und Konsequenzenklassen .....	78
Tabelle 16: Objektuntergruppen und potenzielle Konsequenzen .....	81
Tabelle 17: Konsequenzenklassen und zugehörige Indikatoren.....	84
Tabelle 18: Zuordnung der Binnenwasserstraßen zu den Bundeswasserstraßen .....	86
Tabelle 19: Güterbeförderung auf den Abschnitten der Binnenwasserstraße Saar .....	87
Tabelle 20: Schleusenanlagen der Saar und zugehörige Liegegelder.....	88
Tabelle 21: Indikatoren und zugeordnete CLC-Klassen .....	89
Tabelle 22: Ergebnisse der Flächenanalyse im Untersuchungsgebiet der Saar .....	91
Tabelle 23: Höhen der Schwallwellen an der Saar .....	98
Tabelle 24: Größe und Wiederherstellungskosten der Wehre an der Saar .....	101
Tabelle 25: Ergebnis der Datenerhebung für die Wehranlagen an der Saar.....	104
Tabelle 26: Präferenzfunktionen der Methode PROMETHEE .....	107
Tabelle 27: Ranking der Wehranlagen nach PROMETHEE II (Auszug).....	111
Tabelle 28: Einzelwerte der nach Nettofluss sortierten Wehranlagen (Auszug).....	112
Tabelle 29: Expertenbefragung zur Gewichtung der Kriterien für die Priorisierung .....	113
Tabelle 30: Gewichtung der Kriterien für die Priorisierung .....	113
Tabelle 31: Gewählte Präferenzfunktionen der Methode PROMETHEE.....	114
Tabelle 32: Statistische Kennzahlen der Differenzbeträge .....	115
Tabelle 33: Teilergebnis der Sensitivitätsanalyse zur Gewichtung des Kriteriums „Menschen“	117
Tabelle 34: Kriterienausprägungen der zwei Cluster-Wehranlagen.....	120

Tabelle 35: Größe der 13 gebildeten Cluster .....	121
Tabelle 36: Kriterienausprägungen der 13 Cluster-Wehranlagen.....	121
Tabelle 37: Rangwechsel bei Variation der Gewichtung einzelner Kriterien.....	123
Tabelle 38: Parameter für die Anwendung der Methode PROMETHEE II.....	126
Tabelle 39: Rang 1 bis 10 der mit PROMETHEE II priorisierten Wehranlagen.....	126
Tabelle 40: Priorisierungsergebnisse im Vergleich.....	127
Tabelle 41: Rücksetzwerte nach einer Instandhaltungsmaßnahme .....	134
Tabelle 42: Anteilige Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen.....	135
Tabelle 43: Eingabemaske für die Parameter in der Simulation.....	138
Tabelle 44: Parameter von Ausgangsszenario und Vergleichsszenario .....	139
Tabelle 45: Einzelwerte zu Ausgangsszenario und Vergleichsszenario.....	142
Tabelle 46: Gesamtergebnis für das Ausgangsszenario 1.2.3max2BW .....	143
Tabelle 47: Gesamtergebnis für das Vergleichsszenario 1.2.3.....	144
Tabelle 48: Einzelergebnisse für das Ausgangsszenario 1.2.3max2BW (Auszug) .....	145
Tabelle 49: Einzelergebnisse für das Vergleichsszenario 1.2.3.....	146
Tabelle 50: Ergebnisse der Expertenbefragung zur Nutzungsdauer .....	147
Tabelle 51: Szenarien für unterschiedliche Nutzungsdauern .....	147
Tabelle 52: Parameter der Szenarien zur Nutzungsdauer.....	148
Tabelle 53: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung Nutzungsdauer .....	152
Tabelle 54: Szenarien für das jährlich verfügbare Budget.....	154
Tabelle 55: Parameter von Szenario 1.1.3 und 1.3.3 (Verfügbares Budget).....	154
Tabelle 56: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung (verfügbares Budget).....	156
Tabelle 57: Szenarien für die Zeitspanne zum Vorziehen von Maßnahmen.....	157
Tabelle 58: Parameter von Szenario 1.2.1 und 1.2.4.....	158
Tabelle 59: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung (Vorziehen von Maßnahmen).....	161
Tabelle 60: Zusammenstellung der Einzelwerte der untersuchten Szenarien.....	162
Tabelle 61: Variation der Gewichtungsfaktoren .....	163
Tabelle 62: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung (Gewichtungsfaktor).....	164
Tabelle 63: Instandhaltungsplanung.....	165
Tabelle 64: Bundeswasserstraßen ohne erfassten Güterverkehr .....	189
Tabelle 65: Übersicht möglicher Parameterkombinationen .....	197
Tabelle 66: Testergebnis der Priorisierung der Wehranlagen gemäß MPI.....	204
Tabelle 67: Gesamtergebnis zu Szenario 1.2.3 (ungekürzt).....	223
Tabelle 68: Einzelergebnis zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023) .....	226
Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023) .....	228

## Abkürzungsverzeichnis

_mv	Mittelwert eines Wertes
_sd	Standardabweichung eines Wertes
AD	Altersdifferenz zum Vorziehen einer Maßnahme
AV	Anlagevermögen
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BAW-MSV	Merkblatt Schadensklassifizierung
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
bspw.	beispielsweise
BWStr	Bundeswasserstraßen
CEDIM	Center for Disaster Management and Risk Reduction
CLC	CORINE Land Cover
CW	Cluster-Wehranlage
DbN	Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme
DM	Decision Maker, vgl. ET
ELECTRE	Elimination Et Choix Tradusiant la REalité
ET	Entscheidungsträger
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
EU-WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie
G	Menschen
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GVS	Güterverkehrsstatistik des Statistischen Bundesamtes
I <sub>g</sub>	Höhe der getätigten Investitionen
IHR	Instandhaltungsrückstau
IPCC	International Panel for Climate Change
KK	Konsequenzenklasse
M <sub>g</sub>	Anzahl durchgeführter Maßnahmen
MADM	Multi Attribute Decision Making
Max IHR	Maximalwert Instandhaltungsrückstau
Mb	Massivbau
MCAP	Multiple Criteria Aggregation Procedures
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
MCDM	Multi Criteria Decision Making
Min IHR	Minimalwert Instandhaltungsrückstau
MODM	Multi Objective Decision Making
MPI	Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten
MQ	Mittelwasserabfluss

MS Excel .....	Microsoft Tabellenkalkulationsprogramm
Objekt-ID.....	Objekt-Identifikationsnummer
OGr.....	Objektgruppe
OO Calc.....	Open Office Tabellenkalkulationsprogramm
OGr .....	Objektobergruppe
OUGr .....	Objektuntergruppe
OW .....	Oberwasser
PABI .....	Praxisorientierte Adaptive Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen
PROMETHEE .....	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations
S .....	Infrastrukturbetreiber
Stb.....	Stahlbau
U.....	Umwelt
UBA.....	Umweltbundesamt
UW.....	Unterwasser
VV-WSV .....	Verwaltungsvorschrift der WSV
W .....	Wirtschaft
WADABA.....	Wasserstraßen Datenbank
WSA.....	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV .....	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
WSVPruf.....	Datenbank zur Bauwerksinspektion der WSV
z.B.....	zum Beispiel
ZN.....	Zustandsnote
ZSKG.....	Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz

# 1 Einleitung und Inhaltsübersicht

Eine der wichtigsten Aufgaben im Infrastrukturmanagement ist der gezielte Einsatz von Ressourcen zum Erhalt der baulichen Substanz, da die wirtschaftliche Entwicklung eines Staates und der Ausbau von Verkehrsinfrastrukturen in direktem Zusammenhang stehen (Zierer, 2015). Viele der heute noch funktionsfähigen Ingenieurbauwerke der Verkehrswege in Deutschland wurden Anfang des 20. Jahrhunderts bis 1970 gebaut und nähern sich dem Ende ihrer technischen Lebensdauer. Fortschreitenden Substanzverlusten (BMVI, 2015) stehen rückläufige Investitionen in die Verkehrsinfrastrukturen gegenüber (Dams, Greive, 2014; Eilts, 2016). Nahezu zwei Drittel der Verkehrswasserbauwerke sind in einem nur „ausreichenden“ oder „ungenügenden“ bzw. „nicht ausreichenden“ Zustand (BMVI, 2015). Aufgrund der knappen Ressourcen und der Dringlichkeit der Instandhaltungsmaßnahmen ist es notwendig, die einzelnen Bauwerke für eine Instandhaltungsstrategie zu priorisieren (BMVI, 2015).

Die Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten (MPI) des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) bewertet einerseits die wirtschaftliche Bedeutung aufgrund der Lage im Kern- oder Nebennetz und andererseits die Sicherheitsrelevanz der Verkehrswasserbauwerke (BMVI, 2016a). Im Ergebnis einer eigenen testweisen Durchführung der MPI mit Daten aus dem Bauwerksverzeichnis der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sind aktuell etwa 200 Ingenieurbauwerke (rund 10 % des Gesamtbestands) der höchsten Prioritätsstufe zuzuordnen. Für einen Großteil dieser Bauwerke sind demnach unmittelbar Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen. Da diese Aufgabe mit den verfügbaren Ressourcen zeitnah nicht zu bewältigen ist, bedarf es zusätzlicher Kriterien für differenziertere Ergebnisse aus der Priorisierung.

Die Priorisierung von Objekten für die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen ist Gegenstand mehrerer Forschungsarbeiten (vgl. Übersichtsarbeiten von Kim Wing et al., 2016; Kabir et al., 2013). Sind unterschiedliche Kriterien oder auch Zielsetzungen einer Priorisierung zu berücksichtigen, unterstützen die Methoden der Multikriteriellen Entscheidungsanalyse (Engl.: Multi Criteria Decision Analysis, MCDA) den Entscheidungsträger (Geldermann, Lerche, 2014; Greco et al., 2016; Zopounidis, Doumpos, 2002).

Anwendungsbereiche der MCDA finden sich zum Beispiel im Infrastrukturmanagement (Vidovic et al., 2018; Mild et al., 2015; Patidar et al., 2007), im Lebenszyklusmanagement bei der Instandhaltungsplanung für Hochbauten, Gebäude oder Industrieanlagen (Dekker, 1995; Schneider, 2013; Shen et al., 1998; Yusof et al., 2012) sowie bei der Bewertung und Auswahl von Schutzmaßnahmen im Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (Jongejan, 2013; Morales-Torres et al., 2016; Pardo-Bosch, Aguado, 2014).

Basis für die Kriterien zur Priorisierung im Infrastrukturmanagement sowie im Lebenszyklusmanagement bilden im Wesentlichen Ergebnisse aus Zustandsanalysen für konkrete Objekttypen (Dohi, 2014; Frangopol, Liu, 2005; González et al., 2006; Hendhratmoyo et al., 2017; Ochs, 2012;

Osztermayer Jozsef, 2007; Rashidi et al., 2015; Shah et al., 2013; Kim Wing et al., 2016). Als Kriterien werden zudem in Abhängigkeit von der Zielsetzung die Kosten, die Bedeutung des Objekts für den Verkehr und/oder die Sicherheit für die Nutzer herangezogen (Frangopol, Liu, 2005; Kim Wing et al., 2016). Zu den wesentlichen Zielen bei einer Priorisierung im Kontext des Infrastruktur- und Lebenszyklusmanagements gehören die Optimierung des Ressourceneinsatzes, die gezielte Platzierung von Instandhaltungsmaßnahmen und die Erfüllung von Anforderungen unterschiedlicher Nutzergruppen. Somit sind Entscheidungen nicht nur in Hinblick auf ein einzelnes Objekt der Infrastruktur, sondern unter Berücksichtigung seiner Bedeutung als Element eines größeren Netzwerks zu treffen (Baji et al., 2017; Frangopol et al., 2005; Kabir et al., 2014; Ouyang, 2014; Seyedshohadaie et al., 2010; Shafiee, 2016).

Im Risikomanagement extremer Naturereignisse steht der Umgang mit potenziellen Konsequenzen im Vordergrund, was in die Entscheidungsfindung bspw. bei der Auswahl und Bewertung von Hochwasserschutzkonzepten gezielt einbezogen wird (Lisson, 2014) und zudem im Wasserhaushaltsgesetz nach den Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie EU-WRRL (BMU WHG, 2009) verankert ist. Die analysierten Konsequenzen umfassen ökonomische und ökologische Schäden sowie die Gefährdung von Personen. Verschiedene Arbeiten widmen sich insbesondere der Analyse von Schadenspotenzialen (Bachmann, 2012; Hess, 2008; Kron, 2008; Kutschera, 2008; Meyer, 2005; Thieken, 2010). Ziel im Risikomanagement extremer Naturereignisse ist eine bedarfsorientierte Kombination und Durchführung von Maßnahmen zum Schutz und zur Vorsorge vor extremen Naturereignissen.

Trotz der zuvor beschriebenen Bandbreite decken die wissenschaftlichen Studien nur einen Teilbereich der Anforderungen an ein Infrastrukturmanagement für Verkehrswasserbauwerke ab. So steht weniger der Substanzerhalt des Bauwerks im Vordergrund als vielmehr der Erhalt einer konkreten Funktion an einer bestimmten Stelle der Wasserstraße. Ein Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen kann, ähnlich wie ein Hochwasserereignis, wirtschaftliche und ökologische Folgen sowie Konsequenzen für die Bevölkerung haben.

Darüber hinaus fehlt in den vorliegenden Ansätzen für die Priorisierung und Entscheidungsunterstützung im Infrastruktur- oder Lebenszyklusmanagement die Berücksichtigung zeitabhängiger Eigenschaften eines großen heterogenen Bauwerksbestands. Da sich diese aufgrund durchgeführter Instandhaltungsmaßnahmen oder aufgrund von Alters- und Zustandsentwicklungen kontinuierlich verändern, ist die Berücksichtigung dieser Prozesse unabdingbar. Einige Ansätze im Lebenszyklusmanagement berücksichtigen zeitveränderliche Eigenschaften von Bauwerken (Bahr 2008; Durango und Madanat 2002; Frangopol und Liu 2005), vernachlässigen jedoch Informationen zur Bewertung möglicher Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen sowie deren Integration in die Entscheidungsfindung für das Instandhaltungsmanagement größerer Bauwerksbestände.

Daraus lässt sich ableiten, dass es bisher an einem geschlossenen und praktikablen Instrument fehlt, welches die Konzepte des Risikomanagements und die des Infrastruktur- und Lebenszyklusmanagements in die Instandhaltungsstrategie für Verkehrsinfrastruktursysteme integriert

und dem Entscheidungsträger zudem langfristige Effekte im Bauwerksportfolio aufzeigt. Der Abbau eines Instandhaltungsrückstaus oder eine Priorisierung von Maßnahmen bei wenigen oder qualitativ nicht ausreichenden Daten konnte in den recherchierten Veröffentlichungen ebenso wenig ausgemacht werden wie die Anwendbarkeit der Methoden für einen großen heterogenen Bauwerksbestand.

Es lassen sich somit zwei zentrale Forschungsfragen formulieren:

- Wie können Verkehrswasserbauwerke innerhalb eines großen Bauwerksbestands unter Berücksichtigung fortschreitender Substanzverluste für eine Instandhaltungsplanung bewertet werden?
- Wie kann eine Instandhaltungsplanung unter Berücksichtigung restriktiver Rahmenbedingungen entwickelt werden, sodass aktuelle und zukünftige Ressourcenbedarfe erkennbar werden und insbesondere der Instandhaltungsrückstau quantifiziert wird?

Für die Beantwortung der Forschungsfragen werden Erkenntnisse aus verschiedenen Fachgebieten zusammengeführt. Aufgrund der Komplexität der Wirkzusammenhänge zwischen wasserbaulichen Verkehrsinfrastrukturen und den Systemen, in die sie eingebettet sind, eignen sich insbesondere Methoden des auf den Hochwasserschutz bezogenen Risikomanagements und des Lebenszyklusmanagements für eine Verbesserung der Instandhaltungsplanung. Dafür werden zum einen Geoinformationssysteme mit vorhandenen Datenbanken gekoppelt und ausgewertet sowie ein Ansatz aus dem Wasserbau angewandt, um hydraulische Effekte zu approximieren. Zum anderen werden zeitabhängige Veränderungen mithilfe von Zustandsprognosen und einer regelbasierten Auswahl von Instandhaltungsmaßnahmen in ein Entscheidungsunterstützungssystem integriert. Langzeitsimulationen zeigen, wie sich der Bauwerksbestand mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen entwickelt.

Die vorliegende Ausarbeitung ist in vier Kapitel unterteilt (siehe Abbildung 1). Die Einleitung im ersten Kapitel ordnet die Arbeit thematisch ein und arbeitet aktuelle Herausforderungen im Infrastrukturmanagement für Verkehrswasserbauwerke heraus. Es folgen sowohl eine kurze Übersicht zu relevanten Forschungsansätzen im Risiko- und Lebenszyklusmanagement als auch die Ableitung der Forschungsfragen. Das erste Kapitel schließt mit der Beschreibung der Zielsetzung und der Darstellung zum Aufbau der Arbeit.

Das zweite Kapitel widmet sich den Grundlagen, die für den eigenen Ansatz und die prototypische Anwendung notwendig sind. Beginnend mit dem allgemeinen Risikoverständnis und dem zyklischen Aufbau des Risikomanagements wird zunächst die Methode der Ex-ante-Schadensanalyse im Hochwasserschutz beschrieben, da insbesondere hier Parallelen zu den Versagensfolgen von Verkehrswasserbauwerken zu erwarten sind. Anschließend werden der Aufbau und die Funktion von Verkehrswasserbauwerken am Beispiel der Wehranlagen erläutert. Es folgt die Vorstellung der Bauwerksinspektion der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), der

Zustandsbewertung und -prognose sowie der Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten (MPI). Das Kapitel schließt mit einer Einführung zur Multikriteriellen Entscheidungsanalyse und zu Entscheidungsunterstützungssystemen (EUS) sowie der systematischen Auswahl einer Priorisierungsmethode für die Anwendung in dieser Arbeit.

In Kapitel 3 folgt die Zusammenführung der bisherigen Erkenntnisse in den eigenen Lösungsansatz. Dieser umfasst die drei Teilschritte Entwicklung des Indikatorensystems, risiko-basierte Priorisierung und Integration zeitveränderlicher Parameter in das Planungsinstrument.

Für die Entwicklung des Indikatorensystems wird im ersten Teilschritt das Risikoverständnis der vorliegenden Arbeit definiert und die zugrunde gelegte Struktur für die zeitliche und räumliche Verortung von Konsequenzen entwickelt. Ausgehend von den Funktionen der Verkehrswasserbauwerke werden die nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen potenziell betroffenen Bereiche (Menschen, Wirtschaft, Umwelt, Infrastrukturbetreiber) ermittelt und die entsprechenden Indikatoren identifiziert. Es folgt die Beschreibung Methode zur Datenerhebung für den jeweiligen Indikator. Diese Ausführungen schließen mit einer kurzen Zusammenfassung und Veranschaulichung am Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen.

Der zweite Teilschritt widmet sich der Priorisierung der Bauwerke auf Basis des zuvor entwickelten Indikatorensystems. Die Priorisierung erfolgt mit der in Abschnitt 2 gewählten Methode PROMETHEE II (Engl.: Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations), wobei zuvor die Funktionsweise der Methode erläutert wird. Ein Teil der Ausführungen widmet sich der Sensitivitätsanalyse und dem Umgang mit auftretenden Schwierigkeiten. Die Durchführung und die Ergebnisse der Priorisierung werden am Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen gezeigt.

Im dritten Teilschritt werden die Ergebnisse aller untersuchten Bauwerke in das Planungsinstrument integriert. Auf Grundlage der aktuellen Zustandsbewertung und mit Prognosefunktionen wird die Restnutzungsdauer berechnet und alle Bauwerke werden dem Jahr zugeordnet, in dem voraussichtlich eine außerordentliche Instandhaltungsmaßnahme notwendig wird. Nach zuvor definierten Entscheidungsregeln wird bestimmt, welche baulichen Maßnahmen zu erwarten sind. Die Simulation der zeitlichen Entwicklungen im Bauwerkportfolio unter bestimmten Rahmenbedingungen und die Auswertung der Ergebnisse werden wie zuvor am Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen dargelegt.

Es folgen Kapitel 4 und 5 mit den Schlussfolgerungen und den Ansatzpunkten für zukünftige Forschungsarbeiten sowie einer Zusammenfassung der zentralen Aspekte der Arbeit (siehe Abbildung 1).

<b>1 Einleitung</b>		
Einführung	Ziele und Vorgehensweise	
<b>2 Grundlagen für eine risiko-basierte Instandhaltungsplanung</b>		
Risikobegriff und Ex-ante-Schadensanalysen	Instandhaltungsplanung für Verkehrswasserbauwerke	Entscheidungstheorie und Auswahl einer Methode
<b>3 Konzeption und Anwendung des Planungsinstruments</b>		
<b>Ex-ante-Schadensanalysen und Entwicklung eines Indikatorensystems</b>		
Risikoverständnis und Objektauswahl	Strukturierung und Ableitung von Indikatoren	Anwendung am Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen
<b>Risiko-basierte Prioritätsbewertung der Verkehrswasserbauwerke</b>		
Anwendung der Methode PROMETHEE II	Sensitivitätsanalyse zur Methode PROMETHEE II	Priorisierung innerhalb der Objektuntergruppe Wehranlagen
<b>Langzeitprognosen für die Instandhaltungsplanung</b>		
Prognose und Modellierung zeitveränderlicher Prozesse	Simulation und Szenarioanalyse langfristiger Entwicklungen	Veranschaulichung für die Objektuntergruppe Wehranlagen
<b>4 Schlussfolgerungen und Ausblick</b>		
Schlussfolgerungen	Kritische Würdigung und Ausblick	
<b>5 Zusammenfassung</b>		

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit



## 2 Grundlagen für eine risiko-basierte Instandhaltungsplanung

### 2.1 Risikobetrachtung und Schadensanalysen im Hochwasserschutz

#### 2.1.1 Risikobegriff und Risikomanagement

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „Risiko“ verwendet, wenn die Möglichkeit nachteiliger Auswirkungen besteht. Ein Risiko ist nach diesem Verständnis ein unsicheres Ereignis, dessen Nichteintreten dem Eintreten vorgezogen wird. So werden mit dem Risikobegriff eher unangenehme Gefahrensituationen, mögliche Verluste, Schäden oder Veränderungen mit ungewissen Konsequenzen verbunden (Dudenverlag, 2019). Dem gegenüber steht der positive Risikobegriff, der als Chance verstanden wird (Kalwait et al., 2008).

Jonen (2007) beschreibt zwei Ansätze zur Entstehung des Risikobegriffs (siehe Abbildung 2). Einerseits kann die Entstehung auf das italienische ‚rischiare‘ und das lateinische ‚risicare‘ zurückgeführt werden, was übersetzt ‚eine Klippe umsegeln‘ bzw. ‚etwas wagen‘ oder ‚herausfordern‘ bedeutet. In diesem Zusammenhang ist ein Risiko etwas Vermeidbares, auf was sich bewusst eingelassen wird. Andererseits kann nach Jonen (2007) der Risikobegriff auf das griechische ‚riza‘ und auf das arabische ‚rizq‘ zurückgeführt werden. Hier handelt es sich sinngemäß um den ‚Lebensunterhalt, der von Gott abhängt‘ oder auch ‚Schicksal‘. Nach diesem Verständnis ist Risiko etwas Gegebenes, was sich nicht vermeiden lässt. Beide Ansätze lassen sich somit hinsichtlich der Wahlmöglichkeiten innerhalb der Situation bzw. der Beeinflussbarkeit unterscheiden.

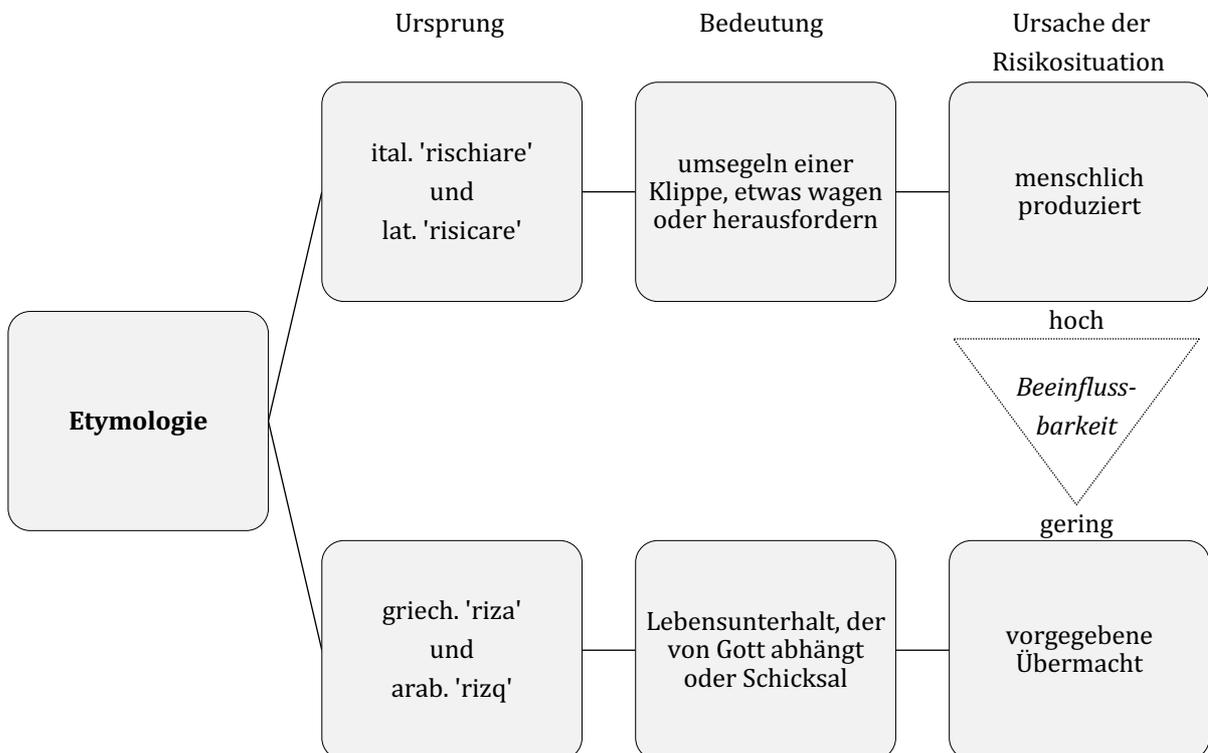


Abbildung 2: Etymologie des Risikobegriffs (Jonen, 2007)

Darüber hinaus wird das Risikoverständnis im Kontext der unterschiedlichen Fragestellungen in Wissenschaftsdisziplinen wie den Ingenieurwissenschaften, den Wirtschaftswissenschaften oder den Geisteswissenschaften spezifiziert (Amyotte, McCutcheon, 2006; Faturechi, Miller-Hooks, 2015; Glaser, 2019; Japp, 2000; Winzer et al., 2009). Das Risiko wird als eine prognostische Größe dargestellt, die sich aus der Eintrittswahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Ereignis und dem zugehörigen Schadensausmaß zusammensetzt. Kaplan, Garrick (1981) beschreiben das Risiko als Menge unterschiedlicher Ereignisse:

$$R = \{[s_i, p_i, a_i]\} \text{ mit } i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Mit  $n \in \mathbb{N}$

$s_i$ : Beschreibung des Ereignisses  $i$

$p_i$ : Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses  $i$

$a_i$ : Schadensausmaß des Ereignisses  $i$

Die quantitative Bestimmung des Risikos  $R$  für ein bestimmtes Ereignis erfolgt im Allgemeinen durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeit  $P$  des Ereignisses  $i$  mit dessen Schadensausmaß  $A$ . Die Einzelrisiken der Ereignisse können dabei zu einem Gesamtrisiko  $R$  aufsummiert werden.

$$R = \sum_{i=1}^n P_i * A_i \quad (2)$$

Mit  $n \in \mathbb{N}$

$R$ : Risikozahl als Maß des Risikos

$P_i$ : Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses  $i$

$A_i$ : Schadensausmaß des Ereignisses  $i$

Von Pipattanapiwong (2004) wird ein Konzept von Risiko und Unsicherheit mit einer hierarchischen Struktur eingeführt. Demnach können das Risiko bzw. die Unsicherheit eines Faktors  $C$  auf Basis von zwei anderen, voneinander unabhängigen Faktoren  $A$  und  $B$  ermittelt werden (siehe Abbildung 3).

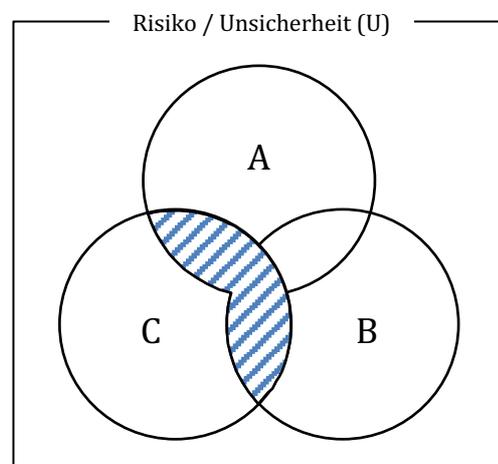


Abbildung 3: Hierarchische Struktur des Risikobegriffs (Pipattanapiwong, 2004)

Die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einzelner Risiken erfolgt gemäß diesem Ansatz mit qualitativen Begriffen wie z.B. von sehr wahrscheinlich bis extrem unwahrscheinlich), die quantitativen Wahrscheinlichkeitsbereichen (z.B.: > 85 %, > 0,01 %) zugeordnet sind. Ein vergleichbarer Ansatz wird im Rahmen der Publikationen des International Panel for Climate Change (IPCC) verwendet (IPCC, 2007).

Eine weitere Definition nennt ISO 31000 (ISO 31000:2018). Hier wird das Risiko als ein Effekt von Unsicherheit auf Zielsetzungen beschrieben und im Zusammenhang mit möglichen Risikoquellen, möglichen Ereignissen, deren Folgen und der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens betrachtet. Der in der Norm verwendete Begriff *likelihood* beschränkt sich dabei nicht nur auf die mathematische oder quantitative Bedeutung der Wahrscheinlichkeit, sondern umfasst auch eine qualitative oder verbal formulierte Wahrscheinlichkeit.

Das Management von Risiken hat das vorrangige Ziel, Risiken frühzeitig zu erkennen und zu beeinflussen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den in ISO 31000:2018 beschriebenen Risikomanagementprozess.

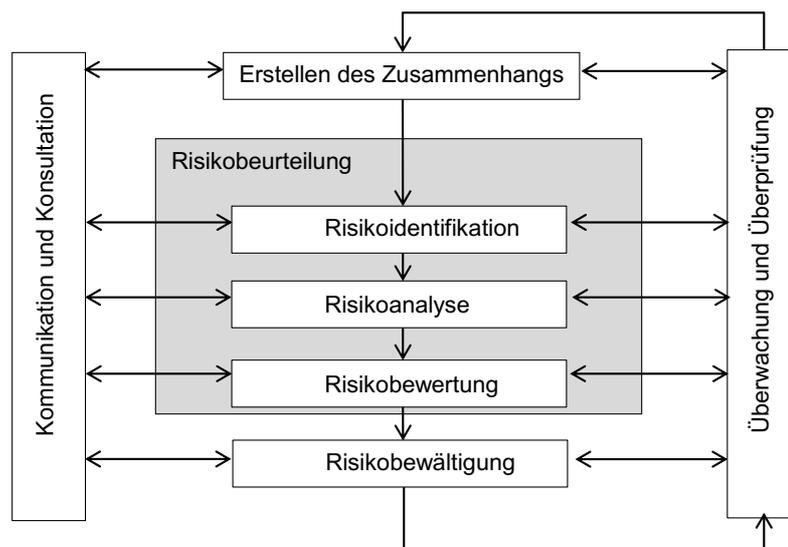


Abbildung 4: Der Risikomanagementprozess (ISO 31000:2018)

Kernelement des Risikomanagementprozesses ist die Risikobewertung, welche die drei Teilschritte Identifikation, Analyse und Bewertung von Risiken umfasst (ISO 31000:2018):

- Der erste Schritt der Risikobewertung ist die Risikoidentifikation. In dieser Phase wird eine umfassende Auflistung der Risiken erstellt, wobei auch die mit verpassten Chancen verbundenen Risiken einbezogen werden. In der Norm wird zudem explizit darauf verwiesen, dass auch die Folgeeffekte bestimmter Auswirkungen, einschließlich der Kaskaden- und Kumulativwirkungen, zu untersuchen sind.

- Die Risikoanalyse folgt als zweiter Schritt und beinhaltet die Entwicklung eines Risikoverständnisses und die Analyse der Auswirkungen und Wahrscheinlichkeiten sowie anderer Risikomerkmale. Die Analyse umfasst die Darstellung der verschiedenen Sichtweisen von Experten, aber auch der Identifikation von Unsicherheiten bezüglich der Informationen, ihrer Verfügbarkeit, ihrer Qualität sowie der Menge oder der Grenzen von Simulationsmodellen. In Abhängigkeit der Aufgabenstellung sowie der verfügbaren Ressourcen kann die Risikoanalyse mit unterschiedlicher Untersuchungstiefe durchgeführt werden.
- Die Risikobewertung als dritter und letzter Schritt der Risikobeurteilung legt aufbauend auf diesen Erkenntnissen fest, wie und ob ein Risiko durch bestimmte Sicherheitsmaßnahmen abgedeckt wird. Da diese Maßnahmen im Allgemeinen mit anderen Projekten um begrenzte Ressourcen konkurrieren, geht es letztendlich auch um die Festlegung einer Prioritätsreihenfolge oder die Ermittlung von Handlungsalternativen, wobei gesetzliche und regulatorische Anforderungen berücksichtigt werden.

Für Verkehrswasserbauwerke wurden bislang keine Risikobeurteilungen wie in ISO 31000:2018 durchgeführt, so dass weder Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Funktionsausfalls oder eines Bauwerksversagens noch über das zugehörige Schadensausmaß vorliegen. Aufgrund der Zustandsentwicklung der Verkehrswasserbauwerke kann angenommen werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines Funktionsausfalls oder Bauwerksversagens zunimmt. Für eine Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit liegen jedoch zu wenige Informationen vor, sodass probabilistische Analysen nicht Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit sind. Für die Priorisierung der Bauwerke für die Instandhaltungsplanung wird somit der Fokus auf die Abschätzung der Schadensfolgen gerichtet (siehe Abschnitt 3.2).

### **2.1.2 Ermittlung von Hochwasserschäden**

Verkehrswasserbauwerke sind nicht nur die Voraussetzung für die Schiffbarkeit der Wasserstraßen, sondern sie erfüllen auch wasserwirtschaftliche Aufgaben wie z. B. die Regulierung der Wasserspiegellage durch Wehranlagen oder sie sind in Hochwasserschutzsysteme eingebunden. Die Folgen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen können eine plötzlich auftretende Schwallwelle oder auch Überflutungen sein. Auch wenn das Schadensausmaß nicht das Ausmaß der Folgen eines extremen Hochwasserereignisses annimmt, gibt es Parallelen bei den ablaufenden Mechanismen, sodass für die Ermittlung der Höhe von Schäden die Methode zur Schadensanalyse nach Hochwasserereignissen adaptiert wird.

Extreme Hochwasserereignisse an großen mitteleuropäischen Flüssen führen immer wieder zu schwerwiegenden ökonomischen, sozialen und ökologischen Schäden. In zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen wird der Frage nachgegangen, wie die Zusammenhänge zwischen einem Hochwasser und dessen Schäden abgebildet werden können. Bei einer Abschätzung der Schäden kann zum einen die Modellierung auf Basis historischer Ereignisse und zum anderen die Prognose auf Basis realistischer, aber synthetischer Szenarien unterschieden werden. Bei den letztgenannten Was-wäre-wenn-Analysen (auch als Ex-ante-Schadensanalysen bezeichnet) werden für ein Szenario mögliche Schäden von Experten geschätzt. Diese Abschätzungen von Hochwasserschäden sind für die Verbesserung von Schutzmaßnahmen erforderlich, werden aber auch

in der Versicherungswirtschaft oder für die Erstellung von Hochwasserrisikokarten genutzt. (Thieken, 2010)

Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Aufbau der Methode von Meyer (2005) zur Bestimmung von Risiken im Hochwasserschutz. Die Versagenswahrscheinlichkeit zur Ermittlung bestehender Risiken ergibt sich aus der Sicherheitsanalyse (siehe Abbildung 5, links) und das Schadensausmaß aus der Ex-ante-Schadensanalyse (siehe Abbildung 5, rechts).

Für die Sicherheitsanalyse wird sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Ereignis (Gefährdung) als auch die Vulnerabilität eines Bauwerks identifiziert, um die daraus resultierende Versagenswahrscheinlichkeit abzuleiten (siehe Abbildung 5, links). So wird bspw. bestimmt, ob die Intensität eines bestimmten Ereignisses zu einem Versagen eines Dammes und infolgedessen zu einer Überflutung führen würde (Meyer, 2005). Da zu den Verkehrswasserbauwerken keine Daten zu historischen Ereignissen vorliegen, aus denen eine Versagenswahrscheinlichkeit abgeleitet werden kann, und bisher auch keine Vulnerabilitätsanalysen durchgeführt wurden, ist die Sicherheitsanalyse nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die Größe der Überflutungsflächen und die Überflutungshöhe lassen sich mithilfe von Simulationen ermitteln. Die Ergebnisse sind nach im Wesentlichen von der Intensität des Ereignisses, der Anfälligkeit des technischen Systems (Vulnerabilität) und den Geländeeigenschaften im Überflutungsgebiet abhängig.

In einem weiteren Schritt wird für das Überflutungsgebiet das Schadenspotenzial ermittelt, was den Werten bzw. Schutzgütern entspricht (siehe Abbildung 5, rechts). Aus dem Grad der Betroffenheit durch die Überflutung (i. d. R. ermittelt über die Überflutungshöhe) und die Anfälligkeit (Vulnerabilität) der betroffenen Werte ergibt sich deren Schädigungsgrad. Der mögliche Schaden (resp. das Schadensausmaß) errechnet sich nach Meyer (2005) aus dem Schadenspotenzial multipliziert mit dem Schädigungsgrad.

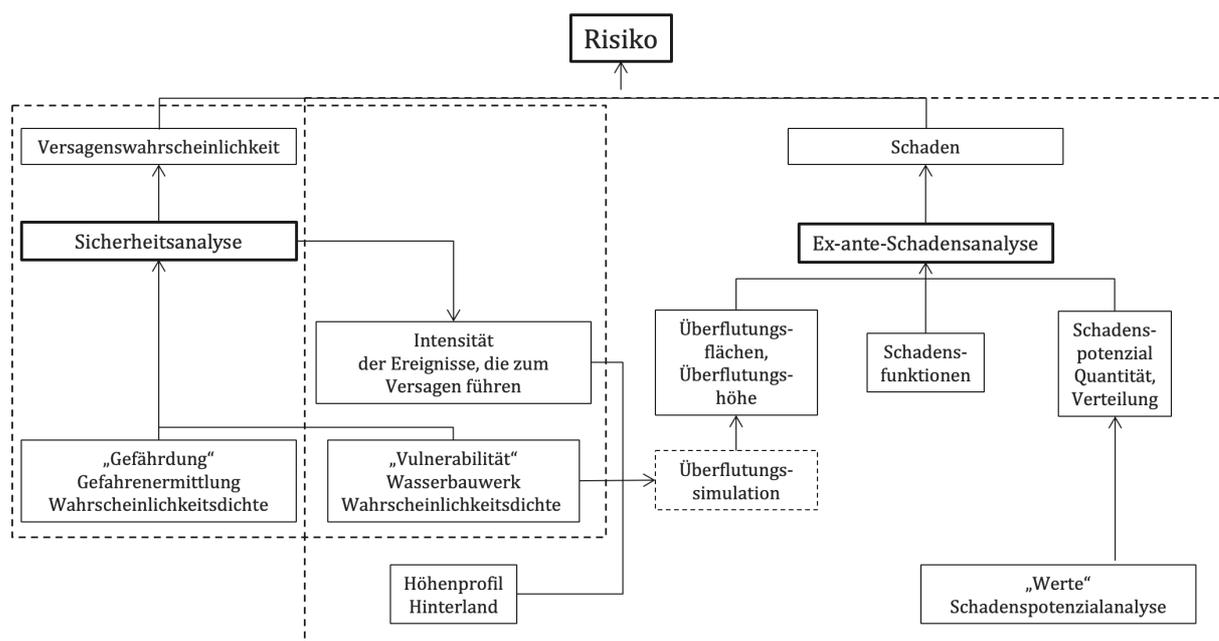


Abbildung 5: Elemente von Risikoanalysen im Hochwasserschutz (Meyer, 2005)

Auch wenn das Versagen bspw. einer Wehranlage Auslöser für hydraulische Effekte sein kann, sind Überflutungen nicht die einzige Konsequenz nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen, was in der Bestimmung der Indikatoren in Kapitel 3.2.2 berücksichtigt wird. Ergebnisse einer Schadensanalyse sind nach Thieken (2010):

- aus der Überflutungssimulation Angaben zur Strömungsgeschwindigkeit und Überflutungsdauer, Überflutungsfläche und -höhe im Verlauf der Überflutung,
- aus der Schadenspotenzialanalyse Quantität und räumliche Verteilung der gefährdeten Werte, differenziert nach Wertekategorien und
- aus der Verschneidung beider Ergebnisse in Verbindung mit der Schadensfunktion die betroffenen Werte und der Grad ihrer Betroffenheit.

Nachfolgend wird auf die Elemente *Überflutungssimulation* (Abschnitt 2.1.2.1), *Werte und Schadenspotenzialanalyse* (Abschnitt 2.1.2.2) und *Schadensfunktionen* (Abschnitt 2.1.2.3) näher eingegangen.

#### 2.1.2.1 Überflutungssimulation

Die Überflutungssimulation ist sowohl Bestandteil der Sicherheits- bzw. Gefährdungsanalyse als auch der Schadensanalyse und stellt damit das Bindeglied zwischen den beiden Hauptelementen der Risikoanalyse dar (siehe Abbildung 5). Mit ihr können Überflutungsparameter wie die Größe der betroffenen Fläche sowie die Höhe und Geschwindigkeit der Überflutung bestimmt werden. Je nach Anforderung stehen unterschiedliche Methoden zur Auswahl.

- Für Sturmfluten kann in einem vereinfachten Verfahren der erwartete Scheitelwasserstand mit der Geländehöhe im Hinterland verschnitten werden. Aufgrund der zugleich implizit getroffenen Annahme, dass das Küstenschutzsystem großflächig versagt, sich das Wasser momentartig ausbreitet und der Scheitelwasserstand länger andauert, wird unter Umständen die Überflutungsfläche stark überschätzt und die spezifische Bodenrauigkeit wird nicht berücksichtigt.
- Bei der Überflutungssimulation wird von der Ausbreitung der Flutwelle in Form konzentrischer Halbkreise von einer punktuellen Bruchstelle ausgegangen. Es werden Einströmvolumen und Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt. Die Höhendifferenzen des Hinterlandes bleiben unberücksichtigt.
- Mit der dynamischen Überflutungssimulation gelingt eine vollständige Abbildung von Ereignissen, die in ihrer Ausprägung variiert werden können (Scheitelhöhe, Deichbruchweite, Einströmvolumen). Die Ausbreitung der Flutwelle ergibt sich durch die zweidimensionale numerische Simulation auf Basis eines um Strukturelemente ergänzten Höhenmodells unter Berücksichtigung der Bodenrauigkeit. Es können Größen wie Vorwarnzeit, Strömungsgeschwindigkeit und Überflutungsdauer erhoben werden. Wichtige ermittelte Parameter sind maximale Überflutungsfläche und -höhe im zeitlichen Verlauf der Überflutung. Dieses Verfahren benötigt jedoch umfangreiche Daten als Input und ist zudem ressourcenintensiv.

### 2.1.2.2 Werte und Schadenspotenzialanalyse

Neben der Identifikation potentieller Schäden ist die Art der Schäden von Interesse, da diese bspw. bei der Auswahl von Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen sind. Ein Schaden kann nach Smith (1999) in einem dreistufigen Verfahren wie folgt eingeordnet werden:

- *Direkter oder indirekter Schaden:*
  - direkt: unmittelbare Einwirkung des Wassers auf den Wertbestand,
  - indirekt: Unterbrechung/Ingangsetzung von Prozessen.
- *Tangibler oder intangibler Schaden:*
  - tangibel: in monetären Werten abbildbar,
  - intangibel: nicht oder nicht direkt monetär zu bewerten.
- *Primärer oder sekundärer Schaden*
  - primär: Entstehung während des Schadensereignisses,
  - sekundär: zeitlich und kausal nachfolgende Schäden, Multiplikationseffekte.

Abbildung 6 zeigt diese Unterteilung und benennt für jede der acht Kategorien von Hochwasserschäden zudem ein Beispiel.

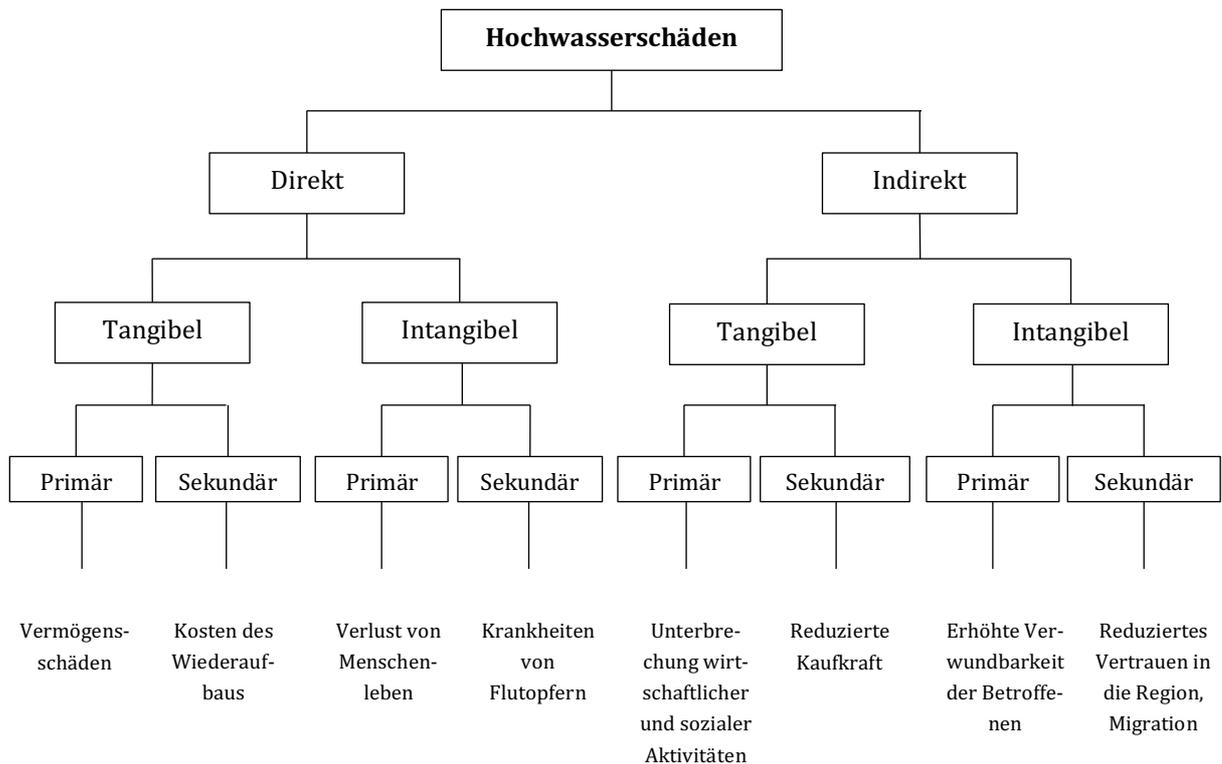


Abbildung 6: Kategorien von Hochwasserschäden (Smith, 1999)

Thieken (2010) veranschaulicht den räumlichen und zeitlichen Zusammenhang eines extremen Naturereignisses in Raum-Zeit-Diagrammen. Unterschieden wird zwischen dem überfluteten und dem nicht überfluteten Gebiet sowie den Zeiträumen während des Ereignisses, unmittelbar nach

dem Ereignis und langfristig, d. h. mehr als sechs Monate nach Ereignisende. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Verteilung tangibler, direkter Schäden, die im Wesentlichen das überflutete Gebiet betreffen. In Abbildung 7 grau hinterlegt sind mögliche Schäden im überfluteten Gebiet während des Ereignisses. Eine tiefergehende Betrachtung unterteilt die direkten Schäden zudem in verschiedene Schadenssektoren: Privathaushalte und Wohngebäude, gewerbliche Wirtschaft und Unternehmen, Land- und Forstwirtschaft sowie (öffentliche) Infrastruktur (Thieken, 2010). Schäden durch hochwasserbedingte Veränderungen im Grundwasserspiegel werden den direkten Schäden zugeordnet, sie können sich aber auch außerhalb der überfluteten Flächen zeigen.

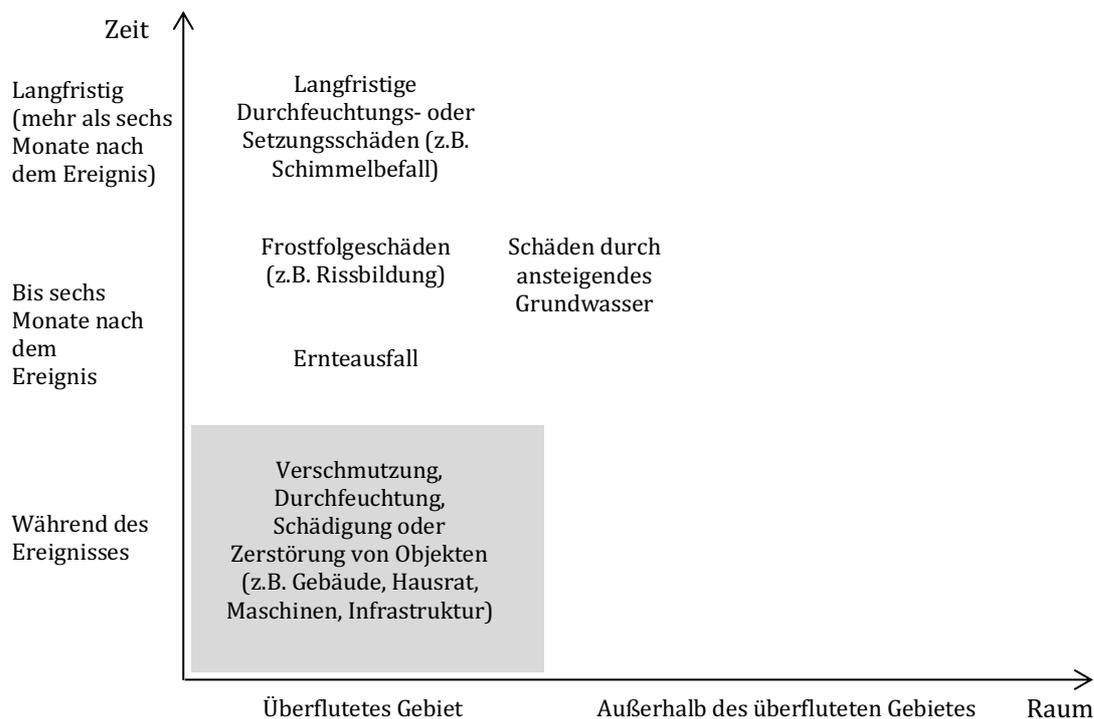


Abbildung 7: Auftreten tangibler, direkter Hochwasserschäden in Raum und Zeit (Thieken, 2010)

Auch indirekte Hochwasserschäden lassen sich in Raum-Zeit-Diagramme einordnen. Zu den indirekten Schäden gehören Produktionsausfälle oder hochwasserbedingte Betriebseinschränkungen, die langfristig ebenfalls zu Umsatz- und Ertragseinbußen führen können. Oft bedingen diese wiederum auch außerhalb der überfluteten Gebiete Transportschwierigkeiten durch Verkehrseintrüchtigungen und durch Lieferschwierigkeiten ausgelöste Produktionsausfälle.

### 2.1.2.3 Schadensfunktion

Die entwickelten Modelle zur Abschätzung möglicher Folgen für Privathaushalte und Wohngebäudebauern größtenteils auf Schadensfunktionen auf, bei denen sich ein Schaden als Produkt aus dem Schädigungsgrad und dem Schadenspotenzial ergibt. Dafür werden zunächst die Faktoren bestimmt, die den Schädigungsgrad eines Wertobjekts gegenüber einer Überflutung beeinflussen.

Mögliche Einflussfaktoren sind Überflutungshöhe und -dauer, Fließgeschwindigkeit, Wasserinhaltsstoffe sowie Art und Beschaffenheit eines gefährdeten Objekts. In der Praxis wird der Schädigungsgrad häufig vereinfacht als Funktion des Belastungsparameters Überflutungshöhe bzw. Wasserstand angegeben. Schließlich können zwei grundsätzliche Ansätze zur Schadensberechnung unterschieden werden:

- der Schaden als prozentualer Anteil des Schadenspotenzials und
- direkte Wasserstands-Schadensfunktion unter Verwendung absoluter Schadenssummen.

Bei der Verwendung des prozentualen Anteils des Schadenspotenzials wird zuvor der Gesamtwert der gefährdeten Objekte ermittelt. Bei den Wasserstands-Schadensfunktionen werden im Gegensatz dazu die Schäden direkt berechnet. In beiden Fällen stellen die Schadensfunktionen den Zusammenhang zwischen der Überflutungshöhe und potenziellen Schäden her.

Für die Überschwemmung von Industrie- und Gewerbeflächen konnten bislang keine Schadensfunktionen mit belastbaren Ergebnissen entwickelt werden (Thieken, 2010), da allein schon das Anlagevermögen zwischen den Sektoren (produzierendes Gewerbe, Handel, Unternehmensdienstleistungen sowie öffentliche und private Dienstleistungen) in der Höhe stark variiert. Bei Bedarf müssen differenzierte Erhebungen erfolgen, wofür objektscharfe Informationen aus dem Untersuchungsgebiet (mikroskalig) erfasst werden müssen, was mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Dem stehen die Meso- und Makroskala gegenüber, bei denen mögliche Schäden nicht objektscharf ermittelt, sondern bspw. für Gesamtschadensbilanzen geschätzt werden (siehe Abschnitt 3.2.1). Die von Thieken (2010) entwickelten Erhebungsbögen erfassen sektorunabhängig die geschädigten Flächen, Wiederherstellungskosten, Informationen zum Objekt wie dessen Verortung oder zu schadensmindernden Maßnahmen sowie Überflutungsdauer und -höhe.

### **2.1.3 Anwendungsbeispiele**

#### **2.1.3.1 Risikoanalysen im Bevölkerungsschutz**

Die Gefährdung der Bevölkerung durch extreme Naturereignisse sind typisches Beispiel für die Anwendung von Risikoanalysen. Gemäß der Risikodefinition (siehe Abschnitt 2.1.1) sind Naturkatastrophen das gefährdende Ereignis und für ein definiertes Objekt wird das Risiko ermittelt. Arbeiten in diesem Bereich befassen sich bspw. mit Risikoanalysen auf Ebene von Einzelobjekten (vgl. Kron, 2008) oder untersuchen größere Gebiete wie z.B. eine Küstenregion (vgl. Joyce, 2017). Sie basieren meist auf der Simulation von Szenarien wie Hochwasser- oder Sturmereignissen, für die Gefährdungskorridore ermittelt werden. Durch eine Überlagerung solcher Korridore mit Daten zu Infrastruktursystemen werden anschließend bestehende Risiken ermittelt (Connelly et al., 2016; Cruz et al., 2006; Hossain, 2017; Joyce, 2017), um Maßnahmen des Risikomanagements effizient steuern zu können (Joyce, 2017). Ein Beispiel für die beschriebene Vorgehensweise zeigt Abbildung 8. Das untersuchte Extremereignis ist eine Überflutung, die aufgrund des gleichzeitigen Eintretens einer Sturmflut und eines Starkregenereignisses entsteht. Die Untersuchung zu unterschiedlichen Zeitpunkten (nach 5, 10, 15 und 17 Stunden) ermöglicht eine Abschätzung, welche Bereiche wann und in welchem Ausmaß von diesem Ereignis betroffen sein werden.

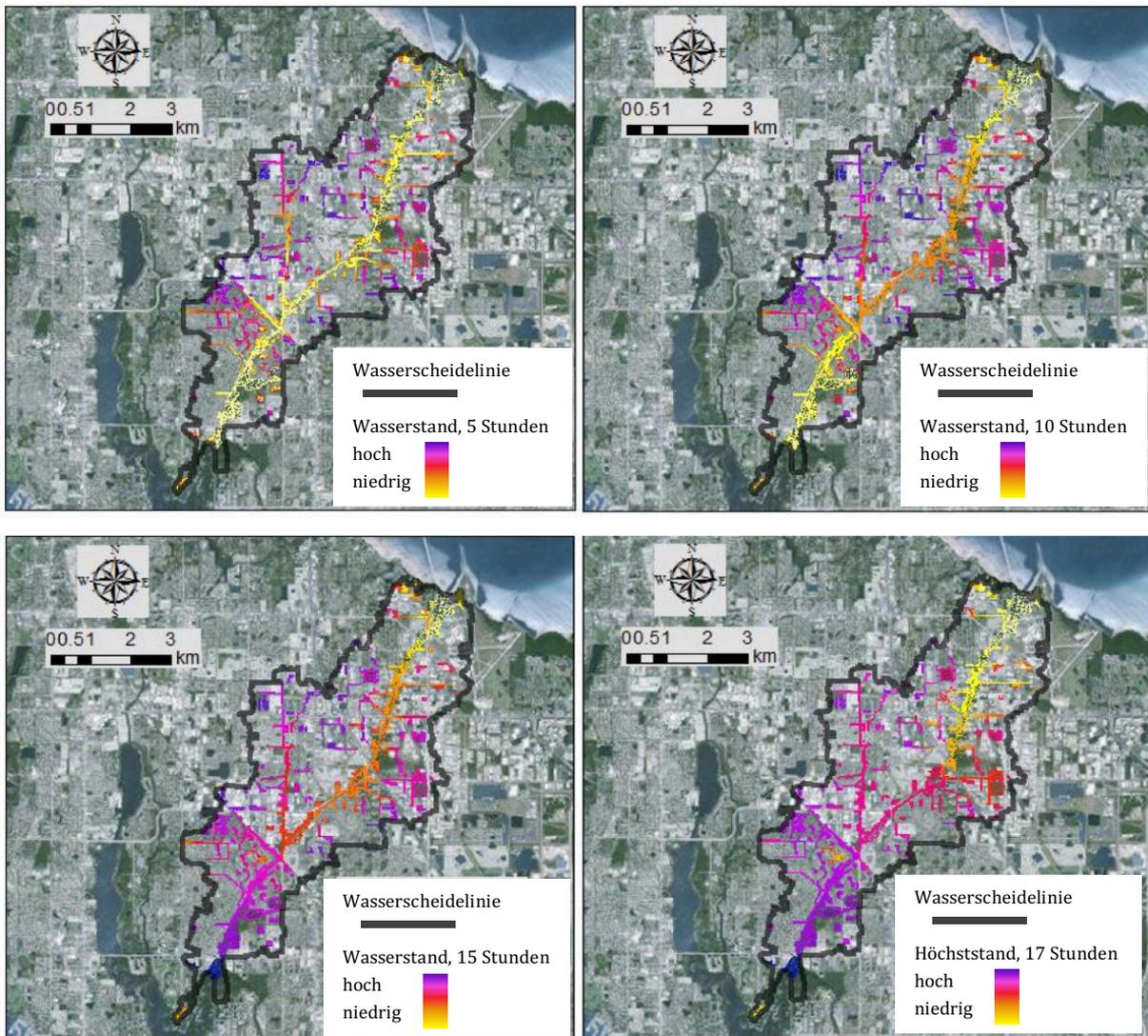


Abbildung 8: Ergebnisse einer Hochwassersimulation (Joyce, 2017)

Seit 2009 ist in Deutschland die Risikoanalyse im Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (ZSKG) gesetzlich verankert. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) hat daraufhin für die Bundesländer eine Methode für die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz (Deutscher Bundestag, 2010) entwickelt. Die Methode orientiert sich unter anderem an den internationalen Standards des Risikomanagements ISO 31000 und ISO 31010. Ziel ist eine Anwendung auf verschiedenen administrativen Ebenen im jeweiligen Zuständigkeitsbereich und die Verwendung der Ergebnisse als Entscheidungsgrundlage im Risiko- und Krisenmanagement. Seit 2012 wurden verschiedene Gefahren einer Risikoanalyse unterzogen und die Ergebnisse in Bundestagsberichten veröffentlicht (BBK, 2018):

- 2012: Extremes Schmelzhochwasser aus den Mittelgebirgen sowie Pandemie durch Virus Modi-SARS,
- 2013: Wintersturm,
- 2014: Sturmflut,
- 2015: Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Kernkraftwerk,

2016: Freisetzung chemischer Stoffe,  
 2018: Dürre.

Das BBK (2018) beschreibt das Risiko- und Krisenmanagement als einen kontinuierlichen Prozess und definiert das Risiko als eine Funktion aus der Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefahr mit bestimmter Intensität und dem zu erwartenden Schadensausmaß für Schutzgüter. Dieser Prozess beginnt idealerweise bereits mit dem rechtzeitigen Erkennen möglicher Risiken (siehe Abbildung 9), so dass im Vorfeld Einsatzkräfte mobilisiert werden können und die Bevölkerung informiert werden kann.

Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, dass unerwartete Ereignisse eintreten oder Ereignisse, deren Konsequenzen das übliche Ausmaß bei Weitem übertreffen. In diesem Fall beginnt der Zyklus mit der Bewältigung der Folgen des Ereignisses und erst im Nachgang wird ein Risiko- und Katastrophenmanagement aufgebaut.

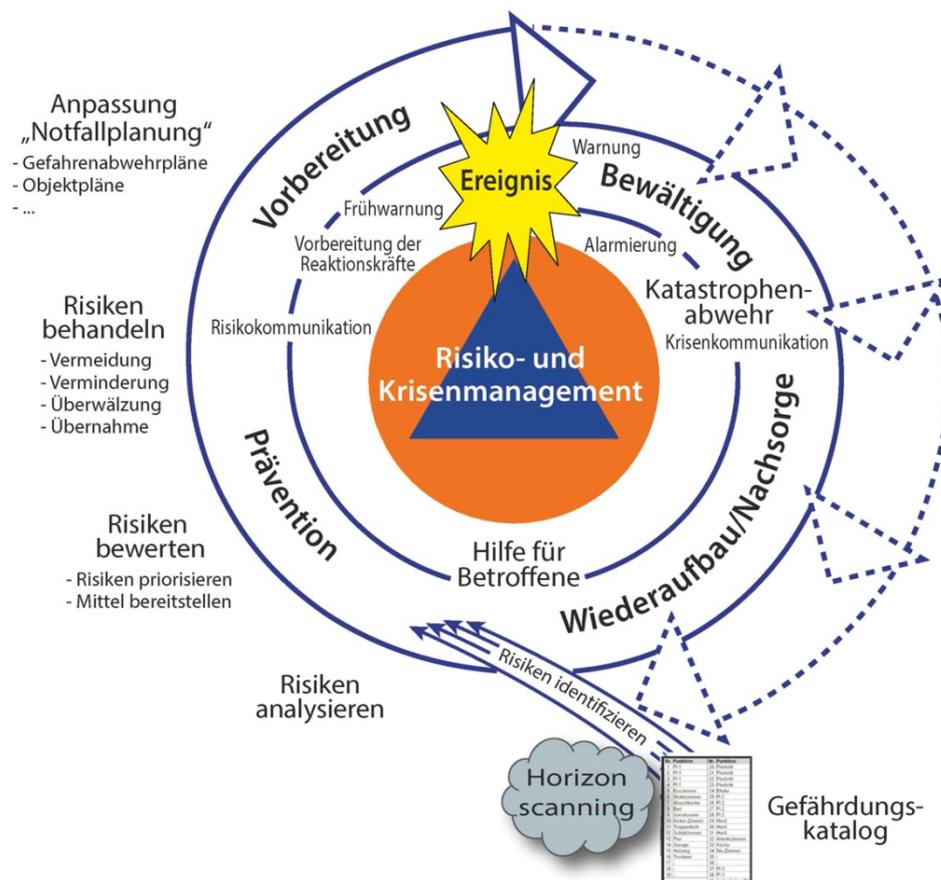


Abbildung 9: Ganzheitlicher Ansatz des Risiko- und Krisenmanagementzyklus (BBK, 2018)

Als Grundsätze für ein Risiko- und Krisenmanagement nennt das BBK (2018):

- die Balance zwischen wissenschaftlichem Anspruch und einer pragmatischen Vorgehensweise,
- die Möglichkeit, Wissensdefizite (zunächst) durch begründete Annahmen und Schätzungen unter Einbindung von Experten zu kompensieren,

- eine Beschränkung der Analyse auf diejenigen Risiken, welche eine Verwaltungsebene im Ereignisfall bei der Bewältigung der Schäden oder bei der Prävention vor so große Herausforderungen stellen, dass eine Unterstützung durch eine höhere Verwaltungsebene notwendig sein kann.

Für die Durchführung von Risikoanalysen im Bevölkerungsschutz wird ein bestimmtes räumliches Bezugsgebiet definiert, für das das Schadensausmaß in den Bereichen Mensch, Umwelt, Wirtschaft, Versorgung und immaterielle Schutzgüter ermittelt wird. Diese Bereiche werden durch charakterisierende Informationen abgebildet, die von unterschiedlichen Ämtern, Behörden oder den Infrastrukturbetreibern bezogen werden können (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Informationsquellen für verschiedene Schutzgüter (BBK, 2018)

Bereich	Informationen	Informationsquellen
Mensch	Einwohnerzahl	Statistische Ämter
	Einwohnerdichte	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
	Anzahl Haushalte	Einwohnermeldeämter
Umwelt	Geschützte Gebiete	Bundesamt für Naturschutz Umweltämter
	Landwirtschaftliche Nutzfläche	Statistische Ämter Wirtschaftsbehörden
Wirtschaft	Wirtschaftsleistung	Statistische Ämter
	Gewerbesteuereinnahmen	Wirtschaftsbehörden
Versorgung	Unterbrechung der Trinkwasserversorgung	Wirtschaftsbehörden Infrastrukturbetreiber
	Unterbrechung der Stromversorgung	
	Unterbrechung der Gasversorgung	
	Unterbrechung der Telekommunikation	
Immateriell	Kulturgüter	Denkmalschutzbehörden

Um das Schadensausmaß zu bestimmen, benennt das BBK (2018) für jeden der fünf Bereiche Schadensparameter, welche die komplexen Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen stark vereinfachen (siehe Tabelle 2). Im Gegenzug ist es möglich, mit vertretbarem Aufwand zu schlüssigen Aussagen zu kommen (BBK, 2018).

Die erwarteten Ausprägungen der Schadensparameter werden für die Risikoanalyse klassifiziert, indem für jeden Schadensparameter ein Schwellenwert für die Klassen von 1 = unbedeutend bis 5 = katastrophal festgelegt wird. Wird für einen oder mehrere Parameter kein Schaden bei einem Ereignis erwartet, wird ihm der Wert 1 zugewiesen, da ein Schaden nicht mit Sicherheit auszuschließen ist.

Tabelle 2: Beispiele für Schadensparameter (BBK, 2018)

Bereich	Schadensparameter	Maßeinheit
Mensch	Tote	Anzahl
	Verletzte	Anzahl
	Hilfebedürftige über 14 Tage	Anzahl
	Hilfebedürftige bis 14 Tage	Anzahl
Umwelt	Schädigung geschützter Gebiete	ha
	Schädigung von Lebensräumen in Gewässern	km bzw. ha
	Schädigung des Grundwassers	ha
	Schädigung landwirtschaftlicher Nutzflächen	ha
Wirtschaft	Sachschäden	€
	Folgeschäden	€
	Verlust wirtschaftlicher Leistung	€
	Verlust gewerlicher Ertragskraft	€
Versorgung	Unterbrechung der Trinkwasserversorgung	Anzahl Stunden/Tage
	Unterbrechung der Stromversorgung	Anzahl Stunden/Tage
	Unterbrechung der Gasversorgung	Anzahl Stunden/Tage
	Unterbrechung der Telekommunikation	Anzahl Stunden/Tage
Immateriell	Auswirkungen auf die Sicherheit und Ordnung	Ausmaß
	Politische Auswirkungen	Ausmaß
	Psychologische Auswirkungen	Ausmaß
	Schädigung von Kulturgut	Anzahl/Grad der Schädigung

Für eine gezielte Risikoanalyse entwickelt das BBK dynamische Gefährdungskarten, welche die gesammelten Informationen gebündelt abbilden. So wird es für bestimmte Ereignisse möglich, Bereiche mit einer hohen Schadensanfälligkeit oder großen Schadenshöhen zu lokalisieren und im Risikomanagement zu berücksichtigen.

### 2.1.3.2 Schadensanalysen extremer Naturereignisse

Mit dem Ziel der Schadensminderung nach möglichen Großschadensereignissen, wie zum Beispiel einem Erdbeben, wurde im Jahr 2002 in Kooperation des Deutschen GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ) und der damaligen Universität Karlsruhe (TH) das Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology, kurz CEDIM, als virtuelles Institut gegründet.

In den Publikationen des CEDIM wird immer wieder herausgearbeitet, dass das Ausmaß möglicher Schäden nicht allein von zum Beispiel der Stärke eines Erdbebens abhängt, sondern auch von der Gesamtsumme der Risikoelemente im gefährdeten Bereich, vor allem von ihrem Wert und ihrer seismischen Vulnerabilität (CEDIM, 2016). Dieser Ansatz zeigt Parallelen zu den Risikoana-

lysen im Hochwasserschutz, so bspw. zu den Schadensfunktionen und der Schadenspotenzialanalyse (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Nach dem Verständnis des CEDIM entsteht eine Risikosituation erst dann, wenn durch ein Ereignis eine Gefährdung besteht, sich im Wirkungsradius des Ereignisses Werte befinden und diese Werte auf das Ereignis empfindlich reagieren können (siehe Abbildung 10). Dieses Risikoverständnis wird für die Anforderungen im Infrastrukturmanagement in Abschnitt 3.1 modifiziert, indem die Verkehrswasserbauwerke und ihre Eigenschaften in dieses Modell integriert werden.



Abbildung 10: Risikoverständnis nach CEDIM (CEDIM, 2016)

Mit der Zusammenführung von Informationen über Werte und deren Vulnerabilität gegenüber Erdbeben konnte die ursprüngliche Erdbeben-Risiko-Karte präzisiert werden. Derartige Informationen wurden bislang separat für weitere Ereignisse wie zum Beispiel Sturm, Hochwasser oder Erdbeben zusammengestellt. Seitens CEDIM ist eine Zusammenführung der Erkenntnisse vorgesehen, um es Planern und Entscheidungsträgern zu ermöglichen, adäquate Entscheidungen über Programme zur Risikominderung und Schadensvermeidung zu treffen.

Das Hauptziel dieses Projektes „Synopsis der Naturgefahren“ ist es, passende probabilistische und szenario-basierte, deterministische Methoden zu entwickeln, mit denen unterschiedliche Naturgefahren im Rahmen einer einheitlichen methodischen Systematik verglichen werden können. Als Ergebnis soll sichtbar werden, welches Gebiet am anfälligsten für welche Naturgefahr ist oder welche Gefahr zum maximalen Schaden in einem bestimmten Gebiet führt (CEDIM, 2016).

#### 2.1.4 Zusammenfassung

Im Allgemeinen werden im Rahmen von Risikobeurteilungen Ereignisse und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit im Kontext möglicher Folgen analysiert. Somit sind sowohl die Risikoquellen als auch die Konsequenzen der elementare Untersuchungsgegenstand im Risikomanagement. Bei einer Abschätzung zukünftiger Ereignisse einschließlich der durch sie verursachten Schäden kann sowohl die Modellierung auf Basis historischer Ereignisse als auch die Prognose auf Basis realistischer synthetischer Szenarien unterschieden werden.

Das Risikomanagement extremer Ereignisse kann grundsätzlich als kontinuierlicher Prozess verstanden werden, bei dem Maßnahmen ausgewählt, hinsichtlich ihrer Wirksamkeit überprüft und getroffene Entscheidungen ggf. angepasst werden. Die Methode der Szenarioanalyse und der Prozessgedanke werden bei der Entwicklung des Risikoverständnisses aufgegriffen und weiterentwickelt (siehe Abschnitt 3.1 und Abschnitt 3.2.1).

Die Abschätzung der Schäden durch extreme Ereignisse wie bspw. einem Hochwasser sind für die Verbesserung von Schutzmaßnahmen notwendig, werden aber auch in der Versicherungswirtschaft oder für die Erstellung von Hochwasserrisikokarten genutzt. Für Untersuchungen werden Simulationen von Hochwasserereignissen und unterschiedliche Datensätze über Schutzgüter im Untersuchungsgebiet herangezogen. Gegenstand der Analysen sind im Allgemeinen extreme Ausprägungen der Ereignisse, um die Schadenspotenziale zu bestimmen. Da bislang keine Risikoanalysen für Verkehrswasserbauwerke durchgeführt wurden, wird der Ansatz der Ex-ante-Schadensanalyse aus dem Hochwasserschutz für das Extremereignis Bauwerksversagen adaptiert (siehe Abschnitt 3.2).

Schäden können anhand ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung, der Möglichkeit ihrer monetären Bewertung sowie anhand ihrer Zugehörigkeit zu unterschiedlichen Wertekategorien wie zum Beispiel Mensch, Umwelt, Wirtschaft, Versorgung und Immateriell unterschieden werden. Die für diese Kategorien gewählten Schadensparameter vereinfachen die komplexen Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen, jedoch ist es im Gegenzug möglich, mit vertretbarem Aufwand zu schlüssigen Aussagen zu kommen. Für die Entwicklung eines Indikatorensystems für Verkehrswasserbauwerke werden in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 die räumlich-zeitliche Verteilung von Schäden aus Abschnitt 2.1.2 sowie die Schadenskategorien und einige Schadensparameter aus Abschnitt 2.1.3 als strukturierende Elemente beibehalten.

## 2.2 Instandhaltungsplanung für Verkehrswasserbauwerke

### 2.2.1 Verkehrswasserbauwerke des Bundes

Der Slogan: „*Wir machen Schifffahrt möglich*“ benennt die Kernaufgabe der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes. Als Strompolizei- und Bauaufsichtsbehörde trägt sie Sorge dafür, dass sich die Wasserstraßen in einem für die Schifffahrt erforderlichen Zustand befinden und die bundeseigenen Schifffahrtsanlagen allen Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Die WSV ist für die Unterhaltung, den Betrieb sowie den Aus- und Neubau von Bundeswasserstraßen und für die dazugehörigen Anlagen einschließlich der behördlichen Genehmigungsverfahren wie der Planfeststellung und -genehmigung zuständig. (WaStrG, 1968)

Zu den Bundeswasserstraßen gehören ca. 7300 km Binnenwasserstraßen und 23000 km<sup>2</sup> Seewasserstraßen (siehe Abbildung 11).

Die Bundeswasserstraßen werden unter anderem in Abhängigkeit von der vorrangigen Nutzung durch die Schifffahrt in Binnenschifffahrtsstraßen und Seeschifffahrtsstraßen unterteilt. Je nach Güterverkehrsaufkommen werden jeweils vier Kategorien unterschieden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Transportmengen in Tonnen pro Jahr für die Netzkategorisierung (BMVI, 2015b)

Kategorie	Binnenschifffahrtsstraße	Seeschifffahrtsstraßen
Kernnetz A	≥ 6,0 Mio. t/a	≥ 50,0 Mio. t/a
Kernnetz B	≥ 4,0 Mio. t/a	≥ 5,0 Mio. t/a
Kernnetz C	≥ 0,6 Mio. t/a	≥ 1,0 Mio. t/a
Außerhalb des Kernnetzes	< 0,6 Mio. t/a	< 1,0 Mio. t/a

Netzkategorisierung unter  
Berücksichtigung der  
Verkehrsprognose 2030

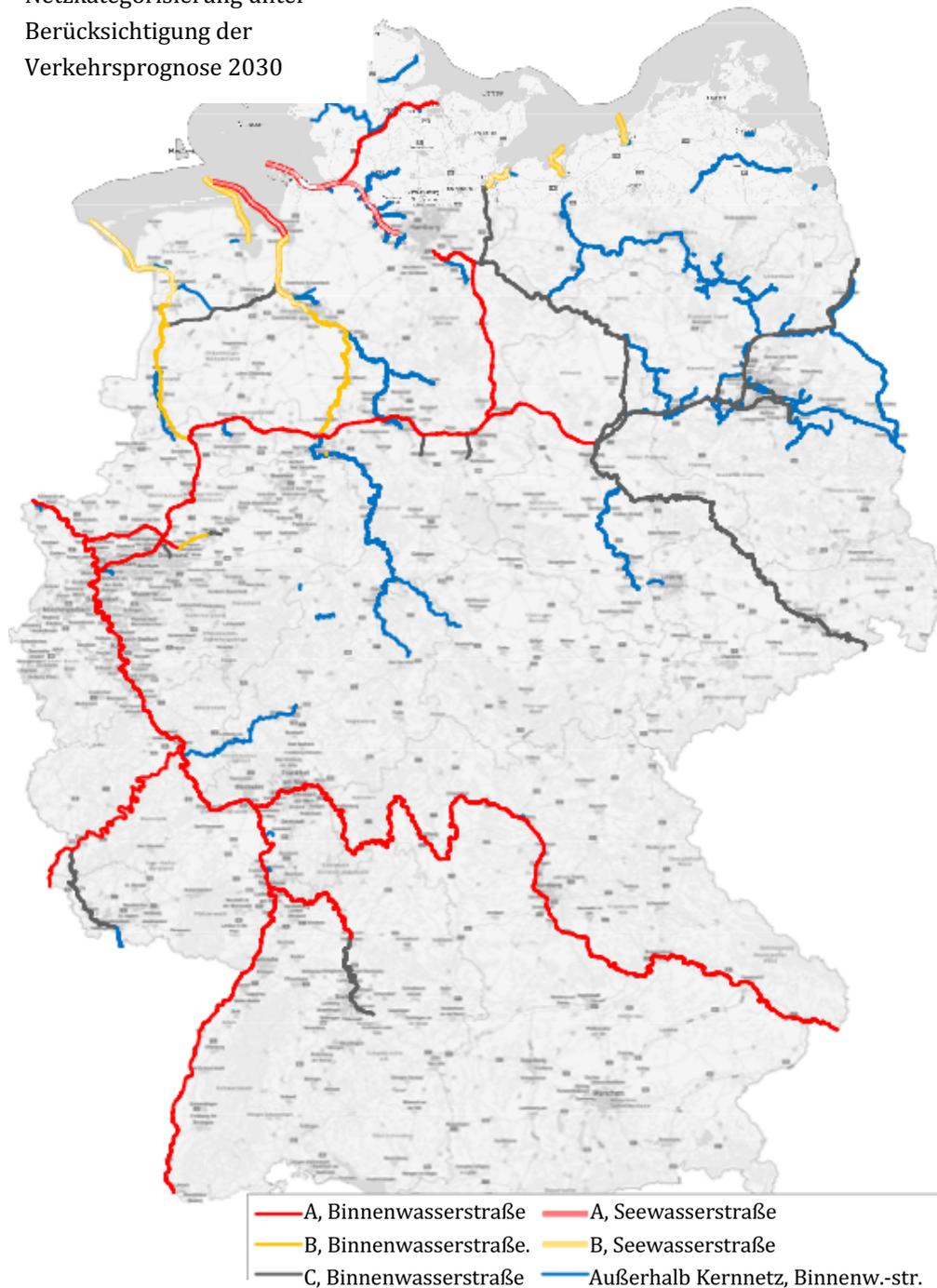


Abbildung 11: Kategorisierung der Bundeswasserstraßen (BMVI, 2015)

Das Erscheinungsbild der Bundeswasserstraßen ist geprägt von den unterschiedlichsten Verkehrswasserbauwerken. Im Objektkatalog der Verwaltungsvorschrift VV-WSV 1102 werden diese Objekte der WSV entsprechend ihrer überwiegenden Zweckbestimmung in Objektober-

gruppen (OOGr) gruppiert. Dabei werden Objekte für unmittelbare Aufgaben und Objekte für mittelbare Aufgaben unterschieden (BMVBW, 2005). Unmittelbare Aufgaben betreffen den Wasserabfluss (Vorflut), die sichere Verkehrsnutzung sowie Folge- und Ausgleichsmaßnahmen. Objekte für die mittelbaren Aufgaben sind notwendig für die Erfüllung der zuvor genannten unmittelbaren Aufgaben.

- Objekte mit unmittelbaren Aufgaben sind:
  - Objekte für den Wasserabfluss und die Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen sowie für die Schiffbarkeit der Seewasserstraßen (OOGr 100),
  - Objekte für das Regeln und Sichern des Wasserspiegels sowie für das hydrologische Messwesen (OOGr 200),
  - Objekte für den Schiffsverkehr (OOGr 300),
  - Objekte für die Sicherung und Erleichterung des Schiffsverkehrs (OOGr 400),
  - Objekte für das Aufrechterhalten des Kreuzungsverkehrs der Binnenwasserstraßen (OOGr 500).
- Objekte mit mittelbaren Aufgaben sind:
  - Anlagen für mittelbare Aufgaben (OOGr 600),
  - Fahrzeuge für mittelbare Aufgaben (OOGr 700).

Allen OOGr untergeordnet sind unterschiedliche Objektgruppen (OGr) und Objektuntergruppen (OUGr). OOGr 200 ist bspw. OGr 210 Stauanlagen untergeordnet. Zu den Stauanlagen gehören wiederum OUGr 211 Talsperren einschließlich Staubecken, OUGr 212 Pumpspeichieranlagen und OUGr 213 Wehranlagen. Im Bauwerksverzeichnis (Stand 01/2019) sind entsprechend dieser Systematik mehr als 5000 Objekte erfasst, wobei die ersten drei Ziffern der Objekt-Identifikationsnummer jeden Bauwerks immer der jeweiligen OUGr entsprechen. Tabelle 4 zeigt beispielhaft Objektuntergruppen, bei welchen zahlenmäßig die meisten Objekte der Inspektionskategorie A (siehe Abschnitt 2.2.2) zugeordnet sind.

Tabelle 4: Anzahl Objekte ausgewählter Objektuntergruppen (Eigene Darstellung)

Objektuntergruppe	Bauwerke in der WSV (Anzahl)	Inspektionskategorie	
		A	B
Dükeranlagen	352	350	2
Schiffsschleusenanlagen	321	316	5
Wehranlagen	312	245	64

Für die weiteren Untersuchungen werden die Wehranlagen exemplarisch als Referenzobjektgruppe gewählt, da sie mit mehreren Systemen in Wechselbeziehung stehen (siehe Abschnitt 3.2.1). So ermöglichen Wehranlagen durch den Gewässeraufstau vielerorts die Schifffahrt und erfüllen wasserwirtschaftliche Aufgaben. Da sie den Abfluss eines natürlichen Fließgewässers

regulieren, zählen sie zu den nicht sperrbaren Bauwerken, d. h. dass ihre Funktion jederzeit uneingeschränkt gewährleistet sein muss (BMVI, 2016b). Im Gegensatz dazu beeinträchtigt bspw. die Sperrung einer Schiffsschleusenanlage den Schiffsverkehr, da die Schiffe ohne Schiffsschleusen keine Höhendifferenzen überwinden können. Die Wasserstraße wird jedoch nicht in ihren ursprünglichen Eigenschaften beeinträchtigt. Schleusenanlagen gehören somit zu den sperrbaren Bauwerken. Dükeranlagen wiederum gehören wie die Wehranlagen zu den nicht sperrbaren Bauwerken. Sie ermöglichen die Führung eines natürlichen Fließgewässers unter einen Kanal hindurch. Die Schiffbarkeit des gekreuzten Gewässers (häufig ein Kanal) ist jedoch nicht direkt abhängig von der Funktion eines Dükers wie es bei den Wehranlagen der Fall ist, da ein Bauwerksversagen zwar eine Überflutung im Umland verursacht, der schiffsführende Kanal davon aber nicht beeinträchtigt sein muss.

### 2.2.1.1 Aufbau und Funktion von Wehranlagen

Für die Ableitung möglicher Konsequenzen nach einem Bauwerksversagen ist ein grundlegendes Verständnis zum Aufbau und zur Funktion der Bauwerke notwendig. Eine Wehranlage ist eine feste oder mit beweglichen Verschlüssen versehene Anlage, die durch Anstauung eines Fließgewässers in erster Linie der Hebung des Wasserstandes dient. Mit einer Wehranlage ist es möglich, die unregelmäßige Wasserführung eines Fließgewässers auszugleichen. Die Anlage unterliegt dadurch einer veränderlichen Über- bzw. Durchströmung und ist infolgedessen neben statischen auch erheblichen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt (DIN 19700-13:2019). Während eine Talsperre den gesamten Talquerschnitt als Stauraum nutzt (siehe Abbildung 12, links), begrenzen bei einer Wehranlage resp. Flussperre (siehe Abbildung 12, rechts) parallel zum Fluss verlaufende künstliche Stauhaltungsdämme das Stauvolumen (Strobl, Zunic, 2006).

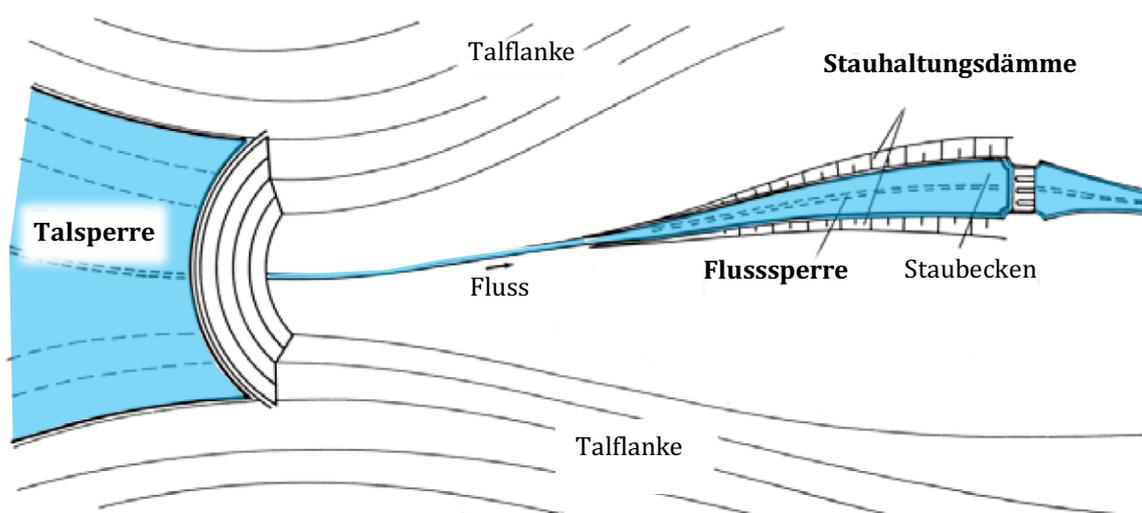


Abbildung 12: Unterschied zwischen Talsperre und Wehranlage (Strobl, Zunic, 2006)

Eine Aufstauung des Wassers kann aufgrund verschiedener Anforderungen notwendig sein. Beispiele sind die Regulierung der nötigen Fahrwassertiefe während Phasen geringer Wasserführung, der Ausgleich von Wasserspiegelschwankungen durch eine Entnahme von Wasser für Bewässerungs- und Wasserversorgungsanlagen und die Gewinnung von Fallhöhe durch Zusammenfassen des natürlichen Gefälles für die Energieerzeugung. Mit der Abflussregulierung sind auch Nachteile verbunden. Dazu gehören neben den hohen Bau-, Betriebs- und Unterhaltungskosten auch Veränderungen in den Grundwasserverhältnissen, Verlandungserscheinungen sowie die Störung des Geschiebe- und Schwebstoffhaushalts. Wegen der durch den Aufstau verringerten Fließgeschwindigkeiten ist es nicht mehr möglich, die Schiffe talwärts treiben zu lassen bzw. wird die Schifffahrt durch die notwendige Überwindung der Staustufen (Schleusungszeiten) beeinträchtigt. (Kuhn, 1984; Press, 1959; Strobl, Zunic, 2006)

Bei den Bauarten werden feste, bewegliche und kombinierte Wehre unterschieden (siehe Abbildung 13). Für feste Wehre sind die je nach Abflussmenge schwankenden Oberwasserstände charakteristisch. Sie kommen dort zum Einsatz, wo die wechselnden Wasserspiegellagen, die Hochwasserabführung und die Verlandung keine spürbare Schädigung der Anlieger verursachen. Wehre mit beweglichen Verschlüssen ermöglichen hingegen eine genauere Haltung und Regelung des Oberwassers (Stauziel) bzw. der Wasserabfuhr (Press, 1959). Je nach Höhenlage der Wehrkrone (siehe Abbildung 13 Ziffer 3: Überlaufkrone) wird außerdem zwischen Grundwehr und Überfallwehr unterschieden. Bei einem Grundwehr liegt der höchste Punkt der Wehrkrone unterhalb des Unterwasserspiegels (siehe Abbildung 13, jeweils rechts: II), man spricht hier auch von einem unvollkommenen Überfall. Bei einem Überfallwehr bzw. einem vollkommenen Überfall liegt die Wehrkrone über dem Unterwasserspiegel. Bei dem festen Wehr in Abbildung 13 (oben) handelt es sich um einen vollkommenen Überfall.

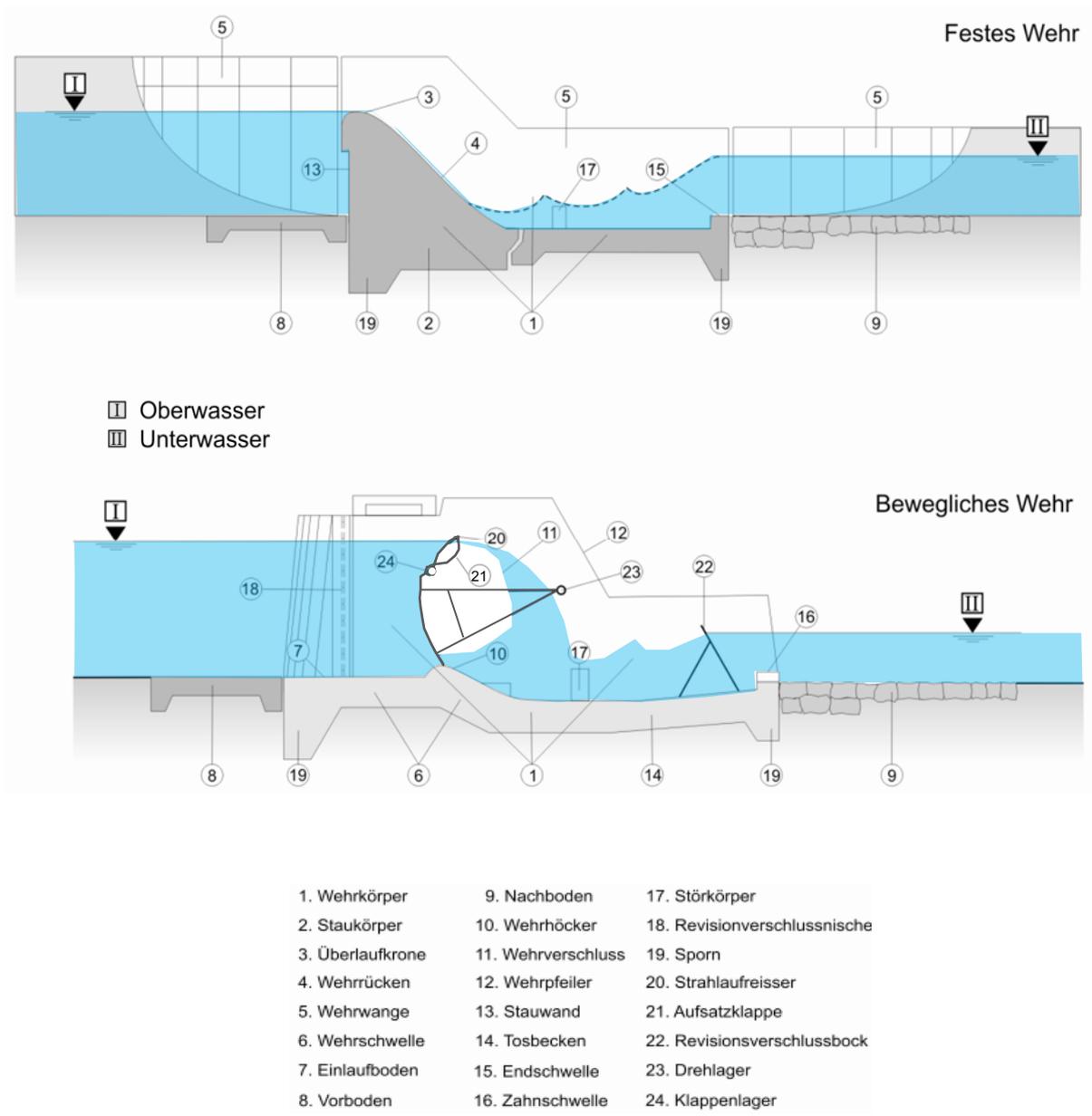


Abbildung 13: Aufbau fester und beweglicher Wehranlagen (BAW, 2010)

Die beweglichen Wehranlagen werden darüber hinaus anhand der Verschlussstypen unterteilt. Die verschiedenen Verschlüsse öffnen sich entweder durch Heben, Senken oder Drehbewegung und werden dadurch vom Wasser über- oder unterströmt (Strobl, Zunic, 2006). Eine Sonderform der überströmten Wehre sind Schlauchwehre, die allein durch das Ein- und Ausleiten von Luft oder Wasser gesteuert werden. Abbildung 14 zeigt ein Schlauchwehr in einer Hochwassersituation.



Abbildung 14: Schlauchwehr am Tempe Town Lake, USA, Arizona (Gebhardt, 2008)

Eine Einteilung der Wehranlagen erfolgt in DIN 19700-13:2019 anhand des Schadenspotenzials (siehe Tabelle 5) und der Fallhöhe bei Mittelwasserabfluss (MQ) in die Klassen I bis III (siehe Tabelle 6). Zur quantitativen Bestimmung des Schadenspotenzials werden keine methodischen Hinweise gegeben.

Tabelle 5: Zuordnung von Schadenspotenzialen im Hochwasserfall (DIN 19700-13:19)

Objektkategorie	Schadenspotenzial
Sonderobjekte mit außergewöhnlichen Konsequenzen	hoch
Geschlossene Siedlungen	hoch
Industrieanlagen	hoch
Überregionale Infrastrukturanlagen	hoch
Einzelgebäude, nicht dauerhaft bewohnte Siedlungen	mittel
Regionale Infrastrukturanlagen	mittel
Landwirtschaftlich genutzte Flächen	gering
Naturlandschaften	gering

So werden zum Beispiel alle Wehranlagen mit einer Fallhöhe von mehr als 1,50 m und einer Gefährdung für geschlossene Siedlungen oder für Industrieanlagen im Versagensfall der Klasse I zugeordnet. Argumente für die vorgenommene Klassifizierung oder Anwendungsbereiche werden nicht aufgeführt.

Tabelle 6: Klassifizierung der Staustufen (DIN 19700-13:2019)

Fallhöhe $\Delta h$ bei MQ	Schadenspotenzial		
	hoch	mittel	gering
$\Delta h \geq 5,00$ m	Klasse I	Klasse I	Klasse II
$5 \text{ m} > \Delta h \geq 1,5$ m	Klasse I	Klasse II	Klasse III
$\Delta h < 1,5$ m	Klasse II	Klasse III	Klasse III

Die zu berücksichtigenden Anforderungen beim Bau einer Wehranlage geben bereits erste Hinweise auf die Schwachstellen einer Wehranlage. Am Massivbau können unzulässige Verformungen, Risse und Setzungen auftreten, was zu einer Einschränkung oder Behinderung der Beweglichkeit der Stahlverschlüsse führen kann. Eine Einschränkung oder ein Ausfall der Steuerungsmöglichkeit beeinträchtigt die Wasserabfuhr und kann Überschwemmungen zur Folge haben. Zum Beispiel trat der Neckar am 25.06.2016 bei einer planmäßigen Hochwassersituation oberhalb der Staustufe Hofen über die Ufer, weil die Anlage nicht steuerbar war (Hörner, 2016). In einem weiteren Fall ist der komplette Verschluss eines Wehrfeldes am 14.05.2019 bei der Wehranlage des Lake Dunlap (Texas, USA) herausgebrochen und verursachte das Leerlaufen der Stauhaltung und Überschwemmungen unbekanntes Ausmaßes in den Uferbereichen (Lake Record Blog, 2019).

Wehrkrone, Tosbecken und Endschwelle sind vermehrt der Abrasion durch den Feststofftransport des Wassers ausgesetzt. Um- und Unterläufigkeiten gefährden die Standsicherheit und können einen hydraulischen Grundbruch oder ein Aufschwimmen zur Folge haben. Bei einem hydraulischen Grundbruch wird die Gewichtskraft einer durchlässigen Bodenschicht und infolgedessen die Festigkeit durch nach oben strömendes Grundwasser aufgehoben. Bei einem Versagen durch Aufschwimmen wird ein Bauwerk oder eine undurchlässige Bodenschicht infolge der hydrostatischen Auftriebskraft des Wassers angehoben (BAW, 2013; Strobl, Zunic, 2006). Weitere Versagensformen sind die Erosion und die Suffosion als Formen hydraulisch verursachter Materialtransportprozesse, die Umlagerung und der Transport von Bodenteilchen (BAW, 2013; Schupener, 2012). Zu den ungewünschten Einwirkungen zählen ebenso Schwingungen und Unterdrücke an den Verschlüssen sowie Kavitation, welche die Lebensdauer der Verschlüsse verkürzen (Strobl, Zunic, 2006).

## 2.2.2 Bauwerksinspektion in der WSV

Die WSV ist gemäß Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101 (BMVBS, 2009) verpflichtet, regelmäßig Bauwerksinspektionen durchzuführen und die Ergebnisse zu dokumentieren. Die Prozesse werden durch die eigens entwickelte Software WSVPruf und das BAW-Merkblatt zur Schadensklassifizierung BAW-MSV (BAW, 2018) unterstützt. Grundlage für den Umfang der Bauwerksinspektion ist die Zuordnung der in VV-WSV 1102 genannten Objektarten in Inspektionskategorien A oder B (siehe Tabelle 7), die unter Beachtung der Sicherheit und Ordnung nach Gefährdungspotenzial und Lastbeanspruchung erfolgt ist.

Tabelle 7: Auszug aus VV-WSV 2101 - Objektartenzuordnung zu Inspektionskategorien (BMVBS 2009)

Objektartenzuordnung zu Inspektionskategorien			
Objekt-Art	Objekt-Bezeichnung	Bedingung	Kategorie
200	Objekte für das Regeln und Sichern des Wasserspiegels sowie für das hydrologische Messwesen		
210	Stauanlagen		
211	Talsperren einschl. Staubecken		A
212	Pumpspeicheranlagen		A
213	Wehranlagen, Wasserverteilungsanlagen		A
		festes Wehr mit geringer Fallhöhe	B

Objektarten der Inspektionskategorie A sind einer Bauwerksprüfung alle 6 Jahre, einer Bauwerküberwachung 3 Jahre nach der Prüfung und jährlich einer Bauwerksbesichtigung zu unterziehen. Bauwerke der Inspektionskategorie B werden hingegen nur jährlich besichtigt. Bauwerksprüfung, Bauwerküberwachung und Bauwerksbesichtigung als Teil der Bauwerksinspektion (siehe Tabelle 8) unterscheiden sich im Umfang und im notwendigen Personal (BMVBS 2009).

Tabelle 8: Inspektionsformen der WSV (BMVBS, 2009)

Begriff	Erläuterung
Bauwerksprüfung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• handnahe Untersuchung aller, auch der schwer zugänglichen, Bauwerksteile</li> <li>• sachkundiges Ingenieurpersonal</li> <li>• Beurteilung des Bauwerkszustands hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit</li> </ul>
Bauwerksüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• intensive, erweiterte Sichtprüfung der Bauwerke</li> <li>• sachkundiges Ingenieurpersonal</li> <li>• Beurteilung des Bauwerkszustands hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit</li> </ul>
Bauwerksbesichtigung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle der Bauwerke auf offensichtliche Schäden</li> <li>• sachkundiges Personal, welches in das Tragverhalten und die Funktionsweise des Bauwerkes eingewiesen ist</li> <li>• Beurteilung des allgemeinen baulichen Zustands der Bauwerke</li> </ul>

Neben den Inspektionsformen gemäß VV-WSV 2101 (BMVBS, 2009) gibt es die laufende Beobachtung durch sachkundiges Personal, die bei allen Bauwerken unabhängig von einer Zuordnung zu einer Inspektionskategorie durchgeführt wird. Grundlage ist hier Verwaltungsvorschrift VV-WSV 1116 (BMVBS, 1995). Für Dämme in den Dammstrecken der Bundeswasserstraßen gilt die Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2301 und für Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen als Über- und Unterführungsanlagen für Verkehre aller Art findet DIN 1076 Anwendung. Zu den Ingenieurbauwerken in der Unterhaltungslast der WSV gehören bspw. rund 1500 Brücken.

Alle nach Inspektionskategorie A und B zu inspizierende Bauwerke werden in einem Bauwerksverzeichnis erfasst, welches mindestens die Objekt-Identifikationsnummer (Objekt-ID), den Bauwerksnamen und die Wasserstraßenbezeichnung sowie in Kategorie A zusätzlich die zugehörige Zustandsnote enthält. Für jedes Bauwerk wird darüber hinaus eine Bauwerksinspektionsakte geführt, die eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten des Bauwerks mit Skizzen und die Besichtigungsberichte enthält (Kategorie A und B). Bei Bauwerken der Kategorie A umfasst diese Akte eine Vielzahl weiterer Dokumente wie z.B. Bestandspläne und Bestandsstatiken, Vermessungsergebnisse sowie Gutachten und Überwachungsberichte.

Insbesondere die Bauwerksprüfung zeigt, wie umfangreich eine Bauwerksinspektion sein kann. So müssen ober- und unterhalb eines Bauwerks Revisionsverschlüsse gestellt werden, alles Wasser wird abgelassen bzw. abgepumpt, das Bauwerk wird mit Hochdruckreinigern gereinigt und schließlich vom Bauwerksprüfer Stück für Stück handnah inspiziert. Erkannte Schäden werden klassifiziert und in der Datenbank WSVPruf dokumentiert. Mithilfe des Programms können Prüfberichte generiert oder die Entwicklung eines Schadens nachverfolgt werden. Mit einem Zusatzmodul ist es möglich, die Zustandsnote des ganzen Objekts oder die Entwicklung einzelner Teilnoten wie dem Stahlwasserbau oder Massivbau zu prognostizieren.

### 2.2.2.1 Schadensbewertung und Ermittlung der Zustandsnote

Ein Schaden wird für die Verkehrswasserbauwerke definiert als Überschreitung des Toleranzbereiches für die Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Zustand eines Bauteils zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion im Hinblick auf die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit (BAW, 2018). Für die Bewertung von Schäden steht das BAW-Merkblatt zur Schadensklassifizierung (BAW, 2018) zur Verfügung, das vorrangig als Online-Hilfe für das Programm WSVPruf entwickelt wurde. In dem Merkblatt sind die Schadensbilder nach Bauweisen bzw. Baustoffen zusammengefasst und werden mit einer Vielzahl von Beispielen veranschaulicht. Im Merkblatt werden folgende Bewertungsgrundsätze genannt (BAW, 2018):

- Bei der Bauwerksinspektion sollen nur Schäden erfasst und dokumentiert werden.
- Die Schäden sollen im Hinblick auf die Tragfähigkeit und/oder die Gebrauchstauglichkeit bewertet werden.
- Ausschlaggebend für die Bewertung der Schäden ist der aktuelle Zustand zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion.
- Bewertet wird ein Schaden in Bezug auf das betroffene Bauteil, nicht in Bezug auf die Gesamtanlage und nicht in Bezug auf das Schadensausmaß.

Diese Grundsätze und die Schadensklassifizierung dienen vorrangig der Sicherung der Vergleichbarkeit von Ergebnissen und der Reduzierung von Interpretationsspielräumen.

Erkannte Schäden werden den Schadensklassen 1 bis 4 zugeordnet. Schadensklasse 1 gehören gemäß Merkblatt (BAW, 2018) ausschließlich Schäden an, die keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit haben und bei denen zukünftig keine Zustandsverschlechterung zu erwarten ist. Alle anderen Schäden werden unmittelbar Schadensklasse 2 oder höher eingestuft. Schäden in Klasse 2 bis 4 durchlaufen einen Entwicklungsprozess, bei denen sich der Zustand zunehmend verschlechtert und sich auf die Tragfähigkeit und/oder die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils auswirkt. Schadensklasse 4 entspricht der schlechtesten Bewertung und ggf. werden Prüfzyklen verkürzt oder Sofortmaßnahmen eingeleitet, um eine mögliche Gefahr für Leib und Leben auszuschließen oder abzuwenden (BAW, 2018).

In der Datenbank WSVPruf werden die klassifizierten Schäden erfasst und einer von 11 Objektteilkategorien zugeordnet, diese sind zum Beispiel Massivbau, Fugen, Stahlbau oder Antriebe. Zusätzlich wird das Ausmaß des Schadens erfasst, wofür eine festgelegte Anzahl von beschreibenden Begriffen zur Auswahl steht. Um für das ganze Bauwerk eine Zustandsnote zu ermitteln, werden die Einzelergebnisse der Schadensbewertung in drei Schritten aggregiert.

Im ersten Schritt wird die Schadensklasse jedes einzelnen Schadens anhand der beschreibenden Begriffe modifiziert. Für Begriffe wie „beginnend“, „ein Stück“ oder „vereinzelt“ verbessert sich die Schadensbewertung um den Wert 0,1 und für Begriffe wie „an allen Bauteilen“, „ausgeprägt“ oder „großflächig“ reduziert sich die Schadensbewertung um den Wert 0,1. Bei Begriffen aus dem mittleren Größenbereich bleibt die Schadensnote unverändert. Durch diese Anpassung wird die Größe der Schäden in der Zustandsnote berücksichtigt. Der schlechteste Wert nach diesem Schritt entspricht der vorläufigen Note für das Bauwerk und es folgt die nächste Modifikation.

Wenn nur ein oder zwei Schäden innerhalb einer der 11 Objektteilkategorien erfasst sind, wird die Note um den Wert 0,1 verbessert. Bei drei bis fünf erfassten Schäden bleibt die Note unverändert. Bei sechs oder mehr Schäden reduziert sich die Note um den Wert 0,1. Mit dieser Anpassung im zweiten Schritt wird berücksichtigt, wie groß die Anzahl Schäden derselben Objektteilkategorie ist. Der schlechteste Wert nach diesem Schritt entspricht wiederum der vorläufigen Note für das Bauwerk und es folgt der letzte Teilschritt.

Die Note wird in einem letzten Schritt nochmals angepasst, indem die Anzahl der geschädigten Objektteilkategorien überprüft wird. Wenn vier oder weniger der elf Kategorien Schäden aufweisen, erfolgt eine Verbesserung um den Wert 0,1. Die Note bleibt bei fünf bis acht Objektteilkategorien unverändert und wird bei neun und mehr Objektteilkategorien um den Wert 0,1 herabgestuft.

Das Ergebnis sind bis zu fünf Noten in den Teilnoten-kategorien Massivbau, Stahlbau, Ausrüstung, Sonstiges und Korrosionsschutz sowie die Zustandsnote für das Gesamtbauwerk. Bedingt durch den Algorithmus gibt es die Noten (in 0,1er Schritten):

- 1,0 bis 1,3 für den Zustandsnotenbereich 1 (sehr gut),
- 1,7 bis 2,3 für den Zustandsnotenbereich 2 (befriedigend),
- 2,7 bis 3,3 für den Zustandsnotenbereich 3 (ausreichend) und
- 3,7 bis 4,0, für den Zustandsnotenbereich 4 (ungenügend).

Diese sind zusammen mit den Einzelschäden Bestandteil des Zustands- bzw. Prüfberichts für das jeweilige Bauwerk. Sind einer der Teilnoten-kategorien keine Schäden zugeordnet, wird keine Teilnote ausgewiesen.

Eine Auswertung der Daten in WSVPruf zeigt, dass ein Großteil der Bauwerke mit Zustandsnoten aus den Bereichen „ausreichend“ (Zustandsnotenbereich 3) und „ungenügend“ (Zustandsnotenbereich 4) bewertet ist.

Abbildung 15 zeigt dies am Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen.

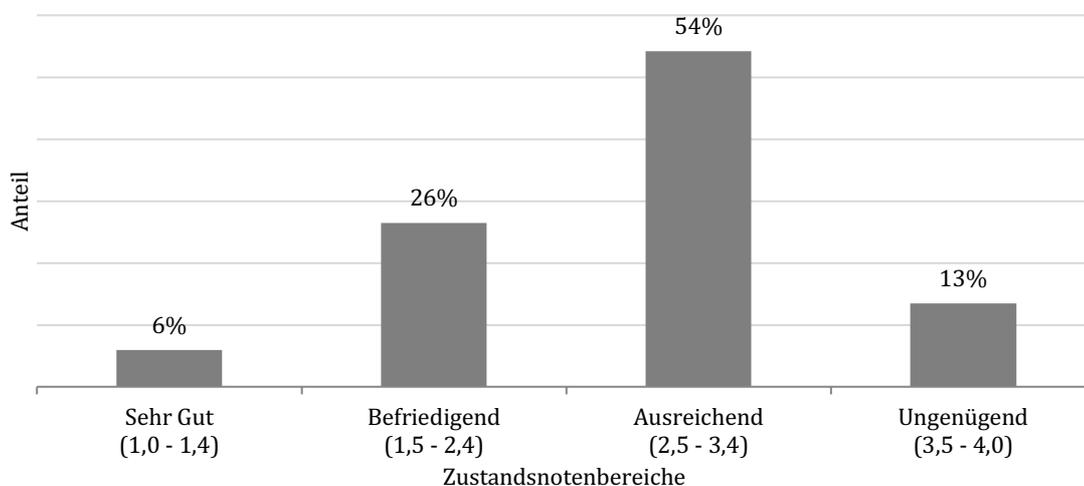


Abbildung 15: Verteilung der 245 Wehranlagen auf die Zustandsnotenbereiche (Eigene Darstellung)

Eine schlechte Zustandsnote signalisiert gemäß Merkblatt (BAW, 2018) Handlungsbedarf, da die Gebrauchstauglichkeit und/oder die Tragfähigkeit eingeschränkt sind, was aber nicht zwingend bedeutet, dass ein Neubau notwendig ist. Aufgrund der Alterungsprozesse ist zu erwarten, dass sich die Verteilung dahingehend verändert, dass der Anteil im Zustandsnotenbereich 4 kurz- bis mittelfristig zunehmen wird. Um diese Entwicklung aufzuzeigen, bietet ein Zusatzmodul innerhalb des Programms WSVPruf die Möglichkeit, die Zustandsentwicklung einzelner Bauwerke zu prognostizieren.

### 2.2.2.2 Zustandsprognosen

Ziel der Zustandsprognose ist die Bestimmung des Zeitpunktes, an dem für ein Bauwerk eine definierte Zustands- bzw. Nutzungsgrenze erreicht wird (siehe Abbildung 16). Daraus kann der rechtzeitige Eingreifzeitpunkt für notwendige Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet werden, um die Nutzungsdauer zu verlängern oder das Bauwerk durch einen Neubau zu ersetzen.

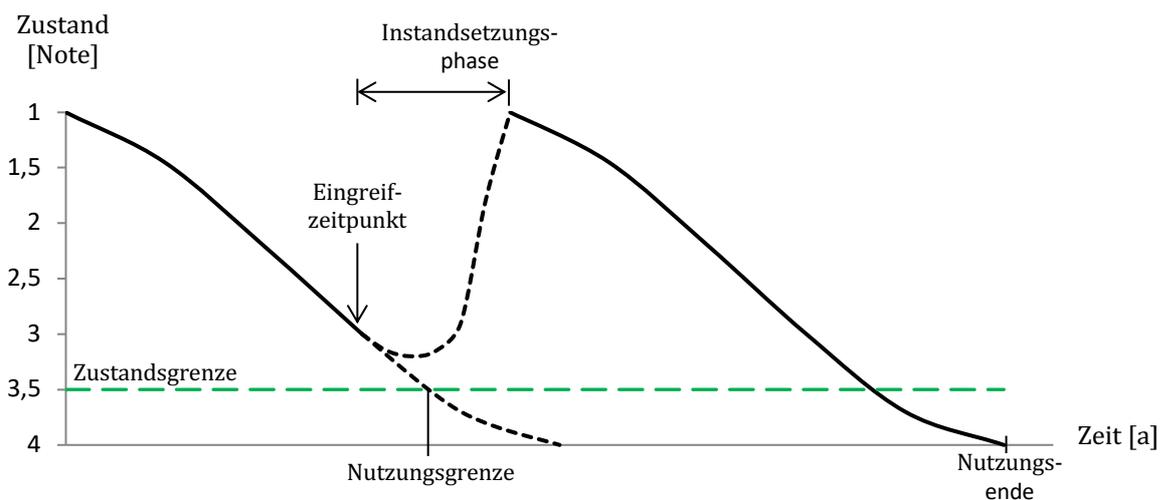


Abbildung 16: Zustand eines Bauwerks in Abhängigkeit der Nutzungsdauer (BAW, 2010)

Für die Verkehrswasserbauwerke der WSV wurde eine Methode der Zustandsprognose entwickelt, die sowohl mit als auch ohne Bauwerksschäden angewendet werden kann (Kühni et al., 2008). Wenn Schäden bei der Bauwerksinspektion in WSVPruf dokumentiert sind, wird die Zustandsentwicklung mithilfe von Markov-Matrizen berechnet. Jeder Schadensbegriff, der bei der Bewertung von Schäden im Rahmen der Bauwerksinspektion ausgewählt wurde, wird einem von 14 definierten Verfallsprozessen zugeordnet. Für jeden Verfallsprozess wurde von Kühni et al. (2008) definiert, mit welcher zeitabhängigen Wahrscheinlichkeit ein Schaden in eine schlechtere Schadensklasse wechselt. Ausgehend von der aktuellen Schadensbewertung und der bemessenen Lebensdauer für eine bestimmte Objektteilkategorie kann somit prognostiziert werden, wann ein Schaden einen bestimmten Wert bis 4,0 erreicht. Sind keine Bauwerksschäden erfasst, erfolgt eine Prognose in Anlehnung an die Überlebensfunktionen aus der Bevölkerungsstatistik, welche an die

bemessene Nutzungsdauer angepasst wurde. Grundlage für beide Verfahren bilden gewonnene Informationen aus Experteninterviews in Form einer Delphi-Befragung, bei welcher der Zeitpunkt des Auftretens bestimmter Schadensbilder für die Schadensklasse 2 bis zum Erreichen der Schadensklasse 4 angegeben werden sollten. Anhand der Einschätzungen durch die Experten wurden die Verläufe der Schadensentwicklung ermittelt und mit Funktionen beschrieben (Kühni et al., 2008). Mit beiden Methoden ist es möglich, für die fünf Teilnotenkategorien (Massivbau, Stahlbau, Ausrüstung, Korrosionsschutz und Sonstiges) und somit für das gesamte Bauwerk eine Aussage über die Zustandsentwicklung zu treffen. Diese wiederum ist Grundlage für die Ermittlung des Erreichens der Zustandsgrenze und des Eingreifzeitpunktes, zu dem eine Instandsetzungsmaßnahme idealerweise eingeleitet werden sollte.

So wie eine schlechte Zustandsbewertung einen unmittelbar anstehenden Handlungsbedarf anzeigt, deutet im Umkehrschluss eine gute Zustandsbewertung auf ein größeres Zeitfenster hin, bis Instandhaltungsmaßnahmen notwendig werden. Die Zustandsprognose für einzelne Teilnotenkategorien ist ein hilfreiches Instrument, um zu ermitteln, wann bspw. der Massivbau oder der Stahlwasserbau eines Objekts eine Maßnahme erwarten lassen.

### **2.2.3 Priorisierung von Investitionsprojekten in der WSV**

Für die Instandhaltungsplanung wird die Priorität durch die Methodik zur Priorisierung von Investitionsmaßnahmen an Bundeswasserstrassen (MPI) ermittelt (BMVI, 2016a). Ziel der MPI ist es, wichtige und somit dringliche und vorteilhafte Projekte zu identifizieren, diese rechtzeitig zu starten und die dafür benötigten Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Die Projekte werden nach MPI in vier verschiedene Prioritätsklassen aufgeteilt (BMVI, 2016a):

- Priorität 1: hohe Dringlichkeit
- Priorität 2: mittlere Dringlichkeit
- Priorität 3: hohe Vorteilhaftigkeit
- Priorität 4: keine Dringlichkeit, geringe Vorteilhaftigkeit

Die Prioritätskategorien 2 bis 4 werden zusätzlich noch in je drei Unterprioritätsstufen eingeteilt, die auf der verkehrlichen Relevanz der Projekte basieren. Projekte innerhalb der gleichen Prioritätsstufe sind gleichrangig, was einen gewissen Spielraum für individuelle Ressourcensteuerung zulässt. Insgesamt gibt es zehn verschiedene Prioritätswerte. Die Einteilung in die verschiedenen Prioritätsstufen basiert auf einer mehrstufigen Bewertung der Projekte hinsichtlich sechs Kriterien (BMVI, 2016a):

- Kriterium 1 - Lage im Kernnetz: Es wird unterschieden, ob ein Projekt im Kernnetz liegt oder nicht. Für im Kernnetz liegende Projekte wird die strategische Entscheidung getroffen, ob das Projekt für den Bestand des Verkehrsträgers Schiff/Wasserstraße von Bedeutung ist.
- Kriterium 2 - Vertragsrechtliche Bindung: Es wird berücksichtigt, ob ein Projekt bereits vertraglich gebunden ist.
- Kriterium 3 - Ersatz vor Ausbau: Es gibt Ersatz-, Ausbau und kombinierte Ersatz-Ausbau-Projekte. Gemäß dem Grundsatz „Ersatz vor Ausbau“ werden Projekte im Kernnetz, welche sich

dem Ersatz und somit der Bestandssicherung des bestehenden Netzes widmen, höher gewichtet als Ausbauprojekte.

- Kriterium 4 - Zustand und Sperrbarkeit: Dieses Kriterium behandelt die Sicherheitsrelevanz von Bauwerken. Bauwerke mit einer Zustandsnote von 3,7 bis 4,0 werden höher bewertet als Bauwerke mit einem Zustand von 3,3 oder besser. Außerdem wird unterschieden, ob Objekte sperrbar sind oder nicht. Nicht sperrbare Anlagen sind in der Regel Anlagen mit wasserwirtschaftlichen Aufgaben und werden höher priorisiert.
- Kriterium 5 - Verkehrliche Relevanz der Ersatzprojekte im Kernnetz: Dieses Kriterium beschäftigt sich mit der verkehrlichen Relevanz der Projekte der Prioritätsstufe 2. Alle Projekte, welche durch die Kriterien 1 bis 4 in Priorität 2 eingeteilt wurden, werden nun nach deren verkehrlicher Relevanz aufgeschlüsselt. Projekte mit Priorität 2 sind alles Ersatz- oder Bestandssicherungsprojekte. Je nach ihrer Lage im Kernnetz erhalten die Projekte die Priorität 2.1, 2.2 oder 2.3.
- Kriterium 6 - Verkehrliche Relevanz der Ausbauprojekte im Kernnetz: Das letzte Kriterium ähnelt Kriterium 5, befasst sich jedoch mit den Projekten der Prioritätsstufe 3, welche Ausbauprojekte oder kombinierte Ersatz-Ausbau-Projekte mit Schwerpunkt Ausbau beinhaltet. Je nach Lage der Projekte im Kernnetz erhalten diese die Priorität 3.1, 3.2 oder 3.3.

Das erste Kriterium ordnet die Projekte zunächst in die Prioritätsstufen 3 (Lage im Kernnetz) und 4 (Lage außerhalb des Kernnetzes) ein. Mit den nachfolgenden Kriterien werden die Projekte aufgrund bestimmter Eigenschaften in der Priorität heraufgestuft oder einzelnen Unterstufen zugeordnet. So sind (Stand 07/2019) sind 38 Wehranlagen (ca. 16 %) der Prioritätsstufe 1 (P1) zugeordnet. Aufgrund der kontinuierlichen Substanzverluste durch Alterungsprozesse ist mit einem stetigen Zuwachs in P1 zu rechnen.

Bei der MPI wird implizit die Zustandsnote eines Bauwerkes als Indikator für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Bauwerks- oder Bauteilausfalls genutzt. Die Verwendung der Zustandsnote stellt eine pragmatische, allerdings sehr vereinfachende Herangehensweise dar, da die Aussagefähigkeit der Zustandsnote selbst nach einer Reduktion auf die Teilnoten für Massivbau und Stahlbau Schwächen aufweist. Im Wesentlichen lassen sich zwei Kritikpunkte nennen (Bödefeld, Akkermann, 2018):

- Bedingt durch den Algorithmus kann ein Schaden ohne Relevanz für die Tragfähigkeit ursächlich für eine schlechte Zustandsnote sein, da diese Schäden nicht extrahiert werden.
- Die Erkenntnisse aus der Bauwerksinspektion basieren maßgeblich auf der Erfassung sichtbarer Schäden. Darüber hinaus relevante Aspekte wie die Auslastung oder die Robustheit des Bauwerks bleiben unberücksichtigt.

Während die Unterscheidung in systemrelevant und nicht systemrelevant die Bedeutung eines Objektes für Kernprozesse wie z. B. die Wasserspiegelregelung bewertet (siehe Tabelle 15), ist die Zustandsnote trotz der genannten Kritikpunkte ein erstes Indiz für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Bauwerks- oder Bauteilausfalls, wobei schlechtere Zustandsnoten auf eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses wie z.B. ein Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen

hindeuten. Die systemrelevanten Bauwerke (hohe Konsequenzen bei Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen) in einem schlechten Bauwerkszustand (hohe Eintrittswahrscheinlichkeit) sind nach diesem Verständnis die Bauwerke mit dem höchsten Risiko.

Die MPI ist eine regelbasierte Priorisierung, mit der die einzelnen Investitionsprojekte resp. Verkehrswasserbauwerke systematisch und nachvollziehbar den Prioritätsstufen zugeordnet werden. Sie bildet dabei die aktuelle Situation einzelner Bauwerke ab, die in den Prioritätsstufen gesammelt werden. Vergleiche zwischen den Bauwerken innerhalb einer Prioritätsstufe sind nicht vorgesehen, sodass z. B. bei den 38 Wehranlagen der höchsten Prioritätsstufe P1 nicht differenziert werden kann, in welcher Reihenfolge die Maßnahmen am besten durchzuführen sind. Für eine Differenzierung werden weitere Kriterien oder auch andere Methoden zur Entscheidungsfindung benötigt.

#### **2.2.4 Zusammenfassung**

Die Analyse der Konsequenzen erfolgt im Risikomanagement in unmittelbarem Zusammenhang mit bestimmten Ereignissen bzw. Risikoquellen. In der vorliegenden Arbeit sind die Verkehrswasserbauwerke Gegenstand der Untersuchung. Diese werden anhand ihrer vorrangigen Aufgaben gemäß Objektkatalog der Verwaltungsvorschrift VV-WSV 1102 gruppiert. Diese Aufgaben erlauben Rückschlüsse auf mögliche Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen. Das gewählte Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen zeigt, dass es sich bei den Verkehrswasserbauwerken um Ingenieurbauwerke handelt, die in starken Wechselbeziehungen mit ihrer Umwelt stehen und ein Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen nicht nur den Verkehr, sondern auch die Umgebung eines Bauwerks beeinflussen kann. Die Interdependenzen werden bei der Entwicklung des Indikatorensystems in Abschnitt 3.2 berücksichtigt.

Die Komplexität der Verkehrswasserbauwerke und zeitveränderliche Eigenschaften wie Alter und Zustand sind einer der maßgeblichen Gründe für die Einführung regelmäßiger Bauwerksinspektionen gemäß Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101. Zu diesem Zweck werden die Objektarten nach ihrem Gefährdungspotenzial und ihrer Lastbeanspruchung in Inspektionskategorien eingeordnet. Bei Objekten der Inspektionskategorien A werden während der regelmäßigen Bauwerksinspektionen erkannte Schäden erfasst, bewertet und in der Datenbank WSVPruf dokumentiert, um Zustandsnoten zu berechnen. Mit dem Modul Zustandsprognose ist es möglich, den Zustand eines einzelnen Objekts bzw. von dessen Teilnotenkategorien, wie z.B. Stahlwasserbau oder Massivbau, zu prognostizieren und somit das Erreichen der Zustandsgrenze bzw. der Nutzungsdauer zu bestimmen. In Abschnitt 3.4.1.1 werden diese Erkenntnisse weiterentwickelt, sodass eine Anwendung für einen großen Bauwerksbestand realisierbar ist.

Die Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten des BMVI berücksichtigt die Sicherheitsrelevanz und die wirtschaftliche Bedeutung der Verkehrswasserbauwerke. Die Sicherheitsrelevanz wird in der MPI mit der Zustandsnote aus der Inspektionsdatenbank WSVPruf abgebildet. Die wirtschaftliche Bedeutung ist bereits mit der Zugehörigkeit zum Kernnetz gegeben. Zu diesem gehören alle Bundeswasserstraßen, auf denen nennenswerter Güterverkehr stattfindet. Die Methode sortiert die Bauwerke in Prioritätsstufen ein, wobei innerhalb einer Stufe keine weitergehende Ordnung erstellt wird und somit alle Bauwerke einer Stufe formal als gleichwertig gelten.

Unberücksichtigt bleibt bei der MPI, ob und in welchem Ausmaß Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen zu erwarten sind. In Abschnitt 3.2.2 werden mit dem entwickelten Indikatorensystem mögliche Konsequenzen nach einem Bauwerksversagen in die Entscheidungsfindung integriert. Mit den Indikatoren und der gewählten Methode der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (siehe Abschnitt 2.3 und Abschnitt 3) werden die Prioritätswerte für die Instandhaltungsplanung am Beispiel von 245 Wehranlagen ermittelt.

## **2.3 Entscheidungstheoretische Grundlagen**

### **2.3.1 Systeme zur Entscheidungsunterstützung**

Systeme zur Entscheidungsunterstützung (EUS) finden ihren Einsatzbereich im Wesentlichen bei beschränkt rationalem Entscheidungsverhalten. Sprague und Carlson (1982) beschreiben die Systeme zur Entscheidungsunterstützung als Werkzeuge, die durch eine verbesserte Nutzung von Daten und Modellen bei der Lösung unstrukturierter Probleme helfen. Die Funktionalitäten orientieren sich maßgeblich an den aus der Problemstellung resultierenden Anforderungen und an den vorgesehenen Nutzergruppen. Es werden folgende Anforderungen an ein EUS gestellt (Sprague, Carlson, 1982):

- Anpassungsfähigkeit (erweiterbar, skalierbar),
- Unterstützung in allen Phasen der Entscheidungsfindung und
- leichte Bedienbarkeit.

Als wesentliche Kennzeichen eines (idealen) EUS nennt Werner (1992):

- Unterstützung des Entscheidungsträgers bei der Lösung bzw. Handhabung von Problemen,
- Hilfestellung in allen Phasen des Problemlösungsprozesses,
- Einsatzmöglichkeit auf allen Unternehmensebenen,
- Verwendung in allen Tätigkeitsbereichen eines Managers (operativer, taktischer, strategischer Bereich),
- Anwendbarkeit sowohl für Individuen als auch für Gruppen,
- Entwicklung unter Einbeziehung der Nutzer (evolutionär),
- flexible und anpassungsfähige EUS,
- Unterstützung einer Vielzahl unterschiedlicher Entscheidungsstile,
- Realisierung einer einfachen Mensch-Maschine-Kommunikation und
- Steuerungsmöglichkeit der Mensch-Maschine-Kommunikation seitens der Benutzer.

Nach Pereira und Quintana (2002) zeigen insbesondere Entwicklungen von EUS im Umwelt- und Risikomanagement, dass bei der formalen Analyse komplexer Entscheidungsprobleme nicht immer Lösungen ermittelt werden können. In diesen Fällen liegt der Schwerpunkt vielmehr auf der Unterstützung bei der Ermittlung von reproduzierbaren Entscheidungen anhand einzelner oder mehrerer Kriterien sowie der Möglichkeit, ein EUS an verschiedene Nutzergruppen anzupassen. Der Entscheidungsträger soll durch sie keineswegs ersetzt oder aus der Verantwortung genommen werden (Marakas, 1999).

Auch Andersson-Sköld et al. (2001) formulieren ebenfalls im Kontext des Umwelt- und Risikomanagements, dass Entscheidungen unter Unsicherheit sowie multiple, häufig gegensätzliche Interessen und Ziele die eigentliche Herausforderung darstellen. Somit ist es Aufgabe eines EUS, realistische Alternativen zu identifizieren, Informationen in die Analyse und Auswahl von Alternativen zu integrieren sowie zwischen Schlüssel- und Nebeninformationen zu unterscheiden. Zentral ist eine transparente und vor allem reproduzierbare Entscheidungsfindung (Andersson-Sköld et al., 2001).

Abbildung 17 zeigt den von Werner (1992) beschriebenen Zusammenhang zwischen den Kernelementen eines Entscheidungsunterstützungssystems, zu denen er auch die Nutzer zählt. Als zentrales Element eines EUS können die verschiedenen Daten angesehen werden, welche die Grundlage des Entscheidungsprozesses bilden. Die Datenkomponente stellt die Verbindung zu den internen und externen Informationsquellen her und verwaltet die unterschiedlichen Datenformen und -typen. Die Datenverarbeitung erfolgt in Interaktion mit der Modell- und Methodenkomponente. Die Modell- und Methodenkomponente umfasst anwendungsspezifische Modelle, wie zum Beispiel vereinfachte Abbildungen realer Sachverhalte, oder auch Methoden des Operations Research, Berechnungsalgorithmen aus der Statistik oder Mathematik. Die Dialogkomponente ermöglicht die Mensch-Maschine-Interaktion sowie die Datenbereitstellung für den Nutzer und ist mitbestimmend für die Qualität und Anwenderfreundlichkeit des EUS (Werner, 1992).

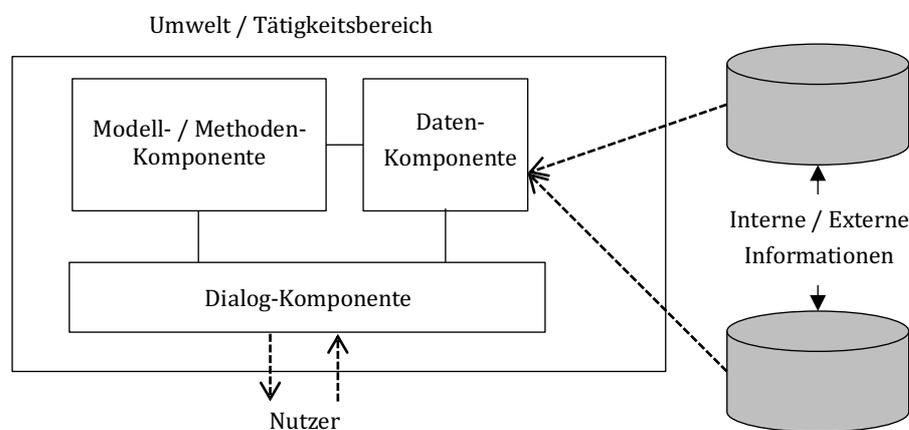


Abbildung 17: Grundstruktur von Entscheidungsunterstützungssystemen (Werner, 1992)

Limitierender Faktor in Entscheidungsprozessen ist oft die dafür vorgesehene Zeit – ein EUS kann dabei helfen, auch größere Mengen Daten in sehr kurzer Zeit aus verschiedenen Quellen zusammenzuführen und auszuwerten. So kann die zur Verfügung stehende Zeit für die Suche von Alternativen effektiver genutzt und eine größere Anzahl von Lösungsalternativen formuliert werden. Vorteil der Anwendung eines EUS ist somit – neben der Unterstützung bei der Problemlösung – vor allem auch der Zeitgewinn.

### 2.3.2 Der Prozess einer Entscheidungsfindung

Bei den theoretischen Ansätzen der Entscheidungstheorie wird im Allgemeinen zwischen der präskriptiven und der deskriptiven Entscheidungstheorie unterschieden. Die präskriptive (vorschreibende) Entscheidungstheorie oder auch Entscheidungslogik hat zum Ziel, mittels deduktiver Methoden den optimalen Weg vorzugeben, wie Entscheidungen rational zu treffen sind. Die deskriptive (beschreibende) Entscheidungstheorie untersucht mithilfe empirischer Analysen, wie und warum Entscheidungen getroffen werden. Beide Theorien beinhalten grundlegende Erkenntnisse zum Verständnis von Entscheidungsprozessen (Laux, 2005). Die Entstehung von Entscheidungen, wie z.B. die Priorisierung von Verkehrswasserbauwerken für die Instandhaltungsplanung, ist ein Prozess, wie er bspw. im Phasenmodell von Simon (1960) beschrieben wird:

- Problemerkennung und Zielformulierung („intelligence“): Die erste Phase zeichnet sich im Wesentlichen durch die Gewinnung und Verarbeitung von Informationen aus. Der Entscheidungsträger erkennt einen Handlungsbedarf, um vom aktuellen IST-Zustand zum gewünschten SOLL-Zustand zu gelangen.
- Erarbeitung und Bewertung von Alternativen („design“): In dieser Phase wird der Handlungsspielraum hinsichtlich realistischer Alternativen sondiert. Dazu gehört sowohl die Einhaltung äußerer Rahmenbedingungen als auch die Berücksichtigung bereits gemachter Erfahrungen. Nach Werner (1992) sind schlecht spezifizierbare und abbildbare Komponenten wie „Erfahrung“ oder „Intuition“ oft ein Bestandteil dieser Phase. Ein weiterer Aspekt ist die Berücksichtigung zukünftiger Konsequenzen, die Entscheidungen nach sich ziehen, und nicht beeinflussbarer Systemänderungen. Letztere werden als Szenarien verarbeitet (Rommelfanger, Eicke-meier, 2013). Bei der Problemanalyse kann die Entwicklung von Modellen hilfreich sein, um auf experimentellem Weg das Systemverhalten abzubilden, zu simulieren und mögliche Problemursachen zu identifizieren. Dies kann beispielsweise durch „What-if-Tests“ geschehen. Eine Visualisierung spezieller Aspekte kann zusätzlich unterstützen und von Entscheidungsträgern zur Veranschaulichung herangezogen werden (Werner, 1992).
- Auswahl einer Alternative („choice“): Der Entscheidungsprozess nach Simon (1960) endet in der dritten Phase mit der Auswahl einer Alternative.

Marakas (1999) erweitert dieses Modell um eine Implementierungsphase, die aus der Ausführung und einer anschließenden Kontrolle der Zielerreichung besteht. Gegebenenfalls wird der Entscheidungsprozess wiederholt, um sich iterativ dem gewünschten Systemzustand zu nähern (Marakas, 1999). Der Entscheidungsprozess ist nicht nur Aneinanderreihung einzelner Schritte, sondern zeichnet sich durch Wechselbeziehungen und den notwendigen Blick fürs Ganze aus (Laux, 2005).

Dieser Prozess wurde in späteren Jahren immer wieder überarbeitet und um weitere Komponenten ergänzt. So benennt die Sozialwissenschaftlerin Wilz (2010) als ein weiteres frühes Element im Prozess die Motivation resp. die Erkenntnis des Entscheidungsträgers, überhaupt aktiv zu werden. Sie ergänzt zum Ende des Prozesses darüber hinaus eine Phase der Kommunikation, um z.B. die Zustimmung anderer zu einer getroffenen Wahl zu erhalten (Wilz, 2010).

Insbesondere im Hinblick auf die vielen Interdependenzen der einzelnen Phasen beschreibt Marakas (1999) die Eigenschaften des Entscheidungsprozesses von strukturiert bis unstrukturiert.

Bei einem strukturierten Entscheidungsprozess stehen für alle Phasen Lösungstechniken zur Verfügung und alle relevanten Informationen sind leicht zu ermitteln. Es handelt sich um Routine- oder sich wiederholende Entscheidungssituationen. Den Gegenpol bildet der gänzlich unstrukturierte Entscheidungsprozess, der aufgrund fehlender Lösungstechniken und nicht zu beschaffender Informationen nur mit der Intuition des Entscheidungsträgers gelöst werden kann. Die Lösung dieser komplexen Aufgabe ist maßgeblich von der subjektiven Einschätzung des Entscheidungsträgers geprägt. Die verschiedenen Abstufungen zwischen strukturiert und unstrukturiert entsprechen semi-strukturierten Entscheidungsprozessen Marakas (1999).

Auch für das Entscheidungsverhalten gibt unterschiedliche Modelle. Die Optimierungsstrategie im Entscheidungsverhalten des theoretisch optimal entscheidenden *Homo Oeconomicus* ist gekennzeichnet durch den Einsatz aller verfügbaren Mittel, um seinen Nutzen zu maximieren. Für seine rationalen Entscheidungen stehen ihm vollumfänglich Informationen zum Handlungsraum, zu möglichen Szenarien und zu den Konsequenzen zur Verfügung (Rommelfanger, Eickemeier, 2013). Diese Annahmen sind allerdings auch einer der zentralen Kritikpunkte, da sie kaum der Realität entsprechen dürften.

Bereits Simon (1960) formuliert den Ansatz des beschränkt rationalen Entscheidungsverhaltens, das die Erarbeitung mehrerer Lösungsalternativen einschließt. Nach Rommelfanger und Eickemeier (2013) hat ein Entscheidungsträger nicht immer die Möglichkeit, alle relevanten Informationen über Alternativen und deren Konsequenzen sowie Umweltzustände zu gewinnen, was auch nicht immer zwingend als notwendig bewertet wird. Folglich wird so lange nach Alternativen gesucht, bis die festgelegten Ziele erfüllt werden. Dabei kann sich der Entscheidungsträger auch mit Alternativen zufriedengeben, die nicht optimal sind, sich dem Idealziel aber in für ihn ausreichender Weise nähern (Satisfizierungsstrategie). Das ist letztlich auch der Ansatzpunkt für die präskriptive Entscheidungstheorie, die mit ihren Modellen als Abbild der Realität versucht, diese Auswahlphase zu unterstützen. (Rommelfanger, Eickemeier, 2013)

### **2.3.3 Multikriterielle Entscheidungen**

Der Alltag ist von Entscheidungen mit unterschiedlichster Tragweite geprägt. Wenn die Folgen einer Entscheidung andere Menschen oder noch weitreichender die Bevölkerung, Natur oder Wirtschaft betreffen, wird es notwendig, den Entscheidungsprozess systematisch anzugehen und eine Entscheidung strukturiert herbeizuführen. So ist im Infrastrukturmanagement eine Vielzahl von Investitionsentscheidungen notwendig, die nicht ausschließlich auf Grundlage finanzieller Kriterien getroffen werden. Der Umfang von Verkehrsbeeinträchtigungen bei einem Ausfall des Bauwerks, Folgen für die Umwelt oder Aspekte des Bevölkerungsschutzes werden gleichermaßen berücksichtigt. Der Entscheidungsträger (ET) benötigt Informationen über mögliche Alternativen, zur Zielsetzung und zu möglichen Konsequenzen, die eine Entscheidung nach sich zieht. Die Informationen ermöglichen es, unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien die Alternative auszuwählen, mit der das gesetzte Ziel erreicht werden kann oder die dem Ziel zumindest am nächsten kommt.

Die Multikriterielle Entscheidungsanalyse unterstützt die Strukturierung und Lösung von Problemen, bei denen nach mehr als einem Kriterium aus unterschiedlichen Bereichen entschieden werden soll. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt unter Berücksichtigung mehrerer relevanter Konsequenzen und ist Grundlage oder Handlungsempfehlung für wichtige Entscheidungen. Dabei sollen die Präferenzen des ET bestmöglich berücksichtigt und systematisch zwischen den vorhandenen Alternativen abgewogen werden. (Geldermann, Lerche, 2014; Majumder, 2015)

Die heutige Forschung zur Decision Analysis baut wesentlich auf der Subjectivly-Expected-Utility-Theorie (SEU-Theorie) auf, die in den frühen 1930er Jahren entwickelt wurde (Greco et al., 2016). Diese Theorie besagt, dass für den Entscheidungsträger der subjektiv erwartete Nutzen einer Konsequenz maßgeblich relevant ist (Spektrum, 2000). Dies wird dann deutlich, wenn es um die Interpretation von Entscheidungen geht, da es aufgrund des subjektiv erwarteten Nutzens auch nur eine subjektiv „beste“ Entscheidung gibt. Der ET versucht bei einer Entscheidung, seinen Nutzen mit den ihm vorliegenden und teilweise subjektiven Informationen zu maximieren. Die vorhandenen Alternativen werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften systematisch miteinander verglichen, sodass die Alternative mit dem größten Nutzen gewählt werden kann.

Die Ergebnisse der Methoden der MCDA sind als Handlungsempfehlung zu verstehen, die der Anwender für seine Entscheidung nutzen kann. Die Herausforderung liegt darin, möglichst „gute“ Empfehlungen abzugeben. Um eine solche „gute“ Empfehlung zu erhalten, muss aus einer Vielzahl von Methoden die für die Fragestellung passende ausgewählt werden. Das grundsätzliche Verfahren ist bei der MCDA nicht verbindlich festgeschrieben und kann je nach Anwendungsfall angepasst und je nach Detailtiefe in einzelne Schritte unterteilt werden. Häufig werden folgende Schritte in den Methoden zur Entscheidungsfindung genannt (DCLG, 2009; Geldermann, Lerche, 2014; Mukherjee, 2017; Opricovic, Tzeng, 2004):

- Definition des Entscheidungsproblems,
- Identifikation und Ausgestaltung der Alternativen,
- Ermittlung des Zielsystems,
- Offenlegung der Kriterien und ggf. Darstellung in einer Hierarchie,
- Bestimmung der Ausprägungen der Kriterien bei den einzelnen Alternativen,
- Beschreibung der Präferenzen und Wertefunktionen,
- Festlegung der subjektiven Gewichtung der Kriterien,
- Aggregation mittels der gewählten Methode und Festlegung einer Rangfolge sowie
- Durchführung einer Sensitivitätsanalyse und Beurteilung der Ergebnisse.

Zusammenfassend betrachtet, unterstützen alle Methoden der MCDA den Entscheidungsträger bei der Informationsoffenlegung und -verarbeitung, bei der Problemstrukturierung sowie bei der Integration sowohl qualitativer als auch quantitativer Daten. Mit ihnen soll jedoch nicht eine Entscheidungsfindung automatisiert oder dem Entscheidungsträger die Entscheidung einschließlich der damit verbundenen Verantwortung abgenommen werden (Geldermann, Lerche, 2014).

### 2.3.3.1 Elemente multikriterieller Entscheidungsproblem

Eine systematische Auseinandersetzung mit der Problemstellung steigert nicht nur die Transparenz, sondern erschließt möglicherweise auch neue, bislang nicht bedachte Aspekte eines Entscheidungsproblems (Geldermann, Lerche, 2014). Darüber hinaus können mehrere Kriterien unterschiedlicher Bereiche berücksichtigt werden, sodass im Ergebnis eine Bewertung der Handlungsoptionen unter Einbeziehung mehrerer, relevanter Konsequenzen erfolgt, was die Grundlage bzw. Handlungsempfehlung für wichtige Entscheidungen ist. Ein Entscheidungsproblem besteht nach Geldermann und Lerche (2014) aus fünf Elementen:

- Die *Alternativen* sind die Wahlmöglichkeiten für eine Lösung des Entscheidungsproblems, sie schließen sich gegenseitig aus. Je nach Art des Entscheidungsproblems ist Unterlassen, also Nichtstun, auch eine Handlungsoption oder es werden im Prozessverlauf neue Alternativen generiert. Die Alternativen lassen sich mit charakteristischen und entscheidungsrelevanten Merkmalen beschreiben, die für alle Alternativen prüfbar sein müssen.
- Das *Zielsystem* unterscheidet sich vom Ist-Zustand, es ist messbar, erreichbar und eindeutig formuliert. Ggf. sind mehrere, konkurrierende Ziele möglich und es können Ober- und Unterziele formuliert werden.
- Die *Kriterien* dienen zur Prüfung der Zielerreichung und bei mehreren Zielen werden demzufolge mehrere unterschiedliche Kriterien berücksichtigt. Eine hierarchische Darstellung kann das Problemverständnis zusätzlich verbessern. Konkretisiert werden die Kriterien mit messbaren Attributen, deren Werte der Kriterienausprägung entsprechen.
- Die *Präferenzen* des Entscheidungsträgers bilden in Kombination mit der Kriteriengewichtung die Grundlage für die spätere Rangfolge der Alternativen. Die Präferenzen repräsentieren die Einschätzung der Konsequenzen durch den Entscheidungsträger und gehen mit den Alternativen einher. Unterschieden werden die strikte Präferenz, die Indifferenz, die Präferenz, die schwache Präferenz und die Unvergleichbarkeit. In Abhängigkeit von der Methode gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Präferenzen abzubilden. Die Präferenz ist die Bewertungsgrundlage für die Ermittlung einer Rangfolge der untersuchten Alternativen.
- Die *Kriteriengewichtung* ermöglicht die Integration etwaiger subjektiver Einschätzungen, wie wichtig ein Kriterium hinsichtlich des Gesamtproblems eingestuft wird. Auch hier zeigen die Methoden eine große Bandbreite. Sensitivitätsanalysen dienen dem Verständnis der Auswirkung der einzelnen Gewichtungen.

### 2.3.3.2 Klassifizierung multikriterieller Entscheidungsprobleme

In Abhängigkeit von den Eigenschaften eines Entscheidungsproblems erfolgt eine Eingrenzung und schließlich die Auswahl der Methoden, welche für die Lösung geeignet sind. Geldermann (2005), Laux (2005) und Westphal (2016) benennen mehrere charakteristische Merkmale für eine Klassifizierung multikriterieller Entscheidungsprobleme, anhand derer das Entscheidungsproblem der vorliegenden Arbeit eingeordnet wird.

- *Alternativen bzw. Art des Lösungsraums*: Hierbei werden das MODM (Multi Objective Decision Making) und das MADM (Multi Attribute Decision Making) unterschieden. Beim MODM wird

aus einer stetigen Menge an Alternativen (implizite Erfassung von Alternativen) mittels mathematischer Verfahren die optimale Lösung ermittelt. Beim MADM erfolgt sowohl ein Vergleich innerhalb einer diskreten Menge Alternativen als auch die Auswahl der bestmöglichen der realisierbaren Alternativen. Bei den Verkehrswasserbauwerken handelt es sich um einen diskreten Lösungsraum und somit um den Bereich des MADM.

- *Anzahl der gleichzeitig verfolgten Ziele:* Zur Anwendung kommen meist Modelle mit nur einer Zielgröße. Reale Entscheidungsprobleme zeichnen sich hingegen oft durch mehrere Zielgrößen aus, die in einem komplementären, indifferenten oder konkurrierenden Verhältnis stehen können. Die Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke erfolgt unter Berücksichtigung der Schadensminimierung für Bevölkerung, Umwelt und Wirtschaft und verfolgt somit mehrere Ziele.
- *Einordnung nach der Zeitperiode:* Unter zeitlichen Aspekten lassen sich statische und dynamische Entscheidungsmodelle unterscheiden. Bei Letzteren sind ein oder mehrere Parameter mit der Zeit veränderlich und mehrstufige Modelle integrieren zum Beispiel Wechselwirkungen zwischen gegenwärtigen und zukünftigen Aktionen. Bei der Modellierung und Simulation bleiben die Parameter innerhalb der untersuchten Szenarien unverändert, sodass es sich um ein statisches Entscheidungsmodell handelt.
- *Unterscheidung nach Umweltzuständen:* Der Zustandsraum beschreibt den nicht beeinflussbaren Zustand der zukünftigen Umwelt. Die Bewertung der Ergebnisse einer konkreten Entscheidung ist von den Informationen zu den jeweiligen Umweltzuständen abhängig. Das Vorliegen vollkommener Information entspricht einer Entscheidung unter Sicherheit. Dem stehen Entscheidungen unter Unsicherheit gegenüber, bei denen unterschieden wird, ob die Unsicherheit bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit der Umweltzustände oder bezüglich der Daten über die Umweltzustände besteht. Sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt, handelt es sich um eine Entscheidung unter Risiko, anderenfalls unter Ungewissheit. Besteht die Unsicherheit bezüglich der Daten, da diese nicht genau erfasst werden können, liegt Unschärfe vor. Bei unvollständigen oder fehlenden Daten ist Unvollständigkeit gegeben. Da die Eintrittswahrscheinlichkeit für zukünftige Entwicklungen nicht bekannt ist, handelt es sich um eine Entscheidung unter Ungewissheit. Die notwendigen Daten können teilweise nicht genau erfasst werden und liegen zum Teil unvollständig vor, so dass sowohl Unschärfe als Unvollständigkeit bezüglich der Daten gegeben sind.
- *Anzahl der Entscheidungsträger:* Eine weitere Differenzierung kann anhand der Anzahl Personen vorgenommen werden, die an der Entscheidung beteiligt sind. Bei einer Individualentscheidung gibt es einen Entscheidungsträger. Bei mehreren Entscheidungsträgern handelt es sich um eine Gruppenentscheidung. Da an dieser Stelle jedoch weniger der Prozess der Entscheidungsfindung, sondern vielmehr das Ergebnis für die Instandhaltungsplanung im Vordergrund steht, wird die WSV als Entscheidungsträger als Einzelperson betrachtet.

In Tabelle 9 sind die Felder entsprechend der vorgenommenen Einordnung des Entscheidungsproblems dieser Arbeit hellgrau markiert.

Tabelle 9: Klassifizierungsmöglichkeiten für Entscheidungsprobleme (Geldermann, 2005)

Variable	Ausprägung			
Alternativen	diskreter Lösungsraum	stetiger Lösungsraum		
Ziele	ein Ziel	mehrere Ziele		
Zeit	statisch	dynamisch		
		einstufig	mehrstufig	
Umweltzustände	Sicherheit	Unsicherheit		
		Ungewissheit	Risiko	Unschärfe
Entscheidungsträger	Einzelperson	Gruppe		

### 2.3.3.3 Auswahl einer Methode der MCDA

Um eine Handlungsempfehlung zu erhalten, muss zuvor aus einer Vielzahl von Methoden die für die Fragestellung passende ausgewählt werden, was in der Praxis häufig die eigentliche Schwierigkeit darstellt (Guitouni, Martel, 1998). Eine Eingrenzung der in Frage kommenden Methoden kann, wie in Abschnitt 2.3.3.2 beschrieben, über den Lösungsraum erfolgen. Die für diese Arbeit grundsätzlich zur Auswahl stehenden Methoden können in einem ersten Schritt über den Lösungsraum eingegrenzt auf das MADM beschränkt werden (siehe Abbildung 18, hellgrau markiert).

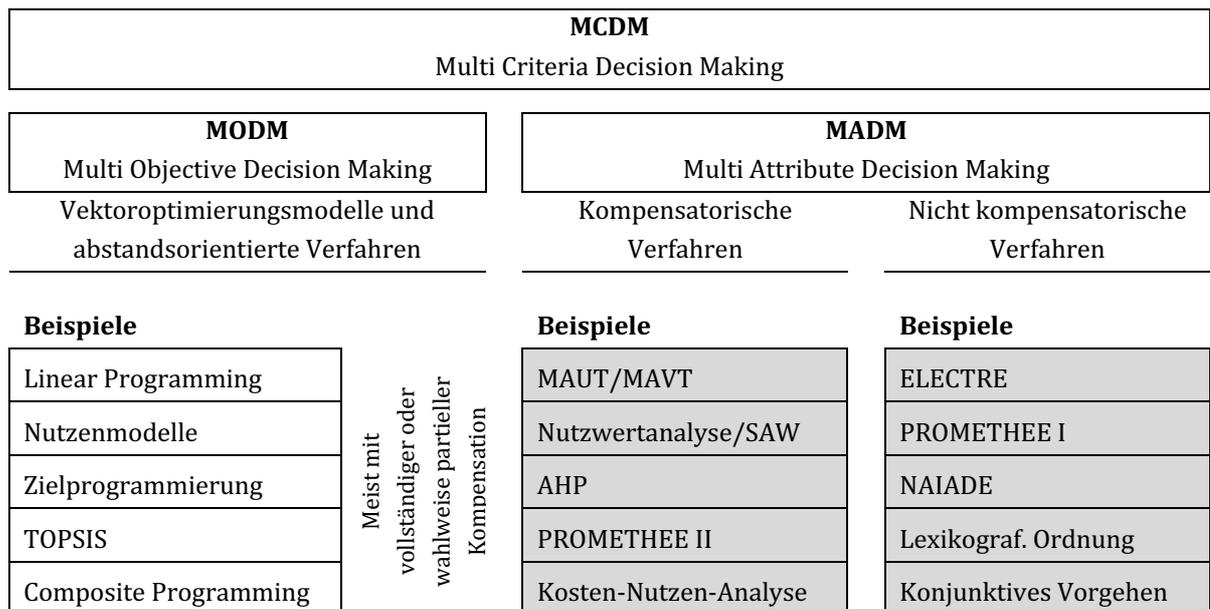


Abbildung 18: Auswahl von Verfahren des Multi Criteria Decision Making (Ruhland, 2004)

Einen weiteren Ansatz, die für die Verkehrswasserbauwerke relevanten MADM-Verfahren zu klassifizieren, zeigt Westphal (2016). In Abhängigkeit von Art und Qualität der verfügbaren Informationen schlägt er die jeweils infrage kommende Gruppe von Verfahren vor. Im vorliegenden Anwendungsfall liegen quantitative Daten vor (kardinale Informationen). Die Gruppe der Verfahren, die aufgrund dieser Einteilung für eine Priorisierung der Bauwerke für die Instandhaltungsplanung verwendet werden können, ist in Tabelle 10 hellgrau markiert.

Tabelle 10: Klassifikation der MADM-Verfahren (Westphal, 2016)

Informationen	Qualität der Information	Gruppe von Verfahren (Beispiele)
Informationen über die Attribute vorhanden	Anspruchsniveau	Disjunktives Vorgehen Konjunktives Vorgehen
	Ordinale Information	Lexikographische Ordnung Halbordnung Aspektweise Elimination Permutationsmethode ORESTE
	Kardinale Information (MADM-Verfahren)	ELECTRE PROMETHEE TOPSIS Nutzwertanalyse AHP
	Substitutionsraten	MAUT Hierarchische Substitutionsratenmethode
Keine Informationen vorhanden	-	Maximin-Strategie Maximax-Strategie

Eine weitere Möglichkeit zeigen Polatidis et al. (2006) mit einer Klassifizierung der Methoden anhand ihrer Funktionsweise und wichtiger Eigenschaften bzw. Anforderungen (siehe Abbildung 19). Mit der Klasse der Outranking-Methoden (Engl.: Outranking Methods, auch Prävalenzverfahren) werden jeweils zwei Alternativen bezüglich eines Kriteriums verglichen und entweder mit strikter Präferenz oder Indifferenz bewertet. Im Vorfeld definierte Schwellenwerte trennen beide Bereiche voneinander. Abschließend werden die Einzelwerte der Kriterien für jede Alternative summiert, wodurch die beste Alternative ermittelt werden kann (Nitzsch, 1992). Die Präferenzen müssen vorab nicht eindeutig bekannt sein, sondern werden mithilfe der jeweiligen Methode ermittelt und es kann eine mögliche vollständige Kompensation zwischen Kriterien vermieden werden. Im Gegensatz dazu untersuchen und vergleichen die Klasse der klassischen oder auch nutzenbasierten Methoden (Engl.: Utility-Based Models, auch Multiattributive Bewertungsverfahren) den jeweiligen Nutzen von Alternativen. Jeder Alternative wird über die vollständige und problembezogene Modellierung der Präferenzstruktur ein Nutzenwert zugeordnet. Nach Anwendung der Aggregationsvorschrift wird der höchste Nutzenwert und damit die optimale Alternative be-

stimmt. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich hauptsächlich in der Ermittlung der Einzelwerte und der Zielgewichte (Nitzsch, 1992). Voraussetzung für die Anwendung dieser Methoden sind eindeutig formulierbare Präferenzen (eine Ausnahme ist hier die Methode AHP) und die Unabhängigkeit der Kriterien (Geldermann, Lerche, 2014). Beide Klassen sind dazu geeignet, diskrete Mengen von Alternativen zu untersuchen und können den Methoden des MADM zugeordnet werden. Bei stetigen Mengen werden Berechnungsverfahren (Programming Methods) verwendet, die eine unendliche Anzahl Alternativen berechnen und daraus die beste Lösung ermitteln können. Diese Methoden gehören zum MODM. Ferner gibt es zahlreiche weitere Methoden, die zum Teil auf eigenen Ansätzen oder auf einer Mischung anderer Methoden basieren. Für die Fragestellung in der vorliegenden Arbeit sind grundsätzlich sowohl die Outranking-Methoden als auch die nutzenbasierten Methoden geeignet, da es sich bei den Verkehrswasserbauwerken um eine diskrete Menge von Alternativen handelt. Aufgrund der fehlenden Informationen zu den Präferenzen des ET sind die Outranking-Methoden vorteilhafter für die Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung (siehe Abbildung 19, hellgrau markiert), wobei der AHP weiterhin infrage kommt, da für eine Anwendung des AHP keine vorab formulierten Präferenzen notwendig sind.

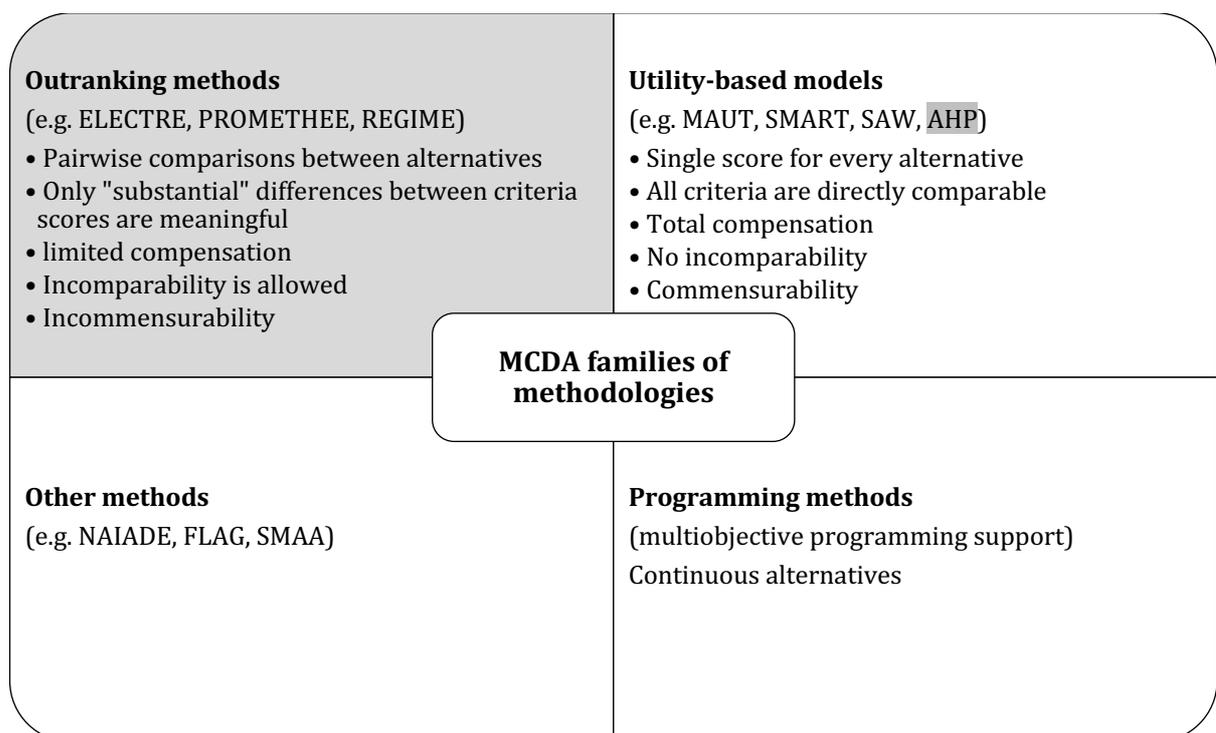


Abbildung 19: Übersicht zu den Methoden der MCDA (Polatidis et al., 2006)

Während die Methoden der MCDA einschließlich ihrer Ergebnisse in der Literatur zum Teil sehr ausführlich beschrieben und miteinander verglichen werden, finden sich nur wenige wissenschaftliche Abhandlungen, die sich mit der gezielten Auswahl einer Methode befassen. Die zuvor

genannten Arbeiten geben einen Überblick, welche Methoden auf Grundlage der vorliegenden Datenstruktur prinzipiell eingesetzt werden können und über welchen Leistungsumfang diese verfügen. Die Wahl einer Methode erfolgt häufig auf Grundlage der vorhandenen technischen Möglichkeiten sowie anhand von Erfahrungsberichten und Beispielberechnungen.

Wenige Arbeiten setzen sich mit der systematischen Auswahl einer Methode der MCDA auseinander. Ein Ansatz zur Methodenwahl wurde von Greene et al. (2011) entwickelt. Grundlage ist der in Abbildung 20 dargestellte Entscheidungsbaum, mit dem eine erste Einschränkung der zur Auswahl stehenden Methoden vorgenommen werden kann. Die Anwendung wird im Folgenden für das Entscheidungsproblem der Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung gezeigt. Da es sich bei den Verkehrswasserbauwerken um eine Menge eindeutig unterscheidbarer Alternativen und somit um einen diskreten Lösungsraum handelt, werden wie eingangs festgestellt die Methoden des MADM (siehe Abbildung 20, hellgrau markiert) gewählt. Die Frage nach einem Trade-off im linken Ast in Abbildung 20 kann positiv beantwortet werden (rechter Pfad), da im vorliegenden Entscheidungsproblem konkurrierende Kriterien herangezogen und abgewogen werden. Ein Trade-off ist eine gegenläufige Abhängigkeit von Kriterien oder Alternativen (Cambridge University Press, 2014). Im vorliegenden Anwendungsfall können bspw. wirtschaftliche Interessen und Interessen des Bevölkerungsschutzes konkurrierend auftreten. Die Frage, ob es sich um eine große Anzahl Alternativen handelt, erscheint zunächst unkonkret. Greene et al. (2011) machen die wählbare Größe des Datensatzes in erster Linie von der Rechenleistung bzw. dem verwendeten Algorithmus abhängig. Eigene Beispielberechnungen zeigen, dass die Berechnung mit dem entwickelten MS Excel-Tool für den vorliegenden Datensatz der 245 Wehranlagen möglich ist, so dass der zu wählende, linke Pfad zu den Gewichtungsmethoden und Kompensationsmethoden bzw. den Outranking-Methoden führt (siehe Abbildung 20, hellgrau markiert).

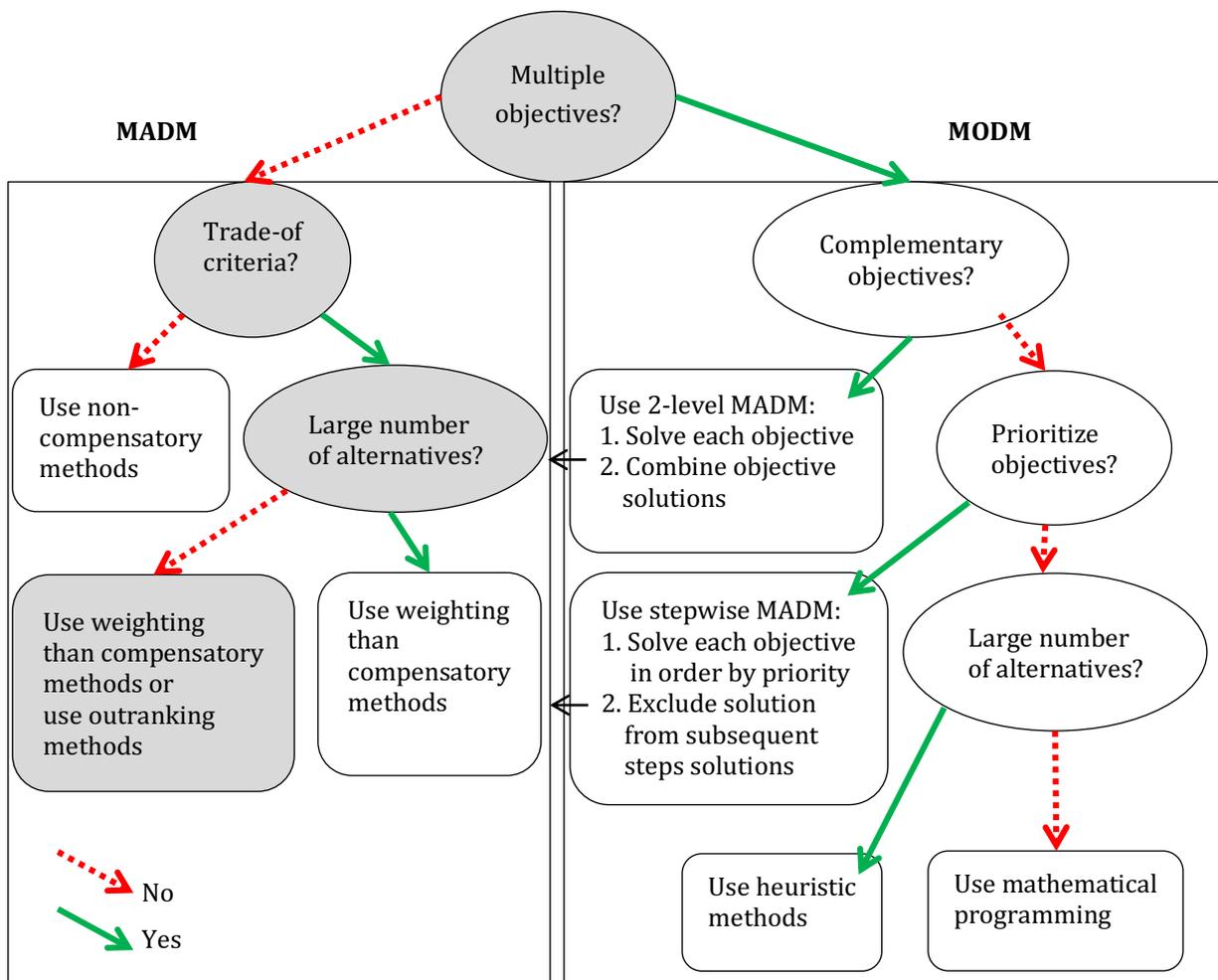


Abbildung 20: Entscheidungsbaum für die Auswahl von Methoden der MCDA (Greene et al., 2011)

Zu den Weighting Methods oder auch Gewichtungsmethoden gehören nach Greene et al. (2011) alle Methoden, die eine Gewichtung der Kriterien vornehmen, was von einem einfachen Ranking über ein Rating bis hin zu einer Trade-off Analyse reicht. Eine Besonderheit ist der Analytic Hierarchy Process (AHP), bei dem die Gewichtung in die Methode integriert ist. Als Compensatory Methods oder auch als Kompensationsmethoden werden die Methoden bezeichnet, bei denen weniger attraktive Attribute einer Alternative durch gute Ausprägungen bei anderen Attributen derselben Alternative ausgeglichen werden können (Majumder, 2015). Dazu gehören z. B. der AHP, die Weighted Linear Combination, das Fuzzy Additive Weighting und der Ordered Weighted Average. Outranking Methoden wie ELECTRE oder PROMETHEE arbeiten mit paarweisen Vergleichen zwischen den Alternativen, wobei die Präferenz einer Alternative gegenüber einer anderen oder die Indifferenz bewertet werden. Nur eine mögliche Aversion gegenüber einer Alternative wird nicht berücksichtigt (Greene et al., 2011).

Eine weitere Hilfestellung zur Auswahl einer geeigneten Methode der MCDA bieten die *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method* von Guitouni und Martel (1998). Die Guidelines umfassen sieben Leitfragen, welche die Ziele, die Datenstruktur und die Präferenzen des

Anwenders abfragen. Hintergrund der Guidelines ist ein Modell zu den Methoden der MCDA (siehe Abbildung 21), bei dem die Multiple Criteria Aggregation Procedures (MCAP) den Kern der jeweiligen Methode ausmachen und als mathematischer und algorithmischer Hintergrund der Methode verstanden werden können (Guitouni, Martel, 1998). Die Abfrage des Anwenders verfolgt das Ziel, seine Anforderungen mit den MCAP der unterschiedlichen Methoden systematisch zu vergleichen und daraufhin eine Empfehlung für eine oder mehrere geeignete Methoden zu geben.

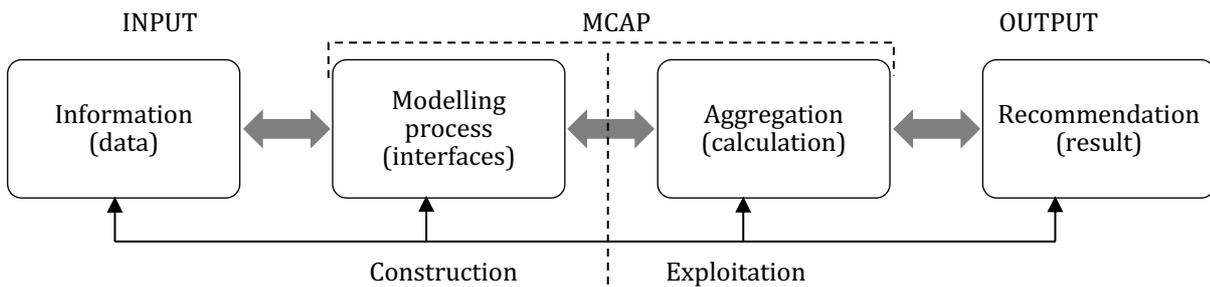


Abbildung 21: Modell der Methoden der MCDA (Guitouni, Martel, 1998)

Die sieben Leitfragen G1 bis G7 werden nachfolgend kurz vorgestellt und die Fragestellungen auf das Entscheidungsproblem bei der Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung unmittelbar angewandt.

- *„Guideline G1: Determine the stakeholders of the decision process. If there are many decision makers (judges), one should think about group decision making methods or group decision support systems (GDSS).“* (Guitouni, Martel, 1998:512) Die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) ist der Entscheidungsträger (Engl.: Decision Maker, DM) bei der Auswahl von Investitionsprojekten, wobei die Entscheidungen zuvor mit dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und den einzelnen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern bzw. den Wasserstraßen-Neubauämtern abgestimmt werden. Nachfolgend wird die Annahme getroffen, dass es sich um einen einzelnen Entscheidungsträger handelt, sodass zunächst alle Methoden für das Entscheidungsproblem geeignet bleiben.
- *„Guideline G2: Consider the DM ‚cognition‘ (Decision Makers way of thinking) when choosing a particular preference elucidation mode. If he is more comfortable with pairwise comparisons, why using tradeoffs and vice versa?“* (Guitouni, Martel, 1998:512) Da es sich bei den Verkehrswasserbauwerken um eine eher große Anzahl Alternativen handelt, wird für die vorliegende Arbeit angenommen, dass paarweise Vergleiche grundsätzlich für eine größere Transparenz sorgen und somit eine Anwendung der Outranking-Methoden vorteilhafter ist.
- *„Guideline G3: Determine the decision problematic pursued by the DM. If the DM wants to get an alternative rating, then a ranking method is appropriate, and so on.“* (Guitouni, Martel, 1998:512) Wie in der Zielsetzung bereits erwähnt wurde, soll die Anwendung der MCDA zu einer Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung führen. Da-

für wird bevorzugt ein Rating, zumindest aber ein Ranking resp. eine Rangfolge der verschiedenen Bauwerke für die Entscheidungsfindung benötigt. Für die Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke sind bezüglich dieses Kriteriums sowohl die nutzenbasierten als auch die Outranking-Methoden geeignet.

- *„Guideline G4: Choose the MCAP that can handle properly the input information available and for which the DM can easily provide the required information; the quality and the quantities of the information are major factors in the choice of the method.“* (Guitouni, Martel, 1998:512) Die verwendeten Informationen zum Bauwerksbestand umfassen die Daten zur Anzahl Personen im jeweiligen Untersuchungsgebiet, zur Größe von Flächen mit bestimmter Nutzungsart und zu den Kosten durch eine Verkehrsunterbrechung sowie die Höhe einer Schwallwelle nach einem Bauwerksversagen (siehe Abschnitt 3.2.2). Bei einer Veränderung der Eingangsdaten, bspw. aufgrund einer Erweiterung auf Bauwerke anderer OUGr, sollte die Methode dennoch anwendbar bleiben. Somit ist die Möglichkeit der Verarbeitung quantitativer als auch qualitativer Daten bei der Auswahl einer Methode der MCDA maßgeblich, was sowohl bei den Outranking-Methoden als auch bei den nutzenbasierten Methoden gegeben ist.
- *„Guideline G5: The compensation degree of the MCAP method is an important aspect to consider and to explain to the Decision Maker. If he refuses any compensation, then many MCAP will not be considered.“* (Guitouni, Martel, 1998:512) Für die Auswahl einer Methode zur Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke wird für die vorliegende Arbeit angenommen, dass der GDWS als Betreiber eines öffentlichen Verkehrsinfrastruktursystems eine vollständige Kompensation von Kriterienausprägungen vermeiden möchte, um die unterschiedlichen Interessengruppen gleichermaßen zu berücksichtigen. Dementsprechend sollte eine der Outranking-Methoden gewählt werden.
- *„Guideline G6: The fundamental hypothesis of the method are to be met (verified), otherwise one should choose another method.“* (Guitouni, Martel, 1998:512) Die 29 in einer Studie von Guitoni und Martel (1997) untersuchten und verglichenen Methoden unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer Annahmen und Hypothesen, die die Anwendungsmöglichkeiten einschränken können:
  - Independence (Unabhängigkeit)
  - Commensurability (Angemessenheit/Verhältnismäßigkeit)
  - Invariance (Invarianz)
  - Transitivity (Transitivität)
  - Dominance (Dominanz)
  - Coalition (Koalition)Guitoni und Martel (1997) haben festgestellt, dass diese Einschränkungen bei der Auswahl einer Methode oft außer Acht gelassen werden. Da für die untersuchten Methoden von Guitoni und Martel (1997) jedoch nicht näher auf die Vorgehensweise zur Prüfung der Hypothesen eingegangen wird und auch keine vertiefenden Übersichtsarbeiten zur Beantwortung dieser Fragestellung verfügbar sind, kann für die Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke hinsichtlich dieses Kriteriums keine weitere Einschränkung der Methoden vorgenommen werden.
- *„Guideline G7: The decision support system coming with the method is an important aspect to be considered when the time comes to choose a MCDA method. It is easy to use a decision aid package*

*and in many cases people choose the software without understanding the procedure. It happens that the suitable MCDA method is not implemented in a DSS. To overcome this problem, it is important to go forward by developing user friendly decision aid packages which implement a variety of MCDA methods."* (Guitouni, Martel, 1998:512) Bereits im Jahr 1997 wurde für mehr als die Hälfte der von Guitoni und Martel untersuchten Methoden eine Softwarelösung angeboten, sodass grundsätzlich ein Großteil der Methoden zur Anwendung kommen kann. Ziel der vorliegenden Arbeit ist jedoch die Entwicklung einer Methode, die mit verfügbaren Daten und Programmen umsetzbar ist. Die Anwendung soll mit MS Excel oder OO Calc realisiert werden können, sodass die Methode einem breiten Anwenderkreis offensteht. Zudem vereinfachen diese Formate eine weitere Verwendung der Daten.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse aus der Untersuchung der Tentative Guidelines in Tabelle 11 zeigt, dass nach dem Abgleich mit den Eigenschaften des Entscheidungsproblems der vorliegenden Arbeit die Methoden der MCDA durch die Guidelines G1, G6 und G7 nicht eingegrenzt werden. Gemäß den Guidelines G3 und G4 sind sowohl die nutzenbasierten Methoden als auch die Outranking-Methoden für das Entscheidungsproblem dieser Arbeit geeignet. Die Guidelines G2 und G5 schränken die Methoden der MCDA für diese Arbeit schließlich auf die Outranking-Methoden ein (siehe Tabelle 11, hellgrau markiert).

Tabelle 11: Eingrenzung der Methoden der MCDA (Eigene Darstellung)

<b>Guideline</b>	<b>Alle Methoden der MCDA</b>	<b>Outranking- Methoden</b>	<b>Nutzenbasierte Methoden</b>
G1	X	X	X
G2		X	
G3		X	X
G4		X	X
G5		X	
G6	X	X	X
G7	X	X	X

Auch Geldermann (1999) spricht sich für die Outranking-Methoden aus, wenn der Entscheidungsträger seine Präferenzen bezüglich der Kriterien nicht explizit formulieren kann und Unterstützungsbedarf bei der Strukturierung des Problems besteht. Darüber hinaus sind die Outranking-Methoden nach Geldermann (1999) für eine große Anzahl Alternativen oder auch deren Kondensierung auf relevante Alternativen geeignet, wie zum Beispiel die Methoden ELECTRE und PROMETHEE II. Nachteil der Methode ELECTRE ist die Beschränkung auf den linearen Präferenzvergleich. Das Verfahren der Methode PROMETHEE II ähnelt bei strenger Präferenz oder Indifferenz der Methode ELECTRE, ist jedoch zusätzlich in der Lage, leichte Präferenzen abzubilden (Geldermann, 1999). Für die vorliegende Arbeit wird final die Methode PROMETHEE II gewählt, um die Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung zu priorisieren. Die detaillierte

Beschreibung der Methode findet sich im Zusammenhang mit ihrer Anwendung und der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 3.3.

#### **2.3.4 Zusammenfassung**

Systeme zur Entscheidungsunterstützung sind Werkzeuge, welche die Zusammenführung und Auswertung größerer Datenmengen und die Verwendung von Modellen unterstützen, sodass auch umfangreiche Probleme anforderungsgerecht gelöst werden können. Dabei steht die transparente und reproduzierbare Entscheidungsfindung im Vordergrund. Ein wesentlicher Vorteil der EUS ist die Zeitersparnis. Das Konzept der EUS wird vollständig mit dem in Abschnitt 3 entwickelten Planungsinstrument umgesetzt.

Einer Entscheidung geht ein Prozess voraus, der aus mehreren, sich teilweise wiederholenden Phasen besteht. Diese sind die Problemerkennung und Zielformulierung, die Informationsgewinnung und -verarbeitung, die Erarbeitung und Bewertung von Handlungsalternativen und möglichen Konsequenzen und schließlich die Auswahl einer Alternative, deren Implementierung und Kommunikation. In Ergänzung zum beschriebenen Entscheidungsprozess, soll jedoch nicht nur ein Verkehrswasserbauwerk als beste Alternative ausgewählt werden, sondern es werden für alle Bauwerke Prioritätswerte berechnet. So können sie innerhalb unterschiedlicher Zeitperioden gemäß ihrer Prioritätswerte in der Instandhaltungsplanung platziert werden (Abschnitt 3.4.2.1).

Grundelemente eines Entscheidungsproblems sind die zur Auswahl stehenden Alternativen, das Zielsystem, die Kriterien zur Prüfung der Zielerreichung, die Präferenzen des Entscheidungsträgers und die Gewichtung der Kriterien. Entscheidungsprobleme können darüber hinaus anhand charakteristischer Merkmale wie z.B. Art des Lösungsraums, Anzahl gleichzeitig verfolgter Ziele, Einordnung nach Zeitperiode, Informationen zu zukünftigen Umweltzuständen und Anzahl Entscheidungsträger klassifiziert werden. Diese Charakteristik eines Entscheidungsproblems ist maßgeblich für die Eignung der verschiedenen Methoden der MCDA für das jeweilige Entscheidungsproblem. Mithilfe unterschiedlicher Prozeduren wurde die Charakteristik der Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke als Entscheidungsproblem untersucht und die in Frage kommenden Methoden systematisch eingegrenzt. Final wurde für das Entscheidungsproblem dieser Arbeit die Outranking-Methode PROMETHEE II als geeignet identifiziert (siehe Abschnitt 3.3).



### 3 Risiko-basierte Priorisierung und Entscheidungsunterstützung

#### 3.1 Spezifizierung des Risikobegriffs

Aufgrund der unterschiedlichen Objektarten und der Aufgabenvielfalt sind verschiedenartige Versagensszenarien und -folgen möglich. Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, existieren keine Informationen zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses oder Ergebnisse aus Risikobeurteilungen für die Verkehrswasserbauwerke des Bundes, sodass eine quantitative Bestimmung der Risiken nicht möglich ist.

Um dennoch potenzielle Versagensfolgen in die Priorisierung der Bauwerke für die Instandhaltungsplanung zu integrieren, wird das allgemeine Risikoverständnis aus Abschnitt 2.1.1 in Anlehnung an das Konzept des CEDIM (siehe Abbildung 10) für die Anforderungen im Infrastrukturmanagement angepasst, indem die Komponenten *Ereignis* und *Werte* (Schadensausmaß) um die Komponente *System* erweitert werden. Diese Erweiterung ermöglicht eine risiko-basierte Analyse, bei der das Schadensausmaß nicht nur von einem Ereignis und der Art der Werte, sondern auch von zum Beispiel den spezifischen Eigenschaften eines Bauwerks abhängt. Die Priorisierung von Bauwerken für die Instandhaltungsplanung (siehe Abschnitt 3.3) basiert in der vorliegenden Arbeit somit auf einem Risikokonzept, welches die drei Grundelemente Ereignis – System – Werte umfasst. Diese Spezifikation basiert auf der Annahme, dass einem Risikoszenario eine Prozesskette zugrunde liegt, d. h. eine zeitliche Abfolge von verschiedenen Elementen. Die Elemente dieser Prozesskette und ihre Abfolge werden mithilfe der Abbildung 22 veranschaulicht. Dabei symbolisieren die Pfeile, dass der „Output“ eines Elementes der Prozesskette zum „Input“ für das nachfolgende Element wird.

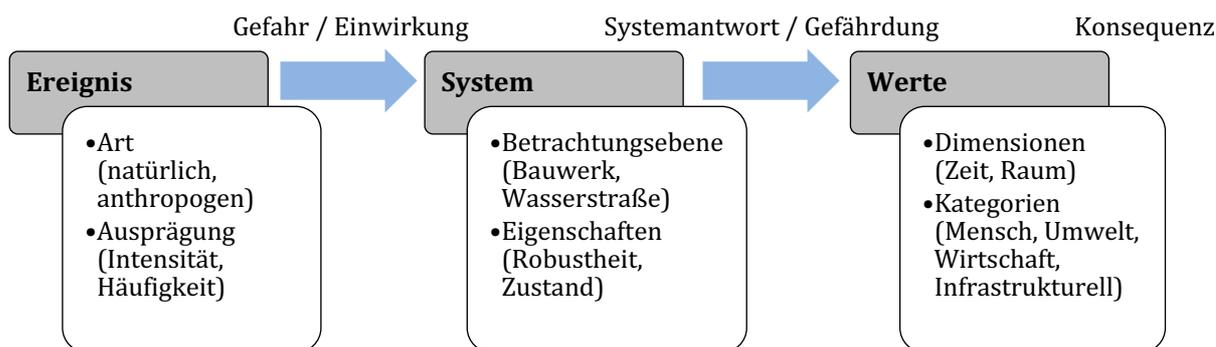


Abbildung 22: Der spezifizierte Risikobegriff (Eigene Darstellung)

Startpunkt der Prozesskette ist ein auslösendes Ereignis, das natürlichen Ursprungs sein kann wie z.B. Extremwetterereignisse, anthropogenen Ursprungs wie menschliches oder technisches Versagen aber auch vernachlässigte Instandhaltung. Charakterisiert wird das Ereignis durch seine Intensität und die Häufigkeit seines Auftretens. Ein Ereignis kann plötzlich auftreten, sich aber

auch langsam „einschleichen“ und sein eigentlicher Beginn lange unbemerkt bleiben. Die Charakterisierung dieser Ereignisse ist bspw. bei der Bemessung von Verkehrswasserbauwerken von großer Bedeutung. Für Bestandsbauwerke sind zudem Ereignisse von Bedeutung, wenn sich zum Beispiel daraus Veränderungen der Eingangsgrößen einer Nachweisführung für z.B. der Standsicherheit ergeben würden (siehe Abschnitt 2.2.1.1). Die aus dem Ereignis resultierende Gefahr wird zu einer Einwirkung auf das System.

Das System kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung ein Verkehrswasserbauwerk, aber auch ein Wasserstraßenabschnitt sein. Charakteristische Eigenschaften sind z.B. der Zustand, das Alter oder die Robustheit. Auch die Vulnerabilität im Sinne der Darstellungen des CEDIM (siehe Abbildung 10) gehört zu den Eigenschaften eines Systems. Die Charakteristik des Systems beeinflusst die Art und das Ausmaß der Reaktion auf eine bestimmte Einwirkung. Diese Reaktion entspricht der Systemantwort, welche in Bezug zu den Werten zu einer Gefährdung wird.

Bei den Werten handelt es sich um Schutzgüter wie Menschen, die natürliche und die künstliche Umwelt. Auch nicht physische Vorgänge wie wirtschaftliche Aktivitäten zählen zu den Werten. Die Dimensionen Zeit (kurz-, mittel- oder langfristig) und Raum (z.B. in direkter Umgebung vom Objekt oder außerhalb des Wirkungsradius) bilden in der Regel das Grundgerüst für die Untersuchungen zu den Konsequenzen bzw. zum Schadensausmaß (siehe Abschnitt 3.2.1), welche erfasst und bewertet werden. Diese Ergebnisse können als Datengrundlage für ein Risikomanagement dienen, sodass wie beim Ansatz des BBK ein zyklischer Prozess entsteht (siehe Abschnitt 2.1.3.1).

Nach diesem Verständnis entsteht eine Risikosituation erst dann, wenn ein Ereignis auf ein System einwirkt und die so hervorgerufene Systemantwort zu einer Gefährdung der Werte im Wirkungsradius des auslösenden Ereignisses und des reagierenden Systems wird (siehe Abschnitt 2.1.3.2). Der wesentliche Vorteil dieser Dreiteilung besteht darin, dass dieses Schema bspw. nicht nur die Vulnerabilität der Werte als Eigenschaft untersucht, sondern in Abhängigkeit vom Untersuchungsziel auch Systemeigenschaften wie z.B. der Bauwerkszustand berücksichtigt werden können. Wenn zu einem späteren Zeitpunkt konkrete Werte für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses angegeben werden können, genügt der für die vorliegende Arbeit spezifizierte Risikobegriff weiterhin der formalen Beschreibung des Risikos und der üblicherweise angewandten Formel zur quantitativen Bestimmung des Risikos (siehe Abschnitt 2.1.1).

## 3.2 Ex-ante-Schadensanalyse und Ableitung von Indikatoren

### 3.2.1 Zeitliche und räumliche Strukturierung der Konsequenzklassen

Ausgangspunkt für die nachfolgenden Untersuchungen ist die Fragestellung, welche Ereignisse grundsätzlich auftreten und welche Folgen diese Ereignisse nach sich ziehen können. Abbildung 23 skizziert das Ergebnis eigener Untersuchungen und von Interviews mit Experten der BAW am Beispiel der Objektgruppe Wehranlagen. In der linken Spalte „Auslösendes Ereignis“ wurden sowohl Naturgefahren als auch Ereignisse technischen und menschlichen Ursprungs zusammengestellt, die beim System Wehranlage verschiedene Prozesse resp. Systemantworten in Gang setzen können. Das Attribut „kurzfristig“ beschreibt Ereignisse, nach deren Eintreten in der Regel zeitnah mit entsprechenden Folgen gerechnet werden muss. Das Attribut „langfristig“ beschreibt Ereignisse, bei denen es Jahre oder Jahrzehnte dauern kann, bis erkennbare Systemantworten auftreten. Aus der jeweiligen Systemantwort resultieren unterschiedliche Gefährdungen, deren Ausmaß bis zu einem Totalversagen (Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen) führen kann und bestimmte Konsequenzen bewirkt. Deren Ausmaß ist wiederum davon abhängig, ob und welche präventiven oder reaktiven Maßnahmen getroffen werden oder welche räumlich-zeitlichen Faktoren die Exposition beeinflussen.

Ereignis		System	Systemantwort / Gefährdungen	Ausmaß der Gefährdung	Konsequenz		
kurzfristig	Erdbeben	Wehranlage	Beeinträchtigung der äußeren Standsicherheit - Geländebruch - Grundbruch - Kippen - Gleiten	Kein Versagen	Sachschäden		
	Hochwasser						
	Kältewelle		Beeinträchtigung der inneren Standsicherheit - Querkraft - Biegung - Verformung - Bruch		Teilversagen	Irreparable Bauwerksschäden	
	Hitzewelle						
	(Schiffs-)Unfall		Überströmen			Reparable Bauwerksschäden	
	Sabotage, Vandalismus, Terrorismus		Auftrieb				
	Bedienungsfehler		Unterströmen			Personenschäden	
langfristig	Unsachgemäßer Bauwerksentwurf		Kolk	Totalversagen			Volkswirtschaftliche Schäden
	Qualität der Bauausführung		Antriebsprobleme				
	Unzureichende Baugrunduntersuchung		Unplanmäßige Außerbetriebnahme		Umweltschäden		
	Änderungen der Grundwasserverhältnisse		Mechanische Schäden				
	Nicht ausreichende Instandhaltung		Alterung, Verschleiß				
			Chemische Schädigung				
			Blockierung				

Abbildung 23: Analyse der Ereignis-Konsequenzen-Zusammenhänge für Wehranlagen (Eigene Darstellung)

Bereits in dieser sicher noch unvollständigen Übersicht zeigt sich für die OUGr Wehranlagen eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten für eine Analyse der Ereignis-Konsequenzen-Zusammenhänge. Für die vorliegende Arbeit wird – entsprechend der Eingangsproblematik – als auslösendes Ereignis eine nicht ausreichende Instandhaltung der Wehranlage zugrunde gelegt. In der Folge wird die innere Standsicherheit beeinträchtigt und es kommt zu einem Bruch, bei dem ein Verschlusskörper aus der Anlage herausbricht. Dieses Szenario entspricht einem Totalversagen, bei dem das Wasser aus der Stauhaltung (dem Oberwasser) schwallartig in das Unterwasser abfließt. Für eine Vergleichbarkeit der Objekte untereinander wird als Konsequenz der maximal mögliche Schaden nach einem Bauwerksversagen bzw. Funktionsausfall angenommen (Maximalprinzip).

Für die Klassifizierung der Verkehrswasserbauwerke hinsichtlich bestehender Risiken wird sich wegen der komplexen Ereignis-Konsequenzen-Zusammenhänge in der vorliegenden Arbeit an den Konsequenzen orientiert, die für unterschiedliche Schutzgüter (siehe Abbildung 23) zu erwarten sind. Aufgrund der Vielfalt der Aufgaben und Funktionen der Verkehrswasserbauwerke kann sich bei Störfällen eine Vielzahl von Auswirkungen auf verschiedenste Bereiche ergeben, wie beispielsweise (PLANCO, 2007):

- Personen- und Güterverkehr,
- Wasserver- und entsorgung für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft,
- Hochwassermanagement,
- Energiegewinnung,
- Freizeit und Erholung,
- Fischerei,
- Trinkwassergewinnung,
- Grundwassermanagement,
- Lebensraum für Tiere und Pflanzen.

Einige Auswirkungen wie zum Beispiel Verkehrsbeeinträchtigungen zeigen sich unmittelbar, während sich Störungen z. B. in ökologischen Systemen auch noch bemerkbar machen können, wenn der eigentliche Schaden schon längst beseitigt ist. Ähnlich verhält es sich auch mit der räumlichen Wirkung von Ereignissen. Für die Erfassung der Wirkzusammenhänge wird nachfolgend eine Systematik zur räumlichen und zeitlichen Einordnung der Konsequenzen und ein Verfahren zur Auswahl und Ermittlung relevanter Indikatoren entwickelt. Die Überlegungen basieren auf dem in Kapitel 2.1.2 und 2.1.3 beschriebenen Erkenntnisstand und auf Experteninterviews mit der BAW.

In Anlehnung an Thieken (2010) werden die drei zeitlichen Wirkungshorizonte Z1 (kurzfristig), Z2 (mittelfristig) und Z3 (langfristig) unterschieden (siehe Tabelle 12). Es werden nachfolgend Konsequenzen analysiert, die unmittelbar während des Versagensereignisses (Z1) oder bis zu 6 Monate danach (Z2) eintreten können. Langfristige Konsequenzen (Z3) werden nicht untersucht, da eine Erfassung zum einen zeitintensiv ist und zum anderen gegenüber Z1 und Z2 kein Zugewinn an relevanten Informationen zu erwarten ist. Für eine klassische Risikoanalyse sollten selbstverständlich Langzeitwirkungen in die Bewertung einbezogen werden.

Tabelle 12: Differenzierung zeitlicher Wirkungshorizonte (Eigene Darstellung)

<b>Zeitlicher Wirkungshorizont</b>	<b>Beschreibung</b>
Z1 (kurzfristig)	unmittelbar während des Versagensereignis
Z2 (mittelfristig)	Zeitfenster bis 6 Monate nach Versagensereignis
Z3 (langfristig)	Zeitfenster >6 Monate nach Versagensereignis

Ergänzend werden die drei räumlichen Wirkungshorizonte R1 (Standort), R2 (direktes Umfeld) und R3 (weiteres Umfeld) eingeführt (siehe Tabelle 13). Diese Differenzierung ermöglicht eine Analyse der Konsequenzen im Wirkungshorizont R1, welche die Liegenschaft des Objekts und somit den Infrastrukturbetreiber selbst betreffen. Die Analyse der Konsequenzen im Wirkungshorizont R2 umfasst das Umfeld eines Verkehrswasserbauwerks inclusive des zugehörigen Wasserstraßenabschnitts und der Uferbereiche bis 1 km Entfernung. R3 umfasst die Flächen außerhalb des Wirkungshorizonts R2 (siehe Tabelle 13). Es werden die Konsequenzen analysiert, welche die Fläche resp. die Liegenschaft des Bauwerks (R1) und das direkte Umfeld (R2) betreffen. Das weitere Umfeld (R3) wird nicht untersucht, weil für die vorliegende Arbeit angenommen wird, dass die unterschiedlichen Nutzergruppen hauptsächlich im näheren Umfeld eines Verkehrswasserbauwerks zu finden sind.

Tabelle 13: Differenzierung räumlicher Wirkungshorizonte (Eigene Darstellung)

<b>Räumliche Wirkungshorizonte</b>	<b>Beschreibung</b>
R1 (Liegenschaft)	Fläche, die das Bauwerk einnimmt
R2 (direktes Umfeld)	Angrenzende Flächen in einem Korridor bis 1 km Entfernung
R3 (weiteres Umfeld)	Fläche außerhalb des direkten Umfeldes, >R2

Die Ex-ante-Schadensanalyse als wesentlicher Bestandteil einer Risikoanalyse bestimmt das Schadenspotenzial als Gesamtheit der Werte und ihrer räumlichen Verteilung im Untersuchungsgebiet. Es können mikro-, meso- und makroskalige Verfahren unterschieden werden. (Kron, 2008; Meyer, 2005)

- Bei mikroskaligen Schadenspotenzialanalysen erfolgt die Erfassung der Flächennutzungsarten objektscharf. Dafür werden eigene Kartierungen entwickelt oder es werden die Daten der Liegenschaftskataster ausgewertet. Das Ergebnis sind detaillierte und hochwertige Daten, deren Erhebung allerdings ressourcenintensiv ist.
- Für makroskalige Analysen der Schadenspotenziale werden Daten aus amtlichen Statistiken verwendet und auf Stadt- bzw. Gemeindeebene gleichverteilt. Dem Vorteil der einfachen Auswertung vorhandener Daten steht ein wenig aussagekräftiges Ergebnis gegenüber.

- Die mesoskalige Schadenspotenzialanalyse ist eine hybride Methode. Ausgehend von der makroskaligen Vorgehensweise werden die erhobenen Werte auf Gemeindeebene in einem zusätzlichen Schritt auf Flächennutzungseinheiten verortet, die den jeweiligen Wertkategorien entsprechen.

In vorliegender Arbeit wird für die großflächig angelegte Analyse und Bestimmung der verschiedenen Indikatoren der mesoskalige Ansatz verfolgt, da gegenüber der mikroskaligen Analyse eine deutliche Zeitersparnis erzielt werden kann und durch die Eingrenzung auf Korridore entlang der Wasserstraße dennoch mehr Informationen generiert werden können als mit einer makroskaligen Analyse.

Da Verkehrswasserbauwerke in eine Vielzahl komplexer Systeme integriert sind, werden für eine bessere Vergleichbarkeit die möglichen Konsequenzen klassifiziert (siehe Abschnitt 2.1.3.1). Es werden vier Konsequenzenklassen (KK) unterschieden:

- Ökonomisch (Wirtschaft, W): Hier werden ökonomische Konsequenzen erfasst, die nicht den Infrastrukturbetreiber betreffen. Dazu gehören zum Beispiel Verkehrsbeeinträchtigungen, Versorgungsunterbrechungen, Betriebseinschränkungen, Überflutungsschäden von Gewerbe- und Industrieinfrastruktur, Auswirkungen auf sogenannte Hot Spots wie Energieversorger.
- Sozial (Menschen, G): Die sozialen Konsequenzen umfassen die Anzahl betroffener Personen, Überflutungsschäden von Siedlungsflächen, hydraulische Einwirkungen und Hot Spots wie zum Beispiel öffentliche Einrichtungen.
- Ökologisch (Umwelt, U): In die Gruppe der ökologischen Konsequenzen gehören bspw. die Überflutungsschäden von natürlichen Grünflächen, betroffene Wassertiere und -pflanzen und Auswirkungen auf das Grundwasser.
- Strukturell (Infrastrukturbetreiber, S): Die Klasse der strukturellen Konsequenzen umfasst die Schäden für den Infrastrukturbetreiber wie bspw. Wiederherstellungskosten oder Kosten für Sicherungsmaßnahmen.

Mit den jeweils drei Dimensionen für die räumliche und zeitliche Ausdehnung von Konsequenzen und den vier Konsequenzenklassen ergibt sich eine Konsequenzen-Matrix (siehe Tabelle 14), welche das Grundgerüst für alle nachfolgenden Untersuchungen bildet. Die untersuchten Wirkungshorizonte sind in der Tabelle 14 hellgrau markiert.

Tabelle 14: Grundstruktur der Wirkungshorizonte und Konsequenzenklassen (Eigene Darstellung)

Raum	Zeit		Z1 Kurzfristig (während des Ereignisses)		Z2 Mittelfristig (bis 6 Monate nach dem Ereignis)		Z3 Langfristig (mehr als 6 Monate nach dem Ereignis)	
	W	G	U	S	W	G	U	S
<b>R1</b> Liegenschaft des Objekts	W	G	U	S	W	G	U	S
	U	S	W	G	U	S	W	G
<b>R2</b> Direktes Umfeld des Objekts	W	G	U	S	W	G	U	S
	U	S	W	G	U	S	W	G
<b>R3</b> Weiteres Umfeld des Objekts	W	G	U	S	W	G	U	S
	U	S	W	G	U	S	W	G

Tabelle 15 zeigt, in welchen der vier Konsequenzenklassen für die jeweiligen Objektarten Auswirkungen erwartet werden („x“) oder nicht („-“). Die Objektarten sind entsprechend ihrer Aufgaben (Kernprozesse) den OGr im Objektkatalog der WSV zugeordnet (siehe Abschnitt 2.2.1). Ergänzt werden Angaben zur Anzahl der jeweiligen Objekte in der WSV und deren jeweilige Inspektionskategorie (siehe Abschnitt 2.2.2). Alle oder eine hohe Anzahl Objekte in der Inspektionskategorie A signalisiert (siehe Tabelle 15, Fettsatz), dass komplexe statische, konstruktive und hydromechanische Verhältnisse bei den Objekten dieser Objektgruppe von Bedeutung sind. Nicht untersucht werden Objekte der OGr 400 (Objekte für die Sicherung und Erleichterung des Schiffsverkehrs, z.B. feste visuelle Schifffahrtszeichen) und der OGr 600 (Objekte für sonstige unmittelbare Aufgaben, z.B. unbebaute Grundstücksflächen) sowie der OGr 700 und 800 (Anlagen und Fahrzeuge für mittelbare Aufgaben), da diese nicht für die Instandhaltungsplanung priorisiert werden müssen.

Für die Bewertung wurden in eigenen Untersuchungen und auf Grundlage von Experteninterviews mit der BAW mögliche Konsequenzen nach dem Maximalprinzip für das Ereignis Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen analysiert.

Tabelle 15: Kernprozesse – Objektarten und Konsequenzenklassen (Eigene Darstellung)

Objektuntergruppe	Anzahl in der WSV	Inspektions- kategorie	Konsequenzenklasse			
			W	M	U	S
<b>1. Kernprozess: Wasserabfluss und Sicherstellung Schiffbarkeit</b>						
<b>Kanalbrückenanlagen</b>	<b>41</b>	<b>A</b>	x	x	x	x
Parallelbauwerke	17	A	x	x	x	x
	74	B				
Ufernahe Sicherungsbauwerke	92	A	x	-	-	x
	420	B				
<b>2. Kernprozess: Wasserspiegelregelung und -sicherung</b>						
<b>Wehranlagen</b>	<b>245</b>	<b>A</b>	x	x	x	x
	64	B				
<b>Speisungspumpwerkenanlagen</b>	<b>48</b>	<b>A</b>	x	-	-	x
	2	B				
Einlass-/ Auslassbauwerke	16	A	x	x	x	x
	46	B				
Hochwasserrückhaltebecken	1	B	x	x	x	x
<b>Hochwassersperrtoranlagen</b>	<b>12</b>	<b>A</b>	x	x	x	x
	1	B				
<b>Sicherheitstoranlagen</b>	<b>32</b>	<b>A</b>	x	x	x	x
	3	B				

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 15: Kernprozesse – Objektarten und Konsequenzenklassen (Eigene Darstellung)

Objektuntergruppe	Anzahl in der WSV	Inspektions- kategorie	Konsequenzenklasse			
			W	G	U	S
<b>3. Kernprozess: Sicherstellung Schiffsverkehr</b>						
<b>Schiffsschleusenanlagen</b>	<b>316</b>	<b>A</b>	x	-	-	x
	5	B	x	-	-	x
<b>Schiffshebewerkanlagen</b>	<b>4</b>	<b>A</b>	x	-	-	x
<b>Bootsschleusenanlagen</b>	<b>78</b>	<b>A</b>	x	-	-	x
	2	B	x	-	-	x
Bootsgassen, Bootsschleppenanlagen	2 158	A B	x	-	-	x
Ausweichstellen	12 3	A B	x	-	-	x
Wendestellen	53	B	x	-	-	x
Liegestellen	27 417	A B	x	-	-	x
Schutzhäfen, Liegehäfen	5 71	A B	x	-	-	x
Umschlagstellen	12 58	A B	x	-	-	x
Anlegestellen mit festen Landebrücken / Landstegen	36	B	x	-	-	x
Hafenanlagen	4 35	A B	x	-	-	x
Anlegestelle mit schwimmenden Landebrücken / Landstegen	2 44	A B	x	-	-	x
<b>5. Kernprozess: Aufrechterhaltung Kreuzungsverkehr</b>						
Ersatzübergangsstellen	121	B	x	-	-	x
<b>Durchlassanlagen</b>	<b>68</b>	<b>A</b>	x	x	x	x
	3	B	x	x	x	x
Rohr- und Kabeldükeranlagen	11 50	A B	x	x	x	x
<b>Dükeranlagen</b>	<b>350</b>	<b>A</b>	x	x	x	x
	2	B	x	x	x	x

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen in Tabelle 15 zeigen, dass bei allen Objektuntergruppen Auswirkungen in den Konsequenzenklassen W und S zu erwarten sind, da ein Versagen bzw. Funktionsausfall immer – wenn auch mit unterschiedlichem Ausmaß – Auswirkungen auf den Schiffsverkehr und für den Infrastrukturbetreiber nach sich zieht. Hingegen sind für die Konsequenzenklassen Sozial (Menschen, G) und Ökologisch (Umwelt, U) für OUGr eines Kernprozesses unterschiedliche Ausprägungen möglich. Ursache für diese Unterschiede sind die speziellen Funktionen und Aufgaben der einzelnen Bauwerke, die einem Kernprozess zugeordnet sind. Dem

Kernprozess 2 „Wasserspiegelregelung und -sicherung“ sind zum Beispiel sowohl Speisungspumpwerken als auch Wehranlagen zugeordnet. Speisungspumpwerke sind Bauwerke zur Kanalspeisung durch Überpumpen von Wasser einer Kanalhaltung in eine andere oder zur Speisung geschlossener Häfen. Sie bewirken eine Wasserspiegelregelung durch eine Zugabe von Wasser. Eine Wehranlage hingegen ist ein Absperrbauwerk innerhalb eines natürlichen Wasserlaufs, welches der Hebung des Oberflächen- und des Grundwasserstandes („Kulturwehr“) und meist auch der Regelung des Abflusses dient. Sie bewirken die Wasserspiegelregelung durch einen Aufstau des Wassers. Bei Ausfall eines Speisungspumpwerks wird es im Kanal zu einem allmählichen Abfall des Wasserspiegels kommen, sodass zeitverzögert keine Schifffahrt mehr möglich ist. Die Konsequenzklassen G und U spielen keine oder nur eine untergeordnete Rolle (mit Strichen in Tabelle 15 gekennzeichnet). Das Versagen einer Wehranlage beeinträchtigt die Schifffahrt und löst unmittelbar im Unterwasser eine Schwallwelle aus, die zu Überschwemmungen führen kann. Hier können Schutzgüter aller vier Konsequenzklassen betroffen sein.

### **3.2.2 Auswahl der Indikatoren und Datenanalyse**

Menschliche Siedlungen entstanden sowohl wegen der Versorgungsmöglichkeiten mit Wasser und Nahrung als auch wegen der oft besseren Bodenqualität an Flüssen und Seen. Die natürlichen Flussläufe konnten in ihrem ursprünglichen Zustand oder ohne größere bauliche Maßnahmen als Verkehrsweg genutzt werden, sobald es einfache Wasserfahrzeuge gab. Die Binnenwasserstraßen blieben über Jahrhunderte hinweg die schnellsten und kostengünstigsten Verkehrswege. (Ellmers, 2007; WSV, 2015) Das Alleinstellungsmerkmal der Wasserstraßen und der Verkehrswasserbauwerke gegenüber anderen Infrastruktursystemen ist ihre Funktionsvielfalt. Sie dienen dem Personen- und Güterverkehr, erfüllen wasserwirtschaftliche Aufgaben und sind Teil von Hochwasserschutzsystemen. Außerdem werden sie zur Energiegewinnung sowie zur Wasserver- und -entsorgung in Industrie und Landwirtschaft genutzt. Teilweise dienen sie der Trinkwassergewinnung, bieten Raum für die Freizeitgestaltung und sind natürlicher Lebensraum für viele Tiere und Pflanzen.

Bislang wurden für Verkehrswasserbauwerke keine Informationen zu möglichen Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen flächendeckend erfasst, systematisch zusammengestellt und ausgewertet wie es zum Beispiel beim Hochwasserschutz der Fall ist. Um für eine risiko-basierte Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke für eine Instandhaltungsplanung entsprechende Analysen durchführen zu können, werden für jede der vier Konsequenzklassen (W, G, U und S) Indikatoren bestimmt, welche die Bedeutung eines Infrastrukturbauwerks in dem jeweiligen Bereich abbilden und dabei auf verfügbare Daten zurückgreifen. Für die Bestimmung der Indikatoren wird mit den vier Konsequenzklassen (KK) die Aufgabenvielfalt der Verkehrswasserbauwerke berücksichtigt. Tabelle 16 benennt die wesentlichen, möglichen Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen. Die Analyse erfolgt für vier unterschiedliche Objektuntergruppen, um die Methode grundsätzlich für eine Anwendung für das gesamte Objektportfolio auszulegen. Dafür wurde aus jedem der vier Kernprozesse die OUGr gewählt, in welcher der Großteil der Objekte der Inspektionskategorie A zugeordnet ist (siehe Tabelle 15). Grundlage für diese Herleitung sind die verschiedenen Systeme, in die Verkehrsinfrastrukturen integriert sind (siehe Kapitel 3.2.1).

Tabelle 16: Objektuntergruppen und potenzielle Konsequenzen (Eigene Darstellung)

OUGr	Konsequenzen	KK
<b>Kanalbrückenanlagen</b> (1. Kernprozess: Wasserabfluss und Sicherstellung Schiffbarkeit)	<i>Verkehrsbeeinträchtigung</i> durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Beeinträchtigung der Wasserver- und -entsorgung</i> für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Überflutung von angrenzenden</i> Flächen (Industrie- und Gewerbeflächen, landwirtschaftliche Flächen) durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Beeinträchtigung der Freizeitschifffahrt</i> durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	G
	<i>Gefährdung von Personen</i> auf angrenzenden Flächen (Siedlung, Erholung) durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts	G
	<i>Beeinträchtigung der Trinkwassergewinnung</i> durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts oder mögliche Verunreinigungen	G
	<i>Beeinträchtigung des Lebensraums</i> für Tiere und Pflanzen durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	U
	<i>Außerordentliche Kosten</i> für den Infrastrukturbetreiber durch Funktionsausfall oder Wiederherstellung	S
OUGr	Konsequenzen	KK
<b>Wehranlagen</b> (2. Wasserspiegelregelung und -sicherung)	<i>Verkehrsbeeinträchtigung</i> durch Leerlaufen der Stauhaltung oder Störungen in der Wasserspiegelregelung	W
	<i>Beeinträchtigung der Wasserver- und -entsorgung</i> für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft durch Leerlaufen der Stauhaltung oder Störungen in der Wasserspiegelregelung	W
	<i>Überflutung von angrenzenden</i> Flächen (Industrie- und Gewerbe, Landwirtschaft) durch Leerlaufen der Stauhaltung	W
	<i>Beeinträchtigung der Freizeitschifffahrt</i> durch Leerlaufen der Stauhaltung oder Störungen in der Wasserspiegelregelung	G
	<i>Gefährdung von Personen</i> auf angrenzenden Flächen (Siedlung, Erholung) durch Leerlaufen der Stauhaltung	G
	<i>Beeinträchtigung der Trinkwassergewinnung</i> durch Leerlaufen der Stauhaltung oder mögliche Verunreinigungen	G
	<i>Beeinträchtigung des Lebensraums</i> für Tiere und Pflanzen durch Leerlaufen der Stauhaltung oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	U
	<i>Außerordentliche Kosten</i> für den Infrastrukturbetreiber durch Funktionsausfall oder Wiederherstellung des Objekts	S
	<i>Beeinträchtigungen im Hochwassermanagement</i> durch Funktionsausfall	W, G, U, S
	<i>Beeinträchtigung der Energiegewinnung</i> durch Funktionsausfall	W, G, U, S
<i>Störungen des Grundwasserspiegels</i> durch Leerlaufen der Stauhaltung	W, G, U, S	

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 16: Objektuntergruppen und potenzielle Konsequenzen (Eigene Darstellung)

OUGr	Konsequenzen	KK
<b>Schiffschleusenanlagen</b> (3. Kernprozess: Sicherstellung Schiffsverkehr)	<i>Verkehrsbeeinträchtigung</i> durch Leerlaufen oder Sperrung der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Beeinträchtigung der Wasserver- und entsorgung</i> für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft durch Leerlaufen oder Sperrung der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Überflutung von angrenzenden Flächen</i> (Industrie- und Gewerbe, Landwirtschaft) durch Leerlaufen der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Beeinträchtigung der Freizeitschifffahrt</i> durch Leerlaufen der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts	G
	<i>Gefährdung von Personen</i> auf angrenzenden Flächen (Siedlung, Erholung) durch Leerlaufen der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts	G
	<i>Beeinträchtigung der Trinkwassergewinnung</i> durch Leerlaufen der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts oder mögliche Verunreinigungen	G
	<i>Beeinträchtigung des Lebensraums</i> für Tiere und Pflanzen durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts der Stauhaltung bzw. des Wasserstraßenabschnitts	U
	<i>Außerordentliche Kosten</i> für den Infrastrukturbetreiber durch Funktionsausfall oder Wiederherstellung des Objekts	S
OUGr	Konsequenzen	KK
<b>Dükeranlagen</b> (5. Kernprozess: Aufrechterhaltung Kreuzungsverkehr)	<i>Verkehrsbeeinträchtigung</i> durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Beeinträchtigung der Wasserver- und entsorgung</i> für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Überflutung von angrenzenden Flächen</i> (Industrie- und Gewerbe, Landwirtschaft) durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts	W
	<i>Beeinträchtigung der Freizeitschifffahrt</i> durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts	G
	<i>Gefährdung von Personen</i> auf angrenzenden Flächen (Siedlung, Erholung) durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts	G
	<i>Beeinträchtigung der Trinkwassergewinnung</i> durch Leerlaufen des Wasserstraßenabschnitts oder mögliche Verunreinigungen	G
	<i>Beeinträchtigung des Lebensraums</i> für Tiere und Pflanzen durch Leerlaufen oder Sperrung des Wasserstraßenabschnitts	U
	<i>Außerordentliche Kosten</i> für den Infrastrukturbetreiber durch Funktionsausfall oder Wiederherstellung des Objekts	S
	<i>Überflutung von angrenzenden Flächen</i> (Industrie- und Gewerbeflächen, Siedlungsflächen, landwirtschaftliche Flächen, natürliche Grünflächen) durch Rückstau im gedükerten Gewässer	W, G, U, S

Für alle vier Objektuntergruppen ergeben sich für potenzielle Extremereignisse Auswirkungen im Untersuchungsgebiet durch:

- Verkehrsbeeinträchtigungen
- Beeinträchtigungen in der (Trink-)Wasserversorgung und Wasserentsorgung
- Überflutungen angrenzender Flächen mit verschiedenen Nutzungsarten
- Gefährdung von Personen
- Einfluss auf natürliche Lebensräume
- Außerordentliche Kosten für den Infrastrukturbetreiber

Für die OUGr Kanalbrückenanlagen, Wehranlagen und Dükeranlagen können über die genannten Punkte hinaus bauwerksspezifische Mechanismen ausgelöst werden. Bei den Kanalbrückenanlagen kann zusätzlich bei einem Bauwerksversagen das Wasser des Kanalabschnitts ins Gelände abfließen und Überflutungen verursachen. Für die Objektuntergruppe Wehranlagen kann es zusätzlich zu Beeinträchtigungen für die Energiegewinnung, das Hochwassermanagement und den Grundwasserspiegel kommen. Bei Dükeranlagen besteht die Gefahr, dass es zu einem Rückstau im gedükerten Flusslauf und somit zu großflächigen Überflutungen kommt. Das Ausmaß ist von der Fließgeschwindigkeit und der Durchflussmenge des Baches oder Flusses abhängig. Diese Konsequenzen bleiben als Sonderfälle in den nachfolgenden Ausführungen zur Ableitung der Indikatoren zunächst unberücksichtigt, da keine oder nicht ausreichende Informationen zu diesen Wirkungsmechanismen vorliegen.

In Abhängigkeit vom auslösenden Ereignis und der daraus resultierenden Systemantwort können die Folgen für Menschen, Wirtschaft und Umwelt sowie für den Infrastrukturbetreiber in unterschiedlichem Umfang auftreten. Aufgrund bislang noch fehlender Informationen über tatsächliche Ausprägungen aus realen Schadensereignissen wird von den jeweils maximal möglichen Konsequenzen im jeweiligen Bereich ausgegangen. Hier zeigt es sich als besondere Herausforderung, auf Basis der wenigen, verfügbaren Daten diejenigen Indikatoren zu identifizieren, welche Rückschlüsse auf mögliche Abhängigkeiten der Nutzer von der Wasserstraße abbilden und darüber hinaus generisch sind und sich somit auf alle Verkehrswasserbauwerke beziehen lassen (siehe Abschnitt 2.1.3.1).

Tabelle 17 listet die zuvor identifizierten Konsequenzen sowie die zugehörige Konsequenzklasse auf und benennt den zugehörigen Indikator. In der rechten Spalte wird die Nummer des Abschnitts genannt, in welchem die Vorgehensweise zur Ermittlung des jeweiligen Indikators erläutert wird. Die Auswahl erfolgt in Anlehnung an die Risikoanalysen im Bevölkerungsschutz (siehe Abschnitt 2.1.3.1) sowie die Ermittlung von Hochwasserschäden (siehe Abschnitt 2.1.2).

Tabelle 17: Konsequenzenklassen und zugehörige Indikatoren (Eigene Darstellung)

<b>Konsequenzen- klasse</b>	<b>Konsequenzen nach Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen</b>	<b>Indikator</b>	<b>Abschnitt</b>
<b>Ökonomisch</b> (Wirtschaft, W)	Beeinträchtigung des Güterverkehrs	Kosten durch Verkehrsunterbrechung	3.2.2.1
	Beeinträchtigung der Wasserversorgung und -entsorgung	Größe der angrenzenden Flächen mit industrieller oder gewerblicher Nutzung	3.2.2.2
	Überflutung angrenzender Industrie- und Gewerbeflächen	Hydraulischer Parameter: Höhe einer Schwallwelle nach einem Bauwerksversagen	3.2.2.3
<b>Sozial</b> (Menschen, G)	Gefährdung von Personen auf angrenzenden Flächen	Größe der angrenzenden Siedlungsflächen, Einwohnerzahl	3.2.2.2
	Beeinträchtigung der Trinkwasserversorgung	Größe der angrenzenden Siedlungsflächen, Einwohnerzahl	3.2.2.2
	Überflutung angrenzender Siedlungsflächen	Hydraulischer Parameter: Höhe einer Schwallwelle nach einem Bauwerksversagen	3.2.2.3
<b>Ökologisch</b> (Umwelt, U)	Beeinträchtigung natürlicher Lebensräume	Größe der angrenzenden, natürlichen Flächen	3.2.2.2
	Überflutung natürlicher Lebensräume	Hydraulischer Parameter: Höhe einer Schwallwelle nach einem Bauwerksversagen	3.2.2.3
<b>Strukturell</b> (Infrastruktur- betreiber, S)	Außerordentliche Kosten	Wiederherstellungskosten für das Objekt	3.2.2.4

In den Abschnitten 3.2.2.1 bis 3.2.2.4 wird die Datenerhebung für die Indikatoren am Beispiel der Wehranlagen an der Bundeswasserstraße Saar vorgestellt. Alle ermittelten Daten für die einzelnen Objekte sind immer über die Objekt-Identifikationsnummer (Objekt-ID) verknüpft, so dass bei unterschiedlichen Analysen immer eine eindeutige Zuordnung sichergestellt ist. Zum Ende des Kapitels erfolgt die Visualisierung der Ergebnisse.

### 3.2.2.1 Kosten durch Verkehrsunterbrechung

Der Ausfall oder das Versagen eines Verkehrswasserbauwerks beeinflusst erheblich den Schiffsverkehr und infolgedessen die Güter- und Warenflüsse für die verschiedensten gesellschaftlichen Bereiche. Dieser Indikator ist der Konsequenzenklasse Ökonomisch (Wirtschaft, W) zugeordnet. Um die Auswirkungen im Rahmen einer Ex-ante-Schadensanalyse abzuschätzen, wird eine Methode zur Ermittlung der Ausfallkosten für die Güterbeförderung auf den Bundeswasserstraßen entwickelt. Die Ausfallkosten ermöglichen die Bewertung der Folgen einer Nicht-Schiffbarkeit auf den Güterverkehr und darüber hinaus einen Vergleich zwischen Verkehrswasserbauwerken innerhalb der gleichen Wasserstraßenkategorie und auch mit Standort an derselben Wasserstraße. Grundlage für die Bestimmung der Kosten durch Verkehrsunterbrechung sind zum einen die Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt (Destatis, 2017) und zum anderen die in § 4 BinSchLV genannten Liegegeldsätze (BinSchLV, 2010). Die in § 4 der Lade- und Löschzeitenverordnung (BinSchLV) genannten Liegegeldsätze dienen unter anderem auch zur Berechnung von Ansprüchen bei Nutzungsausfällen wegen einer durch Havarie erzwungenen Stilllegung eines Schiffes, bei der die Liegegeldsätze von 1994 unter Anpassung an die Entwicklung des Preisindex verwendet werden. Pauschalsätze wie das Liegegeld ermöglichen unabhängig von Konjunkturschwankungen eine standardisierte Ex-ante-Berechnung aus möglichen Ansprüchen einer Nutzungsausfallentschädigung (Waldstein, 2007).

In der *Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt* wird Deutschland in neun Wasserstraßengebiete untergeteilt (Destatis, 2017):

- Elbegebiet,
- Wesergebiet,
- Mittellandkanalgebiet,
- Westdeutsches Kanalgebiet,
- Rheingebiet, Lahn, Main, Mosel, Neckar, Saar,
- Donaugebiet,
- Gebiet Berlin,
- Brandenburg u. Binnengebiet Mecklenburg-Vorpommern,
- Küstengebiet Mecklenburg-Vorpommern.

Jedes der Wasserstraßengebiete wird zudem in Wasserstraßenabschnitte und deren Teilbereiche untergliedert. Damit ist es möglich, Flüsse nicht nur als Ganzes, sondern auch definierte Streckenabschnitte auszuwerten. Mit dieser Differenzierung wird berücksichtigt, dass die Transportleistung in den oberen Flussabschnitten in der Regel geringer ist als in den unteren und ein Bauwerksversagen Folgen mit unterschiedlichem Ausmaß nach sich ziehen kann. Aus der Güterverkehrsstatistik wird Tabellenblatt 4.3: *Güterbeförderung nach Wasserstraßengebieten/-abschnitten, Wasserstraßen und Schiffsarten* ausgewertet. Diese Tabelle listet die schiffbaren Wasserstraßen (Länge in Kilometern) in Deutschlands auf und die Menge der beförderten Güter in 1000 Tonnen. Auch wird die Tabelle 4.4: *Tonnenkilometrische Leistung nach Wasserstraßengebieten/-abschnitten, Wasserstraßen und Schiffsarten* analysiert, in der die Güterverkehrsdichte in 1000 Tonnen angegeben ist, die sich aus dem Quotient von geleisteten Tonnenkilometern und Länge der

Wasserstraße ergibt (Destatis, 2017). Die Einheit Tonnenkilometer [tkm] im Sinne dieser Statistik ist eine Kennzahl für die Messung der Beförderungsleistung auf der Wasserstraße. Sie errechnet sich als Produkt aus dem Gewicht der beförderten Güter in Tonnen und der Transportentfernung in Kilometer. Ziel dieser Analyse ist eine streckengenaue Zuordnung der beförderten Güter.

Die *Verordnung über die Lade- und Löschzeiten sowie das Liegegeld in der Binnenschifffahrt (Lade- und Löschzeitenverordnung – BinSchLV)* regelt für die Binnenschifffahrt die Lade- und Löschzeiten und die daraus resultierenden Ansprüche, die ein Binnenschiffer gegenüber dem Absender oder Empfänger einer Fracht geltend machen kann. Diese Ansprüche entstehen, wenn der Frachtführer unverschuldet nach Ablauf der definierten Lade- oder Löschzeiten warten muss und so in der Ausübung seiner Tätigkeit gehindert wird. Das Liegegeld kann somit als Entschädigungsleistung für einen erzwungenen Stillstand verstanden werden, der in der Regel mit finanziellen Verlusten für den Binnenschiffer verbunden ist.

Bis zum 01.01.1994 wurden von den Frachtausschüssen der Binnenschifffahrt marktgerechte Durchschnittswerte für das dem Frachtführer frachtvertraglich geschuldete Liegegeld festgelegt. Diese in Mischkalkulationen ermittelten Pauschalsätze richteten sich nach dem tonnageabhängigen möglichen Tagesverdienst eines Binnenschiffes. Bis 1994 orientierte sich die Rechtsprechung ausschließlich an diesen Pauschalsätzen zur Bestimmung der Höhe von in der Regel deliktisch begründeten Ansprüchen auf Nutzungsausfallentschädigung im Havariebereich. (Waldstein, 2007) In der neueren Rechtsprechung werden im Havariebereich zusätzlich die in den letzten Monaten tatsächlich erzielten Einfahrerergebnisse eines Schiffes in die Berechnung der Ansprüche auf Nutzungsausfallentschädigung einbezogen.

Zur Ermittlung von Informationen zum Güterverkehr der Binnenschifffahrt werden die Daten der Güterverkehrsstatistik des Statistischen Bundesamtes (GVS) aus dem Jahr 2016 (Destatis, 2017) verwendet. Da die Kategorisierung der Binnenwasserstraßen der Güterverkehrsstatistik nicht der Nummerierung der Bundeswasserstraßen (BWStr) der WSV entspricht, werden die Streckenabschnitte aus der GVS den Bundeswasserstraßen zugeordnet. So wird bspw. die Saar (Bundeswasserstraßennummer 42) mit zwei Streckenabschnitten in der Güterverkehrsstatistik erfasst und nummeriert (siehe Tabelle 18): Völklingen bis Gündingen/Grenze (GVS Nr. 527) und Mosel bis Völklingen (GVS Nr. 528).

Tabelle 18: Zuordnung der Binnenwasserstraßen zu den Bundeswasserstraßen (Eigene Darstellung)

Nr. BWStr.	Name BWStr.	Nr. GVS	Name der Binnenwasserstraße in der GVS
42	Saar	527	Saar, Völklingen bis Gündingen/Grenze
		528	Saar, Mosel bis Völklingen

Unter Annahme der Gleichverteilung der Schiffe auf den Wasserstraßenabschnitten werden auf Basis der Liegegelder und der Anzahl der Schiffe mögliche Ansprüche bei Nutzungsausfall objektspezifisch berechnet. Zunächst werden dafür die Gütermengen aus der GVS ermittelt, wobei Tankmotorschiffe und Tankleichter sowie Güterschiffe und Güterleichter jeweils zusammengefasst werden. Die in § 4 BinSchLV genannten Liegegeldsätze zur Berechnung von Ansprüchen bei Nutzungsausfällen unterteilen Güterschiffe nach Ladekapazität und Tankschiffe zusätzlich nach Bauweisen. (BinSchLV, 2010)

Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass die Transportmengen der Tankschiffe und der Güterschiffe einheitlich auf Schiffe mit einer Kapazität zu je 1500 t aufgeteilt sind, was einem Liegegeld von 75,- €/h gemäß BinSchLV (2010) für beide Schiffstypen entspricht. Bei dieser Annahme steht nicht die korrekte Abbildung der tatsächlichen fahrenden Schiffstypen, sondern die Gleichverteilung der Gütermengen auf den Streckenabschnitten gemäß GVS im Vordergrund. Die gemittelten Liegegelder [€/h\*km] werden verwendet, um mögliche Ansprüche bei Nutzungsausfällen zu berechnen. Anhand ihrer Position (Wasserstraßen-Kilometer) werden für jede Wehranlage die individuelle Länge der Gesamtstrecke, die sich aus Oberwasser (OW) und Unterwasser (UW) zusammensetzt, ermittelt und mit den streckenspezifischen Liegegeldern verrechnet. Vorteil gegenüber der Zuordnung der Objekte zu einer Wasserstraßenkategorie A, B, C oder Sonstige ist eine höhere Auflösung auf Basis einer objektspezifischen Längenermittlung von Ober- und Unterwasser, so dass eine präzise Bewertung einzelner Anlagen und der Vergleich von Anlagen möglich sind, auch wenn sie an der gleichen Bundeswasserstraße stehen.

Die Bestimmung der Kosten durch Verkehrsunterbrechung erfolgt am Beispiel der Bundeswasserstraße Saar, die größtenteils der Wasserstraßenkategorie C und zu einem Teil der Kategorie Außerhalb des Kernnetzes angehört (siehe Abschnitt 2.2.1). Tabelle 19 zeigt die transportierten Gütermengen für die beiden Abschnitte der Saar gemäß GVS und deren Verteilung auf die verschiedenen Schiffsarten.

Tabelle 19: Güterbeförderung auf den Abschnitten der Binnenwasserstraße Saar (Eigene Darstellung)

Nr. GVS	Länge (km)	Güterbeförderung im Jahr 2016					
		Insgesamt	nach Schiffsart				
			Gütermotor-schiff	Tankmotor-schiff	Güterleichter	Tankleichter	Sonstige
Angaben in 1000 t							
527	22	235	231	0	4	0	0
528	72	3617	2559	40	116	1	901

Laut Güterverkehrsstatistik werden auf dem Abschnitt Völklingen bis Güdingen/Grenze (GVS Nr. 527, 22 km Länge) jährlich insgesamt 235.000 t Güter befördert, was pro Jahr rund 157 Schiffe bzw. pro Stunde 0,02 Schiffen mit einer Ladekapazität von 1500 t entspricht. Wenn alle 0,02

Schiffe bei einem Nutzungsausfall ihre Ansprüche i. H. v. 75,- € pro Stunde geltend machen und unter der Annahme, dass die Schiffe gleichmäßig auf der Streckenlänge von 22 km des Abschnittes Mosel bis Völklingen verteilt sind, ergibt sich für diesen Streckenabschnitt der Saar ein mittleres Liegegeld von 0,06 € pro Stunde und Kilometer.

Auf dem Abschnitt Mosel bis Völklingen (GVS Nr. 528, 72 km Länge) werden jährlich 3.617.000 t Güter befördert, was jährlich rund 2.412 bzw. stündlich 0,28 Schiffen entspricht. Nach der Verrechnung mit dem Liegegeld in Höhe von 75,- € und der Umlage auf die Streckenlänge von 72 km ergibt sich ein mittleres Liegegeld von 0,29 € pro Stunde und Kilometer.

Mit den Werten der mittleren Liegegelder und den Streckenlängen für Ober- und Unterwasser werden für die jede Wehranlage die möglichen Kosten durch Verkehrsunterbrechung berechnet. Tabelle 20 zeigt die ermittelten Werte für das Liegegeld pro Kilometer und das Ergebnis der Umlage auf die Gesamtstrecken aus Ober- und Unterwasser für die Wehranlagen an der Saar. Mit den Daten aus der GVS und den gemittelten Liegegeldern für die Wehranlagen unterschiedliche Werte berechnet werden. Somit können über die Liegegelder auch Wehranlagen derselben Wasserstraße miteinander verglichen werden.

Tabelle 20: Schleusenanlagen der Saar und zugehörige Liegegelder (Eigene Darstellung)

Objekt-ID Wehranlage	Lage [Wasserstraßen- kilometer]	Liegegeld [€/km*h]	Streckenlänge OW+UW [km]	Liegegeld OW+UW [€/h]
Binnenwasserstraße Saar, Abschnitt Mosel bis Völklingen (GVS Nr. 528)				
2136304003	5,17	0,06	13,40	0,80
2136504003	18,56	0,06	26,35	1,58
2136504004	31,52	0,06	35,68	2,14
2136706001	54,25	0,06	34,57	2,07
2136706004	66,09	0,06	11,84	0,71
Binnenwasserstraße Saar, Abschnitt Völklingen bis Güdingen/Grenze (GVS Nr. 527)				
2136706006	75,10	0,28	16,39	4,59
2136708001	82,48	0,28	17,82	4,99

### 3.2.2.2 Ermittlung der Flächengrößen und -nutzungsarten

In einem definierten Korridor entlang der Wasserstraßenabschnitte werden die angrenzenden Flächen hinsichtlich ihrer Größe und Nutzungsart analysiert, da ein Bezug zwischen den Wasserstraßen und der Nutzungsart angrenzender Flächen angenommen werden kann. Beispiele sind die Kühlwassergewinnung für Kraftwerke und dessen Rückführung, die Brauchwassergewinnung für die Landwirtschaft, die Prozesswassergewinnung in der Industrie, die Trinkwassergewinnung sowie die Nutzung als Naherholungsgebiet. In der Umgebung von Häfen lassen sich zudem vermehrt Unternehmen identifizieren, die bestimmte Gütergruppen umschlagen, transportieren oder nutzen. (Scholten, Rothstein, 2012)

Der für jedes Objekt spezifische Korridor umfasst die Gesamtlänge von Ober- und Unterwasser eines Verkehrswasserbauwerks und ist zu beiden Uferseiten jeweils 1 km breit. Dieser Eingrenzung wird zugrunde gelegt, dass die Wechselbeziehungen zwischen Wasserstraße und den angrenzenden Flächen sowie die Nutzungsintensität durch die verschiedenen Gruppen mit zunehmender Entfernung abnehmen und insbesondere Wasserverbraucher in der Regel in direkter Nähe zum Fluss angesiedelt sind (siehe Abschnitt 3.2.1).

Basis für die Analyse der Flächennutzungsarten bildet der Datensatz CORINE Land Cover (CLC), der Bestandteil des CORINE-Projektes (Coordination of Information on the Environment) des Europäischen Ministerrates ist, das im Jahr 1985 gestartet wurde (EEA, 1995). Übergeordnetes Ziel des noch andauernden Projektes ist die Gewinnung einheitlicher und somit vergleichbarer Daten zur Bodenbedeckung bzw. Landnutzung in Europa. Einsatzbereiche der Daten finden sich in Bodenmanagement, Naturschutz und Wassermanagement. Die Datensätze werden fortlaufend aktualisiert und ermöglichen es, Veränderungen nachzuvollziehen. In Deutschland wird der Datensatz von verschiedenen Behörden wie zum Beispiel vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) oder vom Umweltbundesamt (UBA) frei zur Verfügung gestellt. Mithilfe von Geoinformationsdaten und unter Verwendung der Software ArcGIS kann ermittelt werden, welche Arten der Flächennutzung in einem untersuchten Gebiet vorliegen und wie groß diese Flächen sind. Die Nutzungsarten werden in 44 CLC-Klassen unterteilt und können für eigene Anforderungen beliebig zusammengefasst werden. Für die spätere Priorisierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind wenige, aussagekräftige Indikatoren vorteilhaft. Aus diesem Grund werden die Werte einzelner Klassen für die Indikatoren summiert. Tabelle 21 zeigt die für die vorliegende Arbeit vorgenommene Zusammenfassung der CLC-Klassen, im Anhang findet sich die ursprüngliche Klassifizierung (Anhang III, Abbildung 45, S. 196).

Tabelle 21: Indikatoren und zugeordnete CLC-Klassen (Eigene Darstellung)

Konsequenzenklasse	Indikator	Zugeordnete CLC-Klassen
Ökonomisch (Wirtschaft, W),	Größe der Industrie- und Gewerbeflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (CLC 1.2 und CLC 1.3)</li> <li>• Landwirtschaftliche Flächen (CLC 2.1 bis CLC 2.4)</li> </ul>
Sozial (Menschen, M)	Größe der Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Städtische Prägung (CLC 1.1 und CLC 1.4)</li> </ul>
Ökologisch (Umwelt, U)	Größe der Naturflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grünflächen und Wald (CLC 3.1 bis CLC 3.3)</li> <li>• Gewässerflächen (CLC 4 und CLC 5)</li> </ul>

Gemäß dem gewählten mesoskaligem Ansatz (siehe Abschnitt 3.2.1) werden die verschiedenen Werte der Flächennutzungsarten innerhalb des definierten Korridors entlang der Bundeswasserstraßen erfasst und den Einzelobjekten zugeordnet (siehe Anhang II, S. 188-193). Abbildung 24 veranschaulicht die Umsetzung für die Wehranlagen an der Saar. Für die zu untersuchende Flussstrecke werden die Positionen der Wehranlagen mit ihrer Objekt-ID im Flussverlauf markiert (siehe Abbildung 24, links). In einem zweiten Schritt erfolgt die Auswertung innerhalb des zu untersuchenden Korridors gemäß den zuvor definierten Flächennutzungsarten. Die Flächennutzungsarten können für eine Visualisierung farblich kodiert werden (siehe Abbildung 24, rechts). Die Größe der jeweiligen Flächenanteile wird für den Ober- und Unterwasserbereich objektspezifisch aufsummiert.

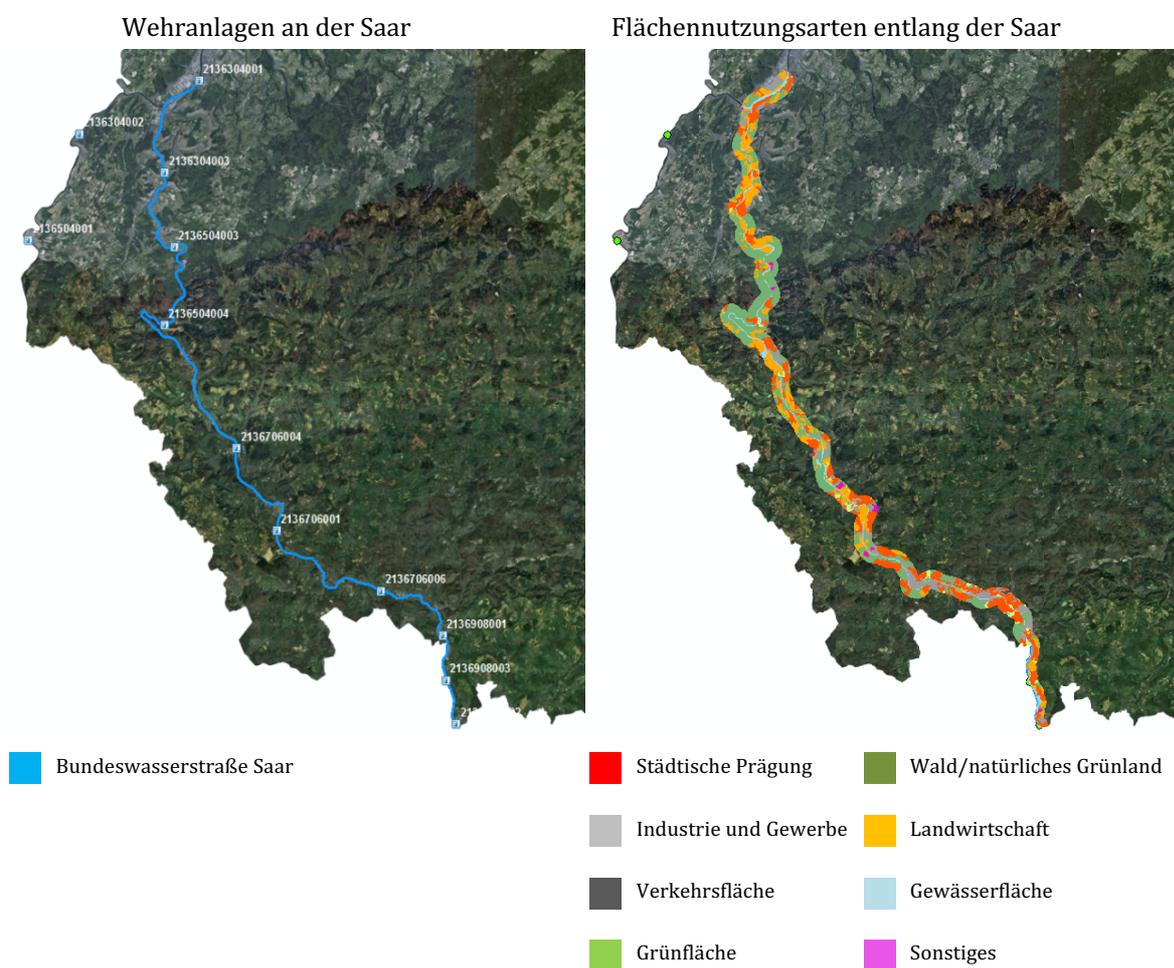


Abbildung 24: Erstellung der Flächennutzungsanalyse entlang einer Wasserstraße (BKG, 2018; Eigene Darstellung)

Als zusätzliche Information wird die Einwohnerdichte für die Flächen mit städtischer Prägung ausgelesen, um die Einwohnerzahl auf dieser Fläche zu bestimmen. Tabelle 22 zeigt die ermittelten Werte für die Einwohnerzahlen, die Größen der Siedlungsflächen, der Naturflächen sowie der Industrie- und Gewerbeflächen für die Wehranlagen an der Saar. Der größte Wert ist in Tabelle 22 hellgrau markiert.

Tabelle 22: Ergebnisse der Flächenanalyse im Untersuchungsgebiet der Saar (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	Einwohner [Anzahl]	Siedlungsflächen [m <sup>2</sup> ]	Naturflächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbeflächen [m <sup>2</sup> ]
2136304003	26.744	10.019.792,3	21.002.794,7	22.050.593,8
2136504003	13.151	6.775.568,3	29.749.443,6	14.872.909,8
2136504004	24.130	10.597.710,7	40.532.572,1	20.722.501,7
2136706001	74.315	20.069.270,8	21.907.040,1	19.490.729,1
2136706004	48.042	15.411.946,8	30.482.476,6	25.261.418,9
2136706006	112.140	23.311.686,9	19.475.274,7	16.216.310,1
2136908001	73.804	13.789.231,3	9.287.631,1	8.989.940,5

Wie bereits in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, werden in der vorliegenden Arbeit über die Analyse der Flächennutzungsarten die Wechselbeziehungen zwischen der Wasserstraße und den angrenzenden Flächen bzw. ihren Nutzern abgebildet. Je größer die jeweiligen Werte sind, umso stärkere Effekte infolge eines Funktionsausfalls und Bauwerksversagens sind für das jeweilige Untersuchungsgebiet zu erwarten. Die ermittelten Größen aus der Flächenanalyse zeigen somit implizit, ob es bspw. zu Beeinträchtigungen in der Trink- oder Brauchwasserversorgung sowie der Wasserentsorgung für die verschiedenen Nutzergruppen kommen kann, ob eine Gefährdung durch Überflutungen von angrenzenden Flächen mit verschiedenen Nutzungsarten oder eine Gefährdung von Personen besteht bzw. ob natürliche Lebensräume ungünstig beeinflusst werden können.

### 3.2.2.3 Hydraulische Analysen

Für den Versagensfall von Verkehrswasserbauwerken sind unterschiedliche hydraulische Effekte in Oberwasser, Unterwasser und in den Uferbereichen (R1 und R2, siehe 3.2.1) zu erwarten, sodass diese als hydraulischer Parameter in die Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke in der Instandhaltungsplanung integriert werden. Für das Versagen von Wehranlagen an Fließgewässern wird als auslösendes Schadensereignis angenommen, dass eines der beweglichen Verschlussorgane der Wehranlage herausbricht. Bei der nachfolgenden schlagartigen Entleerung der Stauhaltung entsteht eine Schwallwelle, die eine Überflutung des Uferbereichs oder auch angrenzender Flächen verursachen kann, wenn bspw. die angrenzenden Dämme nicht hoch genug sind oder keine Dämme vorhanden sind. Selbst wenn die Schwallwelle aufgrund baulicher oder natürlicher Gegebenheiten im Gewässerbett verbleibt, wird die Schifffahrt beeinflusst es können sich Menschen im Uferbereich aufhalten. Die auftretenden hydraulischen Effekte sind abhängig von der jeweiligen OUGr. In der vorliegenden Arbeit wird die Methode der Datenerhebung für die OUGr Wehranlagen vorgestellt.

Da die Modellierung und Simulation der hydraulischen Effekte einer Schwallwellenausbreitung nach einem Bauwerksversagen ressourcenintensive Verfahren sind, wird ein Ansatz zur Abschätzung der Höhe von Schwallwellen verwendet, bei dem vorhandene Daten genutzt und Informationen kurzfristig verfügbar gemacht werden. Grundlage bildet die Untersuchung unterschiedlicher Ansätze zur Beschreibung und Simulation der Ausbreitung einer Schwallwelle nach dem Versagen eines Wehrfeldes (Musall et al., 2018). Ziel ist die Berechnung der Höhe der Schwallwelle für 245 Wehranlagen, welche als Kriterium in die Priorisierung für die Instandhaltungsplanung aufgenommen wird (siehe Abschnitt 3.3).

Abbildung 25 zeigt den zeitlichen Verlauf einer Schwallwelle in vier unterschiedlichen Zuständen von der Entstehung einer Schwallwelle bis hin zu neuen Wasserspiegellage.

- *Zustand A:* Betrachtet wird der Ausgangszustand von Wehranlage 2. Wehranlage 1 und 3 liegen ober- bzw. unterhalb von Wehranlage 2 und begrenzen das Untersuchungsgebiet aus Oberwasser (OW) und Unterwasser (UW). Die Wasserspiegellagen sind abflussabhängig und weisen in der Realität ein Gefälle auf (grüne Linien). Für die weiteren Erläuterungen werden die Wasserspiegellagen des hydrostatischen Staus (blaue Linien) angenommen.
- *Zustand B:* Unmittelbar nach dem Versagen eines Verschlusses von Wehranlage 2 wird eine Schwallwelle im Unterwasser in Richtung Wehranlage 3 ausgelöst und zeitgleich eine entgegengesetzt laufende Sunkwelle im Oberwasser, die in Richtung Wehranlage 1 läuft. Die Ziffern 1 bis 4 symbolisieren die verschiedenen Phasen der Ausbreitung der Wellen. Die Schwallwelle erreicht im Unterwasser die maximale Höhe  $\Delta h_{\max}$ .
- *Zustand C:* Mit Erreichen von Wehranlage 3 kehrt sich die Richtung der schwächer werdenden Schwallwelle um. Dieser Vorgang (Reflexion) kann sich mehrfach wiederholen und wird von z. B. topographischen Gegebenheiten im Gewässerbett beeinflusst.
- *Zustand D:* Langfristig stellt sich eine ausgeglichene Wasserspiegellage zwischen Wehranlage 1 und 3 ein. Die durchgezogene blaue Linie entspricht dem neuen hydrostatischen Stau bzw. der neuen Wasserspiegellage.

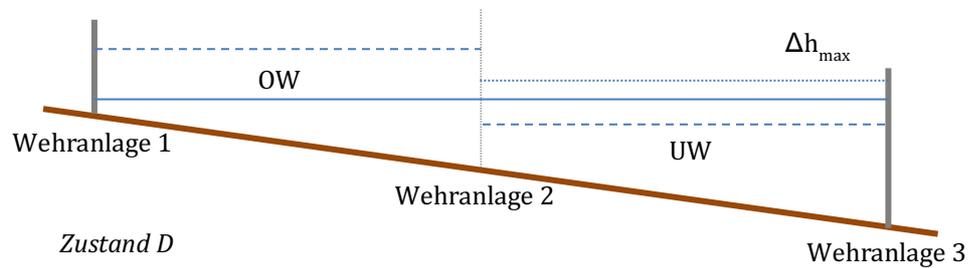
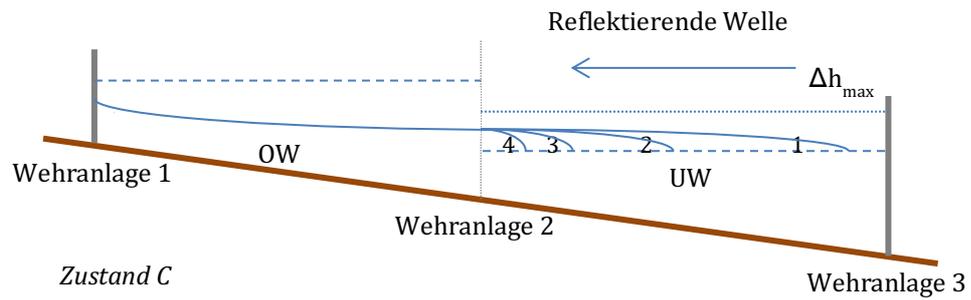
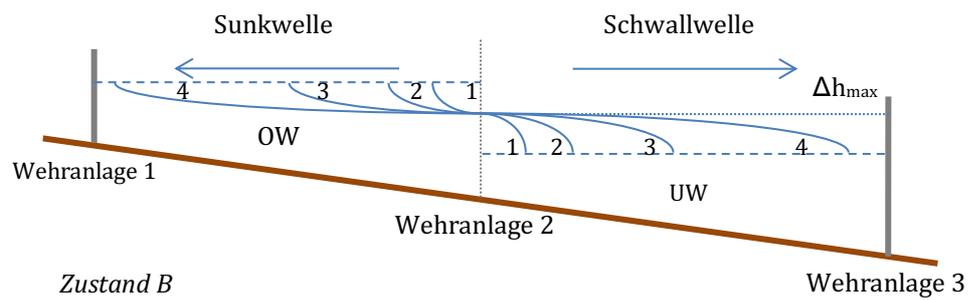
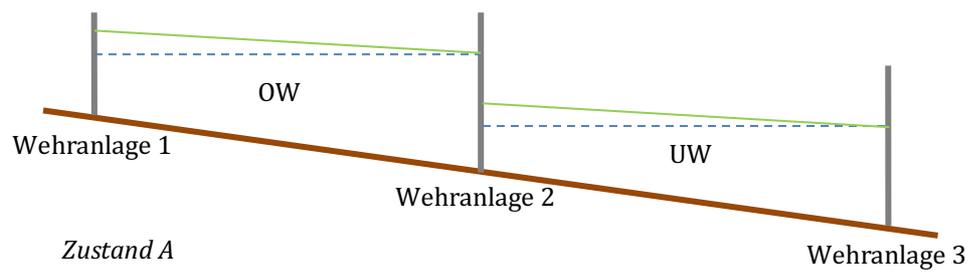


Abbildung 25: Verlauf bis zum Einstellen der neuen Wasserspiegellage (Eigene Darstellung)

Zustand B zeigt, dass die Schwallwelle die maximale Höhe  $\Delta h_{max}$  nicht übersteigt. Unberücksichtigt bleiben bei diesen Überlegungen lokale Effekte. Diese können auftreten, wenn z.B. Einengungen oder Sandbänke im Verlauf des Flussbettes auftreten, weshalb Informationen bspw. zur schmalsten Stelle oder der Wassertiefe im Unterwasser benötigt werden. Außerdem können Wellenreflexionen dazu führen, dass Wellen aufeinandertreffen und ihre Höhe kurzfristig zunimmt (Thorenz, 2017). Wenn die Wasserspiegellage mit der maximalen Höhe  $\Delta h_{max}$  der Schwallwelle als waagerechte Ebene angenommen wird, deckt sie vollständig das Höhenspektrum während der Wellenausbreitung ab. Effekte wie z.B. Reibungsverluste und/oder Verluste durch Überströmung reduzieren die Höhe der Schwallwelle und werden vernachlässigt.

Für die Berechnung der Höhe der Schwallwelle nach dem Versagen eines Wehranlagenverschlusses stehen zwei Verfahren zur Verfügung, die für die Priorisierung der 245 Wehranlagen für die Instandhaltungsplanung mit geringem Zeitaufwand hinreichend genaue Ergebnisse liefern:

- Mit dem *Poleni-Ansatz* kann aus einer vereinfachten Kontinuitätsgleichung – der Zufluss entspricht dem Abfluss – und über die Poleni-Formel die Höhe der Schwallwelle abgeschätzt werden (Thorenz, 2017).
- Für den *Musall-Ansatz* wurden mittels einer Parameterstudie unter Einsatz dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle idealisierte Geometriezustände untersucht, welche sich an den Wehranlagen der Bundeswasserstraßen orientieren (Musall et al., 2018). Mithilfe eines Rechentools wird die Höhe einer Schwallwelle für eine existierende Wehranlage interpoliert.

Durch das Herausbrechen des Verschlussorgans entsteht eine Bresche  $B_W$ , deren Breite einer Wehrfeldbreite der Anlage entspricht. Für die Berechnung wird jeweils die größte Wehrfeldbreite einer Anlage verwendet. Die im Unterwasser entstehende Schwallwelle mit der Höhe  $\Delta h_{UW}$  (siehe Abbildung 26) bewegt sich linear mit der Wellengeschwindigkeit  $c$ . Die Breite der Schwallwelle entspricht der Breite des Unterwassers  $B_{UW}$  resp. der Breite des Flusslaufs unterhalb der Wehranlage. In Abbildung 26 ist mit  $h_{ow}$  die Tiefe des Oberwassers und mit  $h_{UW}$  die Tiefe des Unterwassers bezeichnet.

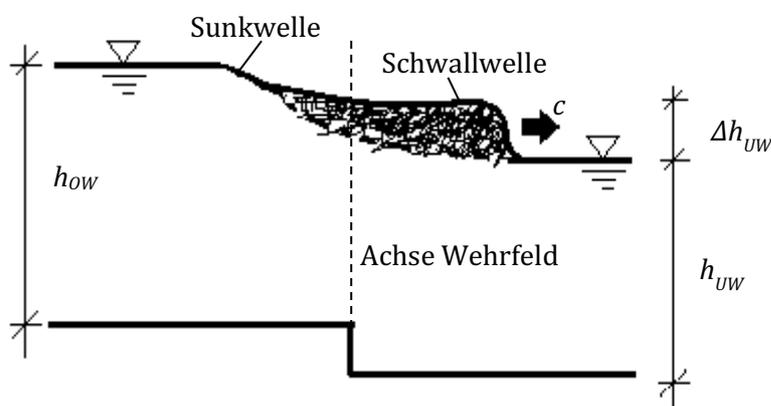


Abbildung 26: Prinzipskizze zur Höhe einer Schwallwelle (Eigene Darstellung)

Für den *Poleni-Ansatz* werden der Abfluss und der Zufluss ermittelt. Der Abfluss über die Wehrschwelle wird mit der allgemeinen Überfallformel für den Rechteckquerschnitt nach *Poleni* ermittelt (siehe DIN 19558; Thorenz, 2017; Musall et al., 2018). Die Geschwindigkeit  $c$  der Welle berechnet sich mit:

$$c \approx \sqrt{g * h_{UW}} \quad (3)$$

$c$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit  
 $g$ : Erdbeschleunigung  
 $h_{UW}$ : Wassertiefe im Unterwasser

Die durchflossene Fläche  $A$  errechnet sich mittels:

$$A = B_{UW} * \Delta h_{UW} \quad (4)$$

$A$ : durchflossene Fläche  
 $B_{UW}$ : Breite des Unterwassers  
 $\Delta h_{UW}$ : Höhe der Schwallwelle

Der Abfluss  $Q_A$  wird durch Multiplikation der durchflossenen Fläche  $A$  mit der Wellengeschwindigkeit  $c$  ermittelt.

$$Q_A = A * c \quad (5)$$

$Q_A$ : Abfluss  
 $A$ : durchflossene Fläche  
 $c$ : Ausbreitungsgeschwindigkeit

Es gilt:

$$Q_Z = Q_A = Q \quad (6)$$

$Q_Z$ : Zufluss  
 $Q_A$ : Abfluss  
 $Q$ : Wehrdurchfluss

Aus der Kontinuitätsgleichung (6) kann mithilfe Poleni-Formel (7) die Höhe der Schwallwelle  $\Delta h_{max}$  (siehe Abbildung 26) abgeschätzt werden:

$$Q_Z = \frac{2}{3} \mu * B_W * \sqrt{2g} * h_{OW}^{3/2} \quad (7)$$

$Q_Z$ : Zufluss  
 $\mu$ : Überfallbeiwert  
 $B_W$ : Breite der Bresche  
 $g$ : Erdbeschleunigung  
 $h_{OW}$ : Wassertiefe im Oberwasser

Der Überfallbeiwert  $\mu$  in Formel (7) ist ein Korrekturwert, der die Abweichung zwischen der theoretisch aufgestellten oder abgeleiteten Überfallformel und dem real auftretenden Abfluss definiert (Aigner, 2008). Zur Vereinfachung wird angenommen, dass  $\mu \approx 0,6$  ist (Thorenz, 2017). Die Breite der Bresche entspricht der Breite des herausgebrochenen Verschlusses resp. einer Wehrfeldbreite.

Formel (8) beschreibt, dass die Sunkwelle im Oberwasser mit dem Wert null angenommen und somit vernachlässigt wird. Die Vernachlässigung der Sunkwelle im OW führt zu einer rechnerischen Überschätzung von  $Q_z$  und in der Folge zu einer Überschätzung der Höhe der Schwallwelle  $\Delta h_{UW}$ .

$$\Delta h_{OW} = \frac{Q_z}{B_{OW} * \sqrt{g * h_{OW}}} \rightarrow 0 \quad (8)$$

$\Delta h_{OW}$ : Änderung der Wassertiefe im Oberwasser durch die Sunkwelle

$Q_z$ : Zufluss

$B_{OW}$ : Breite des Oberwassers / der Wehranlage

$g$ : Erdbeschleunigung

$h_{OW}$ : Wassertiefe im Oberwasser

Ein Ersetzen von  $c$  gemäß Formel (3) bzw.  $A$  gemäß Formel (4) und ein Umformen von Formel (5) ergeben:

$$\Delta h_{UW} = \frac{Q}{B_{UW} * \sqrt{g * h_{UW}}} \quad (9)$$

Gemäß Gleichung (6) wird  $Q$  ersetzt durch  $Q_z$  und einsetzen von  $Q_z$  aus (7) ergibt:

$$\Delta h_{UW} = \frac{2}{3} \mu * \frac{B_W * \sqrt{2g * h_{OW}^3}}{B_{UW} * \sqrt{g * h_{UW}}} \quad (10)$$

Erneutes umformen ergibt (11):

$$\Delta h_{UW} = \frac{2}{3} \mu * \frac{B_W}{B_{UW}} * \frac{\sqrt{2} * \sqrt{h_{OW}} * h_{OW}}{\sqrt{h_{UW}}} \quad (11)$$

Die durch die Vernachlässigung der Sunkwelle in (8) überschätzte, maximale Höhe der Schwallwelle  $\Delta h_{max}$  ergibt sich somit zu:

$$\Delta h_{max} \cong \frac{2}{3} \mu * \frac{B_W}{B_{UW}} * \sqrt{2} * h_{OW} * \sqrt{\frac{h_{OW}}{h_{UW}}} \quad (12)$$

$$\Delta h_{max} \cong \frac{0,6 * \frac{B_W}{B_{UW}} * h_{OW} * \sqrt{\frac{h_{OW}}{h_{UW}}}}{\underline{\underline{\quad}}} \quad (13)$$

$\Delta h_{max}$ : Höhe der Schwallwelle

$B_W$ : Breite der Bresche

$B_{UW}$ : Schmalste Stelle im Flussbett

$h_{OW}$ : Wassertiefe im Oberwasser

$h_{UW}$ : Wassertiefe im Unterwasser

Im Vergleich liegen die Ergebnisse der Berechnung der Schwallwellenhöhe mit dem Poleni-Ansatz (13) bis zu 100 % höher als die Ergebnisse einer 3D-Simulation (Musall et al., 2018). Da die für eine 3D-Simulation notwendigen Daten von allen 245 Wehranlagen nicht vorliegen oder kurzfristig ermittelt werden können, kann dieser Ansatz dennoch bis zum Aufholen dieser Defizite verwendet werden (vgl. 2.1.3.1). Bei eigenen Analysen der verfügbaren Daten hat sich gezeigt, dass bei einem Großteil der Wehranlagen keine Daten zu den Wassertiefen im UW und den Breiten des Flussbetts vorliegen. Hier wären händische Messungen im GIS möglich, die jedoch nur zu weiteren Ungenauigkeiten führen würden, sodass der Poleni-Ansatz nicht weiterverfolgt wird.

Für den *Musall-Ansatz* erfolgt zunächst eine Zusammenstellung aller verfügbaren Daten der Wehranlagen der Bundeswasserstraßen und eine Gruppierung nach relevanten Merkmalen und der Häufigkeit ihres Auftretens (Musall et al., 2018; siehe Anhang IV, S. 197):

- Anzahl der Wehrfelder: 1 bis 5,
- Stau- bzw. Fallhöhe der Wehranlage (Differenz der Wasserspiegellagen von Ober- und Unterwasser): 1 m, 3 m, 5 m und 8 m,
- Unterwassertiefe: 1,5 m, 3,5 m und 5,5 m,
- Sohlspung (auch Sohlabsturz oder Wehrhöcker) am Wehrboden: 0 m, 1 m und 4 m

Aus der Gruppierung in Tabelle 65 ergeben sich 36 synthetische Typen von Wehranlagen, für die mithilfe des 3D-Strömungsmodells 3D-HN die hydraulischen Größen Wellenhöhe  $\Delta h$ , die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der Breschendurchfluss  $q$  ermittelt werden. Die Simulationsergebnisse werden mit den Ergebnissen aus den Berechnungen mit im Wasserbau allgemein bekannten Methoden wie z.B. der Flachwassergleichung, den Ansätzen von Preß/Schröder, von Martin sowie von Ritter/Stoker verglichen. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Höhe der Schwallwelle bzw. der Differenz bei einer möglichen Unter- oder Überschätzung der Ergebnisse der Simulation durch die Rechenergebnisse (Musall et al., 2018). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgt eine Modifikation der Methoden auf den Spezialfall des Versagens von Wehranlagen. Da für die drei entwickelten Ansätze von Musall et al. (2018) nicht eindeutig zu ermitteln ist, welcher Ansatz die „besseren“ Ergebnisse liefert, sind alle drei in einer MS Excel-Anwendung integriert.

Für die Berechnung der Höhe der Schwallwelle mit dem Musall-Ansatz werden für alle Wehranlagen die Anzahl und Breite der Wehrfelder sowie die Fallhöhe aus dem Bauwerksverzeichnis

bzw. der Wasserstraßendatenbank (WADABA) zusammengestellt. Bei den wenigen fehlenden Daten wird der Mittelwert aus den vorhandenen Daten verwendet, was in der MS Excel-Anwendung farblich markiert ist. Als Sohlabsturz bzw. Unterwassertiefe wird aufgrund der wenigen vorhandenen Daten für alle Wehranlagen einheitlich 1 m bzw. 3,5 m festgelegt, was den Werten der Gruppe mit den meisten Wehranlagen entspricht, sodass schließlich für alle Wehranlagen die entsprechenden Werte gegeben sind.

Die Berechnungen erfolgen zunächst mit allen drei Ansätzen, wobei final der jeweils höchste Wert für die Höhe der Schwallwelle in die Priorisierung eingeht, sodass auch hier die Höhe der Schwallwelle tendenziell überschätzt ist. Tabelle 23 zeigt als Beispiel die mit dem Musall-Ansatz berechneten Höhen der Schwallwelle für die Wehranlagen an der Saar im Vergleich zu ihren Fallhöhen (Differenz OW-UW). In Relation zu den Fallhöhen fallen die Höhen der Schwallwellen unterschiedlich aus. So liegen die Fallhöhen der Wehranlagen 2136304003 und 2136706006 mit 5,69 m bzw. 5,95 dicht beieinander, die Höhen der Schwallwellen zeigen mit 2,54 m bzw. 0,03 m einen deutlichen Unterschied, was auf die Eingangsgrößen zur Berechnung der Höhe der Schwallwelle gemäß Musall-Ansatz liegt. Diese sind neben der Fallhöhe auch die Wehrfeldbreite und die Breite des Flussbettes, bei denen sich die Wehranlagen erheblich voneinander unterscheiden können. Die Ableitung der Schadenspotenziale anhand der Fallhöhen von Wehranlagen in DIN 19700-13:2019 (siehe Tabelle 6) wird mit den Ergebnissen des Musall-Ansatzes im Hinblick auf eine Priorisierung für die Instandhaltungsplanung aussagekräftig ergänzt.

Tabelle 23: Höhen der Schwallwellen an der Saar (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	Fallhöhe [m]	Höhe der Schwallwelle [m]
2136304003	5,69	2,54
2136504003	14,50	6,09
2136504004	11,00	3,27
2136706001	3,80	0,83
2136706004	8,00	1,67
2136706006	5,95	0,03
2136908001	2,41	1,00

Anhand Abbildung 25 lässt sich nachvollziehen, dass nicht nur die Schwallwelle im Unterwasser, sondern auch die Sunkwelle im Oberwasser Konsequenzen für verschiedene Nutzergruppen nach sich ziehen kann. Diese sind bspw. die Unterbrechung des Schiffsverkehrs oder auch die Beeinträchtigung der Brauchwasserentnahme im OW für die Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen, welche bereits über die Kosten der Verkehrsunterbrechung bzw. den Werten aus der Flächennutzungsanalyse in die Priorisierung in Abschnitt 3.3 integriert werden. Der hydraulische Parameter ist somit vorrangig ein Indikator für die Gefährdung durch eine Schwallwelle im UW im Versagensfall einer Wehranlage.

### 3.2.2.4 Wiederherstellungskosten für das Objekt

Für die Ermittlung der Höhe der außerordentlichen Kosten, die dem Infrastrukturbetreiber bei einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen entstehen, werden als Maximalwert die Wiederherstellungskosten als Indikator zu Grunde gelegt. Die Wiederherstellungskosten betreffen den Infrastrukturbetreiber direkt und werden der Konsequenzenklasse Strukturell (Infrastrukturbetreiber, S) zugeordnet. Sie bilden den Schaden ab, der dem Infrastrukturbetreiber selbst entsteht. Die Ermittlung der Kosten für die Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit und der Verkehrssicherheit eines Verkehrswasserbauwerks hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab, die wichtiger Bestandteil strategischer Planungen sind. Bislang werden derartige Kosten dezentral von den zuständigen Ämtern in der WSV erfasst und können nicht flächendeckend ausgewertet werden.

Für eine erste Orientierung werden drei unterschiedliche Wertermittlungsverfahren für Immobilien in Deutschland hinsichtlich ihrer Eignung als Vorlage für die Wertermittlung für Verkehrsinfrastrukturen geprüft (ImmoWertV 2007).

- Das *Vergleichswertverfahren* (§§ 15-16 ImmoWertV) kommt in der deutschen Immobilienbewertung bei der Wertermittlung des Bodenwerts von Grundstücken zur Anwendung. Trotz der restriktiven Anforderungen an Vergleichsobjekte und einem möglichen Mangel an zeitnahen Transaktionen ist eine Anwendung auch bei bebauten Grundstücken möglich (Hellerforth, 2012). Für die Ermittlung der Wiederherstellungskosten von Verkehrsinfrastrukturen ist jedoch weniger der Bodenwert, als vielmehr der Wert des Objektes selbst von Interesse.
- Das *Ertragswertverfahren* (§§ 17-20 ImmoWertV) bestimmt den Objektwert anhand der zu erwartenden zukünftigen Immobilienerträge. Der Wert ergibt sich hierbei aus der Summe der Barwerte aller bei ordnungsgemäßer Bewirtschaftung eines Grundstücks nachhaltig erzielbaren Reinerträge einschließlich des Barwerts des Bodenwertes (Kleiber, 2010). Dieses Verfahren ist somit nicht für öffentliche Infrastrukturbauwerke geeignet.
- Das *Sachwertverfahren* (§§ 21-23 ImmoWertV) steht in der WertV gleichrangig neben dem Vergleichs- und Ertragswertverfahren, wird im Wesentlichen aber nur zur Plausibilisierung der beiden anderen Ansätze verwendet, in denen es insbesondere zur Identifikation von Marktungleichgewichten dienen kann. Das Verfahren wird nachfolgend verwendet, da gemäß ImmoWertV „*der Wert der baulichen Anlagen, wie Gebäude, Außenanlagen und besondere Betriebs-einrichtungen, und der Wert sonstiger Anlagen, getrennt vom Bodenwert, nach Herstellungswerten zu ermitteln*“ ist und somit die Wiederherstellungskosten ermittelt werden können.

Gemäß DIN 276-1 sind Kosten im Bauwesen „*Aufwendungen für Güter, Leistungen, Steuern und Abgaben, die für die Vorbereitung, Planung und Ausführung von Bauprojekten erforderlich sind*“. Die Kosten bei Projekten der Öffentlichen Hand setzen sich wie im Sachwertverfahren aus den reinen Baukosten (Instandsetzungs- oder Neubaukosten) sowie aus den Kosten für Ausführungsplanung, Abbruch, Baubehelfe sowie Verkehrsführung zusammen (Bödefeld, Brockelmann, 2019).

Für die Verkehrswasserbauwerke des Bundes stehen keine Daten zur Verfügung, mit denen der Wiederbeschaffungswert für die Budgetierung der Instandhaltungskosten berechnet werden kann (siehe Abschnitt 3.4.2.4). Daher wurden auf Basis der Neubaukosten von 13 Wehranlagen der WSV von Bödefeld und Brockelmann (2019) Schätzfunktionen für die Neubaukosten von Wehranlagen abgeleitet. Die Analysen zeigen einen direkten Zusammenhang zwischen den Kosten  $K$ , der Verschlusshöhe  $H$  und der Wehrfeldbreite  $B$  (lichte Weite zwischen den Pfeilern). Die prozentuale Verteilung der Bauausgaben ist über alle Wehrtypen homogen. Danach beträgt der relative Anteil an den Gesamtkosten (Bödefeld, Brockelmann, 2019) ca. 65 % für den Massivbau (Mb) und ca. 25 % für den Stahlbau (Stb). Unter Berücksichtigung des Baupreisindex berechnen sich die Massivbaukosten  $K_{Mb}$  eines Wehres zu (Bödefeld, Brockelmann, 2019):

$$K_{Mb} = 320000 * (B * H^2)^{0,43} \text{ [€]} \quad (14)$$

$K_{Mb}$ : Kosten Massivbau

$B$ : Wehrfeldbreite

$H$ : Verschlusshöhe

Die Verschlusskosten  $K_{Stb}$  eines Wehres berechnen sich unter Berücksichtigung des Baupreisindex zu (Bödefeld, Brockelmann, 2019):

$$K_{Stb} = 85000 * (B^2 * H^2)^{0,33} \text{ [€]} \quad (15)$$

$K_{Stb}$ : Kosten Stahlbau

$B$ : Wehrfeldbreite

$H$ : Verschlusshöhe

Für den verwendeten Datensatz der 245 Wehranlagen wird im Folgenden in den Formeln anstatt der Verschlusshöhe  $H$  durchgehend die Fallhöhe  $h$  verwendet, da diese vergleichbare Werte wie die Verschlusshöhe annimmt und vor allem, weil dieser Wert für den Großteil der Wehranlagen erfasst ist. Bei fehlenden Angaben wird der Mittelwert der Fallhöhe verwendet, sodass für alle 245 Wehranlagen die Wiederherstellungskosten berechnet werden. In der MS Excel Anwendung sind händisch vorgenommene Ergänzungen farblich markiert. Bei den entwickelten Kostenfunktionen handelt es sich um Schätzfunktionen, die von einem kleinen Datensatz abgeleitet wurden (Bödefeld, Brockelmann, 2019). Da es sich bei den Realdaten um durchgeführte Maßnahmen kleinerer Wehranlagen handelt, werden die Kosten für große Wehranlagen mit diesen Schätzfunktionen tendenziell unterschätzt. Mit der Realisierung weiterer Neubaumaßnahmen kann sich nicht nur die Datengrundlage, sondern können auch die Schätzfunktionen sukzessive verbessert werden.

Tabelle 24: Größe und Wiederherstellungskosten der Wehre an der Saar (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	Fallhöhe [m]	Anzahl Wehrfelder	Breite der Wehrfelder [m]				Wiederherstellungskosten [€]
2136304003	5,69	4	16,5	16,5	16,5	16,5	22.320.000
2136504003	14,50	3	16,5	16,5	16,5	-	17.820.000
2136504004	11,00	3	16,5	16,5	16,5	-	17.820.000
2136706001	3,80	3	16,5	16,5	16,5	-	17.820.000
2136706004	8,00	3	16,5	16,5	16,5	-	17.820.000
2136706006	5,95	3	13,0	13,0	13,0	-	17.540.000
2136908001	2,41	2	25,1	25,1	-	-	14.008.000

Die Summe der berechneten Wiederherstellungskosten aller Bauwerke entspricht dem Anlagevermögen  $A$ .

$$A = \sum_{i=1}^n (K_{Mb,i} + K_{Stb,i}) \quad (16)$$

$A$ : Anlagevermögen

$K_{Mb,i}$ : Kosten des Massivbaus für die Wehranlage  $i$

$K_{Stb,i}$ : Kosten des Stahlbaus für die Wehranlage  $i$

Mit den ermittelten Wiederherstellungskosten ergibt sich nach eigenen Berechnungen ein Anlagevermögen von 2,125 Mrd. € aus der Summe der Einzelwerte für den Datensatz der 245 Wehranlagen. Tabelle 24 listet die Wiederherstellungskosten für die Wehranlagen an der Saar auf.

### 3.2.3 Zusammenfassung und Visualisierung der Ergebnisse

Die nachfolgenden Diagramme zeigen für drei Wehranlagen an der Saar eine Übersicht zu den ermittelten Werten (siehe Abbildung 27 bis Abbildung 29). Die hinterlegten Netzdiagramme sind normiert, sodass der jeweilige Maximalwert eines Indikators dem Wert 1,0 entspricht. Grundlage für die Ermittlung des Maximalwertes sind die Daten aller 245 Wehranlagen. Jede Wehranlage hat somit ein objektspezifisches Profil, was sich als dunkle Fläche im Diagramm aufspannt. Diese Fläche zeigt, wie sich eine einzelne Wehranlage im Vergleich zu allen anderen Wehranlagen positioniert. Die Form der Fläche ist somit direkt abhängig von den referenzierten Daten. Ein Eckpunkt der Fläche mit einem Wert nahe 1 bedeutet, dass dieser Indikator der Wehranlage einen hohen Wert in Relation zu allen anderen Wehranlagen aufweist. Für jede Wehranlage ist somit erkennbar, in welchen Bereichen mögliche Konsequenzen ihren Schwerpunkt haben oder ob das Objekt im Vergleich zu den anderen Wehranlagen zu den eher großen und somit teuren Anlagen gehört. Abbildung 27 bis Abbildung 29 zeigen die Diagramme von drei Wehranlagen an der Saar mit unterschiedlichen Profilen. Der Wert für die Wiederherstellungskosten der Wehranlage 2136304003 in Abbildung 27 liegt mit einem Wert zwischen 0,5 und 0,8 in der oberen Hälfte der

Werte der Grundgesamtheit aller 245 Wehranlagen und ist höher als die Werte der Wehranlagen 2136706006 in Abbildung 28 und 213908001 in Abbildung 29. Die Werte der Wehranlage 2136706006 in Abbildung 28 nimmt im Vergleich zwischen den drei Wehranlagen die höchsten Werte an, liegt in Relation zu allen 245 Wehranlagen jedoch nur im Mittelfeld. Abschließend ist festzuhalten, dass die Diagramme keine Risikoanalyse bzw. Auseinandersetzung mit den Daten der Wehranlagen oder den Gegebenheiten vor Ort ersetzen, sie geben dennoch einen visuellen Hinweis zur Positionierung des Einzelobjekts im Gesamtportfolio der Wehranlagen hinsichtlich zu erwartender Konsequenzen nach einem Funktionsausfall und Bauwerksversagen.

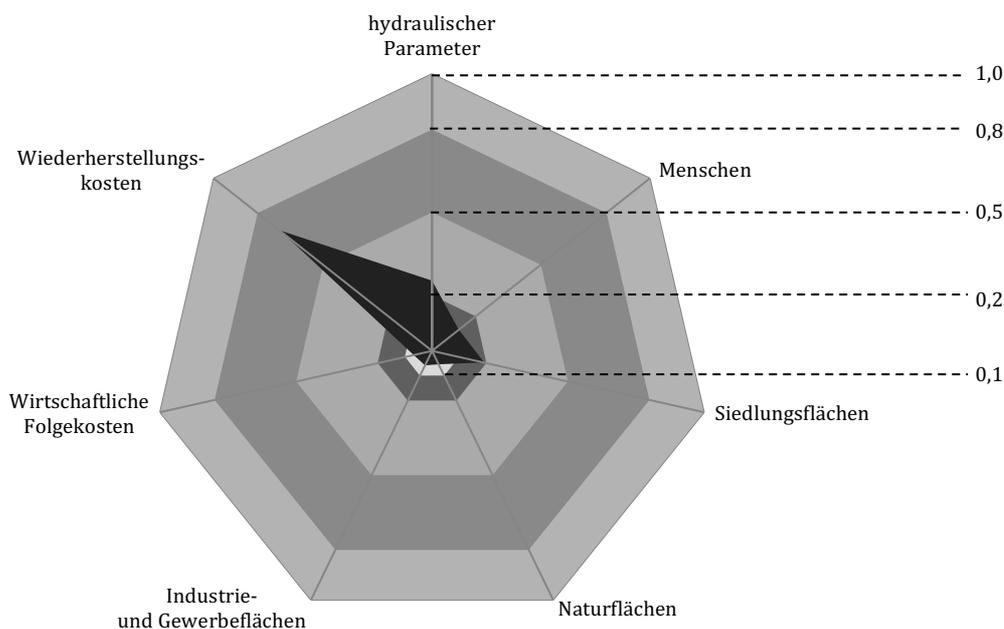


Abbildung 27: Diagramm zu den ermittelten Indikatoren der Wehranlage 2136304003 (Eigene Darstellung)

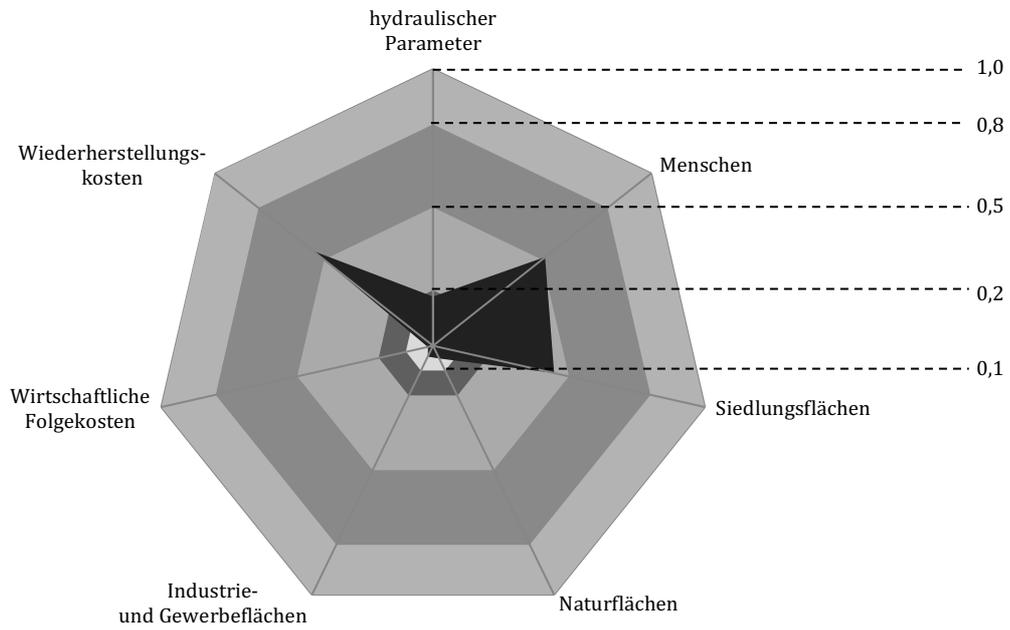


Abbildung 28: Diagramm zu den ermittelten Indikatoren der Wehranlage 2136706006 (Eigene Darstellung)

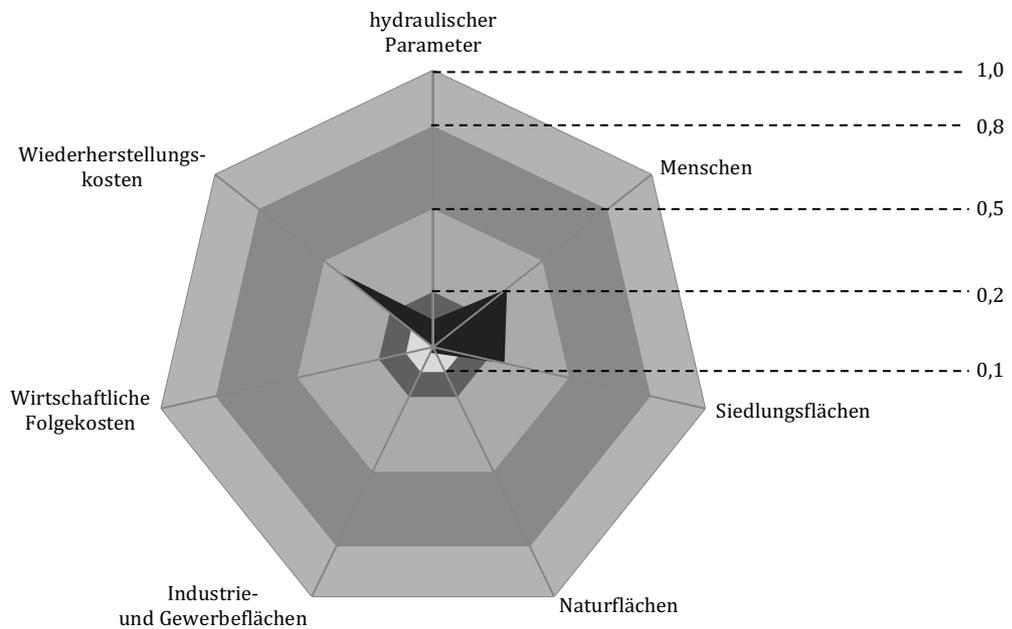


Abbildung 29: Diagramm zu den ermittelten Indikatoren der Wehranlage 2136908001 (Eigene Darstellung)

Die erhobenen Daten (siehe Tabelle 25) bilden die Basis für die sich in Abschnitt 3.3 anschließende Priorisierung, bei der die Werte aus den Flächenanalysen, die Kosten durch Verkehrsunterbrechung und die Höhe der Schwallwelle berücksichtigt werden.

Tabelle 25: Ergebnis der Datenerhebung für die Wehranlagen an der Saar (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	Wiederherstellkosten [€]	Hydr. Parameter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungsflächen [m <sup>2</sup> ]	Naturflächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbeflächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrsunterbrechung [€]
2136304003	22320000	2,54	26744	10019792	21002795	22050594	0,80
2136504003	17820000	6,09	13151	6775568,4	29749444	14872910	1,58
2136504004	17820000	3,27	24130	10597711	40532572	20722502	2,14
2136706001	17820000	0,83	74315	20069271	21907040	19490729	2,07
2136706004	17820000	1,67	48042	15411947	30482477	25261419	0,71
2136706006	17540000	0,03	112140	23311687	19475275	16216310	4,59
2136908001	14008000	1,00	73804	13789231	9287631	8989940,5	4,99

Die Wiederherstellungskosten werden nicht für die Priorisierung verwendet, da angenommen wird, dass die Höhe der Kosten nicht maßgeblich für die Entscheidung für oder gegen eine Maßnahme eines öffentlichen Infrastrukturbetreibers ist, sondern ausschließlich die Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen. Die Wiederherstellungskosten werden in Abschnitt 3.4.2.4 für die Budgetierung der Instandhaltungskosten im Rahmen der Entscheidungsunterstützung verwendet.

### 3.3 Risiko-basierte Prioritätsbewertung der Verkehrswasserbauwerke

Aus den Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse wurde in Abschnitt 2.3.3.3 die Outranking-Methode PROMETHEE II für die risiko-basierte Priorisierung der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung ausgewählt.

#### 3.3.1 Konzept und Anwendung der Methode PROMETHEE II

Die Methode PROMETHEE II gehört zu den Outranking-Methoden der Europäischen Schule der MCDA und wurde erstmals von Brans, Vincke und Mareschall (1986) veröffentlicht. Ziel dieser Methode ist es, die optimale Lösung zu finden und eine Rangliste zu erzeugen. Jedoch soll der Anwender nicht einfach dieser Lösung vertrauen, sondern auch die Entstehung der Rangfolge nachvollziehen können und darin unterstützt werden, Präferenzen und gewählte Gewichtungen zu hinterfragen.

PROMETHEE II ist eine Methode der MCDA, bei der die Differenz  $d$  eines Kriteriums zweier Alternativen A und B ermittelt und mithilfe einer Präferenzfunktion bestimmt wird, wie stark diese Differenz zu einer Präferenz von Variante B gegenüber Variante A beiträgt. Auf diese Weise werden Präferenzgrade  $\pi$  ermittelt, welche zwischen 0 und 100 % liegen. Je höher der Präferenzgrad  $\pi$  ist, umso stärker wird Variante B gegenüber Variante A bevorzugt. Mit dieser Methode wird bei einem Vergleich der Varianten keine symmetrische, reziproke Matrix entwickelt, d.h. die Favorisierung der Variante B gegenüber Variante A erzeugt keinen Kehrwert für den Vergleich der Variante A mit Variante B. Wenn eine Variante nicht favorisiert wird, beträgt ihr Präferenzgrad 0. Für die Bestimmung der Präferenzgrade werden für jedes Kriterium die jeweiligen Präferenztypen bzw. -funktionen und ggf. notwendige Schwellenwerte festgelegt. Die Verwendung von Schwellenwerten bietet sich an, wenn die Differenz zwischen Parametern bis zu bzw. ab einem bestimmten Wert keinen Einfluss auf die Präferenz hat. Brans et al. (1986) definieren sechs Präferenzfunktionen, welche die Präferenzaussagen des Entscheidungsträgers in Ausprägungsdifferenzen übersetzen:

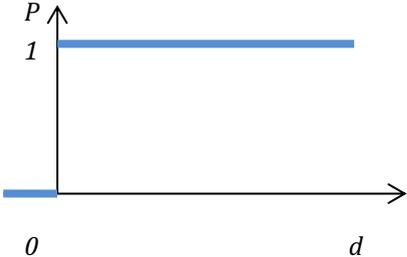
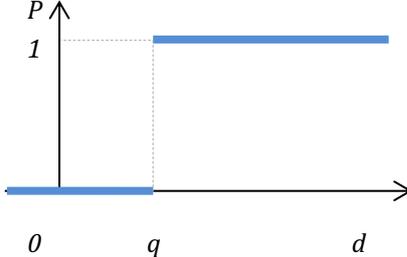
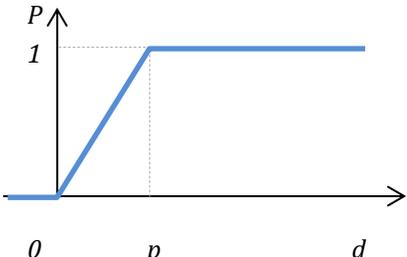
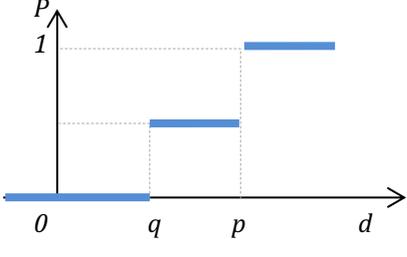
- Die *Typ-1*-Präferenzfunktion formalisiert einfache Ja-Nein-Entscheidungen, bei denen es auf das Vorhandensein eines Attributes ankommt. Beispiel: Ein Kunde möchte einen PKW mit einer Klimaanlage kaufen. Hat Fahrzeug B eine Klimaanlage und Fahrzeug A nicht, wird B gegenüber A eindeutig präferiert und der Kunde entscheidet sich für Fahrzeug B.
- Die Präferenzfunktion *Typ 2* ähnelt Typ 1 und ermöglicht zusätzlich das Abbilden einer Präferenz, die ab einem vom Entscheidungsträger zu definierenden Schwellenwert zum Tragen kommt, was folgendes Beispiel veranschaulicht: Car-Sharing lohnt sich bis zu einer jährlichen Fahrleistung von bis zu 10.000 Kilometern, darüber hinaus ist es günstiger einen eigenen Pkw zu besitzen.
- Die *Typ-3*-Präferenzfunktion bildet einen stetigen linearen Anstieg der Präferenz ab, das heißt dass mit größer werdendem Unterschied die Präferenz zunimmt. Ab einem zu definierenden Präferenzwert  $p$ , was der Differenz zwischen der Kriterienausprägung bei zwei Alternativen A und B entspricht, wird immer Alternative B gewählt, auch wenn die Differenz darüber hinaus

weiter zunimmt. Beispiel: Ein Kunde kauft seinen Kaffee immer in Geschäft A. Wird der Preis für Kaffee in Geschäft B reduziert, steigt die Präferenz, in diesem Geschäft zu kaufen, mit zunehmender Ersparnis. Ab einer Reduzierung von 3,- € wird der Kaffee immer in Geschäft B gekauft.

- Die Präferenzfunktion *Typ-4* ermöglicht „Präferenzsprünge“. Zwischen die Bereiche Indifferenz und strikte Präferenz wird ein Bereich mit schwacher Präferenz eingefügt. Beide Schwellenwerte müssen vom Entscheidungsträger definiert werden. So ist zum Beispiel ein Mobilfunknutzer bis zu einer Differenz von 2 MB monatlichem Datenvolumen indifferent zwischen zwei Anbietern. Zwischen 2 MB und 5 MB ist der Bereich schwacher Präferenz, wobei der Kunde nicht zwischen bspw. 2 MB oder 4 MB unterscheidet. Ab einer Differenz von 5 MB und mehr gilt strikte Präferenz für einen Anbieterwechsel bezüglich dieses Kriteriums.
- Die *Typ-5*-Präferenzfunktion ähnelt dem *Typ-3* sich und bildet ebenfalls einen stetigen linearen Anstieg der Präferenzen ab. *Typ 5* hat zudem einen Indifferenzbereich und ermöglicht somit die Abbildung von Präferenzen, die ab einem zu definierenden Schwellenwert linear zunehmen und schließlich den Präferenzwert annehmen, wie zum Beispiel im folgenden Fall: Ist der Preis einer Sorte Kaffeebohnen in Geschäft A nicht teurer als 50 Cent pro Kilogramm im Vergleich zu Geschäft B, kauft ein bestimmter Kunde immer in Geschäft A. Wird der Preis für den Kaffee in Geschäft B darüber hinaus reduziert, steigt die Präferenz in diesem Geschäft zu kaufen mit zunehmender Ersparnis. Ab einer Reduzierung von 3,- € wird der Kaffee immer in Geschäft B gekauft.
- Die *Typ-6*-Präferenzfunktion ist als streng wachsende Gauß-Kurve modelliert. Die Verwendung erfolgt bei leichter Präferenz, die bis zu einem festzulegenden Wert, dem Wendepunkt, zunehmend ansteigt und dann langsamer werdend gegen die absolute Präferenz konvergiert. Es müssen vom Entscheidungsträger keine Schwellenwerte, aber die Position des Wendepunkts festgelegt werden. So erfordert bspw. die Infektion mit einem gefährlichen Krankheitserreger von wenigen Personen pro Jahr nicht zwingend zusätzliche Maßnahmen, wenn diese Zahl kaum von den üblichen Werten abweicht. Bei steigenden Infektionszahlen zeigt sich jedoch eine Tendenz zu stärkeren Maßnahmen wie einer gesetzlichen Impfpflicht. Die Präferenz steigt zunächst überproportional. Bei einer weiteren Zunahme über den zu definierenden Wendepunkt hinaus, beeinflusst die steigende Anzahl Neuinfektionen immer weniger diese Tendenz. Die Präferenz nimmt langsamer zu.

Tabelle 26 zeigt die Schaubilder für die sechs beschriebenen Präferenzfunktionen, benennt die Gleichung und die festzulegenden Parameter. In den Schaubildern entsprechen die x-Achsen den Differenzbeträgen  $d$  zwischen Kriterienausprägungen im paarweisen Vergleich zweier Alternativen und die y-Achse bildet den Präferenzgrad  $P$  ab.

Tabelle 26: Präferenzfunktionen der Methode PROMETHEE (Brans et al., 1986)

Schaubild der Präferenzfunktion	Präferenzfunktion	Festzulegende Parameter
<p>Typ 1</p>  <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1. The function is 0 for d ≤ 0 and 1 for d &gt; 0.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	-
<p>Typ 2</p>  <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1. A vertical dashed line is drawn at d=q. The function is 0 for d ≤ q and 1 for d &gt; q.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
<p>Typ 3</p>  <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1. A vertical dashed line is drawn at d=p. The function is 0 for d ≤ 0, increases linearly from (0,0) to (p,1), and is 1 for d &gt; p.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
<p>Typ 4</p>  <p>The graph shows a coordinate system with a vertical axis labeled 'P' and a horizontal axis labeled 'd'. The origin is marked '0'. A horizontal line is drawn at P=1. A vertical dashed line is drawn at d=q. Another vertical dashed line is drawn at d=p. The function is 0 for d ≤ q, jumps to 1/2 at d=q, jumps to 1 at d=p, and is 1 for d &gt; p.</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 26: Präferenzfunktionen der Methode PROMETHEE (Brans et al., 1986)

Schaubild der Präferenzfunktion	Präferenzfunktion	Festzulegende Parameter
<p>Typ 5</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	<p><math>p, q</math></p>
<p>Typ 6</p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	<p><math>s</math></p>

- d Differenzbetrag der Kriterienausprägungen im paarweisen Vergleich zweier Alternativen
- P Präferenzgrad  $\pi$
- q Schwellenwert Indifferenz
- p Schwellenwert Präferenz
- s Scheitelpunkt

Nach Zusammenstellung der paarweisen und [1,0]-skalierten Differenzbeträge in einer  $n \times n$ -Matrix für  $n$  Alternativen werden diese Werte entsprechend der Vorgaben des ET gewichtet. Für PROMETHEE ist keine spezielle Methodik zur Ermittlung der Gewichtung  $w_j$  der jeweiligen Kriterien vorgeschrieben. Die einzige Bedingung ist, dass die Summe aller Gewichte  $w_j$  1 ist:

$$\sum w_j = 1 \tag{17}$$

$w_j$ : Kriteriengewichtung

Nach Ermittlung der Paarvergleiche auf Grundlage der verallgemeinerten Kriterien werden alle Alternativen bezüglich ihrer gewichteten Kriterien dargestellt:

$$\pi: \begin{cases} A \times A \rightarrow [1,0] \\ \pi(A_i, A_j) = \sum_{k=1}^K w_k * p_k(A_i, A_j) \end{cases} \quad (18)$$

$\pi(A_i, A_j)$ : Präferenzgrad der Alternative  $A_i$  gegenüber der Alternative  $A_j$

$w_k$ : Kriteriengewichtung

$p_k(A_i, A_j)$ : Präferenz der Alternative  $A_i$  gegenüber  $A_j$

Auf Grundlage dieser Paarvergleichsmatrix können die Aus- und Eingangsflüsse ermittelt werden. Diese zeigen, wie stark Alternative  $A_i$  die anderen Alternativen dominiert (positiver Fluss, Gleichung 5) und wie stark die anderen Alternativen  $A_j$  im Vergleich mit  $A_i$  bevorzugt werden (negativer Fluss, Gleichung 6). Dafür werden in der Matrix die Präferenzgrade zeilenweise für den positiven Fluss bzw. spaltenweise für den negativen Fluss summiert und normiert. Ziel ist die Herstellung einer globalen Ordnung mithilfe der Differenz beider Größen (Nettofluss, Gleichung 7).

$$\Phi_i^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K \pi(A_i, A_j) \quad (19)$$

$$\Phi_i^- = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^K \pi(A_j, A_i) \quad (20)$$

$$\Phi_i^{net} = \Phi_i^+ - \Phi_i^- \quad (21)$$

$\Phi_i^+$ : Ausgangsfluss

$\Phi_i^-$ : Eingangsfluss

$\Phi_i^{net}$ : Nettofluss

$K$ : Kriterium zur Prüfung der Zielerreichung

$\pi(A_i, A_j)$ : Präferenzgrad der Alternative  $A_i$  gegenüber der Alternative  $A_j$

Diese vollständige Präordnung liefert über eine absteigende Reihung Anhaltspunkte für die beste Lösung unter den gewählten Bedingungen. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse (siehe Abschnitt 3.3.3) wird die Lösung auf den Einfluss der Eingangsparameter insbesondere der Gewichtungsfaktoren und damit die Empfindlichkeit der Ordnung gegenüber Veränderungen untersucht.

Geldermann und Lerche (2014) nennen für die Anwendung der Methode PROMETHEE II neun durchzuführende Schritte, wobei der letzte Schritt die Sensitivitätsanalyse beinhaltet, auf die in Kapitel 3.3.3 detailliert eingegangen wird. Die ersten acht Schritte werden nachfolgend kurz für das Beispiel der OUGr Wehranlagen erläutert:

- *Definition des Entscheidungsproblems*: Ziel für die Verkehrsinfrastruktur Wasserstraße ist, dass die Bauwerke den Anforderungen von Sicherheit und Ordnung genügen (BAW, 2017). Dazu

gehören Erhalt und Pflege der Bauwerke durch regelmäßig durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen sowie eine zuverlässige Funktion der Bauwerke aber auch der Schutz vor den Folgen möglicher Extremereignisse wie Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen durch vernachlässigte Instandhaltung. Die Bauwerke sollen hinsichtlich verschiedener Kriterien bewertet und priorisiert werden, so dass der Entscheidungsträger die kritischen Bauwerke identifizieren und mögliche Schadensfolgen durch die Umsetzung vorrangig priorisierter Maßnahmen minimieren kann.

- *Identifikation und Ausgestaltung der Alternativen:* Die zur Priorisierung stehenden Alternativen sind 245 Wehranlagen an den Bundeswasserstraßen, die unter Verwaltung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes stehen. Für jedes dieser Bauwerke werden im Vorfeld die Werte unterschiedlicher Indikatoren ermittelt, die unverändert in die Untersuchung eingehen.
- *Ermittlung des Zielsystems:* Unter Punkt 1 wurde bereits das Schutzziel und dessen Erfüllung durch die Erstellung einer priorisierenden Liste benannt. Dieses wird auf ein vollständiges Zielsystem erweitert, so dass die Erfordernisse aller Wertebereiche berücksichtigt werden. Als Unterziele sollen neben den Folgen für die Bevölkerung auch wirtschaftliche und ökologische Konsequenzen minimiert werden (siehe Abschnitt 3.2.2).
- *Offenlegung der Kriterien und Darstellung in einer Hierarchie:* Im Rahmen der Datenerhebung und -analyse konnte die Anzahl der Indikatoren auf sechs reduziert werden, die den Kriterien innerhalb des Entscheidungsproblems (für Erläuterungen siehe Kapitel 3.2.2) entsprechen:
  - Anzahl Menschen
  - Größe der Siedlungsflächen
  - Größe von natürlichen/naturnahen Flächen
  - Größe wirtschaftlich genutzter Flächen
  - Kosten durch Verkehrsunterbrechung
  - Höhe der Schwallwelle nach Bauwerksversagen

Die hierarchische Anordnung ergibt sich aus der Zuordnung der Kriterien zu den Konsequenzklassen Mensch, Wirtschaft, Umwelt und Infrastruktur (siehe Abschnitt 3.2.1).

- *Offenlegung der Präferenzen und Wertefunktion:* Für eine mathematisch formale Darstellung des Zielsystems werden die Kriterien bezüglich ihrer Ausprägung untersucht und es werden die jeweiligen Präferenztypen und Schwellenwerte festgelegt. Brans et al. (1986) benennen sechs Präferenzfunktionen, welche dem Anwender der Methode bei der Modellierung helfen sollen (siehe Tabelle 26). Alle Kriterien werden für den vorliegenden Anwendungsfall mit der Präferenzfunktion Typ 5 modelliert. Diese Präferenzfunktion wurde unter der Annahme gewählt, dass immer die Alternative präferiert wird, die im paarweisen Vergleich der Kriterien den größeren Wert aufweist. Auf die Festlegung des Indifferenzschwellenwertes  $q$  und des Präferenzschwellenwertes  $p$  wird in Abschnitt 3.3.2 eingegangen.
- *Bestimmung der Kriterienausprägungen für die einzelnen Alternativen:* Die Datenerfassung erfolgt wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben.
- *Ermittlung der Kriteriengewichtung:* Bei der Ermittlung der Kriteriengewichtung wird einzelnen Kriterien eine für den ET individuell wahrgenommene Gewichtung zugewiesen. Im Falle der Anwendung von PROMETHEE II ist keine bestimmte Methode vorgegeben. Für den vorlie-

genden Datensatz wurde aus der Verantwortung des öffentlichen Sektors gegenüber der Bevölkerung abgeleitet, dass die Kriterien Menschen und Siedlungsflächen ein höheres Gewicht als die anderen Kriterien haben. Auf die Festlegung der Gewichtungsfaktoren wird in Kapitel 3.3.2 eingegangen.

- *Aggregation und Festlegung einer Rangfolge:* Nach Modellierung des Entscheidungsproblems in den vorangegangenen sieben Schritten werden die vorliegenden Daten entsprechend der Methode aggregiert. Für eine nachvollziehbare Anwendung wird die Priorisierung in MS Excel realisiert, wobei jedes Sheet einen Teilschritt darstellt:
  - *Bestimmung der Outranking-Relationen:* Die Outranking-Relationen basieren auf der Formel (18), welche für die Umsetzung in MS Excel aufgeteilt wird. Zunächst wird jedes Kriterium  $k$  einer Alternative in einer  $k \times k$ -Matrix aufgespannt, wofür sechs Tabellenblätter erstellt werden. Dann werden in jedem der Arbeitsblätter die Differenzen zwischen den jeweils 957.462 Alternativenpaaren berechnet. Mit den Differenzwerten der einzelnen Alternativenpaare, den Gewichtungsfaktoren und der Präferenzfunktion werden die Präferenzen  $p_k(A_i, A_j)$  innerhalb des Intervalls  $[0,1]$  berechnet.
  - *Berechnung der Aus- und Eingangsflüsse:* In einem weiteren Schritt werden für alle Alternativen die Aus- und Eingangsflüsse mit Formel (19) und (20) berechnet. Der Ausgangsfluss  $\Phi^+(a_i)$  gibt an, wie stark Alternative  $A_i$  gegenüber allen anderen Alternativen präferiert wird. Der Eingangsfluss  $\Phi^-(a_i)$  gibt hingegen an, wie oft Alternative  $A_i$  von anderen Alternativen dominiert wird.
  - *Aggregation und Auswertung nach PROMETHEE II:* Der Nettofluss  $\Phi^{\text{net}}(a_i)$  ist gemäß Formel (21) die Differenz von Aus- und Eingangsfluss und bildet final ab, welche Alternative die anderen Alternativen am stärksten dominiert, ohne selbst häufig dominiert zu werden. Mittels dieser Dominanz kann eine Aussage getroffen werden, welche Wehranlage nach dieser Methode die höchste Priorität für die Instandhaltungsplanung hat und alle Wehranlagen können in eine Reihenfolge gebracht werden.
  - *Beurteilung der Ergebnisse:* Tabelle 27 zeigt einen Auszug der berechneten Rangliste absteigend nach Nettofluss sortiert. Der Nettofluss nimmt für alle 245 Wehranlagen Werte von 164,20 bis -31,49 an. Die Differenz zwischen den einzelnen Werten der Nettoflüsse erlaubt methodisch bedingt keine Vergleiche hinsichtlich der Bedeutung des Priorisierungswertes.

Tabelle 27: Ranking der Wehranlagen nach PROMETHEE II (Auszug) (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	$\Phi^+(a_i)$	$\Phi^-(a_i)$	$\Phi^{\text{net}}(a_i)$	Rang
2132528001	167,90	3,71	164,20	1
2135916003	105,73	2,70	103,03	2
2132918004	93,71	5,46	88,25	3
2133546003	90,17	12,38	77,79	4
2136332004	79,24	5,38	73,86	5
2133934001	83,12	10,32	72,80	6

Die Wehranlagen auf den Rängen 5 und 6 zeigen, dass ein höherer Eingangsflusses  $\Phi^-(a_i)$  dazu führen kann, dass ein geringerer Wert für den Nettofluss  $\Phi^{\text{net}}(a_i)$  berechnet wird, obwohl der Ausgangsfluss  $\Phi^+(a_i)$  der Wehranlage auf Rang 6 höher ist als der von Wehranlage auf Rang 5.

Tabelle 28 zeigt ergänzend zu den Ergebnissen in Tabelle 27 die Werte zu den einzelnen Kriterien. Farblich markiert ist der Wert einer Wehranlage, die an der Regnitz liegt. Diese Bundeswasserstraße ist nicht in der GVS erfasst, da hier kein bzw. kein nennenswerter Güterverkehr erfasst wird (siehe Tabelle 64). Für diesen Fall wird der Wert 0 angenommen und händisch in die Tabelle eingetragen und orange markiert.

Tabelle 28: Einzelwerte der nach Nettofluss sortierten Wehranlagen (Auszug) (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	Wiederherstellkosten [T€]	Hydr. Parameter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungsflächen [m <sup>2</sup> ]	Naturflächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbeflächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrsunterbrechung [€/h]	$\Phi^{\text{net}}(a_i)$
2132528001	25.000	1,27	191.089	52.333.811	380.498.565	374.252.128	0,00	164,20
2135916003	19.702	1,65	184.913	19.170.520	10.723.591	21.956.967	445042,39	103,03
2132918004	27.900	0,96	166.289	30.796.190	109.252.052	95.391.287	0,00	88,25
2133546003	12.280	0,24	217.835	22.260.244	32.894.671	10.389.904	0,00	77,79
2136332004	18.260	1,04	138.779	29.499.576	52.290.478	77.033.198	0,00	73,86
2133934001	18.900	0,41	79.910	30.454.789	166.093.499	332.689.097	9566,90	72,80

Der ermittelte Nettofluss bzw. Rang sind als statische Parameter für das jeweilige Bauwerk aufzufassen. Sie verändern sich, wenn bspw. die Grundgesamtheit der Bauwerke durch Hinzufügen von Bauwerken zunimmt oder sich die Zusammensetzung der Flächennutzungsarten durch Umnutzung verändert.

### 3.3.2 Festlegung der Gewichtungsfaktoren und der Präferenzfunktion

Für die Festlegung der Gewichtungsfaktoren für die Priorisierung mit PROMETHEE II wurde ein Experteninterview mit acht Teilnehmern durchgeführt. Dafür wurde jeder Teilnehmer aufgefordert, die sechs Kriterien für eine Priorisierung so zu gewichten, dass die Summe der Einzelgewichte 100 % ergibt (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Expertenbefragung zur Gewichtung der Kriterien für die Priorisierung (Eigene Darstellung)

Kriterium Experte	Hydr. Parameter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungs- flächen [m <sup>2</sup> ]	Natur- flächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbe- flächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrs- unterbrechung [€/h]
1	0,25	0,25	0,25	0,05	0,1	0,1
2	0,4	0,175	0,175	0,05	0,1	0,1
3	0,5	0,2	0,075	0,05	0,1	0,075
4	0,4	0,2	0,1	0,05	0,15	0,1
5	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1
6	-*	0,3	0,2	0,05	0,225	0,225
7	-*	0,4	0,1	0,025	0,25	0,225
8	-*	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3

\* Es wird eine separate Betrachtung des hydraulischen Parameters vorgeschlagen.

Der hydraulische Parameter wurde in der Expertenrunde kontrovers diskutiert. Einigkeit herrscht hinsichtlich der Bedeutung dieses Kriteriums, da eine hohe Schwallwelle als ein Indikator für weitreichende Folgen in allen Konsequenzklassen betrachtet wird. Aus diesem Grund wurde dieses Kriterium von den Experten 1 bis 5 vergleichsweise hoch gewichtet. Hingegen wurde von den Experten 6, 7 und 8 gerade wegen dieser übergeordneten Bedeutung empfohlen, diesen Parameter als Kriterium auszuschließen, um hydraulische Effekte separat in die Entscheidungsfindung aufzunehmen.

In Abstimmung mit allen befragten Experten wurden die Gewichtungsfaktoren für die Priorisierung im Vergleichsszenario (siehe Abschnitt 3.4.2.1) wie Tabelle 30 zeigt festgelegt:

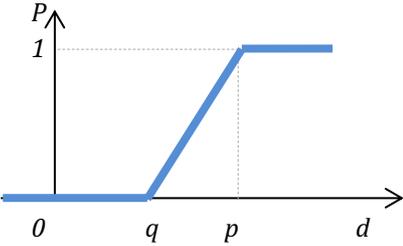
Tabelle 30: Gewichtung der Kriterien für die Priorisierung (Eigene Darstellung)

Kriterium	Hydr. Para- meter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungs- flächen [m <sup>2</sup> ]	Natur- flächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbe- flächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrs- unterbrechung [€/h]
Gewicht	0,25	0,25	0,25	0,05	0,1	0,1

In der Expertenrunde wurde außer der Gewichtung auch die Art der Präferenzfunktion und die Festlegung der Schwellenwerte diskutiert und abgestimmt (siehe Abschnitt 3.3.1). Aufgrund der Verteilung der Daten wird die Präferenzfunktion Typ 5 gewählt (siehe Tabelle 31). Der Indifferenzschwellenwert wird mit  $q = 0$  festgelegt, was formal der Präferenzfunktion Typ 3 entspricht. Somit führt eine Differenz  $d > 0$  im paarweisen Vergleich eines Kriteriums zweier Alternativen zu einer Präferenz  $\pi > 0$ . Durch die programmtechnische Ausführung der Präferenzfunktion Typ 5

kann bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt ohne größeren Aufwand ein Indifferenzwert eingeführt und eine Anpassung des Indifferenzschwellenwertes vorgenommen werden.

Tabelle 31: Gewählte Präferenzfunktionen der Methode PROMETHEE (Eigene Darstellung)

Schaubild der Präferenzfunktion	Präferenzfunktion	Festzulegende Parameter
<p>Typ 5</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	<p><math>p, q</math></p>

- d Differenzbetrag der Kriterienausprägungen im paarweisen Vergleich zweier Alternativen
- P Präferenzgrad  $\pi$
- q Schwellenwert Indifferenz
- p Schwellenwert Präferenz

Für die Festlegung einer Präferenzschwelle  $p$  finden sich in der Literatur keine Empfehlungen. Da es bei allen Kriterien im oberen Wertebereich Extremwerte bzw. Ausreißer gibt (siehe Anhang V, S. 198-201), für die  $P(d) = 1$  gelten soll, wurden den Experten verschiedene statistische Kennzahlen vorgeschlagen (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32: Statistische Kennzahlen der Differenzbeträge (Eigene Darstellung)

Kriterium Kennzahl	Hydr. Parameter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungs- flächen [m <sup>2</sup> ]	Natur- flächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbe- flächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrs- unterbrechung [€/h]
Mittelwert $\mu$	1,22	30.011	8.069.307	18.898.638	26.231.421	34.936
Standard- abweichung $\sigma$	0,69	39.462	6.788.561	27.335.527	32.862.328	69.679
Median	1,13	15.785	6.396.112	13.211.211	19.455.634	2.615
75-Quartil	1,57	34.139	10.016.889	22.616.226	29.435.449	41.875
Maximum	6,23	217.835	52.333.811	380.498.565	374.252.128	493.785
$\mu + \sigma$	1,91	69.473	14.857.868	46.234.165	59.093.749	104.615
(Anteil Bauwerke [%])	(12,24)	(13,46)	(13,87)	(4,89)	(8,57)	(6,93)
$\mu + 2\sigma$	2,59	108.934	21.646.429	73.569.692	91.956.077	174.293
(Anteil Bauwerke [%])	(1,22)	(6,12)	(3,67)	(0,81)	(3,67)	(5,71)

Für  $p = \mu + \sigma$  und  $p = \mu + 2\sigma$  wurde zudem berechnet, wie hoch der Anteil Bauwerke ist, für die dann  $P(d) = 1$  gilt (siehe Tabelle 32, hellgrau markiert). Von den Experten wurde als Präferenzschwelle  $p = \mu + \sigma$  festgelegt.

### 3.3.3 Sensitivitätsanalyse

Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss die Gewichtungsfaktoren auf die Rangfolge haben. Die Sensitivitätsanalyse soll dem Entscheidungsträger ermöglichen, die Komplexität der multikriteriellen Entscheidung zu erfassen und die Ergebnisse zu evaluieren (Geldermann et al., 2003). Eine systematische Vorgehensweise für PROMETHEE II findet sich in Geldermann et al. (2003), wobei auf die Ähnlichkeit zur Ermittlung des Nutzwertes im gewichteten additiven Modell hingewiesen wird. Dabei werden Teilnutzenwerte ermittelt, gewichtet und über alle Merkmale zum Nutzwert der jeweiligen Alternative summiert, was mit der Vorgehensweise zur Ermittlung des Nettoflusses vergleichbar ist.

Übertragen auf das Verfahren PROMETHEE II können  $p_{ij}$  als die ungewichtete, gemittelte Differenz der Eingangs- und Ausgangsflüsse für den Paarvergleich der Alternativen  $a_i$  und  $a_r$  in Bezug auf das Kriterium  $j$  interpretiert werden und sind nach Geldermann et al. (2003) somit als erweiterte Kriterienausprägung zu verstehen. Die ermittelten Werte  $p_{ij}$  werden in eine Matrix übertragen und bilden die Grundlage für die Sensitivitätsanalyse.

### 3.3.3.1 Bestimmung von Insensitivitätsintervallen

Mit Sensitivitätsanalysen wird untersucht, ob und wie die Rangfolge auf eine Veränderung der Gewichtungsfaktoren reagiert. Ein Insensitivitätsintervall ist dabei der Bereich, in dem die Ergebnisse durch eine Veränderung der Gewichtungsfaktoren nicht beeinflusst werden. Je größer das Insensitivitätsintervall eines Gewichtungsfaktors ist, desto robuster ist er gegenüber Veränderungen. Das Intervall für Kriterium  $j$  kann mit wenigen Rechenschritten bestimmt werden. Geldermann et al. (2003) berechnen für jede Alternative  $i$  den Nettofluss mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren:

- ursprünglich gewählter Gewichtungsfaktor  $w_j$  für das Kriterium  $j$ ,
- Gewichtungsfaktor  $w_j = 0 \%$ , wobei die Gewichtungen der anderen Kriterien neu auf  $[0,1]$  normiert werden müssen und
- Gewichtungsfaktor  $w_j = 100 \%$ , so dass die anderen Kriterien unberücksichtigt bleiben.

Alle drei Nettoflusswerte liegen aufgrund der linear-additiven Berechnung bei PROMETHEE II auf einer Geraden. Nach der Berechnung der Geraden  $g(w_j, a_i)$  für alle Alternativen  $a_i$  bezüglich eines Kriteriums  $j$  können die Schnittpunkte der Geraden ermittelt werden. Das Insensitivitätsintervall bestimmt sich anschließend aus den Schnittpunkten, deren Gewichtung  $w_j^*$  der ursprünglich gewählten Gewichtung  $w_j$  im Intervall  $[0 \%, 100 \%]$  am nächsten liegt (Geldermann et al., 2003). Eine Veränderung der Gewichtung  $w_j$  über den Wert  $w_j^*$  hinaus hätte eine Veränderung des Präferenzwertes und somit eine Veränderung der Reihung der Alternativen zur Folge. Der Schnittpunkt zweier Geraden bestimmt sich zu (Geldermann et al., 2003):

$$g(w_j, a_i) = g(w_j, a_r) \quad (22)$$

↔

$$\Phi_0^{net}(a_i) + (\Phi_1^{net}(a_i) - \Phi_0^{net}(a_i)) * w^* = \Phi_0^{net}(a_r) + (\Phi_1^{net}(a_r) - \Phi_0^{net}(a_r)) * w^* \quad (23)$$

↔

$$w^* = \frac{\Phi_0^{net}(a_i) - \Phi_0^{net}(a_r)}{\Phi_1^{net}(a_r) - \Phi_0^{net}(a_r) - \Phi_1^{net}(a_i) + \Phi_0^{net}(a_i)} \quad (24)$$

$w^*$ : Gewichtung des Kriteriums  $j$  im Schnittpunkt der Geraden  $g(w_j, a_i)$  und  $g(w_j, a_r)$

$\Phi_0^{net}(a_i)$ : Präferenzindex der Alternative  $a_i$  für eine Gewichtung  $w_j = 0 \%$ , wobei

$$\Phi_0^{net}(a_i) = \frac{(\Phi^+(a_i) - \pi(a_i, a_r)) - \Phi^-(a_i) - \pi(a_r, a_i)}{((\sum_{j=1}^n w_j) - w^*)}$$
 mit  $w_j^*$  als ursprünglich gewählte Gewichtung für das Kriterium  $j$

$\Phi_1^{net}(a_i)$ : Präferenzindex der Alternative  $a_i$  für eine Gewichtung  $w_j = 100 \%$

Tabelle 33 zeigt einen Auszug der Berechnung aller  $w^*$  für das Kriterium *Menschen*, absteigend sortiert, sowie die Nettoflüsse bei einer Gewichtung  $w_j = 0 \%$  und  $w_j = 100 \%$ . Die Analyse bezieht sich jeweils auf eine Alternative  $a_i$ , als Beispiel wurde die Wehranlage Geesthacht gewählt. Die Gewichtung ist festgesetzt mit  $w_j = 0,16667$ . Wird das zu untersuchende Kriterium *Menschen* mit  $0 \%$  gewichtet, werden die verbleibenden fünf Gewichte mit je  $20 \%$  gleichgewichtet. Wird das

Kriterium *Menschen* mit 100 % gewichtet, gehen die anderen Kriterien mit einem Gewichtungsfaktor von 0 % in die Berechnung ein. Aus Tabelle 33 (grau markierte Zeilen) ergibt sich das Insensitivitätsintervall zu [0,16658; 0,18647], in der die Gewichtung von 16,67 % liegt. Die geringe Differenz von 0,02016 zwischen den Intervallgrenzen zeigt, dass bereits eine minimale Änderung der Gewichtung zu einer Veränderung der Rangfolge führt. Ursache für das kleine Insensitivitätsintervall ist die große Anzahl untersuchter Alternativen (245 Wehranlagen), deren Werte für die einzelnen Kriterien dicht beieinanderliegen.

Tabelle 33: Teilergebnis der Sensitivitätsanalyse zur Gewichtung des Kriteriums „Menschen“ (Eigene Darstellung)

Objekt_ID	$\Phi_0^{net}(a_i)$	$\Phi_1^{net}(a_i)$	$w^*$
2132918004	-8,96968	-0,95532	3,14698
2133544003	-17,8018	-3,28278	1,52359
2133546002	-13,8226	0,67544	0,97138
2133546001	-13,1426	0,70319	0,96424
2133546004	-14,7229	0,88265	0,95012
2133546003	-16,6962	1,00041	0,94886
2135916003	-4,18409	0,16212	0,89719
2133748003	-5,16648	-3,72106	0,29005
2137138001	-2,66057	-10,98058	0,26921
2135918001	-5,28106	-4,98096	0,22667
2135920001	-4,62757	-9,35213	0,18647
2137140002	-2,05599	-23,65866	0,16658
2136106002	-4,70562	-12,12736	0,14713
2137140001	-3,76936	-22,23386	0,12046
2135918005	-6,44544	-3,39006	0,10098
2135916002	-4,39506	-22,14336	0,09897
2136304001	-5,72913	-10,45979	0,09519
2137546001	-3,62286	-30,54448	0,09501
2136706004	-4,96340	-19,12243	0,08906
2135710002	-5,75473	-18,77349	0,05520

Die geringen Differenzen zeigen sich ebenfalls in der grafischen Darstellung (siehe Abbildung 30). Bei einer Gewichtung von  $w_j < 0,16658$  wird die Wehranlage 2137140002 gegenüber der Wehranlage 2132528001 präferiert, bei  $w_j > 0,18647$  die Wehranlage 2135920001. Für einen besseren Überblick werden die Geraden der anderen 242 Wehranlagen in Abbildung 30 nicht abgebildet.

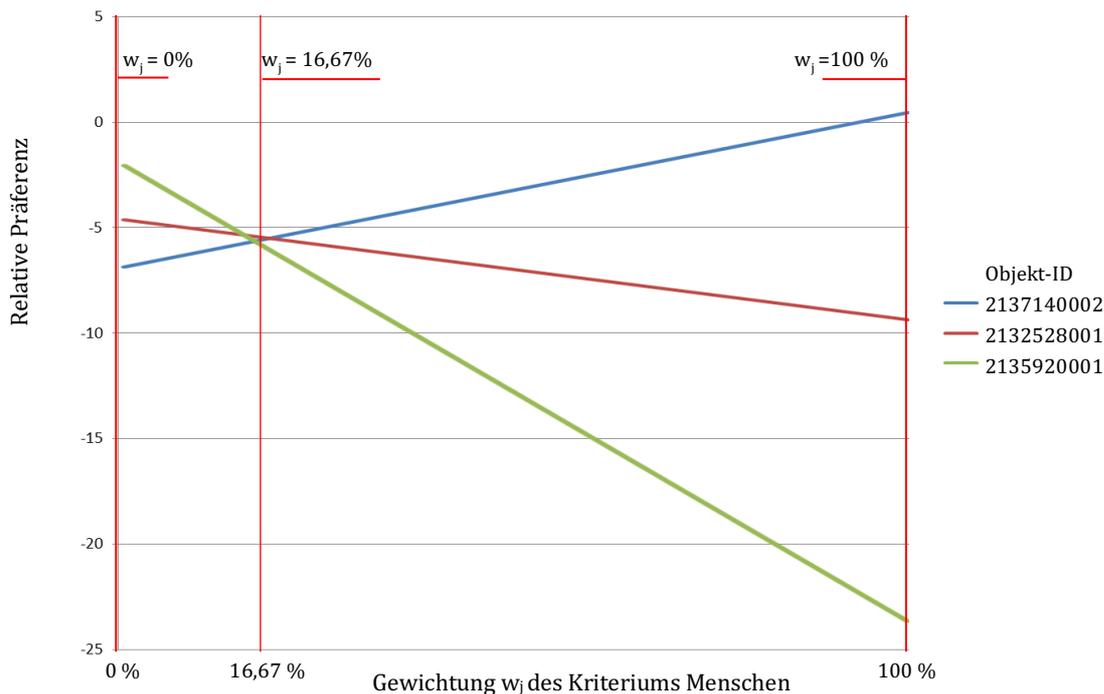


Abbildung 30: Grafische Darstellung der Sensitivitätsanalyse (Eigene Darstellung)

Nicht nur die Veränderung der Gewichtung beeinflusst das Ergebnis der Rangfolge, sondern auch die Veränderung der Schwellenwerte für die Indifferenz  $q$  sowie die strikte Präferenz  $p$  oder der gewählte Typ der Präferenzfunktion. Untersuchungen zeigen, dass die Veränderung der Gewichtung eine höhere Sensitivität zeigt als die der Schwellenwerte oder die Wahl der Präferenzfunktion (Geldermann et al, 2003, nach Rentz et al.). Für diesbezügliche Sensitivitätsanalysen wurden bislang keine systematischen Methoden wie die zuvor beschriebene entwickelt. Bei der Variation dieser Parameter wird für jeden Anwendungsfall eine individuelle Untersuchungssystematik festgelegt und Rangfolgeänderungen können letztlich nur stichprobenartig im Rahmen dieser Systematik gezeigt werden. (Geldermann et al., 2003)

Geldermann et al. (2003) zeigen zudem die Möglichkeit einer mehrdimensionalen Sensitivitätsanalyse unter Verwendung der Nettoflüsse  $\Phi^{net}$ . Die entwickelte Methode berechnet für jedes Alternativenpaar  $i$  und  $r$  einen Sensitivitätsindikator  $\delta_{j,i,r}$  ( $1 \leq i \leq r \leq m$  und  $1 \leq j \leq n$ ). Dieser entspricht der kleinsten Veränderung des Gewichtungsfaktors  $w_j$ , welche zu einem Tausch der Ränge zwischen den Alternativen  $i$  und  $r$  führt. Für eine  $n \times m$  Entscheidungstabelle sind  $n \times (m(m-1)/2)$  Berechnungen notwendig. Im vorliegenden Anwendungsfall mit 245 Wehranlagen entspricht das 7.263.270 Berechnungen für alle möglichen  $\delta_{j,i,r}$ . Kann kein  $\delta_{j,i,r}$  berechnet werden, ist das jeweilige Kriterium stabil. Je größer die Werte der Sensitivitätsindikatoren  $|\delta_{j,i,r}|$  sind, desto sensibler reagiert das Ergebnis auf eine Veränderung der Gewichtung. Allerdings bewirken Veränderungen der Gewichtung nicht nur einen Tausch der Platzierung der jeweils untersuchten Alternativen  $i$  und  $r$ . Durch eine Veränderung der Gewichtung  $w_j$  verändert sich die anteilige Gewichtung der anderen Kriterien, was somit auch für andere Alternativen einen Rangtausch bewirken kann

(Geldermann et al., 2003). Auf die mehrdimensionale Sensitivitätsanalyse wird im Weiteren nicht eingegangen, da aufgrund der großen Anzahl Alternativen keine Verbesserung der Aussagekraft im Vergleich zur eindimensionalen Sensitivitätsanalyse zu erwarten ist bzw. aufgrund der zunehmenden Komplexität die Bereiche, in denen eine Veränderung der Gewichtung keine Veränderung der Rangfolge bewirkt, noch kleiner werden.

### 3.3.3.2 Partitionierende Clusteranalyse mit dem k-medoid-Algorithmus

Der Datensatz mit 245 Wehranlagen ist aufgrund seiner Größe nicht für die von Geldermann et al. (2003) vorgestellte Sensitivitätsanalyse geeignet. Zur Reduzierung der Anzahl Alternativen wird mit dem vorhandenen Datensatz eine Clusteranalyse durchgeführt. Mit dieser Methode werden Wehranlagen mit ähnlichen Eigenschaften in Cluster zusammengefasst, wobei jeder Cluster ein Zentrum hat, um das ähnliche Wehranlagen gruppiert werden (vgl. Ester, Sander, 2000; Everitt et al., 2011). Die Sensitivitätsanalyse bezüglich der Gewichtungsfaktoren wird dann mit dem deutlich reduzierten Datensatz aus der Clusteranalyse wiederholt.

Von den Methoden der Clusteranalyse sind für den Datensatz der 245 Wehranlagen grundsätzlich hierarchische oder partitionierende Methoden geeignet. Da die sechs Kriterien zur Priorisierung der Wehranlagen keiner hierarchischen Ordnung entsprechen (siehe Abschnitt 3.2.2), wird als eine partitionierende Methode der k-medoid-Algorithmus gewählt. Der zentrale Punkt eines Clusters ist der Medoid, der nur bei dieser Methode einem existierenden Objekt entspricht, im vorliegenden Fall einer der 245 Wehranlagen (Ester, Sander, 2000). Die Zuordnung der anderen Wehranlagen erfolgt auf Basis der Distanz zum Medoid, der nachfolgend als Cluster-Wehranlage (CW) bezeichnet wird.

Der Algorithmus für die Clusteranalyse wurde in der Skriptsprache R programmiert (siehe Anhang VIII, S. 216). Die optimale Menge Cluster wird dabei anhand der Diagramme aus den generierten Plots ermittelt, indem am Maximum der Kurve die Anzahl der Cluster auf der x-Achse abgelesen wird (Kassambra, 2017). Grundsätzlich können zwei Möglichkeiten unterschieden werden, um das Optimum abzulesen. Entweder wird das absolute Maximum  $\max_1$  gewählt, was möglichst nah an der y-Achse liegen sollte. Im vorliegenden Fall liegt das Maximum  $\max_1$  bei einer Anzahl von zwei Clustern  $\max_1 = 2$  (siehe Abbildung 31). Alternativ kann als optimale Anzahl Cluster der Wert gewählt werden, welcher der erste hohe Wert eines Plateaus ist (Kassambra, 2017). Ein Plateau heißt, dass nachfolgende Mengen von Clustern einen ähnlich hohen Wert in der Silhouette, also in der Stärke der Strukturierung resp. der Distanz der Einzelwerte zur CW, aufweisen und mit einer größeren Anzahl Cluster keine Verbesserung der Strukturierung erreicht wird. Im Diagramm zeigt sich dieses Maximum bei einer Anzahl von 13 Clustern mit  $\max_2 = 13$ .

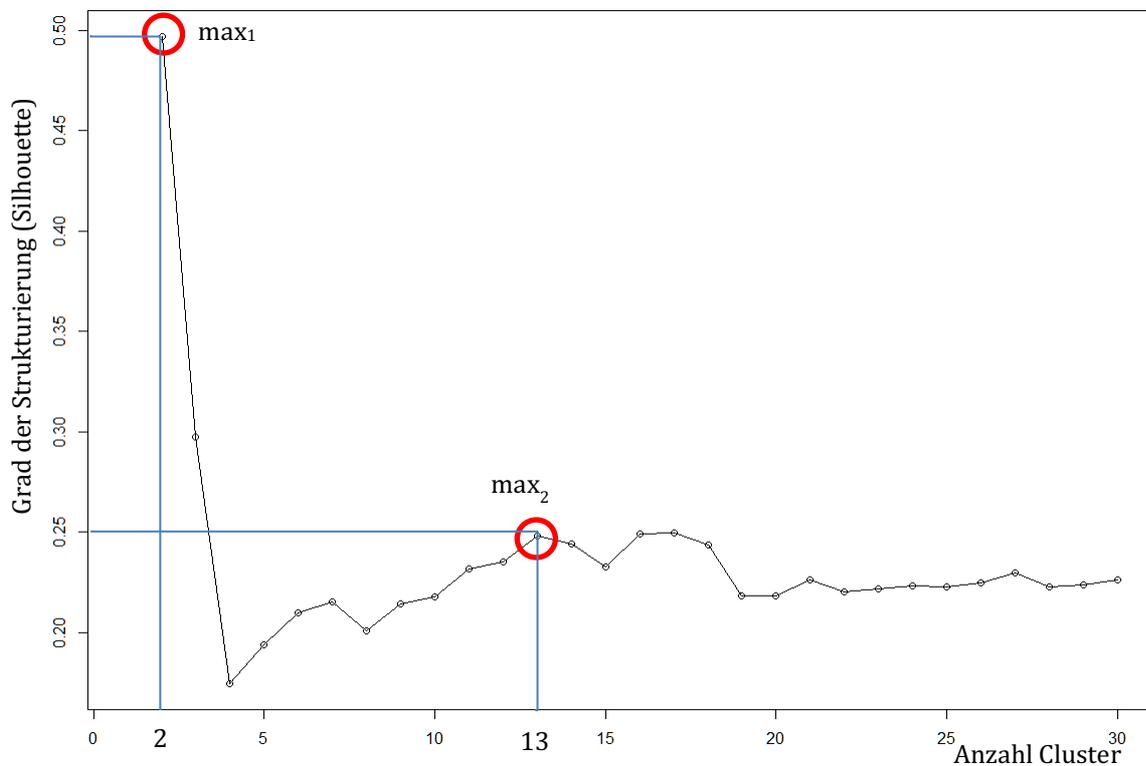


Abbildung 31: Plot zur Bestimmung der optimalen Anzahl Cluster (Eigene Darstellung)

Der Silhouette-Wert für max<sub>2</sub> mit 0,25 an der y-Achse fällt im Vergleich zu max<sub>1</sub> mit einem Silhouette-Wert von 0,5 gering aus. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Clusteranalyse dennoch sowohl mit max<sub>1</sub> = 2 Cluster als auch max<sub>2</sub> = 13 Cluster gezeigt, da beide Werte gemäß Kassambra (2017) als optimale Anzahl Cluster in Frage kommen.

Bei einer Gruppierung der Wehranlagen zu zwei Clustern umfasst das Cluster 1 insgesamt 197 Wehranlagen und Cluster 2 umfasst 48 Wehranlagen. Die beiden Cluster sind allerdings für eine Priorisierung mit PROMETHEE II nicht geeignet, da CW 2 bei allen Kriterien höhere Werte aufweist und unabhängig von der Gewichtung einzelner Kriterien immer auf Rang 1 platziert wird (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Kriterienausprägungen der zwei Cluster-Wehranlagen (Eigene Darstellung)

CW	Hydr. Parameter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungsflächen [m <sup>2</sup> ]	Naturflächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbeflächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrsunterbrechung [€/h]
1	1,08	12340	5462879	12145197	18543389	103
2	1,22	74813	15759814	19045427	24974092	28753

Tabelle 35 listet die Anzahl Wehranlagen auf, die einem der 13 Cluster zugeordnet wurden. Der größte Cluster 1 umfasst 65 Wehranlagen, dem kleinsten Cluster 10 ist nur eine Wehranlage zugeordnet.

Tabelle 35: Größe der 13 gebildeten Cluster (Eigene Darstellung)

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Anzahl Wehranlagen	65	44	5	2	17	18	17	6	9	1	39	16	6

Mit den Kriterienausprägungen der 13 Cluster-Wehranlagen (siehe Tabelle 36) wird die eindimensionale Sensitivitätsanalyse wiederholt. Als Variante nach Geldermann et al. (2003) wird der Fokus nachfolgend nicht auf die Berechnung der Größe der Insensitivitätsintervalle gelegt, sondern auf die Rangwechsel, welche die Veränderung der Gewichtungsfaktoren bewirkt.

Tabelle 36: Kriterienausprägungen der 13 Cluster-Wehranlagen (Eigene Darstellung)

CW	Hydr. Parameter [m]	Menschen [Anzahl]	Siedlungsflächen [m <sup>2</sup> ]	Naturflächen [m <sup>2</sup> ]	Industrie- und Gewerbeflächen [m <sup>2</sup> ]	Kosten durch Verkehrsunterbrechung [€/h]
1	0,98	15681	6104384	11869258	19476732	0
2	1,47	55667	9479759	6870500	15877572	22764
3	1,14	73953	18178617	27075411	19132418	661,9
4	1,08	7834	3696442	10207085	32240245	41618
5	0,75	3759	2476709	10044356	9613850	21,66
6	0,96	197127	15413607	5854199	6477777	0
7	0,92	30782	11981119	20214441	79122657	42,15
8	1,00	78846	29777599	45175198	96316878	0
9	1,72	19933	7355267	13312869	22576011	42484
10	2,06	23045	10518348	39730816	24974092	85919
11	1,27	123527	19088004	11275086	23506584	286329
12	1,27	191089	52333811	380498565	374252128	0
13	5,80	13641	2813664	11671978	6815282	6398

Für jedes Kriterium wird der Einfluss der Gewichtungsfaktoren auf die Rangfolge der CW separat untersucht. Dafür wurde jedes Kriterium mit 0 % sowie mit 100 % gewichtet und es wurden mit

PROMETHEE II die Nettoflüsse bestimmt, anhand derer die jeweilige Rangfolge bestimmt werden kann. Die Ergebnisse werden mit der Rangfolge bei einer Gleichgewichtung ergänzt und die Rangwechsel werden in Diagrammen veranschaulicht.

Abbildung 32 zeigt die Untersuchungsergebnisse der eindimensionalen Sensitivitätsanalyse für das Kriterium Menschen. Links in der Abbildung ist das Kriterium Menschen mit 0 % gewichtet und die anderen fünf Kriterien sind mit je 20 % gleichgewichtet. In der Mitte der Abbildung sind alle sechs Kriterien mit 16,67 % für die Priorisierung mit PROMETHEE II gleichgewichtet. Rechts in der Abbildung wird das Ergebnis gezeigt, wenn das Kriterium Menschen für die Priorisierung mit 100 % gewichtet wird.

Die Anlagen CW 11 und CW 12 weisen in den anderen fünf Kriterien hohe Werte auf und werden bei einer Gewichtung des Kriteriums Menschen mit 0 % entsprechend hoch platziert. Bei einer Gewichtung von 100 % des Kriteriums Menschen rücken beide Anlagen um jeweils nur einen Rang tiefer, da sie im Vergleich zu den anderen Anlagen auch bei diesem Kriterium hohe Werte aufweisen. Anlage CW 6 wird durch eine Gewichtung des Kriteriums Menschen mit von 100 % so verbessert, dass sie von Rang 11 auf Rang 1 wechselt.

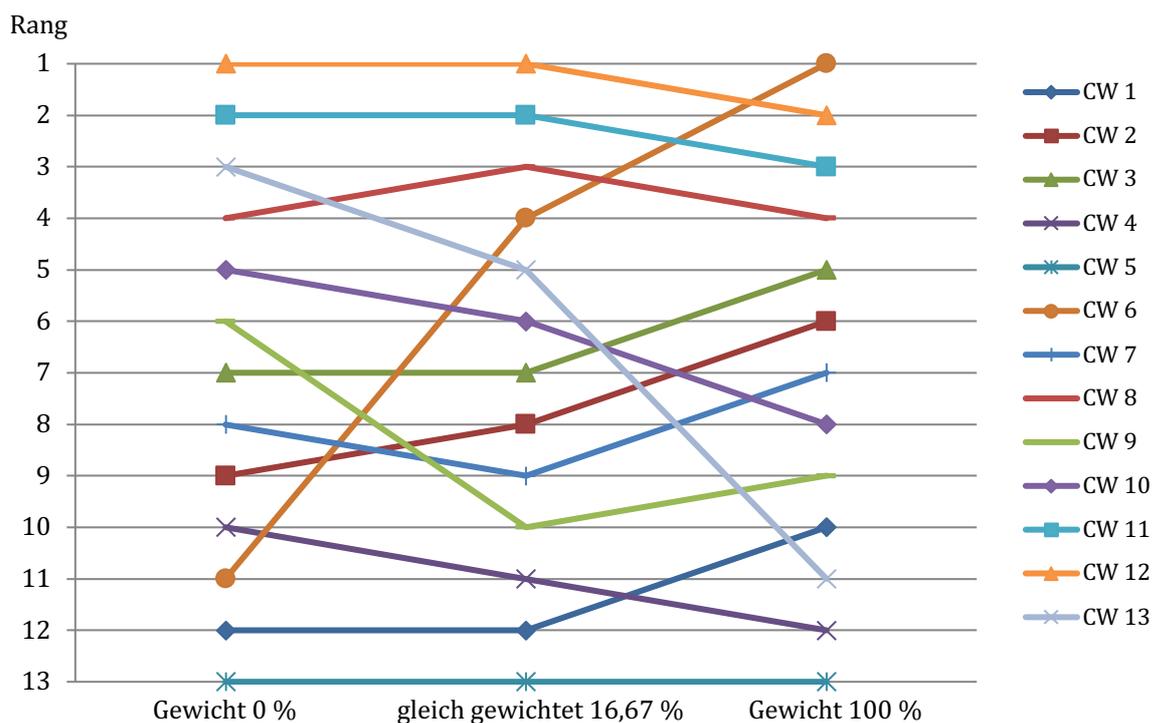


Abbildung 32: Rangwechsel durch Veränderung der Gewichtung des Kriteriums Menschen (Eigene Darstellung)

Geldermann et al. (2003) empfehlen, insbesondere die Gewichtungsfaktoren vertieft zu untersuchen, bei denen bereits kleine Veränderungen die Rangfolge beeinflussen, allerdings ohne zu definieren, was unter klein zu verstehen ist.

Die Ergebnisse der durchgeführten eindimensionalen Sensitivitätsanalyse für alle sechs Kriterien zeigen, dass die Veränderung der Gewichtungsfaktoren in unterschiedlichem Umfang die Rangfolge beeinflussen. So zeigt sich in Tabelle 37 das Kriterium Hydraulischer Parameter mit einer

durchschnittlichen Differenz von 1,23 gegenüber Veränderungen am stabilsten, das Kriterium Naturflächen mit einer durchschnittlichen Differenz von 5,46 gegenüber Veränderungen vergleichsweise sensitiv.

Tabelle 37: Rangwechsel bei Variation der Gewichtung einzelner Kriterien (Eigene Darstellung)

<b>Kriterium: Hydraulischer Parameter</b>				
<b>Cluster- wehranlage</b>	<b>Rang bei Gewicht</b>			<b>Max. Differenz Rangwechsel</b>
	<b>0 %</b>	<b>16,67 %</b>	<b>100 %</b>	
CW 1	11	12	12	1
CW 2	8	8	8	0
CW 3	5	7	7	2
CW 4	10	11	11	1
CW 5	13	13	13	0
CW 6	4	3	4	1
CW 7	7	9	9	2
CW 8	3	4	3	1
CW 9	9	10	10	1
CW 10	6	6	6	0
CW 11	2	2	2	0
CW 12	1	1	1	0
CW 13	12	5	5	7
<b>Durchschnittlicher Rangwechsel</b>				<b>Ø = 1,23</b>

<b>Kriterium: Menschen</b>				
<b>Cluster- wehranlage</b>	<b>Rang bei Gewicht</b>			<b>Max. Differenz Rangwechsel</b>
	<b>0 %</b>	<b>16,67 %</b>	<b>100 %</b>	
CW 1	12	12	10	2
CW 2	9	8	6	3
CW 3	7	7	5	2
CW 4	10	11	12	2
CW 5	13	13	13	0
CW 6	11	4	1	10
CW 7	8	9	7	2
CW 8	4	3	4	1
CW 9	6	10	9	4
CW 10	5	6	8	3
CW 11	2	2	3	1
CW 12	1	1	2	1
CW 13	3	5	11	8
<b>Durchschnittlicher Rangwechsel</b>				<b>Ø = 3,00</b>

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 33: Rangwechsel bei Variation der Gewichtung einzelner Kriterien (Eigene Darstellung)

<b>Kriterium: Siedlungsfläche</b>				
<b>Cluster- wehranlage</b>	<b>Rang bei Gewicht</b>			<b>Max. Differenz Rangwechsel</b>
	<b>0 %</b>	<b>16,67 %</b>	<b>100 %</b>	
CW 1	12	12	10	2
CW 2	8	8	8	0
CW 3	7	7	4	3
CW 4	11	11	11	0
CW 5	13	13	13	0
CW 6	3	4	5	2
CW 7	10	9	6	4
CW 8	5	3	2	3
CW 9	9	10	9	1
CW 10	6	6	7	1
CW 11	2	2	3	1
CW 12	1	1	1	0
CW 13	4	5	12	8
<b>Durchschnittlicher Rangwechsel</b>				<b>Ø = 1,92</b>

<b>Kriterium: Naturflächen</b>				
<b>Cluster- wehranlage</b>	<b>Rang bei Gewicht</b>			<b>Max. Differenz Rangwechsel</b>
	<b>0 %</b>	<b>16,67 %</b>	<b>100 %</b>	
CW 1	7	12	10	3
CW 2	12	8	4	8
CW 3	4	7	7	3
CW 4	10	11	8	3
CW 5	11	13	13	2
CW 6	13	4	11	9
CW 7	5	9	12	7
CW 8	2	3	9	7
CW 9	6	10	3	7
CW 10	3	6	2	4
CW 11	9	2	6	7
CW 12	1	1	5	4
CW 13	8	5	1	7
<b>Durchschnittlicher Rangwechsel</b>				<b>Ø = 5,46</b>

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 33: Rangwechsel bei Variation der Gewichtung einzelner Kriterien (Eigene Darstellung)

<b>Kriterium: Industrie- und Gewerbeflächen</b>				
<b>Cluster- wehranlage</b>	<b>Rang bei Gewicht</b>			<b>Max. Differenz Rangwechsel</b>
	<b>0 %</b>	<b>16,67 %</b>	<b>100 %</b>	
CW 1	12	12	8	4
CW 2	8	8	10	2
CW 3	7	7	9	2
CW 4	11	11	4	8
CW 5	13	13	11	2
CW 6	3	4	13	10
CW 7	10	9	3	7
CW 8	4	3	2	2
CW 9	9	10	7	3
CW 10	6	6	5	1
CW 11	2	2	6	4
CW 12	1	1	1	0
CW 13	5	5	12	7
<b>Durchschnittlicher Rangwechsel</b>				<b>Ø = 4,00</b>

<b>Kriterium: Kosten durch Verkehrsunterbrechung</b>				
<b>Cluster- wehranlage</b>	<b>Rang bei Gewicht</b>			<b>Max. Differenz Rangwechsel</b>
	<b>0 %</b>	<b>16,67 %</b>	<b>100 %</b>	
CW 1	11	12	13	2
CW 2	9	8	5	4
CW 3	6	7	7	1
CW 4	12	11	4	8
CW 5	13	13	9	4
CW 6	3	4	12	9
CW 7	8	9	8	1
CW 8	2	3	11	9
CW 9	10	10	3	7
CW 10	7	6	2	5
CW 11	4	2	1	3
CW 12	1	1	10	9
CW 13	5	5	6	1
<b>Durchschnittlicher Rangwechsel</b>				<b>Ø = 4,85</b>

### 3.3.4 Zwischenergebnis

In Tabelle 38 sind die Eingangsgrößen für die Priorisierung zusammengestellt. Die Form der Tabelle entspricht der Eingabemaske der programmtechnischen Ausführung der Priorisierung mit PROMETHEE II. Der Indifferenz- und der Präferenzschwellenwert, die Präferenzfunktion sowie die Gewichtungsfaktoren können anforderungsbezogen verändert werden, sodass die Nettoflüsse neu berechnet werden können.

Tabelle 38: Parameter für die Anwendung der Methode PROMETHEE II (Eigene Darstellung)

Kriterien	Hydr. Parameter	Menschen	Siedlungsflächen	Naturflächen	Industrieflächen	Wirtschaftl. Folgekosten
Präferenzfunktion	5	5	5	5	5	5
Indifferenzschwelle $q$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Präferenzschwelle $p$	1,91	69.473	14.857.868	46.234.165	59.093.749	104.615
Gewichtung	0,25	0,25	0,25	0,05	0,1	0,1

Mit diesen Parametern werden für alle erfassten Wehranlagen die Flusswerte berechnet. Sortiert ergibt sich die in Tabelle 39 aufgeführte Rangfolge.

Tabelle 39: Rang 1 bis 10 der mit PROMETHEE II priorisierten Wehranlagen (Eigene Darstellung)

Rang	Objekt-ID	$\Phi^+(a_i)$	$\Phi^-(a_i)$	$\Phi^{\text{net}}(a_i)$
1	2132528001	167,90	3,71	164,20
2	2135916003	105,73	2,70	103,03
3	2132918004	93,71	5,46	88,25
4	2133546003	90,17	12,38	77,79
5	2136332004	79,24	5,38	73,86
6	2133934001	83,12	10,32	72,80
7	2133546001	78,58	6,49	72,08
8	2135918001	74,92	4,97	69,95
9	2133546004	78,31	8,48	69,82
10	2133718001	74,96	5,40	69,55

Im Vergleich zur Priorisierungsmethode MPI zeigt sich ein differenziertes Bewertungsergebnis nach Anwendung der Methode PROMETHEE II. Tabelle 40 listet zehn der 38 Wehranlagen auf, die in der WSV aufgrund ihrer Bedeutung und ihres aktuell schlechten Zustands zu den systemkritischen Bauwerken (SKB) zählen (siehe Anhang VI, S. 204). Es handelt sich bei den SKB um Wehranlagen, bei denen unmittelbar umfangreiche Instandhaltungsmaßnahmen notwendig sind und die nach MPI der Prioritätsstufe P1 zugeordnet sind bzw. wurde seitens der WSV festgelegt, dass sie P1 angehören. In der Tabelle sind die Wehranlagen absteigend nach Bauwerksabmessungen (Produkt aus Verschlusshöhe und Gesamtbreite der Anlage) sortiert. In der rechten Spalte sind die Ränge nach PROMETHEE II zugeordnet.

Tabelle 40: Priorisierungsergebnisse im Vergleich (Eigene Darstellung)

<b>Objekt-ID</b>	<b>Priorität MPI*</b>	<b>Rang PROMETHEE II</b>
2137546001	1	31
2134506001	1	122
2135710001	1	45
2136518001	1	42
2136320003	1	112
2133120002	1	59
2133120001	1	96
2135922001	1	80
2136122002	1	100
2136124002	1	97

MPI\*: aufgrund unvollständiger Informationen modifizierte MPI

Die mit den Indikatoren erweiterten Datensätze der Wehranlagen und die Verwendung der Methode PROMETHEE II ermöglichen im Vergleich zur MPI eine differenzierte Priorisierung für den ganzen Bauwerksbestand. Mögliche Folgen eines Versagensereignisses werden nicht implizit wie bei der MPI über die Sortierung der Bauwerke innerhalb der Liste nach Größe, sondern über die sechs neuen Indikatoren gemäß Ex-ante-Schadensanalyse integriert. Die Prioritätsstufen werden aufgelöst und jedem Bauwerk wird ein eindeutiger Prioritätswert über den Platz in der Rangfolge bzw. dem Nettoflusswert gemäß der Priorisierung mit PROMETHEE II zugeordnet.

An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Ergebnisse beider Methoden nur eingeschränkt vergleichbar sind. Die MPI (siehe Abschnitt 2.2.3) wurde für die Untersuchung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur gekürzt angewendet (in der Tabelle mit MPI\* gekennzeichnet), da keine Informationen vorliegen, welche Wehranlagen (bau-)vertraglich gebunden sind (entspricht der MPI Priorität 1) und bei welchen Bauwerken es sich um Ausbau- und/oder Ersatzvorhaben handelt. Somit sind die Bauwerke in Tabelle 40 mit MPI\* nur nach Lage im Kernnetz und Zustandsnote priorisiert. Im Gegensatz dazu wird die Zustandsnote bei der Priorisierung mit PROMETHEE II nicht

berücksichtigt, da sie ein zeitveränderlicher Parameter ist. Diese Eigenschaft wird mit der Modellierung von Alterungsprozessen und der Instandhaltungsmaßnahmen in der Entscheidungsunterstützung integriert (siehe Abschnitt 3.4.1.1 und Abschnitt 3.4.1.2).

Insbesondere bei der Gewichtung der einzelnen Kriterien zeigt sich trotz Sensitivitätsanalyse die Notwendigkeit für den bzw. die Entscheidungsträger, sich intensiv mit der Thematik auseinanderzusetzen, was die Festlegung von Zielsetzungen und deren Berücksichtigung bei der Auswahl von Bauwerken für die Instandhaltungsplanung betrifft. Es müssen die Gewichtungsfaktoren festgelegt werden, wobei mit PROMETHEE II keine methodische Unterstützung zur Verfügung gestellt wird. Mit der Sensitivitätsanalyse kann untersucht werden, wie sich Veränderungen der Gewichtung auf die Rangfolge auswirken. Bereits kleinste Veränderungen bewirken in der Regel gleich mehrere Wechsel in der Rangliste, was im Wesentlichen auf die große Anzahl Alternativen zurückzuführen ist, die sich zudem in den Kriterienausprägungen zum Teil nur minimal unterscheiden.

### **3.4 Planungsinstrument für die Instandhaltungsplanung**

Die Ergebnisse der Datenerhebung und der Priorisierung sind differenzierte, jedoch nach wie vor statische Eingangsgrößen für eine Instandhaltungsplanung. Unberücksichtigt sind bislang noch zeitabhängige Veränderungen im Bauwerksbestand, zu denen im Wesentlichen Alterungsprozesse der baulichen Substanz gehören, was sich in auftretenden Schäden und folglich einer zunehmenden Zustandsverschlechterung zeigt. Veränderungen werden verursacht durch die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen, die einer Zustandsverschlechterung entgegenwirken. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Datenerhebung und der Priorisierung mit diesen zeitveränderlichen Eigenschaften der Bauwerke verbunden.

#### **3.4.1 Modellierung zeitveränderlicher Eigenschaften**

##### **3.4.1.1 Alterungsprozesse**

Zur Abbildung der Alterungsprozesse werden die Prognosefunktionen für die Schadensentwicklung aus dem Modul Zustandsprognose der Inspektionsdatenbank WSVPruf für die Simulation aufbereitet. Ausgehend von der Zustandsnote (ZN) von Massivbau (Mb) und Stahlwasserbau (Stb) zum Untersuchungszeitpunkt wird mithilfe dieser Funktionen für jedes Bauwerk prognostiziert, in welchem Jahr der Mb und der Stb voraussichtlich die Zustandsnote 3,7 und somit den schlechtesten Zustandsnotenbereich 4 erreichen. Um die Materialeigenschaften in den Alterungsprozessen zu berücksichtigen, werden für den Mb und den Stb unterschiedliche Prognosefunktionen verwendet (siehe Abschnitt 2.2.2.2). Die Zustandsprognose in WSVPruf ist bislang nur für Einzelbauwerke möglich und die unterschiedlichen Alterungsprozesse können sich überlagern. Zudem berechnet das Modul entweder die Restnutzungsdauer bei Bauwerken mit erfassten Schäden auf Grundlage der Schadensbewertung oder bei Bauwerken ohne erfasste Schäden mithilfe des Bauwerksalters.

Um die Anwendung in einer Simulation mit dem Datensatz von 245 Bauwerken mit und ohne Schäden zu ermöglichen, werden zunächst im Modul Zustandsprognose die Funktionen der Verfallsprozesse extrahiert, für die der Mb bzw. der Stb zuerst eine Zustandsnote  $\geq 3,7$  erreichen. Auf diese Weise wird in der Simulation die Überlagerung unterschiedlicher Prozesse verhindert und gleichzeitig wird jeweils der ungünstigste Fall der Alterungsprozesse ausgewählt. Bei diesen handelt es sich beim Massivbau um den Verfallsprozess „Oberflächenschaden Beton“ und beim Stahlbau um den Verfallsprozess „Korrosion im Stahlwasserbau“ (siehe Abbildung 33). Gemäß den Verfallsprozessen treten nach ca. 20 Jahren die ersten Schäden der Schadensklasse 2 im Stahlwasserbau (blaue Linie) und im Massivbau (rote Linie) auf, die sich im weiteren Zeitverlauf verschlechtern, bis der Stahlbau nach ca. 57 Jahren bzw. der Massivbau nach ca. 83 Jahren die Schadensklasse 4 erreichen.

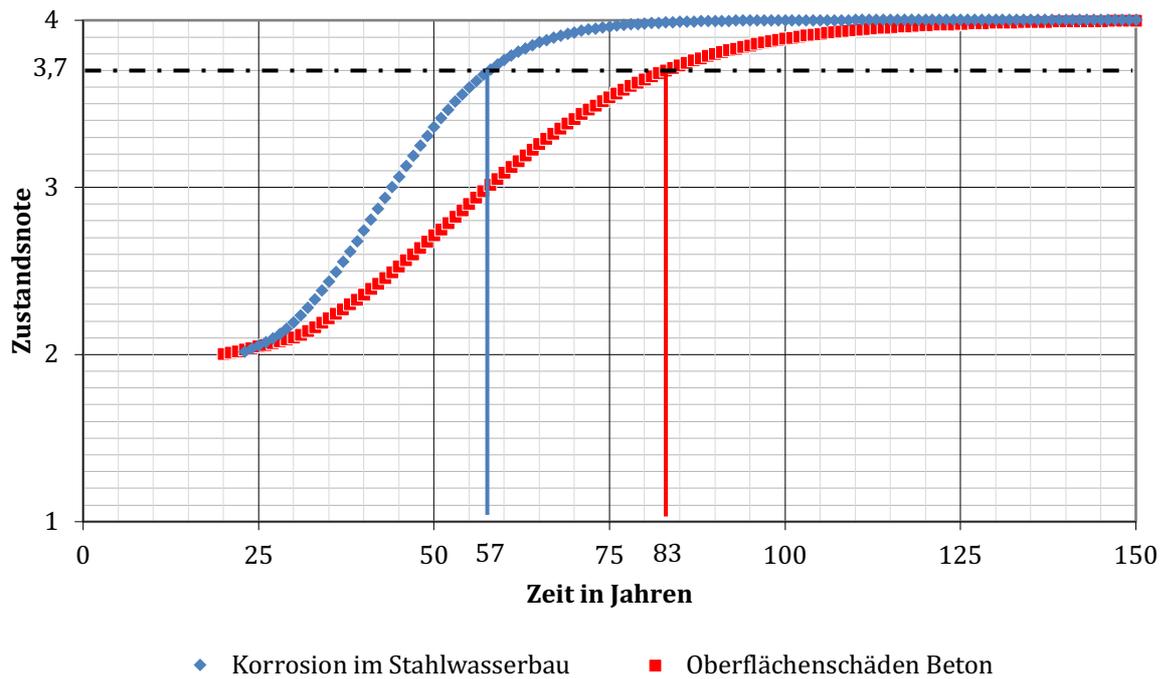


Abbildung 33: Entwicklung der Zustandsnoten für zwei Verfallsprozesse (nach Kühni et al., 2008)

Für die Umsetzung der Verfallsprozesse in einem Algorithmus in der Skriptsprache R (siehe Anhang VII, S. 204-215) wird für beide Verfallsprozesse in einem ersten Schritt für jedes einzelne Jahr der Nutzungsdauer die rechnerische Zustandsnote ermittelt. Diese Werte lassen sich mit einer Funktion abbilden, mit der umgekehrt von jeder beliebigen Zustandsnote ausgehend und auch ohne erfasste Schäden die verbleibende Restnutzungsdauer berechnet wird. Die Funktionen (25) und (26) sind eine Approximation der Verfallsprozesse „Oberflächenschaden Beton“ und „Korrosion im Stahlwasserbau“ und unterscheiden die Zustandsnotenbereiche 1,0 bis 1,3 sowie 1,7 bis 4,0. Für Bauwerke ohne Zustandsnote oder mit einer Zustandsnote im Bereich 1 (zeitunveränderlicher Schaden), wird immer von einer verbleibenden Restnutzungsdauer von 100 Jahren ( $M_b$ ) bzw. 60 Jahren (Stb) ausgegangen. Für Zustandsnoten  $\geq 1,7$  werden die Restnutzungsdauern gemäß den entwickelten Funktionen berechnet. Die verbleibende Restnutzungsdauer  $R_{Mb}$  für den Massivbau errechnet sich gemäß dieser Vorgehensweise zu:

$$R_{Mb}(x) = \begin{cases} 100 \\ \text{für alle } x \in [1,0; 1,3] \\ \\ 100 - 21,136 x_{Mb}^3 - 180,68 x_{Mb}^2 + 536,05 x_{Mb} - 502,9 \\ \text{für alle } x \in [1,7; 4,0] \end{cases} \quad (25)$$

$R_{Mb}(x)$ : Restnutzungsdauer des Massivbaus  
 $x_{Mb}$ : aktuelle Zustandsnote des Massivbaus

Die verbleibende Restnutzungsdauer  $R_{Stb}$  für den Stahlbau errechnet sich analog zu:

$$R_{Stb}(x) = \begin{cases} 60 & \text{für alle } x \in [1,0; 1,3] \\ 60 - 11,669 x_{Stb}^3 - 102,4 x_{Stb}^2 + 308,76 x_{Stb} - 285,59 & \text{für alle } x \in [1,7; 4,0] \end{cases} \quad (26)$$

$R_{Stb}(x)$ : Restnutzungsdauer des Stahlbaus

$x_{Stb}$ : aktuelle Zustandsnote des Stahlbaus

Die entwickelten Prognosefunktionen ermöglichen ausgehend von einer beliebigen Zustandsnote für den Massivbau und den Stahlbau die Bestimmung der verbleibenden Restnutzungsdauer. So errechnet sich bspw. mit der Prognosefunktion für den Massivbau (siehe Abbildung 34, rote Datenreihe) für die Zustandsnote 2,7 eine verbleibende Nutzungsdauer von ca. 57 Jahren in Bezug zu den 100 Jahren bemessener Gesamtnutzungsdauer (siehe Abbildung 34, rote Linie). Parallel ist mit der Prognosefunktion eine verbleibende Nutzungsdauer für die Zustandsnote 3,7 von ca. 22 Jahren in Bezug zur bemessenen Gesamtnutzungsdauer hinterlegt (siehe Abbildung 34, gestrichelte Linie). Das entspricht dem Zeitpunkt zu dem der Zustandsnotenbereich 4 und folglich der Eingreifzeitpunkt erreicht wird. Der Eingreifzeitpunkt gibt an, wann mit einer Instandhaltungsmaßnahme zu beginnen ist, um sie vor Ablauf der Gesamtnutzungsdauer abschließen zu können. Rechnerisch ergibt sich in diesem Fall eine Restnutzungsdauer bis zum Erreichen des Zustandsnotenbereichs 4 bzw. bis zum Eingreifzeitpunkt von 38 Jahren.

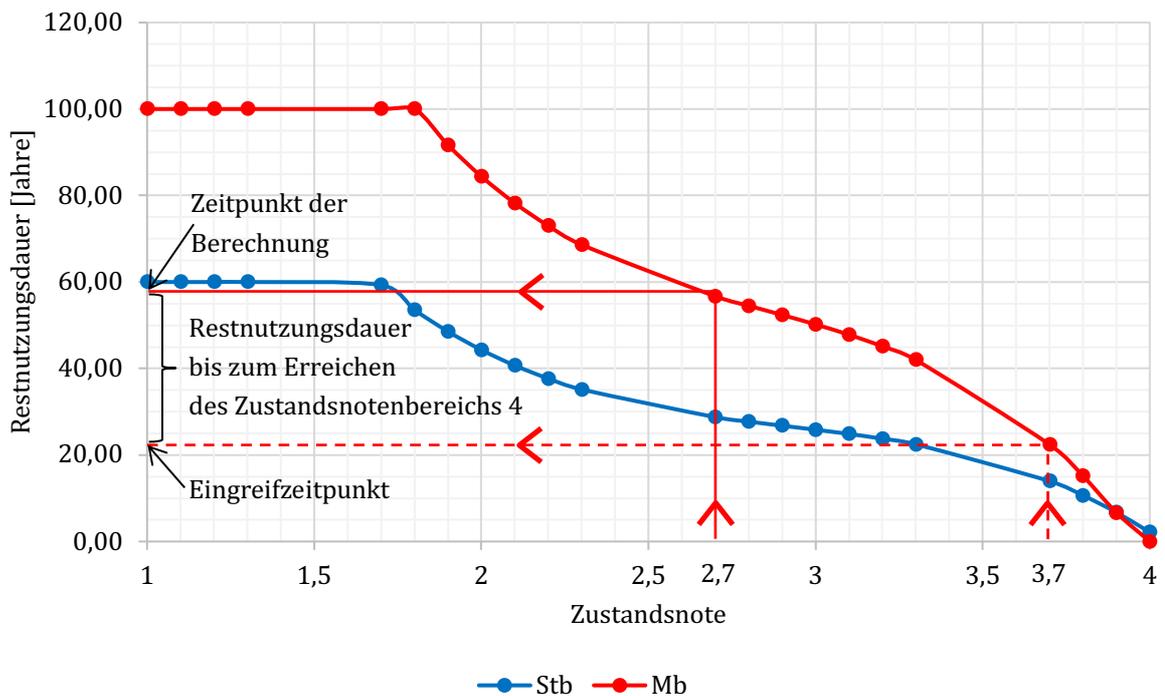


Abbildung 34: Bestimmung des Eingreifzeitpunkts mittels der Prognosefunktion (Eigene Darstellung)

In der Simulation (siehe Abschnitt 3.4.2) werden diese Funktionen verwendet, um jeweils für den Massivbau und den Stahlbau aller Wehranlagen zu bestimmen, wann der Eingreifzeitpunkt resp. der Zustandsnotenbereich 4 ( $ZN \geq 3,7$ ) und somit das Ende der Nutzungsdauer erreicht wird. Mithilfe der Ergebnisse erfolgt eine chronologische Ordnung der zu erwartenden Maßnahmen, so dass jeder Massivbau und jeder Stahlbau einer Wehranlage separat dem Jahr zugeordnet wird, in dem der Eingreifzeitpunkt für die entsprechende Instandhaltungsmaßnahme zu erwarten ist.

#### 3.4.1.2 Instandhaltungsmaßnahmen

Nähert sich ein Bauwerk dem Ende seiner Restnutzungsdauer, stehen grundsätzlich mehrere Optionen für Instandhaltungsmaßnahmen zur Auswahl. Für Wehranlagen lassen sich grundsätzlich drei Typen von Instandhaltungsmaßnahmen am Ende der Nutzungsdauer unterscheiden (Kirchner, 2019):

- *Instandsetzung*: umfasst alle baulichen Maßnahmen, welche die vorhandene Bausubstanz der Wehranlage in einen Zustand zurückversetzen, der den Anforderungen an die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit wieder vollumfänglich genügt.
- *Neubau*: ersetzt die alte Wehranlage durch eine neue Anlage.
- *Kombilösung*: setzt den Massivbau instand und der Verschluss (Stahlbau) einer Wehranlage wird durch einen neuen ersetzt. Der Umfang der Instandsetzung ist bei der Kombilösung abhängig vom Zustand des Massivbaus und reicht von kleineren oberflächlichen Maßnahmen (kleine Instandsetzung) bis hin zum Ersatz von Teilen der Bewehrung und des Betons (große Instandsetzung).

Die Analyse von 17 Voruntersuchungen zu Instandhaltungsmaßnahmen für mechanisch bewegliche Wehranlagen zeigt, dass von den insgesamt 72 untersuchten Varianten nur fünf eine Instandsetzung sowohl für den Stahlbau als auch für den Massivbau untersuchen (Kirchner, 2019). Grund hierfür sind bspw. der schlechte bauliche Allgemeinzustand, veränderte Anforderungen seitens der Schifffahrt bzw. rechtlicher oder normativer Rahmenbedingungen oder ein höherer zu erwartender Aufwand als bei einem Neubau. Infolgedessen wurde die Instandsetzung als Variante unter technischen und/oder betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten als nachteilig bewertet und wird auch in der vorliegenden Arbeit als Variante nicht weiter untersucht. Bei den verbleibenden Varianten handelt es sich um 46 Kombilösungen und um 21 Neubaumaßnahmen. Für die Simulation ist die Kombilösung als große oder kleine Instandsetzung und der Neubau modelliert. Abbildung 35 zeigt den für die Simulation entwickelten Entscheidungsbaum.

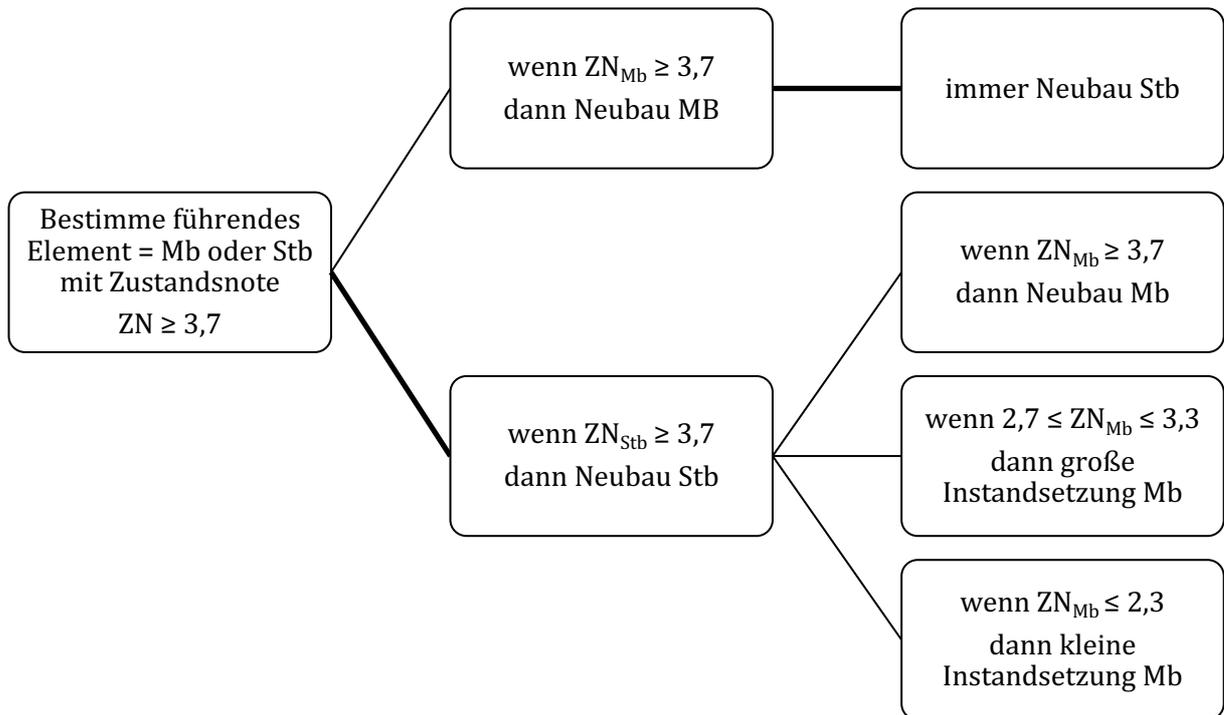


Abbildung 35: Entscheidungsbaum für Instandhaltungsmaßnahmen (Eigene Darstellung)

Im ersten Schritt wird anhand des Datensatzes für das jeweilige Untersuchungsjahr geprüft, ob der Massivbau oder der Stahlbau aufgrund der Zustandsnote  $ZN \geq 3,7$  das führende Element ist. Wenn der Massivbau das führende Element ist, erfolgt dessen Ersatz in Form einer Neubaumaßnahme. Der Stahlwasserbau wird als begleitende Maßnahme zwingend ersetzt, da er aufgrund seines Zustands und/oder seiner Konstruktion nicht wiederverwendbar ist.

Wenn der Stahlbau das führende Element ist (Zustandsnote  $ZN \geq 3,7$ ), wird der Stb durch einen Neubau ersetzt. Die begleitende Maßnahme für den Massivbau wird in Abhängigkeit von dessen Zustand bestimmt:

- Eine  $ZN_{Mb} \geq 3,7$  für den Mb bedeutet, dass dieser wie der Stb vollständig durch einen Neubau ersetzt wird.
- Bei einer Zustandsnote für den Mb im Bereich  $2,7 \leq ZN_{Mb} \leq 3,3$  erfolgt eine große Instandsetzung.
- Eine Zustandsnote für den Mb im Bereich  $ZN_{Mb} \leq 2,3$  heißt, dass der Mb mit einer kleinen Instandsetzung für den neuen Verschluss vorbereitet, also ertüchtigt wird.

Die Kombilösungen Neubau Stb und große Instandsetzung Mb bzw. die Kombilösung Neubau Stb und kleine Instandsetzung Mb werden nachfolgend als große bzw. kleine Instandsetzung bezeichnet.

### 3.4.1.3 Rücksetzwerte

In Abhängigkeit von der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme verbessert sich die Zustandsnote des Bauwerks und die verbleibende Restnutzungsdauer verlängert sich. Für die Simulation werden für diese Verbesserungen in Abhängigkeit von der durchgeführten Maßnahme Rücksetzwerte festgelegt, die für die einzelnen Instandhaltungsmaßnahmen in Tabelle 41 zusammengestellt sind. Ein Rücksetzwert gibt innerhalb der Simulation vor, mit welchem Wert die Zustandsnoten von Mb und Stb eines Bauwerks zu überschreiben sind, wenn die Instandhaltungsmaßnahme gemäß Entscheidungsbaum in Abbildung 35 durchgeführt wurde. Die Rücksetzwerte nach einem Neubau entsprechen einer maximalen Nutzungsdauer von 100 Jahren für den Massivbau und 60 Jahren für den Stahlbau.

Voraussetzung für eine große Instandsetzung am Massivbau ist eine Zustandsnote im Bereich  $2,7 \leq ZN_{Mb} \leq 3,3$ . Nach der Maßnahme verbessert sich der Zustand des Massivbaus, sodass die neue Zustandsnote für die Simulation mit  $ZN_{MB} = 2,3$  festgelegt wird. Aus der Prognosefunktion errechnet sich die neue Nutzungsdauer für den Massivbau von 62 Jahren.

Voraussetzung für die kleine Instandsetzung ist eine  $ZN_{Mb} \leq 2,3$ , die sich nach der Maßnahme auf  $ZN_{MB} = 2,0$  verbessert. Aus der Prognosefunktion errechnet sich eine neue Nutzungsdauer für den Massivbau von 83 Jahren.

Tabelle 41: Rücksetzwerte nach einer Instandhaltungsmaßnahme (Eigene Darstellung)

Führendes Element	Instandhaltungsmaßnahme	Neue Zustandsnote		Neue Nutzungsdauer	
		Stahlbau	Massivbau	Stahlbau	Massivbau
Massivbau	Neubau Stb	Stahlbau	1,0	Stahlbau	60 J.
		Massivbau	1,0	Massivbau	100 J.
Stahlbau	Neubau Mb	Stahlbau	1,0	Stahlbau	60 J.
		Massivbau	1,0	Massivbau	100 J.
	Große Instandsetzung Mb	Stahlbau	1,0	Stahlbau	60 J.
		Massivbau	2,3	Massivbau	62 J.
Kleine Instandsetzung Mb	Stahlbau	1,0	Stahlbau	60 J.	
	Massivbau	2,0	Massivbau	83 J.	

Auch wenn die Differenz bei den Rücksetzwerten für den Massivbau nur minimal erscheint, bewirkt sie einen rechnerischen Unterschied von 21 Jahren für die neue Nutzungsdauer von 62 Jahren (große Instandsetzung) bzw. 83 Jahren (kleine Instandsetzung). So wird berücksichtigt, dass bei einer großen Instandsetzung aufgrund des Ausgangszustands des Massivbaus umfangreichere Maßnahmen notwendig sind. Der ursprüngliche Zustand des Mb im Zustandsnotenbereich 3 verbessert sich deutlich, wird jedoch nicht so gut wie der Bauwerkszustand nach einer kleinen Instandsetzung, bei welcher der Ausgangszustand des Massivbaus grundsätzlich besser war. Die einzelnen Werte können in der Eingabemaske (siehe Tabelle 43) jederzeit manuell verändert werden.

### 3.4.1.4 Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen

Um die Entwicklung des Instandhaltungsrückstaus nachverfolgen und beeinflussen zu können, ist es im Vorfeld nicht nur wichtig zu wissen, wann und welche Maßnahmen zu erwarten sind, sondern auch mit welchen Kosten zu rechnen ist. So kann das jährliche Budget bedarfsgerecht verteilt oder in gleichbleibender Höhe festgelegt werden.

In Abschnitt 3.2.2.4 wurde beschrieben, dass sich die tatsächlichen Gesamtkosten beim Neubau einer Wehranlage mit etwa 65 % dem Massivbau und mit etwa 25 % dem Stahlbau zuordnen lassen. Grundlage war eine Realdatenanalyse von 13 abgeschlossenen Neubauprojekten, bei der zudem ein Zusammenhang zwischen der Höhe der Baukosten und den Bauwerksgrößen lichte Weite und Fallhöhe identifiziert werden konnte (Bödefeld, Brockelmann, 2019).

Diese Kostenaufteilung kann nicht unverändert auf eine der Kombilösungen (siehe 3.4.1.2) übertragen werden, da insbesondere für kleine Instandsetzungen deutlich geringere Kosten für den Massivbau zu erwarten sind. Für die angepasste Kostenaufschlüsselung wird auf die Ergebnisse der Untersuchungen zu den 67 Varianten aus den Voruntersuchungen zu Instandhaltungsmaßnahmen zurückgegriffen. Wird alles in Bezug zu den Neubaukosten gesetzt, lassen sich nach Kirchner (2019) für die Simulation die in Tabelle 42 zusammengestellten anteiligen Kosten ableiten.

Tabelle 42: Anteilige Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen (Eigene Darstellung)

<b>Kosten</b>	<b>Neubau</b>	<b>Große Instandsetzung</b>	<b>Kleine Instandsetzung</b>
Gesamtkosten	100 %	-	-
Baukosten	90 %	70 %	50 %
Massivbau	65 %	42 %	7,5 %
Stahlbau	25 %	28 %	42,5 %

Die anteiligen Kosten berechnen sich im Bezug zu den Gesamtkosten eines Neubaus (100%). Abzüglich der Kosten bspw. für die Erschließung und Planung verbleiben 90 % Baukosten, die in unterschiedlichen Anteilen dem Massivbau und dem Stahlbau zuzuordnen sind.

## 3.4.2 Aggregation und Analyse langfristiger Entwicklungen

### 3.4.2.1 Aufbau der Simulation

Mit dem entwickelten EUS wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Entscheidungen und Rahmenbedingungen langfristig auf den Bauwerksbestand auswirken und welche Parameter den Abbau des Instandhaltungsrückstaus begünstigen.

Die Simulation ist in zwei Phasen unterteilt. Phase 1 umfasst die Schritte 1 bis 3 und wird einmalig zu Beginn einer Simulation durchgeführt. In Phase 1 erfolgt die zustandsabhängige chronologische Ordnung (siehe Abschnitt 3.4.1.1). Die Schritte 4 bis 6 gehören zur Phase 2 und entsprechen zusammen einem Zyklus, der für jedes Untersuchungsjahr wiederholt wird. Dabei werden die

Bauwerke gemäß ihres Prioritätswertes sortiert (siehe Abschnitt 3.3) und es wird die Instandhaltungsmaßnahme ausgewählt (siehe Abschnitt 3.4.1.2). Schritt 6 beinhaltet zudem eine Iterationschleife, die innerhalb eines Untersuchungsjahres wiederholt wird, solange die Summe der Kosten der Instandhaltungsmaßnahmen (siehe Abschnitt 3.4.1.4) mit dem noch verfügbaren Budget (siehe Abschnitt 3.4.2.4) durchgeführt werden können. Die Simulationsdauer ist in der aktuellen Version mit 150 Jahren voreingestellt, sie kann bei Bedarf über die Eingabemaske angepasst werden. Die Schritte sind (siehe Abbildung 36):

- (1) Im ersten Schritt werden für alle zu untersuchenden Wehranlagen aus dem Bauwerksverzeichnis die jeweiligen Zustandsnoten für den Stahlwasserbau und den Massivbau ermittelt.
- (2) Mit den Zustandsnoten und den Prognosefunktionen für den Stahlwasserbau und den Massivbau wird die verbleibende Zeit bis zum Erreichen der Zustandsnote 3,7 resp. die Restnutzungsdauer berechnet.
- (3) Der Stb und der Mb aller Bauwerke werden gemäß der Prognoseergebnisse separat in das Jahr eingeordnet, in dem die Zustandsnote 3,7 und somit der Eingreifzeitpunkt erreicht wird.
- (4) Innerhalb des Untersuchungsjahres werden alle eingeordneten Stb und Mb absteigend nach Prioritätswert aus PROMETHEE II sortiert.
- (5) Für das Element (Mb oder Stb) mit der höchsten Priorität innerhalb des Untersuchungsjahres wird vom zugehörigen Stb bzw. Mb die aktuelle Zustandsnote ermittelt und entschieden, welche Instandhaltungsmaßnahme zu welchen Kosten durchzuführen ist.
- (6) (6a) Solange ausreichend Budget verfügbar ist, werden die Maßnahmen absteigend nach Priorität durchgeführt und die jeweiligen Kosten vom Budget für das aktuelle Jahr abgezogen. Es werden jeweils die neuen Zustandsnoten resp. Rücksetzwerte und die neuen Nutzungsdauern bestimmt. Der Mb und der Stb werden in die in der Zukunft liegenden Jahre eingeordnet, in denen die nächste Instandhaltungsmaßnahme erwartet wird.  
oder  
(6b) Reicht das verfügbare Budget nicht, wird das aktuelle Element und die verbliebenen Elemente des Untersuchungsjahres in das Folgejahr übertragen.  
Der Zyklus wiederholt sich für das Folgejahr ab Punkt 4.

Die in das Folgejahr übertragenen Bauwerke werden gemeinsam mit den bereits vorhandenen Bauwerken des Folgejahres anhand ihrer mit der Methode PROMETHEE II ermittelten Priorität sortiert. Für Bauwerke mit einem niedrigen Prioritätswert kann die Situation eintreten, dass sie mehrere Jahre in Folge nicht in der Instandhaltungsplanung berücksichtigt werden, weil bspw. das verfügbare Budget nicht ausreicht und folglich Bauwerken mit einer höheren Priorität der Vorrang gegeben wird.



Abbildung 36: Teilschritte der Simulation (Eigene Darstellung)

Für die Szenarioanalyse werden die Parameter der zu erwartenden Nutzungsdauer, die Höhe des verfügbaren Budgets und die Zeitspanne zum Vorziehen von Maßnahmen variiert. Die Bezeichnungen der Szenarien sind jeweils drei Ziffern, wobei jede Ziffer einem Parameter entspricht, der variiert wird. Die erste Ziffer steht für die erwartete Nutzungsdauer (vier untersuchte Szenarien), die zweite für das verfügbare Budget (drei untersuchte Szenarien) und die dritte für die Altersdifferenz resp. die Zeitspanne, in der eine Instandhaltungsmaßnahme vorgezogen werden kann (vier untersuchte Szenarien).

### 3.4.2.2 Erläuterungen zu den Ergebnissen

#### *Allgemeines*

Für jede Simulation können die Parameter in einer Eingabemaske individuell festgelegt werden (siehe Tabelle 43). Weitere Informationen liefert das Bauwerksverzeichnis, in dem folgende Daten zu jedem Bauwerk erfasst sind:

- Name und Objekt-ID,
- Bezeichnung der Wasserstraße,
- Aktuelle Zustandsnote von Massivbau und Stahlbau,
- Werte der Kriterien für die Priorisierung,
- Nettoflusswert nach PROMETHEE II,
- Neubaukosten für Massivbau und Stahlbau.

Tabelle 43: Eingabemaske für die Parameter in der Simulation (Eigene Darstellung)

Parameter	Wert	Beschreibung
Startjahr	2019	Jahr, in welchem mit der Prognose begonnen werden soll
Prognosezeitraum	150	Zeitraum, über den die Veränderung der Zustandsnoten betrachtet werden soll [a]
Budget	31,88	jährlich zur Verfügung stehendes Budget für Instandhaltungsmaßnahmen [Mio. €]
Altersdifferenz AD	10	wenn Bauwerk in weniger als AD Jahren instand gesetzt werden soll, darf es vorgezogen werden [a]
Lebensdauer Stw	60	Lebensdauer des Stahlwasserbaus [a]
Lebensdauer Mb	100	Lebensdauer des Massivbaus [a]
Lebensdauer Mb (gr. IH)	62	Lebensdauer Massivbau nach großer IH [a] (empfohlen: ~62 Jahre)
Lebensdauer Mb (kl. IH)	83	Lebensdauer Massivbau nach kleiner IH [a] (empfohlen: ~80 Jahre)
Kosten Stw Neubau	25	Kosten des Stahlwasserbaus bei Instandsetzung (Neubau) des gesamten Bauwerks [%]
Kosten Mb Neubau	65	Kosten des Massivbaus bei Instandsetzung (Neubau) des gesamten Bauwerks [%]
Kosten Stw gr. IH	42	Kosten des Stahlwasserbaus bei Neubau Stw und Reparatur Mb [%]
Kosten Mb gr. IH	28	Kosten des Massivbaus bei Neubau Stw und Reparatur Mb [%]
Kosten Stw kl. IH	43	Kosten des Stahlwasserbaus bei Neubau Stw und Ertüchtigung Mb [%]
Kosten Mb kl. IH	7	Kosten des Massivbaus bei Neubau Stw und Ertüchtigung Mb [%]
Szenario	1.2.3	Bezeichnung des Szenarios, erste Ziffer: Lebensdauer; zweite Ziffer: Kosten; dritte Ziffer: Altersdifferenz
max. Bauwerke pro Jahr	2	Anzahl Bauwerke, die in einem Untersuchungsjahr maximal umgesetzt werden

Das Ausgangsszenario bildet die aktuelle Situation ab und untersucht die Entwicklungen für die OUGr Wehranlagen an den Bundeswasserstraßen, wenn pro Jahr zwei Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. Dieser Wert liegt etwas über der durchschnittlichen Anzahl durchgeführter Neubauprojekte in der WSV mit 40 Wehranlagen der Inspektionskategorie A seit 1990 (Stand Januar 2019). Durchgeführte kleine oder große Instandsetzungsmaßnahmen werden bislang in keiner zentralen Datenbank als solche erfasst und werden nicht berücksichtigt.

Szenario 1.2.3. wird als Vergleichsszenario festgelegt. Die zu erwartende Nutzungsdauer entspricht bei diesem Szenario DIN 19704-1 (2014) mit einer Nutzungsdauer von 70 Jahren für den Stahlbau und der DIN EN 1990/NA mit einer Nutzungsdauer von 100 Jahren für den Massivbau (siehe Abschnitt 3.4.2.3). Das verfügbare Budget entspricht mit 31,88 Mio. € ca. 1,5 % des über die Kostenfunktionen ermittelten Anlagevermögens der Wehranlagen (siehe Abschnitt 3.4.2.4).

Zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen können bis zu 10 Jahre vorgezogen werden (siehe Abschnitt 3.4.2.5). Im Gegensatz zum Ausgangsszenario, dass auf vier Maßnahmen pro Jahr (entspricht 2 Stb und 2 Mb und somit 2 Bauwerken) begrenzt ist, wird die Anzahl der durchführbaren Maßnahmen bei Szenario 1.2.3 durch das verfügbare Budget bestimmt (siehe Tabelle 44).

Tabelle 44: Parameter von Ausgangsszenario und Vergleichsszenario (Eigene Darstellung)

<b>Ausgangsszenario 1.2.3 maxBW2</b>			
Nutzungsdauer		Anzahl Maßnahmen / Jahr	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	Mittelwert seit 1990	Nein
100 Jahre	60 Jahre	4	0 Jahre
<b>Szenario 1.2.3 (Vergleichsszenario)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
100 Jahre	70 Jahre	31,88 Mio. €	10 Jahre

Im Ergebnis der Simulation werden für jedes Szenario eine grafische Darstellung in einem Plot sowie Tabellen zu den jährlich durchgeführten und den verschobenen Maßnahmen erstellt. Damit wird zum einen die langfristige Entwicklung des Bauwerksbestands visualisiert und es werden zum anderen relevante Daten zu den einzelnen Jahren zusammengestellt, wie z. B Name und Objekt-ID der Bauwerke, welche Maßnahmen und Kosten zu erwarten sind (unterteilt in Massivbau und Stahlbau) sowie zur weiteren Analyse die zugehörigen Werte der sechs Kriterien für jedes Bauwerk.

#### *Graphische Darstellung in Plots*

Die Plots zu jeder Simulation umfassen drei Diagramme. Das obere Diagramm zeigt die Entwicklung der durchschnittlichen Dauer bis zur nächsten Maßnahme (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38). Dieser Wert ist direkt an die Zustandsnote gekoppelt. Je schlechter die Zustandsnote, umso kürzer ist die Restnutzungsdauer resp. die verbleibende Zeit bis zur nächsten Maßnahme. Ein geringer Mittelwert und somit ein Verlauf nahe der x-Achse bedeutet, dass viele Bauwerke in kurzer Zeit die Zustandsnote 3,7 erreichen und in die Instandhaltungsplanung aufgenommen werden müssen. Der Bauwerksbestand im Ausgangsszenario (siehe Abbildung 37) ist langfristig in einem schlechteren Zustand als in Szenario 1.2.3 (siehe Abbildung 38), weil nur zwei Wehranlagen pro Jahr instand gesetzt und andere notwendige Maßnahmen in Folgejahren verschoben werden. Gleichzeitig sind für die Folgejahre weitere Instandhaltungsmaßnahmen zu erwarten, welche nicht in erforderlichem Umfang durchgeführt werden. In der Folge baut sich ein Instandhaltungsrückstau auf. Die schwarze Linie im oberen Diagramm entspricht den Mittelwerten  $\mu$  der einzelnen Jahre und verläuft im Idealfall als waagerechte Gerade in möglichst großer Distanz zur x-

Achse. Die hellgrauen Linien in diesem Diagramm sind der Mittelwert abzüglich bzw. zuzüglich der Standardabweichung ( $\mu \pm \sigma$ ).

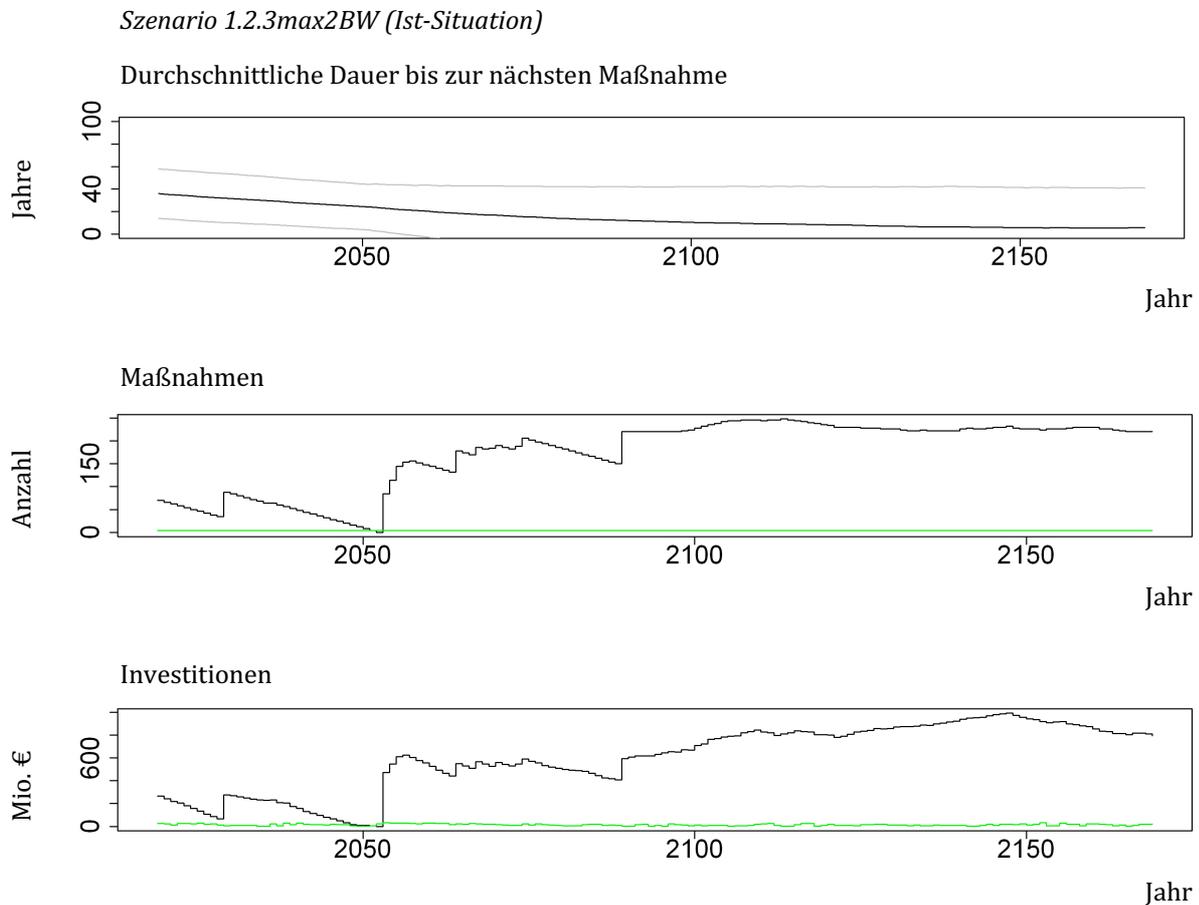


Abbildung 37: Plot der Simulation für das Ausgangsszenario (Eigene Darstellung)

Die beiden anderen Diagramme in den Plots zeigen den zeitlichen Verlauf der Anzahl Maßnahmen (Mitte) und der Höhe der Investitionen in Mio. € (unten). Bei beiden Diagrammen entspricht die schwarze Linie dem prognostizierten Bedarf und die hellgrüne Linie der Anzahl durchgeführter Maßnahmen (Mitte) bzw. dem verbrauchten Budget (unten).

Im Ausgangsszenario in Abbildung 37 übersteigt der Bedarf langfristig die Anzahl der durchgeführten Maßnahmen, da jährlich nur an zwei Bauwerken Maßnahmen realisiert werden. Bis 2052 kann der Instandhaltungsrückstau zunächst vollständig abgebaut werden (siehe Tabelle 46), nimmt dann wieder zu und hält sich gemäß den Ergebnissen der Simulation ab dem Jahr 2089 auf einem hohen Niveau zwischen 200 und 246 Maßnahmen (100 bis 123 Bauwerke).

Die schwarzen Linien für den ermittelten Bedarf in den Diagrammen zu den Maßnahmen und zu den Investitionen zeigen im Vergleichsszenario (siehe Abbildung 38) beide anfangs abfallende Werte, da mit den durchgeführten Maßnahmen der IH-Rückstau abgebaut wird. Aufgrund der heterogenen Verteilung in der Altersstruktur ist dann erneut mit einer Zunahme zu rechnen, da überdurchschnittlich viele Bauwerke aufgrund ihres Zustands in die Instandhaltungsplanung aufgenommen werden müssen. Im mittleren Diagramm entspricht der Verlauf der grünen Linie der

Anzahl durchgeführter Maßnahmen. Bei konstantem Budget können bspw. wenige teure oder mehrere günstige Instandhaltungsmaßnahmen realisiert werden, was zu den Schwankungen im zeitlichen Verlauf führt. Langfristig stellt sich ein Gleichgewicht aus Investitionsbedarf (Diagramm unten, schwarze Linie) und getätigten Investitionen (Diagramm unten, grüne Linie) ein, wenn das verfügbare Budget wie in diesem Szenario mit 31,88 Mio. € ausreichend hoch bemessen ist.

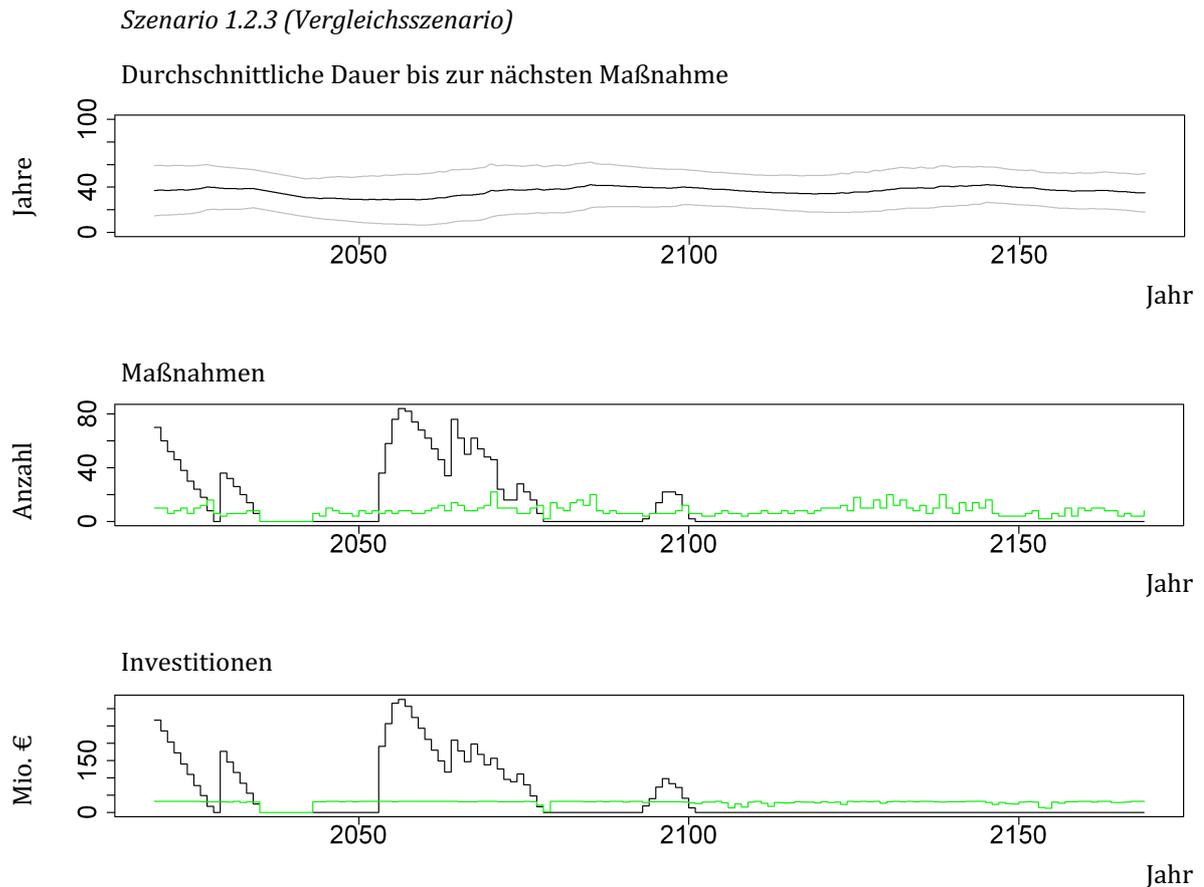


Abbildung 38: Plot der Simulation für das Vergleichsszenario (Eigene Darstellung)

Auch beim Verlauf im verbrauchten Budget treten aufgrund der heterogenen Zusammensetzung des Bauwerksbestandes Phasen auf, in denen keine Maßnahme durchgeführt wird. In diesen Jahren werden keine Instandhaltungsmaßnahmen eingeplant, wenn diese mehr als 10 Jahre in der Zukunft liegen und, wie für dieses Szenario definiert, nicht vorgezogen werden. Beide Kurven verlaufen in dieser Phase auf der x-Achse. Können Bauwerke vorgezogen werden, verläuft die schwarze Linie auf der x-Achse, da kein Bedarf ermittelt wurde, und die grüne Linie nimmt positive Werte aufgrund der vorgezogenen Maßnahmen an. Langfristig wird durch das Verschieben von Maßnahmen und die Option, Maßnahmen vorzuziehen, ein gleichbleibend ausgeglichenes Verhältnis zwischen prognostizierten und durchgeführten Maßnahmen erreicht.

Für einen unmittelbaren Vergleich mit anderen Szenarien werden in jeder Simulation für

- die durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme (DbN),
- die Anzahl durchgeführter Maßnahmen (M),
- die Höhe der getätigten Investitionen (I),

jeweils der Mittelwert (mv) und die Standardabweichung (sd) für den Untersuchungszeitraum von 150 Jahren berechnet und mit den Plots ausgegeben. Zudem werden der Name des Szenarios, die angenommene Lebensdauer (siehe Abschnitt 3.4.2.3), das jährlich verfügbare Budget (siehe Abschnitt 3.4.2.4) und die Zeitspanne zum Vorziehen von Maßnahmen (siehe Abschnitt 3.4.2.5) in der Legende angegeben.

Vergleicht man bspw. den Mittelwert und die Standardabweichung der durchschnittlichen Dauer bis zur nächsten Maßnahme im Ausgangsszenario 1.2.3max2BW mit den Werten im Vergleichsszenario 1.2.3, zeigt sich analog zu den Kurvenverläufen in den Plots, dass das Ausgangsszenario deutlich schlechtere Ergebnisse liefert (siehe Tabelle 45). Das zeigt sich unter anderem in den Werten zum Instandhaltungsrückstau (IHR). Im Ausgangsszenario 1.2.3max2BW kann der IHR nicht abgebaut werden, das Maximum (Max IHR) liegt bei 248 Maßnahmen (124 Bauwerke) und das Minimum (Min IHR) bei 0 (siehe Tabelle 46).

Dabei gilt für die vorliegende Arbeit der IHR in dem Jahr als abgebaut, im welchem die Anzahl durchgeführter Maßnahmen größer oder gleich dem prognostizierten Bedarf ist und die Anzahl der durchgeführten Maßnahmen auch zu keinem späteren Zeitpunkt in der Simulation kleiner als der prognostizierte Bedarf wird. Im Vergleichsszenario 1.2.3 ist der IHR gemäß den Ergebnissen der Simulation ab dem Jahr 2099 abgebaut (siehe Tabelle 47).

Tabelle 45: Einzelwerte zu Ausgangsszenario und Vergleichsszenario (Eigene Darstellung)

Szenario	DbN_mv	DbN_sd	M_mv	M_sd	I_mv	I_sd	Abbau IHR bis	Max IHR	IHR_mv
1.2.3 max2BW	14,9	9,3	4,0	0,0	14,6	8,1	--	248	173,2
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8

DbN_mv	Mittelwert Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
DbN_sd	Standardabweichung Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
M_mv	Mittelwert Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
M_sd	Standardabweichung Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
I_mv	Mittelwert Höhe der Investitionen [Mio. €]
I_sd	Standardabweichung Höhe der Investitionen [Mio. €]
IHR	Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]
IHR_mv	Mittelwert Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]

Einerseits kann so mithilfe der Plots ein visueller Eindruck zu den einzelnen Szenarien bzw. im Vergleich der Szenarien miteinander gegeben werden, andererseits werden für die Verwendung in der Instandhaltungsplanung konkrete Ergebnisse in Tabellen ausgegeben.

### Zusammenstellung der Daten

Einen Überblick gibt die Tabelle *Gesamtergebnis*, in der für jedes Jahr angegeben ist, wie viele Maßnahmen notwendig sind und wie viele durchgeführt werden können. Zudem werden für jedes Jahr die Daten erfasst zur Höhe des Finanzbedarfs, zu den Kosten der durchgeführten Maßnahmen und der Höhe des Budgets, das nicht genutzt wurde. Tabelle 46 zeigt eine Auswahl der Daten für das Ausgangsszenario 1.2.3max2BW.

In den ersten Jahren kann der IHR sukzessive abgebaut werden. Für die Jahre 2029 und 2053 werden 54 bzw. 84 neue Instandhaltungsmaßnahmen prognostiziert. Der erste Peak im Jahr 2029 kann in den Folgejahren zunächst abgebaut werden, der zweite Peak im Jahr 2053 führt durch Maßnahmen in den Folgejahren zu einem Instandhaltungsrückstau, der ab 2089 auf durchschnittlich 230 Maßnahmen (114 Bauwerke) ansteigt und langfristig auf diesem Niveau bestehen bleibt.

Tabelle 46: Gesamtergebnis für das Ausgangsszenario 1.2.3max2BW (Eigene Darstellung)

Jahr	Bedarf Maßnahmen	Anzahl Investitionen	Bedarf [Mio. €]	Investitionen [Mio. €]	Restbudget [Mio. €]
2019	2019	70	4	267,256	24,437
2020	2020	66	4	242,819	23,685
2021	2021	62	4	219,133	12,809
...	...	...	...	...	...
2027	38	4	87,805	23,028	8,852
2028	34	4	64,777	12,63	19,25
2029	88	4	275,526	7,288	24,592
...	...	...	...	...	...
2052	0	4	0	24,039	7,841
2053	84	4	472,818	31,346	0,534
2054	114	4	544,467	29,802	2,078
2055	144	4	608,729	28,01	3,87
2056	154	4	622,764	30,328	1,552
...	...	...	...	...	...

Auch im Vergleichsszenario 1.2.3 (siehe Tabelle 47) werden für die Jahre 2029 und 2053 gleichzeitig mehrere Maßnahmen erwartet. Da ausreichend Budget zur Verfügung steht und es zudem möglich ist, prognostizierte Instandhaltungsmaßnahmen bis zu zehn Jahre vorzuziehen, umfasst der neu entstehende IH-Rückstau in beiden Jahren nur 36 Maßnahmen. Die notwendigen Maßnahmen aus dem Jahr 2029 können innerhalb von 6 Jahren vollständig durchgeführt werden. In den Jahren nach 2053 kommen zeitweise mehr Maßnahmen hinzu, als durchgeführt werden können, sodass der Instandhaltungsrückstau erst nach 26 Jahren vollständig abgebaut ist. Ein dritter

Peak wird für den Zeitraum ab 2093 bis 2100 erwartet. Nach dieser Phase liegt der prognostizierte Bedarf konstant bei null, da alle Maßnahmen vorgezogen und somit bereits vor Ende der Nutzungsdauer durchgeführt werden können. Im Durchschnitt werden 8 Maßnahmen pro Jahr (maximal 16) durchgeführt, was durchschnittlich 4 Bauwerken (maximal 8) jährlich entspricht.

Tabelle 47: Gesamtergebnis für das Vergleichsszenario 1.2.3 (Eigene Darstellung)

<b>Jahr</b>	<b>Bedarf Maßnahmen</b>	<b>Anzahl Investitionen</b>	<b>Bedarf [Mio. €]</b>	<b>Investitionen [Mio. €]</b>	<b>Restbudget [Mio. €]</b>
2019	70	10	267,256	31,873	0,007
2020	60	10	235,383	31,8	0,08
2021	52	6	203,97	31,801	0,079
...	...	...	...	...	...
2027	8	16	17,993	30,82	1,06
2028	0	6	0	31,33	0,55
2029	36	4	176,405	30,497	1,383
...	...	...	...	...	...
2052	0	8	0	31,54	0,34
2053	36	6	191,378	31,476	0,404
2054	58	8	256,975	31,834	0,046
2055	76	6	316,076	31,357	0,523
2056	84	8	326,763	31,57	0,31
...	...	...	...	...	...
2092	0	6	0	31,838	0,042
2093	2	4	18,159	28,819	3,061
2094	6	6	40,032	30,473	1,407
2095	14	6	72,635	30,324	1,556
2096	22	6	97,198	30,768	1,112
2097	22	6	83,539	30,445	1,435
2098	20	8	71,542	30,797	1,083
2099	12	12	40,744	30,201	1,679
2100	2	6	12,542	27,76	4,12
2101	0	6	0	25,788	6,092
...	...	...	...	...	...

Für die Verwendung der Ergebnisse in der Instandhaltungsplanung wird für jedes Szenario darüber hinaus eine Tabelle *Einzelergebnisse* generiert, die für jedes Jahr im Detail auflistet, welche Instandhaltungsmaßnahmen unter den gegebenen Parametern in den jeweiligen Jahren durchgeführt werden, sowie eine Tabelle *Nicht durchgeführt*, aus der hervorgeht, welche Maßnahmen in das Folgejahr verschoben werden müssen.

Tabelle 48 zeigt für das Jahr 2020 die *Einzelergebnisse* für das Ausgangsszenario 1.2.3max2BW, bei dem jedes Jahr zwei Bauwerke instand gesetzt werden, was vier Maßnahmen entspricht. Außer den gezeigten Informationen werden in der Tabelle für jede Maßnahme die Objekt-ID, der Nettofluss aus der Priorisierung mit PROMETHEE II, das Restbudget nach Durchführung der Maßnahme sowie die Werte der sechs Kriterien für die Wehranlage angegeben. Die Investitionsart in der rechten Spalte gibt an, ob es sich um einen Ersatzneubau, eine große oder kleine Instandsetzung handelt und ob der Massivbau oder Stahlbau in der Entscheidung für eine konkrete Maßnahme das führende Element war (siehe Abschnitt 3.4.1.2).

Tabelle 48: Einzelergebnisse für das Ausgangsszenario 1.2.3max2BW (Auszug) (Eigene Darstellung)

Jahr	Objekt	Kosten [Mio. €]	Wasserstraße	Investitionsart
2020	2133748003 Stb	2,42	65 Spree-Oder-Wasserstr.	Ersatz (Mb führend)
2020	2133748003 Mb	6,30	65 Spree-Oder-Wasserstr.	Ersatz (Mb führend)
2020	2133718001 Stb	4,15	52 Weser	Ersatz (Mb führend)
2020	2133718001 Mb	10,80	52 Weser	Ersatz (Mb führend)

Tabelle 49 zeigt für das Vergleichsszenario 1.2.3 die durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen und die Investitionsart für das Jahr 2020, die für jedes Bauwerk den Massivbau und Stahlbau getrennt voneinander auflisten. So ist im Jahr 2020 für die Maßnahme an der Wehranlage 2133748003 der Massivbau führend und sowohl Massivbau als auch Stahlbau werden durch einen Neubau ersetzt (siehe Tabelle 49). Bei der Wehranlage 2132946002 wird die Art der Maßnahme vom Zustand des Stahlbaus bestimmt, der durch einen neuen ersetzt werden muss (Ersatz), und am Massivbau wird eine große Instandsetzung durchgeführt (große IH).

Tabelle 49: Einzelergebnisse für das Vergleichsszenario 1.2.3 (Auszug) (Eigene Darstellung)

Jahr	Objekt	Kosten [Mio. €]	Wasserstrasse	Investitionsart
2020	2133748003 Stb	2,42	65 Spree-Oder-Wasserstr.	Ersatz (Mb führend)
2020	2133748003 Mb	6,30	65 Spree-Oder-Wasserstr.	Ersatz (Mb führend)
2020	2133718001 Stb	4,15	52 Weser	Ersatz (Mb führend)
2020	2133718001 Mb	10,80	52 Weser	Ersatz (Mb führend)
2020	2135714004 Stb	1,66	24 Lahn	Ersatz (Mb führend)
2020	2135714004 Mb	4,30	24 Lahn	Ersatz (Mb führend)
2020	2133540003 Stb	0,49	56 Elbe-Havel-Kanal	Ersatz (Mb führend)
2020	2133540003 Mb	1,28	56 Elbe-Havel-Kanal	Ersatz (Mb führend)
2020	2132946002 Stb	0,23	61 Obere-Havel-Wasserstr.	Ersatz (Stb führend)
2020	2132946002 Mb	0,16	61 Obere-Havel-Wasserstr.	Große IH (Stb führend)

In der Tabelle *Nicht durchgeführt* werden, wie bei den Einzelergebnissen auch, für jede Maßnahme neben dem Namen des Bauwerks die Objekt-ID, der Nettofluss aus der Priorisierung mit PROMETHEE II, der Finanzbedarf für die Maßnahme sowie die Werte der sechs Kriterien für die Wehranlage angegeben. Z.B. werden Vergleichsszenario 1.2.3 in der Simulation 26 Bauwerke (52 Maßnahmen) ins Folgejahr verschoben.

Für jedes Szenario kann anhand dieser Tabelle zusätzlich ermittelt werden, wie oft eine Maßnahme verschoben wird. Im Ausgangsszenario 1.2.3max2BW liegt das Maximum bei 46 Jahren, im Vergleichsszenario 1.2.3 beträgt diese Zeitspanne maximal zehn Jahre innerhalb des Untersuchungszeitraums von 150 Jahren. Für das Vergleichsszenario 1.2.3 können die Liste *Gesamtergebnis* (siehe Anhang X, S. 223ff.) sowie für die Jahre 2019-2023 die Listen *Einzelergebnis* (siehe Anhang X, S. 226-225) und *Nicht durchgeführt* (siehe Anhang X, S. 228-231) eingesehen werden.

### 3.4.2.3 Einfluss der Nutzungsdauer der Verkehrswasserbauwerke

Da mit der Qualität der Bauausführung, der Baustoffqualität oder auch mit regelmäßigen Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen die Nutzungsdauer von Bauwerken beeinflusst werden kann, wird mithilfe der Simulation untersucht, wie sich eine Veränderung der angenommenen Nutzungsdauern für den Stahlbau und den Massivbau auf die langfristigen Entwicklungen im Bauwerksbestand auswirkt.

Um mögliche Ausprägungen für die Nutzungsdauern zu erhalten, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse aus der Delphi-Befragung, aus denen bereits die Prognosefunktionen auf Basis der Inspektionsdatenbank WSVPruf abgeleitet wurden (siehe Abschnitt 2.2.2.2). Dafür wurden 26 Experten befragt, nach wie vielen Jahren ein definierter Schaden der Schadensklasse 2 das erste Mal bei einem bestimmten Bauteil zu erwarten ist und wann dieser Schaden die Schadensklasse 4 er-

reicht. Dabei sollte zwischen einem *anfälligen*, einem *mittleren* und einem *robusten* Bauwerk unterschieden werden. Tabelle 50 benennt die für den Massivbau (Schadenstypen 1 bis 6) und den Stahlbau (Schadenstypen 7 und 8) relevanten Schadenstypen und die von den Experten im Mittel angegebenen Zeitspannen in Jahren, vom Zustand ohne Schaden (Neubau oder gleichwertig) bis der jeweilige Schadenstyp die Schadensklasse 4 erreicht. Für die drei Bauwerkstypen anfällig, mittel und robust ist in Tabelle 50 jeweils der kleinste Wert für den Mb und den Stb fett hervorgehoben.

Tabelle 50: Ergebnisse der Expertenbefragung zur Nutzungsdauer (Eigene Darstellung)

Nr.	Schadenstyp	Zeit bis Erreichen der Schadensklasse 4 [Jahre]		
		anfälliges Bauwerk	mittleres Bauwerk	robustes Bauwerk
Massivbau				
1	Oberflächenschaden Beton	31	65	99
2	Bewehrungskorrosion	34	71	99
3	Oberflächenschaden Mauerwerk	36	68	100
4	Verformung Massivbau	30	73	121
5	Riss Stahlbeton	<b>25</b>	<b>59</b>	98
6	Riss unbewehrter Beton / Mauerwerk	31	63	<b>89</b>
Stahlwasserbau				
7	Riss Stahlwasserbau	31	62	100
8	Korrosion Stahlwasserbau	<b>29</b>	<b>49</b>	<b>65</b>

Die ermittelten Werte aus der Expertenbefragung und die Nutzungsdauern gemäß DIN 1990 und DIN 19704 für Mb und Stb, nach denen ein Bauwerk zu bemessen ist, werden für die Variation der zu erwartenden Nutzungsdauern (Rundungswert) in der Simulation verwendet. Tabelle 51 zeigt die Wertepaare der insgesamt vier untersuchten Szenarien.

Tabelle 51: Szenarien für unterschiedliche Nutzungsdauern (Eigene Darstellung)

Szenario	1.2.3	2.2.3	3.2.3	4.2.3
Bauwerkstyp	Bauwerk gemäß DIN 1990 / DIN 19704	robustes Bauwerk	mittleres Bauwerk	anfälliges Bauwerk
Nutzungsdauer Massivbau [Jahre]	100	90	60	25
Nutzungsdauer Stahlwasserbau [Jahre]	70	65	50	30

- Szenario 1.2.3: Vergleichsszenario mit einem Bestand aus Wehranlagen mit einer erwarteten Nutzungsdauer von 100 Jahren für den Massivbau und 70 Jahren für den Stahlbau gemäß DIN EN 1990/NA und DIN 19704,
- Szenario 2.2.3: Bestand aus robusten Wehranlagen mit einer erwarteten Nutzungsdauer von 90 Jahren für den Massivbau und 65 Jahren für den Stahlbau,
- Szenario 3.2.3: Bestand aus mittleren Wehranlagen mit einer erwarteten Nutzungsdauer von 60 Jahren für den Massivbau und 50 Jahren für den Stahlbau,
- Szenario 4.2.3: Bestand aus anfälligen Wehranlagen mit einer erwarteten Nutzungsdauer von 25 Jahren für den Massivbau und 30 Jahren für den Stahlbau.

Die Parameter verfügbares Budget und das optionale Vorziehen von Maßnahmen entsprechen dem Vergleichsszenario 1.2.3 (siehe Tabelle 52).

Tabelle 52: Parameter der Szenarien zur Nutzungsdauer (Eigene Darstellung)

<b>Szenario 1.2.3: Wehranlagen gemäß DIN EN 1990/NA und DIN 19704 (Vergleichsszenario)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
100 Jahre	70 Jahre	31,88 Mio. €	10 Jahre
<b>Szenario 2.2.3: robuste Wehranlagen</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
90 Jahre	65 Jahre	31,88 Mio. €	10 Jahre
<b>Szenario 3.2.3: mittlere Wehranlagen</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
60 Jahre	50 Jahre	31,88 Mio. €	10 Jahre
<b>Szenario 4.2.3: anfällige Wehranlagen</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
25 Jahre	30 Jahre	31,88 Mio. €	10 Jahre

Im Ergebnis zeigen sich in den Plots und in den Tabellen mit den gewonnenen Daten Unterschiede zwischen den Szenarien in der langfristigen Entwicklung des Bauwerksbestands in Abhängigkeit von der Länge der Nutzungsdauer des jeweiligen Bauwerkstyps.

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die Plots der Szenarien 2.2.3 (robuste Wehranlagen) und 3.2.3 (mittlere Wehranlagen). Im Vergleich der beiden Diagramme zur durchschnittlichen Dauer bis zur nächsten Maßnahme (jeweils oberes Diagramm in den Plots) verlaufen die Linien für den

Mittelwert (schwarz) und für die Standardabweichung (grau) in Szenario 2.2.3 (siehe Abbildung 39) im größeren Abstand zur x-Achse als in Szenario 3.2.3. Da die Bauwerke in Szenario 3.2.3 schneller das Ende ihrer Nutzungsdauer erreichen (siehe Abbildung 40), ist folglich die Dauer bis zur nächsten Maßnahme kürzer und somit der Bauwerkszustand des Gesamtbestandes schlechter als in Szenario 2.2.3 (siehe Abschnitt 3.4.2.2).

Der schlechte Bauwerkszustand spiegelt sich ebenfalls in der Höhe der Anzahl notwendiger Maßnahmen (jeweils mittleres Diagramm in den Plots) und in der Höhe des Investitionsbedarfs (jeweils unteres Diagramm in den Plots) wider.

In Szenario 2.2.3 (siehe Abbildung 39) steigt der anfängliche Bedarf von 70 Maßnahmen (35 Bauwerke) nach einem ersten kurzen Abfall auf eine Anzahl von 84 Maßnahmen (41 Bauwerke). Dieser erste Peak ist im Jahr 2036 vollständig abgebaut. Im zweiten Peak ab 2048 steigt der Bedarf bis auf 118 Maßnahmen (59 Bauwerke) im Jahr 2054 an und wird bis 2073 vollständig abgebaut. Der dritte und letzte Peak ab 2088 erreicht mit 22 Maßnahmen (11 Bauwerke) im Jahr 2092 seinen Höhepunkt und ist bereits 2096 wieder abgebaut. Danach bleibt der Bedarf an Maßnahmen konstant auf dem Wert null, d.h. der Instandhaltungsrückstau ist langfristig abgebaut. Die hellgrüne Linie für die Anzahl umgesetzter Maßnahmen im mittleren Diagramm nimmt Werte zwischen 0 und 20 an, da in Abhängigkeit von den Kosten einzelner Maßnahmen pro Jahr eine unterschiedliche Anzahl durchgeführt werden kann. In den Jahren 2036 und 2037 werden trotz ausreichend vorhandenem Budget keine Maßnahmen durchgeführt, weil keine Maßnahmen für die beiden Jahre prognostiziert wurde. Da die nächsten Maßnahmen erst für das Jahr 2048 zu erwarten sind und Maßnahmen nicht mehr als zehn Jahre vorgezogen werden können (siehe Tabelle 52), wird in den Jahren 2036 und 2037 keine Maßnahme durchgeführt.

Der Verlauf der Kurve zum Investitionsbedarf im unteren Diagramm ähnelt im Verlauf dem Bedarf an Maßnahmen. Die hellgrüne Linie für die getätigten Investitionen verläuft im Gegensatz zur Linie für die umgesetzten Maßnahmen gleichförmig parallel zur x-Achse, da das verfügbare Budget – außer in den Jahren 2035 bis 2037 – regelmäßig fast vollständig investiert wird.

Szenario 2.2.3 (robuste Wehranlagen)

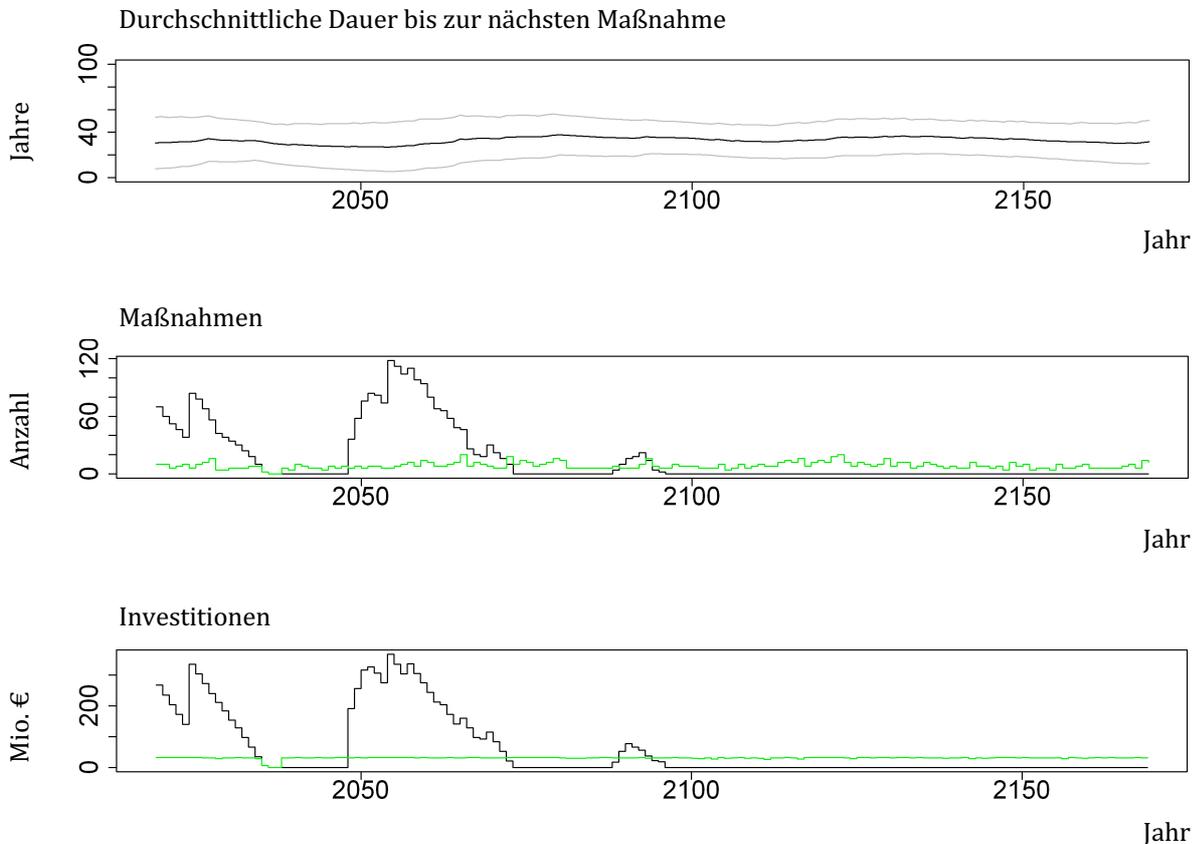


Abbildung 39: Plot zu Szenario 2.2.3 (robuste Wehranlagen) (Eigene Darstellung)

In Szenario 3.2.3 (siehe Abbildung 40) zeigt sich aufgrund der kürzeren Nutzungsdauern eine andere Entwicklung im Bauwerksbestand. Aufgrund der beschleunigten Alterungsprozesse erreicht der Bedarf an Maßnahmen mit einem Wert von 242 (121 Bauwerke) im Jahr 2029 seinen Höhepunkt. Der entstandene Instandhaltungsrückstau kann auf etwa die Hälfte reduziert werden, kann bis Ende der Simulationsdauer allerdings nie vollständig abgebaut werden und liegt im Mittel bei 114 Maßnahmen bzw. 57 Bauwerken. Die hellgrüne Linie für die Anzahl durchgeführter Maßnahmen im mittleren Diagramm nimmt Werte zwischen 4 und 18 an, da bei gegebenem Budget in unterschiedlichem Umfang Maßnahmen durchgeführt werden können.

Der Verlauf der Kurve zum Investitionsbedarf im unteren Diagramm verläuft auch hier nahezu parallel zur x-Achse, da das verfügbare Budget in Höhe von 31,88 Mio. € regelmäßig fast vollständig investiert wird ( $I_{mv} = 31,56$  Mio. €).

Der Plot zu Szenario 4.2.3 (anfällige Wehranlagen) findet sich in Anhang IX, S. 219.

### Szenario 3.2.3 (mittlere Wehranlagen)

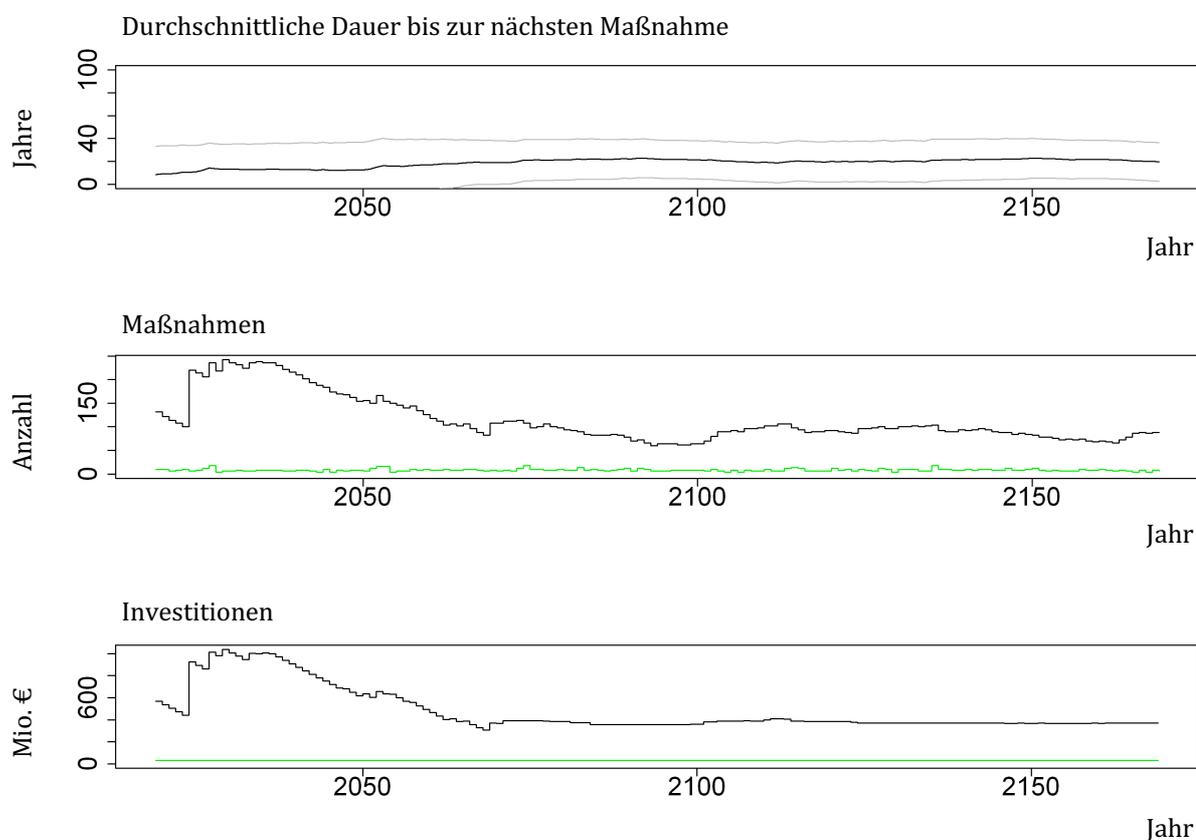


Abbildung 40: Plot zu Szenario 3.2.3 (mittlere Wehranlagen) (Eigene Darstellung)

Tabelle 53 zeigt in Ergänzung zu den Plots die Zusammenstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der vier untersuchten Szenarien für die unterschiedlichen Bauwerkstypen sowie die Eckdaten für den Instandhaltungsrückstau. Das Vergleichsszenario 1.2.3 und Szenario 2.2.3 zeigen insgesamt bessere Ergebnisse im Vergleich zu den mittleren (Szenario 3.2.3) und anfälligen Bauwerken (Szenario 4.2.3). Insbesondere der Mittelwert der durchschnittlichen Dauer bis zur nächsten Maßnahme wird mit kürzeren Nutzungsdauern zunehmend geringer, da die Bauwerke in kürzeren Zeitabständen wieder in die Instandhaltungsplanung aufgenommen werden. In der Folge kann weder für Szenario 3.2.3 noch für Szenario 4.2.3 der Instandhaltungsrückstau abgebaut werden, obwohl in Szenario die Anzahl durchgeführter Maßnahmen ( $M_{mv} = 8,5$ ) und die Höhe der getätigten Investitionen ( $I_{mv} = 31,7$ ) geringfügig höher sind als z.B. in Szenario 1.2.3 mit den längsten Nutzungsdauern für die Bauwerke. Der Instandhaltungsrückstau ist in Szenario 4.2.3 mit durchschnittlich 301,2 Maßnahmen (ca. 150 Bauwerke) bzw. einem Maximum von 414 Maßnahmen (207 Bauwerke) bei einer Grundgesamtheit von 245 Wehranlagen extrem hoch.

Tabelle 53: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung Nutzungsdauer (Eigene Darstellung)

Szenario	DbN_mv	DbN_sd	M_mv	M_sd	I_mv	I_sd	Abbau IHR bis	Max IHR	IHR_mv
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	5,2
2.2.3	32,9	2,8	8,6	3,5	30,5	4,2	2093	118	15,9
3.2.3	18,6	3,8	8,3	2,7	31,6	0,3	--	242	114,2
4.2.3	-7,2	5,8	8,5	2,4	31,7	0,2	--	414	301,2

DbN_mv	Mittelwert Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
DbN_sd	Standardabweichung Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
M_mv	Mittelwert Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
M_sd	Standardabweichung Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
I_mv	Mittelwert Höhe der Investitionen [Mio. €]
I_sd	Standardabweichung Höhe der Investitionen [Mio. €]
IHR	Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]
IHR_mv	Mittelwert Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]

Kürzere Nutzungsdauern durch bspw. minderwertige Qualität der Bauausführung sind erwartungsgemäß eine negative Einflussgröße in der Instandhaltungsplanung. Bereits bei Bauwerken mit mittleren Nutzungsdauern (Szenario 3.2.3) baut sich gemäß den Simulationsergebnissen ein IH-Rückstau auf, der langfristig auf hohem Niveau bestehen bleibt. Da sich die tatsächliche Zusammensetzung des Bauwerksbestands nicht aus den vorhandenen Daten ableiten lässt, wurde für die Simulation ein Bauwerksbestand modelliert, der jeweils aus Bauwerken mit identischen Nutzungsdauern besteht.

Für eine positive Einflussnahme, insbesondere im Hinblick auf den Instandhaltungsrückstau, ist auf eine hohe Qualität der Bauausführung zu achten und/oder es sind Ressourcen in erforderlichem Umfang bereitzustellen, um dem regelmäßig höheren Instandsetzungsbedarf gerecht zu werden und das Risiko eines Funktionsausfalls und/oder Bauwerksversagens zu reduzieren.

#### 3.4.2.4 Veränderungen der Höhe des verfügbaren Budgets

Der Investitionsbedarf für die Instandhaltung der Verkehrswasserbauwerke in Deutschland wird mit ca. 900 Mio. € pro Jahr angegeben und errechnet sich gemäß Eilts (2016) aus dem geschätzten Bruttoanlagevermögen in Höhe von ca. 50 Mrd. € und einer mittleren Nutzungsdauer von ca. 55 Jahren unter Einbeziehung der Wertminderung durch Substanzverluste bzw. Abschreibung. Für den laufenden Betrieb und Unterhaltung wird ein jährlicher Bedarf in Höhe von ca. 1,2 Mrd. € angegeben. Der zusätzliche Bedarf für den Abbau des Instandhaltungsrückstaus kann nicht quantifiziert werden. (BMVI, 2015; Eilts, 2016)

Für eine Abschätzung der Höhe des jährlich bereitzustellenden Budgets für die Instandhaltung eines größeren Bestands Infrastrukturbauwerke, von dem ohnehin kaum verwertbare Daten verfügbar sind (siehe Abschnitt 3.2.2.4), wird in der verfügbaren Literatur keine Empfehlung gegeben. Die bspw. von Bahr (2008) vorgestellten Ansätze beziehen sich auf den Hochbau.

Da sich die von Bahr (2008) untersuchten Ansätze für die Budgetierung der Instandhaltungsmaßnahmen auf Flächengrößen [ $\text{€}/\text{m}^2$ ] für unterschiedliche Gebäudetypen beziehen, ist die unmittelbare Anwendung für die Budgetierung in der Instandhaltungsplanung für Verkehrswasserbauwerke nicht möglich. Zudem werden mit den ermittelten Instandhaltungsraten die Kosten pro Jahr nur für Einzelobjekte bestimmt. Die Instandhaltungsraten beziehen sich gemäß Bahr (2008) entweder auf den Wiederbeschaffungswert und sind mit Beträgen in Höhe von 0,83 % für Bürogebäude bis zu 2,44 % für Produktionsgebäude angegeben oder die Instandhaltungsraten beziehen sich auf den Herstellungswert im Baujahr und sind mit Beträgen in Höhe von 1 % für Büro- oder Wohngebäude bis zu 6 % für Krankenhäuser angegeben.

Bahr (2008) vergleicht die Prognoseergebnisse der analysierten Verfahren mit Realdaten von öffentlichen Gebäuden. Bei allen Verfahren wurden insbesondere bei älteren Bauwerken die außerordentlichen Kosten durch größere Instandhaltungsmaßnahmen am Ende der Nutzungsdauer deutlich unterschätzt. Das von Bahr (2008) entwickelte Verfahren PABI (Praxisorientierte Adaptive Budgetierung von Instandhaltungsmaßnahmen) bezieht sich auf den Wiederbeschaffungswert und differenziert schließlich eine Instandhaltungsrate von 1,2 % für regelmäßige Maßnahmen während der Nutzungsphase zuzüglich 4,4 % für außerordentliche Kosten am Ende der Nutzungsdauer. Bahr (2008) weist darauf hin, dass PABI insbesondere für die Budgetierung von Instandhaltungskosten für einen größeren heterogenen Immobilienbestand geeignet ist. Das Ergebnis wird unter Einbeziehung verschiedener Korrekturfaktoren wie z.B. Bauwerksalter, Technikanteil, Art der Nutzung, Qualität der Planung und Erstellung hinreichend genau und das entwickelte PABI-Tool ermöglicht Prognosen von bis zu 30 Jahren (Bahr, 2008).

Unberücksichtigt bleiben bei diesem Ansatz Kosten, die bspw. durch den Ersatzneubau am Ende der Nutzungsdauer entstehen, wenn wie bei den Verkehrswasserbauwerken am Standort des Bauwerks eine definierte Funktion über einen Lebenszyklus hinaus gewährleistet sein muss und somit ist bislang ungeklärt, ob eine Instandhaltungsmaßnahme wie der Ersatzneubau unter diesem Gesichtspunkt auch den regelmäßigen Kosten zugeordnet werden kann. Diese funktionsbezogene Auslegung der Instandhaltungsmaßnahmen wird als neuer Ansatz in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und in der Simulation umgesetzt.

Der Investitionsbedarf eines Jahres entspricht in der vorliegenden Arbeit der Summe der Kosten der erwarteten Instandhaltungsmaßnahmen für das Untersuchungsjahr gemäß Abschnitt 3.4.1.2. Die Instandhaltungsrate bezieht sich auf das Anlagevermögen (AV) in Höhe von 2,125 Mrd. € (siehe Abschnitt 3.2.2.4) und die Höhe des verfügbaren Budgets orientiert sich an den von Bahr (2008) analysierten Ansätzen und der Methode PABI. Im Ergebnis wird ermittelt, nach wie vielen Jahren sich zwischen Bedarf und verfügbarem Budget ein Gleichgewicht einstellt, sodass der Instandhaltungsrückstau abgebaut wird. Tabelle 54 listet die in der Simulation untersuchten Instandhaltungsraten bzw. verfügbaren Budgets auf.

Tabelle 54: Szenarien für das jährlich verfügbare Budget (Eigene Darstellung)

Szenario	1.1.3		1.2.3		1.3.3	
<b>Budget</b>	1,25 % AV	26,65 Mio. €	1,5 % AV	31,88 Mio. €	1,75 % AV	37,19 Mio. €

Einschließlich des Vergleichsszenarios 1.2.3 wurden drei Simulationen zur Variation des verfügbaren Budgets durchgeführt. Die Parameter Nutzungsdauer und das Vorziehen der Maßnahmen entsprechen dem Vergleichsszenario 1.2.3. und bleiben unverändert. Tabelle 55 zeigt die Parameter für die Szenarien 1.1.3 und 1.3.3, welche als Beispiele zur Erläuterung der Ergebnisse der Simulation mit unterschiedlichen Budgets verwendet werden.

Tabelle 55: Parameter von Szenario 1.1.3 und 1.3.3 (Verfügbares Budget) (Eigene Darstellung)

<b>Szenario 1.1.3 (1,25 % AV)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,25 % des Anlagevermögens	Ja
100 Jahre	70 Jahre	26,65 Mio. €	10 Jahre
<b>Szenario 1.2.3 (1,5 % AV, Vergleichsszenario)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
100 Jahre	70 Jahre	31,88 Mio. €	10 Jahre
<b>Szenario 1.3.3 (1,75 % AV)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,75 % des Anlagevermögens	Ja
100 Jahre	70 Jahre	37,19 Mio. €	10 Jahre

Der Vergleich der Plots der Szenarien 1.1.3 (siehe Abbildung 41) und 1.3.3 (siehe Abbildung 42) zeigt die unterschiedlichen Entwicklungen im Bauwerksbestand in Abhängigkeit von der Höhe des verfügbaren Budgets. Die Unterschiede zeigen sich insbesondere im Verlauf der Kurven in den Diagrammen zur Anzahl der Maßnahmen (jeweils mittleres Diagramm in den Plots) und dem Investitionsbedarf (jeweils unteres Diagramm in den Plots).

Die durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme (jeweils oberes Diagramm in den Plots) verläuft augenscheinlich in beiden Szenarien ähnlich. Die Auswertung der Daten zeigt für Szenario 1.1.3 (1,25 % AV) eine durchschnittliche DbN von 34 Jahren (Minimum 27,8; Maximum 37,6) und für Szenario 1.3.3 (1,75 % AV) von 37 Jahren (Minimum 28,8; Maximum 42,3). Allerdings werden in Szenario 1.1.3 aufkommende Peaks wegen der knapperen Ressourcen vergleichsweise langsam abgebaut, was sich an der größeren Fläche unter den Kurven sowohl für die Anzahl prognostizierter Maßnahmen als auch für den Investitionsbedarf zeigt. Beide Szenarien beginnen mit einem

IHR von 70 Maßnahmen (35 Bauwerke). In Szenario 1.1.3 erfolgt der schrittweise Abbau des IHR bis 2028 auf 14 Maßnahmen, in 1.3.3 erfolgt bereits bis 2027 der vollständige Abbau des IHR. Im Jahr 2029 steigt in Szenario 1.1.3 der IHR auf 58 Maßnahmen an (in Szenario 1.3.3 auf 32) und wird sukzessive bis 2038 abgebaut (in Szenario 1.3.3 bis 2033). Ähnlich verhält es sich mit den IHR ab 2053, der in Szenario 1.1.3 ab 2083 ins Szenario 1.3.3 bereits ab 2068 abgebaut ist. In Szenario 1.3.3 kann ein kurzfristig gestiegener Instandhaltungsbedarf vergleichsweise schnell abgebaut werden, was sich im steilen Abfall der Kurve widerspiegelt.

*Szenario 1.1.3 (1,25 % AV)*

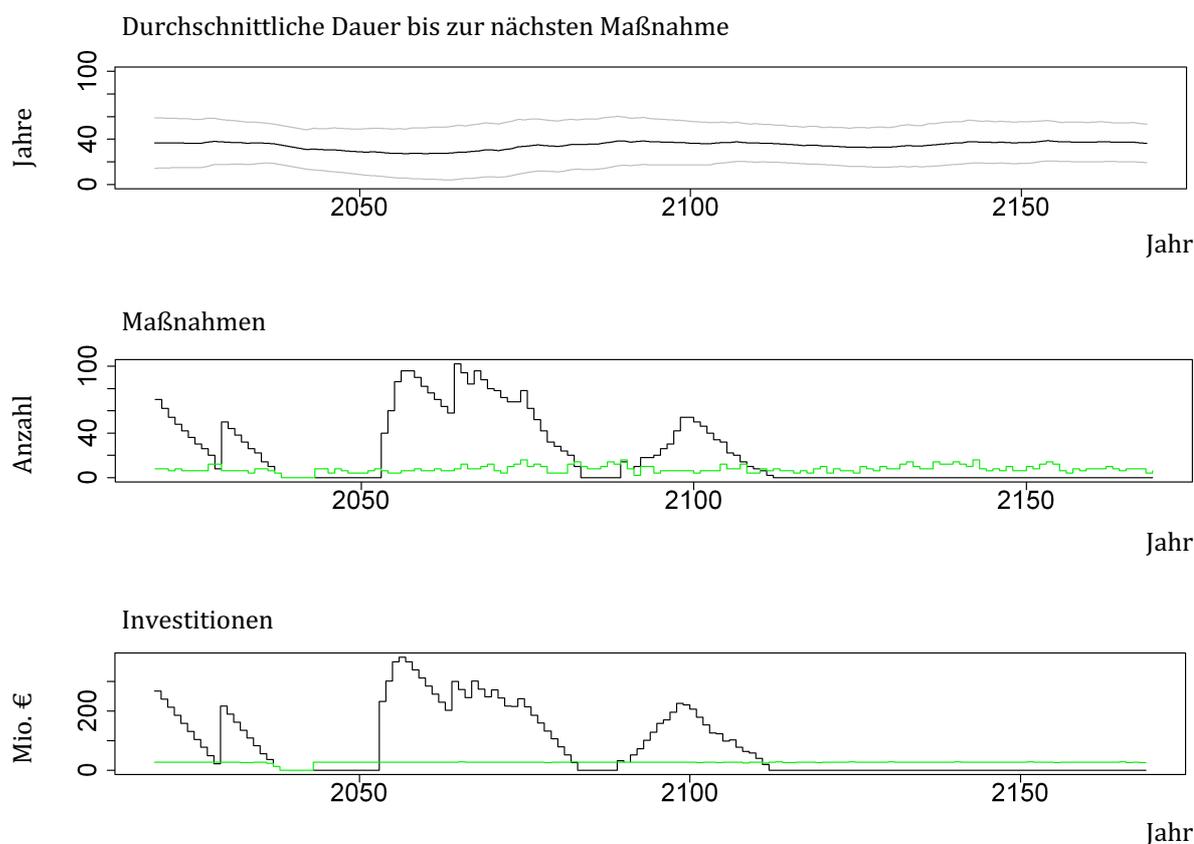


Abbildung 41: Plot zu Szenario 1.1.3 (Budget 1,25 % des Anlagevermögens) (Eigene Darstellung)

Szenario 1.3.3 (1,75 % AV)

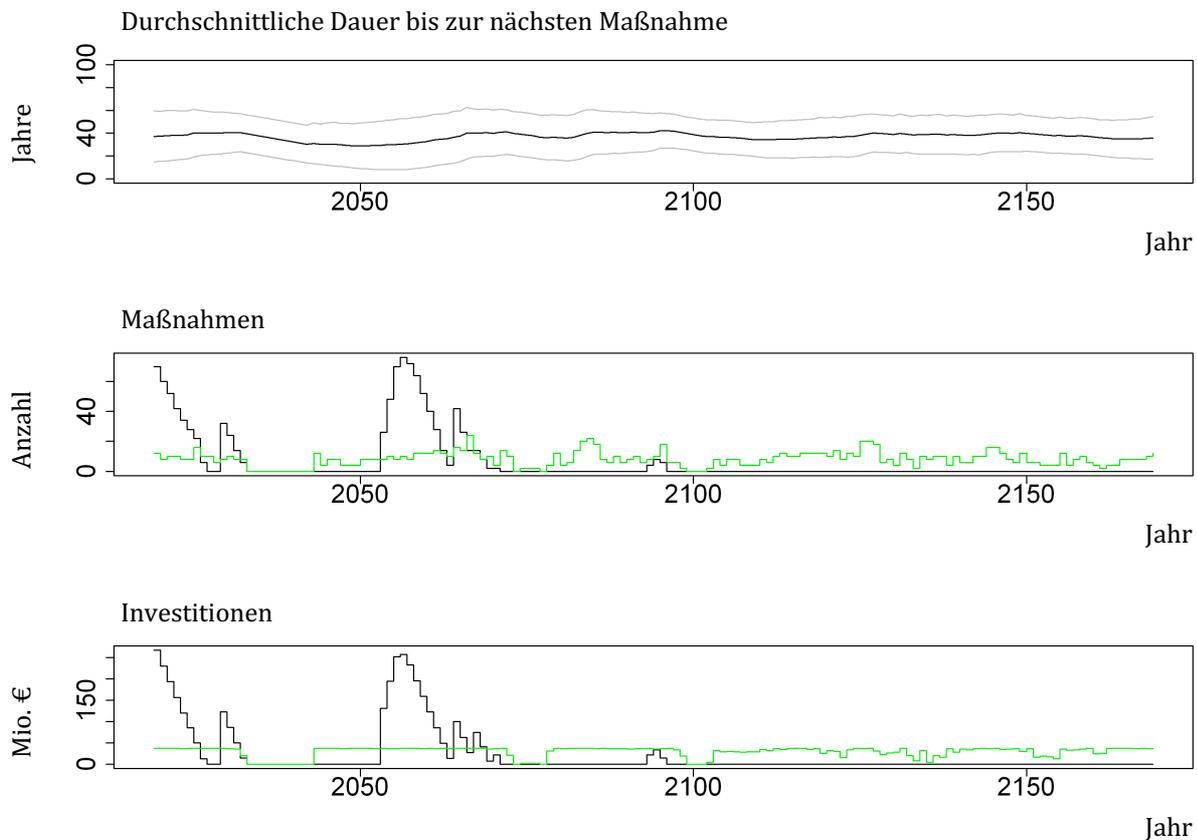


Abbildung 42: Plot zu Szenario 1.3.3 (Budget 1,75 % des Anlagevermögens) (Eigene Darstellung)

Der Verlauf der grünen Linie im unteren Diagramm (Höhe der getätigten Investitionen in Mio. €) im Plot von Szenario 1.3.3 zeigt, dass das verfügbare Budget zu weiten Teilen höher ist als der Bedarf, sodass in der Zukunft zu erwartende Maßnahmen häufig vorgezogen werden (Abbildung 42). Allerdings können Maßnahmen gemäß Festlegung für das Szenario nicht mehr als 10 Jahre vorgezogen werden, sodass beispielsweise für den Zeitraum von 2033 bis einschließlich 2042 weder ein Bedarf prognostiziert wird noch vorgezogene Maßnahmen durchgeführt werden.

Der höhere Mittelwert  $DbN_{mv}$  von Szenario 1.3.3 zeigt, dass der Bauwerkszustand in Szenario 1.3.3 insgesamt in einem etwas besseren Zustand ist (siehe Tabelle 56) als in den Szenarien 1.1.3 und 1.2.3. Ursache für den schlechteren Bauwerkszustand in Szenario 1.1.3 ist das begrenzte Budget, sodass Instandhaltungsmaßnahmen nicht bedarfsgerecht durchgeführt werden können und durchgehend für einen Großteil der Wehranlagen Instandhaltungsmaßnahmen notwendig sind. Diese Konstellation könnte sich ergeben, wenn vom verfügbaren Budget nur ein Teil genutzt werden kann, weil z.B. nicht ausreichend Fachkräfte zur Verfügung stehen.

Tabelle 56: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung (verfügbares Budget) (Eigene Darstellung)

Szenario	DbN_mv	DbN_sd	M_mv	M_sd	I_mv	I_sd	Abbau IHR bis	Max IHR	IHR_mv
1.1.3	34,6	3,3	7,6	3,2	26	5	2112	98	24,5
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
1.3.3	36,9	3,4	8,1	4,9	29	12,5	2068	76	6,7

- DbN\_mv Mittelwert Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
- DbN\_sd Standardabweichung Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
- M\_mv Mittelwert Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
- M\_sd Standardabweichung Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
- I\_mv Mittelwert Höhe der Investitionen [Mio. €]
- I\_sd Standardabweichung Höhe der Investitionen [Mio. €]
- IHR Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]
- IHR\_mv Mittelwert Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]

### 3.4.2.5 Optionales Vorziehen von Maßnahmen

Aufgrund der Budgetrestriktion ist es unumgänglich, dass notwendige Instandhaltungsmaßnahmen in nachfolgende Jahre verschoben werden. Wenn der Instandhaltungsrückstau abgebaut ist, ergeben sich durch die heterogene Zusammensetzung des Bauwerksportfolios gemäß den Ergebnissen der Simulation allerdings auch Phasen, in denen keine Instandhaltungsmaßnahme zu erwarten ist. Um das verfügbare Budget und vorhandene Ressourcen dennoch ausnutzen zu können, kann es vorteilhaft sein, zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen vorzuziehen. Dabei werden aus dem Folgejahr immer die Bauwerke mit den höchsten Prioritätswerten vorgezogen. Für eine möglichst optimale Ausnutzung des Abnutzungsvorrats resp. der vorgesehenen Nutzungsdauer sollten diese Zeitspannen jedoch nicht zu lang gewählt werden. Tabelle 57 zeigt die für die Szenarien gewählten Parameter. Eine Zeitspanne von 0 bedeutet, dass Maßnahmen nicht vorgezogen werden können. Eine Zeitspanne von 15 erlaubt das Vorziehen von Maßnahmen von bis zu 15 Jahren.

Tabelle 57: Szenarien für die Zeitspanne zum Vorziehen von Maßnahmen (Eigene Darstellung)

Szenario	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.2.4
Altersdifferenz [Jahre]	0	5	10	15

Untersucht werden vier Szenarien, wobei es bei drei Szenarien möglich ist, Maßnahmen vorzuziehen, auch wenn die Bauwerke noch nicht das Ende ihrer prognostizierten Nutzungsdauer erreicht haben.

- Szenario 1.2.1: ein Vorziehen von Maßnahmen ist nicht möglich

- Szenario 1.2.2: ein Vorziehen von Maßnahmen ist bis zu 5 Jahre möglich
- Szenario 1.2.3: ein Vorziehen von Maßnahmen ist bis zu 10 Jahre möglich
- Szenario 1.2.4: ein Vorziehen von Maßnahmen ist bis zu 15 Jahre möglich

Die Parameter Nutzungsdauer und verfügbares Budget entsprechen dem Vergleichsszenario 1.2.3. und bleiben unverändert. Tabelle 58 zeigt die Parameter von Szenario 1.2.1 und Szenario 1.2.4, deren Plots miteinander verglichen werden.

Tabelle 58: Parameter von Szenario 1.2.1 und 1.2.4 (Eigene Darstellung)

<b>Szenario 1.2.1 (kein Vorziehen von Maßnahmen)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Nein
100 Jahre	70 Jahre	31,88 Mio. €	0 Jahre
<b>Szenario 1.2.4 (Vorziehen der IH-Maßnahmen bis zu 15 Jahre)</b>			
Nutzungsdauer		Verfügbares Budget	Vorziehen von Maßnahmen
Massivbau	Stahlbau	1,5 % des Anlagevermögens	Ja
100 Jahre	70 Jahre	31,88 Mio. €	15 Jahre

Die Plots der beiden untersuchten Szenarien zeigen im Vergleich, dass sich die Möglichkeit Maßnahmen vorzuziehen, grundsätzlich positiv auf den Bauwerksbestand auswirkt. Können wie in Szenario 1.2.1 keine Instandhaltungsmaßnahmen vorgezogen werden, zeigt sich das in den Diagrammen zur Anzahl der notwendigen Maßnahmen (mittleres Diagramm im Plot) und zum Investitionsbedarf (unteres Diagramm im Plot) in der Höhe und der Breite der Peaks (siehe Abbildung 43). Der anfängliche IH-Rückstau mit 70 Maßnahmen (35 Bauwerke) kann bis 2026 abgebaut werden. Der Abbau des neu entstehenden IH-Rückstaus ab 2029 mit 58 Maßnahmen (29 Bauwerke) wird bis 2035 abgebaut. Es folgen 17 Jahre, für die weder ein Bedarf prognostiziert wird noch vorgezogene Maßnahmen durchgeführt werden. Ab 2053 baut sich erneut ein IH-Rückstau mit dann bis zu 154 Maßnahmen (77 Bauwerke) auf. Erst im Jahr 2111 ist der prognostizierte Bedarf kleiner als die Anzahl der durchgeführten Maßnahmen. Allerdings liegt ab 2017 bis zum Ende des Untersuchungszeitraums im Jahr 2169 der prognostizierte Bedarf im Mittel bei 15,5 Maßnahmen (rund 8 Bauwerke), während im gleichen Zeitraum der Mittelwert für die Anzahl der durchgeführten Maßnahmen bei 9,5 (rund 10 Bauwerke) liegt. Die ungleichmäßige Verteilung der Zustandsnoten des Bauwerksbestandes (siehe Abbildung 15) beeinflusst die Höhe der Peaks, da in der Folge für einige Zeitfenster viele Maßnahmen prognostiziert werden. Aufgrund der Budgetrestriktion können die Instandhaltungsmaßnahmen nur verzögert durchgeführt werden und es baut sich ein langanhaltender IH-Rückstau auf, was sich zum einen in der Breite der Peaks zeigt (mittleres und unteres Diagramm im Plot) und zum anderen an der Kurve für die durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme, die in den Jahren ab 2053 niedrige Werte annimmt und nahe der x-Achse verläuft. Da keine IH-Maßnahmen vorgezogen werden, wird das verfügbare

Budget nicht vollumfänglich ausgenutzt, sodass die Höhe der getätigten Investitionen (hellgrüne Linie, unteres Diagramm im Plot) schwankt, bspw. wird im Zeitraum von 2037 bis 2052 gemäß den Ergebnissen aus der Simulation nicht investiert. Der Instandhaltungsrückstau kann innerhalb des Untersuchungszeitraums von 150 Jahren nie vollständig abgebaut werden. Allerdings liegt der durchschnittliche Bedarf ab dem Jahr 2110 mit durchschnittlich 11,9 Maßnahmen pro Jahr nur wenig über der Anzahl durchgeführter Maßnahmen mit durchschnittlich 7,5 Maßnahmen pro Jahr, sodass die schwarzen Linien in den beiden unteren Diagrammen im Plot nur wenig über den hellgrünen Linien verlaufen.

*Szenario 1.2.1 (kein Vorziehen von Maßnahmen)*

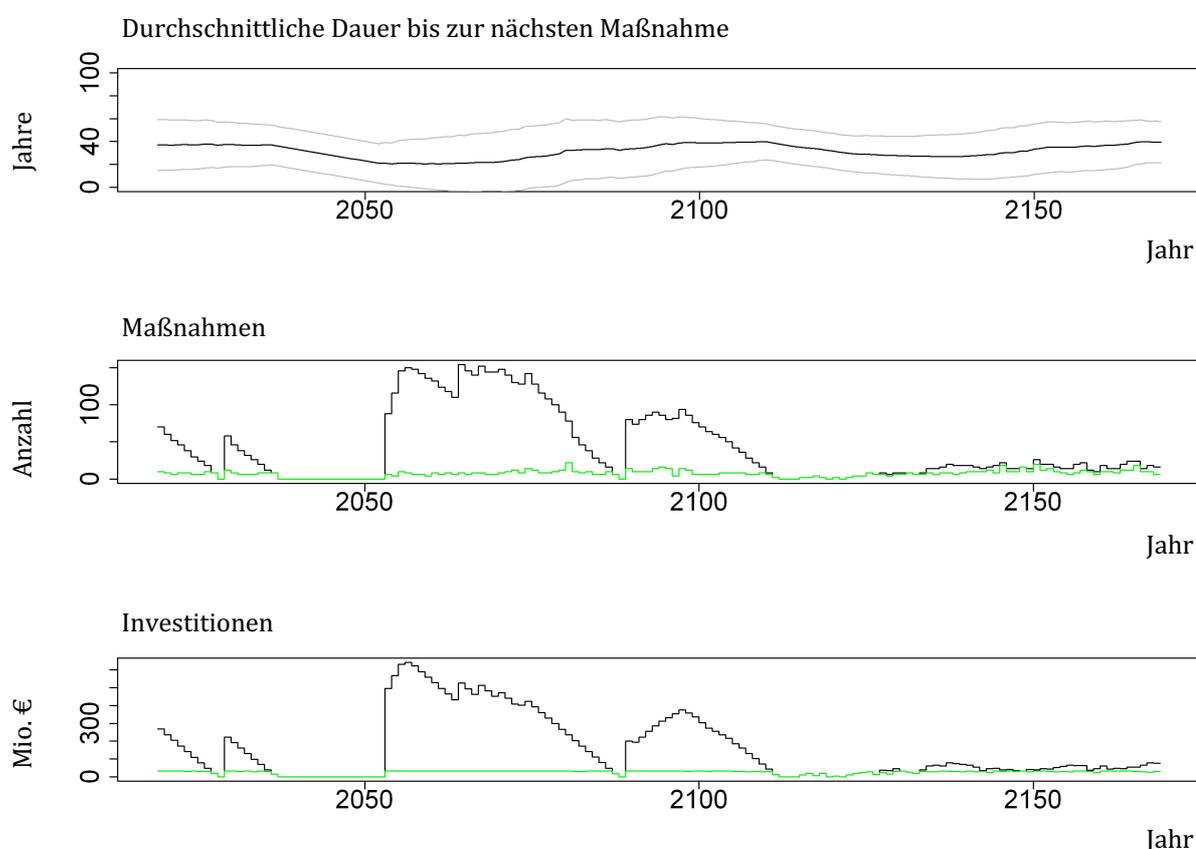


Abbildung 43: Plot zu Szenario 1.2.1 (Kein Vorziehen von IH-Maßnahmen) (Eigene Darstellung)

In Szenario 1.2.4 können Instandhaltungsmaßnahmen bis zu 15 Jahren vorgezogen werden, sodass der zweite Peak mit zu erwartenden Maßnahmen in den Diagrammen im Vergleich zu Szenario 1.2.1 deutlich niedriger ausfällt und der dritte Peak sogar ganz ausbleibt (siehe Abbildung 44).

Szenario 1.2.4 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 15 Jahre)

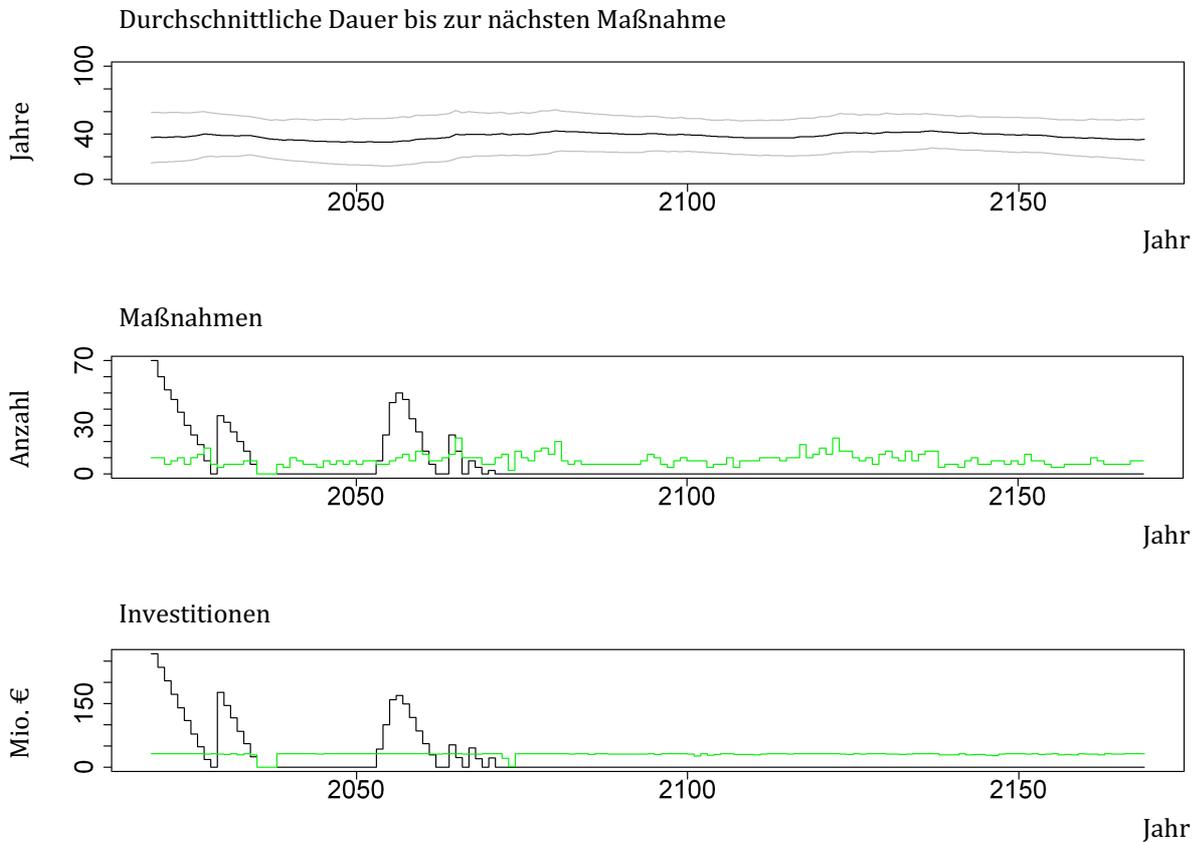


Abbildung 44: Plot zu Szenario 1.2.4 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 15 Jahre) (Eigene Darstellung)

Insgesamt stellt sich schneller ein Gleichgewicht zwischen dem erwarteten Bedarf und den durchgeführten Maßnahmen ein, was auch der hohe Mittelwert und der schnelle Abbau des IHR ab 2065 und dessen geringes Maximum für Szenario 1.2.4 im Vergleich mit den anderen Szenarien zeigen (siehe Tabelle 59).

Der Plot zu Szenario 1.2.1 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 5 Jahre) findet sich in Anhang IX, S. 220.

Tabelle 59: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung (Vorziehen von Maßnahmen) (Eigene Darstellung)

Szenario	DbN_mv	DbN_sd	M_mv	M_sd	I_mv	I_sd	Abbau IHR bis	Max IHR	IHR_mv
1.2.1	31,6	6,0	7,1	4,4	24,3	11,6	—	154	42,8
1.2.2	34,2	4,9	7,4	4,4	25,6	10,2	2106	118	22,7
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
1.2.4	38,3	2,6	8,5	3,6	30,1	5,1	2064	70	5,2

- DbN\_mv Mittelwert Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]  
 DbN\_sd Standardabweichung Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]  
 M\_mv Mittelwert Anzahl Maßnahmen [Anzahl]  
 M\_sd Standardabweichung Anzahl Maßnahmen [Anzahl]  
 I\_mv Mittelwert Höhe der Investitionen [Mio. €]  
 I\_sd Standardabweichung Höhe der Investitionen [Mio. €]  
 IHR Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]  
 IHR\_mv Mittelwert Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]

#### 3.4.2.6 Zwischenergebnis

In Tabelle 60 sind für eine abschließende Übersicht für jedes untersuchte Szenario

- die durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme (Mittelwert, Standardabweichung),
- die mittlere Anzahl durchgeführter Maßnahmen (Mittelwert, Standardabweichung),
- die mittlere Höhe des jährlich eingesetzten Budgets (Mittelwert, Standardabweichung),
- das Jahr, ab dem der IHR langfristig abgebaut ist,
- das Maximum des Instandhaltungsrückstaus und
- der Mittelwert des Instandhaltungsrückstaus

zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass lange Nutzungsdauern wie in Szenario 1.2.3 oder ein höheres verfügbares Budget wie in Szenario 1.3.3 die Entwicklungen im Bauwerksbestand langfristig positiv beeinflussen. Eine mittlere Dauer bis zur nächsten Maßnahme mit 36,5 bzw. 36,9 Jahren zeigt, dass die Bauwerke insgesamt in einem eher guten Zustand sind. Der beste Wert wird in Szenario 1.2.4 erreicht, bei dem Maßnahmen gezielt vorgezogen werden können, um aufkommende Peaks im Vorfeld zu reduzieren.

Tabelle 60: Zusammenstellung der Einzelwerte der untersuchten Szenarien (Eigene Darstellung)

Szenario	DbN_mv	DbN_sd	M_mv	M_sd	I_mv	I_sd	Abbau IHR bis	Max IHR	IHR_mv
Ausgangsszenario und Vergleichsszenario (Abschnitt 3.4.2.2)									
1.2.3max2BW	14,9	9,3	4,0	0,0	14,6	8,1	--	248	173,2
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
Einfluss der Nutzungsdauer (Abschnitt 3.4.2.3)									
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
2.2.3	32,9	2,8	8,6	3,5	30,5	4,2	2093	118	15,9
3.2.3	18,6	3,8	8,3	2,7	31,6	0,3	--	242	114,2
4.2.3	-7,2	5,8	8,5	2,4	31,7	0,2	--	414	301,2
Veränderungen des verfügbaren Budgets (Abschnitt 3.4.2.4)									
1.1.3	34,6	3,3	7,6	3,2	26	5	2112	98	24,5
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
1.3.3	36,9	3,4	8,1	4,9	29	12,5	2068	76	6,7
Vorziehen von Instandhaltungsmaßnahmen (Abschnitt 3.4.2.5)									
1.2.1	31,6	6,0	7,1	4,4	24,3	11,6	--	154	42,8
1.2.2	34,2	4,9	7,4	4,4	25,6	10,2	2106	118	22,7
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
1.2.4	38,3	2,6	8,5	3,6	30,1	5,1	2064	70	5,2

DbN_mv	Mittelwert Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
DbN_sd	Standardabweichung Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
M_mv	Mittelwert Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
M_sd	Standardabweichung Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
I_mv	Mittelwert Höhe der Investitionen [Mio. €]
I_sd	Standardabweichung Höhe der Investitionen [Mio. €]
IHR	Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]
IHR_mv	Mittelwert Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]

Die Rahmenbedingungen in Szenario 1.2.4 (Vorziehen von Maßnahmen bis zu 15 Jahre) und in Szenario 1.3.3 (Budget 1,75 % vom Anlagevermögen) führen zu einem frühen Abbau des Instandhaltungsrückstaus in den Jahren 2064 bzw. 2068. Die Verläufe der grünen Linien in den Plots zeigen allerdings auch, dass oft verfrüht investiert und somit die Restnutzungsdauer nicht immer ausgenutzt wird. Gute Ergebnisse zeigen auch Szenario 1.2.3 (Vergleichsszenario) und Szenario 1.1.3 (Budget 1,25 % vom Anlagevermögen) sowie 2.2.3 (robuste Bauwerke), auch wenn sich Szenario 2.2.3 mit einem Maximum von 118 Maßnahmen (59 Bauwerke) als Instandhaltungsrückstau eher im Mittelfeld bewegt.

Die schlechtesten Ergebnisse zeigen die Werte von Szenario 3.2.3 (mittlere Bauwerke), Szenario 1.2.3 maxBW2 (Ausgangsszenario, 2 Bauwerke pro Jahr) und Szenario 4.2.3 (anfällige Bauwerke). Der sich aufbauende Instandhaltungsrückstau ist zum einen nicht mehr abzubauen und zum anderen betrifft er wegen der verkürzten Nutzungsdauern (Szenario 3.2.3) bzw. wegen der geringen Investitionstätigkeiten (Szenario 1.2.3 maxBW2) nicht mehr als ein Drittel der Bauwerke. In Szenario 4.2.3 weitet sich der Instandhaltungsrückstau auf bis 85 % der Wehranlagen aus.

### 3.4.2.7 Ergänzende Analyse der Wirkung der Gewichtungsfaktoren

Für die Priorisierung der Bauwerke für die Instandhaltungsplanung wurden in Abschnitt 3.3.2 die Gewichtungsfaktoren für die sechs Kriterien (siehe Abschnitt 3.2.2) festgelegt. In Ergänzung zur Sensitivitätsanalyse wird an dieser Stelle untersucht, ob und welche Wirkung unterschiedliche Gewichtungsfaktoren auf die langfristige Entwicklung im Bauwerksbestand zeigen bzw. wird insbesondere untersucht, wie sich die Rangfolge der Bauwerke innerhalb der Jahre verändert. In Anlehnung an die einzelnen Expertenmeinungen werden dafür für das Vergleichsszenario drei Testfälle untersucht (Tabelle 61), in denen die Wehranlagen für die Instandhaltungsplanung neu priorisiert werden. In Testfall 1 werden die Indikatoren der Konsequenzenklasse (KK) *Sozial* am stärksten gewichtet, in Testfall 2 die Indikatoren der KK *Ökonomisch* und in Testfall 3 der *hydraulische Parameter*. Da im Experteninterview die *Größe der Naturflächen* im Untersuchungsgebiet mehrheitlich gering gewichtet wurde, wird diese Variante nicht als Testfall untersucht. Für diese vier Varianten wurde die Simulation wiederholt, wobei die Parameter *Nutzungsdauer*, *verfügbares Budget* und das *optionale Vorziehen von Maßnahmen* aus Szenario 1.2.3 beibehalten werden.

Tabelle 61: Variation der Gewichtungsfaktoren (Eigene Darstellung)

Kriterium Variante	Gewichtungsfaktoren					
	Menschen	Siedlungs- flächen	Natur- flächen	Industrie- flächen	Wirtschaftl. Folgekosten	Hydr. Parame- ter
Vergleichs- szenario	0,25	0,25	0,05	0,1	0,1	0,25
Testfall1	0,325	0,325	0,05	0,1	0,1	0,1
Testfall 2	0,1	0,1	0,05	0,325	0,325	0,1
Testfall 3	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,55

Tabelle 62 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie die Einzelwerte für den Instandhaltungsrückstau für das Vergleichsszenario und für die drei Testfälle, die erwartungsgemäß kaum voneinander abweichen, da für alle Szenarien die Nutzungsdauer für die Verkehrswasserbauwerke, die Höhe des verfügbaren Budgets und das optionale Vorziehen von Maßnahmen gleich sind.

Tabelle 62: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung (Gewichtungsfaktor) (Eigene Darstellung)

Szenario	DbN_mv	DbN_sd	M_mv	M_sd	I_mv	I_sd	Abbau IHR bis	Max IHR	IHR_mv
1.2.3	36,5	3,6	7,9	4,1	28,1	7,9	2099	84	11,8
Testfall1	36,4	3,6	7,9	4	28	7,8	2100	84	12,0
Testfall 2	36,4	3,4	7,9	3,9	28,1	7,7	2100	86	12,2
Testfall 3	36,4	3,4	8	3,7	28,1	7,7	2101	80	12,0

DbN_mv	Mittelwert Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
DbN_sd	Standardabweichung Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme [a]
M_mv	Mittelwert Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
M_sd	Standardabweichung Anzahl Maßnahmen [Anzahl]
I_mv	Mittelwert Höhe der Investitionen [Mio. €]
I_sd	Standardabweichung Höhe der Investitionen [Mio. €]
IHR	Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]
IHR_mv	Mittelwert Instandhaltungsrückstau [Anzahl Maßnahmen]

Auch die Plots der vier Simulationen weisen kaum Unterschiede auf. In kleinerem Umfang variieren die Werte der Anzahl und der Höhe der Investitionen, da die Bauwerke aufgrund der Gewichtungsfaktoren in jedem Szenario in unterschiedlicher Reihenfolge in die Zeitfenster einsortiert werden. In Abhängigkeit von den Kosten der jeweiligen Maßnahme fällt auch die Anzahl der durchführbaren Maßnahmen innerhalb eines Jahres bei den Szenarien unterschiedlich hoch aus.

Unterschiede zeigen sich somit in den Tabellen zu den Einzelergebnissen (siehe Abschnitt 3.4.2.2). Tabelle 63 zeigt für Szenario 1.2.3 (Vergleichsszenario) die drei Testfälle die aufgrund der Budgetrestriktion durchführbaren Instandhaltungsmaßnahmen der ersten fünf Jahre, die innerhalb eines Jahres nach ihrer Priorität sortiert sind. Die Instandhaltungsmaßnahme für die Wehranlage 2132528001 (kursiv markiert) wird bspw. für das Jahr 2019 prognostiziert. In allen drei Testfällen hat die Wehranlage nach Anwendung der Methode PROMETHEE II eine vergleichsweise hohe Priorität zugeordnet bekommen, sodass sie jeweils an erster bzw. zweiter Stelle platziert ist. Die Instandhaltungsmaßnahme für die Wehranlage 2132944007 (unterstrichen markiert) wird ebenfalls für das Jahr 2019 prognostiziert, kann aber aufgrund ihrer etwas geringeren Prioritätswerte und der Budgetrestriktion nur in Szenario 1.2.3 unmittelbar in die Instandhaltungsplanung aufgenommen werden. In Testfall 1 und 2 muss die Maßnahme für die Wehranlage 2132944007 in die Jahre 2022 bzw. 2023 verschoben werden. In Testfall 3 wird sie erst im Jahr 2024 in der Instandhaltungsplanung berücksichtigt (nicht in Tabelle 63 dargestellt). Aufgrund der unterschiedlichen Wiederherstellungskosten können in den einzelnen Jahren bis zu sechs Bauwerke, vereinzelt auch nur drei Bauwerke instand gesetzt werden.

Tabelle 63: Instandhaltungsplanung (Eigene Darstellung)

Jahr	Objekte in der Instandhaltungsplanung [Objekt-ID]			
	Szenario 1.2.3	Testfall 1	Testfall 2	Testfall 3
2019	2132528001	2132528001	2132528001	2135712004
	2136332004	2133748003	2133718001	2132528001
	2133546001	2133546001	2133338001	2133748003
	2133322001	2133322001	2132946002	-
	2132944007	2133338001	-	-
2020	2133748003	2136332004	2135916002	2133520002
	2133718001	2133718001	2133748003	2137120004
	2135714004	2134536006	2136332004	2133546001
	2133540003	2133138002	2133138002	2133148005
	2132946002	2132946004	-	2132946004
	-	-	-	2132946002
2021	2135916002	2137120007	2135916001	2133718001
	2137120007	2135916002	2133320001	2135916002
	2135712004	2135712004	2133322001	2135710004
	-	-	2133546001	2133138002
	-	-	2132946001	-
2022	2135710001	2135916001	2133120001	2137120007
	2133320001	2135710001	2133520002	2133120001
	2133338001	2135714004	2135714004	2135712001
	2132946004	2132944007	-	2132946001
	-	2132946002	-	-
2023	2135916001	2133320001	2136920001	2136332004
	2133520002	2136920001	2135710001	2133320001
	2135712001	2133540003	2132946004	2133322001
	2133138002	-	2132944007	2133146009
	2133748001	-	-	-

### 3.4.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Datenanalyse (siehe Abschnitt 3.2) und der Priorisierung (siehe Abschnitt 3.3) wurden mit den zeitveränderlichen Parametern eines Bauwerksportfolios zusammengeführt und in ein Planungsinstrument für die Instandhaltungsplanung integriert. Die Anwendung am Beispiel der Objektgruppe Wehranlagen verdeutlicht die Möglichkeiten des entwickelten Planungsinstruments in der Instandhaltungsplanung für ein großes heterogenes Bauwerksportfolio wie das der Verkehrswasserbauwerke.

Für die Modellierung der Alterungsprozesse wurden die Prognosefunktionen aus dem Zusatzmodul Zustandsprognose der Datenbank WSVPruf verwendet (siehe Abschnitt 2.2.2.2). Da die Funktionen in der ursprünglichen Form für Einzelbauwerke und einen Prognosezeitraum von 30 bis maximal 60 Jahren verwendet werden, wurden sie für die vorliegende Arbeit approximiert, so dass mit dem entwickelten System zur Entscheidungsunterstützung Zustandsentwicklungen zeitgleich für eine größere Anzahl Bauwerke und über beliebig lange Zeit berechnet werden können (siehe Abschnitt 3.4.1.1).

Den Gegenpol zu den Alterungsprozessen bilden die modellierten Instandhaltungsmaßnahmen. Die für die Verkehrswasserbauwerke drei wesentlichen Maßnahmen sind der Neubau, die große Instandsetzung und die kleine Instandsetzung. Es wurde ein regelbasiertes Entscheidungsmodell entwickelt, das anhand der aktuellen Zustandsnoten von Stahlbau und Massivbau ermittelt, welche der drei Maßnahmen durchzuführen ist (siehe Abschnitt 3.4.1.2). Für jede der möglichen Maßnahmen wurden Rücksetzwerte für die Zustandsnoten von Massivbau und Stahlbau festgelegt, anhand derer über die Prognosefunktionen die neuen Nutzungsdauern berechnet werden können (siehe Abschnitt 3.4.1.3).

Aus der Analyse von Realdaten und Voruntersuchungen zu Bauprojekten in Abschnitt 3.2.2.4 erfolgt die Übertragung der Kostenfunktionen und der anteiligen Kosten für die kleine und die große Instandsetzung auf die Gruppe der Wehranlagen, so dass für jede Wehranlage die Kosten für eine der drei Instandhaltungsmaßnahmen berechnet werden können (siehe Abschnitt 3.4.1.4). Schließlich wurden Instandhaltungsraten aus dem Hochbau für die Szenarioanalyse adaptiert, um aus dem Anlagevermögen ein Instandhaltungsbudget für den untersuchten Bauwerksbestand der Wehranlagen abzuleiten (siehe Abschnitt 3.4.2.4).

Für die Analyse der langfristigen Entwicklungen im Bauwerksbestand wurde in Abschnitt 3.4.2.1 ein Algorithmus entwickelt, der die zeitveränderlichen Eigenschaften des Bauwerksbestands (Alterungsprozesse, durchgeführte IH-Maßnahmen) mit den Ergebnissen aus der Priorisierung und den Kostenkennwerten verbindet. Ergänzt wurden diese Eingangsgrößen um verschiedene Restriktionen wie die Nutzungsdauer der Verkehrswasserbauwerke und das für Investitionen verfügbare Budget.

Die aktuelle Situation in der WSV wird mit dem Ausgangsszenario 1.2.3.max2BW beschrieben, bei dem jährlich zwei Bauwerke instand gesetzt werden – für die OUGr Wehranlagen entspricht das ungefähr dem Mittelwert der letzten drei Jahrzehnte. Im Vergleichsszenario 1.2.3 werden die in Normen festgelegten Nutzungsdauern für den Massivbau und den Stahlbau verwendet, für Inves-

titionen steht ein Budget von 1,5 % des Anlagevermögens zur Verfügung und anstehende Maßnahmen können nicht nur verschoben, sondern bei vorhandenen Kapazitäten auch bis zu zehn Jahre vorgezogen werden. In unterschiedlichen Szenarien in den Abschnitten 3.4.2.3 bis 3.4.2.5 wurden die einzelnen Parameter variiert, um zu analysieren, wie sich der Zustand aller Bauwerke und insbesondere der Instandhaltungsrückstau während des Untersuchungszeitraums von 150 Jahren entwickeln. Längere Nutzungsdauern der Verkehrswasserbauwerke und/oder ein höheres verfügbares Budget verbessern den Gesamtzustand des Bauwerkszustands und beschleunigen den Abbau des Instandhaltungsrückstaus. Steigern lassen sich diese Effekte mit dem optionalen Vorziehen von Instandhaltungsmaßnahmen, sodass aufkommende Peaks bereits im Vorfeld reduziert werden können (siehe Abschnitt 3.4.2.6)

Abschließend wurde überprüft, ob und welchen Einfluss die Gewichtung der Kriterien in der Priorisierung hat. Diese hat keinen Einfluss auf die Langzeitentwicklung. Bei der detaillierten Analyse einzelner Jahre zeigen sich allerdings Unterschiede in der Rangfolge der Bauwerke, so dass je nach verfügbarem Budget Maßnahmen mit niedrigeren Prioritätswerten in Folgejahre verschoben werden. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Ergebnisse der Priorisierung nur von Bedeutung sind, solange es einen Instandhaltungsrückstau gibt und Maßnahmen prioritätsabhängig für die Instandhaltungsplanung ausgewählt werden müssen. Wenn der Investitionsbedarf nicht oder nur kurzzeitig bzw. minimal höher als das verfügbare Budget ist, können Instandhaltungsmaßnahmen im Wesentlichen unmittelbar zu den Zeitpunkten abgearbeitet werden, zu denen sie prognostiziert werden. Eine Auswahl über die Prioritätswerte muss nicht mehr erfolgen.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, wie wirkungsvoll der gezielte Einsatz von Ressourcen ist. So bestimmen häufig bereits die Qualität der Planung und Bauausführung darüber, ob das Bauwerksportfolio im Wesentlichen aus eher robusten oder eher anfälligen Bauwerken besteht. Bei Letzteren ist wegen der kürzeren Nutzungsdauern in größerem Umfang mit Instandhaltungsmaßnahmen zu rechnen, wobei sich eine geringe Qualität der Bausubstanz bereits in höheren Kosten der laufenden Unterhaltung niederschlägt. Ähnliche Auswirkungen zeigt auch ein zu knapp bemessenes Budget. Hier müssen notwendige Instandhaltungsmaßnahmen immer wieder verschoben werden, sodass ein Instandhaltungsrückstau nicht oder nur stark verzögert abgearbeitet werden kann. Mit der Möglichkeit, Maßnahmen vorzuziehen, können erwartete Peaks reduziert werden und damit kann auch die Anzahl Bauwerke beeinflusst werden, die anderenfalls in Folgejahre verschoben werden.



## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 4.1 Schlussfolgerungen

#### 4.1.1 Schlussfolgerungen aus der Ex-ante-Schadensanalyse

Die für Verkehrswasserbauwerke entwickelte Ex-ante-Schadensanalyse stellt im Ergebnis entscheidungsrelevante Daten für die Bewertung der Priorität der Bauwerke in der Instandhaltungsplanung zur Verfügung. Für die Ableitung von Indikatoren, die als Kriterien für die Bewertung der Priorität verwendet werden, wurde am Beispiel der Objektuntergruppe Wehranlagen untersucht:

- Aufbau und Funktion von Verkehrswasserbauwerken,
- Interdependenzen mit anderen Systemen und
- Auswirkungen auf andere Systeme bei Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen.

Mit den neu gewonnenen Daten finden nicht nur bauwerksbezogene Informationen Berücksichtigung in der Entscheidungsfindung, sondern mit den potenziellen Folgen nach einem Bauwerksversagen oder Funktionsausfall auch Wechselbeziehungen mit anderen Systemen. Die für jedes untersuchte Bauwerk individuell vorgenommene Datenanalyse leistet einen wertvollen Beitrag für eine differenzierte Bewertung von bislang als ähnlich geltende Bauwerke. Zeitgleich wurde eine Grundlage für systematische Risikoanalysen geschaffen, um mit den Ergebnissen gezielt dem Problem der Zustandsverschlechterung der Verkehrsinfrastruktur begegnen zu können und um ein Bewusstsein für potenzielle Schadensereignisse zu schaffen, die nicht nur die Verkehrs- und Güterströme der Wasserstraße beeinträchtigen, sondern auch andere Nutzergruppen zum Teil erheblich gefährden können.

Die erfolgreiche Anwendung am Beispiel der 245 Wehranlagen zeigt die Eignung für einen großen Bauwerksbestand. Innerhalb kurzer Zeit konnte die Datengrundlage für die Bewertung der Priorität der Bauwerke geschaffen werden, sodass für jedes Bauwerk individuell potenzielle Auswirkungen eines Versagensereignisses auf die Schutzziele Mensch, Wirtschaft und Umwelt bei der Bewertung der Priorität berücksichtigt werden.

Unter Verwendung von Ansätzen aus dem Bevölkerungs- und Katastrophenschutz sowie dem Hochwasserschutz erfolgt eine räumlich-zeitliche Strukturierung als Grundlage für die Einordnung potenzieller Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen. Die Verwendung bereits verfügbarer Werkzeuge und Daten ermöglichen eine schnelle Umsetzung. Die Auswertung der Flächennutzungsarten und die Bestimmung der Einwohnerzahlen im jeweiligen Untersuchungsgebiet erfolgen mithilfe eines Digitalen Geländemodells und des auf Satellitendaten basierenden Datensatzes von CORINE Land Cover, die Kosten durch Verkehrsunterbrechung werden mit den Daten aus der Güterverkehrsstatistik für die Binnenschifffahrt berechnet und für die Abschätzung der Schwallwelle nach einem Bauwerksversagen wird ein Berechnungstool verwendet, mit dem auf Grundlage modifizierter hydraulischer Modelle für eine beliebige Wehranlage die Höhe der Schwallwelle nach einem plötzlichen Bauwerksversagen bestimmt werden kann. Mit der Nutzung von vorhandenen Datensätzen und IT-Anwendungen konnte die Generierung neuer relevanter Daten weitestgehend automatisiert sowie ihre Verarbeitung deutlich vereinfacht und beschleunigt werden.

#### 4.1.2 Schlussfolgerungen zur Priorisierungsmethode

Die verwendete Outranking Methode PROMETHEE gehört zu den Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse und ist ein Verfahren zur Bewertung der Priorität, das auch für einen großen Bauwerksbestand geeignet ist. Für die Festlegung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien und die Auswahl der Präferenzfunktion für die Ermittlung der Präferenzgrade in den paarweisen Vergleichen der Alternativen wurde ein Experteninterview durchgeführt. Auch wenn der befragte Expertenkreis nicht repräsentativ für alle am Entscheidungsprozess beteiligten Instanzen ist, zeigt das Ergebnis, dass die Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen für Menschen und Siedlungsflächen von allen bis auf einen Experten gleich oder höher gewichtet wurden als die Auswirkungen für die Binnenschifffahrt oder die Gefährdung für Industrie- und Gewerbeflächen.

Auch die Sensitivitätsanalyse ist unter methodischen Gesichtspunkten für den Datensatz der 245 Wehranlagen geeignet und es können Insensitivitätsintervalle berechnet werden, innerhalb derer eine Veränderung der Gewichtungsfaktoren keine Veränderung der Rangfolge der Bauwerke bewirkt. Für die Sensitivitätsanalyse ist jedoch nicht genauer beschrieben, ab wann ein Insensitivitätsintervall ausreichend groß ist, sodass eine Lösung als robust betrachtet werden kann. Für das Beispiel der 245 Wehranlagen sind die berechneten Insensitivitätsintervalle klein, was auf die große Anzahl Alternativen zurückzuführen ist. Kleine Veränderungen der Gewichtungsfaktoren bewirken nicht nur einen Rangwechsel für die jeweils betrachtete Wehranlage, sondern zeitgleich auch für einen Großteil der anderen Wehranlagen.

Für die Reduzierung der Anzahl Alternativen unter Beibehaltung der auftretenden Kriterienausprägungen wurde mit dem k-medoid-Algorithmus eine Clusteranalyse durchgeführt. Die erneut durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine Veränderung der Gewichtungsfaktoren nur für das Kriterium *Größe der Naturflächen* im Vergleich mit den anderen Kriterien größere Veränderungen bewirkt. Dieses Kriterium wird jedoch vom Expertenkreis bis auf einen der Experten geschlossen als weniger wichtig eingestuft. Für die anderen fünf Kriterien bewirken Veränderungen der Gewichtungsfaktoren Rangfolgeänderungen in ähnlichem Umfang, sodass auch eine reduzierte Anzahl Alternativen die Aussagekraft der Sensitivitätsanalyse nicht erhöht werden konnte.

Die Anwendung der Priorisierungsmethode unterstützt den bzw. die Entscheidungsträger bei der Reduzierung subjektiver Einflüsse in der Entscheidungsfindung und steigert die Transparenz für den Entscheidungsträger selbst aber auch in der Kommunikation bzw. im inhaltlichen Diskurs mit anderen Interessengruppen. Unbestritten vorteilhaft sind die Zeitersparnis und die Nachvollziehbarkeit. Zudem liefert diese Vorgehensweise einen wertvollen Impuls für die Bewertung von Bauwerken, sodass nicht jedes Bauwerk separat bewertet und aufgrund definierter Eigenschaften einer der zehn Prioritätsstufen zugeordnet wird, sondern die Merkmalsausprägungen aller Bauwerke miteinander verglichen werden und ein relationaler Prioritätswert für jedes Bauwerk berechnet wird. Da der Prioritätswert eines Bauwerks allein keine Rückschlüsse auf die Merkmalsausprägungen der einzelnen Kriterien erlaubt, ist das methodische Verständnis unerlässlich für die Einordnung bzw. Bewertung der Ergebnisse.

### 4.1.3 Schlussfolgerungen aus den Langzeitsimulationen

Die neuen Prioritätswerte der Verkehrswasserbauwerke berücksichtigen mögliche Folgen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen, ohne dass dynamischen Eigenschaften wie z.B. einer Zustandsveränderung der Bauwerke Rechnung getragen wird. Für die Instandhaltungsplanung der Verkehrswasserbauwerke wurde aus diesem Grund die voranschreitende Zustandsverschlechterung für den Massivbau und den Stahlbau mit jeweils einem Schädigungsprozess modelliert. Grundlage sind die Ergebnisse einer Delphi-Befragung mit einem ausgewählten Expertenkreis, die ursprünglich durchgeführt wurde, um die Datenbank aus der Bauwerksinspektion mit einem Planungswerkzeug einer Zustandsprognose für Einzelbauwerke zu erweitern. Für die Untersuchung in der vorliegenden Arbeit konnte für den Massivbau und den Stahlbau jeweils der Schadensprozess extrahiert werden, für den ein Bauwerk am schnellsten das Ende der Nutzungsdauer erreicht und eine umfangreiche substanzerhaltende Instandhaltungsmaßnahme zu erwarten ist. Beide Prognosefunktionen wurden im Planungsinstrument integriert.

Mit dem entwickelten Planungsinstrument kann erstmalig zeitgleich für eine große Anzahl Verkehrswasserbauwerke die Zustandsentwicklung für mehrere Jahrzehnte in Folge prognostiziert werden. Die Langzeitsimulationen berücksichtigen, dass mit Durchführung einer umfangreichen Instandhaltungsmaßnahme, wie z.B. einem Neubau, das Ende des Lebenszyklus des Bauwerkes erreicht ist und jedoch die Funktion, wie z.B. eine Wasserspiegelregelung, an diesem Standort erhalten bleibt. Darüber hinaus wird für das jeweilige Bauwerk in Abhängigkeit von der aktuellen Zustandsbewertung für Massivbau und Stahlbau die durchzuführende Instandhaltungsmaßnahme ermittelt und die neuen Zustandsnoten nach Abschluss der Maßnahme berechnet, sodass Neubaumaßnahmen und auch substanzerhaltende Maßnahmen wie z.B. eine Ertüchtigung abgebildet werden.

Anhand der unterschiedlichen Szenarien wird demonstriert, dass Entwicklungen in einem großen Bauwerksbestand nicht ausschließlich von fortschreitenden Substanzverlusten und durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen beeinflusst werden. Weitere Einflussgrößen sind die Robustheit resp. die Nutzungsdauer der Verkehrswasserbauwerke, die Höhe des für Investitionen verfügbaren Budgets und auch die Flexibilität in der Planung, bei Bedarf die Durchführung erwarteter Instandhaltungsmaßnahmen vorzuziehen. Im Ergebnis kann für jedes Szenario im Untersuchungszeitraum von derzeit 150 Jahren ein Zeitplan erstellt werden, der das Jahr der erwarteten Instandhaltungsmaßnahme, Name und Objekt-ID des betroffenen Bauwerkes, Art und Kosten der Maßnahme sowie die Merkmalsausprägungen der Kriterien aus der Priorisierung und den Prioritätswert beinhaltet.

Erstmals können dem Entscheidungsträger die Bauwerke benannt werden, die aufgrund der Ressourcenbeschränkung in das nächste Planungsjahr übertragen werden müssen. Somit kann auch der Investitionsbedarf des Instandhaltungsrückstaus für einzelne Jahren quantifiziert und dessen Entwicklung verfolgt bzw. der Zeitpunkt des Abbaus ermittelt werden.

## 4.2 Kritische Würdigung und zukünftiger Forschungsbedarf

Das Planungsinstrument für eine risiko-basierte Instandhaltungsplanung für Infrastrukturbauwerke an den Bundeswasserstraßen ist ein dreiteiliges modulares System, das

- gemäß dem Ansatz der Ex-ante-Schadensanalyse im Bevölkerungs- und Katastrophenschutz bzw. Hochwasserschutz neu erhobene Daten für jedes Bauwerk zusammenstellt,
- die Bauwerke anhand der Ergebnisse aus der Ex-ante-Schadensanalyse unter Verwendung einer Methode der MCDA für die Instandhaltungsplanung priorisiert und
- mithilfe von Langzeitsimulationen für den Bauwerksbestand einen Instandhaltungsplan erstellt und Entwicklungen für den Instandhaltungsrückstau bis hin zu dessen Abbau aufzeigt.

### 4.2.1 Datengewinnung und Datenaufbereitung

Wechselbeziehungen zwischen der Wasserstraße bzw. dem Verkehrswasserbauwerk und der Umgebung werden in der vorliegenden Arbeit implizit über die Bestimmung der Flächennutzungsarten und den hydraulischen Parameter erfasst.

Für die Analyse der Flächennutzungsarten werden Geoinformationssysteme verwendet, wobei für jedes einzelne Bauwerk ein 1 km breiter Untersuchungskorridor ausgewertet wurde, der die Gesamtlänge von Oberwasser und Unterwasser umfasst. Die Bestimmung der Gesamtlänge erfolgte über die Verortung der Bauwerke im GIS. Insbesondere für Bauwerke mit Merkmalsausprägungen in den oberen Bereichen sollte geprüft werden, ob die Werte zustande kommen, weil das Bauwerk in einem Siedlungsgebiet steht oder die analysierte Gesamtstrecke verhältnismäßig lang ist. Für eine Präzision der Ergebnisse könnten Vulnerabilitätsanalysen durchgeführt werden, um zu quantifizieren, welche Wasserstraßenabschnitte tatsächlich für z.B. regelmäßige Wasserentnahmen genutzt werden, sodass kein pauschales Risiko für alle Anlieger angenommen werden muss und insbesondere auch Auswirkungen einer Sunkwelle im Oberwasser einbezogen werden können. Da sich durch Umnutzungen Änderungen ergeben können, sollte die Analyse der Flächennutzungsarten in regelmäßigen Abständen wiederholt werden.

Der hydraulische Parameter entspricht in der vorliegenden Arbeit der Höhe einer Schwallwelle nach einem plötzlichen Bauwerksversagen von Wehranlagen. Hier könnten sich detaillierte Analysen anschließen, ob die Schwallwelle im Gewässerbett der jeweils betrachteten Wehranlage verbleibt oder ob es aufgrund baulicher oder topographischer Bedingungen zu Überflutungen im Umland kommen kann. Da die Methode zur Berechnung der Höher einer Schwallwelle ausschließlich für Wehranlagen entwickelt wurde, ist sie nicht auf andere Bauwerkstypen übertragbar, da bei jedem Bauwerkstyp spezifische Mechanismen ausgelöst werden. So wird z.B. bei Kanalbrückenanlagen höchstwahrscheinlich keine Schwallwelle im Kanalbett auftreten, aber dafür kann bei einem Bauwerksversagen das Wasser des Kanalabschnitts schwallartig seitlich ins Gelände abfließen und großflächige Überflutungen verursachen. Bei Dükeranlagen besteht wiederum die Gefahr, dass es zu einem Rückstau im gedükerten Flusslauf und somit zu langsamen, aber großflächigen Überflutungen kommt. Das Ausmaß ist von der Fließgeschwindigkeit und der Durchflussmenge des Baches oder Flusses abhängig. Für alle diese Mechanismen liegen keine oder bei wei-

tem nicht ausreichende Informationen vor und auch mögliche Kaskadeneffekte könnten untersucht werden. Für eine Berücksichtigung des Parameters in der Bewertung der Priorität für alle Verkehrswasserbauwerke müssten sowohl die hydraulischen Effekte vertieft untersucht als auch eine Systematik entwickelt werden, die einen Vergleich zwischen verschiedenen Objekttypen zulässt.

Die Kosten einer Verkehrsunterbrechung nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen wurden in Anlehnung an BinSchLV (2010) zur Berechnung von Ansprüchen bei Nutzungsausfällen bei Havarie berechnet. Für eine präzise Berechnung stehen bislang keine Daten, Fallstudien oder wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung, sodass sich hier zukünftig verschiedene Arbeiten der Fragestellung widmen könnten, welche Unternehmen der Binnenschifffahrt z.B. betroffen wären und in welchem Ausmaß oder ob und welche Rechtsmittel ihnen tatsächlich zur Verfügung stünden, um Ansprüche geltend zu machen.

Die berechneten Wiederherstellungskosten bleiben bei der Bewertung der Priorität zunächst unberücksichtigt und werden erst in Verbindung mit möglichen Instandhaltungsmaßnahmen in den Langzeitsimulationen verwendet. Da in der vorliegenden Arbeit keine finanziellen Konsequenzen der zur Auswahl stehenden Investitionen untersucht werden und Prognosen für sehr lange Zeiträume wenig aussagekräftig sind, wurde auf eine Anwendung von Methoden der Investitionsrechnung verzichtet und es wird für den Untersuchungszeitraum von konstanten Wiederherstellungskosten und auch von einem gleichbleibenden Budget ausgegangen. Darüber hinaus wurden die Wiederherstellungskosten der 245 Wehranlagen unterschiedlichster Größe auf Basis von Ergebnissen einer Realdatenanalyse von nur 13 durchgeführten Neubaumaßnahmen bei kleinen Wehranlagen ermittelt, sodass Wiederherstellungskosten für größere Wehranlagen nicht präzise berechnet, sondern nur skaliert werden konnten. Ziel weiterer Untersuchungen sollte es sein, das Verfahren der Ermittlung der Wiederherstellungskosten für Verkehrswasserbauwerke unter Verwendung weiterer Erfahrungswerte und einer fundierten Datengrundlage weiterzuentwickeln und unterschiedliche Einflussfaktoren wie z.B. Entwicklungen auf dem Kapitalmarkt in Form von Ensembleanalysen zu berücksichtigen.

Da in der vorliegenden Arbeit keine mikroskalige, sondern eine mesoskalige Analyse der Schadenspotenziale realisiert wurde, sind methodisch bedingt nur eingeschränkt Aussagen über die tatsächliche Höhe der Schadensfolgen möglich. Auch hier sind vertiefende Untersuchungen empfehlenswert, da im Kontext der Instandhaltungsplanung für Verkehrswasserbauwerke bislang nicht auf Ergebnisse aus Risikoanalysen zurückgegriffen werden kann und auch keine Informationen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten oder zu historischen Versagensereignissen vorliegen, die als Vergleichsszenarien heranzuziehen wären. Für eine benutzerfreundliche Anwendung und bei einer Ausweitung auf den gesamten Bauwerksbestand sollte auf eine geeignetere Softwarelösung ausgewichen und Schnittstellen zu relevanten Fachdatenbanken hergestellt werden.

#### 4.2.2 Bewertung der Priorität

Für die Bewertung der Priorität der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung wurden unterschiedliche Ansätze ausgewertet, um eine geeignete Methode zu finden. Aus der Gruppe der Outranking-Methoden wurde die Methode PROMETHEE ausgewählt, bei der die Alternativen jeweils paarweise miteinander verglichen werden und nach Aggregation der Einzelergebnisse eine Rangordnung vorliegt. Die ermittelten Prioritätswerte in Form der Nettoflüsse erlauben jedoch keine quantitative Bewertung bzw. keine Aussagen hinsichtlich der Bedeutung dieser Werte. Metrisch skalierte Daten mit interpretierbaren Abständen können dem Entscheidungsträger bei der Einordnung und Bewertung der Ergebnisse unterstützen.

Für die Ermittlung der Rangfolge müssen im Vorfeld für die Kriterien Gewichtungsfaktoren festgelegt und eine Präferenzfunktion ausgewählt werden, welche für die Transformation der Ergebnisse aus den paarweisen Vergleichen Präferenzwerte ermittelt. In der vorliegenden Arbeit konnte dafür ein kleiner Expertenkreis befragt werden. Für die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren werden im Rahmen der Methode PROMETHEE II keine Empfehlungen gegeben, was insbesondere für Erstanwender eine Hilfestellung wäre.

Der Gewichtung des hydraulischen Parameters wurde in der Expertenrunde einheitlich eine hohe Bedeutung beigemessen und er wurde entweder vergleichsweise hoch gewichtet oder es wurde empfohlen, diesen Parameter als Kriterium auszuschließen, um hydraulische Effekte separat in die Entscheidungsfindung zu integrieren. Insbesondere im Hinblick auf die hydraulischen Mechanismen der unterschiedlichen Verkehrswasserbauwerke sollte untersucht werden, in welcher Form diese in die Bewertung der Priorität für die Instandhaltungsplanung einfließen und wie sie gewichtet werden.

Mit der Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, wie sich Veränderungen der Gewichtungsfaktoren auf die Rangfolge der Bauwerke auswirken. Eine Orientierung für die Bewertung ist seitens der Methode nicht gegeben, sodass die Frage nicht eindeutig beantwortet werden konnte, ob die Ergebnisse der Bewertung der Priorität als sensitiv oder robust gegenüber Veränderungen einzuordnen sind. Bereits kleine Veränderungen bewirken zeitgleich mehrere Wechsel in der Rangfolge der Bauwerke, was durchaus auch mit der großen Anzahl Bauwerke zusammenhängen kann. Für die Beurteilung der Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse könnte ein Bewertungsmaßstab entwickelt werden, mit dem sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Alternativen bestimmen lässt, wie sensitiv oder robust die gewählte Konstellation ist.

Die Bewertung der Priorität der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung wurde in MS Excel realisiert. Dem Nutzer steht eine Eingabemaske zur Verfügung und die paarweisen Vergleiche für jedes Kriterium erfolgen in einem separaten Blatt, sodass die Zwischenergebnisse immer nachvollzogen werden können. Allerdings ist es empfehlenswert, mit zunehmender Anzahl Bauwerke auf geeignete Software zu migrieren.

### 4.2.3 Planungsinstrument für die Instandhaltung

Die Zustandsverschlechterung der Verkehrswasserbauwerke wird in der vorliegenden Arbeit mit Prognosefunktionen nachgebildet, sodass das Ende der Nutzungsdauer für den Massivbau und den Stahlbau separat berechnet werden kann. Die Prognosefunktionen basieren auf vorhandenen Ergebnissen einer Expertenbefragung, bei denen die Experten angeben sollten, wann ein definierter Schaden erstmals auftritt und wann dieser voraussichtlich die schlechteste Schadensklasse erreicht. Dabei sollte seinerzeit zwischen anfälligen, mittleren und robusten Bauwerken unterschieden werden. Für eine Erhöhung der Aussagekraft sollten die Prognosefunktionen nur Schädigungsmechanismen berücksichtigen, bei denen das Ausmaß des jeweils bewerteten Schadens die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit potenziell gefährdet und somit das Ende der Nutzungsdauer erreicht ist. Schäden kleineren Ausmaßes, mit dem kein höheres Gefährdungspotenzial einhergeht, sollten unberücksichtigt bleiben. Auch die Überlagerung von Schädigungsprozessen könnte untersucht und in die Prognosefunktionen integriert werden. Für eine Erweiterung des entwickelten Modells könnte zudem differenziert werden, ob es jeweils sich um ein anfälliges oder robustes Bauwerk handelt, sodass den Bauwerken unterschiedliche Nutzungsdauern zugeordnet werden können.

In Abhängigkeit von der Zustandsnote des Massivbaus und des Stahlbaus wird vor Ablauf der Nutzungsdauer des jeweils untersuchten Bauwerks eine der modellierten Instandhaltungsmaßnahmen ausgewählt. Gemäß der aktuellen Situation der Verkehrswasserbauwerke könnten weitere Varianten einer Instandhaltung wie z.B. Sofortmaßnahmen berücksichtigt werden. Sofortmaßnahmen dienen hauptsächlich der Abwendung von Gefahren für Personen und können als kostengünstiges Provisorium zumindest ein kleines Zeitfenster bis zum Beginn der notwendigen Instandhaltungsmaßnahme überbrücken.

Durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen haben eine Verbesserung des Bauwerkszustandes und eine Verlängerung der Nutzungsdauer zum Ziel, was in der vorliegenden Arbeit mit den Rücksetzwerten für die Zustandsnote abgebildet wird. Die Werte basieren ausschließlich auf Expertenwissen. In der Datenbank WSVPruf zur Bauwerksinspektion könnten Schadensbewertungen über einen längeren Zeitraum zurückverfolgt werden, um die veränderten Schadensbewertungen nach einer durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme zu ermitteln. Wenn zudem die Art der durchgeführten Maßnahme und auch die Kosten beim zuständigen WSA abgefragt werden, könnten die Ergebnisse zusammengeführt und die Rücksetzwerte angepasst sowie die in der vorliegenden Arbeit angenommenen Kosten für die unterschiedlichen Varianten der Instandhaltungsmaßnahmen angepasst werden. In der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt sind die voraussichtliche Dauer der Planung, Genehmigung und Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen, mit deren Kenntnis könnte ein Beitrag für die Optimierung der zeitlichen Positionierung von Maßnahmen geleistet werden.

Für die Analyse möglicher Langzeitentwicklungen im Bauwerksbestand wurden unterschiedliche Rahmenbedingungen und ihre Auswirkungen untersucht. Diese sind Annahmen für die Nutzungsdauer der betrachteten Verkehrswasserbauwerke, für die Höhe des Gesamtbudgets sowie für das optionale Vorziehen von Instandhaltungsmaßnahmen.

Die untersuchten Bauwerke wurden mit homogenen Eigenschaften modelliert, sodass die Bauwerke in der vorliegenden Arbeit die gleiche Nutzungsdauer haben. Die Robustheit eines Bauwerks oder wiederholt durchgeführte Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen können die Länge der Nutzungsdauer beeinflussen. Es bedarf weiterer Untersuchungen, um die unterschiedlichen Eigenschaften der Bauwerke und ihre Auswirkungen im entwickelten Planungsinstrument integrieren zu können. Darüber hinaus könnten mit Methoden wie z.B. der Monte Carlo Simulation seltene unvorhersehbare Ereignisse wie z.B. ein Bauwerksversagen vor Ablauf der Nutzungsdauer berücksichtigt werden.

Der Investitionsbedarf bzw. die Instandhaltungsrate wurden in der vorliegenden Arbeit mithilfe von Ansätzen aus dem Hochbau antizipiert. Eine Konkretisierung dieser Werte für Verkehrswasserbauwerke und ein spezifisches Budgetierungsverfahren würden eine strategische Instandhaltungsplanung unter ökonomischen Gesichtspunkten erheblich erleichtern.

Das optionale Vorziehen von Maßnahmen ist ein erster methodischer Ansatz, verfügbare Ressourcen auszulasten und eine größere Anzahl erwarteter Instandhaltungsmaßnahmen zu entzerren, sodass einem aufkommenden Instandhaltungsrückstau gezielt entgegengewirkt werden kann. Methoden wie z.B. Scheduling können auf eine Optimierung der Ergebnisse des Planungsinstruments hinwirken, so dass Ressourcen bedarfsgerecht geplant werden können. Voraussetzung dafür sind weiterführende empirische Arbeiten, um die für eine Optimierung der Instandhaltungsplanung notwendige Datengrundlage zu schaffen.

In der aktuellen Version ist das Planungsinstrument auf die Anwendung für alle Verkehrswasserbauwerke der WSV ausgerichtet. Für eine Verwendung in kleineren administrativen Einheiten können die Bauwerke zusätzlich nach Wasserstraßen gefiltert werden, sodass die Ergebnisse als Grundlage für eine regional beschränkte Instandhaltungsplanung verwendet werden könnten.

Eine Besonderheit des entwickelten Planungsinstruments ist die Offenlegung und Quantifizierung des Instandhaltungsrückstaus, der gemäß der vorliegenden Arbeit besteht, wenn der Investitionsbedarf größer ist als die getätigten Investitionen. Dieser Ansatz könnte methodisch umfangreich erweitert werden, wenn auf notwendige Informationen zu möglichen Instandhaltungsmaßnahmen und den Kosten der jeweiligen Maßnahme zurückgegriffen werden könnte, sodass dieser Problemstellung mit neu zu entwickelnden Methoden begegnet werden kann.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der bislang fehlenden Modellierung von Unsicherheiten sowie in der fehlenden Abbildung möglicher Veränderungen durch Innovationen in den Bauprozessen. Es bedarf darüber hinaus einer Überführung in die Praxis und der Bewertung des Planungsinstruments sowie einer Beurteilung der gewonnenen Erkenntnisse.

Das Planungsinstrument wurde mithilfe der Programmiersprache R (Open-Source) und MS Excel realisiert. Auch hier steht dem Nutzer eine Eingabemaske zur Verfügung, mit der die unterschiedlichen Parameter für die Simulation eingestellt werden können. Die Ausgabe der berechneten Instandhaltungspläne erfolgt in MS Excel, sodass Planungsinstrument und Ergebnisse unmittelbar zum Einsatz kommen können. Mit Realisierung der vorgeschlagenen Weiterentwicklungsmöglichkeiten für das Planungsinstrument sollte eine datenbankgestützte Lösung angestrebt werden.

## 5 Zusammenfassung

Alternde Verkehrsinfrastrukturen stellen eine Gesellschaft mit zunehmendem Verkehrsaufkommen vor große Herausforderungen. Der Bundesverkehrswegeplan 2030 prognostiziert einen Anstieg der Transportleistung im Güterverkehr für die Binnenschifffahrt von 2010 bis zum Jahr 2030 um fast 23 % und betont die Bedeutung zusätzlich notwendiger Finanzmittel (BMVI, 2016b). Im Jahr 2015 wurde der Investitionsbedarf für Ersatz- und Ausbauprojekte auf über 1,1 Mrd. € geschätzt. Der Instandhaltungsrückstau der Verkehrswasserbauwerke konnte bislang nicht quantifiziert werden, sodass von einem noch weit größeren Investitionsbedarf auszugehen ist. Andererseits konnten nur ca. 60 % (ca. 400 Mio. €) der verfügbaren Mittel in Höhe von ca. 675 Mio. € Ausbau- und/oder Ersatzmaßnahmen investiert werden (BMVI, 2015b). Dem gegenüber steht ein Bauwerksbestand, der etwa zur Hälfte vor 1950 erbaut wurde und von dem gemäß BMVI (2015b) innerhalb der nächsten zehn Jahre nahezu für 20 % der Bauwerke ein Ersatz resp. Neubau oder eine große Grundinstandsetzung notwendig ist.

Aufgrund der fortschreitenden Substanzverluste gewinnt der Diskurs um mögliche Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen der Verkehrswasserbauwerke an Bedeutung. Mit der bislang verwendeten Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten ist es nicht möglich, flächendeckend abzuschätzen, wann, wo und mit welchen Instandhaltungsmaßnahmen zukünftig zu rechnen ist. Auch ist die Datenlage nicht ausreichend für die Durchführung von Risikoanalysen und es fehlt an Informationen zu Umfang und Kosten von Instandhaltungsmaßnahmen sowie den Wechselbeziehungen der Verkehrswasserbauwerke mit ihrer Umgebung. Zeitveränderliche Prozesse wie der Zustand eines Bauwerks und Zustandsverbesserungen aufgrund von durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen oder Bewältigungsstrategien im Umgang mit dem Instandhaltungsrückstau bleiben in der Instandhaltungsplanung unberücksichtigt.

Die vorliegende Arbeit nimmt sich dieser Problematik an und leistet mit dem entwickelten Planungsinstrument einen ersten Beitrag. Ziel sind die Verbesserung der Methode zur Priorisierung von Investitionsvorhaben an Bundeswasserstraßen unter Einbindung möglicher Versagensfolgen und eine Entscheidungsunterstützung in der Instandhaltungsplanung für Verkehrswasserbauwerke, um Ressourcenbedarfe zu erkennen und den Instandhaltungsrückstau nachhaltig abzubauen.

Basis für das entwickelte Planungsinstrument sind die Erhebung und Aufbereitung von Daten für 245 Wehranlagen. Dabei werden vorhandene Bauwerkskennzahlen um die Ergebnisse von Ex-ante-Schadensanalysen ergänzt, die in einem definierten Untersuchungsgebiet umfangreiche Analysen von Flächennutzungsarten, Kosten durch Verkehrsunterbrechung für die Binnenschifffahrt und einen hydraulischen Parameter für die Höhe einer möglichen Schwallwelle umfassen. Die Bewertung der Priorität der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung erfolgt mit PROMETHEE II, einer Methode der multikriteriellen Entscheidungsanalyse. Im Ergebnis kann für alle betrachteten Wehranlagen eine eindeutige Rangfolge entsprechend ihres Prioritätswerts erstellt werden. Mit dem Ziel, zukunftsorientierte Entscheidungen in der Instandhaltungsplanung zu unterstützen, wird die Zustandsentwicklung aller Bauwerke prognostiziert und die für

einen längeren Zeitraum erwarteten Instandhaltungsmaßnahmen werden chronologisch und innerhalb einzelner Zeitfenster nach Priorität geordnet. Die Implementierung der Methode in MS Excel und mithilfe der Programmiersprache R ermöglicht eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsfindung, die leicht an neue Rahmenbedingungen wie die Höhe des verfügbaren Budgets oder die erwartete Nutzungsdauer der Bauwerke anpassbar ist.

Der verfolgte mesoskalige Ansatz zeigt, dass trotz der wenigen verfügbaren Daten eine in sich geschlossene Methode entwickelt werden konnte, sodass eine unmittelbare Anwendung möglich ist. Mit einem konsequenten Datenmanagement kann die Genauigkeit der Ergebnisse zudem stetig gesteigert werden. Unbestritten vorteilhaft sind Methode und Ergebnis der Datengewinnung, da die gewählte Struktur vollständig auf andere Bauwerkstypen übertragbar ist. In der vorliegenden Arbeit wurden bestehende Daten um Ergebnisse aus Ex-ante-Schadensanalysen erweitert. Grundlage für diesen Ansatz sind offensichtliche Wechselbeziehungen mit der Umgebung und anderen gesellschaftlichen Systemen, die in unterschiedlichen Formen die Wasserstraße nutzen. Auf Grundlage der neu ermittelten Daten und unter Verwendung einer Methode der multikriteriellen Entscheidungsanalyse wird in paarweisen Vergleichen für jedes Bauwerk ein Prioritätswert für die Instandhaltungsplanung berechnet. Im Rahmen der Methode kann die Gewichtung einzelner Kriterien und unterschiedliche Parameter individuell festgelegt werden.

Da zum Zeitpunkt einer Entscheidung nicht immer auch die langfristigen Folgen erkennbar sind, erfolgt in der vorliegenden Arbeit eine Kombination der Bauwerksdaten und der berechneten Prioritätswerte mit zeitveränderlichen Eigenschaften in Form von Alterungsprozessen (Substanzverlust) und Instandhaltungsmaßnahmen (Substanzerhalt/-verbesserung). Das entwickelte Planungsinstrument simuliert Langzeitentwicklungen des Bauwerksbestands unter dem Einfluss unterschiedlicher Rahmenbedingungen wie der Nutzungsdauer von Bauwerken, dem verfügbaren Budget in Form einer Instandhaltungsrate oder einer flexiblen Instandhaltungsplanung, bei der zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen auch vorgezogen werden können. Mit dem entwickelten Algorithmus wird für alle Bauwerke die Restnutzungsdauer berechnet und daraufhin eine chronologische Ordnung erstellt, sodass jedem Jahr eine Gruppe von Bauwerken zugeordnet wird, für die Instandhaltungsmaßnahmen zu erwarten sind.

In Abhängigkeit vom Zustand des Massivbaus und des Stahlbaus erfolgen die regelbasierte Zuordnung einer Instandhaltungsmaßnahme und die Berechnung des voraussichtlichen Investitionsbedarfs. Für jedes Jahr wird nun geprüft, welche der erwarteten Instandhaltungsmaßnahmen mit dem verfügbaren Budget durchgeführt werden können. Liegt der Investitionsbedarf höher, werden die Maßnahmen absteigend nach Prioritätswert in die Instandhaltungsplanung aufgenommen, solange die Summe ihrer Kosten die Höhe des Budgets nicht überschreitet. Bauwerke, die aufgrund ihres niedrigen Prioritätswerts nicht berücksichtigt werden können, werden in das Folgejahr übertragen. Dieser Abgleich zwischen Investitionsbedarf und verfügbarem Budget sowie die Übertragung unberücksichtigt gebliebener Bauwerke ins Folgejahr erfolgen nacheinander für jedes Jahr.

Für eine unmittelbare Anwendung Ergebnisse in der Instandhaltungsplanung erfolgt ihre Zusammenstellung, sodass nachvollziehbar ist, welche Bauwerke unter den gewählten Bedingungen in den einzelnen Jahren in die Instandhaltungsplanung aufgenommen wurden und welche Bauwerke nicht berücksichtigt werden konnten und somit in ein Folgejahr übertragen wurden. Mit angegeben sind immer Bauwerksdaten wie z.B. die Objekt-Identifikationsnummer oder die jeweilige Bundeswasserstraße sowie die Einzelergebnisse aus der Ex-ante-Schadensanalyse. Die Gesamtübersicht listet auf, wie viele Bauwerke in den einzelnen Jahren im Untersuchungszeitraum in die Instandhaltungsplanung aufgenommen werden, wie viele Bauwerke jeweils in das Folgejahr übertragen werden müssen, wie hoch der jährliche Investitionsbedarf ist und insbesondere wie sich der Instandhaltungsrückstau entwickelt und bis zu welchem Zeitpunkt er nachhaltig abgebaut werden kann.

Das für einen großen Bauwerksbestand entwickelte Planungsinstrument unterstützt den Anwender, sich strukturiert mit den Wechselbeziehungen zwischen dem Verkehrsinfrastruktursystem Bundeswasserstraße und der Umwelt, in die es eingebettet ist, auseinanderzusetzen. Die Bewertung der Priorität der Verkehrswasserbauwerke für die Instandhaltungsplanung erfolgt unter Berücksichtigung möglicher Konsequenzen nach einem Funktionsausfall bzw. Bauwerksversagen, wobei dem Anwender Möglichkeiten zur Einflussnahme gegeben werden. Die Langzeitprognosen für den Bauwerksbestand dienen schließlich der Erstellung einer Instandhaltungsplanung, wobei der Anwender auch hier restriktive Rahmenbedingungen für eigene Anforderungen definieren kann. Im Ergebnis erhält der Anwender einen risiko-basierten Instandhaltungsplan, der für den gesamten Bauwerksbestand langfristige Entwicklungen im Investitionsbedarf aufzeigt und darüber hinaus eine Quantifizierung und Nachverfolgung des Instandhaltungsrückstaus ermöglicht.

Mit der Entwicklung des Planungsinstruments konnten somit beide Forschungsfragen dieser Arbeit beantwortet werden.

- Wie können Verkehrswasserbauwerke innerhalb eines großen Bauwerksbestands unter Berücksichtigung fortschreitender Substanzverluste für eine Instandhaltungsplanung bewertet werden?
- Wie kann eine Instandhaltungsplanung unter Berücksichtigung restriktiver Rahmenbedingungen entwickelt werden, sodass aktuelle und zukünftige Ressourcenbedarfe erkennbar werden und insbesondere der Instandhaltungsrückstau quantifiziert wird?

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit machen deutlich, dass auch mit vermeintlich pragmatischen Ansätzen und nur wenigen verfügbaren Daten ein ganzheitliches Konzept zur Verfügung gestellt werden kann, mit dem sich Elemente des Risikomanagements und des Lebenszyklusmanagements in die Instandhaltungsplanung für einen großen Bauwerksbestand integrieren lassen.



## 6 Literaturverzeichnis

- Aigner, D. (2008): Überfälle. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 36. TU Dresden. Institut für Wasserbau und THM.
- Amyotte, P. R., McCutcheon, D. J. (2006): Risk Management - an area of knowledge for all engineers. Hg. v. The Research Committee of the Canadian Council of Professional Engineers.
- Andersson-Sköld, Y. et al. (2001): The Rejuvenate DST for biomass selection on marginal land: results from case study applications. Manuscript Draft. In: Elsevier Editorial System for Journal of Environmental Management.
- Bachmann, D. (2012): Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Bahr, C. (2008): Realdatenanalyse zum Instandhaltungsaufwand öffentlicher Hochbauten. Ein Beitrag zur Budgetierung, Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe.
- Baji, H. et al. (2017): Risk-cost optimised maintenance strategy for tunnel structures. Tunnelling and Underground Space Technology, 69, S.72-84.
- BAW (2010): Bauwerksinspektion (MBI). BAW Merkblatt, Karlsruhe.
- BAW (2013): Merkblatt: Materialtransport im Boden (MMB). BAW Merkblatt. Hg. v. BAW, Karlsruhe.
- BAW (2017): Die BAW. Hg. v. BAW. Online verfügbar unter [http://www.baw.de/DE/die\\_baw/die\\_baw.html](http://www.baw.de/DE/die_baw/die_baw.html), zuletzt geprüft am 25.11.2017.
- BAW (2018): Merkblatt: Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. Online verfügbar unter <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/105197>, zuletzt geprüft am 21.08.2019.
- BBK (2018): Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe - Risikomanagement. Online verfügbar unter [https://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/Risikomanagement/risikomanagement\\_node.html](https://www.bbk.bund.de/DE/AufgabenundAusstattung/Risikomanagement/risikomanagement_node.html), zuletzt geprüft am 04.05.2018.
- BinSchLV (2010): Verordnung über die Lade- und Löschzeiten sowie das Liegegeld in der Binnenschiffahrt (Lade- und Löschzeitenverordnung). BinSchLV.
- BMVBS (2009): Bauwerksinspektion VV-WSV 2101. Fundstelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMVBW (2005): VV-WSV 1102 Verwaltungsvorschrift der WSV des Bundes - Objektkatalog. Fundstelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen.
- BMVI (2015): Verkehrsinfrastrukturbericht. Auszug Wasserstraßen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.

BMVI (2016a): Methode zur Priorisierung von Investitionsprojekten (MPI). Nicht öffentliches Dokument.

BMVI (2016b): Bundesverkehrswegeplan 2030. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin.

Bödefeld, J., Brockelmann, H. (2019): Sachstandsbericht: Instandsetzungs- und Neubaumaßnahmen inkl. deren Kosten. Teil 1: Neubau von Wehranlagen. BAW, Karlsruhe (BAW-Nr. B3951.04.12.50013).

Brans, J. P. et al. (1986): How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. In: *European Journal of Operational Research*, 24, S. 228–238, zuletzt geprüft am 24.11.2017.

Cambridge University Press (Hrsg.) (2014): Cambridge Dictionary. Bedeutung von "trade-off" im englischen Wörterbuch. Online verfügbar unter <http://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/trade-off>, zuletzt geprüft am 13.09.2017.

CEDIM (2016): Informationen zum Erdbebenrisiko in Deutschland. Unter Mitarbeit von Hilpert, J. Johannes Hilpert. Online verfügbar unter <https://www.cedim.de/1017.php>, zuletzt aktualisiert am 30.09.2016, zuletzt geprüft am 19.04.2018.

Connelly, E. B., Thorisson, H.; James Valverde Jr., L.; Lambert, J. H. (2016): Asset risk management and resilience for flood control, hydropower, and waterways. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems. Part A: Civil Engineering*, 2(4). 04016001-04016008.

Cruz, A. M., Steinberg, L. J. & Vetere-Arellano, A. L. (2006). Emerging issues for natech disaster risk management in Europe. *Journal of Risk Research*, 9(5), 483-501.

Hossain, M. K. (2017). Flood Risk Assessment for the Vulnerable Populations and Infrastructure: Village Creek, Birmingham, Alabama. Master thesis. Auburn University, Auburn.

Dams, J., Greive, M. (2014): Angst vor Verkehrsinfarkt macht Politiker kreativ. Hg. v. Axel Springer SE. Welt. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/wirtschaft/article132015947/Angst-vor-Verkehrsinfarkt-macht-Politiker-kreativ.html>, zuletzt geprüft am 13.09.2018.

DCLG (2009): Multi-criteria analysis: a manual. Hg. v. Department for Communities and Local Government, London.

Dekker, R. (1995): Integrating optimisation, priority setting, planning and combining of maintenance activities. In: *European Journal of Operational Research*, 82, 2, S.225–240.

Destatis (2017): Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2016. Fachserie 8 Reihe 4. Hg. v. Statistisches Bundesamt.

Deutscher Bundestag (2010): Bericht über die Methode zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Drucksache 17/4178, Berlin, zuletzt geprüft am 04.05.2018.

DIN 19558 2002-12: Kläranlagen - Ablaufeinrichtungen, Überfallwehr und Tauchwand, getauchte Ablaufrohre in Becken - Baugrundsätze, Hauptmaße, Anordnungsbeispiele.

DIN 276-1 2018: Kosten im Bauwesen.

DIN EN 1990/NA Dezember 2010: Nationaler Anhang - Natinal festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlage der Tragwerksplanung.

DIN 19700-13 Juni 2019. Stauanlagen - Teil 13 Stauanlagen.

Dohi, T. (2014): Availability and performability analysis for a service degradation process with condition-based preventive maintenance II - estimation and simulation. In: International Journal of Strategic Engineering Asset Management, 2, 1, S. 98–115.

Dudenverlag (2019): Duden. Wörterbuch. Bibliographisches Institut GmbH, Berlin. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Risiko>, zuletzt geprüft am 29.10.2019.

EEA (1995): CORINE land cover. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>, zuletzt geprüft am 23.08.2019.

Eilts, M. (2016): Zustand der Verkehrsinfrastruktur an Bundeswasserstraßen. Expertennetzwerk des BMVI. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 08.12.2016.

Ester, M., Sander, J. (2000): Knowledge Discovery in Databases. Techniken und Anwendungen, Springer, Berlin, Heidelberg.

Everitt, B. S. et al. (2011): Cluster Analysis. 5th Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

Faturechi, R., Miller-Hooks, E. (2015): Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Desasters: A Comprehesive Review. In: Journal of Infrastructure Systems, 21(1).

Frangopol, D. M., Liu, M. (2005): Multiobjective Optimization for Risk-Based Maintenance and Life-Cycle Cost of Civil Infrastructure Systems. In: System Modeling and Optimization. CSMO, 199, S. 123–137.

Gebhardt, M. (2008): Stand der Schlauchwehrtechnik. Anwendungsbeispiele und Betriebserfahrungen. BAW, Karlsruhe.

Geldermann, J. (1999): Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Geldermann, J. et al. (2003): Sensitivitätsanalysen für das Outranking-Verfahren PROMETHEE. In: Habenicht, W. et al. (Hrsg.): Multi-Criteria- und Fuzzy-Systeme in Theorie und Praxis, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, S. 127–151.

Geldermann, J. (2005): Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Fak. für Wirtschaftswiss., Habilitation, Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe.

Geldermann, J., Lerche, N. (2014): Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Methode: PROMETHEE. Leitfaden. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.

Glaser, C. (2019): Risiko im Management. 100 Fehler, Irrtümer, Verzerrungen und wie man sie vermeidet. 1. Auflage 2019, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Gabler, Wiesbaden.

- González, J. et al. (2006): Optimal railway infrastructure maintenance and repair policies to manage risk under uncertainty with adaptive control. DES - Working Papers. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Estadística. In: Statistics and Econometrics. WS.
- Greco, S. et al. (2016): Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys. Volume 1 and 2. 2. Auflage, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, New York.
- Greene, R. et al. (2011): GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. In: Geography Compass, 5, 6, S. 412–432, zuletzt geprüft am 12.09.2017.
- Guitouni, A., Martel, J.-M. (1998): Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. In: European Journal of Operational Research, 109, 2, S. 501–521.
- Hellerfort, M. (2012): BWL für die Immobilienwirtschaft. Eine Einführung. Oldenbourg Verlag München.
- Hendhratmoyo, A. et al. (2017): The Evaluation of Screening Process and Local Bureaucracy in Determining the Priority of Urban Roads Maintenance and Rehabilitation. In: J. Phys.: Conf. Ser., 909, S. 12072.
- Hess, J. T. (2008): Schutzziele im Umgang mit Naturrisiken in der Schweiz. Dissertation. ETH Zürich. Zürich.
- Hörner, T. (2016): Das Hochwasser, das gar keines war. In: Stuttgarter Zeitung, 31.12.2016. Online verfügbar unter <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.jahresrueckblick-stuttgart-das-hochwasser-das-gar-keines-war.721e3c30-e3be-4ed9-84fd-d9066dbaa7ad.html>, zuletzt geprüft am 25.08.2019.
- IPCC (2007): The IPCC Assessments of Climate Change and Uncertainties. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Abgerufen von: [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch1s1-6.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch1s1-6.html), am: 29.08.2018.
- ISO 31000:2018. Risk management-guidelines.
- Japp, K. P. (2000): Risiko. 1. Aufl., digitale Originalausgabe, transcript Verlag, Bielefeld (Einsichten. Themen der Soziologie).
- Jonen, A. (2007): Semantische Analyse des Risikobegriffs: Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung. Beiträge zur Controlling-Forschung, Nr. 11. Working Paper. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. Lehrstuhl für Unternehmensrechnung und Controlling.
- Jongejan, R. (2013): The use of quantitative risk analysis for prioritizing flood risk management actions in the Netherlands.
- Joyce, J. (2017): Coupling Infrastructure Resilience and Flood Risk Assessment for a Coastal Urban Watershed. (Master), University of Central Florida.
- Kabir, G. et al. (2013): A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. In: Structure and Infrastructure Engineering, 10, 9, S. 1176–1210.

- Kalwait, R. et al. (2008): Risikomanagement in der Unternehmensführung: Wertgenerierung durch chancen- und kompetenzorientiertes Management. WILEY-VCH, Weinheim Bergstraße.
- Kaplan, S., Garrick, B. J. (1981): On The Quantitative Definition of Risk. In: Risk Analysis, 1, 1, S. 11–27.
- Kassambra, A. (2017): Practical Guide to Cluster Analysis in R. Unsupervised Machine Learning, STHDA, [www.sthda.com](http://www.sthda.com).
- Kim Wing, A. C. et al. (2016): A literature review on maintenance priority - conceptual framework and directions. In: MATEC Web Conf., 66, S. 4.
- Kirchner, A. (2019): Ermittlung von Kostenansätzen zum Variantenvergleich von Baumaßnahmen an Wehranlagen. Master-Thesis. Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe.
- Kleiber, W. (2010): WertR 06. Wertermittlungsrichtlinien und ImmoWertV 2010 ; Sammlung amtlicher Texte zur Ermittlung des Verkehrswerts von Grundstücken mit Normalherstellungskosten - NHK ; 10. Aufl., Bundesanzeiger-Verl., Köln (Bau, Immobilien, Vergabe).
- Kron, A. (2008): Mikroskalige Ermittlung potenzieller Hochwasserschäden zur Gefahren- und Risikoanalyse. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung.
- Kuhn, R. (1985): Binnenverkehrswasserbau. Ernst, Verlag für Architektur und techn. Wiss., Berlin.
- Kutschera, G. (2008): Analyse der Unsicherheiten bei der Ermittlung der Schadenspotentiale infolge Überschwemmung. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Kühni, K.; Bödefeld, J.; Kunz, C. (2008): EMS-WSV – Ein Erhaltungsmanagementsystem für Verkehrswasserbauwerke, Bautechnik 85, Heft 8, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- Lake Record Blog (2019): Watch the Moment Lake Dunlap Dam Fails. Online verfügbar unter <https://lakerecord.net/2019/05/16/watch-the-moment-lake-dunlap-dam-fails/>, zuletzt geprüft am 25.08.2019.
- Laux, H. (2005): Entscheidungstheorie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Lisson, M. (2014): Entwicklung eines Modells zur Nachhaltigkeitsbewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen - Umsetzung in Planung und Projektentscheidung. Dissertation. Universität der Bundeswehr, München.
- Majumder, M. (Hrsg.) (2015): Impact of Urbanization on Water Shortage in Face of Climatic Aberrations, Springer Singapore, Singapore (SpringerBriefs in Water Science and Technology).
- Marakas, G. M. (1999): Decision support systems in the 21st century, Inc. A Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey.
- Meyer, V. (2005): Methoden der Sturmflut-Schadenspotentialanalyse an der deutschen Nordseeküste. Dissertation. Universität Hannover, Hannover. Fachbereich Geowissenschaften und Geographie.

- Mild, P. et al. (2015): Selecting Infrastructure Maintenance Projects with Robust Portfolio Modeling. In: *Decision Support Systems*, 77, S. 21–30. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923615000858>, zuletzt geprüft am 11.09.2018.
- Morales-Torres, A. et al. (2016): The suitability of risk reduction indicators to inform dam safety management. In: *Structure and Infrastructure Engineering*, 91, S. 1–12.
- Mukherjee, K. (2017): *Supplier Selection. An MCDA-Based Approach*, Springer (India), Jaipur (Studies in Systems, Decision and Control, 88).
- Musall, M. et al. (2018): Weiterführung der hydraulischen Analysen zur Flutwellenausbreitung nach dem Versagen von Stauanlagen an Fließgewässern. KIT, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Nitzsch, R. v. (1992): *Entscheidung bei Zielkonflikten: Ein PC-gestütztes Verfahren*. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- Ochs, C. P. (2012): *Multikriterielle Optimierung der Sanierungsplanung von Entwässerungsnetzen*. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. Fachbereich Architektur/Raum- und Umweltplanung/Bauingenieurwesen.
- Opricovic, S., Tzeng, G.-H. (2004): Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. In: *European Journal of Operational Research*, 156, 2, S. 445–455. Online verfügbar unter [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1), zuletzt geprüft am 31.07.2019.
- Osztermayer Jozsef (2007): *Zustandsabhängiges, risikobasiertes Asset-Management in der Energieversorgung*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik.
- Ouyang, M. (2014): *Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems*. *Reliability engineering & System safety*, 121, S. 43-60.
- Pardo-Bosch, F., Aguado, A. (2014): Investment priorities for the management of hydraulic structures. In: *Structure and Infrastructure Engineering*, 11, 10, S. 1338–1351.
- Patidar, V. et al. (2007): *Multi-Objective Optimization for Bridge Management Systems*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Pereira, Â. G., Quintana, S. C. (2002): From technocratic to participatory decision support systems: Responding to the New Governance Initiatives. In: *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 6/2, S. 95–107.
- PLANCO, C. G. (2007): *Verkehrswirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße*. Schlussbericht. Unter Mitarbeit von Bundesanstalt für Gewässerkunde. Hg. v. WSV. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost, Magdeburg.
- Polatidis, H. et al. (2006): Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning. In: *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1, 2, S. 181–193.

- Press, H. (1959): Stauanlagen und Wasserkraftwerke. Teil II: Wehranlagen, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- Rashidi, M. et al. (2015): A new model for bridge management. Part A: condition assessment and priority ranking of bridges. In: Australian Journal of Civil Engineering, 14, 1, S. 35–45.
- Rommelfanger, H. J., Eickemeier, S. H. (2013): Entscheidungstheorie: Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Ruhland, A. (2004): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Verfahren der Trinkwasseraufbereitung an den Beispielen Arsenentfernung und zentrale Erhärtung. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Schneider, D. (2013): Modell für das nachhaltige Immobilien-Portfoliomanagement betrieblicher Büro-Bestandsbauten. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Scholten, A., Rothstein, B. (2012): Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins, Im Selbstverlag des Instituts für Geographie und Geologie der Julius-Maximilians-Universität, Würzburg (Würzburger geographische Arbeiten, Heft 107).
- Schuppener, B. (2012): Aufschwimmen und hydraulischer Grundbruch. BAW Kolloquium: „Neue Normung in der Geotechnik“. Hg. v. BAW, Karlsruhe.
- Seyedshohadaie, S. R.; Damnjanovic; I.; Butenko (2010): Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(4), S.236-248.
- Shafiee, M. (2016): Modelling and analysis of availability for critical interdependent infrastructures. International Journal of Risk Assessment and Management, 19(4), S. 299-314.
- Shah, Y. U. et al. (2013): Development of Overall Pavement Condition Index for Urban Road Network. In: Procedia - Social and Behavioral Sciences, 104, S. 332–341.
- Shen, Q. et al. (1998): Priority setting in maintenance management. A modified multi-attribute approach using analytic hierarchy process. In: Construction Management and Economics, 16, 6, S. 693–702.
- Simon, H. A. (1960): The new science of management decision, Harper, New York (Ford distinguished lectures / New York University, 3).
- Smith, D. I. (1999): Floods. Physical processes and human impacts by K. Smith and R. Ward, John Wiley, Chichester 1998. No. of pages: 382. In: Earth Surface Processes and Landforms, 24, 13, S. 1261.
- Spektrum (2000): Hg. v. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. Online verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/psychologie/seu-theorie/14137>, zuletzt geprüft am 08.09.2017.
- Sprague, R. H., Carlson, E. D. (1982): Building effective decision support systems. 10. Aufl., Englewood Cliffs, NJ [u.a.]: Prentice-Hall.

- Strobl, T., Zunic, F. (2006): Wasserbau. Aktuelle Grundlagen - Neue Entwicklungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Thielen, A. H. (Hrsg.) (2010): Hochwasserschäden. Erfassung, Abschätzung und Vermeidung, Oekom, München.
- Thorenz, C. (2017): Abschätzung von Schwallwellen mit Hilfe der Überfallformel von Poleni, 04.10.2017. E-Mail an Heike Schmidt-Bäumler.
- Vidovic, A. et al. (2018): Decision-making framework and optimized remediation for railway concrete bridges deteriorated by carbonation and chloride attack The Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering.
- Waldstein, Thor von; Holland, Hubert (2007): Binnenschiffahrtsrecht. Kommentar. 5., völlig neu bearb. Aufl., Berlin de Gruyter Recht (De-Gruyter-Kommentar).
- WaStrG: Bundeswasserstraßengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Mai 2007 (BGBl. I S. 962; 2008 I S. 1980), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 8 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist. WaStrG. Fundstelle: Bundesrepublik Deutschland.
- Werner, W. (1992): Entscheidungsunterstützungssysteme. Ein problem- und benutzerorientiertes Management-Instrument, Physica Verlag, Heidelberg.
- WertV (1997): Wertermittlungsverordnung: Verordnung über Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, WertV, vom 1997. In: Bundesgesetzblatt.
- Westphal, D. (2016): Adaptive Verkürzung des Analytischen Hierarchie Prozesses zur rationalen Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Fakultät Wirtschaft und Management.
- Winzer, P. et al. (2009): Sicherheitsforschung- Chancen und Perspektiven. acatech diskutiert, Fraunhofer IRB Verlag.
- Yusof, N.'A. et al. (2012): Residents' Maintenance Priorities Preference. The Case of Public Housing in Malaysia. In: Procedia - Social and Behavioral Sciences, 62, S. 508–513.
- Zierer, M. (2015): Wechselwirkungen zwischen Verkehrsinfrastruktur und Wirtschaftswachstum. Eine theoretische Untersuchung und empirische Analyse für Deutschland. Dissertation. Universität Regensburg, Regensburg.
- Zopounidis, C., Doumpos, M. (2002): Multi-criteria decision aid in financial decision making. Methodologies and literature review. In: J. Multi-Crit. Decis. Anal., 11, 4-5, S. 167–186.

## 7 Anhang

### I Bundeswasserstraßen ohne in der GVS erfassten Güterverkehr

Tabelle 64 listet die Bundeswasserstraßen auf, für die in der Güterverkehrsstatistik kein Güterverkehr erfasst wird, weil hier kein oder kein nennenswerter Güterverkehr stattfindet. Für die Bundeswasserstraßen Trave, sowie die Nord- und Ostsee sind hingegen keine Daten erfasst, weil es sich nicht um Binnenwasserstraßen im Sinne der Güterverkehrsstatistik handelt.

Tabelle 64: Bundeswasserstraßen ohne erfassten Güterverkehr (Destatis, 2017)

Nr.	Name der Bundeswasserstraße	Wasserstraßenkategorie
02	Altmühl	Sonstige
10	Elisabethfehnkanal	Sonstige
13	Ems-Seitenkanal	Sonstige
15	Freiburger Hafenpriel	Sonstige
16	Fulda	Sonstige
18	Hase	Sonstige
25	Leda und Sagter Ems	Sonstige
26	Leine, Ihme und Schneller Graben	Sonstige
27	Lesum	Sonstige
37	Regen	Sonstige
38	Regnitz	Sonstige
45	Sorge	Sonstige
48	Trave [Kanaltrave]	A; Sonstige
50	Werra	Sonstige
53	Wümme	Sonstige
69	Saale-Leipzig-Kanal	Sonstige
70	Nordsee	Seewasserstraße
80	Ostsee	Seewasserstraße
82	Peene	Sonstige

## II Toolbox Flächenanalyse (Python)

```
1  # -*- coding: cp1252 -*-
2  import arcpy
3  import csv
4  import os
5  arcpy.CheckOutExtension("Spatial") # Spatial analyst aktivieren für
6  räumliche Analysen
7
8  ##
9  ## Datum: 27.11.2017
10 ##
11 ## Ziel: Risikoflächenberechnung entlang Wasserstraßen bei
12
13 ## BENÖTIGTE INPUT DATEN:
14
15 ## Fluss und Stauobjekte (Teilstrecken)
16 fluss_shape = arcpy.GetParameterAsText(0)
17
18 ## Feld mit Wehrnummer
19 idColumnName = arcpy.GetParameterAsText(1)
20
21 ## Informationen zur Risikoberechnung
22 Landcover = ".\\BKG_CLC\\clc10_10km_um_fluesse.shp" # relative Pfade zu
23 den Risikolayern
24 DGM = ".\\BKG_DGM\\dgm_10km_um_fluesse.tif"
25 Einwohner = ".\\StatistischesBundesamt_Zensusdaten_und_Gitter\\Einwoh-
26 nerzahl_1x1km_10km_um_fluesse.shp"
27
28 ## Puffer um den zu betrachtenden Streckenabschnitt (maximale Ausdeh-
29 nung)
30 puffer = arcpy.GetParameter(2)
31
32 ## Speicherort:
33 speicherort = arcpy.GetParameterAsText(3) + "\\\"
34 if not os.path.exists(speicherort + "resultdata\\"):
35     os.makedirs(speicherort + "resultdata\\")
36
37 ## neue CSV im Speicherort erstellen
38 f = open(speicherort + "results.csv", 'w')
39 f.write(";Einwohnerzahl;Betroffene Flaeche;Staedtische Praegung;Indust-
40 rie und Gewerbeflaechen;Verkehrsflaeche;Gruenflaeche;Wald/natuerliches
41 Gruenland;Landwirtschaft;Gewaesserflaeche;Sonstiges\n") # Überschriften
42 eintragen
43
44
45 # Zum LIVE anzeigen der Ergebnisse:
46
47 # get the map document
48 mxd = arcpy.mapping.MapDocument("CURRENT")
49 # get the data frame
50 df = arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd, "**")[0]
51
52 # save the actual displayed FC's so they are not deleted later
53 goodFCs = []
54 allFcs = arcpy.ListFeatureClasses()
55 for fc in allFcs:
56     goodFCs.append(fc)
57
58 # save the actual displayed Layers so they are not deleted later
```

```

59 allLayers = arcpy.mapping.ListLayers(mxd)
60 for l in allLayers:
61     goodFCs.append(l.name)
62
63
64
65 ## WORKFLOW:
66 ##         1. Puffer um die Streckenabschnitte generieren
67 ##         Die Streckenabschnitte müssen in einem Shapefile
68 als einzelne Features vorliegen
69 ##         Ein einzelnes Feature beschreibt dabei die Strecke
70 zwischen 2 Wehren, also die Strecke,
71 ##         die von einer Flutwelle bei Ausfall des oberen Weh-
72 res betroffen wäre.
73 ##
74 ##         2. Durch Streckenabschnitte iterieren
75 ##
76 ##         3. Landcover & Einwohnerinformationen mithilfe des
77 Puffers zuschneiden
78 ##
79 ##         4. Flächenberechnung
80 ##         4.1 Betroffene Einwohner:
81 ##         Für jedes Pixel wird der übrig gebliebene Prozent-
82 satz des Quadratkilometers berechnet (Fläche/1.000.000)
83 ##         und mit Einwohnerzahl multipliziert. Anschließend
84 wird durch die Features iteriert und die Gesamteinwohnerzahl summiert.
85 ##         4.2 Betroffene Fläche:
86 ##         Die Landnutzungsklassen werden zu einem Multipart-
87 Feature verschmolzen (Dissolve), so das z.B. Felder auf beiden Seiten
88 des
89 ##         Flusses eine zusammengehörige Fläche besitzen. An-
90 schließend wird durch die Features iteriert und die betroffene Gesamt-
91 fläche summiert.
92 ##         Außerdem werden die betroffenen Flächen der einzel-
93 nen Klassen gespeichert (in Quadratmetern)
94 ##         Die Klassen wurden vorher in das von Heike defi-
95 nierte Schema klassifiziert (siehe unten) und befinden sich in der
96 Spalte clc_heike
97 ##
98 ##         5. Die Ergebnisdaten in eine CSV-Datei speichern
99 ##         Während der Bearbeitung füllt sich für jeden Stre-
100 ckenabschnitt der String "resultstring", der am Ende der Berechnungen
101 in die
102 ##         CSV geschrieben wird
103
104
105 ## 1. PUFFER UM DIE STRECKENABSCHNITTE GERNERIEREN
106 arcpy.env.overwriteOutput = True #
107 überschreiben ermöglichen
108 check_shapefile_fluss = arcpy.Describe(fluss_shape) #
109 test ob shapefile existiert
110 arcpy.AddMessage("Fluss: {}".format(check_shapefile_fluss.name)) # +
111 ausgabe des namens in der konsole
112 puffergroesse = str(puffer) + " Meters" #
113 puffergröße für werkzeug aufbereiten
114
115 #
116 puffer erzeugen: es können nur abgerundete ecken erzeugt werden, für
117 kanten ist eine erweiterung erforderlich
118

```

```

119 Puffer_shape = arcpy.Buffer_analysis(in_features=fluss_shape, out_fea-
120 ture_class=speicherort + "puffer.shp", buffer_distance_or_field=puffer-
121 groesse, line_side="FULL", line_end_type="ROUND", dissolve_op-
122 tion="NONE", dissolve_field="", method="PLANAR")
123 arcpy.AddMessage("Puffer erstellt!")
124
125 arcpy.MakeFeatureLayer_management(Puffer_shape, "puffer") #
126 temporären layer erzeugen für selektion
127 pufferLayer = arcpy.mapping.Layer("puffer") #
128 einen mapping layer erzeugen
129 arcpy.mapping.AddLayer(df, pufferLayer , "TOP") #
130 der karte hinzufuegen (TOP in table of contents)
131
132
133 ## 2. DURCH STRECKENABSCHNITTE ITERIEREN UND DAZUGEHÖRIGEN PUFFER DES
134 STRECKENABSCHNITTS SELEKTIEREN
135 Scursor = arcpy.SearchCursor(fluss_shape) #
136 SearchCursor über die teilstrecken erstellen
137 for row in Scursor: #
138 für jede teilstrecke:
139     arcpy.AddMessage("ID: " + str(row.getValue(idColumnName))) #
140 gib die id der teilstrecke aus
141
142     wehrID = row.getValue(idColumnName) #
143 speicher die id
144     if isinstance(wehrID, (int, long, float, complex)) == True: #
145 wenn der datentyp der spalte numerisch ist:
146         abfrage = idColumnName + " = {}" .format(wehrID) #
147 sql-syntax ohne anführungszeichen
148     else: #
149 wenn nicht (text):
150         abfrage = idColumnName + " = '{}'" .format(wehrID) #
151 sql-syntax mit anführungszeichen
152
153     arcpy.AddMessage(abfrage)
154
155     arcpy.SelectLayerByAttribute_management("puffer", "NEW_SELECTION",
156 abfrage) # mit der oben erstellen abfrage den teilbereich selektieren
157     arcpy.AddMessage("Teilbereich selektiert!")
158
159     # es ist nun nur der puffer um das risokogebiet der aktuellen wehr-
160 id selektiert -> damit kann verschnitten werden!
161
162
163
164 ## 3. LANDCOVER & EINWOHNERINFORMATIONEN MITHILFE DES DGM ZUSCHNEIDEN
165
166     # zum Abspeichern der Shapefiles ggf Sonderzeichen im Namen erset-
167 zen:
168     # replacements = {u"Ä": "Ae", u"ä": "ae", u"Ö": "Oe", u"ö": "oe",
169 u"Ü": "Ue", u"ü": "ue", u"ß": "ss"}
170     # wehrname = row.getValue(wehre_name)
171     # wehrname = "".join([replacements.get(c, c) for c in wehrname])
172     LC_string = "Landcover" + str(wehrID).strip() + ".shp"
173 # speichernamen definieren (abhängig von der id)
174     E_string = "Einwohner" + str(wehrID).strip() + ".shp"
175 #
176
177     arcpy.AddMessage("\nverschneide Risikoflaeche mit Landnutzung und
178 Einwohnerzahl...\n")

```

```

179
180     Landcover_Mask = arcpy.Clip_analysis (Landcover, "puffer", spei-
181 cherort + "resultdata\\" + LC_string) # Die 10km flächennutzung- und
182 einwohnerzahldaten
183     Einwohner_Mask = arcpy.Clip_analysis (Einwohner, "puffer", spei-
184 cherort + "resultdata\\" + E_string) # um alle flüsse D. auf die se-
185 lektierte teilstrecke
186
187 # zuschneiden
188
189     # Der zugeschnittene landnutzungsteil soll in der karte angezeigt
190 werden:
191
192     lcLyrName = "lc " + str(wehrID)
193 # layernamen definieren
194     arcpy.MakeFeatureLayer_management (Landcover_Mask, lcLyrName)
195 # temporären layer erzeugen
196     LandcoverLayer = arcpy.mapping.Layer (lcLyrName)
197 # und mapping layer erzeugen
198     arcpy.mapping.AddLayer (df, LandcoverLayer , "TOP")
199 # .. auf Karte anzeigen
200
201     Lyr_string = ".\\styling\\landuse_symbology.lyr"
202 # lyr file relativ zur toolbox
203     desc = arcpy.Describe (Lyr_string)
204 # kann als Describe object beschrieben werden
205     Lyr_path = desc.catalogPath
206 # daraus kann der absolute pfad extrahiert werden
207     symbologyLyr = arcpy.mapping.Layer (Lyr_path)
208 # wird benötigt um map layer zu erzeugen
209
210     # per for-schleife allen hinzugefügten landcover layern die rich-
211 tige symbolisierung zuweisen:
212     for lyr in arcpy.mapping.ListLayers (mxd, "", df):
213         if lyr.name not in goodFCs:
214             arcpy.ApplySymbologyFromLayer_management (in_layer=lyr,
215 in_symbology_layer=symbologyLyr) # symbolisierung anpassen
216
217
218     arcpy.AddMessage ("Landnutzung und Einwohnerzahl für den Risikobe-
219 reich extrahiert!\n")
220
221
222 ## 4. FLÄCHENBERECHNUNG
223 ## 4.1 BETROFFENE EINWOHNER:
224
225 ## 4.1.1 Für jedes Pixel den übrig gebliebenen Prozentsatz berechnen
226 (Fläche/1.000.000) und mit Einwohnerzahl multiplizieren (Spalte "Ein-
227 wohner")
228     arcpy.AddField_management (Einwohner_Mask, "Einw_risk", "Double")
229     expression = "{0}".for-
230 mat ("!SHAPE.area@SQUAREMETERS!/1000000*!Einwohner!")
231     arcpy.CalculateField_management (Einwohner_Mask, "Einw_risk", ex-
232 pression, "PYTHON", )
233
234 ## 4.1.2 Die betroffenen Einwohner summieren:
235     betroffene_Einwohner = 0
236     Sum = arcpy.SearchCursor (Einwohner_Mask)
237     for row in Sum:
238         betroffene_Einwohner += row.getValue ("Einw_risk")

```

```

239     betroffene_Einwohner = int(round(betroffene_Einwohner))      #
240 Einwohnerzahl auf Ganzzahl runden
241     arcpy.AddMessage("Betroffene Einwohner: {0}".format(betroffene_Ein-
242 wohner))
243     resultstring = str(wehrID) + ";" + str(betroffene_Einwohner) + ";"
244 # -> dieser wird nach und nach mit Informationen gefüllt
245
246 ## 4.2 Betroffene Flächen:
247     # 1: Städtische Prägung  2: Industrie und Gewerbeflächen  3: Ver-
248 kehrsfläche  4: Grünfläche
249     # 5: Wald / natürliches Grünland  6: Landwirtschaft  7: Gewässer-
250 fläche 10: Sonstiges
251
252 ## 4.2.1 Die Landnutzungsklassen zu einem Multipart-Feature verschmel-
253 zen (deutlich einfachere Flächenberechnung)
254     Landcover_Risikoflaeche = arcpy.Dissolve_management(in_fea-
255 tures=Landcover_Mask, out_feature_class=speicherort + "resultdata\\2" +
256 LC_string, dissolve_field="clc_heike", statistics_fields="",
257 multi_part="MULTI_PART", unsplit_lines="DISSOLVE_LINES")
258
259 ## 4.2.2 Die Flächen pro Klasse sowie Gesamtfläche berechnen:
260     arcpy.AddField_management(Landcover_Risikoflaeche, "area", "Double")
261     expression2 = "{0}".format("!SHAPE.area@SQUAREMETERS!")
262     arcpy.CalculateField_management(Landcover_Risikoflaeche, "area",
263 expression2, "PYTHON", )

    klassenliste = ["Staedtische Praegung", "Industrie und Gewerbeflae-
264 chen", "Verkehrsflaeche", "Gruenflaeche", "Wald/natuerliches Gruen-
265 land", "Landwirtschaft", "Gewaesserflaeche", "Sonstiges"]
    betroffene_Flaechen = []

    arcpy.MakeFeatureLayer_management(Landcover_Risikoflaeche, "risiko-
266 flaechen") # Temporären Layer erzeugen für Selektion
    klassenliste_id = [1,2,3,4,5,6,7,10]
    counter = 0
    area = 0
    for nr in klassenliste_id:
        counter += 1
        arcpy.SelectLayerByAttribute_management("risikoflaechen",
267 "NEW_SELECTION", "clc_heike = {}".format(nr))
        desc = arcpy.Describe("risikoflaechen")

        if len(desc.FIDSet) > 0: # wenn eine Selektion durchgeführt
268 wurde:
            SC_flaechen = arcpy.SearchCursor("risikoflaechen")
            for row in SC_flaechen: # durch Selektion nur noch ein Fea-
269 ture enthalten
                area = row.getValue("area")
                betroffene_Flaechen.append(area)

            else: # wenn keine Selektion durchgeführt
270 wurde:
                betroffene_Flaechen.append(0)

    Gesamtflaeche = sum(betroffene_Flaechen)
    arcpy.AddMessage("Betroffene Gesamtfläche: {0} m^2".format(Gesamt-
271 flaeche))
    resultstring = resultstring + str(Gesamtflaeche) + ";"
    for i in range(0, len(klassenliste)):

```

```

        arcpy.AddMessage(klassenliste[i] + ": " + str(betroffene_Flae-
chen[i]) + " m^2")
        resultstring = resultstring + str(betroffene_Flaechen[i]) + ";"

## 5. DIE ERGEBNISDDATEN IN EINE CSV-DATEI SPEICHERN
    resultstring = resultstring.replace(".", ",")
# fuer excel import . durch komma ersetzen
    resultstring = resultstring[:-1] + "\n"
# letztes zu vieles ";" entfernen und zeilenumbruch hinzufügen
    f.write(resultstring)
# in die CSV schreiben

arcpy.AddMessage("\n")

# Temporäre Files löschen
arcpy.Delete_management(Landcover_Risikoflaeche)

# -----
# SKRIPT BEENDEN!

# Aktuell bearbeitete Geometrie im MXD löschen:
# https://gis.stackexchange.com/questions/190169/remove-tables-not-just-layers-from-the-map-document/190175
arcpy.SelectLayerByAttribute_management("puffer", "CLEAR_SELECTION")

# alle neu hinzugekommenen layer löschen
for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd, "*puffer*", df):
    if lyr.name not in goodFCs:
        arcpy.mapping.RemoveLayer(df, lyr)
        print "remove wildcard *puffer* to delete all new layers"

# alle neu hinzugekommenen result feature classes (shapefiles) löschen
allFCs = arcpy.ListFeatureClasses(speicherort)
for fc in allFCs:
    if fc not in goodFCs:
        #arcpy.Delete_management(fc)
        print "remove comment to delete all newly created feature clas-
ses"
    else:
        pass

# löschen des Puffers
arcpy.Delete_management(Puffer_shape)

# Cursor und weitere Variablen löschen
del SC_flaechen
del Sum
del Scursor
del mxd
del df

# CSV-Datei schließen
f.close()

arcpy.AddMessage("Berechnung erfolgreich beendet!")

```

### III Corine Land Cover Classes

#### 1. Artificial surfaces

##### 1.1 Urban fabric

-  1.1.1. Continuous urban fabric
-  1.1.2. Discontinuous urban fabric

##### 1.2 Industrial, commercial and transport units

-  1.2.1. Industrial or commercial units
-  1.2.2. Road and rail networks and associated land
-  1.2.3. Port areas
-  1.2.4. Airports

##### 1.3 Mine, dump and construction sites

-  1.3.1. Mineral extraction sites
-  1.3.2. Dump sites
-  1.3.3. Construction sites

##### 1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas

-  1.4.1. Green urban areas
-  1.4.2. Sport and leisure facilities

#### 2. Agricultural areas

##### 2.1 Arable land

-  2.1.1. Non-irrigated arable land
-  2.1.2. Permanently irrigated land
-  2.1.3. Rice fields

##### 2.2 Permanent crops

-  2.2.1. Vineyards
-  2.2.2. Fruit trees and berry plantations
-  2.2.3. Olive groves

##### 2.3 Pastures

-  2.3.1. Pastures

##### 2.4 Heterogeneous agricultural areas

-  2.4.1. Annual crops associated with permanent crops
-  2.4.2. Complex cultivation patterns
-  2.4.3. Land principally occupied by agriculture
-  2.4.4. Agro-forestry areas

#### 3. Forest and seminatural areas

##### 3.1 Forests

-  3.1.1. Broad-leaved forest
-  3.1.2. Coniferous forest
-  3.1.3. Mixed forest

##### 3.2 Shrub and/or herbaceous vegetation associations

-  3.2.1. Natural grassland
-  3.2.2. Moors and heathland
-  3.2.3. Sclerophyllous vegetation
-  3.2.4. Transitional woodland shrub

##### 3.3 Open spaces with little or no vegetation

-  3.3.1. Beaches, dunes, and sand plains
-  3.3.2. Bare rock
-  3.3.3. Sparsely vegetated areas
-  3.3.4. Burnt areas
-  3.3.5. Glaciers and perpetual snow

#### 4. Wetlands

##### 4.1 Inland wetlands

-  4.1.1. Inland marshes
-  4.1.2. Peat bogs

##### 4.2 Coastal wetlands

-  4.2.1. Salt marshes
-  4.2.2. Salines
-  4.2.3. Intertidal flats

#### 5. Water bodies

##### 5.1 Inland waters

-  5.1.1. Water courses
-  5.1.2. Water bodies

##### 5.2 Marine waters

-  5.2.1. Coastal lagoons
-  5.2.2. Estuaries
-  5.2.3. Sea and ocean

Abbildung 45: Corine land cover classes (EEA, 1995)

## IV Auswertung der Parameterkombinationen

Tabelle 65: Übersicht möglicher Parameterkombinationen (Musall et al., 2018)

Nr.	Kanalbreite [m]	Sohlabschur [m]	UW-Tiefe [m]	Fallhöhe [m]	Anzahl	Nr.	Kanalbreite [m]	Sohlabschur [m]	UW-Tiefe [m]	Fallhöhe [m]	Anzahl	Nr.	Kanalbreite [m]	Sohlabschur [m]	UW-Tiefe [m]	Fallhöhe [m]	Anzahl	
1	25	0	1,5	1,5	3	28	50	0	1,5	1,5	-	28	125	0	1,5	1,5	-	109
2			1,5	5	8	29			1,5	5	-	110						
3			8	30	8	-			111									
4		1	0	1,5	1,5	5		31	1	0	1,5	1,5		1	112			
5				3,5	5	1		32			3,5	5		-	113			
6				8	33	8		-			114							
7		1	0	1,5	1,5	-		34	1	0	1,5	1,5		-	115			
8				5	5	-		35			5,5	5		-	116			
9				8	36	8		-			117							
10	25	0	1,5	1,5	2	37	50	0	1,5	1,5	1	118						
11			5	8	38	1,5			5	3	119							
12			8	39	8	2			120									
13		1	0	1,5	1,5	4		40	1	0	1,5	1,5	-	121				
14				5	10	41		3,5			5	10	122					
15				8	42	4		8			4	-	123					
16		1	0	1,5	1,5	-		43	1	0	1,5	1,5	-	124				
17				5	-	44		5,5			5	-	125					
18				8	-	45		8			-	-	126					
19	75	0	1,5	1,5	-	46	4	0	1,5	1,5	-	127						
20			5	-	47	1,5			5	-	128							
21			8	-	48	8			-	-	129							
22		1	0	1,5	1,5	-		49	1	0	1,5	1,5	-	130				
23				3,5	5	1		50			3,5	5	1	131				
24				8	51	8		-			52							
25		1	0	1,5	1,5	-		52	1	0	1,5	1,5	-	132				
26				5	2	53		5,5			5	-	133					
27				8	54	8		-			54							
55	75	0	1,5	1,5	-	55	4	0	1,5	1,5	-	73						
56			5	4	56	1,5			5	-	74							
57			8	57	8	-			57	5	-	75						
58		1	0	1,5	1,5	-		58	1	0	1,5	1,5	-	76				
59				3,5	2	59		3,5			5	17	77					
60				8	7	60		8			8	13	78					
61		1	0	1,5	1,5	-		61	1	0	1,5	1,5	-	79				
62				5	-	62		5,5			5	-	80					
63				8	-	63		8			-	-	81					
64	75	0	1,5	1,5	-	64	4	0	1,5	1,5	-	73						
65			5	1	65	1,5			5	-	74							
66			8	9	66	8			9	-	75							
67		1	0	1,5	1,5	-		67	1	0	1,5	1,5	-	76				
68				3,5	5	68		3,5			5	17	77					
69				8	13	69		8			13	-	78					
70		1	0	1,5	1,5	-		70	1	0	1,5	1,5	-	79				
71				5	2	71		5,5			5	2	80					
72				8	-	72		8			-	-	81					
73	75	0	1,5	1,5	-	73	4	0	1,5	1,5	-	73						
74			5	-	74	1,5			5	-	74							
75			8	-	75	8			-	-	75							
76		1	0	1,5	1,5	-		76	1	0	1,5	1,5	-	76				
77				3,5	5	-		77			3,5	5	-	77				
78				8	-	78		8			-	-	78					
79		1	0	1,5	1,5	-		79	1	0	1,5	1,5	-	79				
80				5	1	80		5,5			5	1	80					
81				8	3	81		8			3	-	81					

## V Verteilungen und Boxplots der Kriterien (Differenzbetrag d)

Nachfolgende Diagramme und Boxplots wurden aus den Daten der 245 Wehranlagen erstellt.

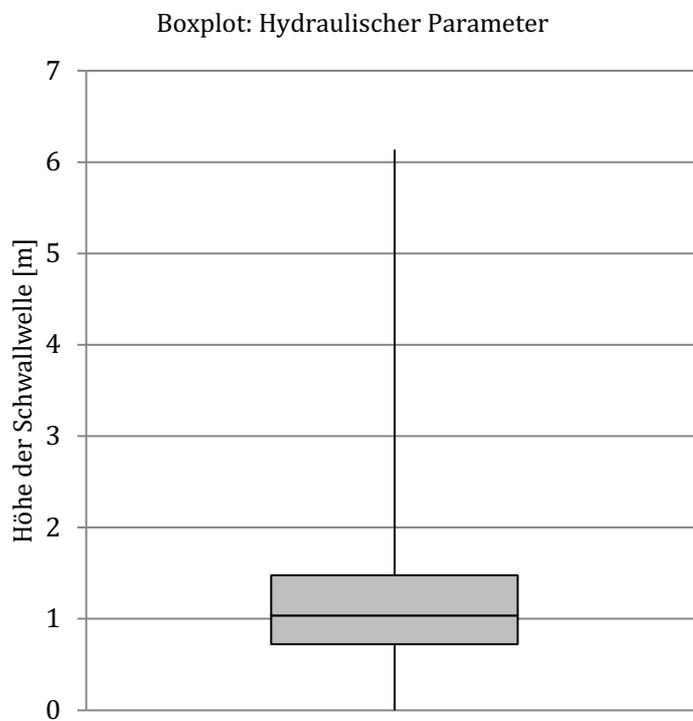
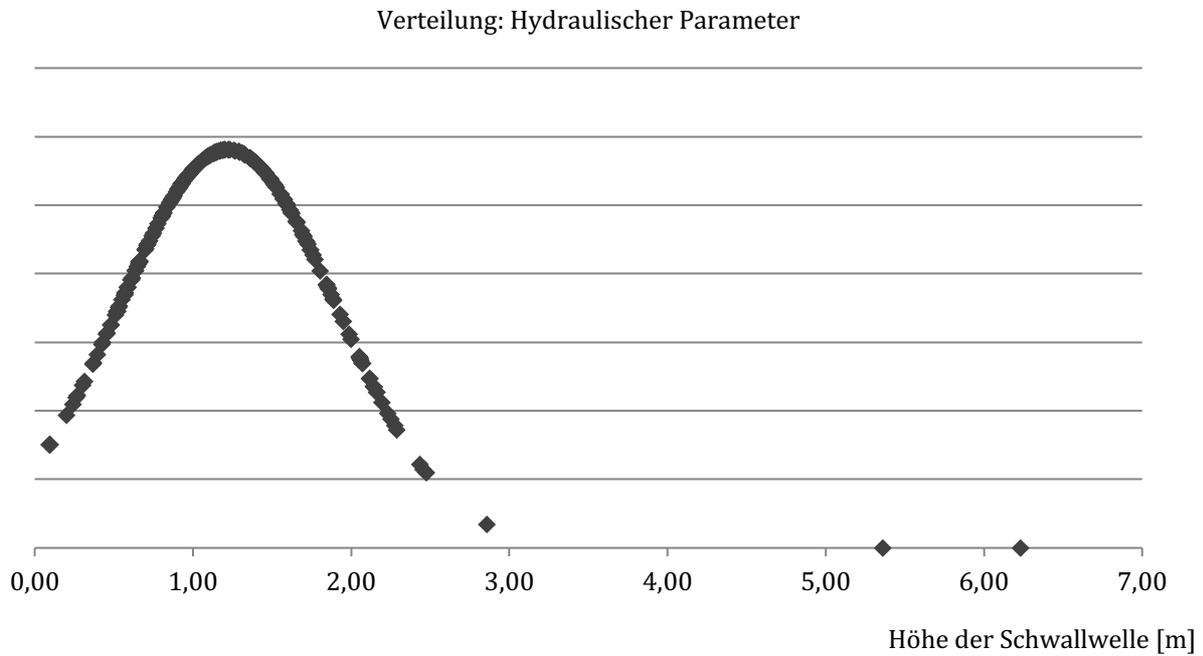


Abbildung 46: Verteilung und Boxplot zu Hydraulischer Parameter (Eigene Darstellung)

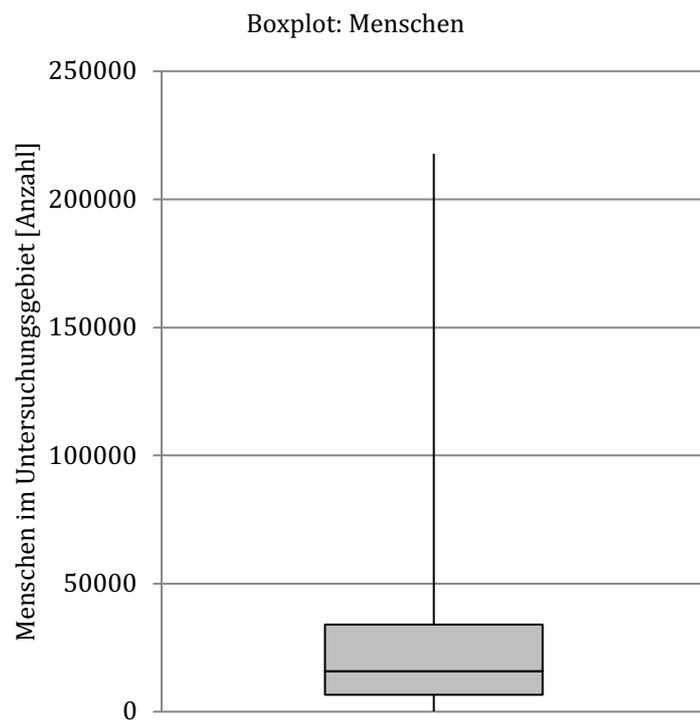
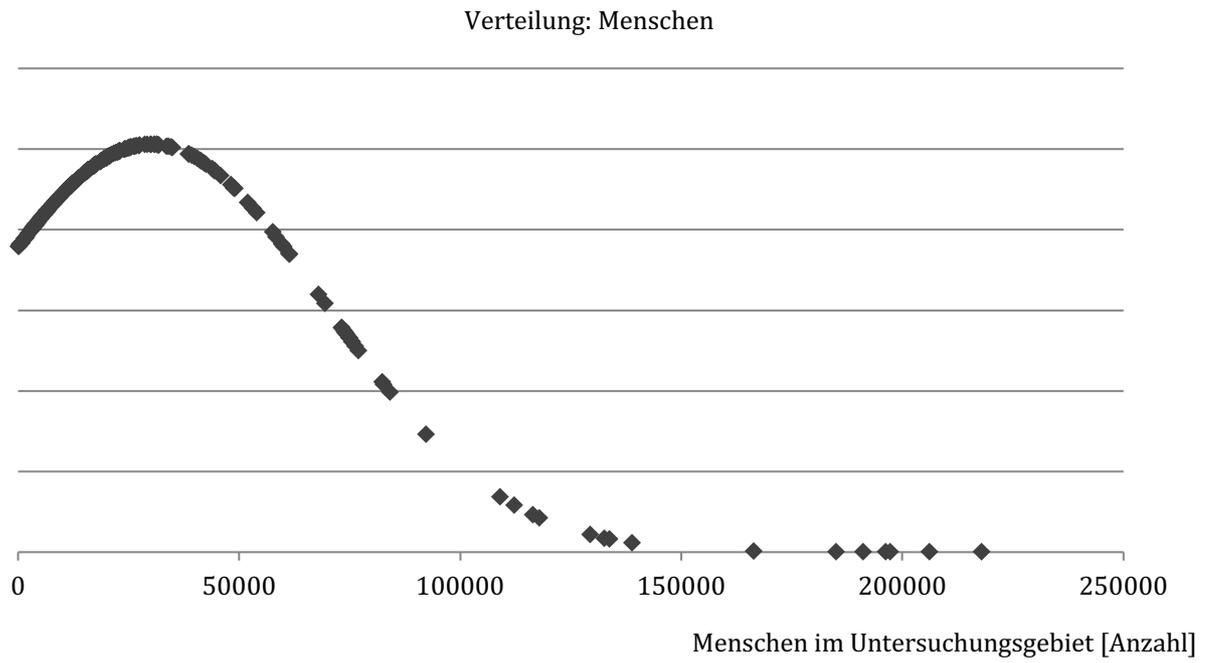
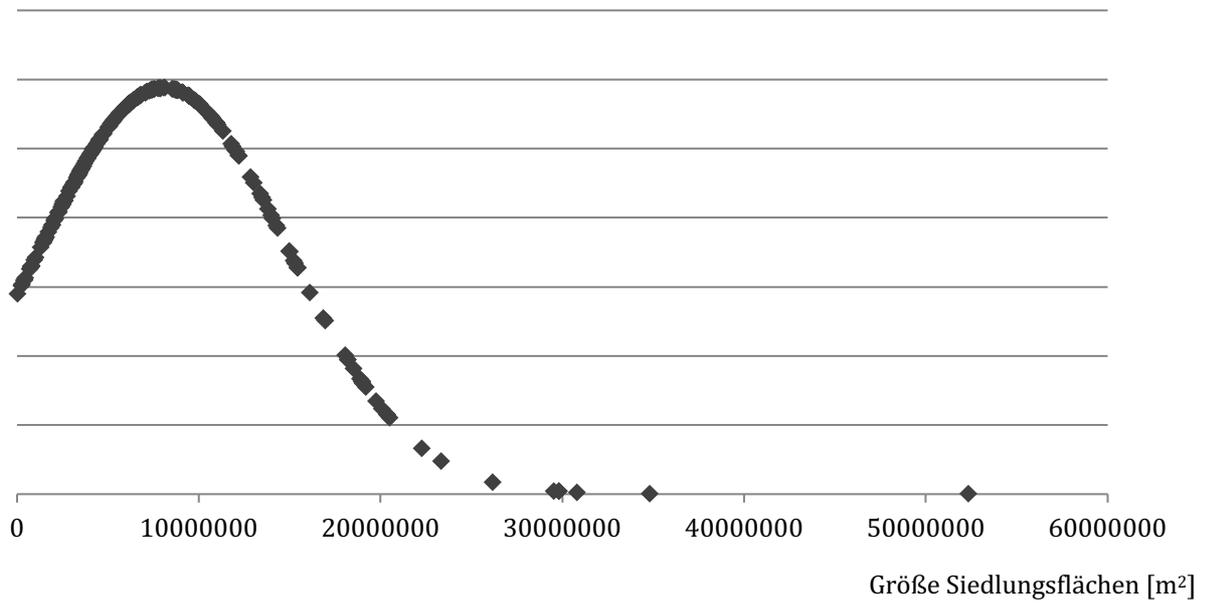


Abbildung 47: Verteilung und Boxplot zu Menschen im Untersuchungsgebiet (Eigene Darstellung)

Verteilung: Siedlungsflächen



Boxplot: Siedlungsflächen

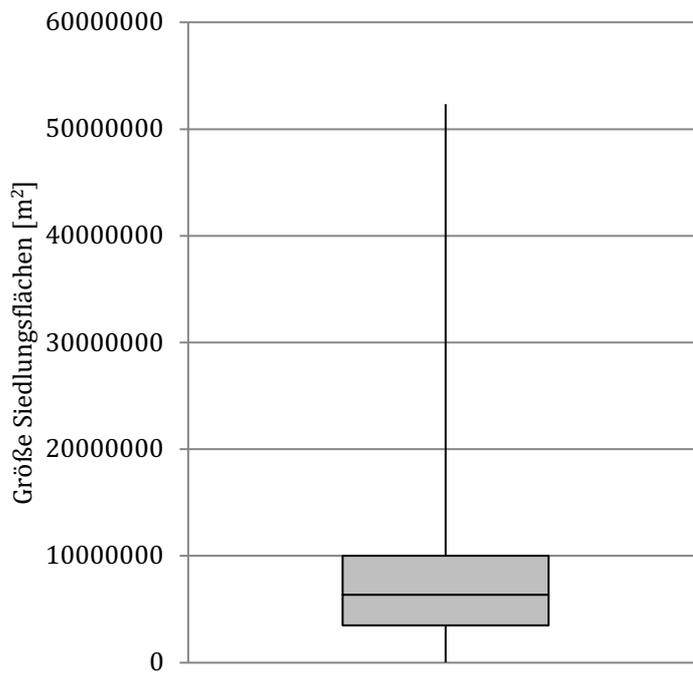
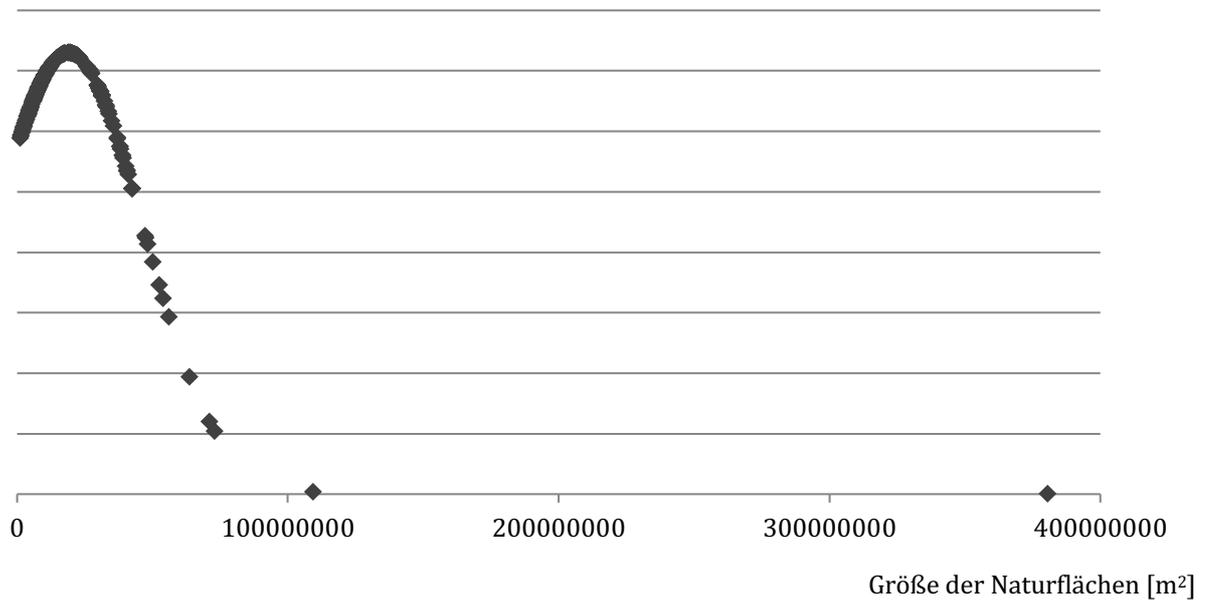


Abbildung 48: Verteilung und Boxplot zu Größe der Siedlungsflächen (Eigene Darstellung)

Verteilung: Naturflächen



Boxplot: Naturflächen

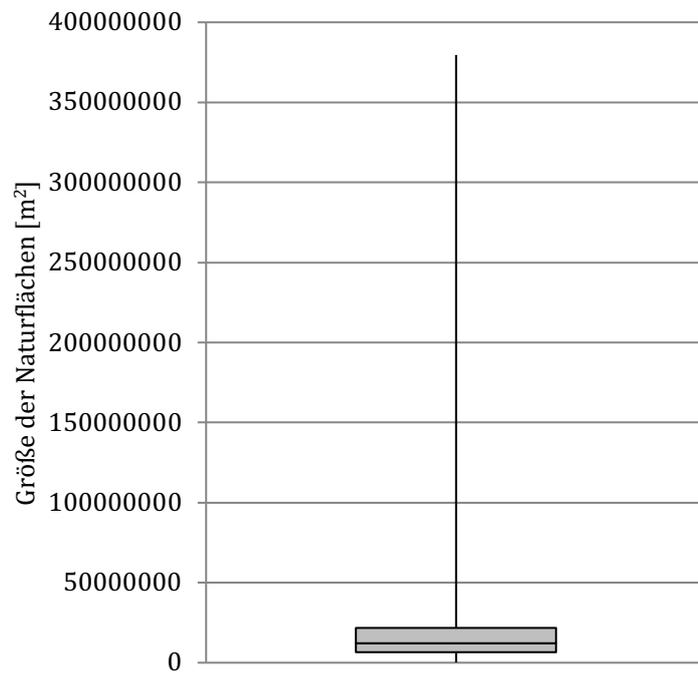


Abbildung 49: Verteilung und Boxplot zu Größe der Naturflächen (Eigene Darstellung)

Verteilung: Industrie- und Gewerbeflächen

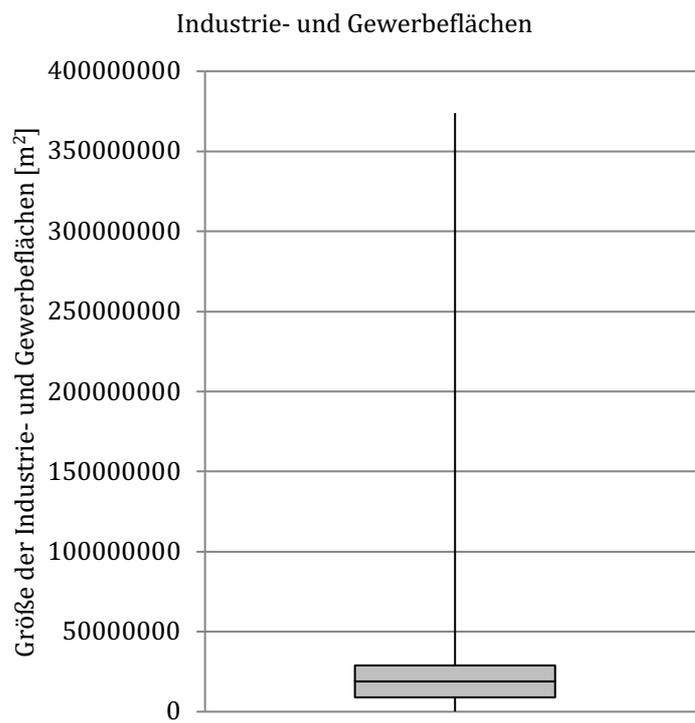
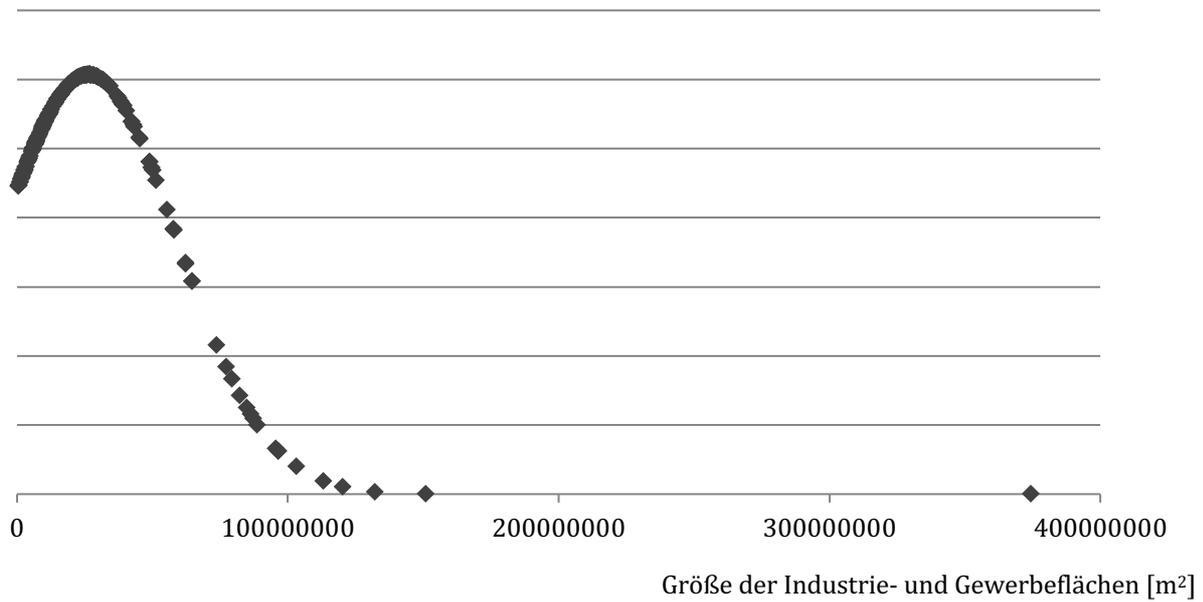
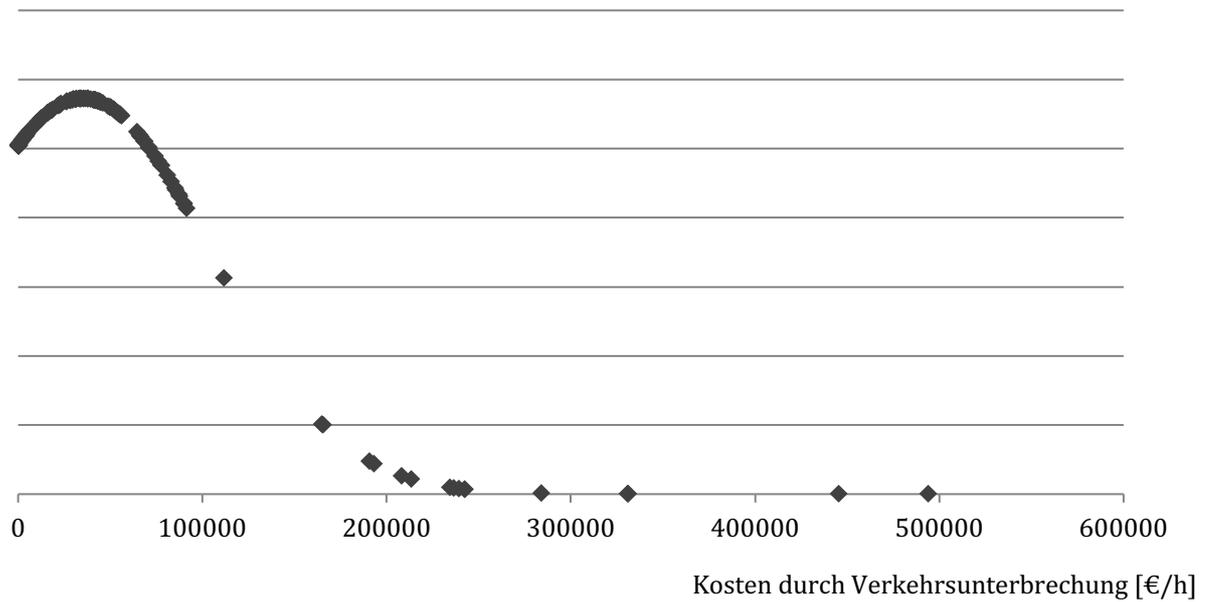


Abbildung 50: Verteilung und Boxplot zu Größe Industrie- und Gewerbeflächen (Eigene Darstellung)

Verteilung: Wirtschaftliche Folgekosten



Boxplot: Wirtschaftliche Folgekosten

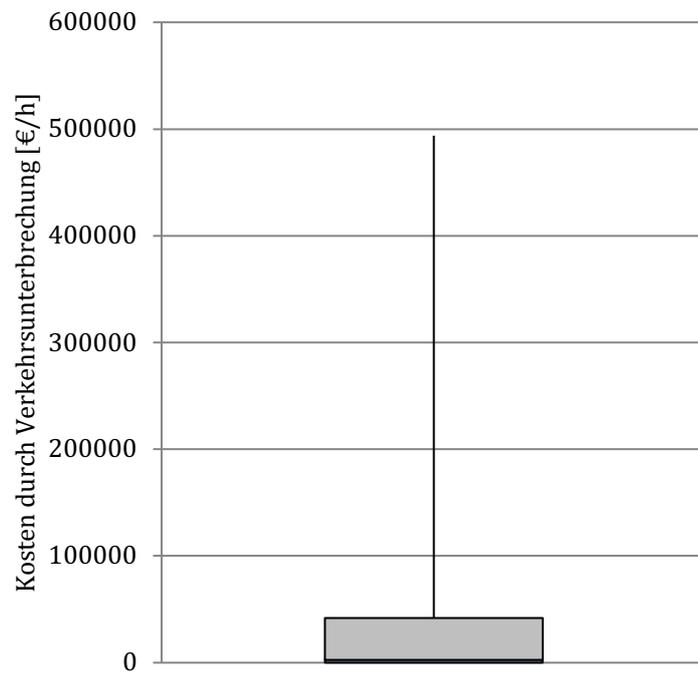


Abbildung 51: Verteilung und Boxplot zu Wirtschaftliche Folgekosten (Eigene Darstellung)

## VI Testergebnisse der Priorisierung nach MPI

Auf Grundlage der Daten aus der Bauwerksinspektion wurde für alle 245 Wehranlagen der Inspektionskategorie die Priorisierung nach MPI vorgenommen. Tabelle 66 zeigt die Zusammenstellung der 57 Wehranlagen, die gemäß MPI der Prioritätsstufe 1 zuzuordnen sind. Ergänzt wurde die Wasserstraßenkategorie (siehe Abbildung 11). Ist für den Massivbau oder den Stahlbau kein Schaden in. WSVPruf erfasst, wurde die Zustandsnote 1 eingetragen (in der Tabelle orange markiert), um die Berechnung durchführen zu können.

Tabelle 66: Testergebnis der Priorisierung der Wehranlagen gemäß MPI (Eigene Darstellung)

Objekt-ID	Zustandsnote	Zustandsnote Massivbau	Zustandsnote Stahlbau	Priorität gemäß MPI	Wasserstraßen- kategorie
2132528001	4	4	4	1	1
2135922001	4	2,1	4	1	1
2136122002	4	3	4	1	1
2136124001	4	1,8	4	1	1
2136128001	4	2	4	1	1
2136130001	4	3	4	1	1
2136324002	4	3,1	4	1	1
2136326001	3,9	3,1	4	1	1
2136326002	4	3,1	4	1	1
2137136002	3,7	3,2	3,2	1	1
2135710001	4	4	4	1	1
2135908001	4	3,2	4	1	1
2136106002	3,9	3,2	2,2	1	1
2136304001	3,9	4	3,2	1	1
2136504001	3,9	3,2	1	1	1
2136518005	4	3,2	4	1	1
2136920001	4	4	4	1	1
2134506001	4	4	4	1	1
2134506003	4	3,2	3,1	1	1
2133120001	4	4	3,2	1	2
2133120002	4	4	4	1	2
2133520001	4	3,2	4	1	2
2133520002	4	4	2,2	1	2
2133718001	4	4	4	1	2
2136920003	4	3,2	4	1	3
2136920004	4	3,2	4	1	3
2136920005	4	2,2	3,2	1	3
2137120001	4	3,2	4	1	3

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 63: Testergebnis der Priorisierung der Wehranlagen gemäß MPI (Eigene Darstellung)

2137120002	4	4	4	1	3
2137120004	4	4	4	1	3
2137120007	4	4	3,1	1	3
2137320003	4	3,2	2,9	1	3
2137322002	4	3,2	4	1	3
2136706001	4	2,1	4	1	3
2136908001	4	3,2	4	1	3
2133146009	3,9	4	1	1	3
2133344003	4	4	4	1	3
2133546004	3,9	3,1	3,9	1	3
2134720002	3,9	2,1	1	1	4
2135710004	4	4	4	1	4
2135712001	4	4	4	1	4
2135712002	4	4	3,2	1	4
2135712003	4	4	3,2	1	4
2135712004	4	4	4	1	4
2135712005	4	4	4	1	4
2135712006	4	4	4	1	4
2135714004	4	4	4	1	4
2136332004	4	4	3,2	1	4
2134522007	3,8	3,9	3	1	4
2133746002	3,8	3,2	3,9	1	4
2133540003	3,9	4	3	1	4
2134136002	3,9	4	1	1	4
2134536001	3,9	3,2	1	1	4
2134536006	4	4	3,2	1	4
2133138002	3,9	3,2	4	1	4
2133338002	3,9	4	4	1	4

## VII R-Code Simulation

```
### SIMULATION DES ZUSTANDES AUSGEWAELHTER BAUWERKE IN ABHAENGIGKEIT EINES  
FESTGELEGTEN JAHRESBUDGETS ###
```

```
### STAND: 29.10.2019 ###
```

```
##### Laden der Zusatzpakete #####
```

```
#install.packages("readxl")  
#install.packages("lubridate")  
#install.packages("tidyr")  
#install.packages("grid")  
#install.packages("gridExtra")  
#install.packages("gplots")  
#install.packages("plyr")  
#install.packages("dplyr")  
#install.packages("devEMF")
```

```
library(readxl)  
library(lubridate)  
library(tidyr)  
library(grid)  
library(gridExtra)  
library(gplots)  
library(plyr)  
library(dplyr)  
library(devEMF)
```

```
##### Einlesen der Datengrundlagen #####
```

```
bauwerksdaten <- read_excel("//nexus/Bautechnik/b4/12_Pro-  
jekte_FuE/B3951040470002_Risikoklassifizierung im EMS-WSV/5 Bearbeitung/3.4 Entschei-  
dungsunterstützung/Simula-  
tion_R_CM/01_PROMETHEE/Simulation_R_PROMETHEE/Datengrundlage/Wehranlagen_R_PRO  
METHEE_v4.xlsx")  
parameter <- read_excel("//nexus/Bautechnik/b4/12_Projekte_FuE/B3951040470002_Ri-  
sikoklassifizierung im EMS-WSV/5 Bearbeitung/3.4 Entscheidungsunterstützung/Simula-  
tion_R_CM/01_PROMETHEE/Simulation_R_PROMETHEE/Datengrundlage/Eingabeparameter_P  
ROMETHEE.xlsx")
```

```
##### Zuweisen der relevanten Parameter #####
```

```

startjahr    <- as.integer(parameter[1,2])
dauer        <- as.integer(parameter[2,2])
budget       <- as.double(parameter[3,2])
differenz    <- as.integer(parameter[4,2])
lebensdauer_stw <- as.integer(parameter[5,2])
lebensdauer_mb  <- as.integer(parameter[6,2])
lebensdauer_mb_rep <- as.integer(parameter[7,2])
lebensdauer_mb_ert <- as.integer(parameter[8,2])
szenario      <- as.character(parameter[17,2])
max_BW        <- as.integer(parameter[18,2])

```

```

kosten_stw_sep <- as.integer(parameter[9,2])/100
kosten_mb_sep  <- as.integer(parameter[10,2])/100
kosten_stw_zus <- as.integer(parameter[11,2])/100
kosten_mb_zus  <- as.integer(parameter[12,2])/100
kosten_stw_rep <- as.integer(parameter[13,2])/100
kosten_mb_rep  <- as.integer(parameter[14,2])/100
kosten_stw_ert <- as.integer(parameter[15,2])/100
kosten_mb_ert  <- as.integer(parameter[16,2])/100

```

##### Zusammenfuegen der wichtigsten Informationen #####

```
data_s <- bauwerksdaten[,c(3,4,5,6,7,14,15,2,8,9,10,11,12,13)] # data_s = data_single
```

### Programmierung einer Funktion zur Zuordnung des Alters in Abh. der ZN ##

```

alter_stw <- function(x){11.669*x^3 - 102.4*x^2 + 308.76*x - 285.59}
alter_mb  <- function(x){21.136*x^3 - 180.68*x^2 + 536.05*x - 502.9}

```

##### Verdopplung des Datensatzes, #####

```
data_d <- data_s[rep(1:nrow(data_s), each=2),]
```

##### Initialisierung neuer Spalten #####

```

data_d$Kategorie <- "Massivbau"
data_d$Jahr      <- 0
data_d$Alter     <- 0

```

##### Aufteilung in Massivbau und Stahlwasserbau, #####

##### Zuordnung der jeweiligen Zustandsnote, #####

```
##### Ermittlung des Investitionsjahres #####
```

```
for(i in 1:nrow(data_d))
{
  ifelse(data_d[i,1]==data_d[(i+1),1],
    {
      data_d[i,15] <- "Stahlwasserbau"
      data_d[i,3] <- data_d[i,5] # Zustandsnote Stw
      data_d[i,17] <- ifelse(data_d[i,3] ==1, 0, ifelse(data_d[i,3]< 2,15, ifelse(data_d[i,3] >=3.97, 60,
alter_stw(data_d[i,3])))) # Ermittlung des 'biologischen' Alters anhand der ZN
      data_d[i,16] <- startjahr + lebensdauer_stw - data_d[i,17] # Investitionsjahr Stw
      data_d[i,16] <- round(data_d[i,16])
    },
    {
      data_d[i,3] <- data_d[i,4] # Zustandsnote Mb
      data_d[i,17] <- ifelse(data_d[i,3] ==1, 0, ifelse(data_d[i,3] < 2,14, ifelse(data_d[i,3] >= 3.93,
100, alter_mb(data_d[i,3])))) # Ermittlung des 'biologischen' Alters anhand der ZN
      data_d[i,16] <- startjahr + lebensdauer_mb - data_d[i,17] # Investitionsjahr Mb
      data_d[i,16] <- round(data_d[i,16])
    }
  )
  if(i==nrow(data_d))
  {
    data_d[i,3] <- data_d[i,4] # Zustandsnote Mb
    data_d[i,17] <- ifelse(data_d[i,3] ==1, 0, ifelse(data_d[i,3] < 2, 14, ifelse(data_d[i,3] >= 3.93,
100, alter_mb(data_d[i,3])))) # Ermittlung des 'biologischen' Alters anhand der ZN
    data_d[i,16] <- startjahr + lebensdauer_mb - data_d[i,17] # Investitionsjahr Mb
    data_d[i,16] <- round(data_d[i,16])
  }
}
```

```
##### Nachbearbeitung der Bauwerksdaten #####
```

```
data_d <- data_d[,c(1,2,15,3,6,7,8,9,10,11,12,13,14,16)] # Umsortierung der Spalten
data_d$Nettofluss <- round(data_d$Nettofluss,2)
data_d$Wiederherstellungskosten <- data_d$Wiederherstellungskosten/1000000
```

```
##### Zusammenfuehren der Spalten Objekt und Kategorie #####
```

```
a <- unite(data_d, "Objekt", c("Objekt", "Kategorie"),sep= " ")
data_d$Objekt <- a$Objekt
```

```
##### Erstellung initialer Auswertungstabellen #####
```

```
ergebnisse <- data.frame(Jahr=numeric(), Objekt_ID=numeric(), Objekt=character(), Kategorie=character(), Kosten=numeric(), Nettofluss=numeric(), Restbudget=numeric(), Wasserstrasse=character(), hydrPar = numeric(), Menschen = numeric(), Siedlung = numeric(), Natur = numeric(), Industrie = numeric(), Folgekosten = numeric(), Investitionsart=character(), stringsAsFactors = FALSE)
```

```
gesamtergebnis <- data.frame(Jahr=numeric(), DbN=numeric(), Bedarf_Mio_Euro=numeric(), Bedarf=numeric(), Investitionen_Mio_Euro=numeric(), Investitionen=numeric(), Restbudget=numeric(), DbN_min=numeric(), DbN_max=numeric(), hydrPar = numeric(), Menschen = numeric(), Siedlung = numeric(), Natur = numeric(), Industrie = numeric(), Folgekosten = numeric(), stringsAsFactors = FALSE)
```

```
nicht_umgesetzt <- data.frame(Jahr=numeric(), Objekt_ID=numeric(), Objekt=character(), Kategorie=character(), Kosten=numeric(), Nettofluss=numeric(), Finanzbedarf=numeric(), Wasserstrasse=character(), hydrpar=numeric(),Menschen=numeric(),Siedlung=numeric(),Natur=numeric(),Industrie=numeric(), Folgekosten=numeric(),stringsAsFactors = FALSE)
```

```
##### Ermittlung der Investitionsart und der Instandsetzungskosten #####
```

```
##### Anpassung des Investitionsjahres #####
```

```
data_d$Jahr_Bedarf <- data_d$Jahr # Notwendig zur Erstellung der Gesamtergebnistabelle (Speicherung des ursprünglichen Investitionsjahres)
```

```
data_d$Investitionsart <- "err"
```

```
data_d_save <- data_d # Speicherung der urspruenglichen Tabelle für Gesamtkosten
```

```
data_d$waiting_for_repair <- FALSE # Parameter zur Reduzierung der Rechenschritte
```

```
for(i in 0:dauer) # Simulationsdauer
```

```
{
```

```
  for(n in 1:(nrow(data_d)-1)) # Anzahl Bauwerke (Bauwerksteile)
```

```
  {
```

```
    if(data_d[n,1]==data_d[(n+1),1]) # Abfrage der gleichen Objekt_ID
```

```
    {
```

```
      if((data_d[n,17]==FALSE)&(data_d[(n+1),17]==FALSE)) #Abfrage, ob Bauwerk schon auf Instandsetzung wartet (Kosten&Jahr aller Bauwerksteile bereits bestimmt)
```

```
      {
```

```
        if(data_d[(n+1),14] == data_d[n,14]) #Wenn Stw=Mb, gemeinsamer Ersatz
```

```
        {
```

```
          data_d[n,5] <- data_d_save[n,5]*kosten_stw_zus #Kosten Stw bei gemeinsamer Instandsetzung
```

```
          data_d[(n+1),5] <- data_d_save[(n+1),5]*kosten_mb_zus #Kosten Mb bei gemeinsamer Instandsetzung
```

```

data_d[n,16] <- "Ersatz (gleichalt)"           #Investitionsart Stw
data_d[(n+1),16] <- "Ersatz (gleichalt)"     #Investitionsart Mb
data_d[n,17] <- TRUE
data_d[(n+1),17] <- TRUE
}
else if(data_d[(n+1),14] > data_d[n,14])# Wenn Stahlbau, dann Massivbau
{
  if(((data_d[(n+1),14]-data_d[n,14]) <= 23) #Ersatz Mb bei Restlebensdauer MB <= 23
Jahre (entspricht ZN>3,6)
  {
    data_d[(n+1),14] <- data_d[n,14]           #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[(n+1),15] <- data_d[n,15]         #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[n,5] <- data_d_save[n,5]*kosten_stw_zus #Kosten Stw bei gemeinsamer
Instandsetzung
    data_d[(n+1),5] <- data_d_save[(n+1),5]*kosten_mb_zus #Kosten Mb bei gemeinsa-
mer Instandsetzung
    data_d[n,16] <- "Ersatz (Stw fuehrend)"   #Investitionsart Stw
    data_d[(n+1),16] <- "Ersatz (Stw fuehrend)" #Investitionsart Mb
  }
  else if((((data_d[(n+1),14]-data_d[n,14]) <= 58)&((data_d[(n+1),14]-data_d[n,14]) >
23))#Reparatur Mb bei 23 < Restlebensdauer <= 58 Jahre (entspricht 2.4 < ZN < 3.6)
  {
    data_d[(n+1),14] <- data_d[n,14]           #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[(n+1),15] <- data_d[n,15]         #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[n,5] <- data_d_save[n,5]*kosten_stw_rep #Kosten Stw bei Reparatur Mb
    data_d[(n+1),5] <- data_d_save[(n+1),5]*kosten_mb_rep #kosten Mb bei Reparatur
    data_d[n,16] <- "Ersatz (Stw fuehrend)"   #Investitionsart Stw
    data_d[(n+1),16] <- "Reparatur"         #Investitionsart Mb
  }
  else if((((data_d[(n+1),14]-data_d[n,14]) <= 80)&((data_d[(n+1),14]-data_d[n,14]) >
58))#Ertuechtigung Mb bei 58 < Restlebensdauer <= 80 Jahre (entspricht 1.4 < ZN < 2.6)
  {
    data_d[(n+1),14] <- data_d[n,14]           #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[(n+1),15] <- data_d[n,15]         #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[n,5] <- data_d_save[n,5]*kosten_stw_ert #Kosten Stw bei Ertuechtigung Mb
    data_d[(n+1),5] <- data_d_save[(n+1),5]*kosten_mb_ert #Kosten Mb bei Ertuechtigung
    data_d[n,16] <- "Ersatz (Stw fuehrend)"   #Investitionsart Stw
    data_d[(n+1),16] <- "Ertuechtigung"     #Investitionsart Mb
  }
  else # bei Restlebensdauer > 80 Jahre (entspricht ZN < 1.4), Kommt nicht vor
  {
    data_d[n,16] <- "ERROR"                   #Investitionsart

```

```

        data_d[(n+1),16] <- "ERROR"                #Investitionsart Mb
    }
    data_d[n,17] <- TRUE
    data_d[(n+1),17] <- TRUE
}
else if(data_d[(n+1),14] < data_d[n,14]) #Wenn Massivbau, dann Stahlwasserbau
{
    data_d[n,14] <- data_d[(n+1),14]            #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[n,15] <- data_d[(n+1),15]            #Anpassung Investitionsjahr
    data_d[n,5] <- data_d_save[n,5]*kosten_stw_zus    #Kosten Stw bei gemeinsamer
Instandsetzung
    data_d[(n+1),5] <- data_d_save[(n+1),5]*kosten_mb_zus    #Kosten Mb bei gemeinsamer
Instandsetzung
    data_d[n,16] <- "Ersatz (MB fuehrend)"        #Investitionsart
    data_d[(n+1),16] <- "Ersatz (MB fuehrend)"    #Investitionsart Mb
    data_d[n,17] <- TRUE
    data_d[(n+1),17] <- TRUE
}
}
}
}
}

```

##### Vorbereiten der Bedarfstabelle sowie deren Parameter #####

```

restbudget = budget
Finanzbedarf <- 0
bedarf <- data_d
bedarf <- bedarf[order(-bedarf$jahr, bedarf$Nettofluss, decreasing=TRUE),] # Sortierung des
Bedarfsdatensatzes, zuerst nach Investitionsjahr, dann nach Nettofluss
anzahl_IJ <- nrow(bedarf[bedarf[,14]<=(startjahr+i+differenz),]) # Zählvariable für for-Schleifen
anz_BW <- 1 # Zählvariable für max. Bauwerkszahl

```

#####  
#####

Ergebnistabellen

```

if(anzahl_IJ != 0)
{
    for(l in 1:anzahl_IJ)
    {
        # Ergebnisse:
    }
}

```

```

if((bedarf[l,1] == bedarf[(l+1),1]) & (bedarf[l,5]+bedarf[(l+1),5] <= restbudget) & (anz_BW
<= max_BW)) #Gemeinsam instanzzusetzende Bauwerke
{
##### Stahlwasserbau #####

zeile_e      <- nrow(ergebnisse) +1
restbudget   <- restbudget - bedarf[l,5]
ergebnisse[zeile_e,1] <- startjahr + i # Ermittlung des Investitionsjahres (Jahr)
ergebnisse[zeile_e,2] <- bedarf[l,1] # Objekt_ID
ergebnisse[zeile_e,3] <- bedarf[l,2] # Objekt
ergebnisse[zeile_e,4] <- bedarf[l,3] # Kategorie
ergebnisse[zeile_e,5] <- bedarf[l,5] # Kosten
ergebnisse[zeile_e,6] <- bedarf[l,6] # Nettofluss
ergebnisse[zeile_e,7] <- restbudget # Restbudget
ergebnisse[zeile_e,8] <- bedarf[l,7] # Wasserstrasse
ergebnisse[zeile_e,9] <- bedarf[l,8] # hydr. Parameter
ergebnisse[zeile_e,10] <- bedarf[l,9] # Menschen
ergebnisse[zeile_e,11] <- bedarf[l,10] # Siedlungsflaechen
ergebnisse[zeile_e,12] <- bedarf[l,11] # Naturflaechen
ergebnisse[zeile_e,13] <- bedarf[l,12] # Industrieflaechen
ergebnisse[zeile_e,14] <- bedarf[l,13] # Wirtschaftl. Folgekosten
ergebnisse[zeile_e,15] <- bedarf[l,16] # Investitionsart

# Berechnung der neuen Lebensdauer
if(ergebnisse[zeile_e,4]=="Stahlwasserbau")
{
  data_d[data_d,2] == ergebnisse[zeile_e,3],14] <- startjahr+i+lebensdauer_stw
}
if(ergebnisse[zeile_e,4]=="Massivbau")
{
  if(ergebnisse[zeile_e,15]=="Reparatur")
  {
    data_d[data_d,2] == ergebnisse[zeile_e,3],14] <- startjahr + i + lebensdauer_mb_rep
  }
  else if(ergebnisse[zeile_e,15]=="Ertuechtigung")
  {
    data_d[data_d,2] == ergebnisse[zeile_e,3],14] <- startjahr + i + lebensdauer_mb_ert
  }
  else
  {
    data_d[data_d,2] == ergebnisse[zeile_e,3],14] <- startjahr + i + lebensdauer_mb
  }
}
}

```

```

}
data_d[data_d[,2] == ergebnisse[zeile_e,3],17] <- FALSE

##### Massivbau #####

zeile_f      <- nrow(ergebnisse) + 1
restbudget   <- restbudget - bedarf[(l+1),5]
ergebnisse[zeile_f,1] <- startjahr + i # Ermittlung des Investitionsjahres (Jahr)
ergebnisse[zeile_f,2] <- bedarf[(l+1),1] # Objekt_ID
ergebnisse[zeile_f,3] <- bedarf[(l+1),2] # Objekt
ergebnisse[zeile_f,4] <- bedarf[(l+1),3] # Kategorie
ergebnisse[zeile_f,5] <- bedarf[(l+1),5] # Kosten
ergebnisse[zeile_f,6] <- bedarf[(l+1),6] # Nettofluss
ergebnisse[zeile_f,7] <- restbudget # Restbudget
ergebnisse[zeile_f,8] <- bedarf[(l+1),7] # Wasserstrasse
ergebnisse[zeile_f,9] <- bedarf[(l+1),8] # hydr. Parameter
ergebnisse[zeile_f,10] <- bedarf[(l+1),9] # Menschen
ergebnisse[zeile_f,11] <- bedarf[(l+1),10] # Siedlungsflaechen
ergebnisse[zeile_f,12] <- bedarf[(l+1),11] # Naturflaechen
ergebnisse[zeile_f,13] <- bedarf[(l+1),12] # Industrieflaechen
ergebnisse[zeile_f,14] <- bedarf[(l+1),13] # Wirtschaftl. Folgekosten
ergebnisse[zeile_f,15] <- bedarf[(l+1),16] # Investitionsart

# Berechnung neue Lebensdauer
if(ergebnisse[zeile_f,4]=="Stahlwasserbau")
{
  data_d[data_d[,2] == ergebnisse[zeile_f,3],14] <- startjahr+i+lebensdauer_stw
}
if(ergebnisse[zeile_f,4]=="Massivbau")
{
  if(ergebnisse[zeile_f,15]=="Reparatur")
  {
    data_d[data_d[,2] == ergebnisse[zeile_f,3],14] <- startjahr + i + lebensdauer_mb_rep
  }
  else if(ergebnisse[zeile_f,15]=="Ertuechtigung")
  {
    data_d[data_d[,2] == ergebnisse[zeile_f,3],14] <- startjahr + i + lebensdauer_mb_ert
  }
  else
  {
    data_d[data_d[,2] == ergebnisse[zeile_f,3],14] <- startjahr + i + lebensdauer_mb
  }
}

```

```

}
data_d[data_d[,2] == ergebnisse[zeile_f,3],17] <- FALSE
anz_BW <- (anz_BW + 1)
}

```

```

# nicht instand gesetzte Bauwerke:

```

```

else if((bedarf[l,1] == bedarf[(l+1),1]) & (bedarf[l,5]+bedarf[(l+1),5] > restbudget) & (bedarf[l,14]<=(startjahr+i)))

```

```

{
##### Stahlwasserbau #####
zeile_e      <- nrow(nicht_umgesetzt)+1
Finanzbedarf <- (Finanzbedarf + bedarf[l,5])
nicht_umgesetzt[zeile_e,1] <- startjahr + i # Ermittlung des Investitionsjahres (Jahr)
nicht_umgesetzt[zeile_e,2] <- bedarf[l,1] # Objekt_ID
nicht_umgesetzt[zeile_e,3] <- bedarf[l,2] # Objekt
nicht_umgesetzt[zeile_e,4] <- bedarf[l,3] # Kategorie
nicht_umgesetzt[zeile_e,5] <- bedarf[l,5] # Kosten
nicht_umgesetzt[zeile_e,6] <- bedarf[l,6] # Nettofluss
nicht_umgesetzt[zeile_e,7] <- Finanzbedarf # entstehender Finanzbedarf
nicht_umgesetzt[zeile_e,8] <- bedarf[l,7] # Wasserstrasse
nicht_umgesetzt[zeile_e,9] <- bedarf[l,8] # hydr. Parameter
nicht_umgesetzt[zeile_e,10] <- bedarf[l,9] # Menschen
nicht_umgesetzt[zeile_e,11] <- bedarf[l,10] # Siedlungsflaechen
nicht_umgesetzt[zeile_e,12] <- bedarf[l,11] # Naturflaechen
nicht_umgesetzt[zeile_e,13] <- bedarf[l,12] # Industrieflaechen
nicht_umgesetzt[zeile_e,14] <- bedarf[l,13] # Wirtschaftl. Folgekosten

```

```

##### Massivbau #####
zeile_e      <- nrow(nicht_umgesetzt)+1
Finanzbedarf <- (Finanzbedarf + bedarf[(l+1),5])
nicht_umgesetzt[zeile_e,1] <- startjahr + i # Ermittlung des Investitionsjahres (Jahr)
nicht_umgesetzt[zeile_e,2] <- bedarf[(l+1),1] # Objekt_ID
nicht_umgesetzt[zeile_e,3] <- bedarf[(l+1),2] # Objekt
nicht_umgesetzt[zeile_e,4] <- bedarf[(l+1),3] # Kategorie
nicht_umgesetzt[zeile_e,5] <- bedarf[(l+1),5] # Kosten
nicht_umgesetzt[zeile_e,6] <- bedarf[(l+1),6] # Nettofluss
nicht_umgesetzt[zeile_e,7] <- Finanzbedarf # entstehender Finanzbedarf
nicht_umgesetzt[zeile_e,8] <- bedarf[(l+1),7] # Wasserstrasse
nicht_umgesetzt[zeile_e,9] <- bedarf[(l+1),8] # hydr. Parameter
nicht_umgesetzt[zeile_e,10] <- bedarf[(l+1),9] # Menschen
nicht_umgesetzt[zeile_e,11] <- bedarf[(l+1),10] # Siedlungsflaechen
nicht_umgesetzt[zeile_e,12] <- bedarf[(l+1),11] # Naturflaechen

```

```

    nicht_umgesetzt[zeile_e,13] <- bedarf[(l+1),12] # Industrieflaechen
    nicht_umgesetzt[zeile_e,14] <- bedarf[(l+1),13] # Wirtschaftl. Folgekosten
  }# Ende Elseif
}# Ende For-Schleife
}# Ende If-Schleife

# Gesamtergebnis:
zeile_g      <- nrow(gesamtergebnis) + 1
gesamtergebnis[zeile_g,1] <- startjahr + i          # Investitionsjahr
gesamtergebnis[zeile_g,2] <- mean((data_d$Jahr) - (startjahr+ i))      # Durchschnittliche
Dauer bis zur naechsten Instandsetzung
gesamtergebnis[zeile_g,3] <- 0                      # Investitionsbedarf in Euro fur
die instandzusetzenden Bauwerke/-teile
anzahl       <- nrow(bedarf[bedarf[,14]<=(startjahr+i),])      # Anzahl instandzuset-
zender Bauwerke (bzw. hier Bauwerksteile)
gesamtergebnis[zeile_g,4] <- anzahl
gesamtergebnis[zeile_g,5] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),5]) # getae-
tigte Ausgaben
gesamtergebnis[zeile_g,6] <- nrow(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),]) # Anzahl
instand gesetzter Bauwerke (basierend auf verfuegbarem Budget)
gesamtergebnis[zeile_g,7] <- restbudget              # Restbudget
gesamtergebnis[zeile_g,8] <- gesamtergebnis[zeile_g,2] - sd((data_d$Jahr)-(startjahr+i)) #
DbN_min = Standardabweichung nach unten
gesamtergebnis[zeile_g,9] <- gesamtergebnis[zeile_g,2] + sd((data_d$Jahr)-(startjahr+i)) #
DbN_max = Standardabweichung nach oben
gesamtergebnis[zeile_g,10] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),9]) # Summe
hydr. Parameter
gesamtergebnis[zeile_g,11] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),10]) # Summe
Menschen
gesamtergebnis[zeile_g,12] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),11]) # Summe
Siedlungsflaechen
gesamtergebnis[zeile_g,13] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),12]) # Summe
Naturflaechen
gesamtergebnis[zeile_g,14] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),13]) # Summe
Industrieflaechen
gesamtergebnis[zeile_g,15] <- sum(ergebnisse[ergebnisse[,1]==(startjahr + i),14]) # Summe
Wirtschaftl. Folgekosten

if(anzahl!=0)
{
  for(az in 1:anzahl)
  {

```

```

    gesamtergebnis[zeile_g,3] <- gesamtergebnis[zeile_g,3] + bedarf[az,5]
  }
}
data_d$Jahr_Bedarf <- data_d$Jahr
}

```

##### Umstrukturieren/Runden der Ergebnistabellen für bessere Übersicht #####

```

gesamtergebnis      <- gesamtergebnis[,c(1,4,6,3,5,7,2,8,9,10,11,12,13,14,15)]
gesamtergebnis$Bedarf_Mio_Euro    <- round(gesamtergebnis$Bedarf_Mio_Euro,3)
gesamtergebnis$Investitionen_Mio_Euro <- round(gesamtergebnis$Investitionen_Mio_Euro,3)
gesamtergebnis$Restbudget        <- round(gesamtergebnis$Restbudget,3)

```

##### Erstellung der Legende für Auswertungsplot #####

```

legende <- data.frame(Szenario=character(), Lebensdauer=character(), Budget=numeric(), AD
=numeric(), M_mv = numeric(), M_sd = numeric(), I_mv = numeric(), I_sd = numeric(), DbN_mv =
numeric(), DbN_sd = numeric(),stringsAsFactors = FALSE)

```

```

legende[1,1] <- szenario
if(lebensdauer_mb<=100&lebensdauer_mb>90) {legende[1,2] <- "Norm"}
if(lebensdauer_mb<=90&lebensdauer_mb>60) {legende[1,2] <- "Robust"}
if(lebensdauer_mb<=60&lebensdauer_mb>25) {legende[1,2] <- "Normal"}
if(lebensdauer_mb<=25)          {legende[1,2] <- "Anfällig"}
legende[1,3] <- budget
legende[1,4] <- differenz
legende[1,5] <- round(mean(gesamtergebnis$Investitionen),1)
legende[1,6] <- round(sd(gesamtergebnis$Investitionen),1)
legende[1,7] <- round(mean(gesamtergebnis$Investitionen_Mio_Euro),1)
legende[1,8] <- round(sd(gesamtergebnis$Investitionen_Mio_Euro),1)
legende[1,9] <- round(mean(gesamtergebnis$DbN),1)
legende[1,10] <- round(sd(gesamtergebnis$DbN),1)

```

##### Erstellen des Auswertungsplots #####

```

emf(file = "plot.emf", width = 10, height = 9, emfPlus = FALSE)
par(mfrow=c(4,1), cex.main=2, cex.axis=2, cex.lab=2)
plot(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$DbN, type = "l", col="black", ylim = c(0,100), main =
"Durchschnittliche Dauer bis zur nächsten Maßnahme", xlab = "Jahr", ylab = " ")
lines(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$DbN_min, type = "l", col="grey")
lines(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$DbN_max, type = "l", col="grey")

```

```

plot(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$Bedarf, type = "s", col="black", ylim = c(0,max(gesamtergebnis$Bedarf, gesamtergebnis$Anzahl_Investitionen )), main = "Maßnahmen [Anzahl]",
xlab = "Jahr", ylab = " ")
lines(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$Investitionen, type = "s", col="green2", lwd=1, lty=1)
plot(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$Bedarf_Mio_Euro, type = "s", col="black", ylim = c(0,max(gesamtergebnis$Bedarf_Mio_Euro, gesamtergebnis$Investitionen_Mio_Euro)), main = "Investitionen [Mio. Euro]", xlab = "Jahr", ylab = " ")
lines(gesamtergebnis$Jahr, gesamtergebnis$Investitionen_Mio_Euro, type = "s", col="green2", lwd=1, lty=1)
pushViewport(viewport(y=1))
gridtheme <- ttheme_default(rowhead=list(fg_params=list(col="white", fontface=3L)))
grid.table(legende, theme = gridtheme)
dev.off()

```

##### Ausgabe der Ergebnistabellen als MS Excel-Datei #####

```

write.csv2(ergebnisse, file = "//nexus/Bautechnik/b4/12_Projekte_FuE/B3951040470002_Risikoklassifizierung im EMS-WSV/5 Bearbeitung/3.4 Entscheidungsunterstützung/Simulation_R_CM/01_PROMETHEE/Simulation_R_PROMETHEE/Auswertungsdateien/Ergebnisse.csv")
write.csv2(gesamtergebnis,file = "//nexus/Bautechnik/b4/12_Projekte_FuE/B3951040470002_Risikoklassifizierung im EMS-WSV/5 Bearbeitung/3.4 Entscheidungsunterstützung/Simulation_R_CM/01_PROMETHEE/Simulation_R_PROMETHEE/Auswertungsdateien/Gesamtergebnis.csv")
write.csv2(nicht_umgesetzt, file = "//nexus/Bautechnik/b4/12_Projekte_FuE/B3951040470002_Risikoklassifizierung im EMS-WSV/5 Bearbeitung/3.4 Entscheidungsunterstützung/Simulation_R_CM/01_PROMETHEE/Simulation_R_PROMETHEE/Auswertungsdateien/Nicht_umgesetzt.csv")

```

##### Ende #####

## VIII R-Code Cluster-Analyse (k-medoid-Algorithmus)

Unter Verwendung von:

Kassambra, A. (2017): Practical Guide to Cluster Analysis in R. Unsupervised Machine Learning, STHDA, [www.sthda.com](http://www.sthda.com).

```
library(cluster)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(readr)
library(Rtsne)
library(forecast)

#####
# Cluster-Analyse-kMedoid
#####

df <- read_csv2("Wehranlagen_FM.csv")

# df[1:5] <- list(NULL)

df[df==""]<-NA
df[df=="unbekannt"]<-NA
df[df=="entfaellt"]<-NA
df<-df[complete.cases(df),]

clusterData <- data.frame(matrix(NA, nrow = nrow(df), ncol = 0 ))

# Data preparation: define categorical variables as factors
# clusterData$Bauwerke <- as.factor(df$BauW)

clusterData$hP <- df$hP
clusterData$hM <- df$hM
clusterData$SF <- df$SF
clusterData$NF <- df$NF
clusterData$IG <- df$IG
clusterData$WFk <- df$WFk

# Compute Gower distance
gower_dist <- daisy(clusterData, metric = "gower")
```

```

gower_mat <- as.matrix(gower_dist)

#' Print most similar clients
clusterData[which(gower_mat == min(gower_mat[gower_mat != min(gower_mat)]), arr.ind =
TRUE)[1, ], ]

#' Print most dissimilar clients
clusterData[which(gower_mat == max(gower_mat[gower_mat != max(gower_mat)]), arr.ind =
TRUE)[1, ], ]

sil_width <- c(NA)
for(i in 2:50){
  pam_fit <- pam(gower_dist, diss = TRUE, k = i)
  sil_width[i] <- pam_fit$silinfo$avg.width
}

plot(1:50, sil_width,
     xlab = "Number of clusters",
     ylab = "Silhouette Width")
lines(1:50, sil_width)

k <- 3
pam_fit <- pam(gower_dist, diss = TRUE, k)
pam_results <- clusterData %>%
  mutate(cluster = pam_fit$clustering) %>%
  group_by(cluster) %>%
  do(the_summary = summary(.))
pam_results$the_summary

df$Cluster <- pam_fit[["clustering"]]
write.table(df, file="clusters.csv", sep=";", col.names = NA)

file.create("summary.csv")
for (i in c(1:k)){
  clusteri <- pam_results$the_summary[[i]]
  write.table(clusteri, file="summary.csv", sep=";", append = TRUE, row.names = FALSE)
}

```

```
#pam_fit[["clustering"]]  
# write.xlsx(pam_fit[["clustering"]], "c:/mydata.xlsx")  
# write.table(pam_fit, "c:/mydata.txt", sep="\t")
```

## IX Plots der Szenarien 4.2.3 und 1.2.2

### Szenario 4.2.3 (anfällige Bauwerke)

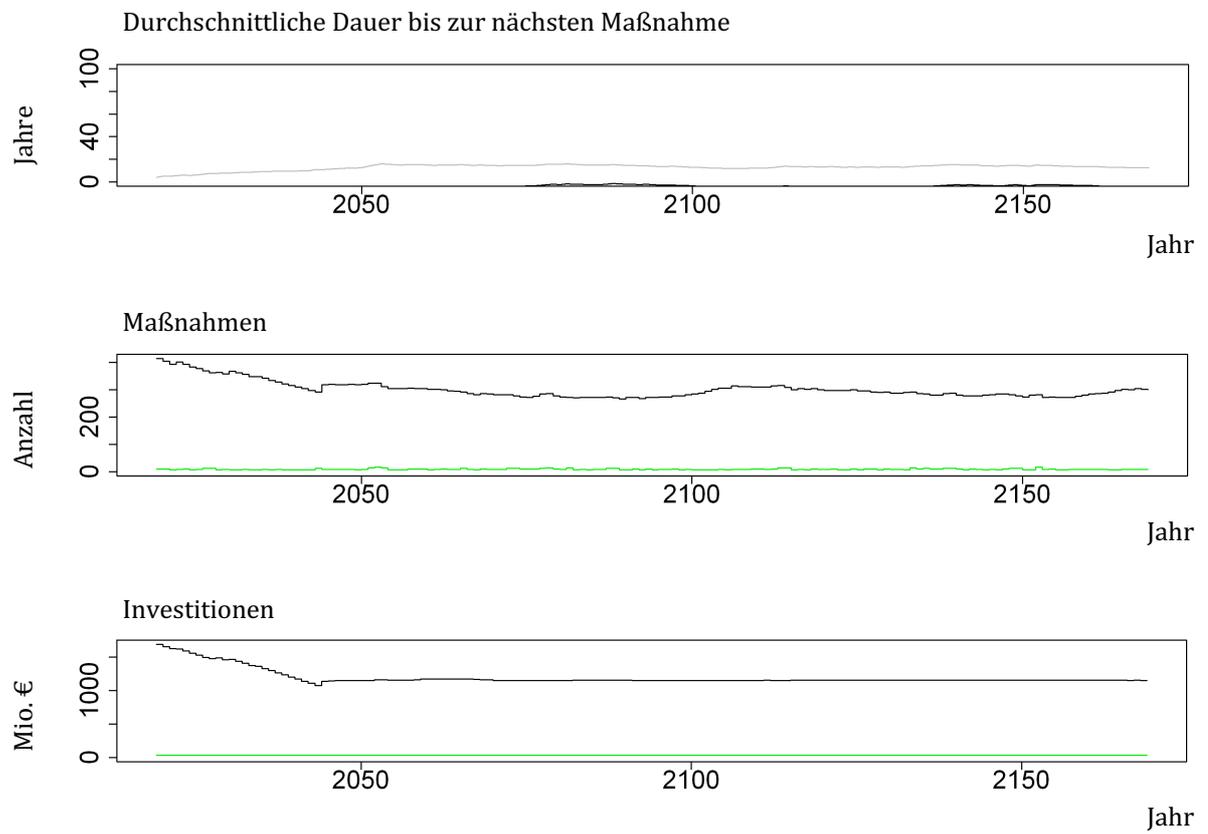


Abbildung 52: Plot zu Szenario 4.2.3 (anfällige Bauwerke) (Eigene Darstellung)

Szenario 1.2.2 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 5 Jahre)

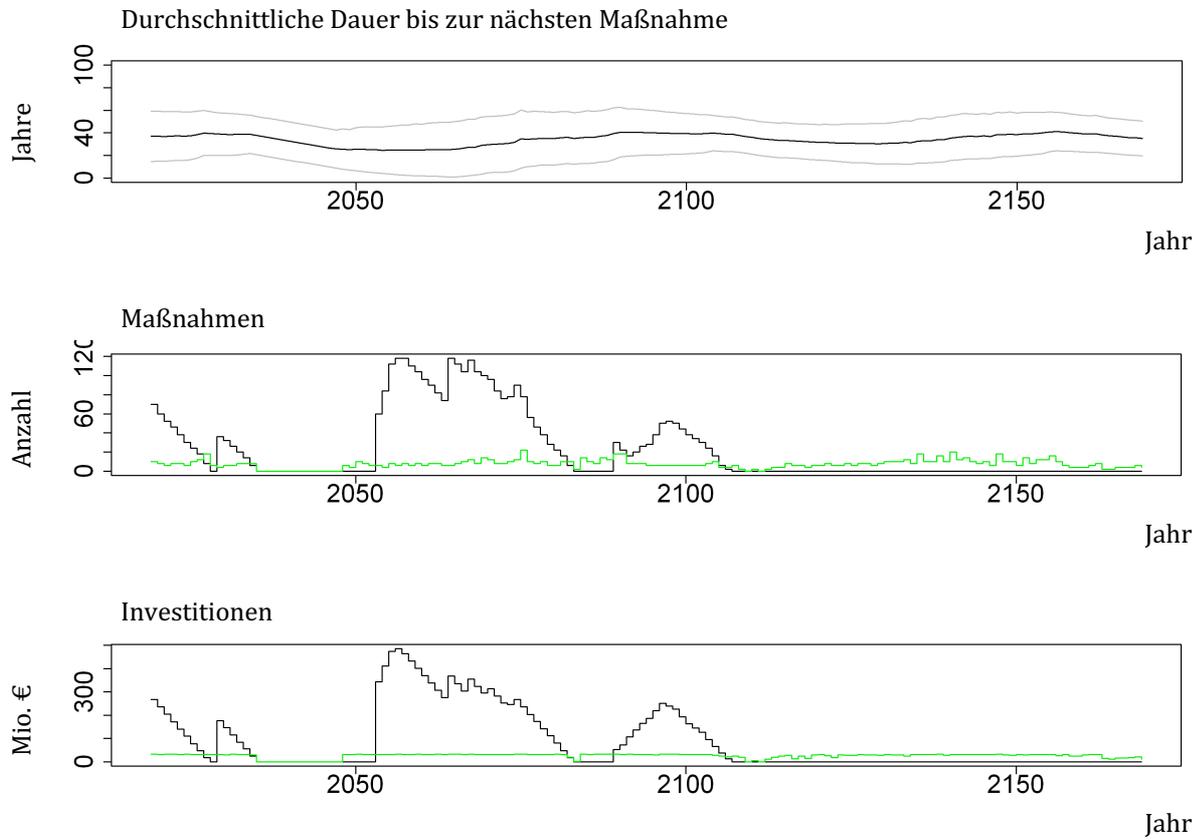


Abbildung 53: Plot zu Szenario 1.2.2 (Vorziehen von IH-Maßnahmen bis zu 5 Jahre) (Eigene Darstellung)

## X Simulationsergebnisse (Auswahl)

Tabelle 67: Gesamtergebnis zu Szenario 1.2.3 (ungekürzt)

Jahr	DbN	Bedarf (Anzahl)	durchgeführt (Anzahl)	IHR (Anzahl)	Bedarf (Mio. €)	investiert (Mio. €)	Restbudget (Mio. €)
2019	36,94	70	10	60	267,26	31,87	0,01
2020	37,25	60	10	50	235,38	31,80	0,08
2021	37,04	52	6	46	203,97	31,80	0,08
2022	37,28	46	8	38	172,17	31,74	0,14
2023	37,72	38	10	28	140,43	31,83	0,05
2024	37,55	30	6	24	109,68	31,74	0,14
2025	37,97	24	10	14	77,94	31,84	0,04
2026	38,86	18	12	6	48,18	31,36	0,52
2027	40,09	8	16	-8	17,99	30,82	1,06
2028	39,65	0	6	-6	0,00	31,33	0,55
2029	39,11	36	4	32	176,41	30,50	1,38
2030	38,89	32	6	26	145,91	29,99	1,89
2031	38,70	26	6	20	115,92	31,76	0,12
2032	38,52	20	6	14	84,16	28,57	3,31
2033	38,59	14	8	6	55,59	31,37	0,51
2034	38,65	6	8	0	24,22	29,24	2,64
2035	37,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2036	36,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2037	35,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2038	34,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2039	33,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2040	32,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2041	31,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2042	30,58	0	0	0	0,00	0,00	31,88
2043	30,41	0	6	0	0,00	31,22	0,66
2044	29,81	0	4	0	0,00	31,35	0,53
2045	30,13	0	10	0	0,00	31,84	0,04
2046	30,09	0	8	0	0,00	31,41	0,47
2047	29,84	0	6	0	0,00	31,17	0,71
2048	29,55	0	6	0	0,00	31,69	0,19
2049	29,07	0	4	0	0,00	31,03	0,85
2050	29,19	0	8	0	0,00	31,49	0,39
2051	28,98	0	6	0	0,00	31,80	0,08
2052	29,07	0	8	0	0,00	31,54	0,34
2053	28,82	36	6	30	191,38	31,48	0,40
2054	29,06	58	8	50	256,98	31,83	0,05
2055	28,80	76	6	70	316,08	31,36	0,52
2056	29,08	84	8	76	326,76	31,57	0,31
2057	29,18	82	8	74	306,72	31,73	0,15
2058	29,07	74	6	68	274,99	31,59	0,29
2059	28,98	68	6	62	243,40	31,79	0,09
2060	29,26	62	8	54	211,61	31,83	0,05
2061	29,62	54	10	44	179,78	31,67	0,21
2062	30,52	46	12	34	148,81	31,74	0,14
2063	30,59	34	8	26	117,08	31,44	0,44
2064	32,05	76	14	62	209,59	31,57	0,32
2065	32,61	62	12	50	178,02	31,25	0,63
2066	32,88	50	8	42	146,77	31,12	0,76
2067	33,05	62	8	54	198,47	31,12	0,76

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 67: Gesamtergebnis zu Szenario 1.2.3

2068	33,60	54	10	44	167,36	31,57	0,31
2069	34,39	48	12	36	138,10	31,79	0,09
2070	37,04	46	22	24	157,07	31,79	0,09
2071	36,83	24	10	14	125,28	30,90	0,98
2072	37,42	16	10	6	95,16	31,04	0,84
2073	37,65	16	10	6	88,76	31,01	0,87
2074	37,46	28	6	22	111,08	31,28	0,60
2075	37,31	22	6	16	79,80	31,75	0,13
2076	37,85	16	10	6	48,05	31,18	0,70
2077	38,42	6	12	0	16,87	20,93	10,95
2078	37,45	0	2	0	0,00	1,51	30,37
2079	38,04	0	14	0	0,00	31,83	0,05
2080	38,34	0	10	0	0,00	31,63	0,25
2081	38,17	0	8	0	0,00	31,77	0,11
2082	38,84	0	14	0	0,00	31,78	0,10
2083	40,02	0	16	0	0,00	31,80	0,08
2084	40,48	0	12	0	0,00	31,31	0,57
2085	42,02	0	20	0	0,00	31,38	0,50
2086	41,63	0	8	0	0,00	31,83	0,05
2087	41,38	0	6	0	0,00	31,13	0,75
2088	41,44	0	8	0	0,00	31,76	0,13
2089	41,10	0	6	0	0,00	31,58	0,30
2090	40,85	0	6	0	0,00	29,67	2,22
2091	40,60	0	6	0	0,00	31,80	0,08
2092	40,37	0	6	0	0,00	31,84	0,04
2093	39,88	2	4	0	18,16	28,82	3,06
2094	39,67	6	6	0	40,03	30,47	1,41
2095	39,53	14	6	8	72,64	30,32	1,56
2096	39,36	22	6	16	97,20	30,77	1,11
2097	39,19	22	6	16	83,54	30,45	1,44
2098	39,38	20	8	12	71,54	30,80	1,08
2099	40,02	12	12	0	40,74	30,20	1,68
2100	39,79	2	6	0	12,54	27,76	4,12
2101	39,58	0	6	0	0,00	25,79	6,09
2102	39,03	0	4	0	0,00	29,74	2,14
2103	38,46	0	4	0	0,00	30,00	1,88
2104	38,14	0	6	0	0,00	31,82	0,06
2105	38,02	0	8	0	0,00	27,48	4,40
2106	37,59	0	6	0	0,00	12,90	18,98
2107	37,22	0	6	0	0,00	24,24	7,64
2108	36,71	0	4	0	0,00	15,14	16,74
2109	36,39	0	6	0	0,00	29,61	2,27
2110	35,98	0	6	0	0,00	31,46	0,42
2111	35,83	0	8	0	0,00	26,46	5,42
2112	35,45	0	6	0	0,00	17,94	13,94
2113	35,15	0	6	0	0,00	29,08	2,80
2114	35,12	0	8	0	0,00	27,79	4,09
2115	34,81	0	6	0	0,00	28,01	3,88
2116	34,67	0	8	0	0,00	31,01	0,87
2117	34,48	0	8	0	0,00	29,76	2,13
2118	34,26	0	6	0	0,00	29,72	2,16
2119	34,13	0	8	0	0,00	27,18	4,71
2120	34,17	0	10	0	0,00	31,01	0,87
2121	34,31	0	10	0	0,00	28,58	3,30

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 67: Gesamtergebnis zu Szenario 1.2.3

2122	34,41	0	10	0	0,00	29,88	2,00
2123	34,88	0	12	0	0,00	23,57	8,32
2124	34,64	0	8	0	0,00	31,57	0,31
2125	35,73	0	18	0	0,00	30,95	0,93
2126	35,79	0	10	0	0,00	31,51	0,37
2127	35,76	0	10	0	0,00	30,93	0,95
2128	36,65	0	16	0	0,00	31,73	0,15
2129	36,63	0	10	0	0,00	26,90	4,98
2130	37,85	0	20	0	0,00	31,35	0,53
2131	38,24	0	12	0	0,00	31,63	0,25
2132	39,14	0	16	0	0,00	31,15	0,73
2133	39,13	0	10	0	0,00	31,65	0,23
2134	38,94	0	8	0	0,00	31,35	0,53
2135	39,58	0	12	0	0,00	31,43	0,45
2136	39,10	0	6	0	0,00	31,57	0,31
2137	39,19	0	10	0	0,00	31,28	0,60
2138	40,74	0	20	0	0,00	29,19	2,69
2139	40,88	0	10	0	0,00	31,14	0,74
2140	40,33	0	6	0	0,00	31,29	0,59
2141	40,99	0	14	0	0,00	30,47	1,41
2142	40,93	0	8	0	0,00	31,44	0,44
2143	41,39	0	14	0	0,00	31,85	0,03
2144	41,60	0	10	0	0,00	31,88	0,00
2145	42,21	0	16	0	0,00	28,45	3,44
2146	41,92	0	6	0	0,00	23,54	8,34
2147	41,39	0	4	0	0,00	28,16	3,72
2148	40,73	0	4	0	0,00	24,93	6,95
2149	40,23	0	4	0	0,00	23,84	8,04
2150	39,69	0	4	0	0,00	29,69	2,19
2151	39,38	0	6	0	0,00	31,10	0,78
2152	39,43	0	8	0	0,00	30,23	1,65
2153	38,46	0	2	0	0,00	14,12	17,76
2154	37,67	0	2	0	0,00	11,83	20,05
2155	37,40	0	6	0	0,00	29,99	1,89
2156	36,92	0	4	0	0,00	26,90	4,98
2157	37,08	0	10	0	0,00	30,61	1,27
2158	36,45	0	4	0	0,00	30,91	0,97
2159	36,75	0	10	0	0,00	31,47	0,41
2160	36,62	0	8	0	0,00	31,74	0,14
2161	36,70	0	10	0	0,00	29,51	2,37
2162	36,96	0	10	0	0,00	31,74	0,15
2163	36,90	0	8	0	0,00	31,73	0,15
2164	36,77	0	8	0	0,00	28,47	3,41
2165	36,17	0	4	0	0,00	28,60	3,28
2166	35,95	0	6	0	0,00	29,77	2,11
2167	35,38	0	4	0	0,00	31,84	0,04
2168	34,94	0	4	0	0,00	31,41	0,47
2169	34,99	0	8	0	0,00	30,64	1,24

Tabelle 68: Einzelergebnis zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

Jahr	Objekt_ID	Nettofluss	Kategorie	Kosten (Mio. €)	Rest-Budget (Mio. €)	Wasserstraße	Hydr. Par. (m)	Menschen (Anzahl)	Siedlung (m <sup>2</sup> )	Natur (m <sup>2</sup> )	Industrie (m <sup>2</sup> )	Folgekosten (€/a)	Investitionsart
2019	2132528001	155,31	Stahlwasserbau	3,84	28,04	07 Elbe	1,27	191089	52333811	380498565	374252128	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2132528001	155,31	Massivbau	10,00	18,04	07 Elbe	1,27	191089	52333811	380498565	374252128	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2136332004	118,63	Stahlwasserbau	2,94	15,10	38 Regnitz	1,04	138779	29499576	52290478	77033198	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2136332004	118,63	Massivbau	7,65	7,44	38 Regnitz	1,04	138779	29499576	52290478	77033198	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2133546001	81,64	Stahlwasserbau	0,50	6,94	65 Spree-Oder	1,46	197127	15413607	4399773	5868213	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2133546001	81,64	Massivbau	1,30	5,65	65 Spree-Oder	1,46	197127	15413607	4399773	5868213	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2133322001	19,76	Stahlwasserbau	1,34	4,30	01 Aller	1,04	22832	11981119	20214441	102997238	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2133322001	19,76	Massivbau	3,49	0,81	01 Aller	1,04	22832	11981119	20214441	102997238	0	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2132944007	-68,45	Stahlwasserbau	0,22	0,59	61 Obere-Havel	0,39	618	741822	21840435	4259273	43	Ersatz (MB fuehrend)
2019	2132944007	-68,45	Massivbau	0,58	0,01	61 Obere-Havel	0,39	618	741822	21840435	4259273	43	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2133748003	111,66	Stahlwasserbau	2,42	29,46	65 Spree-Oder	1,37	129255	18480648	70932369	11660469	213290	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2133748003	111,66	Massivbau	6,30	23,15	65 Spree-Oder	1,37	129255	18480648	70932369	11660469	213290	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2133718001	110,78	Stahlwasserbau	4,15	19,00	52 Weser	1,19	82240	34798721	38059919	132050087	21367	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2133718001	110,78	Massivbau	10,80	8,19	52 Weser	1,19	82240	34798721	38059919	132050087	21367	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2135714004	0,45	Stahlwasserbau	1,66	6,54	24 Lahn	1,41	25538	8771929	8801803	15264288	0	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2135714004	0,45	Massivbau	4,30	2,23	24 Lahn	1,41	25538	8771929	8801803	15264288	0	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2133540003	-44,89	Stahlwasserbau	0,49	1,74	56 Elbe-Havel	0,86	6183	3625907	9072053	2163420	0	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2133540003	-44,89	Massivbau	1,28	0,47	56 Elbe-Havel	0,86	6183	3625907	9072053	2163420	0	Ersatz (MB fuehrend)
2020	2132946002	-53,5	Stahlwasserbau	0,23	0,23	61 Obere-Havel	0,61	3759	2476709	33817921	5522355	74	Ersatz (Stw fuehrend)
2020	2132946002	-53,5	Massivbau	0,16	0,08	61 Obere-Havel	0,61	3759	2476709	33817921	5522355	74	Große IH
2021	2135916002	65,57	Stahlwasserbau	3,06	28,82	29 Main	1,44	41342	16849770	10448875	29839043	493785	Ersatz (MB fuehrend)
2021	2135916002	65,57	Massivbau	7,95	20,87	29 Main	1,44	41342	16849770	10448875	29839043	493785	Ersatz (MB fuehrend)
2021	2137120007	60,54	Stahlwasserbau	3,27	17,59	33 Neckar	1,77	108981	10946665	7052795	7840398	15923	Ersatz (MB fuehrend)
2021	2137120007	60,54	Massivbau	8,51	9,08	33 Neckar	1,77	108981	10946665	7052795	7840398	15923	Ersatz (MB fuehrend)
2021	2135712004	25,54	Stahlwasserbau	2,50	6,58	24 Lahn	6,23	5685	2077260	18728874	7009995	0	Ersatz (MB fuehrend)
2021	2135712004	25,54	Massivbau	6,50	0,08	24 Lahn	6,23	5685	2077260	18728874	7009995	0	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2135710001	42,49	Stahlwasserbau	3,92	27,96	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2135710001	42,49	Massivbau	10,19	17,77	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2133320001	33,86	Stahlwasserbau	3,90	13,87	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2133320001	33,86	Massivbau	10,15	3,72	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2133338001	-19,97	Stahlwasserbau	0,73	2,99	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2133338001	-19,97	Massivbau	1,90	1,09	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2132946004	-51,46	Stahlwasserbau	0,26	0,82	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36	Ersatz (MB fuehrend)
2022	2132946004	-51,46	Massivbau	0,69	0,14	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36	Ersatz (MB fuehrend)

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 68: Einzelergebnis zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

2023	2135916001	32,56	Stahlwasserbau	2,89	28,99	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2135916001	32,56	Massivbau	7,52	21,47	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2133520002	29,08	Stahlwasserbau	3,46	18,01	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2133520002	29,08	Massivbau	9,00	9,01	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2135712001	-4,81	Stahlwasserbau	1,85	7,16	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2135712001	-4,81	Massivbau	4,82	2,34	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2133138002	-54,03	Stahlwasserbau	0,34	2,00	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2133138002	-54,03	Massivbau	0,87	1,13	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0	Ersatz (MB fuehrend)
2023	2133748001	-42,33	Stahlwasserbau	0,65	0,48	65 Spree-Oder	0,37	16012	6083769	47378038	5690037	0	Ersatz (Stw fuehrend)
2023	2133748001	-42,33	Massivbau	0,43	0,05	65 Spree-Oder	0,37	16012	6083769	47378038	5690037	0	Große IH

Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

Jahr	Objekt_ID	Kategorie	Kosten (Mio. €)	Nettofluss	Finanzbedarf (Mio. €)	Wasserstraße	Hydr. Par. (m)	Menschen (Anzahl)	Siedlung (m <sup>2</sup> )	Natur (m <sup>2</sup> )	Industrie (m <sup>2</sup> )	Folgekosten (€/a)
2019	2133748003	Stahlwasserbau	2,42	111,66	2,42	65 Spree-Oder	1,37	129255	18480648	70932369	11660469	213290
2019	2133748003	Massivbau	6,30	111,66	8,73	65 Spree-Oder	1,37	129255	18480648	70932369	11660469	213290
2019	2133718001	Stahlwasserbau	4,15	110,78	12,88	52 Weser	1,19	82240	34798721	38059919	132050087	21367
2019	2133718001	Massivbau	10,80	110,78	23,69	52 Weser	1,19	82240	34798721	38059919	132050087	21367
2019	2135916002	Stahlwasserbau	3,06	65,57	26,74	29 Main	1,44	41342	16849770	10448875	29839043	493785
2019	2135916002	Massivbau	7,95	65,57	34,70	29 Main	1,44	41342	16849770	10448875	29839043	493785
2019	2137120007	Stahlwasserbau	3,27	60,54	37,97	33 Neckar	1,77	108981	10946665	7052795	7840398	15923
2019	2137120007	Massivbau	8,51	60,54	46,49	33 Neckar	1,77	108981	10946665	7052795	7840398	15923
2019	2135710001	Stahlwasserbau	3,92	42,49	50,41	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838
2019	2135710001	Massivbau	10,19	42,49	60,60	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838
2019	2133320001	Stahlwasserbau	3,90	33,86	64,50	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091
2019	2133320001	Massivbau	10,15	33,86	74,65	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091
2019	2135916001	Stahlwasserbau	2,89	32,56	77,54	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2019	2135916001	Massivbau	7,52	32,56	85,06	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2019	2133520002	Stahlwasserbau	3,46	29,08	88,52	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2019	2133520002	Massivbau	9,00	29,08	97,52	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2019	2135712004	Stahlwasserbau	2,50	25,54	100,02	24 Lahn	6,23	5685	2077260	18728874	7009995	0
2019	2135712004	Massivbau	6,50	25,54	106,52	24 Lahn	6,23	5685	2077260	18728874	7009995	0
2019	2137120004	Stahlwasserbau	3,81	24,19	110,32	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2019	2137120004	Massivbau	9,90	24,19	120,22	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2019	2136920001	Stahlwasserbau	4,30	23,25	124,53	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2019	2136920001	Massivbau	11,19	23,25	135,71	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2019	2133120001	Stahlwasserbau	3,52	20,81	139,23	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2019	2133120001	Massivbau	9,15	20,81	148,38	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2019	2136130002	Stahlwasserbau	3,45	15,27	151,84	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2019	2136130002	Massivbau	8,98	15,27	160,82	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2019	2136124002	Stahlwasserbau	2,94	14,35	163,76	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2019	2136124002	Massivbau	7,65	14,35	171,41	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2019	2135714004	Stahlwasserbau	1,66	0,45	173,06	24 Lahn	1,41	25538	8771929	8801803	15264288	0
2019	2135714004	Massivbau	4,30	0,45	177,37	24 Lahn	1,41	25538	8771929	8801803	15264288	0
2019	2135712001	Stahlwasserbau	1,85	-4,81	179,22	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2019	2135712001	Massivbau	4,82	-4,81	184,04	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2019	2135710004	Stahlwasserbau	1,29	-5,79	185,33	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2019	2135710004	Massivbau	3,36	-5,79	188,70	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2019	2133338001	Stahlwasserbau	0,73	-19,97	189,43	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058
2019	2133338001	Massivbau	1,90	-19,97	191,33	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

2019	2134536006	Stahlwasserbau	1,15	-20,5	192,47	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2019	2134536006	Massivbau	2,98	-20,5	195,46	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2019	2135712006	Stahlwasserbau	1,38	-24,14	196,84	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2019	2135712006	Massivbau	3,59	-24,14	200,42	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2019	2133148005	Stahlwasserbau	0,71	-27,58	201,13	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2019	2133148005	Massivbau	1,84	-27,58	202,97	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2019	2135712005	Stahlwasserbau	1,85	-27,78	204,82	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2019	2135712005	Massivbau	4,82	-27,78	209,64	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2019	2135712003	Stahlwasserbau	1,85	-33,4	211,49	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2019	2135712003	Massivbau	4,82	-33,4	216,31	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2019	2133344003	Stahlwasserbau	1,06	-34,66	217,37	58 Havel	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2019	2133344003	Massivbau	2,76	-34,66	220,13	58 Havel	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2019	2135712002	Stahlwasserbau	1,66	-34,91	221,79	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2019	2135712002	Massivbau	4,30	-34,91	226,09	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2019	2133146009	Stahlwasserbau	0,66	-39,83	226,75	58 Havel	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2019	2133146009	Massivbau	1,71	-39,83	228,46	58 Havel	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2019	2133540003	Stahlwasserbau	0,49	-44,89	228,95	56 Elbe-Havel	0,86	6183	3625907	9072053	2163420	0
2019	2133540003	Massivbau	1,28	-44,89	230,22	56 Elbe-Havel	0,86	6183	3625907	9072053	2163420	0
2019	2132946004	Stahlwasserbau	0,26	-51,46	230,49	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36
2019	2132946004	Massivbau	0,69	-51,46	231,17	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36
2019	2133138002	Stahlwasserbau	0,34	-54,03	231,51	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2019	2133138002	Massivbau	0,87	-54,03	232,38	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2019	2132534001	Stahlwasserbau	0,83	-68,51	233,22	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2019	2132534001	Massivbau	2,17	-68,51	235,38	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2020	2135916002	Stahlwasserbau	3,06	65,57	3,06	29 Main	1,44	41342	16849770	10448875	29839043	493785
2020	2135916002	Massivbau	7,95	65,57	11,01	29 Main	1,44	41342	16849770	10448875	29839043	493785
2020	2137120007	Stahlwasserbau	3,27	60,54	14,29	33 Neckar	1,77	108981	10946665	7052795	7840398	15923
2020	2137120007	Massivbau	8,51	60,54	22,80	33 Neckar	1,77	108981	10946665	7052795	7840398	15923
2020	2135710001	Stahlwasserbau	3,92	42,49	26,72	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838
2020	2135710001	Massivbau	10,19	42,49	36,91	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838
2020	2133320001	Stahlwasserbau	3,90	33,86	40,81	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091
2020	2133320001	Massivbau	10,15	33,86	50,96	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091
2020	2135916001	Stahlwasserbau	2,89	32,56	53,85	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2020	2135916001	Massivbau	7,52	32,56	61,37	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2020	2133520002	Stahlwasserbau	3,46	29,08	64,83	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2020	2133520002	Massivbau	9,00	29,08	73,83	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2020	2135712004	Stahlwasserbau	2,50	25,54	76,33	24 Lahn	6,23	5685	2077260	18728874	7009995	0
2020	2135712004	Massivbau	6,50	25,54	82,83	24 Lahn	6,23	5685	2077260	18728874	7009995	0

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

2020	2137120004	Stahlwasserbau	3,81	24,19	86,64	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2020	2137120004	Massivbau	9,90	24,19	96,54	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2020	2136920001	Stahlwasserbau	4,30	23,25	100,84	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2020	2136920001	Massivbau	11,19	23,25	112,03	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2020	2133120001	Stahlwasserbau	3,52	20,81	115,55	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2020	2133120001	Massivbau	9,15	20,81	124,70	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2020	2136130002	Stahlwasserbau	3,45	15,27	128,15	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2020	2136130002	Massivbau	8,98	15,27	137,13	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2020	2136124002	Stahlwasserbau	2,94	14,35	140,07	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2020	2136124002	Massivbau	7,65	14,35	147,72	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2020	2135712001	Stahlwasserbau	1,85	-4,81	149,58	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2020	2135712001	Massivbau	4,82	-4,81	154,39	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2020	2135710004	Stahlwasserbau	1,29	-5,79	155,69	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2020	2135710004	Massivbau	3,36	-5,79	159,05	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2020	2133338001	Stahlwasserbau	0,73	-19,97	159,78	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058
2020	2133338001	Massivbau	1,90	-19,97	161,68	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058
2020	2134536006	Stahlwasserbau	1,15	-20,5	162,83	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2020	2134536006	Massivbau	2,98	-20,5	165,81	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2020	2135712006	Stahlwasserbau	1,38	-24,14	167,19	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2020	2135712006	Massivbau	3,59	-24,14	170,78	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2020	2133148005	Stahlwasserbau	0,71	-27,58	171,48	58 Havel	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2020	2133148005	Massivbau	1,84	-27,58	173,32	58 Havel	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2020	2135712005	Stahlwasserbau	1,85	-27,78	175,17	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2020	2135712005	Massivbau	4,82	-27,78	179,99	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2020	2135712003	Stahlwasserbau	1,85	-33,4	181,84	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2020	2135712003	Massivbau	4,82	-33,4	186,66	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2020	2133344003	Stahlwasserbau	1,06	-34,66	187,72	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2020	2133344003	Massivbau	2,76	-34,66	190,49	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2020	2135712002	Stahlwasserbau	1,66	-34,91	192,14	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2020	2135712002	Massivbau	4,30	-34,91	196,45	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2020	2133146009	Stahlwasserbau	0,66	-39,83	197,10	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2020	2133146009	Massivbau	1,71	-39,83	198,81	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2020	2132946004	Stahlwasserbau	0,26	-51,46	199,07	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36
2020	2132946004	Massivbau	0,69	-51,46	199,76	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36
2020	2133138002	Stahlwasserbau	0,34	-54,03	200,10	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2020	2133138002	Massivbau	0,87	-54,03	200,97	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2020	2132534001	Stahlwasserbau	0,83	-68,51	201,80	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2020	2132534001	Massivbau	2,17	-68,51	203,97	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

2021	2135710001	Stahlwasserbau	3,92	42,49	3,92	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838
2021	2135710001	Massivbau	10,19	42,49	14,11	32 Mosel	1,71	61326	11762453	19464620	16086169	37838
2021	2133320001	Stahlwasserbau	3,90	33,86	18,01	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091
2021	2133320001	Massivbau	10,15	33,86	28,16	52 Weser	1,62	19993	10502414	15476247	82114529	71091
2021	2135916001	Stahlwasserbau	2,89	32,56	31,05	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2021	2135916001	Massivbau	7,52	32,56	38,57	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2021	2133520002	Stahlwasserbau	3,46	29,08	42,03	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2021	2133520002	Massivbau	9,00	29,08	51,03	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2021	2137120004	Stahlwasserbau	3,81	24,19	54,84	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2021	2137120004	Massivbau	9,90	24,19	64,74	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2021	2136920001	Stahlwasserbau	4,30	23,25	69,04	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2021	2136920001	Massivbau	11,19	23,25	80,23	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2021	2133120001	Stahlwasserbau	3,52	20,81	83,75	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2021	2133120001	Massivbau	9,15	20,81	92,90	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2021	2136130002	Stahlwasserbau	3,45	15,27	96,35	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2021	2136130002	Massivbau	8,98	15,27	105,33	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2021	2136124002	Stahlwasserbau	2,94	14,35	108,27	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2021	2136124002	Massivbau	7,65	14,35	115,92	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2021	2135712001	Stahlwasserbau	1,85	-4,81	117,78	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2021	2135712001	Massivbau	4,82	-4,81	122,59	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2021	2135710004	Stahlwasserbau	1,29	-5,79	123,89	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2021	2135710004	Massivbau	3,36	-5,79	127,25	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2021	2133338001	Stahlwasserbau	0,73	-19,97	127,98	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058
2021	2133338001	Massivbau	1,90	-19,97	129,88	68 Untere-Havel	0,52	15636	8737206	13672504	48709230	31058
2021	2134536006	Stahlwasserbau	1,15	-20,5	131,03	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2021	2134536006	Massivbau	2,98	-20,5	134,01	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2021	2135712006	Stahlwasserbau	1,38	-24,14	135,39	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2021	2135712006	Massivbau	3,59	-24,14	138,98	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2021	2133148005	Stahlwasserbau	0,71	-27,58	139,68	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2021	2133148005	Massivbau	1,84	-27,58	141,52	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2021	2135712005	Stahlwasserbau	1,85	-27,78	143,37	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2021	2135712005	Massivbau	4,82	-27,78	148,19	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2021	2135712003	Stahlwasserbau	1,85	-33,4	150,04	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2021	2135712003	Massivbau	4,82	-33,4	154,86	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2021	2133344003	Stahlwasserbau	1,06	-34,66	155,92	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2021	2133344003	Massivbau	2,76	-34,66	158,69	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2021	2135712002	Stahlwasserbau	1,66	-34,91	160,34	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2021	2135712002	Massivbau	4,30	-34,91	164,65	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

2021	2133146009	Stahlwasserbau	0,66	-39,83	165,30	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2021	2133146009	Massivbau	1,71	-39,83	167,01	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2021	2132946004	Stahlwasserbau	0,26	-51,46	167,27	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36
2021	2132946004	Massivbau	0,69	-51,46	167,96	61 Obere-Havel	0,51	7778	3779286	17335018	9917662	36
2021	2133138002	Stahlwasserbau	0,34	-54,03	168,30	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2021	2133138002	Massivbau	0,87	-54,03	169,17	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2021	2132534001	Stahlwasserbau	0,83	-68,51	170,00	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2021	2132534001	Massivbau	2,17	-68,51	172,17	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2022	2135916001	Stahlwasserbau	2,89	32,56	2,89	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2022	2135916001	Massivbau	7,52	32,56	10,41	29 Main	0,91	59968	10015922	7887658	19420539	239198
2022	2133520002	Stahlwasserbau	3,46	29,08	13,87	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2022	2133520002	Massivbau	9,00	29,08	22,87	52 Weser	2,19	15289	6571379	15381345	57891249	51703
2022	2137120004	Stahlwasserbau	3,81	24,19	26,68	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2022	2137120004	Massivbau	9,90	24,19	36,58	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2022	2136920001	Stahlwasserbau	4,30	23,25	40,88	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2022	2136920001	Massivbau	11,19	23,25	52,06	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2022	2133120001	Stahlwasserbau	3,52	20,81	55,58	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2022	2133120001	Massivbau	9,15	20,81	64,73	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2022	2136130002	Stahlwasserbau	3,45	15,27	68,19	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2022	2136130002	Massivbau	8,98	15,27	77,17	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2022	2136124002	Stahlwasserbau	2,94	14,35	80,11	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2022	2136124002	Massivbau	7,65	14,35	87,76	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2022	2135712001	Stahlwasserbau	1,85	-4,81	89,62	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2022	2135712001	Massivbau	4,82	-4,81	94,43	24 Lahn	1,89	11962	4534331	11650971	13153144	0
2022	2135710004	Stahlwasserbau	1,29	-5,79	95,73	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2022	2135710004	Massivbau	3,36	-5,79	99,09	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2022	2134536006	Stahlwasserbau	1,15	-20,5	100,24	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2022	2134536006	Massivbau	2,98	-20,5	103,22	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2022	2135712006	Stahlwasserbau	1,38	-24,14	104,60	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2022	2135712006	Massivbau	3,59	-24,14	108,19	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2022	2133148005	Stahlwasserbau	0,71	-27,58	108,89	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2022	2133148005	Massivbau	1,84	-27,58	110,73	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2022	2135712005	Stahlwasserbau	1,85	-27,78	112,58	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2022	2135712005	Massivbau	4,82	-27,78	117,40	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2022	2135712003	Stahlwasserbau	1,85	-33,4	119,25	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2022	2135712003	Massivbau	4,82	-33,4	124,07	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2022	2133344003	Stahlwasserbau	1,06	-34,66	125,13	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2022	2133344003	Massivbau	2,76	-34,66	127,90	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0

(Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Fortsetzung Tabelle 69: Nicht durchgeführte Maßnahmen zu Szenario 1.2.3 (Auszug 2019-2023)

2022	2135712002	Stahlwasserbau	1,66	-34,91	129,55	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2022	2135712002	Massivbau	4,30	-34,91	133,86	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2022	2133146009	Stahlwasserbau	0,66	-39,83	134,51	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2022	2133146009	Massivbau	1,71	-39,83	136,22	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2022	2133138002	Stahlwasserbau	0,34	-54,03	136,55	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2022	2133138002	Massivbau	0,87	-54,03	137,43	68 Untere-Havel	0,27	5903	3122366	16439016	42257867	0
2022	2132534001	Stahlwasserbau	0,83	-68,51	138,26	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2022	2132534001	Massivbau	2,17	-68,51	140,43	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2023	2137120004	Stahlwasserbau	3,81	24,19	3,81	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2023	2137120004	Massivbau	9,90	24,19	13,71	33 Neckar	2,23	31712	6156007	3629069	22576011	22417
2023	2136920001	Stahlwasserbau	4,30	23,25	18,01	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2023	2136920001	Massivbau	11,19	23,25	29,19	33 Neckar	1,22	53854	11020464	6688206	27036787	44389
2023	2133120001	Stahlwasserbau	3,52	20,81	32,71	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2023	2133120001	Massivbau	9,15	20,81	41,86	52 Weser	1,80	11242	7104127	10304222	84585127	35505
2023	2136130002	Stahlwasserbau	3,45	15,27	45,32	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2023	2136130002	Massivbau	8,98	15,27	54,30	38 Regnitz	1,55	43914	9111541	9400092	15668975	0
2023	2136124002	Stahlwasserbau	2,94	14,35	57,24	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2023	2136124002	Massivbau	7,65	14,35	64,89	29 Main	1,59	9325	12043989	11754354	22210453	40649
2023	2135710004	Stahlwasserbau	1,29	-5,79	66,19	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2023	2135710004	Massivbau	3,36	-5,79	69,55	24 Lahn	1,88	15069	4700546	8085518	2563599	0
2023	2134536006	Stahlwasserbau	1,15	-20,5	70,70	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2023	2134536006	Massivbau	2,98	-20,5	73,68	64 Saale	0,98	44405	4241914	4479665	2028464	0
2023	2135712006	Stahlwasserbau	1,38	-24,14	75,06	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2023	2135712006	Massivbau	3,59	-24,14	78,65	24 Lahn	1,36	11110	4248653	13270211	4349120	0
2023	2133148005	Stahlwasserbau	0,71	-27,58	79,35	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2023	2133148005	Massivbau	1,84	-27,58	81,19	58 Havel-Oder	1,09	20058	4518867	5949674	3719422	2976
2023	2135712005	Stahlwasserbau	1,85	-27,78	83,04	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2023	2135712005	Massivbau	4,82	-27,78	87,86	24 Lahn	1,39	8321	2986527	14439767	6377757	0
2023	2135712003	Stahlwasserbau	1,85	-33,4	89,71	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2023	2135712003	Massivbau	4,82	-33,4	94,53	24 Lahn	1,37	3197	1491378	20820276	11664597	0
2023	2133344003	Stahlwasserbau	1,06	-34,66	95,59	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2023	2133344003	Massivbau	2,76	-34,66	98,35	58 Havel-Oder	0,31	12108	8833913	38758470	22099324	0
2023	2135712002	Stahlwasserbau	1,66	-34,91	100,01	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2023	2135712002	Massivbau	4,30	-34,91	104,31	24 Lahn	1,32	3566	1501421	14219660	14197044	0
2023	2133146009	Stahlwasserbau	0,66	-39,83	104,97	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2023	2133146009	Massivbau	1,71	-39,83	106,68	58 Havel-Oder	1,13	3435	2487711	14428628	3038701	4713
2023	2132534001	Stahlwasserbau	0,83	-68,51	107,51	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57
2023	2132534001	Massivbau	2,17	-68,51	109,68	59 Müritz-Elde	0,42	1147	757039	9828036	4628504	57