



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



Expertennetzwerk
Wissen Können Handeln

Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen

Ergebnisbericht des Themenfeldes 3 im BMVI-Expertennetzwerk für die
Forschungsphase 2016 – 2019



Inhalt

Kurzfassung	11
Executive summary	13
1 Hintergrund und Zielstellung	15
1.1 Herausforderung	15
1.2 BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln“	15
1.3 Fachliche Themen.....	16
2 (Weiter-)Entwicklung von Verfahren und Vorgehensweisen für die Erfassung und Beurteilung des Bestands (SPT 301)	19
2.1 Hintergrund und Zielsetzung.....	19
2.2 Vorgehensweise	19
2.3 Projekte	19
2.3.1 Validierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren für Anwendungen im Brücken- und Ingenieurbau.....	21
2.3.2 Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen	26
2.3.3 Unterstützung der Bauwerksprüfung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung	28
2.3.4 Scher- und Zugfestigkeit massiver Bauwerke	30
2.3.5 Hydroabrasionswiderstand von Beton.....	32
2.3.6 Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke (Ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring).....	34
2.3.7 Automatisierte Bilderfassungsverfahren als Ergänzung zur handnahen Inspektion	38
2.4 Zusammenfassung und Ausblick	39
3 Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken der Verkehrsinfrastruktur (SPT 302)	41
3.1 Hintergrund und Zielsetzung.....	41
3.2 Vorgehensweise	41
3.3 Projekte	42
3.3.1 Zuverlässigkeit Brückenbestand.....	42
3.3.2 Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung	44
3.3.3 Zuverlässigkeitsbasierte Expertensysteme	48
3.3.4 Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen.....	50
3.4 Zusammenfassung und Ausblick	53
4 Prognosen/Vulnerabilitätsanalysen und Maßnahmen (SPT 303)	54
4.1 Hintergrund und Zielsetzung.....	54
4.2 Vorgehensweise	54

4.3	Projekte	55
4.3.1	Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen.....	55
4.3.2	Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen.....	58
4.3.3	Ensembleprognosen extremer Wetterereignisse	60
4.3.4	Anpassung des Regelwerks infolge geänderter Randbedingungen	62
4.4	Zusammenfassung und Ausblick	64
5	Ableitung von (Bau-)Maßnahmen unter Betrieb (SPT 304).....	66
5.1	Hintergrund und Zielsetzung.....	66
5.2	Vorgehensweise	66
5.3	Projekte	66
5.3.1	Zukunftsfähigkeit der Verkehrslastmodelle	66
5.3.2	Maximierung der Verfügbarkeit von Bestandsbrücken aus Stahl und Beton	69
5.3.3	Anpassung von Brückenbauwerken an geänderte Nutzungsbedingungen	71
5.3.4	Reparatur bzw. Einsatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion (Smart Repair)	72
5.3.5	Verwendung von standardisierten Eisenbahnüberführungen zur Beschleunigung von Ersatzmaßnahmen	75
5.4	Zusammenfassung und Ausblick	77
6	Entwicklung eines indikatorgestützten Lebenszyklusmanagements für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur.....	78
6.1	Hintergrund und Zielsetzung.....	78
6.2	Untersuchungsmethoden	78
6.3	Ergebnisse.....	79
6.4	Nutzen	79
7	Fazit und Ausblick	81
7.1	Vernetzung und deren Folgen	81
7.2	Verwertung der Ergebnisse	81
7.3	Offene Forschungsfragen	82
7.4	Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase ab 2020	82
8	Literatur	84

Anhang	89
Veröffentlichungen aus Themenfeld 3	89
Allgemein zum Themenfeld 3	89
Veröffentlichungen im SPT 301	89
Veröffentlichungen im SPT 302	92
Veröffentlichungen im SPT 303	93
Veröffentlichungen im SPT 304	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.....	16
Abbildung 2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.....	17
Abbildung 3: Übersicht des Themenfeldes 3.....	18
Abbildung 4: Vergleich zweier Radar-Messungen am selben Testkörper, links 12 Tage nach Betonage, rechts 450 Tage nach Betonage.....	24
Abbildung 5: Auszug aus der Gliederung des Leitfadens	25
Abbildung 6: Modulares ZfP-Zuverlässigkeitsmodell nach Müller et al. (2013).....	25
Abbildung 7: Feuchtesensoren der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und BS2 Sicherheitstechnik GmbH (links); Auswertung der Feuchtesensoren der BS2 Sicherheitstechnik GmbH von 2016 bis 2019 (rechts).....	28
Abbildung 8: Methodisches Grundgerüst für die automatisierte UAS-gestützte Zustandsbewertung von Bauwerken (links); automatisch generierte Befliegungsrouten für einen Brückenpfeiler.....	29
Abbildung 9: Gleiten in der Arbeitsfuge (links), Belastungsschema eines Versuchskörpers während des Rahmen- scherversuchs (Mitte) und Prüfgerät der BAW zur Beurteilung des Schertragverhaltens (rechts).	31
Abbildung 10: Gegenüberstellung der mit dem Rahmenschergerät der BAW bestimmten, korrigierten Messwerte mit den Simulationsergebnissen (links); Ausschnitt aus der betrachteten Probenoberfläche und korrespon- dierende Flächen- sowie Linienprofile zur Beschreibung der Rauheit (rechts, v.l.n.r.).....	32
Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Mikro-Deval-Koeffizient der Gesteinskörnung und Hydroabrasions- verschleiß des Betons.....	34
Abbildung 12: Auf einer gemeinsamen Grundplatte sind verschiedene Neigungssensoren des Neigungsmess- systems installiert (links). Die Messdaten werden kontinuierlich aufgezeichnet und als Zeitreihen (rechts) dargestellt.....	36
Abbildung 13: Colorierte Punktwolken aus der UAS-Befliegung mittels Kamera- (links) und Lasersensoren (rechts).....	36
Abbildung 14: Punktdichten der langzeitstabilen Rückstreuer von TerraSAR X (links) und Sentinel-1 (rechts) im Bereich der Schleusenanlage Hessigheim; ASC = aufsteigender Orbit, DESC = absteigender Orbit	37
Abbildung 15: Schrittweises Vorgehen zur Bewertung bestehender Bauwerke.....	41
Abbildung 16: Das Modell als Abstraktion der realen Welt, in der eine Entscheidung gefällt werden muss	42
Abbildung 17: Methodik des Vorgehens.....	43
Abbildung 18: Exemplarische Ergebnisse einer A-Priori-Zuverlässigkeits-Berechnung.....	45

Abbildung 19: Wellengrube unmittelbar vor der Versuchsdurchführung.....	46
Abbildung 20: Aufnahme mit dem Laserscanner	46
Abbildung 21: Wahrscheinlichkeit eines Deckwerkschadens in Abhängigkeit von der Anzahl der Schiffe (links) und der Zeit (rechts) am Beispiel unterschiedlicher Wasserstraßen (WStr)	47
Abbildung 22: Ablauf einer Risikobewertung mit Hilfe einer FMEA, deren Kennzahl die RPZ ist.....	50
Abbildung 23: Integrale Zustandsbewertung zur Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen (grau: derzeitige Bausteine des EMS-WSV; grün: ergänzende Bausteine durch die FMEA)	51
Abbildung 24: Ermittlung der Zustandsnote eines Bauwerks X; links: allgemeine Zustandsnote; rechts: anforderungsspezifische Zustandsbewertung anhand der Ursache-Wirkungsketten aus einer FMEA.....	52
Abbildung 25: Zuordnung der Ergebnisse der Teilprojekte aus SPT 303 zu den einzelnen Phasen des Resilienzzyklus.....	54
Abbildung 26: Arbeitsschwerpunkte im SPT 303.....	55
Abbildung 27: Bedieneroberfläche des GIS-basierten Software-Prototyps mit Darstellung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Autobahnen und Bundesstraßen (links) und der Lage und Zustandsnoten von Brückenbauwerken (rechts).....	57
Abbildung 28: Grafische Darstellung des Resilienzmanagementprozesses	57
Abbildung 29: Simulation eines Echtzeit-Prognosesystems für die Abfluss- und Stauregelung an der Neckarstauhaltung Hofen am Beispiel eines Starkregenereignisses am 7. Juni 2018 um 18:31 Uhr (UTC) bei konstantem direktem Zufluss über die Staustufe Cannstatt.....	59
Abbildung 30: Niederschlagsmessung mit Radar (oben) im Vergleich zu Ensembleprognosen (Wahrscheinlichkeit für Niederschläge > 0,1mm in 15 Minuten; Mitte) der Systeme ICON-EU-EPS (20 km horizontale Auflösung) und COSMO-D2-EPS (2 km), die jeweils adaptiv optimiert wurden (orange und grün). Die untere Abbildung zeigt die Größe der bei der Adaption gewählten Umgebung	61
Abbildung 31: Entwicklung des Transportaufkommens in Deutschland [Mio. t p. a.].....	68
Abbildung 32: Ausgebesserte Versuchsprobenplatten in der Belastungsphase durch kontinuierlichen Salzsprühnebel zur beschleunigten Alterung mit erhöhtem Korrosionsdruck.....	74
Abbildung 33: Konzept des LZM	78
Abbildung 34: PDCA-Zyklus für ein verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projekte im SPT 301	20
Tabelle 2: Auszug der Zuordnung Prüfaufgabe/Verfahren für Beton.....	22
Tabelle 3: Projekte im SPT 302	43
Tabelle 4: Ableitung von Indikatoren aus den Wertekategorien.....	49
Tabelle 5: Projekte im SPT 303	56
Tabelle 6: Gliederung der zu erwartenden Auswirkungen	63
Tabelle 7: Projekte im SPT 304	67
Tabelle 8: Verstärkungstechniken	72

Abkürzungsverzeichnis

AHP	engl. <i>analytic hierarchy process</i>
AP	Arbeitspaket
ArcGIS	Geoinformationssystem-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BinSchLV	Verordnung über Lade- und Löschzeiten
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
COSMO-DE	COSMO-Modell (Consortium for Small-Scale Modelling) des DWD für Ausschnitt Deutschland
DB	Deutsche Bahn
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTSV	Durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
duraBASt	Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der Bundesanstalt für Straßenwesen
DWD	Deutscher Wetterdienst
DZSF	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
ELM	Ermüdungslastmodell
EMS	Erhaltungsmanagementsystem
EN	Europäische Normung
EPS	Ensemblevorhersagesystem
FAB	Fachausschuss "ZfP im Bauwesen"
FMEA	engl. <i>failure mode and effects analysis</i> – Fehlermöglichkeiten- und Auswirkungsanalyse
FORM	engl. <i>first-order reliability method</i>
GBB	Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen
GIS	Geoinformationssystem
GUM	engl. <i>guide to the expression of uncertainty in measurement</i> – Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen

ICON-EU	engl. <i>ICOsabedral Non-hydrostatic global circulation model</i> für Europa
IMB	Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
ISO	engl. <i>International Organization for Standardization</i>
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LiDAR	engl. <i>light detection and ranging (laser radar)</i>
LZM	Lebenszyklusmanagement
MCDA	engl. <i>multi-criteria decision analysis</i> – multikriterielle Entscheidungsfindung
NDT	engl. <i>nondestructive testing</i>
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PDCA-Zyklen	Plan, Do, Check, Act-Zyklen
PIANC	engl. <i>Permanent International Association of Navigation Congresses</i> (Verband zum internationalen Austausch im Bereich Schifffahrt und Wasserstraße)
PIARC	engl. <i>Permanent International Association of Road Congresses</i> (Welt-Straßenverband)
PROMETHEE	engl. <i>preference ranking organisation method for enrichment evaluation</i>
PSInSAR	engl. <i>persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar</i>
PVA	Personenverkehrsanlagen (Bahnhöfe)
RI	Robustheitsindex
RI-EBW-PRÜF	Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen
RPZ	Risikoprioritätszahl
SI	Schadensindex
SIB-Bauwerke	Straßeninformationsbank Bauwerke
SPT	Schwerpunktthema
SWOT-Analyse	Analyseansatz hinsichtlich Strengths(Stärken)-Weaknesses(Schwächen)-Opportunities(Chancen)-Threats(Risiken)
TerraSAR-X	Deutscher Erdbeobachtungssatellit
TF	Themenfeld
TIGGE	The International Grand Global Ensemble (Stellt globale Ensemble-Vorhersagen von 10 verschiedenen Wettervorhersagezentren für die Forschung bereit)
TOPSIS	engl. <i>technique for order preference by similarity to ideal solution</i>
TRB	engl. <i>Transportation Research Board</i>
TU	Technische Universität

UA-QS	Unterausschuss "Qualitätssicherung" des FAB
UAS	engl. <i>unmanned aerial system</i> – unbemanntes Flugsystem
UAV	engl. <i>unmanned, uninhabited or unpiloted aerial vehicle</i>
UB	Unterbau
ÜB	Überbau
UTC	engl. <i>Universal Time Coordinated</i>
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WStr	Wasserstraße
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
WSVPruf	Software zur Dokumentation von Schäden im Rahmen der Bauwerksinspektion an Wasserstraßen
XM	Expositionsklasse XM (Mechanical Abrasion)
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung
ZfPBau	zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen

Kurzfassung

Eine aktuelle Herausforderung für die Verkehrsinfrastrukturen Straße, Schiene und Wasserstraße besteht darin, diese funktionsfähig zu halten bzw. deren Funktionsfähigkeit wo notwendig wieder herzustellen. Daher ist es Ziel der Arbeiten im Themenfeld "Verlässlichkeit von Verkehrsinfrastrukturen erhöhen" (Themenfeld 3) des BMVI-Expertenetzwerks diejenigen Bereiche zu identifizieren und zu bearbeiten, die zusammen den größtmöglichen Einfluss auf die Erhöhung der Funktionsfähigkeit und damit der Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen mit Fokus auf die Ingenieurbauwerke haben.

Die identifizierten Bereiche sind:

- (a) Erfassung und Beurteilung des Bestandes,
- (b) Beurteilung der Zuverlässigkeit von Bauwerken der Verkehrsinfrastrukturen,
- (c) Prognosen, Vulnerabilitätsanalysen und Maßnahmen,
- (d) Baumaßnahmen unter Betrieb.

Zu (a): Der wichtigste Ausgangspunkt zur Beurteilung der gegenwärtigen und prognostizierten Leistungsfähigkeit von Ingenieurbauwerken ist die Betrachtung des Zustands, um auf dessen Grundlage geeignete Maßnahmen zur Gewährleistung bzw. Wiederherstellung eines optimalen Zustandes ableiten zu können. Welche Schäden, Mängel und Funktionseinschränkungen weisen diese Bauwerke heute und in Zukunft auf bzw. wie ist das Materialverhalten bezüglich der geforderten Nutzung realitätsnäher zu bewerten?

Folgende Ergebnisse sind erarbeitet worden:

- Ein Katalog zeigt den Anwendern Möglichkeiten und Grenzen von zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) auf und trifft Aussagen zur Qualität dieser Verfahren als Grundlagen für Ausschreibungen.
- Ein Monitoring an Ingenieurbauwerken gibt genauere Informationen zum aktuellen Zustand und zu Veränderungen von Bauwerken. Der Einsatz von Monitoring wurde optimiert und dessen Nutzen monetarisiert.

- Technologische Entwicklungen wie z. B. der Einsatz von UAS (unmanned aerial systems) in Verbindung mit künstlicher Intelligenz ermöglichen eine schnellere, zuverlässige und digitale Erfassung und Speicherung von Bauwerkskenngrößen und deren Veränderungen. Erste Anwendungen sind erfolgt.
- Eine realitätsnähere Beurteilung von Materialkennwerten durch neue Versuchs- und Auswerteverfahren ist entwickelt worden und unterstützt die Anwender in ihrer Arbeit.

Zu (b): Für die Zukunftsfähigkeit der Verkehrsinfrastrukturen ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus der Ingenieurbauwerke zu beurteilen. Hierfür ist ein verkehrsträgerübergreifendes Konzept für ein Lebenszyklusmanagement (LZM) entwickelt worden, das

- sich auf bekannte und neueste Methoden der Zustandserfassung und -bewertung abstützt,
- zukünftig zu erwartendes Verhalten mit abbildet und
- den Sprung von einer deterministischen zur zuverlässigkeits- und risikobasierten Sichtweise ermöglicht.

Unterschiedliche Methoden und Vorgehensweise sind untersucht und bewertet worden, die ihre speziellen Einsatzgebiete und Grenzen haben. Somit stehen dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und den Baulastträgern für unterschiedliche Anwendungen geeignete Entscheidungsunterstützungssysteme zur Verfügung.

Zu (c): Zur Berücksichtigung von ungeplanten und unerwünschten Ereignissen, z. B. Hochwasser oder Brand, sind

- Konzepte und Methoden zur Beurteilung und Prognose sowohl der Sicherheit als auch der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur entwickelt,
- mit Handlungshilfen versehen und
- pilothaft angewendet worden.

Diese erlauben langfristige Strategien für die Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit der Verkehrsinfrastrukturen, liefern aber auch elementare Grundlagen für ein ereignisbezogenes Präventions- und Krisenmanagement.

Des Weiteren erfolgte

- die Entwicklung geeigneter Methoden, welche eine ganzheitliche, konzeptionelle und systematische Beurteilung der Systemresilienz ermöglichen, um die Funktionsfähigkeit sowie den Betrieb einer Verkehrsinfrastruktur nach außergewöhnlichen Ereignissen aufrechtzuerhalten bzw. möglichst schnell wiederherzustellen.
- eine exemplarische Anwendung entwickelter Strategien für eine robuste Abflussregelung von Stauhaltungen der Wasserstraßen bei Starkregenereignissen. Dazu wurden erstmalig komplexe Wetter-Simulationen durchgeführt und in einem solchen Konzept berücksichtigt.

Zu (d): Ein wichtiger Bestandteil eines LZM ist die Auswahl der "richtigen", technisch sinnvollen und wirtschaftlichen (Bau-)Maßnahmen im Zuge des Lebenszyklus der Bauwerke. Es ist gezeigt worden, dass

- mit "Smart Repair" für Beschichtungssysteme, frühzeitig kleine Maßnahme mit geringem Einfluss auf die Nutzer die Dauerhaftigkeit von Bauteilen erheblich verlängern können,
- Ersatzneubauten durch einen verstärkten Einsatz von standardisierten Vorgehensweisen schneller und mit weniger Eingriffen in den Verkehr durchgeführt werden können,
- Bauwerke so zu konstruieren sind, dass spätere Anpassungen bzw. Tragfähigkeitserhöhungen ohne größeren Aufwand möglich sind.

Damit wird eine Beschleunigung des Bauens bzw. der Instandhaltung bei gleicher oder sogar höherer Qualität ermöglicht und im Sinne einer resilienten Verkehrsinfrastruktur eine schnelle Wiederherstellung der ursprünglichen Funktionalität erreicht.

Diese gewonnenen Erkenntnisse werden in der nächsten Phase mit Anwendern diskutiert und ggf. entsprechend angepasst werden, damit das BMVI-Expertenetzwerk seinem Anspruch "WISSEN – KÖNNEN – HANDELN" gerecht wird. Erst wenn die Forschungsergebnisse in der Praxis angewendet werden, ist dieser Anspruch erfüllt.

Executive summary

The railway, road and waterway transportation authorities are faced with the ongoing challenge of maintaining and eventually restoring the functionality of their infrastructure portfolio. Thus, to assess structural reliability of these structures, the Topic "Enhancing the Reliability of Transport Infrastructures" (Topic 3) was initiated within the framework of the BMVI Network of Experts. The scope of the activities of the Topic 3 consists of identifying and addressing those fields which, when taken together, have a maximum impact on enhancing the functionality, and thus, the reliability of transport infrastructures with a focus on civil engineering structures.

The fields identified are:

- (a) Inventory and assessment of condition of the existing stock
- (b) Assessment of engineering of transport infrastructure
- (c) Forecasting and vulnerability analysis
- (d) Construction work with traffic

Re (a): The most important starting point for assessing the present and forecast capacity of civil engineering structures is an assessment of their structural condition. On this basis, suitable measures for ensuring or restoring an optimum condition can be derived. What damage, defects and functional constraints do these structures exhibit today or may exhibit in the future? How is their material behaviour with regard to their lifetime assessed in a more realistic manner?

The following results have been obtained:

- A catalogue shows users the possibilities and limitations of non-destructive testing procedures and makes statements on the quality of these procedures, serving as a basis for invitations to tender.
- Monitoring of civil engineering structures provides more precise information on the current condition and changes, occurring within the structures. The deployment of monitoring has been optimized and its use monetized.

- Technological developments such as the deployment of unmanned aerial systems (UAS) in combination with artificial intelligence are used to record and store structure parameters and their changes more quickly, reliably and in a digital form. First applications have been carried out.

- A more realistic assessment of material characteristics through new experimental and evaluation procedures has been developed and is supporting the users in their work.

Re (b): To future-proof transport infrastructure, it is necessary to assess the whole lifecycle of the civil engineering structures. For this purpose, a cross-modal approach to lifecycle management has been developed that:

- is based on familiar and the most up-to-date methods of condition surveying and assessment;
- also reflects behaviour likely in the future; and
- allows a move from a deterministic perspective to an approach based on reliability and risk.

Various methods and approaches of different specific fields of application, including their limitations have been studied and assessed. Thus, several decision-making support systems are suggested to the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) and the authorities in charge of construction and maintenance activities for various applications.

Re (c): In order to consider unplanned and adverse events, such as flooding or fire,

- strategies and methods for the assessment and forecasting of both the safety and the availability of transport infrastructure have been developed,
- provided with toolkits and
- applied to pilot projects.

They serve for the development of long-term strategies for enhancing the availability and safety of transport infrastructure as well as providing elementary bases for event-driven prevention and crisis management.

In addition:

- appropriate methods have been developed that allow the assessment of system resilience in a holistic, conceptual and systematic manner in order to maintain or restore as quickly as possible the functionality and availability of transport infrastructure after exceptional events;
- there has been a showcase application of strategies developed for robust discharge control of reaches in impounded waterways in the case of intense rainfall. To this end, and for the first time, complex weather simulations have been carried out and considered in the strategy.

Re (d): A key element of lifecycle management is the selection of the "right", technologically appropriate and economically viable (construction) works over the course of the lifecycle of the structures. It has been shown that:

- by carrying out "smart repair" for coating systems, minor maintenance works performed at an early stage and with minor impediments for users can significantly extend the durability of components;
- by making greater use of standardized approaches, the replacement of structures can be achieved more quickly and with less traffic disruption;
- structures are to be designed such that subsequent adaptations and/or increases in load-bearing capacity are possible without great effort or expenditure.

This enables the acceleration of construction and maintenance activities with the same or even higher quality and, with specific reference to resilient transport infrastructure, the quick restoration of the original functionality.

In the next phase, these findings will be discussed with users and adapted if necessary to comply with the motto of the BMVI Network of Experts "KNOWLEDGE – ABILITY – ACTION". Only when the research findings are implemented into practical application this ambition will be fully met.

1 Hintergrund und Zielstellung

Der vorliegende Bericht des Themenfeldes 3 zu den Ergebnissen der 1. Phase des BMVI-Expertennetzwerks ist so aufgebaut, dass der Bericht als Ganzes, aber auch die Abschnitte einzeln lesbar sind. Aus diesem Grund enthalten diese jeweiligen Abschnitte Einleitungstexte, die sich teilweise ähneln, da die Hintergründe für die jeweils behandelte Fragestellung gleich oder ähnlich sind. Dieses dient einem besseren Verständnis, wenn nur einzelne Kapitel gelesen werden.

1.1 Herausforderung

Vor dem Hintergrund der teilweise ungünstigen Altersstruktur der Verkehrsinfrastrukturen, veränderter bzw. zusätzlicher Einwirkungen sowie begrenzter Haushaltsmittel sind erhebliche Anstrengungen hinsichtlich einer optimierten, koordinierten Erhaltung, Ertüchtigung und Ersatzes des Bestandes erforderlich, um auch zukünftig die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastrukturen sicherstellen zu können. So hat die Zunahme des Güterverkehrs dazu geführt, dass der Brückenbestand der Bundesfernstraßen bereits heute zu einem signifikanten Anteil bis an die Grenze seiner Leistungsfähigkeit beansprucht wird. Es ist davon auszugehen, dass der für die Zukunft prognostizierte Güterverkehr ohne gezielte Ertüchtigungs- und Ersatzmaßnahmen nicht ohne Weiteres aufgenommen werden kann.

Da die bisher vorhandenen Werkzeuge und Methoden zur Lösung der o. g. Fragestellungen nur bedingt geeignet sind, ergab sich die Notwendigkeit gezielter Forschung mit dem Ziel, die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Infrastruktur weiter zu gewährleisten und die vorhandenen Ressourcen priorisiert und hocheffizient einsetzen zu können. Daraus ergibt sich die Frage nach belastbaren Informationen zur Sicherheit und Zuverlässigkeit der Verkehrsinfrastruktur aktuell und für ihren Lebenszyklus. Dabei zielen die wissenschaftlichen Erkenntnisse auf die Lösung sowohl kurzfristig anstehender Praxisaufgaben als auch auf mittel- bis langfristig ausgerichtete, praxisorientierte Strategien, Konzepte und Instrumente ab. Die bei der Erstellung von Verkehrsinfrastrukturen angewandten Nachweisgrundsätze und Sicherheitsformate entsprechen zum Teil nicht mehr den heute anzusetzenden Anforderungen. Sich verändernde Einwirkungen sowie zunehmendes Bauwerkalter lassen die Zuverlässigkeit der Bauwerke mit den Jahren

abnehmen. Neben der technischen Zuverlässigkeit treten verstärkt die Aspekte der betrieblichen (verkehrlichen) Zuverlässigkeit in Form der Verfügbarkeit auf. Infrastruktur muss hierbei als Ganzes gesehen werden, sodass nicht nur der Verfügbarkeit eines einzelnen Verkehrsträgers Rechnung getragen werden muss, sondern die Verkehrssysteme im Zusammenhang zu sehen sind.

Hinsichtlich der technischen Zuverlässigkeit ist immer öfter zu prüfen, ob bestehende Bauwerke nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik sicher sind, weshalb Regelwerke für den Bestand entwickelt bzw. angepasst werden müssen (z. B. Nachrechnungsrichtlinie). Diese Regelwerke müssen in Zukunft ggf. weitere als nur technische Kriterien für die Bewertung bestehender Bauwerke enthalten. Dafür müssen im Vorfeld Verfahren konzipiert und entwickelt werden, die eine gesamtwirtschaftliche Betrachtungsweise ermöglichen. Im Betrieb von Infrastrukturen muss die Verfügbarkeit für den Nutzer mit möglichst wenigen Einschränkungen verbunden sein. Geeignete und akzeptierte Zuverlässigkeitskonzepte bzw. Verfügbarkeitsansätze aus zum Beispiel nicht-bautechnischen Bereichen müssen auf ihre Anwendbarkeit auf Verkehrsinfrastrukturen bewertet und ggf. adaptiert werden. Diesen Herausforderungen haben sich die Wissenschaftler gestellt und Lösungen bzw. entsprechende Ansätze entwickelt, die im Folgenden dargestellt werden.

1.2 BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln"

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat im Jahr 2016 die Gründung des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln veranlasst, um das Zusammenwirken seiner Ressortforschungseinrichtungen und Behörden hinsichtlich verkehrsträgerübergreifender Forschung zu fördern. Erstmals wurde damit in der Ressortforschung ein verkehrsträgerübergreifendes Forschungsnetzwerk entwickelt, erprobt und etabliert.

Im BMVI-Expertennetzwerk forschen das Bundesamt für Güterverkehr (BAG), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Deutsche Wet-

terdienst (DWD) und das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrs-forschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF/ EBA) zusammen. Mehr als 70 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit unterschiedlichen Kompetenzen for-schen vernetzt und transdisziplinär, um Lösungsansätze zu zukunftsorientierten Fragestellungen rund um das Ver-kehrssystem zu erarbeiten. Dabei sind die Forscherinnen und Forscher in die Behörden eingebettet und werden dort fachlich und organisatorisch unterstützt. Die Abstimmung zu den Forschungsinhalten und den organisatorischen Ab-läufen erfolgt zwischen BMVI, Bundesoberbehörden und Expertinnen und Experten (Abbildung 1). Dadurch wird eine praxisorientierte fachwissenschaftliche Beratung des BMVI sichergestellt.

Der Forschungsprozess wird darüber hinaus von kontinu-ierlicher Interaktion mit Anwenderinnen und Anwendern begleitet, z. B. mit den Landesstraßenbaubehörden, der Deutschen Bahn AG und der Wasserstraßen- und Schiff-fahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Dieser Praxisbezug er-möglicht die zielgerichtete Entwicklung von anwendungs-orientierten Innovationen.

Die Vision des BMVI-Expertennetzwerks ist es, das Ver-kehrssystem resilient und umweltgerecht zu gestalten. Das BMVI-Expertennetzwerk stellt hierfür wissenschaftlich fundierte Grundlagen bereit. In diesem neuen Forschungs-format in der Ressortforschung wurden verkehrsträger-übergreifende Ziele definiert und in der Forschungsstra-

tegie 2030 (BMVI-Expertennetzwerk 2018) festgehalten. Dieser strategische Forschungsrahmen beschreibt den Umgang des BMVI-Expertennetzwerks mit Herausfor-derungen wie Klimawandel, Umweltschutz, Alterung der In-frastruktur sowie Digitalisierung und zeigt den Weg auf, wie die Vision schrittweise erreicht werden kann (Abbildung 2).

Zur Gewährleistung einer effizienten Bearbeitung der wis-senschaftlichen Fragestellungen wurde die Forschung in Themenfelder gegliedert (Abbildung 2). Die Arbeiten in den Themenfelder 1 bis 3 wurden bereits 2016 aufgenommen. Die Themenfelder 4 und 5 wurden in Form von Pilotpro-jekten ab 2017 bearbeitet. 2019 wurde das Themenfeld 6 etabliert. Die sechs Themenfelder des BMVI-Expertennetz-werks ergänzen sich inhaltlich und schaffen Grundlagen, um die Forschungsstrategie 2030 im Dialog mit Anwende-rinnen und Anwendern erfolgreich umsetzen zu können.

Vorliegender Bericht stellt die Ergebnisse des Themenfel-des 3 aus der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2016–2019) dar. Die Forschungsergebnisse wurden unter Koordination durch die BAST von dieser, BAW, BfG, DWD und DZSF/EBA gemeinschaftlich erarbeitet.

1.3 Fachliche Themen

Da sich eine Vernetzung von Experten der verschiede-nen Behörden und Ressortforschungseinrichtungen des

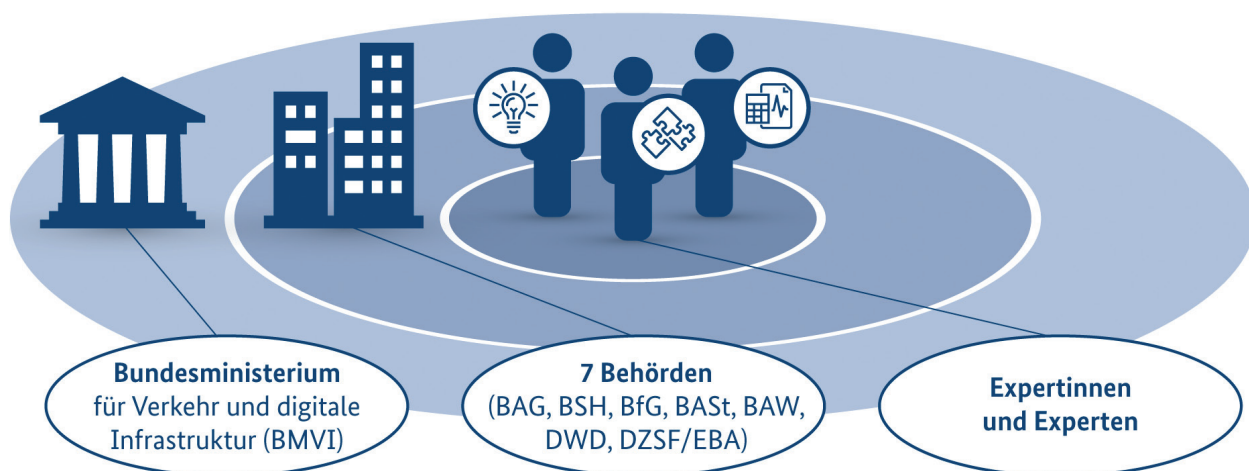


Abbildung 1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.

FORSCHUNGSSTRATEGIE 2030

Das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht gestalten



Abbildung 2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.

BMVI am besten anhand von praktischen und alle Behörden betreffenden Fragestellungen herstellen lässt und die beschriebene Situation der Verkehrsinfrastrukturen entsprechenden Handlungsbedarf liefert, sind vier fachliche Schwerpunktthemen (SPT) zur Bearbeitung ausgewählt worden, die sowohl die Objekt- als auch die Netzebene und Zustandsbewertung bis hin zu (Bau-)Maßnahmen enthalten (Abbildung 3).

Diese sind ausgewählt worden, da sie den Handlungsbogen vom Erkennen und Bewerten des Istzustandes bis zur Optimierung der Durchführung von Maßnahmen sowohl für planmäßige, als auch für außerplanmäßige Einwirkungen abdeckt.

Diese SPTs sind:

- Erfassung und Beurteilung des Bestands (SPT 301),
- Beurteilung der Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken der Verkehrsinfrastruktur (SPT 302),
- Prognosen und Vulnerabilitätsanalysen (SPT 303) sowie
- Ableitung von (Bau-)Maßnahmen unter Betrieb (SPT 304).

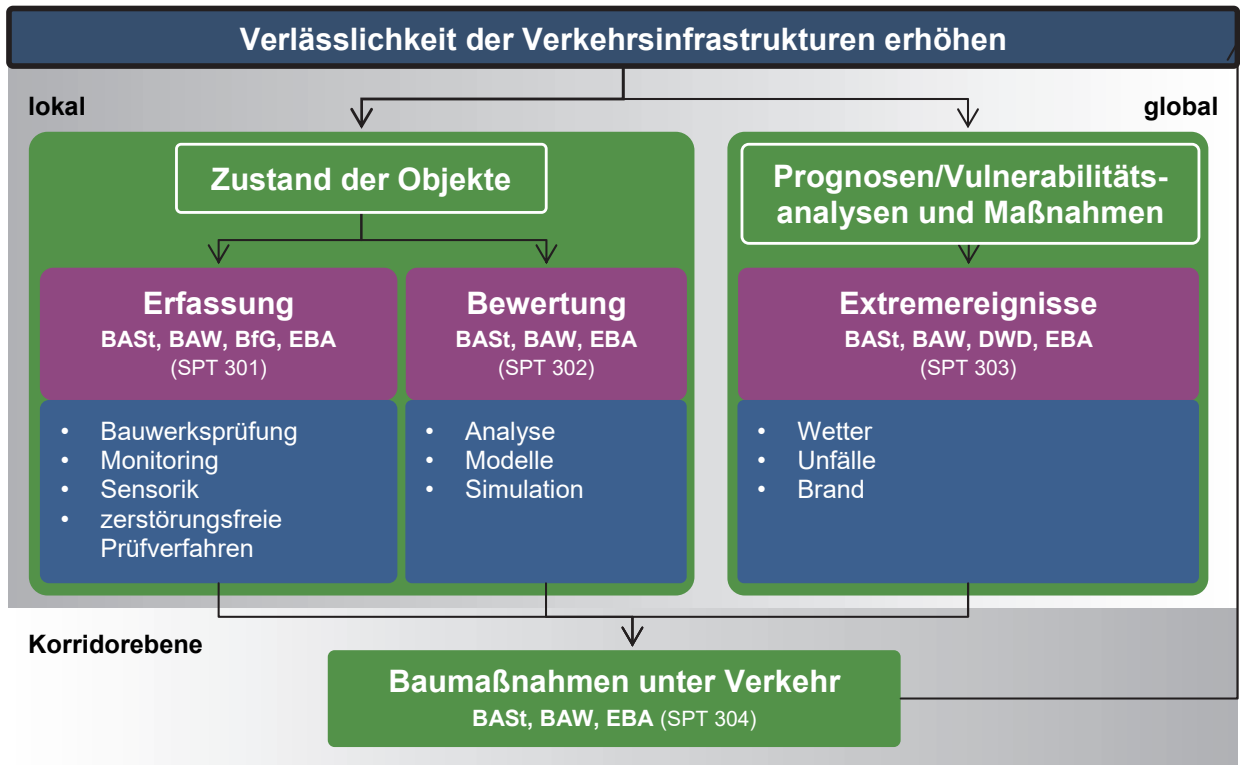


Abbildung 3: Übersicht des Themenfeldes 3.

2 (Weiter-) Entwicklung von Verfahren und Vorgehensweisen für die Erfassung und Beurteilung des Bestands (SPT 301)

2.1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Infrastrukturbauwerke von Straße, Schiene und Wasserstraße weisen häufig ein hohes Alter auf und haben vielfach ihre bei der Errichtung geplante Nutzungsdauer überschritten. Ein hohes Alter bedeutet nicht zwingend einen schlechten Zustand, kann aber zunehmend Schäden zur Folge haben, die einen hohen Unterhaltungsaufwand erfordern und die Verfügbarkeit der Anlagen einschränken. Zu große Differenzen zwischen geplanten und verausgabten Finanzmitteln sowie ein kontinuierlicher Personalabbau während der vergangenen Jahrzehnte haben darüber hinaus einen erheblichen Maßnahmenstau erzeugt. Diese Effekte überlagern sich vielfach mit zunehmenden Belastungen aufgrund des Anwachsens der Verkehrsströme und steigender Beanspruchungen sowie durch Auswirkungen des Klimawandels in Form von häufigeren extremen Wetterereignissen. Basis aller Maßnahmen zur Lösung dieses Problems ist detailliertes Wissen über Zustand und Zustandsentwicklung der Verkehrsinfrastrukturobjekte. Nur so ist es möglich, Entscheidungen über Zeitpunkt und Maßnahme (Instandsetzung/Neubau) optimal zu treffen.

Das Ziel dieses Schwerpunktthemas ist es, Erkenntnisse, Verfahren und Vorgehensweisen bereitzustellen, die eine bessere Erfassung und Bewertung des Zustandes der bestehenden Infrastruktur und eine realitätsnahe Abschätzung der weiteren Zustandsermittlung ermöglichen. Mithilfe solcher Verfahren und Vorgehensweisen wird es möglich werden, den optimalen Eingreifzeitpunkt für erforderliche Instandsetzungs- bzw. Ersatzmaßnahmen festzulegen, um die beschränkten Ressourcen optimal einsetzen zu können.

2.2 Vorgehensweise

Die beschriebene Ausgangssituation erfordert maßgeschneiderte Lösungen für die einzelnen Objekte bzw. Objektarten. Aufgrund des Maßnahmenstaus ist es zwingend erforderlich, Dauerhaftigkeits- und Tragreserven im Bauwerk zu mobilisieren und möglichst viele Objekte weiter zu erhalten. Hierbei geht es zum einen um die Bewertung der

Leistungsfähigkeit und des Nutzens von zerstörungsfreien Prüfverfahren, der Verfahren zur Dauerüberwachung sowie um die Einbindung von Inspektions- und Überwachungsmaßnahmen in Ertüchtigungsstrategien, z. B. im Hinblick auf eine mögliche Kompensation von Defiziten.

Als Ergebnis koordinierter Forschung werden zielführende Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bauwerken der Verkehrsinfrastrukturen und zur Nutzung von Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) sowie von Ansätzen der messtechnischen Dauerüberwachung bereitgestellt werden.

Die Bearbeitung erfolgte systematisch:

- a) Schaffung der Arbeitsgrundlagen,
- b) Erhebung des Sachstands und Ermittlung von Defiziten,
- c) Ausarbeitung, Analyse und Bewertung konzeptioneller Lösungen und
- d) Durchführung von Pilotstudien zur Erfahrungssammlung und Demonstration der Projektergebnisse.

Im SPT 301 wurden dazu einerseits Verfahren zur zerstörenden und zur zerstörungsfreien Ermittlung von Materialparametern untersucht, Bemessungsansätze geprüft und ggf. optimiert. Exemplarisch sei hier die Scherproblematik bestehender Bauwerke genannt. Zum anderen sollten geodätische und physikalische Messverfahren zur Bauwerksuntersuchung und -überwachung sowohl auf der Widerstands- als auch der Einwirkungsseite analysiert und weiterentwickelt werden.

2.3 Projekte

Das Schwerpunktthema "(Weiter-)Entwicklung von Verfahren und Vorgehensweisen für die Erfassung und Beurteilung des Bestandes" wurde in nachfolgend beschriebenen Projekten bearbeitet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Projekte im SPT 301.

Behörde	Titel	Projektleiter/-in
BASSt DZSF/EBA	Validierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren für Anwendungen im Brücken und Ingenieurbau Weiterentwicklung von zerstörungsfreien Prüfverfahren für Anwendungen im Brücken- und Ingenieurbau Berührende Messverfahren zur Strukturanalyse Schlüsselworte (DE): ZfP, ZfPBau, zerstörungsfreie Prüfverfahren Keywords (EN): condition detection, non-destructive testing, concrete damage, masonry damage, process description	Dr. Martin Friese Markus Reinhardt
BASSt	Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen Schlüsselworte (DE): Brücke, Monitoring, Sensor Keywords (EN): bridge, monitoring, sensor	Dr. Iris Hindersmann
BASSt	Unterstützung der Bauwerksprüfung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung Schlüsselworte (DE): Bauwerksprüfung, UAS, Bildauswertung, machine learning, Risserkennung Keywords (EN): building inspection, UAS, image analysis, machine learning, crack detection	Rolf Rabe Dr. Martin Friese (Autor*)
BAW	Scher- und Zugfestigkeit massiver Bauwerke Schlüsselworte (DE): Schertragverhalten, Betonfuge, Materialgesetz Keywords (EN): shear-friction behavior, concrete joint, material law	Dr. Viktória Malárics-Pfaff Dr. Thorsten Reschke
BAW	Hydroabrasionswiderstand von Beton Schlüsselworte (DE): Hydroabrasion, Beton, Dauerhaftigkeit, Exposition, Performance Test Keywords (EN): hydroabrasion, concrete, durability, exposure, performance tests	Dr. Frank Spörel
BfG	Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke (Ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring) Schlüsselworte (DE): Ingenieurgeodäsie, Neigungsmessungen, UAV, Photogrammetrie, Radarinterferometrie Keywords (EN): geodetic engineering, inclination measurement, UAV, photogrammetry, radar interferometry	Mehdi Fedan
DZSF/EBA	Automatisierte Bilderfassungsverfahren als Ergänzung zur handnahen Inspektion Schlüsselworte (DE): Schadensbewertung, Schadenskategorisierung, Bildauswertung Keywords (EN): damage assessment, damage categorization, image analysis	Markus Reinhardt

* hier ist der Autor nicht der Projektleiter

2.3.1 Validierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren für Anwendungen im Brücken- und Ingenieurbau

2.3.1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) erweitern die Möglichkeiten der klassischen, handnahen (und hauptsächlich visuellen) Bauwerksprüfung um Methoden, die Informationen aus dem Bauteilinnern liefern. Das Einsatzpotenzial der ZfPBau-Verfahren liegt unter anderem in folgenden Bereichen: Qualitätssicherung im Neubau, Schadensdiagnose und Ermittlung oder Verifizierung von Bestandsplänen (bspw. als Grundlage für eine statische Nachrechnung oder für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen).

Leider sind diese Einsatzmöglichkeiten und insbesondere die Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Verfahrenstypischen Anwendern auf Seiten der Baulastträger oft nicht ausreichend bekannt, was nicht zuletzt an der Verfügbarkeit entsprechender – nicht interessensgesteuerter – Informationen liegt. Daher sind vier verkehrsträgerübergreifende Arbeitspakete (AP) mit dem Fokus Brückenbau initiiert worden:

- AP1: Verfahrenskatalog ZfPBau: Unmittelbares Ziel ist die Bereitstellung eines prüfaufgabenorientierten Verfahrenskatalogs für ZfPBau-Verfahren als unabhängige Informationsquelle für Anwender z. B. auf Seiten der Baulastträger. Anwender können in diesem Katalog z. B. eine Prüfaufgabe selektieren und bekommen geeignete ZfPBau-Verfahren nebst kompakten, einheitlich aufgebauten Verfahrensbeschreibungen präsentiert.
- AP2: Bewehrungsortung/Betondeckungsmessung: Die Überdeckung der schlaffen Bewehrung ist ein wichtiger Qualitätsparameter im Stahlbetonbau. Sowohl zu geringe (Dauerhaftigkeitsproblem) als auch deutlich zu große (Rissbreite) Betondeckungen stellen Mängel dar. Für Ingenieurbauwerke existiert derzeit kein geeignetes Nachweisformat, um die Einhaltung der Mindestbetondeckung zu gewährleisten. Ziel des AP2 sind grundlegende Untersuchungen zu Verfahrenseignung und Messunsicherheiten, die einen Baustein bei der Entwicklung eines solchen Nachweisformats darstellen.

- AP3: Leitfaden "Ermittlung geometrischer, mechanischer und materialtechnischer Kennwerte an Ingenieurbauwerken aus Stahlbeton/Spannbeton mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren": Ziel ist es, Anwendern (Baulastträger, Ingenieurbüros und ZfPBau-Dienstleister) einen praxisgerechten Leitfaden zum ZfPBau-Einsatz zur Verfügung zu stellen. Der Fokus lag auf der Ermittlung geometrischer, mechanischer und materialtechnischer Kennwerte, wie sie z. B. als Grundlage für eine statische Nachrechnung des Bauwerks benötigt werden.
- AP4: Weitere Untersuchungen zur ZfPBau-Zuverlässigkeit sowie Gremienarbeit: Ziel der Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von ZfPBau-Lösungen ist es, Anwendern verlässliche Informationen zu Einsatzgrenzen von ZfPBau-Verfahren zur Verfügung zu stellen. Außerdem deckt dieses AP verschiedene Aktivitäten in Gremien ab, die größtenteils dem Transfer vorhandenen Wissens in Regelwerke dienen. Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Schaffung von Grundlagen für eine Qualifizierung von Prüfpersonal der ZfPBau.

2.3.1.2 Untersuchungsmethoden

AP1: Verfahrenskatalog ZfPBau

Zunächst erfolgte die Zusammenstellung von Prüfaufgaben und ZfPBau-Lösungen für Bauwerke aus (Stahl-)Beton und Mauerwerk. In einem zweiten Schritt erfolgte diese Zusammenstellung für Bauwerke aus Stahl. Die Erstellung der Logik zur Verknüpfung und Bewertung der Technologien war ebenfalls Gegenstand des zweiten Projekts. Bereits vorhandene Verfahrenskataloge haben das Manko, dass die Verfahrensauswahl unübersichtlich war. In diesem Projekt wurde daher ein deutlicher Fokus auf Praxisrelevanz gelegt, nur praxistaugliche Verfahren wurden in den Katalog aufgenommen.

Im ersten Schritt wurde exemplarisch für wenige Verfahren eine geeignete Struktur erarbeitet (Taffe und Wiese 2019) und mit dem forschungsbegleitenden Ausschuss festgelegt. Die Struktur wurde offen und flexibel angelegt, um den Katalog später um weitere Fragestellungen (z. B. aus dem Bereich des Wasserbaus) und Verfahren erweitern zu können. Der Aufbau der Verfahrensbeschreibungen für den neuen

ZfPBau-Verfahrenskatalog folgt stets dem gleichen Muster, durchgängig wurde auf die Verwendung von eindeutigen Fachbegriffen und zutreffenden Überschriften für die einzelnen Formfelder geachtet.

Nach der Festlegung der Struktur wurden alle nach dem heutigen Stand der Technik sinnvoll einsetzbaren ZfPBau-Verfahren erfasst und als eigenes Tabellenblatt dargestellt (Wiese et al. 2020). Für die Verfahren wurden die relevanten Informationen wie z. B. Anwendungsgrenzen, technische und organisatorische Anforderungen und Alternativverfahren zusammengefasst. Ergänzt wurde dies um Experten-Einschätzungen bzgl. Kosten und Leistungsfähigkeit.

Weiterhin wurden die nach heutigem Stand der Technik bekannten mit ZfPBau-Verfahren untersuchbaren Prüfaufgaben erfasst und beschrieben. Für jede dieser Prüfaufgaben wurde die Eignung der vorher zusammengestellten Verfahren bewertet und in Matrixform dokumentiert.

AP2: Bewehrungsortung/Betondeckungsmessung

Die Anwendbarkeit des Radar-Verfahrens zur Betondeckungsmessung wurde durch Vergleichsmessungen mit magnetisch-induktiven Prüfverfahren sowie durch Langzeitmessungen zur Ermittlung des Einflusses der Hydratation/abnehmender Bauteilfeuchte auf die Messergebnisse überprüft. Außerdem kamen statistische Methoden zur Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM (JCGM 100 2008) zur Anwendung (Taffe und Vonk 2019).

Zusätzlich wurde ein Ringversuch an den für die Langzeitmessungen hergestellten Testkörpern durchgeführt und entsprechend statistisch ausgewertet.

AP3: Leitfaden "Ermittlung geometrischer, mechanischer und materialtechnischer Kennwerte an Ingenieurbauwerken aus Stahlbeton/Spannbeton mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren"

Im Wesentlichen besteht dieses AP aus der Aufbereitung und Strukturierung bereits vorhandener Erkenntnisse, z. B. aus einem externen Forschungsprojekt zur Fragestellung "Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) zur Rekonstruktion von Bestandsplänen als Grundlage

für die Nachrechnung". Während der Bearbeitung wurde der Fokus des AP3 erweitert: Zunächst war die Erstellung eines Leitfadens "Rekonstruktion/Verifizierung von Bestandsplänen mittels ZfPBau" geplant. Da die meisten der in diesem Leitfaden beschriebenen Methoden aber auch bei Fragestellungen jenseits der Nachrechnung zielführend sind, wurden die nachrechnungsspezifischen Textabschnitte in einem Kapitel zusammengefasst und der weitere Leitfaden an die neue Zielstellung angepasst.

Mit der Zulieferung der Abschnitte "Sensitivitätsanalyse" und "Verfahrensbeschreibungen" wurden Externe beauftragt, wobei sich die Verfahrensbeschreibungen in Struktur und Inhalt eng an die Beschreibungen aus dem Verfahrenskatalog anlehnen – auch, um zu einem späteren Zeitpunkt den Leitfaden als interaktives Dokument bereitstellen zu können, das direkt auf die Inhalte des Verfahrenskatalogs verlinkt.

AP4: Weitere Untersuchungen zur ZfPBau-Zuverlässigkeit sowie Gremienarbeit

Im Rahmen dieses APs wurde an der Dissemination vorhandener Erkenntnisse in Form von Regelwerken mitgewirkt. Begleitend wurden eigene Messungen durchgeführt sowie ein Ringversuch mit Beteiligung von acht externen Institutionen organisiert.

2.3.1.3 Ergebnisse

AP1: Verfahrenskatalog ZfPBau

Für praxisrelevante Prüfverfahren an Bauteilen aus (Stahl-) Beton, Mauerwerk und Stahl liegen einheitliche steckbriefartige Verfahrensbeschreibungen vor. Diese enthalten u. a. eine Kurzcharakterisierung des Verfahrens, den Standard-Anwendungsbereich, Anwendungsgrenzen, Verweise auf einschlägige Regelwerke, Hinweise auf alternative Verfahren sowie eine systematische Bewertung des Verfahrensaufwands (Technik, Zeit, Kosten, Fachwissen).

Darüber hinaus wurden praxisrelevante Prüfaufgaben zusammengestellt und charakterisiert – einerseits nach Prüfgegenstand (Baustoffeigenschaften/Zustand bzw. Bauteilkonstruktion/Aufbau), andererseits danach, ob es sich

Tabelle 2: Auszug der Zuordnung Prüfaufgabe/Verfahren für Beton (Taffe und Wiese 2019).

Bewertung geeigneter Verfahren für Prüfaufgaben* <i>* Diese Matrix ist als vereinfachtes Modell zur Datenabfrage vorgesehen. Für detaillierte und weiterführende Informationen zu Anwendungsbereichen, Anwendungsgrenzen und Sonder-Anwendungen der Verfahren wird auf das Formblatt des jeweiligen Verfahrens verwiesen. ** Die baustoffspezifischen Prüfaufgaben sind in qualitative und quantitative Prüfaufgaben unterteilt. Die qualitative Bestimmung (grau hinterlegt) beschreibt die generelle Detektionswahrscheinlichkeit eines Objekts. Die quantitative Bestimmung (weiß hinterlegt) beschreibt die messbare Charakterisierung eines Fehlers und die Messunsicherheit.</i>		Ve														
		Physikalische Grundlage Optische Verfahren				Physikalische Grundlage Mechanische (handwerkliche) Verfahren			Physikalische Grundlage Mechanisch angeregte Verfahren							
		(1) Sichtprüfung	(2)(a) Endoskopie: Boreskope	(2)(b) Endoskopie: Fiberskope	(2)(c) Endoskopie: Videoskope	(1) Ausziehprüfung	(2) Abreißversuch	(3) Bohrmaschine mit automatischer Abschaltung	(1) Rückprallhammer / Schmidt-Hammer	(2) Klopfprobe	(3) Impakt-Echo	(4) Ultraschall	(5) Low-Strain-Verfahren / Hammerschlag-Methode			
Baustoffzusammensetzung (Beton-/ Zementsorte)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
Elementgehalt		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
(Änderung der) Baustoffeigenschaften		-	-	-	-	+	+	-	+	-	o	+	-			
Druckfestigkeit		-	-	-	-	+	-	-	+	-	o	+	-			
Oberflächen- und Haftzugfestigkeit		-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-			
Oberflächen-Inhomogenitäten (z.B. Risse)		+	+	+	+	-	-	-	o	+	o	+	+			
Art, Lage und Fehlergröße (Länge, Breite, Tiefe)		o	o	o	o	-	-	-	-	+	o	+	+			
Volumen-Inhomogenitäten (z.B. Kiesnester)		+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	o	-			
Art, Lage und Fehlergröße (Länge, Breite, Tiefe)		o	o	o	o	-	-	-	-	-	-	o	-			
Delaminationen		o	o	o	o	-	-	-	-	o	+	-	-			
Lage und Größe delaminierter Bereiche		o	o	o	o	-	-	-	-	o	+	-	-			

um qualitative (Detektion) oder quantitative (Messung) Prüfaufgaben handelt.

Im nächsten Schritt wurden die Verfahren und die Prüfaufgaben miteinander verknüpft, wobei eine Bewertung der Eignung vorgenommen wurde (Tabelle 2).

Im Ergebnis steht nach der IT-Umsetzung ein Katalog zur Verfügung, in dem Anwender eine Prüfaufgabe auswählen können und ihnen eine Auswahl geeigneter Verfahren präsentiert wird – mit entsprechend verlinkten Verfahrensdatenblättern. Alternativ können sie ein Verfahren nachschlagen (z. B. weil ihnen ein Angebot zur Untersuchung mit diesem Verfahren vorliegt) und abgleichen, ob das Verfahren für die Prüfaufgabe geeignet ist.

AP2: Bewehrungsortung/Betondeckungsmessung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Radarmessungen grundsätzlich zur Bewehrungsortung und auch zur Beurteilung der Betondeckung eignen, die Genauigkeitsanforderungen des in dem Zusammenhang oft zitierten (aber eigentlich nur für den Hochbau geltenden) Merkblatts "Betondeckung und Bewehrung" (DBV 2015) des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins werden dabei bei typischen Betondeckungen von ca. 5 cm in der Regel nicht eingehalten. Im Vergleich mit magnetisch induktiven Messverfahren hat Radar aber Vorteile bei der getrennten Erkennbarkeit benachbarter Stäbe, bei größeren Tiefen und wenn der Stabdurchmesser nicht bekannt ist.

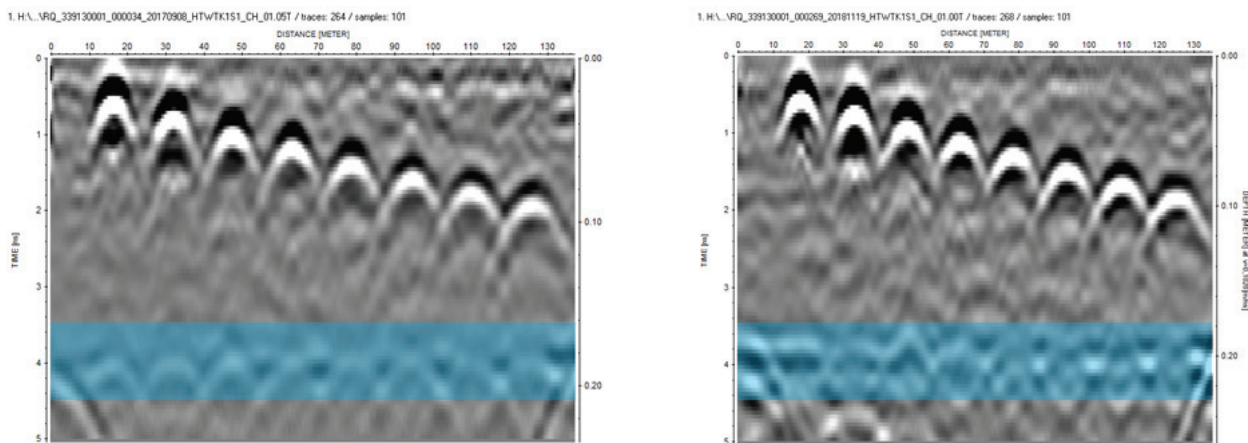


Abbildung 4: Vergleich zweier Radar-Messungen am selben Testkörper, links 12 Tage nach Betonage, rechts 450 Tage nach Betonage (Taffe und Vonk 2019).

Da Radar feuchteabhängig ist und somit bei frisch hergestellten Bauteilen vom Hydratations- und Austrocknungsverlauf beeinflusst wird, wurde dieser Einfluss im Rahmen von Langzeitmessungen untersucht. In Abbildung 4 werden zwei Radar-Messungen 12 und 450 Tage nach der Betonage gezeigt, insbesondere im Bereich der Bauteilrückseite (durch die blaue Markierung gekennzeichnet) erscheint das Bild am hydratisierten und ausgetrockneten Beton deutlich kontrastreicher; im Bereich der oberflächennahen Bewehrung stellt sich das Bild aber auch kurze Zeit nach der Betonage schon erstaunlich klar dar.

AP3: Leitfaden "Ermittlung geometrischer, mechanischer und materialtechnischer Kennwerte an Ingenieurbauwerken aus Stahlbeton/Spannbeton mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren"

Mit dem Leitfaden wird Anwendern auf Seiten der Baulastträger ein praxistaugliches Hilfsmittel bei der Planung von ZfPBau-Untersuchungen zur Verfügung stehen. Zunächst beschäftigt sich dieser Leitfaden – entsprechend seiner Entstehungsgeschichte – als Leitfaden "Rekonstruktion/Verifizierung von Bestandsplänen mittels ZfPBau" mit geometrischen, mechanischen und materialtechnischen Kennwerten (Abbildung 5), eine Erweiterung um den Bereich "Schadensdiagnose" ist aber möglich.

Nicht zu jeder in der Gliederung vorkommenden Kapitelüberschrift stehen validierte und ausreichend in der Praxis

erprobte Verfahren zur Verfügung. Der Vollständigkeit halber werden in diesen Fällen auch experimentelle Verfahren genannt, auf diesen Umstand wird aber jeweils hingewiesen.

AP4: Weitere Untersuchungen zur ZfPBau-Zuverlässigkeit sowie Gremienarbeit

Die Zuverlässigkeit eines ZfP-Systems lässt sich durch die Parameter "innewohnende Leistungsfähigkeit", "Anwendungsparameter" und "Human Factor", eingebettet in einen "organisatorischen Kontext" beschreiben (modulares ZfP-Zuverlässigkeitsmodell, siehe Abbildung 6). Die "innewohnende Leistungsfähigkeit" (siehe auch AP2) markiert dabei ein unter optimalen Bedingungen erzielbares Maximum und ist letztlich nur von der Physik abhängig. Um die Zuverlässigkeit der ZfP/ZfPBau zu steigern, ist es zielführend, die komplette Prozesskette und somit alle Komponenten des Zuverlässigkeitsmodells zu betrachten und – sofern möglich – zu optimieren.

Prüfprozeduren sind in der industriellen ZfP ein Standardwerkzeug zur Sicherung der Anwendungsqualität von ZfP-Verfahren sowie deren Reproduzierbarkeit. Im ZfP-Zuverlässigkeitsmodell wirken Prüfprozeduren direkt auf die Komponenten "Organisatorischer Kontext" und "Human Factor". Die Frage der Übertragbarkeit dieses Konzepts auf ZfPBau-Lösungen ist ein wesentlicher Bestandteil der gemeinsam mit anderen Institutionen getragenen Akti-

<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung geometrischer Kennwerte <ul style="list-style-type: none"> ○ Äußere Geometrie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aufmaß ▪ Photogrammetrie ▪ Laserscan ○ Innere Geometrie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bewehrungsortung ▪ Betondeckungsmessung ▪ Spanngliedortung ○ Dickenmessung nur einseitig zugänglicher Bauteile ○ Weitere geometrische Parameter • Materialkennwerte <ul style="list-style-type: none"> ○ Betonfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Kennwerte <ul style="list-style-type: none"> ○ Vorspannkkräfte (interne Vorspannung) ○ Spannung in externer Vorspannung bzw. in Seilen ○ Spannung in Bewehrungsstäben ○ Spannungen im Beton • Vorgehen bei der Rekonstruktion/Verifizierung von Bestandsplänen <ul style="list-style-type: none"> ○ Grundsätzlicher Ablauf ○ Entwicklung einer Prüfstrategie ○ Einschätzung der Tragstruktur ○ Sensitivitätsanalyse ○ Entwicklung von Bestandsplänen aus Messergebnissen • Umgang mit Messunsicherheiten • Gütebewertung von ZfPBau-Verfahren • Hinweise zur Ausschreibung • Anhang: Verfahrensbeschreibungen
---	---

Abbildung 5: Auszug aus der Gliederung des Leitfadens.

vitäten im Unterausschuss "Qualitätssicherung" (UA-QS) des Fachausschusses "ZfP im Bauwesen" (FAB) der Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung. Im UA-QS wurde eine Prüfprozedur für eine Standardprüfaufgabe im (Beton-)Brückenbau erstellt: Die Spanngliedortung unter Verwendung des Radar-Verfahrens. Die Anwendbarkeit dieser Prüfprozedur wurde zunächst an verschiedenen, ähnlich aufgebauten, Testkörpern erprobt. Zur praxisnahen Erprobung der Prüfprozedur "Spanngliedortung mit Radar" und zur Ermittlung statistisch abgesicherter Informationen zur Güte des Verfahrens führte die BASt im Sommer 2019 einen Ringversuch an einem vor dem Abbruch stehenden Brückenbauwerk durch.

Auf Seiten der (potentiellen) Auftraggeber herrscht häufig große Unsicherheit sowohl bzgl. der Möglichkeiten und

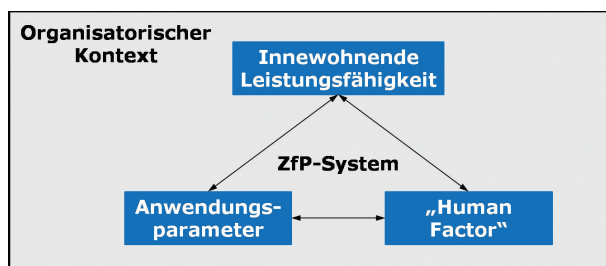


Abbildung 6: Modulares ZfP-Zuverlässigkeitsmodell nach Müller et al. (2013).

Grenzen moderner ZfPBau-Verfahren als auch hinsichtlich der Frage, wie die Fähigkeiten entsprechender Anbieter einzuschätzen sind. Der federführend vom DZSF/EBA beauftragte modulare Katalog von ZfPBau-Verfahren hilft der Auftraggeberseite bei der Auswahl geeigneter Prüfverfahren zur jeweiligen Prüfaufgabe. Ergänzend wurde zusammen mit anderen Akteuren im Unterausschuss "Ausbildung" des FAB ein modulares Konzept zur Qualifizierung von ZfPBau-Prüfern entwickelt und im Normenausschuss Materialprüfung des DIN e. V. (Deutsches Institut für Normung), vorgestellt. Perspektivisch soll aus dem Konzept ein entsprechendes Normenwerk entwickelt werden.

Eines der Standardverfahren der ZfPBau ist das Ultraschall(echo)-Verfahren, das sich an Betonbauwerken insbesondere zur Dickenmessung, Fehlstellenortung und zur Ortung größerer Einbauteile (z. B. Spannkkanäle, Verdrängungskörper, ...) eignet. Den aktuellen Stand der Technik beschreibt das im Sommer 2018 erschienene Merkblatt B4 "Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen", an dessen Erstellung im Unterausschuss "Ultraschall" des FAB mitgewirkt wurde.

Bei Brückenbauwerken aus der frühen Hochphase des Spannbetonbaus kommen oft zwei Problemfälle gleichzeitig zum Zuge: die Verwendung spannungsrissskorrosionsgefährdeter Spannstäbe und ein nach heutigen Maßstäben

zu geringer Grad an (schlaffer) Bewehrung. In diesen Fällen kann das Auftreten von Spannungsrissskorrosion zu einem Versagen ohne Vorankündigung führen. Mit der *Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion* steht ein Regelwerk zur Beurteilung solcher Bauwerke, insbesondere zur Beurteilung des Vorankündigungsverhaltens zur Verfügung. Unabhängig vom rechnerischen Nachweis kann es sinnvoll sein, gefährdete Bauwerke hinsichtlich bereits vorhandener Spannstahlbrüche zu untersuchen. Ein hierfür geeignetes ZfPBau-Verfahren ist die magnetische Streufeldmessung. Das Positionspapier "Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung", das im gleichnamigen Unterausschuss des FAB entwickelt wurde, dokumentiert den Stand der Technik.

Neben "typischen" ZfPBau-Anwendungen, die einen zum Zeitpunkt der Prüfung vorhandenen Zustand abbilden, gewinnt auch die Dauerüberwachung von Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur immer mehr an Bedeutung (siehe auch Kapitel 2.3.2 und 2.3.6). Hier ergeben sich teilweise ähnliche Fragestellungen. Oft fehlen den Bauwerksverantwortlichen spezifische und unabhängige Informationen, um die Eignung bestimmter Systeme beurteilen und schließlich die optimale Lösung beauftragen zu können. Im Unterausschuss "Dauerüberwachung von Bauwerken" des FAB wird derzeit ein Merkblatt erarbeitet, das entsprechende Hilfestellung leisten wird und als eine Grundlage für die geplante Erweiterung des Verfahrenskatalogs um Monitoringverfahren dienen kann.

2.3.1.4 Nutzen

ZfPBau-Verfahren sind eine wertvolle Ergänzung klassischer Methoden zur Zustandserfassung. Von ihrer Natur her sind ZfPBau-Verfahren verkehrsträger- und bauartübergreifend einsetzbar. Insofern profitieren von den hier vorgestellten Ergebnissen sowohl die potentiellen Nutzer von ZfPBau-Leistungen (also die Institutionen, die für die Bauwerkserhaltung in ihrem spezifischen Sektor zuständig sind) als auch die Erbringer dieser Leistungen.

Für die Auftraggeberseite werden unabhängige, verlässliche Informationen zur Verfügung gestellt, an erster Stelle sei hier der ZfPBau-Verfahrenskatalog genannt. Baulastträger werden von einer geregelten Ausbildung und Zertifizierung

von Prüfpersonal profitieren, da hierdurch die Beauftragung von ZfPBau-Leistungen weniger risikobehaftet wird.

ZfPBau-Dienstleister profitieren von zielgerichteten Ausschreibungen (für die es informierter Verantwortlicher bedarf), von Regelwerken, die geeignete Vertragsgrundlagen bilden, und natürlich auch von Hinweisen, wie sie die Qualität ihrer Dienstleistung überprüfen und steigern können.

Ziel aller in diesem Abschnitt genannten Aktivitäten ist die Steigerung des Einsatzes von Bauwerksanalytik und damit einhergehend die Verbesserung einer systematischen Infrastrukturerhaltung. Erreicht wird dieses Ziel zum einen durch die vereinfachte Bereitstellung des Grundwissens zu solchen Verfahren sowie zum anderen durch die Erleichterung des Zugangs zu erweiterten, gesicherten Informationen.

Die Ergebnisse im BMVI-Expertenetzwerk werden dabei helfen, insbesondere die Bauwerksanalytik für Bauwerke aus der Bundesverkehrsinfrastruktur zu stärken. Da zunächst Brücken im Fokus standen, waren an diesen Projekten BAST und DZSF/EBA beteiligt. Eine Erweiterung um Ingenieurbauwerke aus dem Bereich "Wasserstraße" ist für die 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks (2020–2025) vorgesehen.

2.3.2 Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

2.3.2.1 Aufgabenstellung und Ziel

Aufgrund der starken Zunahme des Verkehrs kann es bei Brückenbauwerken zu Tragfähigkeitsdefiziten und zur Beschränkung der Restnutzungsdauer kommen. Da Verstärkung oder Ersatz aller Bauwerke kurzfristig nicht möglich ist, werden Konzepte und Vorgehensweisen für die Überwachung und zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Bestandsbauwerken benötigt. Der Einsatz von Monitoring an Brücken ist wenig verbreitet, Ursachen sind fehlendes Wissen und Erfahrungen zum Sicherheitsgewinn, zu Kosten und zu Einsatzmöglichkeiten. Monitoring beschreibt den Gesamtprozess zur Erfassung, Analyse und Bewertung von Bauwerksreaktionen und/oder einwirkenden Größen mit-

tels eines Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum (DBV 2018). Das Ziel bestand in der Förderung des vermehrten Einsatzes von Monitoringmaßnahmen, um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein Verfahren zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken und eine Methode zur Abschätzung von Kosten und Nutzen einer Monitoringmaßnahme entwickelt. Weiterhin war das Ziel die Einsatzmöglichkeiten von Monitoringmaßnahmen zu untersuchen und Anwendungen im Rahmen von Pilotstudien zu testen.

2.3.2.2 Untersuchungsmethoden

Die Quantifizierung der Zuverlässigkeit erfolgte über die Entwicklung eines Verfahrens, welches die Versagenswahrscheinlichkeit einer Monitoringmaßnahme einer Bestandsbrücke (hier: Schwellwertüberwachung) bestimmt. Die Kosten-Nutzen-Abschätzung einer Monitoringmaßnahme greift auf das "Value-of-Information-Konzept" zu, welches auf der Bayes'schen Entscheidungstheorie aufbaut (Schubert et al. 2019). Für die Klärung der Einsatzmöglichkeiten von Dauerüberwachung als Grundlage für Erhaltungsstrategien wurde zuerst eine Literaturrecherche durchgeführt. Als Pilotstudie wurden Untersuchungen an einer Brücke im Zuge des duraBAST (Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BAST) ausgewählt. Hier werden Einbau und Datenerhebung, Auswertung und Einsatzmöglichkeiten von Sensorik getestet.

2.3.2.3 Ergebnisse

In der Nachrechnungsrichtlinie des BMVI ist der Einsatz von Monitoring als Kompensationsmaßnahme genannt (BMVI 2011). Da aber der Sicherheitsgewinn durch den Einsatz von Monitoring bisher nicht quantifizierbar ist, wird Monitoring bislang nicht als Kompensationsmaßnahme eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde ein Verfahren für die Überwachung von Schwellwerten entwickelt, welches die Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit der Monitoringmaßnahme ermöglicht. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird in zwei Phasen ermittelt. In der "Schadenserkennungsphase" wird die Wahrscheinlichkeit quantifiziert, dass trotz Datenerhebung und -auswertung ein gravierender Schaden nicht erkannt wird und das Tragwerk durch Verkehrsbelastung versagt. In der "Reaktionsphase" wird der zeitliche Aspekt berücksichtigt, dass aufgrund des

kurzen zeitlichen Abstandes zwischen der Schwellwertüberschreitung und dem Tragwerksversagen eine risikoreduzierende Maßnahme nicht umgesetzt werden kann. Das Verfahren wurde am Fallbeispiel der Plattenbalkenbrücke "Hochstraße Gifhorn" im Zuge der Bundesstraße B4 getestet. Die Brücke wurde in einem vorherigen Projekt von Siegert et al. (2015) mit einem Monitoring zur Schwellwertüberwachung von Schubdefizit, Biegedefizit in Längsrichtung und Ermüdungsfestigkeitsdefizit in der Koppelfuge ausgestattet. Die Monitoringmaßnahme brachte einen Zuverlässigkeitsgewinn, welcher auf den Zugewinn bei der Überwachung des Grenzzustands der Schubtragfähigkeit zurückzuführen ist. Der Grenzzustand war ohne Überwachung kritisch, mit Monitoring konnte aber in der Reaktionsphase ein Zuverlässigkeitsgewinn ermittelt werden (Ralbovsky et al. 2019).

Um den monetären Nutzen einer Monitoringmaßnahme darlegen zu können, wurde eine Abschätzung der Kosten und des Nutzens durch die Gegenüberstellung von Betrieb mit Monitoring und Betrieb ohne Monitoring durchgeführt. Hierbei wurden die Kosten, welche durch Installation und Betrieb der Monitoringanlage, Versagenskosten der Brücke, Kosten für Unterhalt und Instandsetzung und gesamtwirtschaftlichen Kosten, abgebildet durch die Parameter Betriebskosten, Reisezeiten, Verkehrssicherheit, Lärm, Luftverschmutzung, Klimaschutz und Erreichbarkeit, einbezogen. Als Beispiel konnte der monetäre Nutzen des Monitorings an der Schwelmetalbrücke (Bundesautobahn 1) mit Überschreitung der zugelassenen Rissweiten und einer Brücke der Bundesautobahn 42 in Duisburg-Beeck mit Überwachung der Kopplungsfugen der gestoßenen Spannlieder gezeigt werden. Die Überwachung der Schwachstellen ermöglichte die Weiternutzung der Bestandsbauwerke (Schubert et al. 2019).

Die Spannbetonbrücke an der duraBAST aus dem Jahr 1973 wurde im Rahmen einer grundhaften Instandsetzung mit Dauerhaftigkeits- und Tragfähigkeitssensoren ausgestattet. Ziel ist es, Einbau und Datenerhebung und -auswertung unter realen Bedingungen zu testen. Die Dauerhaftigkeitssensoren verschiedener Hersteller wurden in Bohrlöchern in der Fahrbahn und an der Bewehrung in den Kappen vor der Betonage eingesetzt (siehe Abbildung 7 links). Die Sensoren überwachen die Parameter Feuchte, Korrosion und Temperatur.

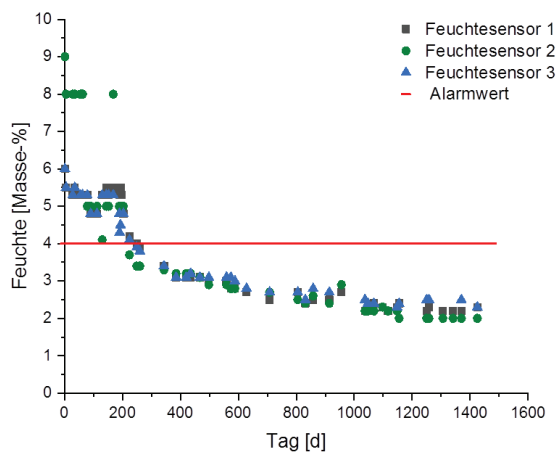
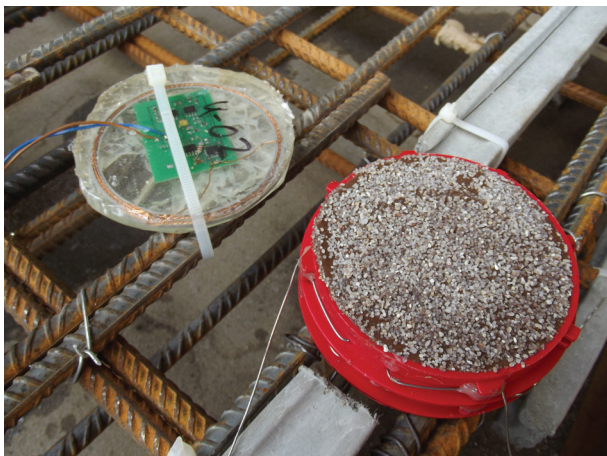


Abbildung 7: Feuchtesensoren der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und BS2 Sicherheitstechnik GmbH (links); Auswertung der Feuchtesensoren der BS2 Sicherheitstechnik GmbH von 2016 bis 2019 (rechts).

Ein Beispiel für die Datenauswertung liefern die Feuchte-daten der Sensoren in der Fahrbahn (Abbildung 7 rechts). Die Sensoren wurden 2017 eingebaut, nach ca. 200 Tagen sinkt der Feuchtgehalt unter den festgelegten Alarmwert von 4 Masseprozent Feuchtigkeit. Hervorgerufen wurde dieser Effekt durch die in diesem Zeitraum erfolgte Abdichtung der Brücke.

2.3.2.4 Nutzen

Das Projekt hat einen hohen Nutzen für die (Straßen-) Bauverwaltungen, da mit dem Projekt verschiedene Ansätze verfolgt wurden, um den Einsatz von Monitoring zu fördern. Die Abschätzung des monetären Nutzens von Monitoringmaßnahmen ist bereits vor deren Installationen möglich und die Zuverlässigkeit der Maßnahmen kann quantifiziert werden. Der verstärkte Einsatz von Monitoring bringt ebenfalls einen gesamtwirtschaftlichen Nutzen durch die bessere Gewährleistung der Verfügbarkeit von Bestandsbauwerken sowie eine Kostenersparnis in Verbindung mit der besseren Ausnutzung der vorhandenen Bestandsbauwerke und den späteren Neubau.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Methoden sind auf die anderen Verkehrsträger (Wasserstraße und Schiene) übertragbar und liefern damit auch einen Mehrwert für diese Verkehrsträger. Der Einsatz von Monitoring erfolgt zwar bei allen Verkehrsträgern, aber auch dort ist der Einsatz nicht weit verbreitet. Die Arbeit erfolgt im Rahmen des

BMVI-Expertennetzwerks, da mit dem Projekt das Ziel, die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur zu erhöhen, bei allen Verkehrsträgern unterstützt wird.

Die Beteiligung der anderen Behörden fand im Rahmen der Betreuung der externen Projekte und des fachlichen Austauschs zu den Themen Sensorik, Datenauswertung und Einsatzpotenziale von Monitoring bei den verschiedenen Verkehrsträgern statt.

2.3.3 Unterstützung der Bauwerksprüfung durch (halb-)automatisierte Bildauswertung

2.3.3.1 Aufgabenstellung und Ziel

Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur müssen regelmäßig geprüft werden, um sicherzustellen, dass sie in einem standsicheren, gebrauchstauglichen und verkehrssicheren Zustand sind – und um mögliche Schäden frühzeitig erkennen zu können. Hierbei stellt für alle Verkehrsträger die handnahe Prüfung und Inspektion den Stand der Technik dar.

Bei großen und komplexen Ingenieurbauwerken ist die handnahe Prüfung jedoch mit einem großen Aufwand verbunden: Geräteeinsatz für die Zugänglichkeit, Sperrungen und Verkehrseinschränkungen, Einsatz hochqualifizierten/

spezialisierten Personals. Hinzu kommt, dass die Ingenieure der Bauwerksprüfung während der Prüftätigkeit erheblichen Gefahren ausgesetzt sind.

Ziel ist es daher, die Bauwerksprüfung künftig effektiver zu gestalten und die handnahe Prüfung auf geschädigte/kritische Bereiche zu fokussieren. Hierbei spielen die Bilderfassung mittels UAS (Holst et al. 2016) und anderer Plattformen sowie die rechnergestützte Bildauswertung eine entscheidende Rolle. Der Schwerpunkt des Projekts lag dabei auf der Bildauswertung zur Detektion typischer Schäden.

2.3.3.2 Untersuchungsmethoden

Das Projekt wurde in mehrere Arbeitsschritte aufgeteilt. Im ersten Arbeitsschritt wurden die Schadenstypen und Referenzbauwerke ausgewählt, relevant für die Referenzbauwerke ist eine gute Zugänglichkeit, einfache Bauwerksgeometrie, Vorhandensein typischer Schadensbilder und eine aktuell durchgeführte Bauwerksprüfung. Der nächste Arbeitsschritt ist die Generierung der Bilddaten, hierbei sind die automatisierte Planung der Flugrouten und die Berechnung der Aufnahmegeometrie zur Verortung der Aufnahmen wichtige Arbeitsschritte. Für eine automatische Generierung der Flugrouten wurden Erkenntnisse und Programme aus den Bereichen Hochbau und Luftbilddatenaufnahme genutzt und eigene Feldversuche durchgeführt. Der letzte Arbeitsschritt ist die automatische Bildanalyse zur Erkennung von geschädigten Bereichen und deren Verortung. Hierzu wurden verschiedene Verfahren des maschinellen Lernens hinsichtlich ihrer Eignung zur Risserkennung untersucht und mit entsprechenden Datensätzen trainiert. Es wurden die Datensätze *Structural Defects Network 2018 (SDNET18)*, *Middle East Technical University 2016 (METU16)*, *DeepCrack 2019 (DC19)*, *CrackForest 2016 (CFD16)* und *AigleRN 2016 (AigleRN16)* genutzt, welche in anderen Projekten erhoben wurden und frei zur Verfügung stehen (Morgenthal et al. 2019a).

Das methodische Grundgerüst für die automatisierte UAS-gestützte Zustandsbewertung von Bauwerken ist in Abbildung 8 oben gezeigt. Das Grundgerüst bildet die Grundlage für die Einbindung der hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse in die Bauwerksprüfung.

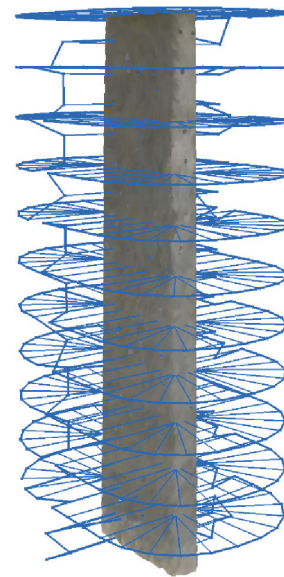
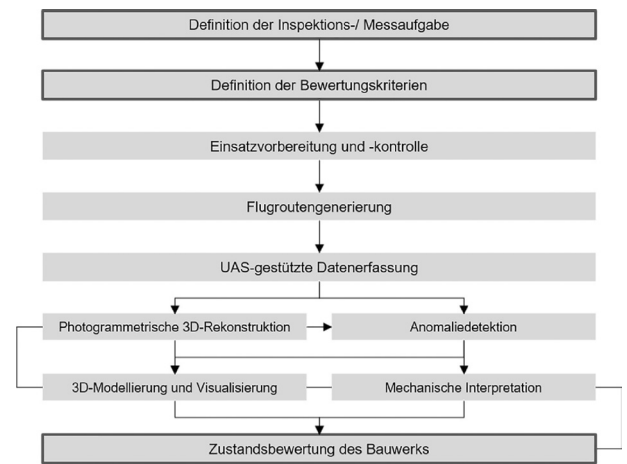


Abbildung 8: Methodisches Grundgerüst für die automatisierte UAS-gestützte Zustandsbewertung von Bauwerken (oben); automatisch generierte Befliegungsrouten für einen Brückenpfeiler (unten) (Morgenthal et al. 2019a, Morgenthal et al. 2019b).

2.3.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in ausführlicher Form in dem Bericht von Morgenthal et al. 2019a enthalten.

Im ersten Arbeitsschritt wurde Schadenstypen ausgewählt, der Fokus wurde auf die Risserkennung bei Betonoberflächen gelegt. Bei Rissen handelt es sich um typische bei der

Bauwerksprüfung auftauchende Schadensbeispiele. Die "reine" Erkennung der Risse stand hierbei im Vordergrund der Analyse. Die ausgewählten Referenzbauwerke sind die Elstertalbrücke bei Pirk (Sachsen) und die Körnebachtalbrücke bei Schwallungen (Thüringen). Von diesen Brücken wurden 3D-Modelle aus Aufnahmen von UAS erstellt und die Aufnahmen wurden georeferenziert.

Im zweiten Schritt wurden die Grundlagen der Generierung der Bilddaten untersucht. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf die objekt- und zielgrößenbezogene 3D-Flugroutenplanung gelegt. Grundlage für die Planung ist ein 3D-Modell des zu untersuchenden Bauwerks. Im Ergebnis wurde eine neue Methode entwickelt, mit der die Flugrouten geplant werden können. Zusätzlich wurden die Kameraposition und deren Blickrichtung für jede einzelne Aufnahme geplant. Die Abbildung 8 unten zeigt eine automatisch generierte Befliegungsrouten eines Brückenpfeilers. Die automatisierte Berechnung verfolgt das Ziel eine vollständige Aufnahme des Bauwerks mit einer minimalen Anzahl an Bildern abzudecken.

Der zentrale Baustein des Projekts widmete sich der eigentlichen Bildanalyse zur Erkennung geschädigter Bereiche. Durch die Konzeption, Weiterentwicklung und das Trainieren vorhandener Methoden des maschinellen Lernen (hier: Convolutional Neural Networks (CNN)) war die automatisierte Rissdetektion in Bildern möglich. Das Ergebnis ist eine umfangreiche Datenbank mit repräsentativen annotierten Bildern von Rissen auf Betonoberflächen. Diese stehen für das Training und die Validierung von CNN's für die automatische Risserkennung zur Verfügung. Darüber liegen ein Softwaretool zur Aufbereitung der Bilddaten und trainierte Faltungsnetze für die Erkennung von Rissen auf Betonoberflächen zur Verfügung. Zusätzlich liegen auch die aufgenommenen Bilddaten, die daraus berechneten georeferenzierten 3D-Bauwerksmodelle (Punktwolken und Oberflächenmodelle) sowie die Ergebnisse der automatischen Bildanalyse der Referenzbauwerke vor (Morgenthal et al. 2019a).

Zur Demonstration und Evaluierung der erarbeiteten Methoden wurden diese bei der Befliegung verschiedener Ingenieurbauwerke der Verkehrsträger Straße und Schiene

erfolgreich eingesetzt. Im Ergebnis lassen sich durch eine Befliegung des Bauwerks nebst Analyse der gewonnenen Bilddaten vor der handnahen Prüfung geschädigte von ungeschädigten Bereichen separieren. Damit kann die handnahe Prüfung auf die relevanten Bereiche beschränkt und so, bei gleichem Sicherheitsniveau, optimiert werden.

2.3.3.4 Nutzen

Die Ergebnisse des Projekts stellen einen ersten, aber schon nutzbaren Baustein auf dem Weg zu einer durch innovative Methoden optimierten Bauwerksprüfung dar. Weitere Bausteine wären z. B. die Erweiterung um visuell detektierbare Schadensbilder oder der Abgleich mit Schadenskatalogen. Typische künftige Nutzer sind die für die Erhaltung zuständigen Bauasträger. Bauwerke aus Stahlbeton kommen bei allen im BMVI-Expertenetzwerk vertretenen Verkehrsträgern vor, insofern sind die Projektergebnisse auch verkehrsträgerübergreifend nutzbar. Bei den Befliegungen im Rahmen des Projekts wurden sowohl Bauwerke des Verkehrsträgers Straße als auch des Verkehrsträgers Schiene untersucht.

2.3.4 Scher- und Zugfestigkeit massiver Bauwerke

2.3.4.1 Aufgabenstellung und Ziel

Bei der statischen Bewertung der Standsicherheit von Wasserbauwerken ist die Untersuchung der Sicherheit gegenüber "Gleiten in der Arbeitsfuge" gemäß DIN EN 1992-1-1: 2011-01 ein zentraler Nachweis. Hierbei bleiben jedoch – insbesondere bei der Annahme der Reibungsbeiwerte – die speziellen Verhältnisse im Wasserbau unberücksichtigt.

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Herleitung bzw. Festlegung der modellmäßigen und versuchstechnischen Grundlagen und Randbedingungen zur Bestimmung belastbarer, wasserbauspezifischer Reibungsbeiwerte zum Führen statischer Sicherheitsnachweise. Ferner sollten neben der Scherversuchsmodellierung zur Definition der Laborversuchskenngrößen auch die Eignung des gegenwärtig

gültigen Nachweisformats zur statischen Berechnung der vorhandenen Tragfähigkeit am Bauteil überprüft werden.

2.3.4.2 Untersuchungsmethoden

Der in einem ersten Arbeitsschritt erhobene aktuelle Sachstand umfasst die versuchstechnische Ermittlung von Scherfestigkeitskennwerten von Beton und Mauerwerk und deren Verwendung in den gängigen Nachweisformaten der europäischen und internationalen Bemessungsstandards. Ferner geht er auf theoretische Untersuchungen zur Aufstellung eines statischen Basismodells ein.

Die experimentellen Tätigkeiten fokussierten zunächst auf die Validierung des Rahmenschergeräts der BAW mit anschließenden Grundsatzversuchen (Abbildung 9). Diese Vorarbeiten mündeten in der Ausarbeitung eines einheitlichen Konzepts zur Durchführung von Laborscherversuchen zur Ermittlung der maßgebenden Scherfestigkeitsgrößen für die Berechnung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke.

Auf Basis der so gewonnenen Ergebnissen wurden Vorgaben für die Verwendung der ermittelten Scherfestigkeitsparameter und Empfehlungen für eine Anpassung der Nachweisformate zur statischen Berechnung der Gleitsicherheit in Arbeitsfugen von Massivbauwerken unter wasserbauspezifischen Randbedingungen aufgestellt.

2.3.4.3 Ergebnisse

Im Anschluss an die Validierung des Rahmenschergeräts der BAW lieferten weitere, im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführte studentische Abschlussarbeiten Ergebnisse beispielsweise zum Einfluss verschiedener Fugenbeschaffenheiten sowie -neigungen auf für Wasserbauwerke repräsentative Scherparameter (Galiazzo 2018) und leiteten erste Modellansätze zur Ermittlung des Reibungswinkels bzw. -beiwerts aus dem Scherversuch an Betonproben her. Danach nimmt beispielsweise der Reibungsbeiwert mit steigender Normalspannung ab (Höffgen et al. 2018).

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Scherversuchen an Laborproben (Malárics-Pfaff et al. in Bearbeitung) untersuchte Wengrzik (2019) die Übertragbarkeit der anhand des Rahmenschergeräts der BAW gewonnenen Ergebnisse zu einer realistischen Beschreibung des Schertragverhaltens von Bestandwasserbauwerken am Beispiel einer Schleuse (Abbildung 10 links). Darüber hinaus verfolgten Topografie-messungen mithilfe eines Streifenlichtprojektors zur Rauheit der Betonier- bzw. Arbeitsfugenoberflächen das Ziel (Abbildung 10 rechts), jene relevanten Rauheitsparameter zu identifizieren, welche unmittelbar oder in Kombination mit gegebenenfalls mechanischen Materialkenngrößen auf die Schertragfähigkeit der betrachteten Proben schließen lassen.

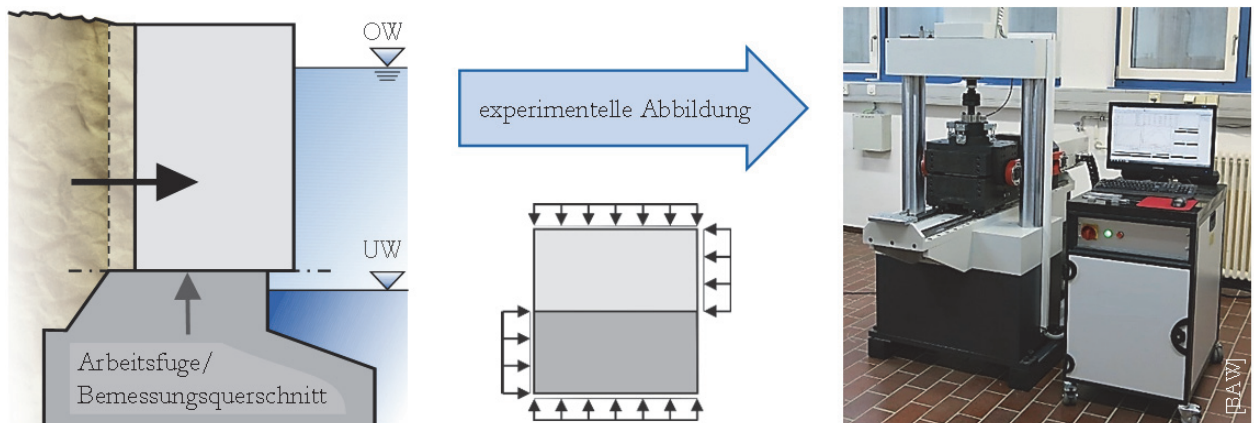


Abbildung 9: Gleiten in der Arbeitsfuge (links), Belastungsschema eines Versuchskörpers während des Rahmenscherversuchs (Mitte) und Prüfgerät der BAW zur Beurteilung des Schertragverhaltens (rechts).

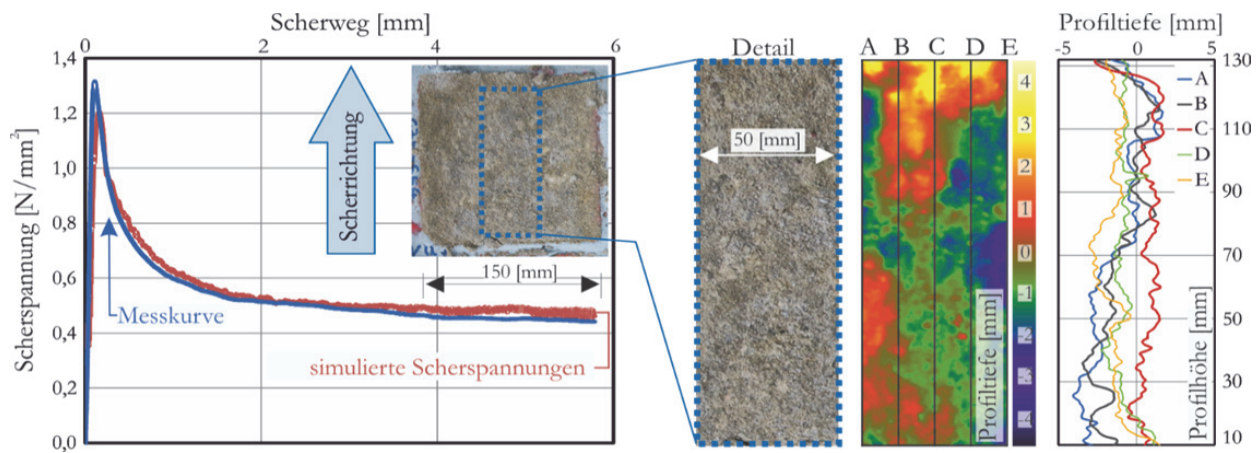


Abbildung 10: Gegenüberstellung der mit dem Rahmenschergerät der BAW bestimmten, korrigierten Messwerte mit den Simulationsergebnissen (links); Ausschnitt aus der betrachteten Probenoberfläche und korrespondierende Flächen- sowie Linienprofile zur Beschreibung der Rauheit (rechts, v.l.n.r.).

Aus Gründen eines besseren physikalischen Verständnisses sowie als Unterstützung für die Modellbildung wird in aktuell durchgeführten Simulationen die numerische Nachbildung des Materialverhaltens während der Abschervorgänge in Anhängigkeit verschiedener Fugenbeschaffenheiten berücksichtigt.

2.3.4.4 Nutzen

Für bestehende Wasserbauwerke der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sind innerhalb der Baubestandsunterlagen Standsicherheitsnachweise vorzuhalten. Ferner, bedingt durch konservative Normvorgaben, können statische Begutachtungen zu Fehleinschätzungen im Hinblick auf den tatsächlichen Bauwerkszustand führen. Durch realitätsnähere Kenngrößen und Modellierungen könnten jedoch vorhandene Reserven bei der rechnerischen Nachweisführung zur Standsicherheit bestehender Wasserbauwerke erschlossen und diese somit angemessener bewertet werden.

Im Fokus der durchgeführten Arbeiten standen hauptsächlich Wasserbauwerke. Die erarbeiteten Methoden und Ergebnisse eignen sich dennoch grundsätzlich auch für Massivbauwerke anderer Verkehrsträger sowie für geotechnische Anwendungen und stellen eine wichtige Basis zukünftiger Forschungen dar. Der behördenübergreifen-

de Austausch im BMVI-Experten Netzwerk ermöglicht den beteiligten Behörden, für die eigenen verkehrsträgerspezifischen Fragestellungen zum Thema Schertragverhalten bereits auf Zwischenergebnisse aus diesem Teilvorhaben zurückgreifend aufzubauen, noch lange bevor eine allgemein gültige Modellvorstellung in voraussichtlich wenigen Jahren in die normativen Richtlinien Eingang findet.

2.3.5 Hydroabrasionswiderstand von Beton

2.3.5.1 Aufgabenstellung und Ziel

Im Bereich des Verkehrswasserbaus werden Betonoberflächen durch Hydroabrasion in unterschiedlicher Ausprägung beansprucht (Tosbecken, Wehrrücken, Sparbeckenzuläufe, Schleusensohlen, Schleusenkammerwände). Im Betonregelwerk wird zur Beschreibung der Intensität der mechanischen Verschleißbeanspruchung eine Expositionsklasseneinteilung XM (Mechanical Abrasion) 1 bis XM3 vorgenommen. Inwiefern die im Wesentlichen aus Verkehr herrührende Expositionsclassensystematik auch die Hydroabrasion angemessen beschreibt, ist oft Gegenstand von Diskussionen. Die Untersuchungen verfolgen daher folgende wesentliche Ziele hinsichtlich der Beschreibung der Einwirkungs- und Widerstandsseite infolge Hydroabrasion:

- a) Erarbeitung einer Klassifizierung für die Hydroabramsionsbeanspruchung analog zu den Expositionsklassen in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität (TU) Dresden
- b) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Bewertung relevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion
- c) Erarbeitung von Anforderungen an Betonausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen für einen hinreichenden Hydroabramsionswiderstand.

2.3.5.2 Untersuchungsmethoden

Die Erkenntnisgewinne sollen über eine Literatursichtung, theoretische Betrachtungen und 3D-hydrnumerische Simulationen sowie Bauwerks- und Laboruntersuchungen erfolgen. Im Labormaßstab werden drei für die Simulation einer Beanspruchung aus Hydroabrasion geeignete Prüfverfahren zur Bewertung des Betonwiderstandes herangezogen.

2.3.5.3 Ergebnisse

Die Erarbeitung von Schritt a) ist mit einem Vorlauf zu den Schritten b) und c) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Institut für Wasserbau, erfolgt (Stamm und Helbig 2016). Erste hydroabramsionsbedingt geschädigte Bauwerke der WSV wurden in die Betrachtungen aufgenommen und 3D-hydrodynamische Simulationen der Fließverhältnisse durchgeführt. Insgesamt haben die Untersuchungen in den besonders von Schäden betroffenen Bereichen Fließgeschwindigkeiten zwischen etwa 3 und 7 m/s ergeben. Da die Bewegung des Geschiebes und die zeitliche Verfügbarkeit bei den Simulationen derzeit nicht berücksichtigt werden können, erlauben die Erkenntnisse bislang lediglich eine Beschreibung des Schädigungspotenzials infolge der Fließgeschwindigkeiten.

Schritt b) wurde im Baustofflabor der BAW mit drei Laborprüfverfahren begonnen. Zur Beschreibung und Bewertung der Einwirkungsintensität der Prüfeinrichtungen wurden Untersuchungen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse

aus Schritt a) durchgeführt. Wesentliche Erkenntnis einer Beschreibung und Bewertung der Einwirkungsintensität der Prüfeinrichtungen war, dass diese trotz deutlich unterschiedlicher Einwirkungsintensität, wie z. B. der Fließgeschwindigkeit, der Materialeigenschaften oder der geometrischen Eigenschaften des Abrasivguts, Unterschiede der Betonqualität gleichermaßen differenzieren können. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass die Anwendung existierender Modelle zur Beschreibung des Fortschritts von Abrasionsschäden unter Einbeziehung der Einwirkungsseite derzeit aufgrund zahlreicher zu treffender Annahmen mit großen Unsicherheiten versehen ist. Darüber hinaus wurde deutlich, dass teilweise Präzisierungen der Prüfandbedingungen erforderlich sind.

Eine Zusammenführung der Ergebnisse der Untersuchungen zu Schritt c) wurde veröffentlicht (Spörel 2018, Spörel 2019). Als wesentliches Ergebnis wurde herausgearbeitet, dass der Mikro-Deval-Koeffizient der Gesteinskörnung einen dominanten Einfluss auf den Widerstand des Betons gegenüber Hydroabrasionseinwirkung hat (Abbildung 11). Dies war bei allen drei Prüfverfahren trotz der teilweise deutlich unterschiedlichen Beanspruchungsintensität der Fall.

Der Mikro-Deval-Koeffizient beschreibt den Einfluss der Gesteinskörnung, die bei typischen Wasserbaubetonen mit über 70 Vol.-% den größten Anteil im Beton einnimmt. Betonkennwerte, wie z. B. die Druckfestigkeit, zeigten einen weitaus geringeren Zusammenhang. Diese wird stärker durch die Eigenschaften der Zementsteinmatrix beeinflusst, welche jedoch einen entsprechend kleineren Volumenanteil einnimmt. Um sowohl die Gesteinskörnung als auch die Matrix berücksichtigen zu können wurde ein neuer Parameter r_{ha} eingeführt, siehe Gleichung (1) (Spörel 2019).

$$r_{ha} = \frac{f_c}{MD} \quad (1)$$

f_c Zylinderdruckfestigkeit, Nasslagerung, $h/d=2$ [MPa]
 MD Micro-Deval-Koeffizient, DIN EN 1097-1 [M.-%]

Derzeit erfolgen Auswertungen, welche Erkenntnisse zur Übertragbarkeit der unterschiedlichen Beanspruchungsintensitäten

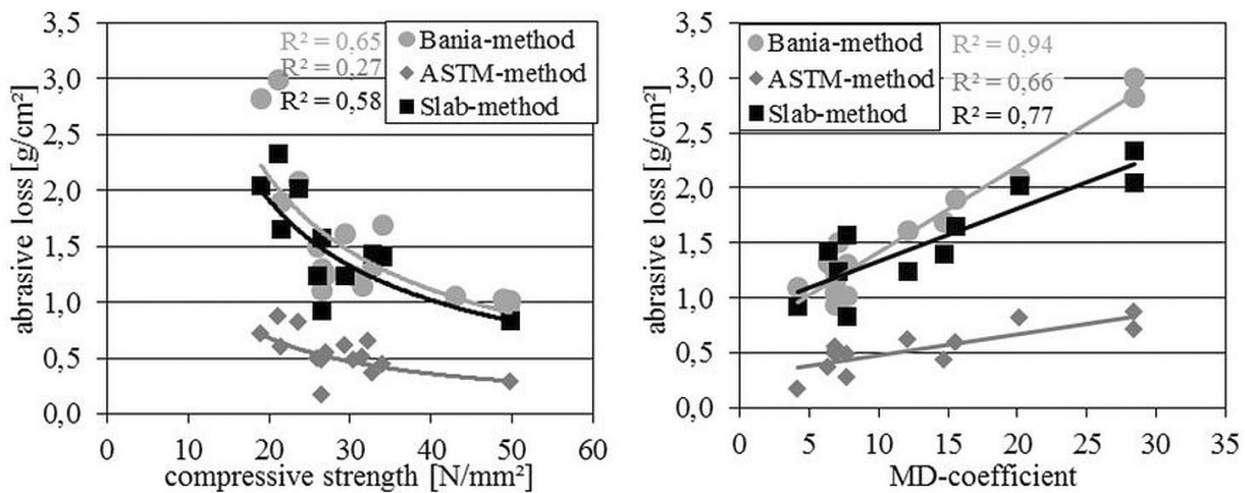


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Mikro-Deval-Koeffizient der Gesteinskörnung und Hydroabrasionsverschleiß des Betons.

tensität in den Prüfverfahren auf die Praxis liefern sollen. Berücksichtigung hierbei finden beispielsweise die Fließgeschwindigkeit, Materialeigenschaften des Abrasivguts oder dessen geometrische Eigenschaften.

2.3.5.4 Nutzen

Etwa 10 % der Wehranlagen und 5 % der Schleusenbauwerke im Verantwortungsbereich der WSV weisen Schäden infolge Hydroabration auf, welche die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen (Schadensklassen 3 oder 4) (Spörel et al. 2015). Bei derartigen Bauwerken ist es von zentraler Bedeutung, Betone oder Betonerersatzsysteme einzusetzen, die der Beanspruchung einen ausreichenden Widerstand entgegensetzen. Instandsetzungen sollen damit künftig möglichst vermieden bzw. erforderliche Instandsetzungsmaßnahmen dauerhaft gegenüber dieser Beanspruchung ausgeführt werden. Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wird eine Berücksichtigung und Weitergabe von Erfahrungen hinsichtlich der Implementierung von neuen Prüfverfahren in das Regelwerk angestrebt. Die Übertragbarkeit von Ergebnissen von Laborprüfverfahren auf Praxisbedingungen ist für alle Verkehrsträger von grundsätzlicher Bedeutung.

2.3.6 Effizientes ingenieurgeodätisches Monitoring der Verkehrsbauwerke (Ingenieurgeodätisches Bauwerksmonitoring)

2.3.6.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Überwachung von Ingenieurbauwerken ist Grundvoraussetzung zur Gewährleistung einer sicheren und zuverlässigen Verkehrsinfrastruktur. Durch die kontinuierliche Überwachung können Veränderungen der Bauwerksgeometrie im Laufe der Zeit festgestellt werden und tragen so zur Bestandsbeurteilung bei. Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojekts an der Schleusenanlage Hessigheim ist die Weiterentwicklung hochgenauer und innovativer Erfassungsmethoden unter realen Bedingungen, um sie für die praktische Anwendung zu erschließen. Die vorherrschenden Betriebsbedingungen sowie äußere Einflüsse, wie geologische und atmosphärische Parameter, tragen zum einen zu Veränderungen des Bauwerks selbst bei, haben aber gleichzeitig zum Teil auch Einfluss auf die jeweiligen Messgrößen. Entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik werden ingenieurgeodätische und photogrammetrische Messverfahren sowie Fernerkundungsmethoden zum Monitoring der einzelnen Schleusenbereiche eingesetzt. Durch eine entsprechende Auswertung werden einerseits Verkippungen und andererseits insbesondere vertikale Veränderungen der Bauwerksstrukturen und des -umfeldes detektiert und in entsprechenden Nut-

zerprodukten aufbereitet. Von übergeordneter Bedeutung ist dabei die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf vergleichbare Fragestellungen der verschiedenen Verkehrsträger.

2.3.6.2 Untersuchungsmethoden

Die Erprobung und Weiterentwicklung der vorgenannten Messverfahren ist in drei Teilprojekte aufgeteilt.

Das Teilprojekt 1 "Neigungsmessung" beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung verschiedener Neigungsmesstechniken, um mögliche Verkippungen der Wehrpfeiler zu bestimmen. Kontinuierlich erfassende Sensoren und die Kenntnis über das Verhalten der eingesetzten Sensoren gegenüber äußeren Einflüssen durch deren Kalibrierung lassen durch geeignete Auswerteverfahren Rückschlüsse auf die Ursachen der Veränderungen zu. Für derzeit laufende zeitreihenbasierte Auswerteaufgaben werden in diesem Zusammenhang sowohl kommerzielle als auch quelloffene Softwareprodukte auf ihre Eignung getestet.

In Teilprojekt 2 ("UAV-gestützte 3D-Messdaten – Matching und Laserscanning") wird die UAV-gestützte (*unmanned, uninhabited or unpiloted aerial vehicle*) photogrammetrische und laserbasierte Erfassung durch drei Befliegungskampagnen weiterentwickelt. Diese dienen zur Entwicklung und Optimierung der Lösungsstrategien zur Produkterstellung (u. a. Digitales Geländemodell, Digitales Oberflächenmodell) sowie zur Erstellung von flächenhaften Deformationsanalysen.

In Teilprojekt 3 "Satellitengestütztes PSInSAR" (engl. *persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar*) werden die Potenziale der satellitengestützten Radarinterferometrie zur Erfassung vertikaler Veränderungen evaluiert. In diesem Zusammenhang wird die Prozesskette der PSInSAR-Auswertung optimiert, um das Leistungspotenzial der TerraSAR-X- (Deutscher Erdbeobachtungssatellit) und Sentinel-1-Daten auszuschöpfen. Anhand von Zeitreihenanalysen werden die Radardaten hinsichtlich ihrer Eignung zur Deformationsanalyse miteinander verglichen.

2.3.6.3 Ergebnisse

Für die Erprobung von Neigungsmesstechniken im Rahmen des Teilprojekts 1 wurden redundante Neigungs-

messsysteme mit unterschiedlich arbeitenden Neigungssensoren und ergänzend Temperatursensoren in zwei Wehrpfeilern der Schleusenanlage installiert. Hierbei sind hohe Anforderungen an die technischen Spezifikationen der einzusetzenden Sensoren gestellt worden. Nach der Beschaffung und Installation der Sensoren wurden diese einer Laborkalibrierung unterzogen, welche Aufschluss darüber gibt, inwiefern die geforderten Spezifikationen eingehalten worden sind. In den Ergebnissen der Kalibrierung zeigt sich, dass zwei Gruppen unterschieden werden können. Während eine Gruppe von Sensoren die Anforderungen weitestgehend erfüllt, ist bei den Sensoren der zweiten Gruppe fraglich, ob sie vor dem Hintergrund der gestellten Anforderungen für diese speziellen Monitoringaufgabe geeignet sind.

Neben der grundsätzlichen Eignung der Sensoren werden auch die unterschiedlichen Messprinzipien (ein- oder zweiachsig) und Funktionen (umschlagbar oder nicht umschlagbar) der Sensoren im Hinblick auf einen permanenten Einsatz evaluiert. Erste Auswertungen zeigen, dass sich vor allem die zweiachsigen, umschlagbaren Neigungssensoren für eine permanente Neigungsmessung gut eignen, da sie eine hohe Messgenauigkeit aufweisen und durch Bestimmung und Kompensation des absoluten Nullpunkts systematische Abweichungen (u. a. Driften) eliminiert werden.

Des Weiteren deuten aktuell laufende Zeitreihenanalysen auf eine hohe Korrelation zwischen erfassten Neigungsänderungen und Temperaturen (Abbildung 12, rechts) hin. Inwiefern es sich um tatsächliche thermisch bedingte Neigungsbewegungen des Bauwerks oder um Temperatureinflüsse auf den Sensor handelt, ist derzeit noch Teil der Untersuchungen. Gleichzeitig werden verschiedene kommerzielle und quelloffene Softwareprodukte hinsichtlich ihrer Funktionalität zur Zeitreihenanalyse und ihrer Bedienerfreundlichkeit miteinander verglichen, wobei sich hierbei insbesondere enorme Unterschiede in der Performance der Softwareprodukte abzeichnen.

Im Rahmen von Teilprojekt 2 finden halbjährlich UAS-Befliegungen des unmittelbaren Bauwerkumfeldes mithilfe von Kamera- und Lasersensoren (Abbildung 13) statt, um Veränderungen der verschiedenen Bauwerksbereiche über die Zeit zu detektieren. Die Auswertungen sowohl der bild-

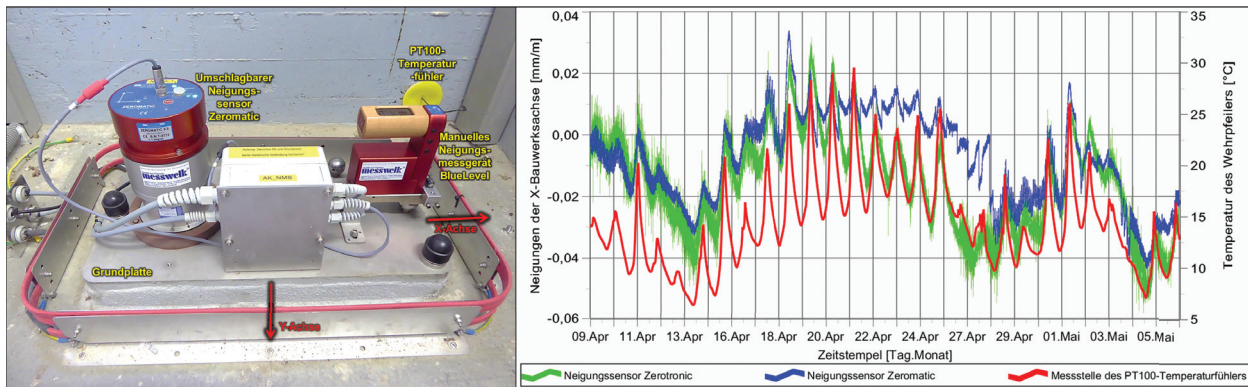


Abbildung 12: Auf einer gemeinsamen Grundplatte sind verschiedenen Neigungssensoren des Neigungsmesssystems installiert (links). Die Messdaten werden kontinuierlich aufgezeichnet und als Zeitreihen (rechts) dargestellt (Quelle: BfG).

als auch laserbasierten Messdaten einer ersten Test-Kampagne im März 2018 haben gezeigt, dass es noch erhebliche Potenziale zur Verfeinerung der Modellierung im Rahmen der Ausgleichung von Bild- und LiDAR-Daten (engl. *light detection and ranging (laser radar)*) gibt (Cramer et al. 2018).

Die beiden eingesetzten Messsensoren werden zunächst als redundante Messsysteme betrachtet, wobei sich die Forschung auf die individuelle Verbesserung der Erfassungs- und Auswertemethoden konzentriert. Insbesondere bedarf es zur Erreichung der geforderten Objektpunktgenauigkeit von besser als 1 cm einer Optimierung der Datenauswertung. Die zukünftigen Arbeiten dieses Teilprojekts zielen u. a. auf die geeignete Kombination beider Sensorsysteme, um die Robustheit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit von 3D-Punktwolken weiter zu erhöhen und gleichzeitig hochpräzise Anwendungen durch UAS-gestützte Datener-

fassungen anzustreben. Zudem werden mithilfe der vorhandenen Epochen flächenhafte Deformationsanalysen durchgeführt.

In Teilprojekt 3 fanden bisher Untersuchungen auf der Grundlage von Zeitreihen sowohl von TerraSAR X- als auch Sentinel 1-Daten über den Zeitraum des Jahres 2018 statt. Diese zeigen, dass die Daten der Sentinel-Mission in ländlichen Regionen, wie die der Schleusenanlage, für ein Monitoring von Geländedeformationen nur eingeschränkt geeignet sind (Abbildung 14). Aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung von 5 m x 20 m gegenüber TerraSAR-X mit einer Auflösung von 1 m x 1 m konnten kleinräumige Deformationsprozesse im erweiterten Bauwerksumfeld der Schleusenanlage Hessigheim mit Sentinel-1-Daten nicht detektiert werden, wohingegen größere Absenkungsprozesse erkannt wurden.

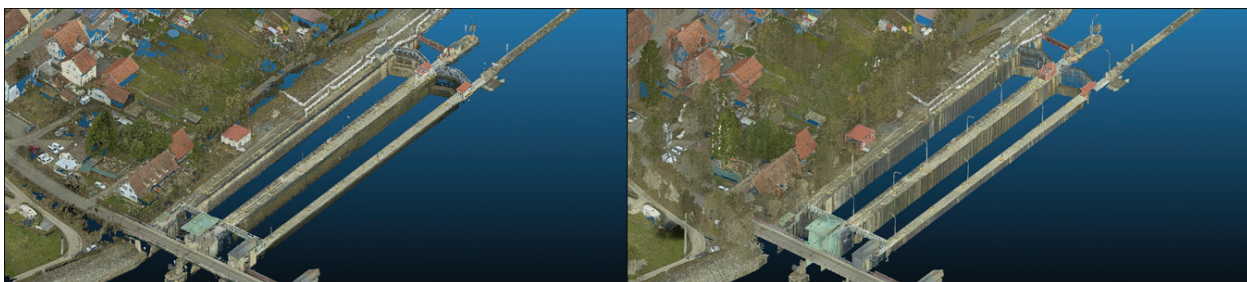


Abbildung 13: Colorierte Punktwolken aus der UAS-Befliegung mittels Kamera- (links) und Lasersensoren (rechts) (Quelle: Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart).

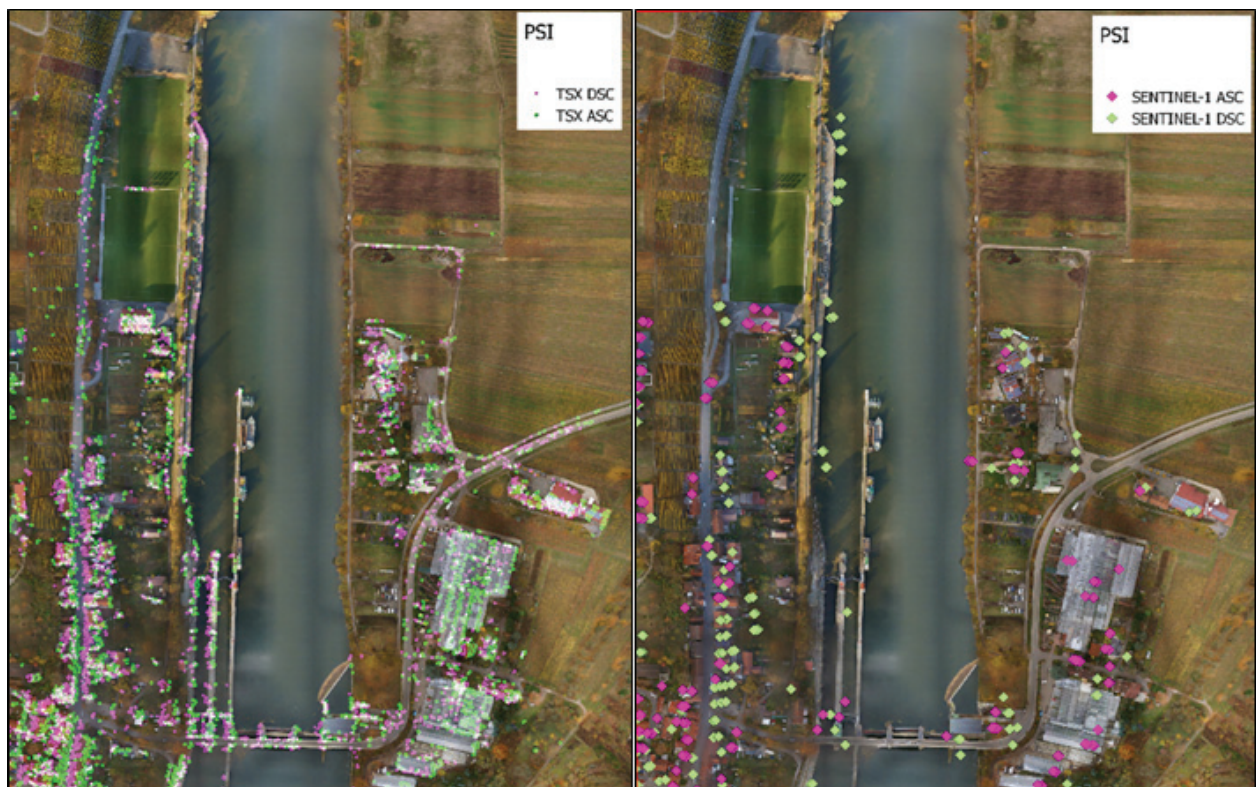


Abbildung 14: Punktdichten der langzeitstabilen Rückstreuer von TerraSAR X (links) und Sentinel-1 (rechts) im Bereich der Schleusenanlage Hessianheim; ASC = aufsteigender Orbit, DESC = absteigender Orbit (Quelle: Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart).

2.3.6.4 Nutzen

Der Einsatz von permanenten Monitoringsystemen für Ingenieurbauwerke trägt zur Gewährleistung einer sicheren und zuverlässigen Verkehrsinfrastruktur bei. Eine Vielzahl von Sensoren liefert zusätzliche Informationen über die Schleusenanlage, ihre Umgebung und jeweils hierin ablaufender Prozesse. Auf der Grundlage dieser Informationen können bestehende Messprogramme (u. a. Tachymetrie, Feinnivellement) der Objektverantwortlichen in der WSV (Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA) Neckar, Amt für Neckarausbau Heidelberg), aber auch Objektverantwortlicher anderer Verkehrsträger, zukünftig zielgerichteter und effizienter eingesetzt und Entscheidungen hinsichtlich der sicheren Nutzung des Bauwerks frühzeitig getroffen werden. Anhand der finalen Ergebnisse aller drei Teilprojekte werden hierzu im Anschluss an das Forschungsprojekt Umsetzungsstrategien und -empfehlungen für den Wirkbetrieb abgeleitet.

Mit dem Ziel der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf vergleichbare Fragestellungen wurde das Projekt im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks bearbeitet. Dabei fand eine intensive Zusammenarbeit zwischen BfG und BAW statt. Die BAW ist insbesondere mit den geologischen und bautechnischen Gegebenheiten an der Schleusenanlage vertraut und hat im Vorfeld des Projekts bereits Überwachungsmessungen durchführt. Gleichzeitig wurde mit der BAST und dem DZSF/EBA ein regelmäßiger Informationsaustausch zum Thema verkehrsträgerübergreifende Bauwerksdokumentation eingerichtet.

Schlussendlich können die Erkenntnisse aus allen drei Teilprojekten zukünftig den o. g. beteiligten Institutionen verkehrsträgerübergreifend bei gleichgelagerten Fragestellungen als Entscheidungsgrundlage über den Einsatz geeigneter Messverfahren dienen.

2.3.7 Automatisierte Bilderfassungsverfahren als Ergänzung zur handnahen Inspektion

2.3.7.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Vorgaben zur Überprüfung von Ingenieurbauwerken, insbesondere Brücken, sind bereits sehr lange im Einsatz, geregelt durch die DIN 1076. Aktuell wird alle 6 Jahre eine handnahe Brückeninspektion durchgeführt, dazwischen ein erweiterte Prüfung und jährlich eine Sichtprüfung. Dabei ist immer der Prüfer als Person die relevante Größe, da das Ergebnis einer Brückenprüfung nur darauf basiert, welche Probleme er detektieren kann und wie er diese bewertet. Es fehlt weitgehend die Möglichkeit, die Entscheidungsfindung zu dokumentieren und damit nachvollziehbar zu machen.

Ziel dieses Projektes war es, den Prozess der Bauwerksprüfung zu unterstützen, indem die Möglichkeiten der Digitalisierung auch für die Brückenprüfung erschlossen werden. Dies umfasst primär zwei Aufgaben. Zum einen sollen Schäden vorausgewertet werden, indem durch eine automatisierte Auswertung von Bildern Schäden identifiziert werden. Zum anderen soll das System auch eine Dokumentation der Schadensentwicklung ermöglichen, um aus dem Fortschreiten der Schädigung den weiteren Verlauf der Zustandsentwicklung abschätzen zu können.

Untersuchungsmethoden

In diesem Projekt wurde vom grundsätzlich genutzten Vorgehen abgewichen. In der Regel wird bestehende Technik genutzt, um zu identifizieren, was bereits möglich ist. Der hier gewählte Ansatz soll – orientiert am Bedarf – die Randbedingungen für eine automatisierte Schadenserkenntnis liefern, also die grundlegenden Anforderungen an die Technik definieren. Dafür wurden zwei externe Projekte vergeben, die eine Kategorisierung und Bewertung optisch detektierbarer Schäden erstellen sollen. Getrennt wurde dabei in die Materialien (Stahl-)Beton und Stahl. Es wurde der Fokus darauf gelegt, primär bereits validierte Ergebnisse zusammenzutragen und aufzubereiten. Nur bei Lücken wurden weitere Untersuchungen angestellt.

2.3.7.3 Ergebnisse

Kategorisierung der Schäden bei Stahlbeton

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Kategorisierung und Bewertung von Rissen bei Stahlbetonbauteilen" ist ein umfassender Überblick zur Thematik der Rissbildung bei Bestandsbauwerken entstanden (Marx et al. 2019). In einem ersten Schritt wurden die optischen Charakteristika typischer Rissbilder zusammengefasst. Diese Beschreibung bildet das Fundament für die anschließende Bestimmung von Rissursachen mithilfe eines Entscheidungsbaums auf Grundlage optischer Parameter. Darüber hinaus konnten Risse in vier Risskategorien unterteilt werden. Die Risse wurden dabei in "Trennrisse", "Anrisse", "Flächenrisse" und "Sprengrisse" unterschieden. Im nächsten Schritt wurden für diese Kategorien auf Grundlage einer intensiven Literaturrecherche Bewertungsstufen entwickelt, mit deren Hilfe ein Riss hinsichtlich seiner Bedeutung für Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beurteilt werden kann. Diese Bewertung bildet wiederum die Basis für eine Bauteilbewertung. Hierbei werden die Bauteile in Abhängigkeit der Einzelrissbewertung in eine von drei Schadensklassen eingeordnet. Vorrangiges Ziel dieser Einordnung ist die Identifikation von Bauwerken bei denen eine handnahe Prüfung nicht notwendig ist, da keine Schäden mit Bedeutung für das Bauwerk detektiert werden konnten. Abgeschlossen wird der erste Teil des Forschungsprojektes durch eine kritische Auseinandersetzung mit möglichen Problemen bei der optischen Erfassung von Rissen bei Bestandsbauwerken. Im Rahmen der Einzelrissbewertung wurde zusätzlich ein Verfahren zur näherungsweise Ermittlung der Risstiefe entwickelt.

Kategorisierung der Schäden bei Stahlkonstruktionen

Durch Peters et al. (2019) wurde eine Kategorisierung und Bewertung von Schäden bei Stahlbaukonstruktionen vorgenommen. Brückenbauwerke aus Stahl werden überwiegend durch Beschichtungen vor Korrosion geschützt. Der Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme ist in der DIN EN ISO 12944 Teil 1 bis 9 ausführlich

geregelt. Die Norm wird durch zusätzliche Regelungen, z. B. für Bundesfernstraßen der BASt (z. B. ZTV-ING Teil 4-3), für den Stahlwasserbau der BAW (z. B. ZTV-W LB 218) sowie der Deutschen Bahn (DB Ril 804.6201), untersetzt. Aufgrund der Tatsache, dass der Korrosionsschutz durch Beschichtungen bezogen auf die Nutzungsdauer, von z. B. Eisenbahnbrücken aus Stahl, nur zeitlich begrenzt wirksam sein kann, werden in der Regel mehrere Instandsetzungen der Beschichtung erforderlich. Indikatoren für eine notwendige Instandsetzung der Beschichtung sind belastungsbedingte Veränderungen, die überwiegend visuell sichtbar sind und bei der händischen Brückenprüfung oder einer Drohnenbefliegung erkannt werden können. Die eindeutig erkennbaren Indikatoren, die zum Verlust der Schutzdauer des Korrosionsschutzsystems führen, sind in den unterschiedlichen Teilen der DIN EN ISO 4628 wiedergegeben und hier ausführlich behandelt worden.

Andere typische Schäden an Stahlbrücken betreffen die geometrische Ausbildung eines Brückenbauwerks wie Abweichungen von der Solllage, Ausbiegungen und Schiefstellungen, Beulen und Knicke sowie Risse und Kerben. Ferner können Auffälligkeiten bzw. Schäden an Fügeverbindungen (Schrauben-, Niet- und Schweißverbindungen inklusive Schweißnahtunregelmäßigkeiten) und an Bauwerkslagern auftreten. Zusätzlich wirken Schmutz- und Wasseransammlungen sowie undichte Bauwerksbereiche sehr negativ. Die genannten Schäden führen in unterschiedlicher Weise zu Beeinflussungen der Dauerhaftigkeit, der Verkehrssicherheit oder gar der Standsicherheit.

Die zusammengestellten Schäden wurden anschließend in Anlehnung an das Bewertungsschema der RI-EBW-PRÜF (Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen) bewertet. Aufgrund der vorhandenen Gliederung der Schäden wurden die Schadensbeispiele zusätzlich einer neu erstellten Schadensstruktur angepasst und direkt mit erforderlichen Maßnahmenempfehlungen verknüpft. Die gefilterten Schadensbeispiele und die hier neu gefundene Bauwerkstruktur wurden hinsichtlich einer Bewertung über einen (evtl. neuen) Algorithmus betrachtet. Schlussendlich konnte festgestellt werden, dass eine Veränderung des bestehenden Algorithmus weder nötig noch zielführend ist. Lediglich eine ausführlichere Ergebnisbeurteilung am Ende der Berechnung, das heißt, nicht mehr

den Fokus auf eine einzige Endnote für die Bauwerksbewertung zu legen, wurde als sinnvolle Maßnahme vorgeschlagen.

2.3.7.4 Nutzen

Ziel des Projektes war es die Grundlagen zu schaffen, mit denen eine automatisierte Schadensbewertung erfolgen kann. Aufbauend kann untersucht werden, welche Voraussetzungen in der Bildauswertung erfüllt sein müssen, um die benötigten Informationen aus optisch erfassten Daten ableiten zu können.

Die Frage der automatisierten Bauwerksanalytik stellt sich für alle Infrastrukturbetreiber und ist damit verkehrsträgerübergreifend. Speziell werden die hier erstellten Informationen bereits in weiteren Projekten (z. B. BASt (Morgenthal et al. 2019a) und DIMARB (mFUND-Projekt unter Beteiligung des EBA)) genutzt und werden so dazu beitragen, bessere Informationen über Bauwerke zu erhalten. Insgesamt stehen durch das Projekt Anforderungen an optische Systeme zur Rissidentifikation zur Verfügung und es wurden diverse Problemfälle definiert, wodurch jede weitere Entwicklung besser auf das Ziel ausgerichtet werden kann. Beide Projekte wurden in enger Kooperation zwischen BASt und DZSF/EBA ausgeschrieben und betreut.

2.4 Zusammenfassung und Ausblick

Auf dem Weg von der reaktiven zur vorausschauenden Erhaltung gilt es, die klassische Bauwerksprüfung durch weitere Verfahren zu ergänzen und zu optimieren. Diese Verfahren können kontinuierlich über Einwirkungen und die Zustandsentwicklung informieren (Monitoring), Informationen aus dem Bauteilinneren gewinnen, die im Rahmen der Bauwerksprüfung nicht erfassbar sind (ZfPBau) oder dazu beitragen, den Prüfaufwand durch Vorselektion relevanter Bereiche zu optimieren (z. B. durch die automatisierte Bilderfassung). Hierbei ermöglicht die (Weiter-)Entwicklung der Prüfmethoden und -verfahren die Bestimmung belastbarer, für unsere Bauwerke repräsentativer Kennwerte, welche eine realitätsnahe Zustandserfassung und -bewertung sichern können. Damit die ergänzenden Verfahren zur klassischen Bauwerksprüfung in die breite Anwendung

kommen, müssen Möglichkeiten, Grenzen sowie Nutzen dieser Verfahren erforscht und dokumentiert sein. Werden diese Verfahren stärker genutzt, können sie zusätzliche Informationen liefern, die Bauwerksverantwortliche in die Lage versetzen, Erhaltungsmaßnahmen frühzeitig zu planen und zu beauftragen – noch bevor Schäden an der Bauteiloberfläche erkennbar sind.

Für eine realistische Beschreibung der Auswirkungen von Schäden müssen die zugrundeliegenden Bemessungskenngrößen so genau wie möglich bekannt sein. Dafür werden

komplexe Details, wie z. B. die Scherfestigkeit in Arbeitsfugen oder der Hydroabrasionswiderstand von Betonen, eingehend untersucht und bewertbar gemacht. Die Untersuchungsmethoden müssen alle relevanten Einflussgrößen berücksichtigen, dabei aber einfach genug sein, um die Anwendbarkeit zu gewährleisten.

Für die 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks ist daher das Ziel, den Weg von der klassischen hin zur vorrausschauenden Bauwerksprüfung weiter voranzutreiben.

3 Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken der Verkehrsinfrastruktur (SPT 302)

3.1 Hintergrund und Zielsetzung

Die Infrastrukturbauwerke von Straße, Schiene und Wasserstraße sind häufig durch ein hohes Alter gekennzeichnet und haben zum Teil ihre geplante Nutzungsdauer überschritten. Dies hat zur Folge, dass sich Schäden an den Bauwerken häufen. Bisherige Instandsetzungsstrategien verfolgen in den meisten Fällen eine reaktive Vorgehensweise, für die u. a. anhand des Bauwerkzustands über die Priorisierung und Reihung von Bauwerken entschieden wird. Der Bauwerkzustand wird aus der Schwere der bereits vorhandenen Schäden am Bauwerk abgeleitet. Für die Beurteilung der Schäden werden derzeit vor allem visuelle Merkmale herangezogen. Die Auswirkungen der Schäden auf objektspezifische Anforderungen hinsichtlich der erforderlichen technischen Zuverlässigkeit und der Restlebensdauer sowie die möglichen Folgen eines Bauwerksausfalls bleiben jedoch unberücksichtigt. Dadurch ist die Aussagekraft der aus den Schäden abgeleiteten Zustandsbewertung bezüglich einer vorrausschauenden und verlässlichen Sicherstellung der Verfügbarkeit der Bauwerke nicht ausreichend.

Ziel des SPT ist die Ergänzung der bisherigen Vorgehensweisen bei der Beurteilung von Bestandsbauwerken durch Verfahren, die eine differenziertere Bewertung einer großen Anzahl an Bauwerken und die Berücksichtigung der Folgen eines Bauwerksversagens zulassen. Als Versagen wird dabei im weitesten Sinne das Nichterfüllen einer an das Bauwerk gestellten Anforderung verstanden. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens innerhalb eines gewissen Zeitraums wird allgemein über die Zuverlässigkeit des Bauwerks ausgedrückt. Mit diesem Ansatz ist eine umfassende Beurteilung der Bauwerke über den Lebenszyklus möglich, da objektspezifische Aspekte wie Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, die Restnutzungsdauer, mögliche Nutzungsänderungen sowie die Sensitivität der Bewertung gegenüber den Eingangsparametern berücksichtigt werden. In Verbindung mit den Kenngrößen für die Abschätzung der wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Folgen eines Bauwerksversagens entsteht ein Verfahren zur Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der risikobasierten Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen.

Die entwickelte differenzierte Betrachtungsweise bildet die Grundlage für eine Optimierung der Investitionsstrategie, da neben der schadensorientierten Zustandsbewertung

weitere relevante Kriterien Eingang in die Beurteilung der Bauwerke finden. Durch die Berücksichtigung der technischen Zuverlässigkeit der Bauwerke und der zu erwartenden Versagensfolgen entsteht ein risikobasiertes System zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen. Die darauf aufbauenden Werkzeuge wie ein ganzheitliches Lebenszyklusmanagement unterstützen die Umsetzung einer zielgerichteten Investitionsstrategie.

3.2 Vorgehensweise

Die Bewertung der Zuverlässigkeit bestehender Bauwerke und der Folgen eines Bauwerksversagens erfordern generell eine interdisziplinäre Methodik, um ein grundlegendes Verständnis der zu analysierenden Situation zu schaffen, die breite Palette der verfügbaren Datenquellen zu analysieren und aussagekräftige Kenngrößen zu generieren (Abbildung 15). In diesem Zusammenhang ist die Anwendbarkeit bestehender bautechnischer Regelwerke begrenzt, da die darin enthaltenen Anforderungen und Empfehlungen die Planung und Herstellung neuer Bauwerke betreffen oder nicht alle Bauwerkstypen einer Verkehrsinfrastruktur abgedeckt sind. Die in den Projekten des SPT 302 erarbeiteten Methodiken umfassen bewährte Verfahren aus Ingenieurwissenschaften, Sozialwissenschaften und Operations

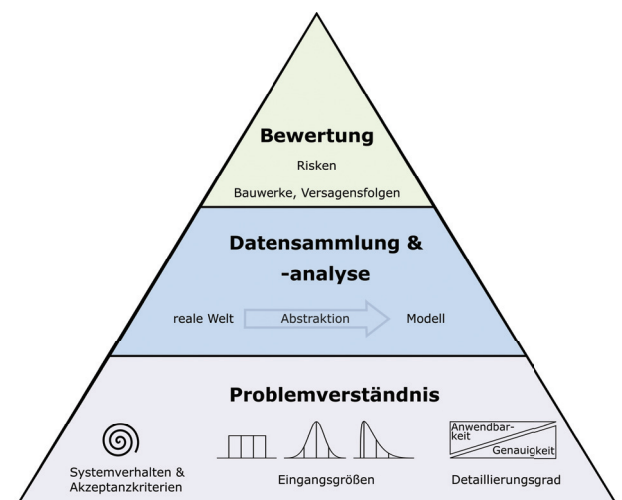


Abbildung 15: Schrittweises Vorgehen zur Bewertung bestehender Bauwerke.

Research, um die normativen Annahmen aus den relevanten Regelwerken sukzessive durch systematisch erworbene, detaillierte Kenntnisse über das zu bewertende Bestandsbauwerk zu ersetzen.

Die Methodik auf der Ebene des Problemverständnisses betrifft die Zusammenstellung von Wissen über die zu analysierende Situation. Auf der Ebene der Datenerhebung und -analyse zielt die Methodik darauf ab, das notwendige Wissen zu erlangen, um ein passendes faktisches Modell aufbauen zu können. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse werden im letzten Schritt aussagekräftige Kenngrößen bewertet, die die Entscheidungsfindung über notwendige Maßnahmen auf Bauwerksebene unterstützen. In der Entscheidungssituation, die sich aus der Abwägung der Kenngrößen ergibt, werden Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse eingesetzt, um zu einem abschließenden Ergebnis zu kommen (Abbildung 16).

Die Bearbeitung in den Teilprojekten erfolgt in den Schritten

- a) Schaffung der Arbeitsgrundlagen
- b) Erhebung des Sachstands und Ermittlung von Defiziten
- c) Ausarbeitung, Analyse und Bewertung konzeptioneller Lösungen und
- d) Durchführung von Pilotstudien zur Erfahrungssammlung und Demonstration der Projektergebnisse.

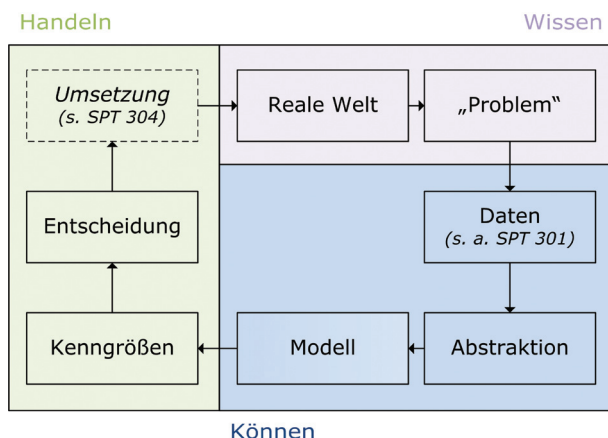


Abbildung 16: Das Modell als Abstraktion der realen Welt, in der eine Entscheidung gefällt werden muss.

Neben der Betrachtung der Zuverlässigkeit bzw. von Teilaspekten der Zuverlässigkeit von Einzelobjekten bzw. Objektgruppen geht es auch um die Berücksichtigung von Zuverlässigkeit und Risikobetrachtungen sowie die Definition relevanter Zielgrößen im Rahmen von Erhaltungs- bzw. Bauwerksmanagementsystemen, die eine aggregierte Betrachtung der Objekte erfordern.

3.3 Projekte

Das Schwerpunktthema "Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Ingenieurbauwerken der Verkehrsinfrastruktur" wurde im Rahmen der fünf nachfolgend beschriebenen Projekte bearbeitet (Tabelle 3).

3.3.1 Zuverlässigkeit Brückenbestand

3.3.1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die bisherige Praxis der Bauwerksprüfung stellt einen deterministischen Ansatz dar (Schaden vorhanden: ja/nein) und Einwirkungen, die eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweisen werden nicht oder nicht angemessen berücksichtigt. Bekannte wissenschaftliche Verfahren zur Berechnung eines Zuverlässigkeitsindex sind sehr zeit- und datenaufwändig und können sinnvoll nur für eine kleine Anzahl von Bauwerken und nicht für ein Netz angewendet werden.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Konzeption zur Abschätzung der Zuverlässigkeit von geschädigten Brücken zu entwickeln und exemplarisch zu testen. Diese Abschätzung soll dazu dienen, die Zuverlässigkeit sowohl von geschädigten, als auch von ungeschädigten Bauwerken untereinander vergleichen zu können.

3.3.1.2 Untersuchungsmethoden

Das übergeordnete Ziel liegt in der Steigerung der Zuverlässigkeit von Verkehrsnetzen. Dafür ist es notwendig, die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponente zu bestimmen. Dazu bieten sich Methoden basierend auf Bayes-Netzen an. Die Ergebnisse von Bauwerksprüfungen bilden die wich-

Tabelle 3: Projekte im SPT 302.

Behörde	Titel	Projektleiter/-in
BASt	Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksinspektion Schlüsselworte (DE): Bauwerksprüfung, Bayes Update, Zuverlässigkeitsindex, vulnerable Zones Keywords (EN): structural inspection, Bayes Update, reliability index, vulnerable zones	Rolf Rabe Ralph Holst (Autor*)
BAW	Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung Schlüsselworte (DE): Bauwerkszuverlässigkeit, Expertenwissen, Datenerfassung und -auswertung, FORM, Monte-Carlo-Simulationen, Markov-Ketten, Ufersicherungen Keywords (EN): structural reliability, expert knowledge, data collection and assessment, FORM, Monte-Carlo-simulations, markov chains, bank revetments	Julia Sorgatz
BAW	Zuverlässigkeitsbasierte Expertensysteme: Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für ein risikobasiertes Infrastrukturmanagement Schlüsselworte (DE): Entscheidungsunterstützung, MCDA, Risikomanagement, Risikobewertung; Wasserstraßen Keywords (EN): decision support, MCDA, risk management, risk assessment, waterways	Heike Schmidt-Bäumler
BAW	Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen Schlüsselworte (DE): technische Zuverlässigkeit, FMEA, Fuzzylogik, AHP, TOPSIS, Robustheit, Erhaltungsmanagement, Wasserstraßen, Operations Research Keywords (EN): technical reliability; FMEA, Fuzzy Logic, AHP, TOPSIS, robustness, maintenance management, hydraulic structures, operations research	François Nyobeu Andreas Panenka

* hier ist der Autor nicht der Projektleiter

tigste Grundlage für die Ableitung notwendiger Maßnahmen und somit für das Konzept zur Abschätzung des Zuverlässigkeitsindex.

Nachfolgend sind die fünf notwendigen Arbeitsschritte mit Teilarbeiten dargestellt (Abbildung 17).

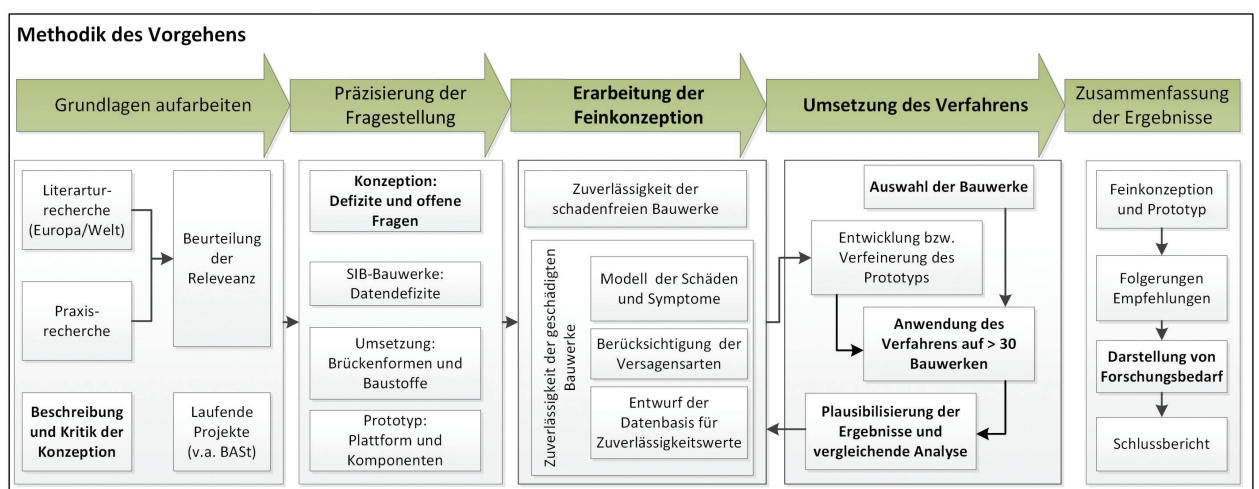


Abbildung 17: Methodik des Vorgehens (Hajdin et al. 2018).

3.3.1.3 Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes mit Unterstützung durch externe Forschung (Hajdin et al. 2018, Hajdin & Fastrich 2019) ist ein webbasiertes Tool entwickelt und an 30 typischen Bauwerken exemplarisch getestet worden. Dieses bezieht seine Eingangswerte aus den Bauwerksdaten der Baulastträger (im ersten Ansatz aus SIB-Bauwerke für Straßenbrücken) und erzeugt somit keinen oder nur einen sehr geringen zusätzlichen Aufwand für die Bereitstellung der notwendigen Daten. Zusätzliche Daten, z. B. genauere Ortsangaben der Schäden oder Ergebnisse von Nachrechnungen, können die Genauigkeit der Abschätzungen verbessern.

Das Tool ermöglicht sehr bedienerfreundlich eine Auswahl der Bauwerke entweder über eine Karte oder eine Liste. Danach ist es möglich, die Zuverlässigkeit a priori, also ohne Berücksichtigung von Schäden, zu berechnen bzw. a posteriori unter Einbeziehung von Schäden am Bauwerk und zwar getrennt für die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit. Dabei können auch mehrere Schäden am Bauwerk und am gleichen Schadensort mit einbezogen werden. Bei der Berechnung der A-Priori-Zuverlässigkeit werden die zum Zeitpunkt der Erstellung des Bauwerkes gültigen Normen und Lastannahmen berücksichtigt und auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt die Auslastung der Bauwerkstragfähigkeit bei 100 % lag.

Ein wichtiger Bestandteil des Tools ist die Festlegung von "vulnerable zones", d. h. von Bereichen, die mehr oder weniger empfindlich auf das Auftreten von Schäden reagieren. Dabei unterscheiden sich die Bereiche für Biege- bzw. für Schubbeanspruchungen.

Im Ergebnis werden Zuverlässigkeitswerte unterschiedlicher Brücken ermittelt (Abbildung 18), um daraus ein Vergleich (Screening) mit anderen Bauwerken zu ermöglichen. Das Konzept sieht vor, dass damit die bisherige Vorgehensweise der Bauwerksprüfung ergänzt und unterstützt und somit eine verbesserte zuverlässigkeitsbasierte Basis für Erhaltungsplanungen geschaffen wird.

3.3.1.4 Nutzen

Der wesentliche Nutzen dieses Projektes besteht darin, dass es mit einer einfachen Methodik möglich ist, die Zuverlässigkeit,

dargestellt über den Zuverlässigkeitsindex β , einer größeren Anzahl von Bauwerken (> 100) mit vergleichsweise geringem Aufwand abschätzen zu können, um damit einen Vergleich von Bauwerken untereinander vornehmen zu können. Eine Abschätzung ist ausreichend, da durch die Systematik der Bauwerksprüfung in Deutschland die Wahrscheinlichkeit eines schlagartigen Standsicherheitsversagens als gering angesehen werden kann.

Der zweite Nutzen besteht darin, dass es mit dieser Methodik wesentlich einfacher sein wird, zuverlässigkeitsbasierte Verfahren in die Anwendung bei den Baulastträgern zu bringen, da es sich hier nicht um eine "Black-Box" von wissenschaftlich sehr anspruchsvollen Verfahren handelt. Dies vergrößert die Akzeptanz in der Praxis und ermöglicht es, zukünftig weitergehende zuverlässigkeits- bzw. risikobasierte Verfahren zu entwickeln und in die Anwendung zu bringen und damit das Verkehrsnetz ein Stückweit resilienter zu machen.

Das Konzept ist zwar konkret an Straßenbrücken getestet worden, aber es ist so offen aufgebaut, dass auch andere Bauwerksarten und andere Verkehrsträger mit ihren Daten hierin eingebunden werden können, damit zukünftig der Vergleich der Zuverlässigkeit von Verkehrsbauwerken mit einheitlichen Ansätzen erfolgen kann. Hierfür bietet eine Zusammenarbeit der Behörden im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks die besten Voraussetzungen.

3.3.2 Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung

3.3.2.1 Aufgabenstellung und Ziel

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es zweckmäßig, eine möglichst weitgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes mit möglichst großen Binnenschiffen zu ermöglichen. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, ein zuverlässigkeitsbasiertes, zum BAW-Merkblatt "Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen" (GBB 2010) ergänzendes Bemessungsverfahren für lose Schüttsteindeckwerke zu entwickeln, welches eine Prognose der Standsicherheit, der Langzeitbeständigkeit und der Wirt-

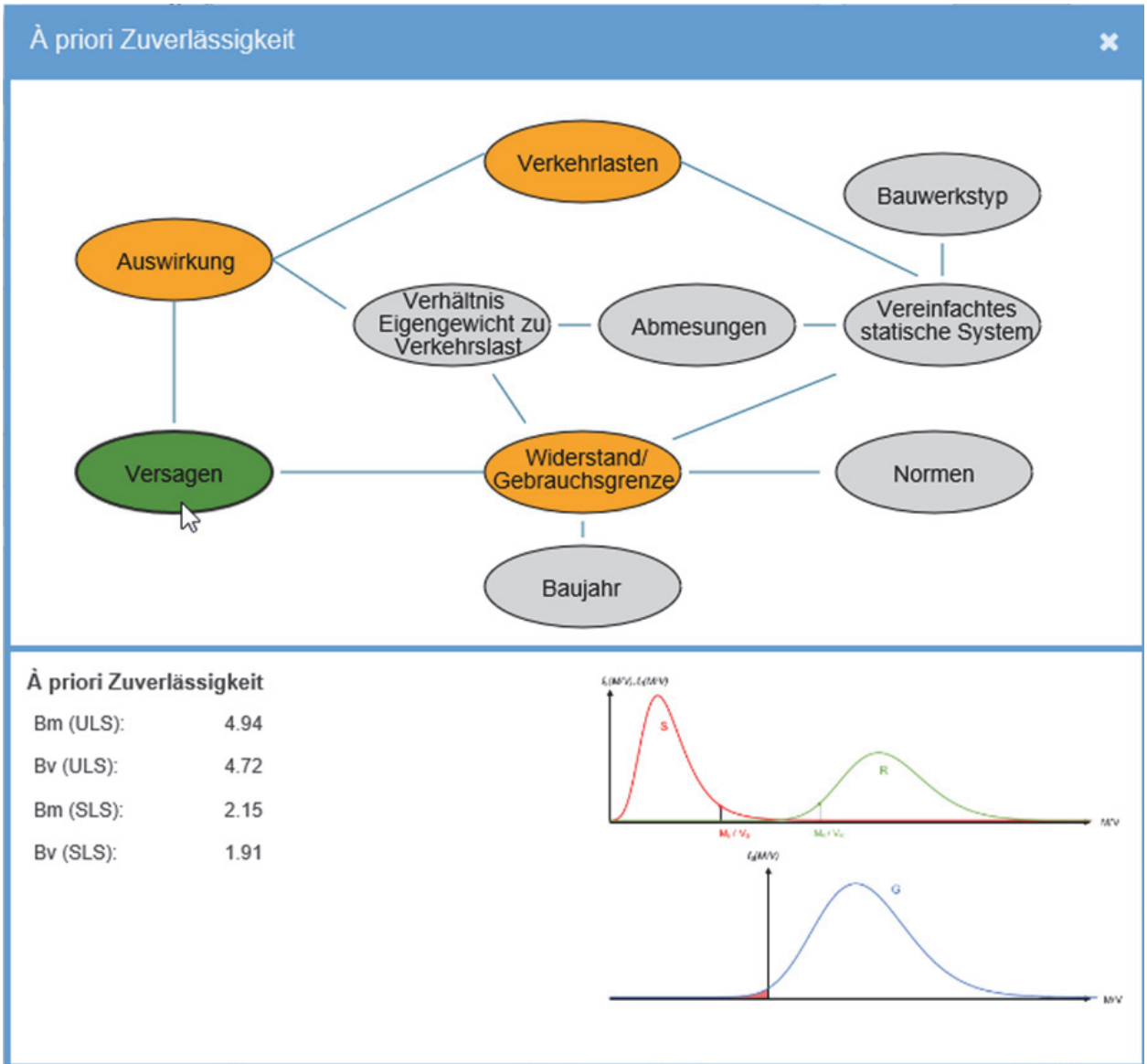


Abbildung 18: Exemplarische Ergebnisse einer A-Priori-Zuverlässigkeits-Berechnung (Hajdin et al. 2018).

schaftlichkeit von Böschungs- und Sohlensicherungen projektspezifisch, d. h. unter der tatsächlichen Verkehrsbelastung und an das jeweilige Sicherheitsbedürfnis angepasst, ermöglicht.

Zur Umsetzung dieser Anforderungen sind in einer Bemessung die Streuung von Bemessungsgrößen sowie die daraus resultierenden Unsicherheiten auf Einwirkungs- und Wi-

derstandsseite zu berücksichtigen und differenzierte, von der Belastungsintensität abhängige Kennzahlen zu generieren. Die entwickelten, für eine Zuverlässigkeitsbetrachtung erforderlichen Prozessabläufe (d. h. von der Datenerfassung, Datenanalyse bis hin zur Zuverlässigkeitsanalyse; vgl. Abbildung 15) sollen in das vom SPT 302 angestrebte ganzheitliche und verkehrsträgerübergreifendes Konzept zur Bewertung der Bauwerkszuverlässigkeit integriert werden.

3.3.2.2 Untersuchungsmethoden

Im Forschungsvorhaben wurde ein Mixed-Methods-Ansatz verwendet. Qualitative und quantitative Methoden der Datenerhebung wurden miteinander kombiniert. In Experteninterviews wurden qualitative Informationen zu Schadensursachen, Schadensbildern und zur Schadensentwicklung von Ufersicherungen aus losen Schüttsteinen ermittelt. Daraus resultierende Hypothesen wurden in einem großmaßstäblichen Modellversuch überprüft.

In einer Wellengrube wurde eine technische Ufersicherung mit Wellen und Strömung belastet, sodass sich sukzessive ein Schaden entwickelt (Abbildung 19). Die Ufersicherung wurde in regelmäßigen Abständen mit einem Laserscanner (Abbildung 20) in ein lokal referenziertes 3D-Modell überführt und die Schadensentwicklung in einem Höhendifferenzenmodell bewertet.

Die Versuche liefern vertiefende Erkenntnisse zur Schadensentwicklung. Gleichzeitig wurde unter Verwendung gängiger Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse, z. B. Monte-Carlo-Simulation (Metropolis & Ulam 1949) und FORM (engl. *first-order reliability method*) (Hasofer & Lind 1974), ein zum GBB ergänzendes Bemessungskonzept entwickelt, welches Verkehrsbeobachtungen an der Wasserstraße nutzt. Sensitivitätsstudien geben Informationen zu den erforderlichen Eingangsparametern im Bemessungs-

modell. Eine Prognose der Langzeitstabilität erfolgte mithilfe eines Ansatzes basierend auf Markov-Ketten (Sorgatz et al. 2019).

3.3.2.3 Ergebnisse

Die Experteninterviews für Wasserstraßen unterschiedlicher Netzkatgorien und Ausbauzustände ergaben, dass vor allem hydraulische Einwirkungen (Wellen, Strömungen) zu Steinverlagerungen an der Wasserstraße führen. Böschungsrutschungen, resultierend aus Porenwasserüberdrücken, werden hingegen selten beobachtet. Aus kleineren Schädigungen (Steinverlagerungen) an der Oberfläche entwickeln sich mit der Zeit größere Schadstellen (Sorgatz et al. 2018). Ferner wurden mithilfe des qualitativen Ansatzes kausale Zusammenhänge in Form von Ursache-Wirkungsketten präzisiert und dadurch ein erweitertes Systemverständnis erlangt.

Basierend auf den Ergebnissen der Experteninterviews wurde ein großmaßstäblicher Modellversuch auf dem BAW-Gelände durchgeführt. In einer Wellengrube wurde eine Ufersicherung, bestehend aus einem Feinsand, einem zweistufigen Kornfilter und einer losen Deckschicht aus Wasserbausteinen aufgebaut. Eine Unterdimensionierung der Steingröße bezogen auf bestehende Bemessungsregeln, erlaubt es, Steinverlagerungen bei Wellen- und Strömungsbelastung zu beobachten. Die Ergebnisse zeigen ein typi-



Abbildung 19: Wellengrube unmittelbar vor der Versuchsdurchführung.



Abbildung 20: Aufnahme mit dem Laserscanner.

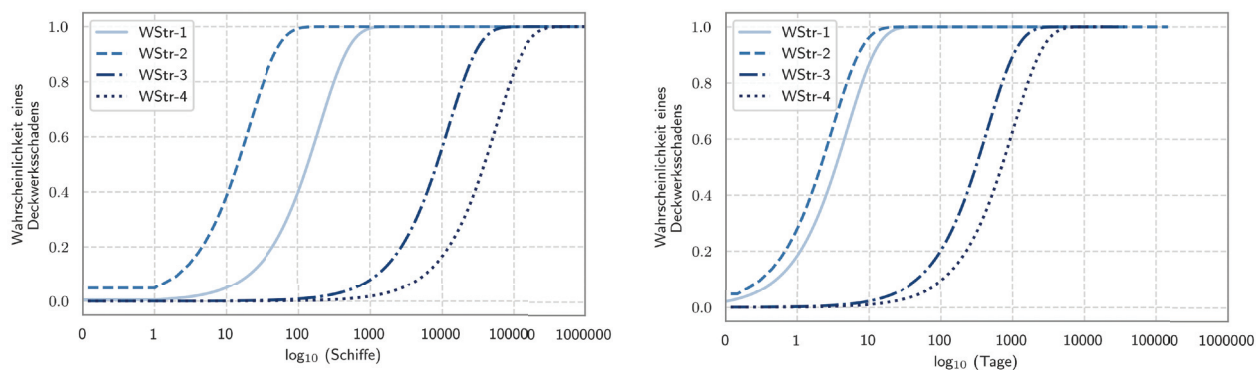


Abbildung 21: Wahrscheinlichkeit eines Deckwerkschadens in Abhängigkeit von der Anzahl der Schiffe (links) und der Zeit (rechts) am Beispiel unterschiedlicher Wasserstraßen (WStr).

sches Schadensbild. Die Wasserbausteine aus dem Wasserwechselbereich verlagern sich zum Böschungsfuß hin. Die Oberkante der Böschung steilt sich leicht auf. Es entsteht ein S-Profil. Weiterhin kann beobachtet werden, dass ein Schaden anfangs schnell eintritt, anschließend jedoch bei gleichbleibender Belastungsintensität nur langsam fortschreitet.

Das entwickelte Konzept zur Anwendung zuverlässigkeitsbasierter Methoden auf die Bemessung von Ufersicherungen beschränkt sich derzeit auf die Prognose von Steinverlagerungen. Die Zuverlässigkeitsanalyse wird hierfür mit einem Markov-Ketten-Ansatz kombiniert. Dies erlaubt eine Interpretation der Versagenswahrscheinlichkeit als Wahrscheinlichkeit eines Initialschadens bezogen auf den Verkehr oder die Zeit (Abbildung 21). Die Prognose basiert auf der ermittelten Bauwerkszuverlässigkeit im Hinblick auf Steinverlagerungen und dem Markov-Ketten-Ansatz. Die Wahrscheinlichkeit eines Deckwerksschadens lässt keine Rückschlüsse auf die Standsicherheit der Ufersicherung zu.

Zukünftig könnte dieses Verfahren bei der Definition der Grenzzuverlässigkeit unterstützen. Darüber hinaus lassen die Ergebnisse vermuten, dass homogene Markov-Ketten mit der darin implizierten exponentiell fortschreitenden Schadensentwicklung für eine langfristige Schadensprognose ungeeignet sind. Die Zuverlässigkeitsanalyse verdeutlicht die Notwendigkeit einer repräsentativen Datenerhebung (Sorgatz et al. 2019) Derzeit wird zusammen mit dem WSA Rheine und dem Außenbezirk Münster am Dortmund-Ems-Kanal an einer Dauermessstelle ein Konzept

zur Beschreibung der Repräsentativität einer Messkampagne geprüft.

Nicht zuletzt wurden im Laufe des Forschungsvorhabens verschiedene Methoden und Prozessabläufe erprobt, welche Bestandteile eines im SPT 302 erarbeiteten Methodenkoffers zur Zuverlässigkeitsanalyse sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerkssbemessung" wurden insbesondere Prozessabläufe zur Erhebung von Expertenwissen sowie für die Bewertung und Analyse quantitativer Daten erarbeitet, welche auf die Verkehrsinfrastrukturen Straße und Schiene übertragbar sind.

3.3.2.4 Nutzen

Diese Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben unterstützen die WSV bei einem optimalen Einsatz von Ressourcen in der Unterhaltung unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Randbedingungen, ohne jedoch Sicherheitsdefizite zu erzeugen. Es werden erste Ansätze vorgestellt, die eine Abschätzung der Zustandsentwicklung von technischen Ufersicherungen und darauf basierend eine Prognose des Sanierungs- und Unterhaltungsbedarfs im Netz der Bundeswasserstraßen erlauben.

Neben dem wasserstraßenspezifischen Nutzen ergänzen die entwickelten Prozessschritte die zuverlässige Bewertung von Bauwerken der verschiedenen Verkehrsträger. Die Methodik unterstützt die Entwicklung einer effizienten, modalen Bauwerksbewertung, die darauf abzielt, die

Zuverlässigkeit der Verkehrsinfrastruktur zu stärken. Im Forschungsvorhaben werden sowohl qualitative als auch quantitative Methoden der Datenerhebung und -analyse eingesetzt. Zusammen liefern die zwei Datentypen ein umfassendes Bild der zu bewertenden Strukturen. Expertenwissen enthält insbesondere Informationen über Ereignisse, die sich aufgrund fehlender Daten in ausreichender Dichte und Qualität einer stochastischen Beschreibung entziehen. Der quantitative Ansatz nähert die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Struktur an. Beide Ansätze führen zu aussagekräftigen Modellen und Kennzahlen, die Entscheidungsprozesse im Hinblick auf die Zuverlässigkeit bestehender Strukturen unterstützen.

3.3.3 Zuverlässigkeitsbasierte Expertensysteme

3.3.3.1 Aufgabenstellung und Ziel

Viele Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur sind in einem "nicht ausreichenden" bzw. "ungenügenden" oder "ausreichenden" Zustand. Insbesondere die mit "ausreichend" bewerteten Bauwerke lassen zudem erwarten, dass sich ihr Zustand innerhalb der nächsten Jahre weiter verschlechtern und somit der Bedarf an dringlichen Maßnahmen noch zunehmen wird, um das Risiko von Funktionsausfällen oder von Beeinträchtigungen durch Bauwerksversagen zu minimieren. Aufgrund der begrenzten Ressourcen ist es notwendig, Bauwerke für eine Erhaltungsstrategie zu priorisieren.

Ziele dieses Forschungsvorhabens sind die Abschätzung potenzieller Risiken auf Basis von Ex-ante-Schadensanalysen sowie eine transparente und objektive Entscheidungsunterstützung für die Priorisierung einer großen Anzahl unterschiedlicher Verkehrsbauwerke am Beispiel der Bundeswasserstraßen.

3.3.3.2 Untersuchungsmethoden

Bei den Verkehrswasserbauwerken lassen sich drei übergeordnete Anforderungen identifizieren. Diese sind (1) die Nutzung der Wasserstraße für den Personen- und Güterverkehr sowie für die Entnahme und die Einleitung von Wasser, (2) der Schutz vor Überflutung sowie vor erhebli-

chen Veränderungen des Grundwasserspiegels und (3) die Kreuzung der Wasserstraße durch andere Infrastruktursysteme wie Straßen oder Pipelines. An der Erfüllung dieser Anforderungen sind verschiedene Bereiche der Gesellschaft interessiert. Diese Bereiche sind die Wertekategorien Infrastruktursysteme, Personen- und Güterschifffahrt, Siedlungen, Industrie und Gewerbe, Energieversorgung, Landwirtschaft und Naturlandschaften. Diese wurden zu vier Gruppen zusammengefasst und es wurden für jede Gruppe Indikatoren für die Ex-ante-Schadensanalyse festgelegt (Tabelle 4).

Mithilfe von Geoinformationsdaten und unter Verwendung des Programms ArcGIS (Geoinformationssystem-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI) wurde ermittelt, welche Arten der Flächennutzung in den objektspezifischen Untersuchungsgebieten vorliegen, wie groß diese Flächen innerhalb dieses Gebiets sind und wie viele Menschen dort leben. Zur Vereinfachung werden abweichend vom Bundesverkehrswegeplan 2030 (BMVI 2016) die Kosten durch Verkehrsunterbrechung nach einem Funktionsausfall oder Bauwerksversagen auf Grundlage der Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt (Destatis 2017) und mit den in § 4 in BinSchLV (Verordnung über Lade- und Löscheziten 2010) genannten Liegegeldsätzen abgeschätzt.

Für die Wiederherstellungskosten wurde auf Basis der Neubaukosten von 13 Wehranlagen der WSV je eine Schätzfunktion für den Massivbau und die Verschlüsse abgeleitet, deren Summe den Baukosten entspricht. Es konnte bei der Realdatenanalyse ein direkter Zusammenhang zwischen den Kosten und der Fallhöhe sowie der Verschlussbreite ermittelt werden.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) am KIT wurden für eine Schwallwelle nach einem plötzlichen Anlagenversagen angepasste Abschätzungsformeln entwickelt. Nach Angabe der situationsabhängigen Parameter Wehrfeldanzahl, Fallhöhe, Unterwassertiefe und Sohlabsturz können für Wehranlagen individuell die Höhe, die Geschwindigkeit der Schwallwelle sowie der Durchfluss ermittelt werden. Diese zusätzlichen Informationen sind ein weiterer Anhaltspunkt, in welchem Ausmaß eine Gefährdung durch Wasser von Personen im Uferbereich besteht.

Tabelle 4: Ableitung von Indikatoren aus den Wertekategorien.

Wertekategorien	Gruppen	Indikatoren
Infrastruktursysteme Personen- und Güterschifffahrt Siedlungen	Gesellschaft	Einwohnerzahl Größe der Siedlungen
Industrie und Gewerbe Energieversorgung	Wirtschaft	Kosten durch Verkehrsunterbrechung Größe der Industrie- und Gewerbeflächen
Landwirtschaft Naturlandschaften	Umwelt	Größe der natürlichen Flächen
	Infrastrukturbetreiber	Wiederherstellungskosten für das Bauwerk

Im abschließenden Schritt erfolgt die Priorisierung der Bauwerke hinsichtlich bestehender Risiken mit Methoden der multikriterielle Entscheidungsfindung (MCDA). Die Auswertung aller erfassten Indikatoren erfolgt mit der Methode PROMETHEE (engl. preference ranking organisation method for enrichment evaluation) (Brans & Vincke 1985). Hierbei können individuelle Präferenzen und Gewichtungen in den Entscheidungsprozess integriert werden.

3.3.3.3 Ergebnis

Die in diesem Forschungsprojekt entwickelte Methode verwendet die Daten aus der Bauwerksinspektion und zur wirtschaftlichen Bedeutung des Bauwerks sowie Informationen zu möglichen Konsequenzen bei Funktionsausfall oder im Fall eines Bauwerksversagens. Dafür wurde ausschließlich auf verfügbare oder einfach zu ermittelnde Daten zurückgegriffen, sodass die Methode kurzfristig für eine große Bauwerksanzahl eingesetzt werden kann. Die neuen Daten stellen den Bezug zwischen den Aufgaben und Funktionen der Bauwerke und den gesellschaftlichen Systemen her, in welche die Verkehrsinfrastruktur eingebettet ist und die bei außergewöhnlichen Ereignissen direkt betroffen sein können. Es ist mit den zusätzlichen Daten möglich, eine große Anzahl Verkehrswasserbauwerke in Bezug auf ihre Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung und ihre wirtschaftliche Bedeutung für eine Maßnahmenplanung

zu priorisieren. Die Methoden der MCDA erlauben die Berücksichtigung der individuellen Präferenzen der Entscheidungsträger und die zielorientierte Gewichtung der einzelnen Kriterien für eine transparente Entscheidungsfindung.

3.3.3.4 Nutzen

Eine Integration von Ansätzen aus dem Risikomanagement in das Erhaltungsmanagement von Verkehrsbauwerken stellt einen Bewertungsrahmen zur Verfügung, der über eine rein bauwerksbezogene Beurteilung hinausgeht. Eine Priorisierung auf Basis von Risikobeurteilungen zeigt das Potenzial zur Vermeidung von Auswirkungen für unterschiedliche Interessengruppen auf und erlaubt eine verbesserte Beurteilung der Wirksamkeit von Entscheidungen und somit insbesondere einen gezielten und bedarfsorientierten Einsatz der verfügbaren Ressourcen. Die entwickelte Methode arbeitet mit vorhandenen Daten und ist auf die Verkehrsinfrastrukturen Straße und Schiene übertragbar. Die Beteiligung und die Zusammenarbeit mit den anderen Behörden des BMVI-Expertennetzwerks fand im Rahmen der Betreuung externer Projekte und dem fachlichen Austausch zu den Themen Ex-ante-Schadensanalysen, Datenanalyse und Lebenszyklusmanagement bei den verschiedenen Verkehrsträgern statt.

3.3.4 Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen

3.3.4.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Tragfähigkeit einer bestehenden Konstruktion lässt sich über die technische Zuverlässigkeit ausdrücken, die vom Zustand des Bauwerks abhängt. Bisher in Deutschland eingesetzte Zustandsbewertungsverfahren basieren im Wesentlichen auf der qualitativen Bewertung der bei Bauwerksinspektionen festgestellten Schäden. Im Hinblick auf die Entscheidungsunterstützung bei der Priorisierung von Instandsetzungsmaßnahmen reicht dieses Verfahren nicht aus, da sowohl die eingesetzten Bewertungsskalen zu grob als auch die verwendeten Kennzahlen für die anforderungsspezifische Beschreibung des Bauwerkszustands ungeeignet sind.

Im Forschungsvorhaben über Tragfähigkeitskennzahlen für bestehende Konstruktionen sollen daher Methoden und Werkzeuge entwickelt werden, die auf Grundlage der festgestellten Schäden eine anforderungsspezifische Aussage der untersuchten Konstruktionen erlauben und damit eine Berücksichtigung von Tragfähigkeitsaspekten im Zustandsbewertungsverfahren ermöglichen. Als Ergebnis

wird eine Systematik angestrebt, die auf den Methoden der Zuverlässigkeitsbetrachtung basiert sowie auf verschiedene Objektarten und Verkehrsträger übertragbar ist. Die entwickelten Methoden und Werkzeuge werden am Beispiel von Massivbauten an Wasserstraßen (Schleusen, Wehre) und deren stahlbaulichen Verschlusskörpern getestet.

3.3.4.2 Untersuchungsmethoden

Eine systematische Methode zur Bewertung von Bauteilen, Prozessen und Systemen ist die Fehlermöglichkeiten- und Auswirkungsanalyse (FMEA), eine Methode für qualitative Zuverlässigkeitsbetrachtungen (Linß 2016). Mithilfe einer FMEA werden anhand einer einheitlichen Kennzahl die von einem System ausgehenden Risiken bewertet. Dafür werden zunächst die funktionalen Bestandteile des zu untersuchenden Systems hierarchisch geordnet. Aus den erforderlichen funktionalen Anforderungen werden potenzielle Ursache-Wirkungsketten abgeleitet. Diese bringen mögliche Fehler mit deren Folgen und den potenziellen Fehlerursachen in einen Zusammenhang. In der abschließenden Risikoanalyse werden die Ursache-Wirkungsketten hinsichtlich ihrer Auswirkung auf eine vorab bestimmte Zielgröße in eine Rangfolge gebracht, um dementsprechend die erforderlichen Maßnahmen zur Risikominimie-

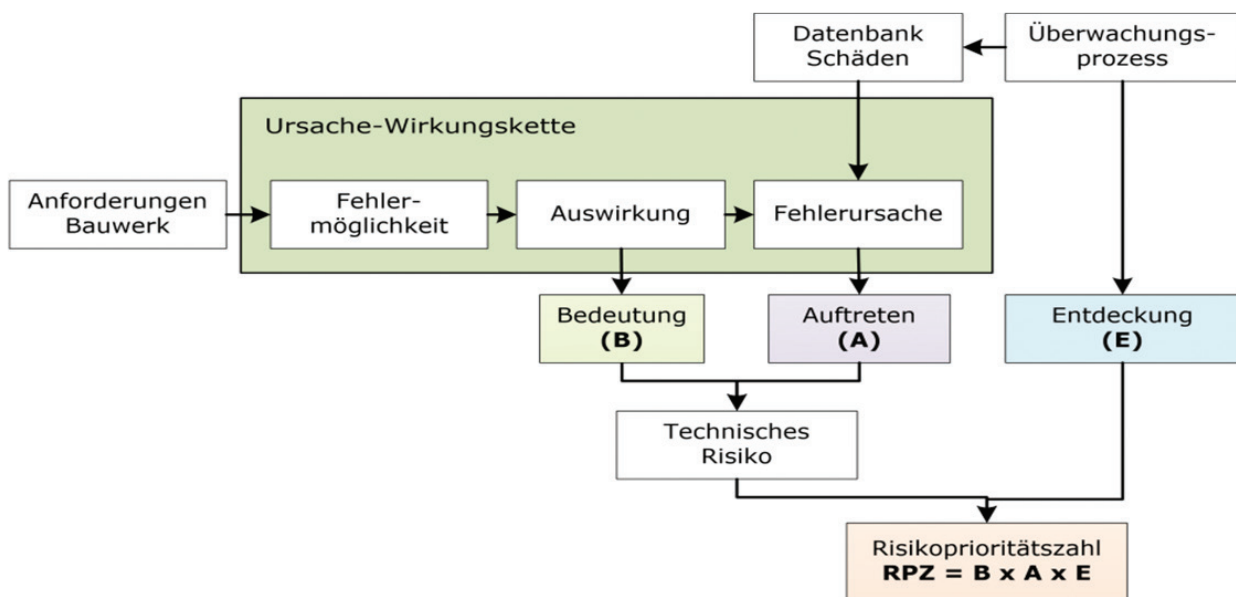


Abbildung 22: Ablauf einer Risikobewertung mit Hilfe einer FMEA, deren Kennzahl die RPZ ist.

zung bzw. zur Erhöhung der Zuverlässigkeit des Systems zu priorisieren. Die Risikobewertung geschieht anhand von Kriterien, die den Schweregrad der Fehlerfolge (Bedeutung, B), die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (Auftreten, A) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit durch qualitätssichernde Maßnahmen für den jeweiligen Fehler (Entdeckung, E) berücksichtigen. Die Daten für die Bewertung der Kriterien stammen aus vorhandenen Datenbanken und verfügbarem Expertenwissen. Aus der Bewertung der Kriterien wird als Kennzahl die sog. Risikoprioritätszahl (RPZ) ermittelt (Abbildung 22). Je höher die RPZ ausfällt, desto höher ist das Risiko, das von der Ursache-Wirkungskette ausgeht. Dementsprechend hoch ist die Priorität für eine Minimierung des jeweiligen Risikos. Die Wahl der Bewertungskriterien steht dem Anwender frei. Die Aussagen der Risikobewertung lassen sich dadurch der zugrunde gelegten Fragestellung anpassen (Panenka & Nyobeu 2018).

Als Verfahren zur Ermittlung der Kennzahlen kommen *analytic hierarchy process* (AHP) (vgl. Nyobeu & Panenka 2018) und TOPSIS (engl. *technique for order preference by similarity to ideal solution*) (Peters & Zelewski 2007) aus dem Bereich der Operations Research zum Einsatz. Eine weit-

verbreitete Methode zur Berechnung der RPZ basiert auf Fuzzylogik (Bowles & Peláez 1995). Alle drei Verfahren berücksichtigen die Subjektivität und die damit verbundenen Unsicherheiten in Bewertungsverfahren, die hauptsächlich auf Expertenwissen basieren.

3.3.4.3 Ergebnisse

Die FMEA fügt sich in das bisherige Schema der Zustandsbewertung von Wasserbauten nahtlos ein und erweitert den zur Verfügung stehenden Informationsumfang (Abbildung 23). Grundlage für das Forschungsvorhaben bilden die Datenbanken mit den Ergebnissen von Bauwerksinspektionen an den Bundeswasserstraßen. Die erfassten Schäden werden von der WSV mittels der Software WSVP systematisch dokumentiert. Die Datensätze enthalten neben wenigen quantitativen Angaben hauptsächlich qualitative Informationen über die vorgefundenen Schäden in Form von verschriftlichtem Expertenwissen. Anhand einer FMEA lassen sich diese Datensätze systematisch auswerten, ohne dabei in deren Struktur einzugreifen.

Durch eine Validierung der ermittelten Ursache-Wirkungsketten anhand der erfassten Schäden entsteht eine

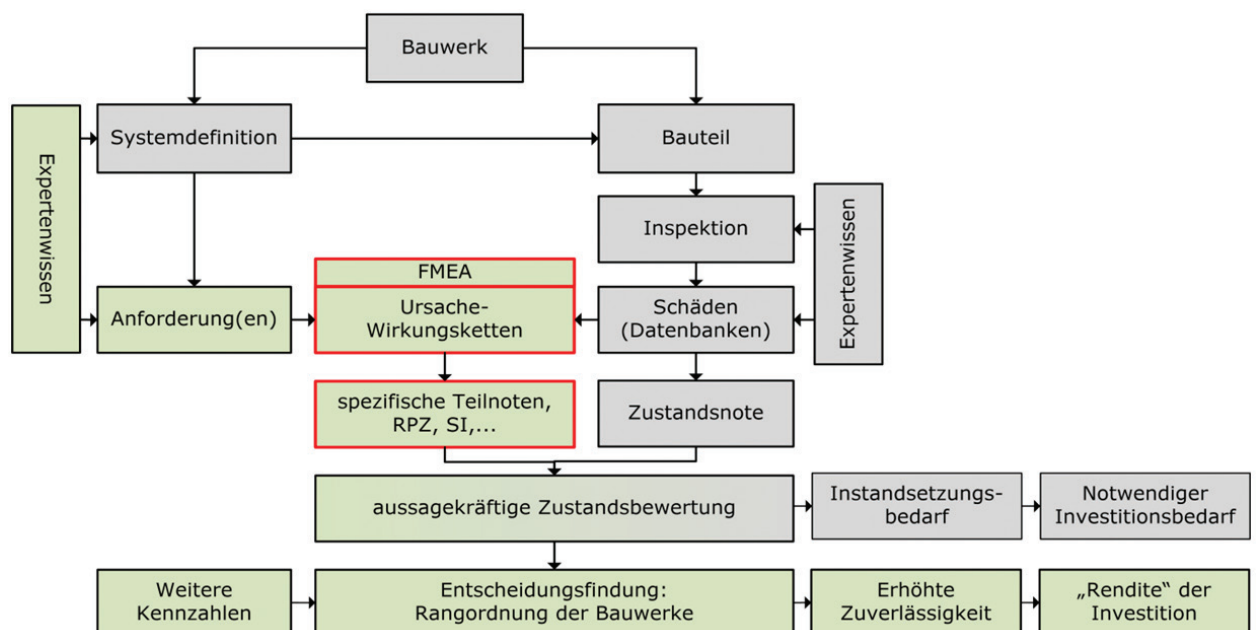


Abbildung 23: Integrale Zustandsbewertung zur Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen (grau: derzeitige Bausteine des EMS-WSV; grün: ergänzende Bausteine durch die FMEA).

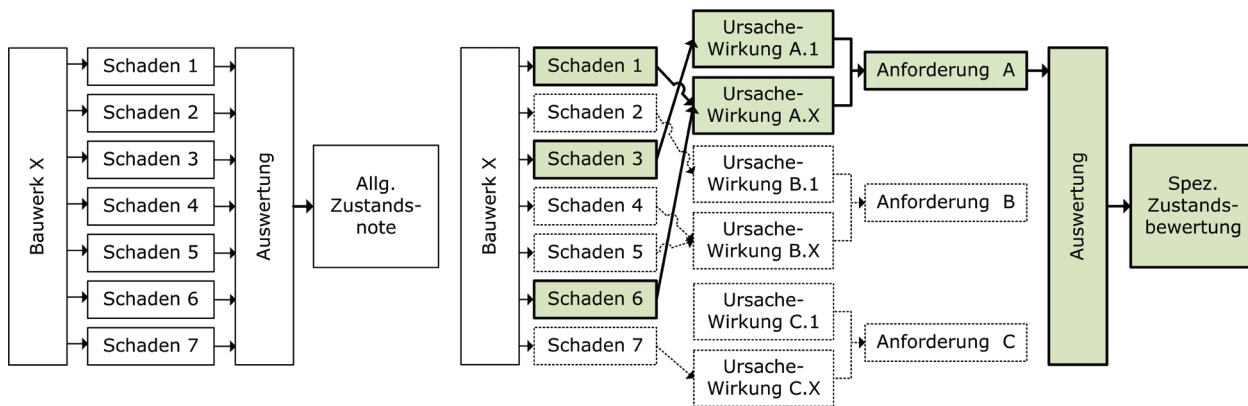


Abbildung 24: Ermittlung der Zustandsnote eines Bauwerks X; links: allgemeine Zustandsnote; rechts: anforderungsspezifische Zustandsbewertung anhand der Ursache-Wirkungsketten aus einer FMEA.

Verbindung zwischen den Schäden und deren Auswirkungen auf die funktionalen Anforderungen an das Bauwerk. Dadurch ist nun unter Beibehaltung der etablierten Bewertungsalgorithmen das anforderungsspezifische Filtern und Berechnen von Zustandsnoten möglich (Abbildung 24). Die an das Erhaltungsmanagementsystem (EMS) der WSV angepasste Risikobewertung stellt mit der RPZ eine aussagekräftige Kenngröße zur Verfügung, die in die Bauwerksbewertung integriert werden kann. Der Einsatz von Fuzzylogik bei der Ermittlung der RPZ erlaubt die Berücksichtigung von Subjektivität als Form der Unsicherheit. Die RPZ ist somit eine Kennzahl für die Zuverlässigkeit des Bauwerks (Panenka & Nyobeu 2018a 2018b).

Ergänzend dazu wurde zur Ermittlung des Schweregrads der Fehlerfolge bzw. deren Bedeutung ein Verfahren zur Robustheitsbewertung einzelner Bauwerksteile entwickelt. Das Verfahren basiert ebenfalls auf einer FMEA und verwendet den AHP zur Wichtung und Bewertung der Robustheitskriterien sowie zur Ermittlung des Robustheitsindex (RI) als Kenngröße. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Schäden an einem Bauwerk lässt sich daraus ein Schadensindex (SI) ableiten. (Akkermann & Weiler 2018, Akkermann et al. 2018).

Sowohl die Zustandsbewertung mittels RPZ als auch SI ermöglichen einen einheitlichen Bewertungsprozess unter Berücksichtigung von subjektivem Expertenwissen. Die dadurch generierten zusätzlichen Kennzahlen erlauben sowohl vergleichende als auch anforderungsspezifische

Aussagen über den Zustand der untersuchten Bauwerke. Durch diese integrale Art der Zustandsbewertung wird eine zielgerichtete Reihung von Instandsetzungsmaßnahmen erleichtert. Angewendet auf die 15 Schleusen des Main-Donau-Kanals wurde mithilfe der FMEA-basierten Bewertungsmethoden und der damit generierten Kenngrößen die Notwendigkeit für tiefgreifende strukturelle Maßnahmen an einigen der Schleusen nachvollzogen und anschaulich dargestellt. (Akkermann & Weiler 2018) Die Zustandsbewertung einiger Wehrverschlüsse am Neckar wurde trotz teilweise gleicher Zustandsnoten weiter differenziert und dadurch eine eindeutige Reihung der Wehre hinsichtlich potenzieller zustandsbedingter Tragfähigkeitsdefizite ermittelt. (Panenka & Nyobeu 2018b).

3.3.4.4 Nutzen

Die entwickelte FMEA ist eine integrale Systematik für die Zustandsbewertung von Bauwerken der Verkehrsinfrastrukturen, die nicht auf einzelne Objektarten oder Verkehrsträger beschränkt ist. Das Bewertungsverfahren unterscheidet zwischen den verschiedenen Anforderungen, die an das Bauwerk gestellt werden, und den damit verbundenen Risiken. Die unter Berücksichtigung der Subjektivität in qualitativen Bewertungsverfahren entwickelten Kennzahlen (RPZ, RI, SI) stellen neben den anforderungsspezifischen Zustandsnoten eine zuverlässigkeitsbasierte Ergänzung der Zustandsbewertung dar. Während die RPZ den Fokus auf eine differenzierte Bewertung der Schäden legt, berücksichtigen RI und SI explizit die bauliche Durch-

bildung des einzelnen Bauwerks und die Auswirkung der Schäden auf das Bauwerk. Die Kennzahlen erlauben unabhängig von dem zugrunde liegenden EMS vergleichende Aussagen über den Zustand der untersuchten Bauwerke und eignen sich daher für alle Verkehrsträger. Die Kennzahlen fließen in das Forschungsvorhaben "Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken" der BAW ein.

3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Vorgehensweisen der Beurteilung des zukünftigen Verhaltens der Bauwerke der Verkehrsinfrastrukturen beruhen weitgehend auf deterministischen Grundlagen. Zuverlässigkeits- bzw. risikobasierte Betrachtungsweisen sind in der Praxis nicht oder nur für Einzelfälle in der Anwendung. Aufgrund des großen Erhaltungs- und Instandsetzungsstaus ist offensichtlich, dass ein zielgerichtetes, zuverlässiges Management der Bauwerke zwingend notwendig ist, damit auch in Zukunft die Funktionsfähigkeit der Verkehrsinfrastrukturen gewährleistet werden kann.

Da die Thematik "Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen" sehr komplex ist und sich nicht von vornherein eine bestimmte Methodik anbietet, ist parallel an unterschiedlichen

zuverlässigkeits- bzw. risikobasierten Vorgehensweisen gearbeitet worden. Die Ergebnisse zeigen, dass je nach Fragestellung unterschiedlichste Vorgehensweisen zielführend sein können. Zum einen sind Expertenbefragungen durchgeführt worden, die dann durch wissenschaftliche Verfahren ausgewertet bzw. ergänzt wurden. Eine andere Vorgehensweise zielt auf die Ermittlung von Kennzahlen, zur Beschreibung und Verfolgung der wichtigsten, charakterisierenden Parameter. Eine weitere Methodik liefert eine Abschätzung eines Zuverlässigkeitsindex für eine vergleichende Bewertung großer Bauwerksbestände. Weiterhin ist eine Methodik entwickelt worden, die zusätzlich die Auswirkungen mit einbezieht und daher risikobasierte Betrachtungsweisen zulässt.

Je nach Bauwerksart, -anzahl, Untersuchungsziel und Lebenszyklusphase lassen sich mit diesen unterschiedlichen Verfahren passende Aussagen zur Entscheidungsunterstützung erzeugen.

Diese Methodiken gilt es in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks (2020–2025) mit den Anwendern zu diskutieren und in einem Maße weiterzuentwickeln, damit sie in Pilotprojekten demonstriert und für eine Überführung in die Praxis vorbereitet werden können (Integrationsphase).

4 Prognosen/Vulnerabilitätsanalysen und Maßnahmen (SPT 303)

4.1 Hintergrund und Zielsetzung

Eine hohe Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastrukturen in Deutschland sichern die Weiterentwicklung unserer hochgradig mobilen Gesellschaft. Die Sicherstellung der Mobilität ist eine zentrale gesellschaftliche Aufgabe. Dabei ist auch eine resiliente Gestaltung des Verkehrssystems zu betrachten.

Ziel dieses Schwerpunktthemas ist die Weiterentwicklung und Erprobung praxisgerechter Verfahren und Modelle zur Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Verkehrsinfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen (z. B. Extremwetterereignisse) unter Berücksichtigung der Funktion im Verkehrsnetz und möglicher Maßnahmen.

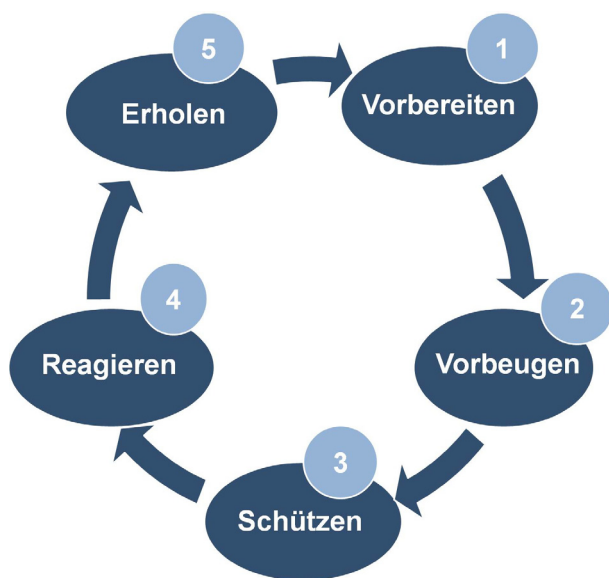
Die zu entwickelnden Modelle zur Risiko- und Schadensprognose erlauben langfristige Strategien für die Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit der Verkehrsinfrastrukturen bei außergewöhnlichen Ereignissen im Sinne eines ganzheitlichen Resilienzansatzes. In diesem Zusammenhang bezeichnet "Resilienz" die Fähigkeit eines Systems, sich auf tatsächlich oder potenziell disruptive Ereignisse

vorzubereiten, sie einzukalkulieren, sie abzuwehren, sie zu verkraften, sich möglichst schnell davon zu erholen und sich ihnen immer erfolgreicher anzupassen. Disruptive Ereignisse sind menschlich, technisch sowie natürlich verursachte außergewöhnliche Ereignisse oder Veränderungsprozesse, die extreme oder katastrophale Folgen haben (Thoma 2014). Um die Prozesse im Kontext Resilienz zu verdeutlichen, wird häufig auch der in Abbildung 25 dargestellte Resilienzyklus verwendet.

4.2 Vorgehensweise

Die Bearbeitung in den Teilprojekten erfolgt in den folgenden Schritten:

- a) Schaffung der Arbeitsgrundlagen/Schnittstellen mit Projektpartnern,
- b) Erhebung des Sachstands,
- c) Konzeption des methodischen Ansatzes, Umsetzung, Analyse und Bewertung,



Resilienzphasen	Ergebnisse	Behörde
1-5	Ansätze zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit der Verkehrsinfrastruktur auf Objekt- und Netzebene (Prototypische Software Anwendung)	BASSt
4-5	Identifizierung von Maßnahmen zur Optimierung von Reaktions- und Wiederherstellungsprozessen für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen (Handbuch & Software-Anwendung)	BASSt
1-5	Prognose- und Regelungssystem für die Abfluss- und Stauregelung an Wasserstraßen	BAW
1	Verbesserung der Vorhersage extremer Wetterereignisse	DWD
1	Schwachstellenanalyse – Anpassung von Regelwerk bzgl. Klimagefährdungen (Entwicklung einer Datenbank)	DZSF/EBA

Abbildung 25: Zuordnung der Ergebnisse der Teilprojekte aus SPT 303 zu den einzelnen Phasen des Resilienzyklus (in Anlehnung an Bruneau et al. 2003).

- d) Durchführung von Pilotstudien zur Erfahrungssammlung und Demonstration der Projektergebnisse,
- e) Empfehlungen.

Die Arbeitsschwerpunkte der Teilprojekte in diesem Schwerpunktthema sind in der Abbildung 26 dargestellt. Bestehende Ansätze und Modelle zur Quantifizierung und Prognose von Verfügbarkeit und Sicherheit wurden identifiziert, auf ihre grundsätzliche Anwendbarkeit für Verkehrsinfrastrukturen und intermodale Verkehrsnetze überprüft und weiterentwickelt.

Zusätzlich wurden die Prognosesysteme zur besseren Vorhersage von Extremwetterereignissen weiterentwickelt und Eintrittswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von wichtigen Parametern (z. B. betrachtetes Gebiet, Zeit) abgeleitet. Des Weiteren wurden Maßnahmen und Strategien zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit erarbeitet. Im Anschluss daran erfolgte die Erprobung der neuen Ansätze für verschiedene Referenzszenarien unter Verwendung relevanter Bauwerkstypen sowie relevanter Teilnetze.

4.3 Projekte

Das Schwerpunktthema "Prognosen/Vulnerabilitätsanalysen und Maßnahmen" wurde im Rahmen der vier nachfolgend beschriebenen Projekte bearbeitet (Tabelle 5).

4.3.1 Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

4.3.1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Eine zuverlässige Verkehrsinfrastruktur ist eine der wesentlichen Grundvoraussetzungen für nachhaltige Mobilität und wirtschaftliches Wachstum. Das bedeutet, dass die Infrastruktur auch unter ungünstigen Bedingungen in der Lage sein muss, ihre Aufgaben situationsangepasst zu erfüllen. Neben der baulichen Zuverlässigkeit sind auch Aspekte der betrieblichen (verkehrlichen) Zuverlässigkeit, insbesondere die Verfügbarkeit, zu betrachten. Dies betrifft die Objektebene (Verwundbarkeit) und die Auswirkungen auf das Verkehrsnetz (Kritikalität) sowie alle Phasen vom Ausfall bis zur Wiederinbetriebnahme der Infrastruktur im Sinne eines ganzheitlichen Resilienzansatzes. Da einheitliche Ansätze zur Beurteilung und Prognose sowohl der Sicherheit als auch der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur bei ungeplanten und unerwünschten Ereignissen, beispielsweise außergewöhnlichen Wetterereignissen, derzeit nicht existieren, war Ziel des Projektes, Konzepte und Methoden für die Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur (z. B. Tunnel, Brücken) bei außergewöhnlichen Ereignissen zu erarbeiten. Die zu entwickelnden Modelle zur Risiko- und Schadensprognose erlauben langfristige Strategien für die Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit der Ver-

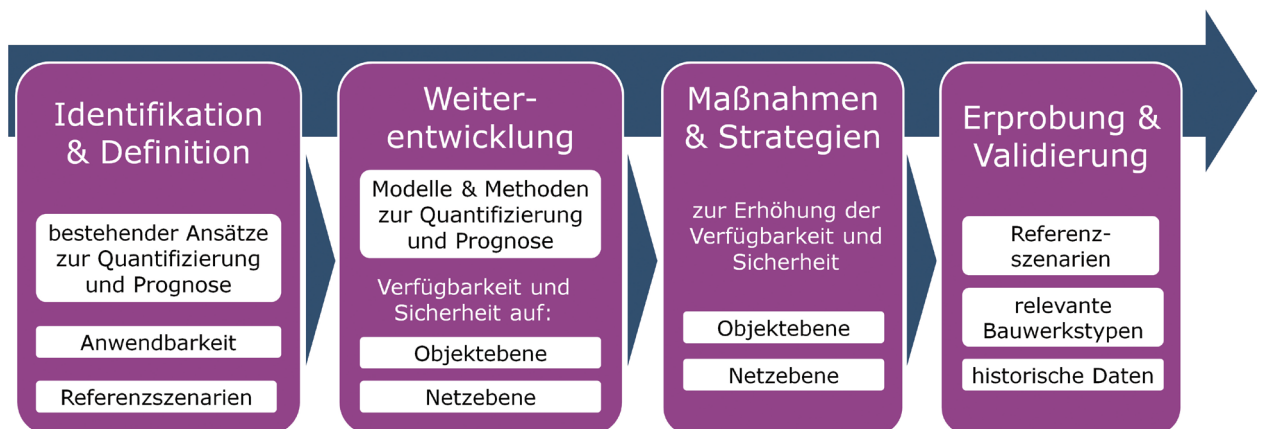


Abbildung 26: Arbeitsschwerpunkte im SPT 303.

Tabelle 5: Projekte im SPT 303.

Behörde	Titel	Projektleiter/-in
BASt	Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen Schlüsselworte (DE): Straßeninfrastruktur, Resilienz, disruptive/außergewöhnliche Ereignisse, Sicherheit, Verfügbarkeit, Entscheidungsunterstützung Keywords (EN): road infrastructure, resilience, disruptive events, safety, availability, decision support	Jennifer Bednorz Dr. Kalliopi Anastassiadou
BAW	Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen Schlüsselworte (DE): Binnenwasserstraßen, Resilienz, extreme Wetterereignisse, Starkregen, Entscheidungsunterstützung Keywords (EN): inland waterways, resilience, extreme weather events, heavy rainfall, decision support	Julia Kasper Franz Simons
DWD	Ensembleprognosen extremer Wetterereignisse Schlüsselworte (DE): Wettervorhersage, Ensemblesysteme, extreme Ereignisse Keywords (EN): weather prediction, ensemble systems, extreme events	Dr. Christina Primo Ramos Dr. Michael Denhard Jens Winkler
DZSF/EBA	Anpassung des Regelwerks infolge geänderter Randbedingungen Schlüsselworte (DE): Klimawandelanpassung, Regelwerk Keywords (EN): climate change adaptation, regulations	Markus Reinhardt

kehrinfrastrukturen, liefern aber auch elementare Grundlagen für ein ereignisbezogenes Präventions- und Krisenmanagement.

Ein weiteres Ziel war die Entwicklung geeigneter Methoden, welche eine ganzheitliche, konzeptionelle und systematische Beurteilung der Systemresilienz ermöglichen, um die Funktionsfähigkeit sowie den Betrieb einer Straßeninfrastruktur nach außergewöhnlichen Ereignissen aufrechtzuerhalten bzw. möglichst schnell wiederherzustellen.

4.3.1.2 Untersuchungsmethoden

Die Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen erfolgt über die Identifizierung und Prüfung bestehender Methoden und Modelle (Anastassiadou 2019) auf grundsätzliche Anwendbarkeit für Verkehrsinfrastrukturen und intermodale Verkehrsnetze sowie deren Weiterentwicklung und Anpassung unter Berücksichtigung verschiedener Referenzszenarien. Des

Weiteren erfolgt die Identifizierung von Maßnahmen und Strategien zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit im Sinne eines ganzheitlichen Resilienzansatzes auf Objekt- und Netzebene. Auf Grundlage des aktuellen nationalen und internationalen Stands der Forschung wurde ein anwendungsorientierter Ansatz für ein Resilienzmanagementkonzept entwickelt, welches mit den Bedürfnissen der potenziellen Nutzer sowie den in Deutschland vorhandenen Ansätzen und Managementsystemen im Straßeninfrastrukturmanagement abgestimmt wurde. Im Anschluss daran erfolgt die Erprobung der neuen Ansätze für die verschiedenen Referenzszenarien und unter Verwendung relevanter Bauwerkstypen sowie relevanter Teilnetze.

4.3.1.3 Ergebnisse

Die Untersuchungen liefern wichtige Ergebnisse zum Sachstand von Verfahren und Modellen zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit der Verkehrsinfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen. Die Ergebnisse wurden in Form einer Machbarkeitsstudie aufbereitet und die ent-

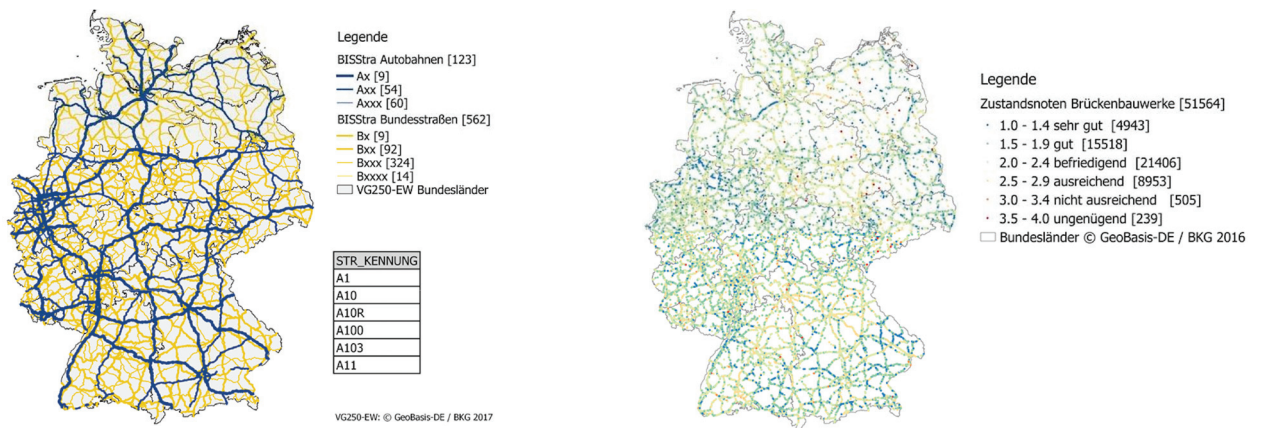


Abbildung 27: Bedieneroberfläche des GIS-basierten Software-Prototyps mit Darstellung der Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV-Kfz) auf Autobahnen und Bundesstraßen (links) und der Lage und Zustandsnoten von Brückenbauwerken (rechts) (Finger et al. 2018).

wickelte Methodik anhand von Realereignissen validiert. Generell eignet sich diese Methodik zur Charakterisierung der Resilienz von Straßeninfrastruktur bei Betrachtung eines beliebigen Ereignisszenarios. Darüber hinaus konnten, durch die Entwicklung eines GIS-basierten Software-Prototyps (Abbildung 27), die entwickelten Verfahren und Modelle beliebig demonstriert werden.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Bewertung von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen durch den Einsatz von plausiblen Vereinfachungen der verwendeten Modelle, die zur Berechnung der Performanzparameter und Resilienzindikatoren herangezogen werden, möglich ist.

Auf der Objektebene wird der strukturelle und betriebsfähige Zustand einzelner Bauwerke mit Ansätzen der im BMVI-Expertennetzwerk entwickelten zeitabhängigen Risiko- und Verwundbarkeitsanalyse bewertet (Anastassiadou 2019). Auf Netzebene wird die Kritikalität einzelner Objekte in Abhängigkeit der Funktion und Relevanz bewertet.

Um die Funktionsfähigkeit sowie den Betrieb einer Straßeninfrastruktur nach dem Eintritt von außergewöhnlichen Ereignissen aufrechtzuerhalten bzw. möglichst schnell wiederherzustellen, wurde ein anwendungsorientierter Ansatz für ein Resilienzmanagementkonzept entwickelt (Abbildung 28).

Durch die methodischen Elemente des Resilienzscreenings, der Maßnahmenbeurteilung sowie der Resilienzoptimie-

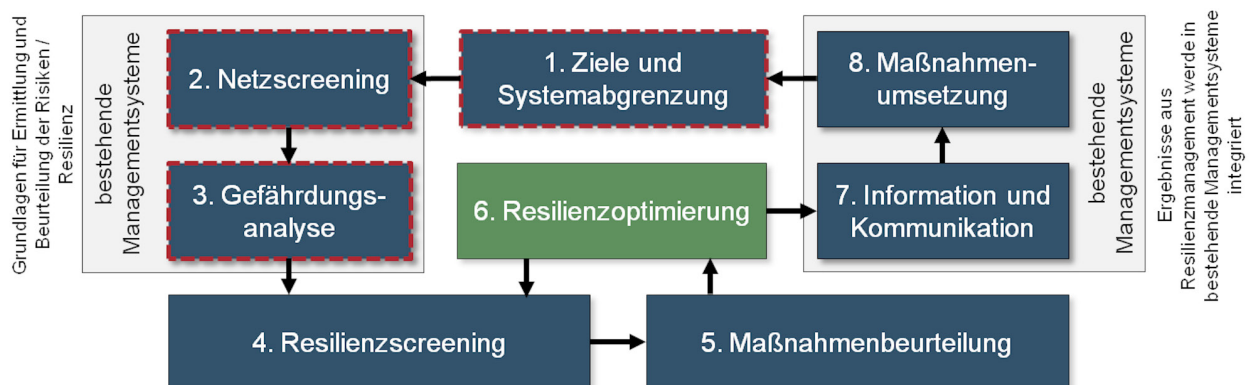


Abbildung 28: Grafische Darstellung des Resilienzmanagementprozesses (Deublein et al. 2018).

Die Ergebnisse des Projektes sind relevant für das BMVI, die am BMVI-Expertenetzwerk beteiligten Behörden und die Nutzer (z. B. Straßenbauverwaltungen der Länder), insbesondere für die Entscheider mit strategischer und konzeptioneller Managementfunktion. Die Vereinfachungen der verwendeten Modelle sollen es den Infrastrukturbetreibern mithilfe des entwickelten GIS-basierten Software-Prototyps ermöglichen, die große Anzahl an Elementen im Bundesfernstraßennetz zeiteffizient hinsichtlich der Verfügbarkeit und Sicherheit sowohl auf Netz- als auch auf Objektebene bewerten zu können. Durch die Anwendung des Resilienzmanagementkonzeptes erfolgt die Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. Der zeitliche und finanzielle Aufwand infolge des Ausfalls und Wiederherstellung der Straßeninfrastruktur lässt sich dadurch auf ein Minimum reduzieren. Des Weiteren, wird es durch die Anwendung der Methodik des Resilienzmanagements den Anwendern im Rahmen der Gewährleistung der Zukunftsfähigkeit der Verkehrsinfrastrukturen erstmals ermöglicht, unterschiedliche Arten von Maßnahmen miteinander zu vergleichen und ihre Wirkungen und Kosten hinsichtlich Resilienz gegenüberzustellen. Auf dieser Grundlage obliegt es dem Entscheidungsträger, eine Rang-

liste der umzusetzenden Maßnahmen zu erstellen, die je nach strategischen oder politischen Zielvorgaben für seine Situation und sein System am geeignetsten sind.

Zur Förderung der praxisingerechten Anwendung der Methodik durch die Straßenbauverwaltungen wurden zusätzlich Handlungshilfen in Form eines Handbuchs und eines anwenderfreundlichen softwarebasierten Tools entwickelt.

4.3.1.4 Nutzen

Die gewonnenen Erkenntnisse und Methoden sind auf die anderen Verkehrsträger übertragbar und steuern somit auf das übergeordnete Ziel des BMVI-Expertenetzwerks "Das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht gestalten" zu. Die Beteiligung der anderen Behörden fand im Rahmen der Betreuung der externen Projekte und des fachlichen Austauschs (Arbeitstreffen, Workshops, Netzwerktreffen) innerhalb des Schwerpunktthemas statt.

4.3.2 Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen

4.3.2.1 Aufgabenstellung und Ziel

Etwa 3.000 km der Bundeswasserstraßen sind mit Staustufen ausgebaut, die im Allgemeinen aus beweglichem Wehr, Schleuse und Laufwasserkraftwerk bestehen. Durch Ändern des Abflusses über Kraftwerk und Wehr hält ein lokaler Regler den gewünschten Wasserstand oberstrom der jeweiligen Staustufe möglichst konstant. Die Abfluss- und Stauregelung soll mehrere, mitunter gegensätzliche Ziele erfüllen: Einhaltung des Stauziels innerhalb der festgelegten Toleranz, Verminderung von Abflussschwankungen, optimale Nutzung der Wasserkraft und Reduzierung des Verschleißes der Wehrverschlüsse.

Im Zuge des Klimawandels ist mit einer Zunahme extremer Wetterereignisse zu rechnen. Insbesondere während Niedrigwasserperioden sind Starkregenereignisse in urbanen Einzugsgebieten problematisch für die Abfluss- und Stauregelung. Infolge einer Überlastung der städtischen Kanalisation bringen Regen- oder Mischwassereinleitungen für wenige Stunden ein Vielfaches des jeweils aktuellen Abflusses in die Wasserstraße ein. Dies kann zu großen Überschreitungen der Stautoleranz sowie zu verstärkten Schwankungen des Abflusses über Kraftwerk und Wehr führen, was eine Gefahr für die Schifffahrt darstellt (Belzner und Schmitt-Heiderich 2012). Ziel dieses Vorhabens war es, das bestehende Regelungskonzept robuster gegenüber Starkregenereignissen zu machen.

4.3.2.2 Untersuchungsmethoden

Um Informationen über bevorstehende Starkregenereignisse in die Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen einzubinden, müssen verschiedene Komponenten aufeinander abgestimmt werden: Niederschlagsprognosen, Niederschlags-Abfluss-Modell und Regelungssystem. Dazu wurden hoch-aufgelöste Vorhersagen durch den DWD aufbereitet. Die Wirkungsweise des neuen Konzepts wurde anhand von Simulationen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen untersucht. Direkt unterhalb der Staustufe Cannstatt, die das obere Ende der Stauhaltung Hofen bildet, entlastet ein Teil der Stuttgarter Kanalisation in den Neckar. Das Tiefbauamt der Stadt Stuttgart hat Messdaten zu diesen Mischwassereinleitungen aus dem Hauptsammler Nesenbach zur Verfügung gestellt.

4.3.2.3 Ergebnisse

Aus extrapolierten Radarniederschlagsdaten des DWD, dem sogenannten Nowcasting, wurden mithilfe eines ver-

einfachten Niederschlag-Abfluss-Modells der Stuttgarter Kanalisation Prognosen für Mischwasserentlastungen aus dem Hauptsammler Nesenbach in die Neckarstauhaltung Hofen berechnet. Anhand historischer Ereignisse wurde gezeigt, dass die Einleitungsprognosen eine ausreichende Genauigkeit aufweisen (Kasper et al. 2018).

Die bestehende Reglerstruktur wurde um eine modellprädiktive Vorsteuerung vom Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart (Amann et al. 2016) ergänzt. Dabei bestimmt ein Optimierungsalgorithmus anhand eines linearisierten Stauhaltungsmodells aus gegebenen Zuflussprognosen einen idealen zeitlichen Verlauf von Wasserstand und Abfluss. Im automatisierten Betrieb wird der Wert des Wasserstands für den nächsten Zeitschritt als Soll-Wasserstand an den Regler ausgegeben. Im manuellen Betrieb kann der optimierte Wasserstands- und Abflussverlauf zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden. Abbildung 29 veranschaulicht, wie die modellprädiktive Vorsteuerung den Soll-Wasserstand aufgrund der vorhergesagten Einleitung im Rahmen der erlaubten Toleranz absenkt. Der

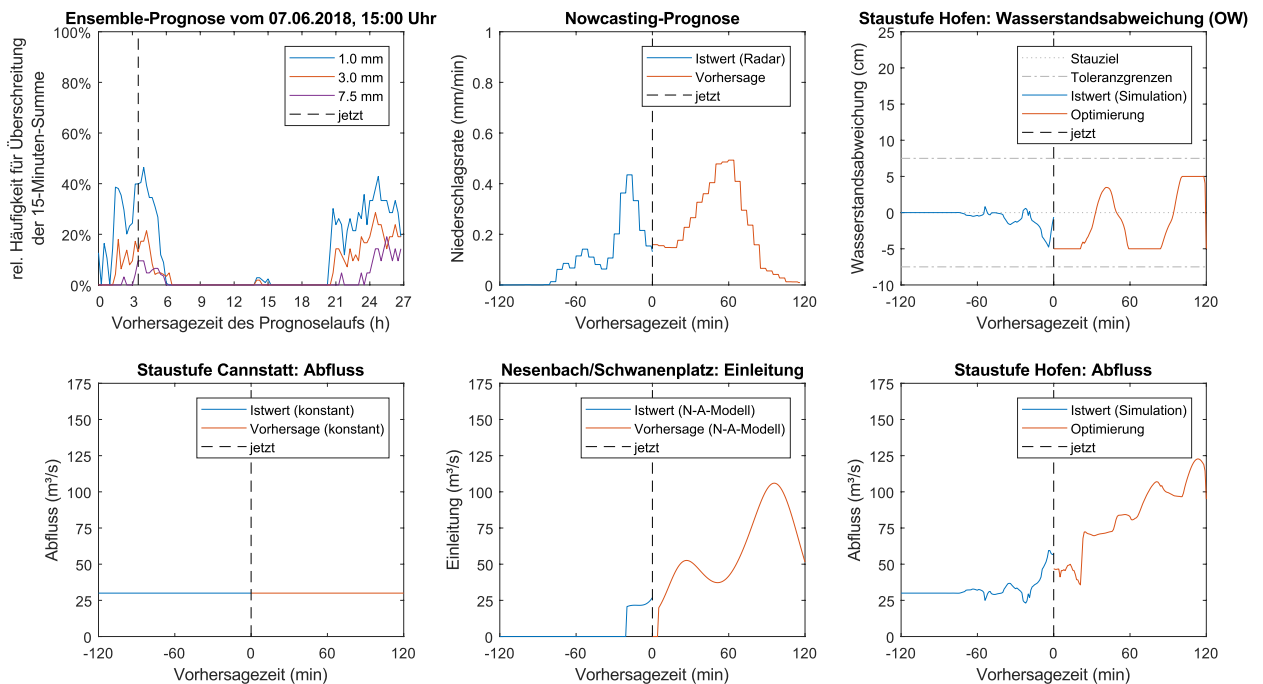


Abbildung 29: Simulation eines Echtzeit-Prognosesystems für die Abfluss- und Stauregelung an der Neckarstauhaltung Hofen am Beispiel eines Starkregenereignisses am 7. Juni 2018 um 18:31 Uhr (UTC) bei konstantem direktem Zufluss über die Staustufe Cannstatt.

lokale Regler gleicht die Ungenauigkeit der Vorhersage und den dadurch ansteigenden Wasserstand durch eine Abflusserhöhung aus. Mithilfe der Darstellung von verbesserten Ensemble-Prognosen aus dem Projekt "Ensemble-Prognosen extremer Wetterereignisse" (siehe Unterkapitel 4.3.3) des DWD kann sich das Personal frühzeitig auf ein bevorstehendes Starkregeneignis einstellen.

Simulationen haben gezeigt, dass Verletzungen der Stautoleranz infolge von seitlichen Einleitungen durch die Berücksichtigung von Niederschlagsprognosen verhindert werden können. Während die bisherige Regelung große Abflussschwankungen verstärkt, können diese durch die modellprädiktive Vorsteuerung deutlich gedämpft werden (Kasper et al. 2018).

4.3.2.4 Nutzen

Durch die Anwendung moderner Regelungsmethoden und die Einbindung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen steht der WSV ein zukunftsfähiges Regelungssystem zur Verfügung, das auch bei zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels eine robuste Abfluss- und Stauregelung sicherstellt. Die neue Regelungsstrategie kompensiert die Wirkung stoßartiger Belastungen in Stauhaltungen, indem sie vorausschauend reagiert, die Gefährdung durch starke Wasserstands- und Abflussschwankungen minimiert und eine schnelle "Erholung" des Systems ermöglicht. Auf diese Weise wird die Resilienz der Wasserstraßen erhöht und die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gewährleistet.

Die Idee, Niederschlagsprognosen in die Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen einzubinden, ist durch die enge Zusammenarbeit mit dem DWD im BMVI-Expertennetzwerk entstanden. Die weiteren beteiligten Institutionen können bei der Entwicklung von Resilienzmaßnahmen gegenüber extremen Wetterereignissen durch die Erfahrung mit Prognosesystemen für kleine Einzugsgebiete profitieren.

Darüber hinaus wurde die Methode der Vulnerabilitätsanalyse, die im Projekt "Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen" der BASt verwendet wird, zur Identifizierung weiterer Staustufen genutzt, die von den

Auswirkungen durch Starkregen in urbanen Einzugsgebieten betroffen sein könnten (Kasper und Simons 2019).

4.3.3 Ensembleprognosen extremer Wetterereignisse

4.3.3.1 Aufgabenstellung und Ziel

Vorhersagen des Wetters sind unsicher und insbesondere bei extremen Ereignissen gelingt deren Lokalisierung in Raum und Zeit in vielen Fällen nur ungenau. Dabei hängt die Unsicherheit einer Vorhersage stark von der Art des betrachteten Ereignisses ab. Zur Bestimmung der Vorhersageunsicherheit erstellt der DWD täglich Ensembleprognosen¹ (von der globalen Skala bis zu 2 km horizontaler Auflösung über Deutschland), die nicht nur verschiedene mögliche Szenarien des Wettergeschehens beschreiben, sondern auch die Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten extremer Ereignisse ermöglicht. Ziele im Projekt waren die Verbesserung der Ensemblesysteme des DWD und eine Optimierung von Wahrscheinlichkeitsprognosen für verkehrs- und bautechnisch relevante Wetterereignisse.

4.3.3.2 Untersuchungsmethoden

Durch die Einführung des globalen Ensembleprognosesystems ICON-EPS (engl. *ICOsahedral Non-hydrostatic global circulation model* - Ensemblevorhersagesystem) (Reinert et al. 2019) wurde eine Verbesserung der Anfangs- und Randbedingungen für das Lokalmensemble COSMO-D2-EPS (COSMO-Modell (Consortium for Small-Scale Modelling) (Baldauf et al. 2018) des DWD für Ausschnitt Deutschland) erreicht, sodass insgesamt eine Verbesserung

¹ Definition Ensembleprognosen: Eine Wettervorhersage umfasst heute i.d.R. ein ganzes "Ensemble" von einzelnen numerischen Vorhersagen. Das Ensemble besteht aus verschiedenen Vorhersageszenarien, den "Ensemble Mitgliedern". Jedes Mitglied basiert auf einer etwas anderen, aber jeweils realistischen Konfiguration des Anfangszustands und des Vorhersagesystems. Abhängig von der aktuellen Wettersituation wirken sich diese Unterschiede auf das Vorhersageresultat aus. https://www.dwd.de/DE/forschung/wettervorhersage/num_modellierung/04_ensemble_methoden/ensemble_vorhersage/ensemble_vorhersagen.html

der hoch aufgelösten Prognosen über Deutschland resultierte. Zudem wurde an einer Methode gearbeitet, die durch gezielte, dynamisch motivierte Variationen der Anfangsbedingungen numerischer Simulationen – eine wesentliche Quelle von Vorhersageunsicherheit – Ensembleprognosen verlässlicher macht.

Im Rahmen der Interpretation von Ensembleprognosen wurde eine neue adaptive Umgebungsmethode für sehr kleine Zielgebiete entwickelt. Zusammen mit der BAW wurde diese Methode für ein Teileinzugsgebiet der Stuttgarter Kanalisation (40 km²) am Beispiel extremer Niederschlagsereignisse und deren Auswirkung auf die Abfluss- und Stauregelung der Neckarstaustufe Hofen getestet.

4.3.3.3 Ergebnisse

Das globale Ensemble-Vorhersagesystem ICON-EPS wurde im Januar 2018 in den operationellen Betrieb des DWD übernommen. Die vom Europaabschnitt des ICON-EPS (20 km horizontale Auflösung) bereitgestellten Anfangs- und Randwerte haben zu einer deutlichen Verbesserung der Vorhersagen des COSMO-D2-EPS (2,2 km; Deutschland) geführt. Für die Weiterentwicklung der Störungsdynamik in Ensemblesystemen wurde eine neue Methode erarbeitet und veröffentlicht (Winkler et al. 2019), die zurzeit im operationellen Umfeld des DWD implementiert wird.

Die Abbildung 30 zeigt die Wirkung der neu entwickelten adaptiven Umgebungsmethode für die Berechnung

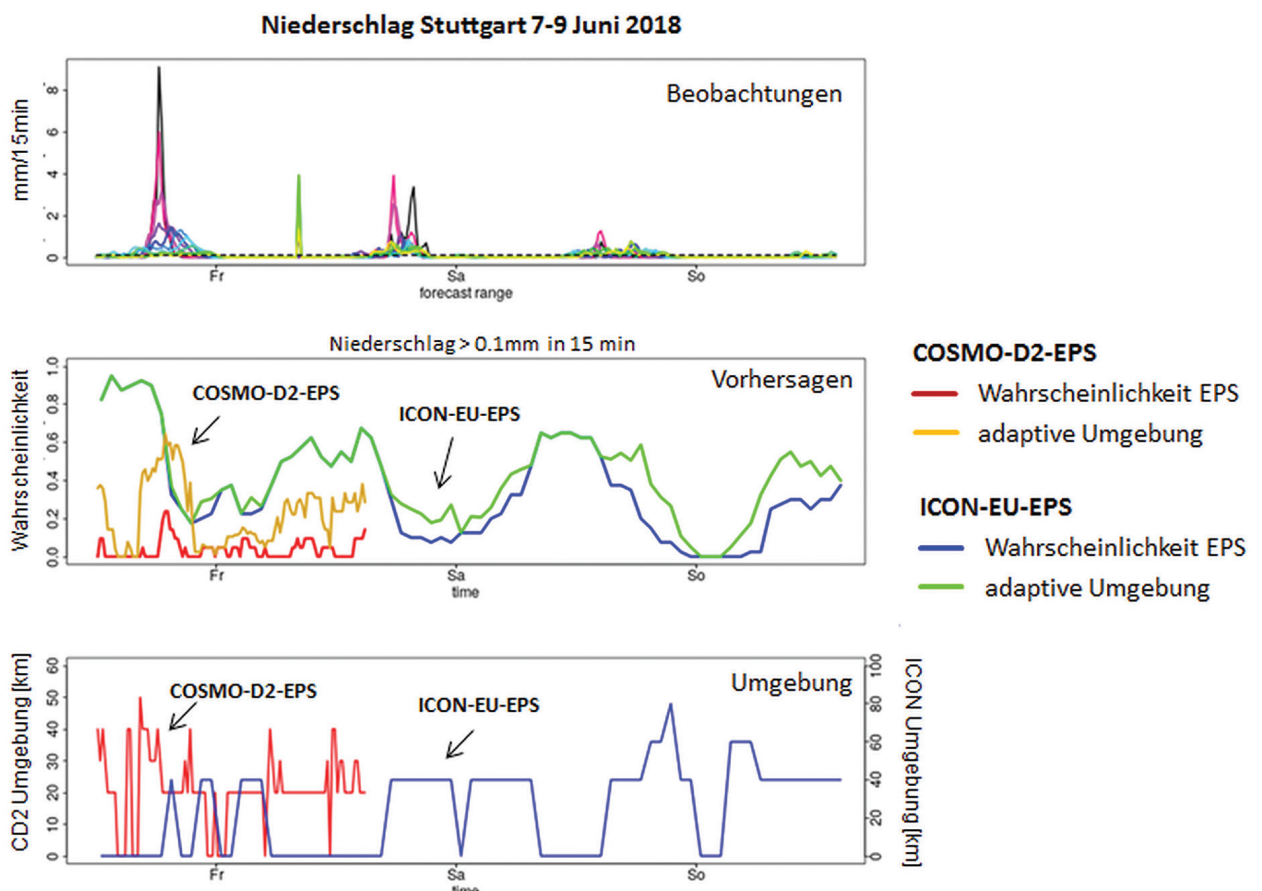


Abbildung 30: Niederschlagsmessung mit Radar (oben) im Vergleich zu Ensembleprognosen (Wahrscheinlichkeit für Niederschläge > 0,1mm in 15 Minuten; Mitte) der Systeme ICON-EU-EPS (20 km horizontale Auflösung) und COSMO-D2-EPS (2 km), die jeweils adaptiv optimiert wurden (orange und grün). Die untere Abbildung zeigt die Größe der bei der Adaption gewählten Umgebung (Ramos 2019).

von Überschreitungswahrscheinlichkeiten am Beispiel des Zielgebiets in Stuttgart. Dargestellt ist in der Bildmitte die Wahrscheinlichkeit, dass eine Niederschlagsmenge von 0,1 mm in 15 Minuten überschritten wird. Die Umgebung für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit wird vergrößert, wenn dadurch eine höhere Konsistenz der aktuellen Vorhersage mit den vorangegangenen ("alten") Vorhersagen entsteht. Selbst in Ensemblesystemen können zeitlich aufeinanderfolgende Vorhersagen zwischen verschiedenen Lösungen hin- und herspringen ("jumpiness"), was ein Indiz für eine geringe Vorhersagbarkeit des Phänomens ist. Sind dagegen die verfügbaren Vorhersagen für ein Gebiet maximal konsistent, lässt sich durch eine Gebietsvergrößerung kein signifikanter Vorteil mehr erreichen. Dieser Effekt ist beim COSMO-D2-EPS besonders ausgeprägt (orangefarbene Kurve). Insbesondere in den Abendstunden werden von den Modellen zu geringe Niederschlagswahrscheinlichkeiten prognostiziert, was durch die Umgebungsmethode (Denhard 2020) korrigiert wird. Die Umgebungsmethode wird zurzeit für die Anwendung auf einem Modellgitter verallgemeinert.

4.3.3.4 Nutzen

Die Verbesserung der Ensembleprognosen des DWD kommt allen Nutzern dieser Vorhersagen in Deutschland zugute (z. B. Behörden, Katastrophenschutz, Feuerwehr, Winterdienst, private Wetterdienstleister usw.). Durch die globale Ausrichtung des ICON-EPS wurde darüber hinaus ein internationaler Forschungsbeitrag Deutschlands im Bereich Ensembleprognosen geleistet. Der DWD hat ab 2019 mit dem ICON-EPS am globalen Ensembleprognoseprojekt TIGGE (The International Grand Global Ensemble²) erstmals teilgenommen.

Vorhersagen extremer Wetterereignisse sind integraler Bestandteil eines erfolgreichen Resilienz- und Risikomanagements im Verkehrsbereich und unterstützen den Resilienzyklus in allen Phasen, was den anderen beteiligten Institutionen im BMVI-Expertennetzwerk in gemeinsamen Projekten zugutekommt. Konkret wurde das Projekt der BAW im SPT 303 zu "Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen"

² <https://www.ecmwf.int/en/research/projects/tigge>

mit Ensembleprognosen ausgewählter Niederschlagsereignisse unterstützt (Kasper et al. 2018).

4.3.4 Anpassung des Regelwerks infolge geänderter Randbedingungen

4.3.4.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Änderung des Klimas ist bereits jetzt in den Temperaturreihen sichtbar und wird wahrscheinlich weiter fortschreiten. Gerade Bauwerke der Infrastruktur werden aber in der Regel für eine Nutzungsdauer von 80 bis 100 Jahre ausgelegt, weswegen insbesondere langfristige Änderungen, wie der Klimawandel am besten bereits in der Planung berücksichtigt werden. Die zu erwartenden Effekte zu prognostizieren und daraus Anforderungen abzuleiten, ist Aufgabe des Themenfeldes "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" (Themenfeld 1). Das hier bearbeitete Projekt dient dazu festzustellen, welche Regelwerke für den Schienenverkehr Aussagen treffen, die mit den zu erwartenden Änderungen im Klima nicht kompatibel sind. Dabei sind die Regelwerke für die Infrastruktur für alle Verkehrsnetze weitgehend identisch. Ziel war es, als ersten Schritt zu identifizieren welche Regelwerke Größen beinhalten oder beinhalten sollten, welche durch den Klimawandel betroffen sein könnten. Die zugrunde liegenden Größen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

4.3.4.2 Untersuchungsmethoden

Dieses Projekt wurde als Vergabe aufgesetzt und in drei Losen vergeben.

1. Infrastruktur
2. Leit- und Sicherungstechnik
3. Fahrzeuge

Bereits zur Vergabe wurde eine Liste beigefügt (Tabelle 6), auf der die zu berücksichtigenden Effekte erfasst waren. Teil der Ausschreibung war es bereits die Normen und Regelwerke vorzuschlagen, welche untersucht werden sollen,

Tabelle 6: Gliederung der zu erwartenden Auswirkungen.

Ursache	Grund	Gefährdung
Temperatur	Hitze	Gesundheit/Wohlbefinden Mensch (Überhitzung, Kreislaufprobleme, Arbeitsschutz, ...)
		Materialausdehnung (Längenzunahme bei Bauteilen/Gleisen,...)
		Materialversagen/-ermüdung (Änderung der Materialparameter, z. B. Elastizität, Festigkeit)
		Wärmeableitung (verminderte Abführung produzierter Wärme (z .B. Elektronik, Bremsen, ...))
		Ausdünstungen (Wärme setzt giftige Stoffe frei z. B. PAKs aus Schwellen/Kunststoffen, ...)
	Frost	Gesundheit/Wohlbefinden Mensch (Unterkühlung, Erfrierungen, ...)
		Materialausdehnung (Längenabnahme bei Bauteilen/Gleisen, ...)
		Materialversagen/-ermüdung (Änderung der Materialparameter, z. B. Elastizität, Festigkeit, ...)
		Frost-Tau-Wechsel (Beanspruchung durch Ausdehnung/Nachfließen von Eis/Wasser)
		Gefrorenes Wasser (Eisbildung in Abflüssen, Zuleitungen, Vorratsbehältern)
Niederschlag	Regen	Dimensionierung Entwässerung (Zunahme der zu bewältigenden Abflussmengen)
		Hochwasser (Resilienz gegen stehendes Wasser, insb. Anlagen mit Schadstoffen/Keimen)
		Gewichtszunahme (Wasser absorbierende Materialien werden schwerer, Schnee-/Eislast)
		Grundversagen (Aktivierung Gleitschicht, aufgeweichter Untergrund, Hangrutschungen)
		Schnee/Eis (Nutzbarkeit eingeschränkt (Bahnhöfe, Gleise), Zusätzlicher Arbeitsaufwand)
	Trockenheit	Grundversagen (Abnahme Kohäsion, Reduktion Erdvolumen)
		Brandrisiko (Flächenbrände/Waldbrände/Böschungsbrände)
Keraunischer Pegel	Blitz	Brandrisiko (benötigter Funke, Überhitzung von Bauteilen)
		Überspannungsschäden (Elektrik/Elektronik, Energieversorgung)
		Blitzableitung (Schutz der Menschen und der Gebäude (PVA), Schutz der Technik)
Sturm	Wind	Bauwerke (erhöhte Windlast, Bauteilsicherung (Häuser, Bahnhöfe, Brücken, ...))
		Fahrzeuge (Windlasten/Windangriffe, Seitenwinde)
		Energie und Signale (Windlasten auf Oberleitung, Signale, Funk/Telekommunikationsmasten, ...)
		Windwurf/Windbruch (Gefahren durch Bäume)
		Windschutz (Schutz von Personen und Gegenständen vor Wind und fliegenden Teilen)
		Staubfreisetzung (reduzierte Sicht, Verschmutzung luftgekühlter Teile)

sodass bei Zuschlag bereits fest stand, welche Dokumente den Untersuchungsraum bilden.

Das Vorgehen ist zweistufig aufgebaut, so dass zuerst hinsichtlich Stichwörter (vgl. Tabelle 6, die Auftragnehmer erweiterten den Umfang der Stichwörter aufgrund ihrer Erfahrungen vor und während der Analyse der Regelwerke) untersucht wurde, welche Teile der Regelwerke betroffen sind. Nachlaufend erfolgte eine nicht verbindliche Eintei-

lung hinsichtlich Dringlichkeit und des zu erwartenden Änderungsbedarfs der im Vorlauf identifizierten Stellen.

4.3.4.3 Ergebnisse

Los 1 Infrastruktur

Die Auswertung der Regelwerke nach oben beschriebener Methodik durch Siefer et al. (2019) ergab insgesamt

1.650 Einträge. Da viele identifizierte Passagen mehreren Ursachen zugewiesen wurden, ist die Zahl der zu ändernden Textstellen aber geringer. Schwachstellen wurden sehr oft im Zusammenhang mit der Temperatur identifiziert. Die Ursache Hitze war bei ca. 25 % und die Ursache Frost bei ca. 30,5 % der identifizierten Passagen der Grund der Datenaufnahme. Eine zentrale Aufgabe der Auftragnehmer bestand auch darin, die getroffene Einteilung der Ursachen zu hinterfragen und anzupassen. Es wurde dabei nur eine zusätzliche Kategorie "Vegetation" eingeführt, die mit 17 Nennungen (ca. 1 %) dem geringsten Anteil an der Datenaufnahme umfasst.

Ein hoher Bedarf an Anpassungen der Regelwerke wurde bei 311 Einträgen identifiziert. Zusätzlich wurden noch die Betroffenheit der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit bei den identifizierten Passagen bewertet. In 201 Einträgen ist die Gebrauchstauglichkeit und in 120 Einträgen die Tragsicherheit betroffen. Hier besteht besonders akuter Anpassungsbedarf.

Los 2 Energie und Sicherheit und Los 3 Fahrzeuge

Für diese Bereiche wurden 235 Stellen mit Änderungsbedarf durch Fritz et al. (2019) identifiziert. Aufgrund der sehr hohen Abhängigkeit technischer Anlagen von Temperaturen und Nässe war bereits zu Beginn damit zu rechnen, dass die bestehenden Regelungen hier besser die Anforderungen an die sich verändernden Klimabedingungen abdecken. Zusätzlich wird in den Regelwerken für Fahrzeuge und technische Streckenausrüstung bereits vermehrt auf weitere Normen verwiesen, in denen relevante Wetterparameter, also die Randbedingungen für die Technik definiert werden. Hierbei werden zum Teil auch schon die klimatischen Bedingungen in übergeordneten Dokumenten definiert, um z. B. europaweit gültige Regelwerke erstellen zu können, ohne dabei einzelne Wettereinflüsse zu stark zu berücksichtigen (z. B. Höchsttemperaturen in Schweden und Spanien). Dieser Weg könnte insgesamt zur Berücksichtigung stark geänderter Anforderungen genutzt werden, speziell auch um spätere Anpassungen einfacher zuzulassen.

4.3.4.4 Nutzen

Die Ergebnisse stehen frei zur Verfügung (Siefer et al. 2019 und Fritz et al. 2019) und werden insbesondere im Schienenwesen verwendet, um den Anpassungsbedarf der Regelwerke abzuschätzen und um Anpassungen durchzuführen. Zusätzlich bilden die Ergebnisse eine Grundlage für den in Themenfeld 1 erstellten Beitrag für den UNECE Klimabericht, der sich mit dem Anpassungsbedarf beschäftigt. Eisenbahnverkehrsunternehmen und Eisenbahninfrastrukturunternehmen können sich mit den Ergebnissen auf den Klimawandel vorbereiten.

Dieses Projekt hat als Fokus den Schienenverkehr, aber die Ergebnisse sind auf die anderen Verkehrsträger (Straße, Wasserstraße) übertragbar, speziell wenn es um die allgemein gültigen Normen geht z. B. Eurocodes. Das Wissen, in welchen Regelwerken, die die Grundlage für ingenieurtechnische Entscheidungen bilden, ein Änderungsbedarf besteht, um den Anforderungen aus dem Klimawandel gerecht zu werden, leistet einen Beitrag für ein funktionierendes Verkehrssystem. Eine Anpassung der Normen ist insbesondere für langfristige Entscheidungen, wie sie im Bereich der Infrastrukturen getroffen werden, notwendig.

Die Projekte wurden extern bearbeitet. Im zugehörigen Begleitkreis waren Deutsche Bahn (DB), BASt, DWD und BfG vertreten. Speziell die Methodik und zum Teil die Ergebnisse sind für alle Behörden nutzbar. Aktuell werden Ergebnisse des Projektes von der BASt als Grundlage verwendet, um den Änderungsbedarf bzgl. der Regelwerke der Straße zu identifizieren.

4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Schwerpunktthema 303 mit dem Handlungsfeld "Verfügbarkeit" wurden Möglichkeiten zur Gewährleistung, Wiederherstellung bzw. Steigerung der Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erarbeitet. Dies geschah beispielsweise durch die Entwicklung von Methoden für die Quantifizierung und Prognose der erforderlichen Verfügbarkeit

und Sicherheit von Ingenieurbauwerken bei außergewöhnlichen Ereignissen unter Berücksichtigung der Kritikalität und gesamtwirtschaftlichen Aspekten sowie möglicher Anpassungsstrategien. Kurzfristige Prognosen extremer Wetterereignisse wurden berücksichtigt und deren Anwendung weiterentwickelt. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen BAW und DWD im Rahmen des BMVI-Experten-netzwerks wurde ein Konzept erarbeitet, mit dem Niederschlagsprognosen in die Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen eingebunden werden. Hiermit und mit der Anwendung moderner Regelungsmethoden steht der WSV ein zukunftsfähiges Regelungssystem zur Verfügung, das auch bei zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels eine robuste Abfluss- und Stauregelung sicherstellt. Zusätzlich erfolgte die Optimierung des Reaktions- und Wiederherstellungsprozesses nach disruptiven Ereignissen durch die Erarbeitung eines Resilienzmanagementkonzeptes für die Straßeninfrastruktur.

Die Ergebnisse im Rahmen der Untersuchungen der Regelwerke zeigen den Anpassungsbedarf an den Klimawandel und bilden eine wichtige Grundlage für die Arbeiten im BMVI-Experten-netzwerk für die nächste Phase.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollen die entwickelten Verfahren in der 2. Phase des BMVI-Experten-netzwerks (2020–2025) weiterentwickelt werden. Verfahren zur Analyse und zur Entscheidungsunterstützung auf Objekt- und Netzebene hinsichtlich der Optimierung von Verfügbarkeit und Sicherheit bei außergewöhnlichen Ereignissen sollen konzipiert, in Pilotvorhaben demonstriert und im Rahmen von Machbarkeitsstudien validiert werden. Prognosesysteme für langfristige und extreme Wetterereignisse werden pilothaft angewendet und Nutzererfahrungen hierzu gesammelt.

5 Ableitung von (Bau-)Maßnahmen unter Betrieb (SPT 304)

5.1 Hintergrund und Zielsetzung

Das hohe Alter der Infrastrukturbauwerke hat grundsätzlich einen hohen Unterhaltungsaufwand zur Folge, durch den die Verfügbarkeit der verschiedenen Anlagen eingeschränkt wird. Zudem nehmen die Belastungen auf die Bauwerke zu durch anwachsende Verkehrsströme sowie stetig steigende Belastungen, wodurch die Infrastruktur in immer höherem Maße zusätzliche Schädigungen erfährt.

In den vergangenen Jahren haben sich bei allen Verkehrsträgern Erhaltungsdefizite ergeben, denen derzeit durch entsprechende Investitionsprogramme des BMVI begegnet wird. Durch diese Vielzahl an gleichzeitig durchgeführten Bau- und Erhaltungsmaßnahmen ergibt sich vorübergehend eine Einschränkung der Leistungsfähigkeit bzw. Verfügbarkeit der Verkehrsnetze.

Die Behinderungen des Verkehrs, die sich aus den Einschränkungen der Verfügbarkeit bei Instandhaltungs- und Baumaßnahmen ergeben, sollen auf ein Minimum reduziert und damit den hohen Ansprüchen an die Verfügbarkeit und die Zuverlässigkeit der Infrastruktur genügt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden bestehende Verfahren optimiert und neue entwickelt mit dem Fokus, dass diese Verfahren technisch sinnvoll, wirtschaftlich und mit möglichst geringem Eingriff in den Verkehr durchzuführen sind.

5.2 Vorgehensweise

Bestehende Bautechnologien sowie Bauverfahren wurden optimiert und neue Methoden entwickelt. Unter Berücksichtigung der Betriebsweisen wurden typische bauliche Maßnahmen entwickelt, um eben diese Maßnahmen weitgehend unter Betrieb bzw. ohne größere Verkehrsbehinderungen zu ermöglichen.

Speziell im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Brücken wurden aktuelle Bauverfahren und -prozesse zu baulichen Erhaltungs-, Erweiterungs- und Ersatzmaßnahmen analysiert und intelligente Instandhaltungsverfahren (sog. Smart Repair-Verfahren) entwickelt. Bestehende Verfahren wurden angepasst unter dem Aspekt, die jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen unter Betrieb und ggf. mit reduzierten

Anforderungen an die Bauausführenden durchführen zu können.

Auch die Verwendung von standardisierten Bauwerken führt zu einer Optimierung, da sich große Vorteile für die Durchführung der Maßnahmen in den Bereichen Planung, Bauverfahren und Bauprozesse ergeben, die in der Folge insbesondere zu Kostenvorteilen führen. Hierbei wurden außerdem auch Möglichkeiten zur Optimierung der baurechtlichen Verfahren betrachtet.

5.3 Projekte

Das Schwerpunktthema "Ableitung von (Bau-)Maßnahmen unter Betrieb" wurde im Rahmen der fünf nachfolgend beschriebenen Projekte bearbeitet (Tabelle 7).

5.3.1 Zukunftsfähigkeit der Verkehrslastmodelle

5.3.1.1 Aufgabenstellung und Ziel

Der Schwerlastverkehr nimmt seit Jahren in Schwere und Anzahl stetig zu, dies gilt auch für den genehmigungspflichtigen Schwerverkehr. Diese Entwicklung wirkt sich sowohl auf den Entwurf und die Bemessung von Brücken, als auch auf den Brückenbestand aus. Hieraus lässt sich ein Handlungsbedarf in Bezug auf die Zukunftsfähigkeit der Verkehrslastmodelle ableiten. Die Aufgabe ist u. a. das Ermüdungslastmodell (ELM) nach DIN EN 1991-2 zu analysieren, zu bewerten und gegebenenfalls anzupassen. Ziel ist es, möglichen Handlungsbedarf zu benennen und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die Modelle angepasst werden können.

5.3.1.2 Untersuchungsmethoden

Das Projekt gliedert sich in drei Arbeitsschritte: Der erste Arbeitsschritt war die Klärung des aktuellen Sachstands; hierbei stehen die Entwicklung des Verkehrs inklusive Schwerverkehr und die Analyse der Defizite des Ermüdungslastmodells im Vordergrund. Im zweiten Schritt wurden Konzepte für die Behebung der Defizite und eine

Tabelle 7: Projekte im SPT 304.

Behörde	Titel	Projektleiter/-in
BAST	Zukunftsfähigkeit der Verkehrslastmodelle Schlüsselworte (DE): Ermüdungslastmodell nach DIN EN 1991-2, Verkehrslastmodelle, Schwerverkehr Keywords (EN): heavy traffic, traffic load model, fatigue load model regarding DIN EN 1991-2	Rolf Rabe Dr. Iris Hindersmann (Autorin*)
BAST	Maximierung der Verfügbarkeit von Bestandsbrücken (Stahl und Beton) Schlüsselworte (DE): Bestandsbrücke, Ersatzneubau, innovative Bauweisen Keywords (EN): existing bridges, replacement construction, innovative construction	Ulrich Schmelter
BAST	Anpassung von Brückenbauwerken an geänderte Nutzungsbedingungen Schlüsselworte (DE): Bestandsbrücke, Nutzungsänderung, Ertüchtigung, Erweiterung, Anpassungsvermögen Keywords (EN): existing bridges, modification of utilization, improved efficiency, extension, potential for adaption	Markus Duschl
BAW	Reparatur bzw. Einsatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion (Smart Repair) Schlüsselworte (DE): intelligente Reparatur, Instandhaltung, Ingenieurbauwerke, Beschichtungen, Korrosionsschutz Keywords (EN): Smart Repair, corrosion protection, life cycle extension, coating, condition maintenance	Mario Hörnig
DZSF/EBA	Verwendung von standardisierten Eisenbahnüberführungen zur Beschleunigung von Ersatzmaßnahmen Schlüsselworte (DE): Rahmentragwerke, Standardisierung, Eisenbahnbrücken Keywords (EN): frame construction, standardization, railway bridge	Meike Holtkämper

*hier ist die Autorin nicht die Projektleiterin

Machbarkeitsstudie durchgeführt. Der abschließende Arbeitsschritt war die Durchführung von Pilotanwendungen.

5.3.1.3 Ergebnisse

Das hier vorgestellte Ergebnis zeigt ein mögliches Vorgehen, um die Auswirkungen der zukünftigen Schwerverkehrslastentwicklung in die Ermüdungslastmodelle von Brücken nach DIN 1991-2 einzubeziehen. Die Ergebnisse sind dem Schlussbericht zum Projekt "Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2" entnommen (Geißler et al. 2018).

Um die Notwendigkeit der Anpassung des Modells an die zukünftige Verkehrsentwicklung darzulegen, wurden Verkehrsprognosen genutzt. In einem ersten Schritt wurden Abschätzungen und Prognosen zur langfristigen Entwicklung des Transportaufkommens genutzt. Abbildung 31 zeigt die Abschätzungen zur Entwicklung des Transportaufkommens für das Haupt- und Sensitivszenario aus ProgTrans (2007) und aus den Verkehrsverflechtungsprognosen (Intraplan Consult et al. 2007, 2014).

Im nächsten Schritt wurden zur Ableitung geeigneter Fahrzeugkollektive des zukünftigen Verkehrs vier Grundscenarien erstellt, die den Verkehr unterschiedlicher Streckentypen und Verkehrsarten definieren: Langstreckenverkehr 1

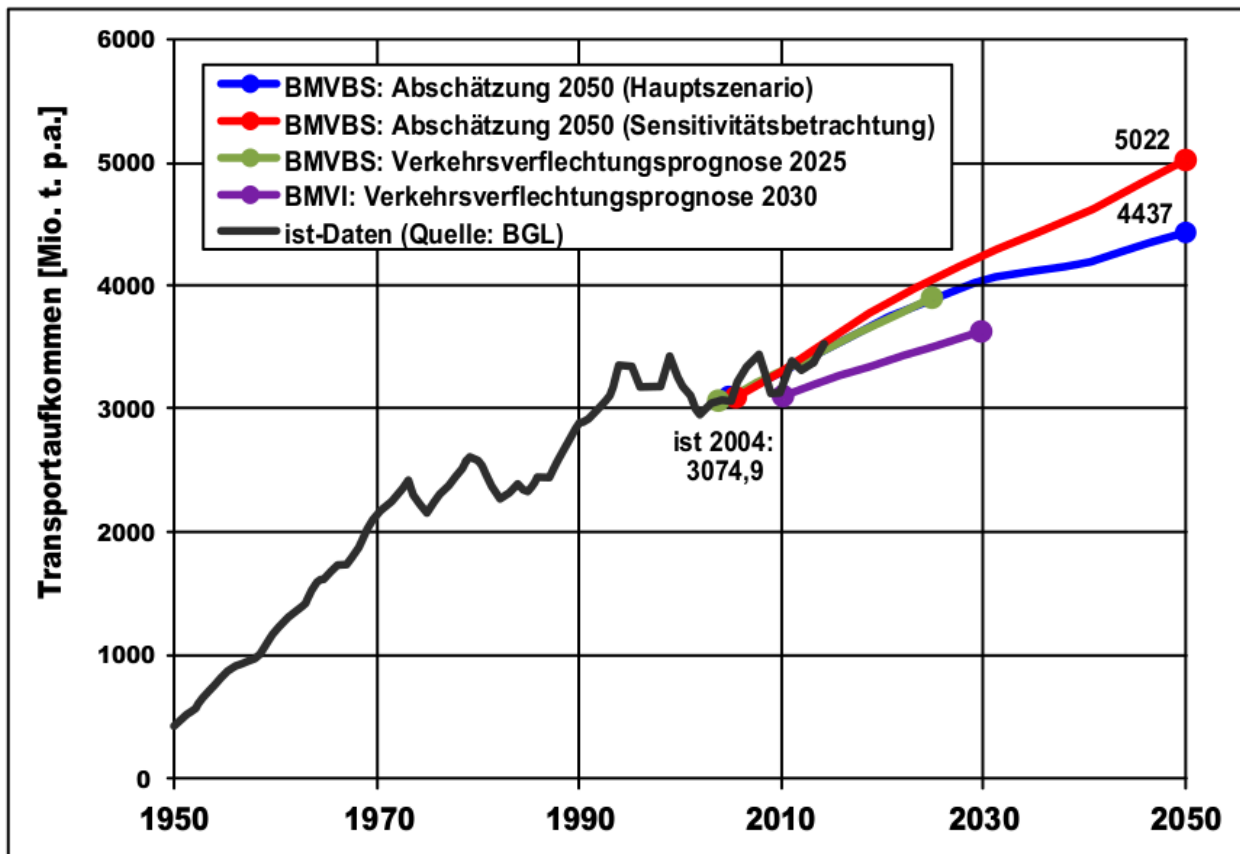


Abbildung 31: Entwicklung des Transportaufkommens in Deutschland [Mio. t. p. a.](Geißler et al. 2018, zusammengestellt aus Intraplan Consult GmbH et al. 2007, 2014, ProgTrans AG 2007).

(normal-schwer), Langstreckenverkehr 2 (leicht), Ortsverkehr 1 (normal-schwer) und Ortsverkehr 2 (leicht).

Basierend auf den Grundszenarien und Verkehrsprognosen wurden Prognoseszenarien abgeleitet, welche die mögliche Änderung des Schwerverkehrs getrennt voneinander betrachten: Anstieg der Schwerverkehrsstärke (DTSV), Hochsetzung des zulässigen Gesamtgewichts, Erhöhung des Anteils des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs, zukünftiges vernetztes und autonomes Fahren in Lkw-Kolonnen (Platooning) und die Kombination unterschiedlicher Szenarien.

Untersucht wurden die Auswirkungen systematisch an vereinfachten Tragsystemen und an vier detaillierten Tragsystemen, die im Projekt entworfen wurden.

Grundlage für die Untersuchungen ist der aktuell normativ geregelte Nachweis schädigungsäquivalenter Spannungsschwingbreiten unter Ansatz des Ermüdungslastmodells ELM 3. Hierzu werden die mit dem ELM 3 ermittelten Spannungsschwingbreiten mit dem Schadensäquivalenzfaktor λ_s , der sich aus einem Beiwert zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit (φ_{fat}) sowie weiteren Beiwerten zur Berücksichtigung des Einflusses von Stützweite und System ($\lambda_{s,1}$), des Verkehrsaufkommens auf dem ersten Fahrstreifen und der Verkehrsart ($\lambda_{s,2}$), der von 100 Jahren abweichenden Nutzungsdauer ($\lambda_{s,3}$) und dem Einfluss weiterer Fahrstreifen ($\lambda_{s,4}$) ergibt, multipliziert.

Aus den Forschungsergebnissen folgt, dass für das Ermüdungslastmodell ELM 3 aufgrund der betrachteten Prognoseszenarien (Anstieg der Schwerverkehrsstärke, Hochsetzung des zulässigen Gesamtgewichts, Erhöhung des

Anteils des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs, zukünftiges vernetztes und autonomes Fahren in Lkw-Kolonnen (Platooning) und die Kombination unterschiedlicher Szenarien) eine Modifikation notwendig wird. Im Ergebnis resultieren überarbeitete Lambda-Faktoren für das Ermüdungslastmodell. Zur Kompensation einer vorhandenen Modellschwäche beim Vorliegen nichtlinearer M - σ -Beziehungen (Verhältnis zwischen Biegung und Stahlspannung) in Spannbetontragwerken, bei denen die Spannungsschwingbreiten im Zustand I (ungerissener Betonquerschnitt) und Zustand II (gerissener Betonquerschnitt) stattfinden, wird die Anwendung eines Korrekturfaktors $\lambda_{\text{Korrektur}}$ vorgeschlagen. Weiterhin wird für den Schadensäquivalenzfaktor λ_S vorgeschlagen, dass eine Korrektur des Beiwerts des $\lambda_{S,2}$ (Einfluss von Verkehrsaufkommen und Verkehrsart) vorgenommen wird. Eine Erhöhung des Wertes zur Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens wird vorgeschlagen, sodass der neue Wert, mit $N_{\text{obs}} = 3,0 \times 10^6$ Lkw pro Jahr ermittelt, einem durchschnittlichen täglichen Schwerverkehrsanteil (DTSV) von 12.000 Fahrzeugen entspricht.

5.3.1.4 Nutzen

Eine Einbringung der Ergebnisse in die Regelwerke (hier Eurocode 2) wird angestrebt. Alle Eigentümer und Betreiber sind bei der Planung von Brücken, die auch dem zukünftigen Verkehrsanstieg gewachsen sein sollen, auf das Vorhandensein von zukunftsfähigen Annahmen und Modellen angewiesen. Daher liefert das Projekt auch einen Mehrwert und Nutzen für die anderen Verkehrsträger, hier sind insbesondere die Verkehrsträger Straße (BAST und BAG) und Wasserstraße (im Rahmen der Betreuung von Brücken) zu nennen.

5.3.2 Maximierung der Verfügbarkeit von Bestandsbrücken aus Stahl und Beton

5.3.2.1 Aufgabenstellung und Ziel

Um bauliche Maßnahmen der Erhaltung, Erweiterung oder Ergänzung im Zuge bestehender Verkehrswege realisieren zu können, ist es neben begrenzten Instandsetzungsmaßnahmen in zunehmendem Maße erforderlich, bestehende

Bauwerke durch Neubauten zu ersetzen. Hierzu ist regelmäßig die temporäre Außerbetriebsetzung der betroffenen Bauwerke erforderlich, mit der Behinderungen des Verkehrs einhergehen. Um diese Verkehrsbehinderungen zu minimieren, werden Vorgehensweisen und Bauverfahren entwickelt, die derartige Erhaltungsmaßnahmen weitestgehend unter Betrieb bzw. mit minimierten Verkehrsbehinderungen ermöglichen. Das Ziel des Projektes war es, innovative Konzepte zur Realisierung von Ersatzneubauten zu entwickeln.

5.3.2.2 Untersuchungsmethoden

Auf Grundlage einer Darstellung der derzeitigen Vorgehensweise bei der Realisierung von Ersatzneubauten, für die eine Recherche bei mehreren Landesstraßenverwaltungen durchgeführt wurde, wurden innovative Bauweisen sowohl für Unterbauten als auch für Überbauten in Beton- und Verbundbauweise zusammengestellt. Neben den innovativen Bauweisen, die sich auf die Konstruktion der Ersatzneubauten beziehen, wurden auch innovative Bauverfahren für Ersatzneubauten betrachtet, die die Herstellung der Ersatzneubauten in Seitenlage ermöglichen. Die innovativen Ansätze wurden anschließend mit dem derzeitigen Vorgehen verglichen und für vier charakteristische Brückenbauwerke Konzepte für die Realisierung entwickelt.

5.3.2.3 Ergebnisse

Zurzeit werden Ersatzneubauten von Straßenbrücken mit einem Überbau in der Regel unter Vollsperrung des Verkehrsweges oder unter Nutzung einer provisorischen Umfahrung an gleicher Stelle wie das Bestandsbauwerk errichtet. Alternativ werden Ersatzneubauten seitlich neben dem Bestandsbauwerk in neuer Endlage angeordnet, wobei zusätzliche Maßnahmen zum Anschluss an die ursprüngliche Straßenachse erforderlich werden. Diese Ausführung ist nur dann möglich, wenn ein ausreichend großes Baufeld neben dem Bestandsbauwerk zur Verfügung steht.

Ersatzbauten von Brückenbauwerken mit zwei getrennten, nebeneinander liegenden Überbauten werden in der Regel nacheinander ebenfalls in Endlage hergestellt, wobei der Verkehrsfluss in beide Fahrtrichtungen mit reduzierten Kapazitäten jeweils über einen Überbau realisiert wird.

Um die mit Ersatzneubauten verbundenen Verkehrsbeeinträchtigungen zu minimieren, ist die Bauzeit in Endlage zu minimieren. Wenn das Ersatzbauwerk bereits in Endlage hergestellt wird, bieten sich zur Beschleunigung des Bauvorganges insbesondere Bauweisen an, die gegenüber der bisher üblichen Ortbetonbauweise einen höheren Vorfertigungsgrad aufweisen. Im Forschungsprojekt wurden jeweils die Vor- und Nachteile der Bauweisen sowie spezifische Detailspekte betrachtet.

Für Unterbauten (UB) wurden acht verschiedene Bauweisen untersucht:

- UB 1 – Modulbauweise mit Blocksteinen und rückseitiger Ortbetonschale
- UB 2 – Schalenbauweise mit Halbfertigteilen und Vollquerschnittergänzungen
- UB 3 – Widerlager aus bewehrter Erde mit Auflagerfertigteil (Brüggemann 2010)
- UB 4 – Stahlbetonhohlquerschnitt mit Betonplattenausfachung
- UB 5 – Stahlbetonhohlquerschnitt – aufgeständertes Widerlager
- UB 6 – Stahlbetonhohlquerschnitt – hochgesetztes Widerlager
- UB 7 – Stahlbetonvollquerschnitt in Köcherfundamenten
- UB 8 – Winkelstützelemente als Widerlagerfertigteil

Entsprechend wurden für die Überbauten (ÜB) sowohl Vollfertigteilösungen als auch Kombinationen von vorgefertigten Bauelementen mit Ortbetonergänzungen untersucht:

- ÜB 1 – Spannbetonhohlkästen verlegt als Trägerschar
- ÜB 2 – Spannbetonquerschnitt in Plattenbalken- oder I-Trägerform verlegt als Trägerschar
- ÜB 3 – Stahlverbundplattenbalken verlegt als Trägerschar

- ÜB 4 – Stahlverbundplattenbalken mit nachträglich aufgesetzter längs vorgespannter Platte
- ÜB 5 – Spannbetonplatten mit einbetonierten Hohlkörpern verlegt als Trägerschar
- ÜB 6 – Variante ÜB 1, 2, 3 und 5 mit Ortbetonergänzung und integrierter Kappe

Insofern eine Herstellung der Ersatzbauwerke in Seitenlage möglich ist, kommt den Verschiebverfahren eine entscheidende Bedeutung zu. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Fluidverfahren, das Einfahren sowie das Einheben von Bauwerken untersucht, die für den Verkehrsträger Schiene bereits eingesetzt werden (DB Bahnbaugruppe GmbH 2016, DB Netz AG 2018). Die verschiedenen innovativen Ansätze wurden den derzeit angewandten Technologien beim Bau von Ersatzbauwerken vergleichend gegenübergestellt und für vier beispielhafte Brückenbauwerke Konzepte für die Realisierung in der Qualität von Entwurfsplanungen erstellt.

5.3.2.4 Nutzen

Gegenstand der Untersuchungen im Projekt waren Ersatzneubauten von Straßenbrücken, die in der Baulast des Bundes, der Länder, der Landkreise oder der Kommunen stehen können. Für alle vorgenannten Baulastträger können sich bei der Realisierung von Ersatzneubauten erhebliche Vorteile hinsichtlich der Bauzeiten in Endlage ergeben, die wiederum zu einer signifikanten Reduktion der mit den Ersatzneubauten verbundenen Verkehrsbeeinträchtigungen führen können. Die untersuchten Bauweisen für Unterbauten können darüber hinaus auch beim Bau von Stützbauwerken angewandt werden und so zu einer Bauzeitverkürzung bei Baumaßnahmen im Zuge der Verkehrssysteme Schiene, Straße und Wasserstraße beitragen. Hierdurch wird nicht nur ein Nutzen für den individuellen Verkehrsteilnehmer erzielt, sondern insbesondere auch ein erheblicher volkswirtschaftlicher Nutzen generiert. Dies gilt umso mehr in Hinblick auf den sich abzeichnenden steigenden Bedarf an Ersatzneubauten innerhalb der bestehenden Verkehrsnetze.

Durch die Bearbeitung des Projektes innerhalb des BMVI-Expertenetzwerks unter Federführung der BAST und mit

Beteiligung des DZSF/EBA konnten umfangreiche Erfahrungen, die bei Ersatzneubauten von Brückenbauwerken im Zuge von Bahnstrecken gewonnen wurden, berücksichtigt werden (Wirker et al. 2019). Darüber hinaus wurden durch die Beteiligung der BAW am Forschungsprojekt Parallelen zu Bauweisen festgestellt, die bei der Instandsetzung von Schleusen im Zuge von Wasserstraßen angewandt werden (BAW 2017). Durch die behördenübergreifende Zusammenarbeit konnten Ansätze zur Standardisierung von Bauprozessen aus dem ebenfalls im SPT 304 "Ableitung von (Bau-) Maßnahmen unter Betrieb" unter Federführung des DZSF/EBA bearbeiteten Projekt "Verwendung von standardisierten Eisenbahnüberführungen zur Beschleunigung von Ersatzmaßnahmen" in dieses Projekt übernommen werden.

5.3.3 Anpassung von Brückenbauwerken an geänderte Nutzungsbedingungen

5.3.3.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Infrastruktur von Straße, Schiene und Wasserstraße weist im Mittel ein hohes Alter auf, sodass die Bauwerkserhaltung und -verstärkung zunehmend im Vordergrund steht. Das steigende Alter der Bauwerke geht zudem mit vorhersehbaren bzw. künftig denkbaren Nutzungsänderungen wie stetig wachsenden Beanspruchungen aus zunehmendem Schwerlastverkehr einher, was zur Verschlechterung des Bauwerkszustands von Bestandsbauwerken führt. Daraus resultierende Schäden an Bauwerken führen zu möglichen Einschränkungen der Verfügbarkeit. Bei der gewohnten Bauweise von Infrastrukturbauwerken ist somit eine Ertüchtigung des Bestandsbauwerks oder sogar ein kompletter Ersatzneubau erforderlich.

Mit dem Projekt unter Einbeziehung eines externen Projektes (Schnellenbach-Held 2018) wurde das Ziel verfolgt, neuartige Konzepte zu erarbeiten, um Brückenbauwerke während ihrer Nutzungsdauer und unter Verkehr an geänderte Nutzungsbedingungen flexibel anpassen zu können. Vorhersehbare bzw. künftig denkbare Nutzungsänderungen sollen für typische Bauwerke der einzelnen Verkehrsträger bereits bei der Neubauplanung so berücksichtigt werden, dass sich Brückenbauwerke an diese Änderungen

mit möglichst geringem Aufwand anpassen lassen und auch bei Änderungen der Rahmenbedingungen kein Ersatzneubau erforderlich ist.

5.3.3.2 Untersuchungsmethoden

Für die verschiedenen Bauweisen der Stahlbeton-, Spannbeton-, Stahl- und Verbundbrücken wurden die relevanten Möglichkeiten zur Bauwerksverstärkung zusammengestellt und erläutert. Es wurden ihre Einsatzmöglichkeiten beschrieben. Zudem wurden die notwendigen Randbedingungen zur Umsetzung und der Einfluss dynamischer Beanspruchungen auf die Verstärkungstechniken ermittelt. Somit wurde ein umfassender Überblick über die etablierten Verstärkungstechniken gegeben.

Neben den etablierten Verstärkungstechniken sind auch innovative Bauweisen interessant, um eine Anpassung an Nutzungsänderungen wirtschaftlicher und effizienter zu gestalten.

5.3.3.3 Ergebnisse

Die durchgeführte Literaturrecherche führte zu den folgenden maßgebenden Nutzungsänderungen für bestehende Brückenbauwerke:

- Erhöhung des Verkehrsaufkommens, des zulässigen Fahrzeuggewichts bzw. der Ausbaulast,
- Anordnung eines weiteren Fahrstreifens,
- Anordnung von Schienenverkehr auf einer Straßenbrücke,
- Erhöhung der Grundbelastung durch vernetztes Fahren (z. B. Platooning),
- Erhöhung der Achszahl.

Die anschließende Analyse etablierter Verstärkungstechniken für Beton-, Stahl- und Verbundbrücken resultiert in den folgenden Verstärkungstechniken (Tabelle 8).

Die relevanten Verstärkungstechniken wurden in einem Verfahrenskatalog zusammengefasst. Der Verfahrenskatalog beinhaltet Verstärkungstechniken für Beton- und

Tabelle 8: Verstärkungstechniken (Schnellenbach-Held 2018).

Betonbrücken	Stahl- und Verbundbrücken
Externe Vorspannung	Querschnittsergänzung mit angeschweißten Blechen
Verstärkung mit Kohlenstofffaserwerkstoffen	Fahrbahnverstärkung bzw. -ersatz
Einbau zusätzlicher Bauteile	Systemveränderung
Einbau zusätzlicher Bewehrung	Teilersatz
Interne Vorspannung ohne Verbund	Externe Vorspannung

Verbundbrücken. Es erfolgte zudem eine Einteilung im Hinblick auf die Anwendung in Längs- oder Querrichtung sowie die Eignung für ein- und zweiteilige Überbauten.

Für die Machbarkeitsstudie wurden neuartige Lastszenarien entwickelt, mit deren Hilfe die bereits beschriebenen zukünftig zu erwartenden Nutzungsänderungen abgebildet werden können. Somit wurde eine Abschätzung der Belastung zukünftiger Brückenbauwerke vorgenommen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Machbarkeitsstudie zeigen, dass der mögliche Verstärkungsgrad einer nachträglichen Verstärkung in hohem Maße projektabhängig ist. Bei dem Beispielbauwerk "Plattenbalken aus Beton" gestaltet sich eine effektive Verstärkung aufgrund hoher Auslastungen bereits im Ausgangszustand schwierig. Eine Erhöhung der Biegetragfähigkeit in Längsrichtung ist lediglich durch die Anordnung einer umgelenkten externen Vorspannung zu erzielen. Im Gegensatz dazu ist bei dem Bauwerk "Hohlkasten aus Beton" eine vollständige Kompensation der gestiegenen Beanspruchungen in Längs- und Querrichtung möglich. Eine Steigerung der Tragfähigkeit kann ebenfalls bei dem betrachteten Verbundüberbau erreicht werden.

5.3.3.4 Nutzen

Mit den Untersuchungsergebnissen wurden allgemeine Empfehlungen für die Neubauplanung formuliert. Diese können dazu beitragen, dass zukünftig die Bauwerke länger genutzt werden können, indem z. B. Umbau- bzw. Verstärkungsmaßnahmen schneller und mit weniger Eingriff in die Umwelt und den Verkehr durchgeführt und somit die Funktionsfähigkeit der Straßen besser und schneller gewährleistet werden können. Zudem können sich auch wirt-

schaftliche Vorteile ergeben, indem weniger noch intakte Bauwerksteile abgerissen bzw. erneuert werden müssen.

Obwohl die Brückenbauwerke der anderen Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße über andere Einwirkungen verfügen, sind die Ergebnisse trotzdem auch auf diese übertragbar: Die erläuterten Methoden zur Verstärkung wie z. B. Querschnittsergänzungen, Verstärkungen, Systemveränderungen oder externe Vorspannung werden allgemein erläutert und bewertet und sind damit nicht nur für Straßenbrücken, sondern auch für Eisenbahnbrücken und Brücken über Wasserstraßen nutzbar.

5.3.4 Reparatur bzw. Einsatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion (Smart Repair)

5.3.4.1 Aufgabenstellung und Ziel

Da ein Großteil der Infrastruktur der Bundeswasserstraßen bereits ein fortgeschrittenes Betriebsalter erreicht hat, weisen viele Bauwerke im Stahlwasserbau und Stahlhochbau Schäden am Korrosionsschutz oder an der Stahlkonstruktion selbst durch Korrosion auf. In vielen Fällen drängt sich dabei die zeitnahe Umsetzung eines Neubaus, zumindest aber einer größeren Instandsetzungsmaßnahme auf. Häufig müssen diese Maßnahmen im Vorfeld über einen langen Zeitraum geplant werden. Ausschreibungs- und Bewerbungsprozesse verzögern einen zeitnahen Beginn zusätzlich. Die eigentliche Ausführung wird anschließend von

Fachfirmen übernommen. Die WSV als Auftraggeber findet sich in der Rolle des Bauüberwachers wieder.

Diese Vorgehensweise kann durch eine gezielte und frühzeitige Reparatur der Beschichtungen für den Korrosionsschutz hinausgezögert werden. Im Gegensatz zur aufwändigen Voll- oder Teilerneuerung ganzer Bauwerke werden bei Reparaturen nur partielle Schadstellen mit dafür geeigneten Stoffen ausgebessert. Damit ergeben sich sowohl langfristige Kosteneinsparungen als auch Sicherheitsgewinne. Dieses sogenannte "Smart Repair" von Korrosionsschutzbeschichtungen kann somit bei Anwendung allgemein, speziell aber während der Bauwerksinspektion, als kurzfristige Ausbesserungsmethode dienen. Daher ist es für den Anwender vor Ort besonders wichtig, entsprechende Lösungen bereit gestellt zu bekommen, damit er ohne viel Aufwand und detaillierte Vorkenntnisse diese Reparaturarbeiten durchführen kann.

Dazu sollen die im vorliegenden Teilprojekt gewonnenen Erkenntnisse aus Labor- und Felduntersuchungen einen ersten Ansatzpunkt liefern, der darüber hinaus als Prüfzenario in einem Regelwerk für Reparaturprodukte aufgeht. Schließlich sollen mit Anwendungserfahrungen von Ausbesserungsbeschichtungen und spezifischen Reparaturlösungen die WSV beraten und unterstützt werden.

5.3.4.2 Untersuchungsmethoden

Zur Prüfung der Anwendbarkeit sowie der Tauglichkeit von Reparaturbeschichtungen für den Stahlwasserbau und Stahlhochbau wurden verschiedene Untersuchungen sowohl im Labor als auch an mehreren Bauwerken durchgeführt. Dabei wurde unter anderem auf Aspekte der Handhabung und der Einsatzfähigkeit wie auch auf das Langzeitverhalten der einzelnen Reparaturlösungen geachtet. Die Möglichkeit diese Produkte über einen mehrmonatigen Zeitraum an Bauwerken der Bundeswasserstraßen unter realen Bedingungen einzusetzen und zu beobachten, wurde umfassend genutzt. Extrembelastungen, wie sie nur selten in der Natur auftreten, wurden dagegen im Korrosionsschuttlabor der BAW durchgeführt. Damit ließen sich Aussagen über Einsatzgrenzen und das zu erwartende langfristige Funktionsverhalten der verschiedenen Produkte treffen. Die Auswertungen wurden durch einen großen Probenumfang statistisch abgesichert.

In mehreren Versuchsreihen wurden verschiedene Kriterien u. a. bei der Probenvorbereitung, der Schadensproduktion, den Ausbesserungsmaßnahmen als auch dem Zusammenspiel von Altbeschichtungen mit Reparaturprodukten untersucht. Im Hinblick auf eine langfristige Standardisierung eines geeigneten Prüfzenarios für Reparaturprodukte wurde zudem die Untersuchungsmethodik in evolutionären Entwicklungsschritten angepasst. Um sicherzustellen, dass regelmäßige Reparaturen unter ökonomischen Punkten eine sinnvolle Möglichkeit der Bauwerkserhaltung darstellen, soll eine aktuelle Studie auf Grundlage der Bestandsdatenbanken der BAW mit Bezug zum Stahlwasserbau Aufschluss geben.

5.3.4.3 Ergebnisse

Die heterogenen Anwendungsarten der einzelnen Reparaturlösungen benötigten eine veränderte Herangehensweise als bei bisherigen und größtenteils normierten Tauglichkeitsprüfungen von Beschichtungssystemen für den Korrosionsschutz. Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine Schädigungsstelle nach Vorbild der gängigen Korrosionsprüfungen mit einem 2 mm breiten Ritz bis zum Stahlsubstrat verwendet. Hierbei ließen sich schon z. T. deutliche Unterschiede in den Eigenschaften der unterschiedlichen Reparaturstoffe dokumentieren. Jedoch waren bei der Interpretation der Ergebnisse Grenzen gesetzt, da die Schädigungsstellen für z. B. Haftfestigkeitsuntersuchungen keinen ausreichenden Messbereich boten. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde die Schädigungsstelle sukzessive vergrößert. Die Abkehr von der gängigen Methode mit schmalen Ritz zog weitere Herausforderungen in Bezug auf eine möglichst gleichmäßige Schädigungseinbringung mit sich.

Als Zwischenschritt wurde eine händische Entschichtung durch mechanisch betriebene Werkzeuge genutzt, mit welcher nach Abschluss der Belastungsphasen (Abbildung 32) die Performance des jeweiligen Reparatursystems besser bewertet werden konnte. Darüber hinaus wurde eine weitere Versuchsreihe mit einer nochmal veränderten Schädigungseinbringung initiiert. Durch die nunmehr ausreichend dimensionierten und gleichzeitig scharf begrenzten, entschichteten Bereiche, wurde die Aussagekraft der gewonnenen Messergebnisse nochmals deutlich angehoben.

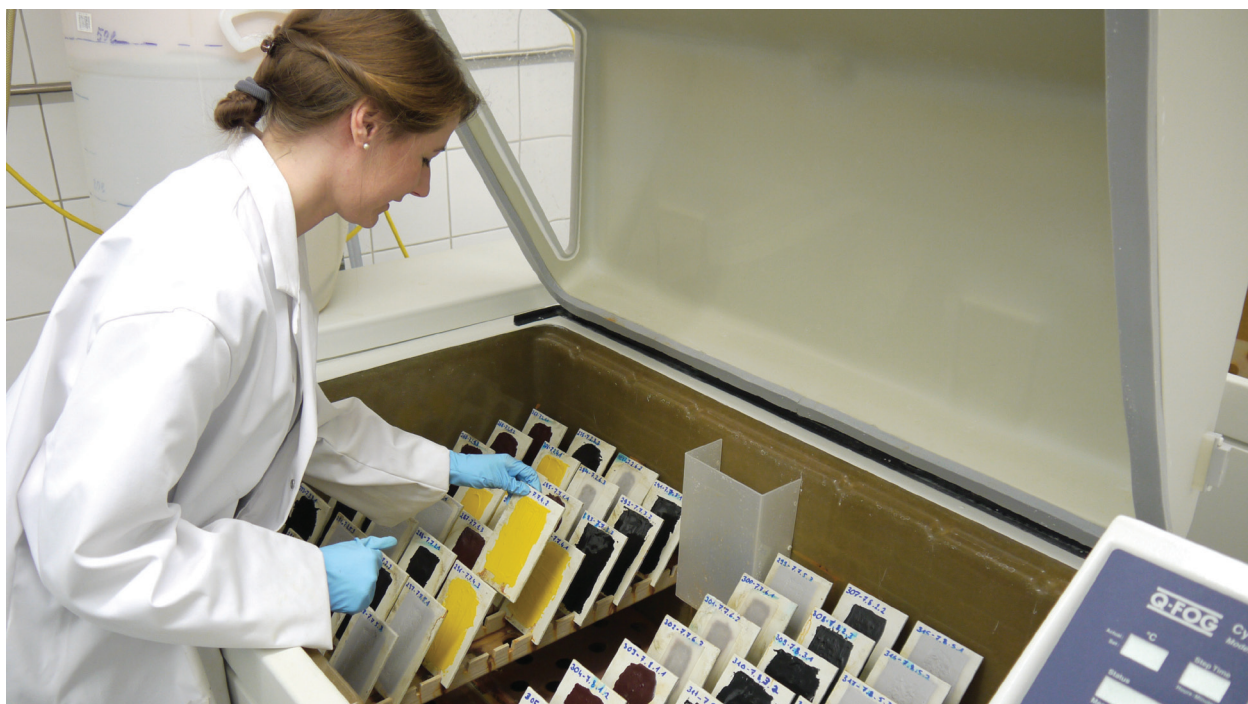


Abbildung 32: Ausgebesserte Versuchsprobenplatten in der Belastungsphase durch kontinuierlichen Salzsprühnebel zur beschleunigten Alterung mit erhöhtem Korrosionsdruck.

Die angewendeten Untersuchungsparameter wie die Nutzung verschiedener Applikationswerkzeuge oder die Herstellung unterschiedlicher Vorbereitungsqualitäten konnte zum einen ein breites Spektrum an Erkenntnissen zur individuellen Leistungserfassung der einzelnen Reparaturlösungen erzeugen und zum anderen die systematische Entwicklung eines geeigneten Laborprüfverfahrens ebendieser vorantreiben. Weitere Versuchsreihen gingen der Frage nach, wie sich die Reparaturlösungen in Kombination mit vorhandenen gefahrstoffhaltigen Altbeschichtungen verhalten, wie sie auf ein verändertes Schädigungsbild durch Schlag- bzw. Druckbelastung angewendet werden können und wie sie sich unter verschiedenen z. T. extremen Klimabedingungen verarbeiten ließen. Gerade die letztgenannte Versuchsreihe stellte ein hohes Maß an Aufwand dar, da die benötigten Bedingungen nur in einer begehbaren Klimakammer erreicht werden konnten. Die verschiedenen Reparaturprodukte zeigten kein eindeutiges Verhalten in Bezug auf Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit. So hatte jeder Stoff seine individuellen idealen Bedingungen. Selbst

bei sehr hohen oder sehr tiefen Temperaturen zeigten einige Stoffe gute Anwendungs- und Funktionsverhalten.

Vervollständigt wurden die Laborprüfungen mit Anwendungsuntersuchungen im Feld. Unter anderem wurden an den Schleusen in Marbach, Neckarsteinach, Gelsenkirchen, Hannover-Anderten und Hannover-Linden Versuchsflächen angelegt. Dabei wurden die Anwendungseigenschaften in Zusammenhang mit der Erstnutzung, also Anwenden, die keine wesentlichen Vorkenntnisse hatten, dokumentiert. Bereits nach fünf Monaten konnte eine erste Zwischenbegutachtung an der Schleuse in Gelsenkirchen durchgeführt werden, wobei erste Anzeichen von Grenzen von gesprüht aufgetragenen Reparaturlösungen festgehalten werden konnte. Die übrigen Reparaturlösungen, die auf herkömmliche Weise appliziert wurden, zeigten bis auf Farbveränderungen keine Schwächen. 13 Monate nach Beginn fand an der Schleuse in Marbach eine Kontrolle der Versuchsflächen statt. Hierbei zeigten von insgesamt zehn verwendeten Reparaturstoffen nur zwei wesentliche Veränderungen, welche langfristig negative Funktionsweisen

vermuten lassen. Zukünftige Begutachtungen an allen Einsatzorten werden weiteren Aufschluss über Leistungscharakteristik der eingesetzten Stoffe geben.

5.3.4.4 Nutzen

Das Teilprojekt "Smart Repair" verfolgt in erster Linie einen Erkenntnisgewinn in Bezug auf die Entwicklung von geeigneten Prüfverfahren von Reparatursystemen für Korrosionsschutzbeschichtungen. Diese Entwicklung sollte über das Projekt hinaus weiter vorangetrieben werden, sodass die BAW neben bereits bestehenden Prüfungen für Erstbeschichtungen langfristig auch Reparatursysteme auf ihre Tauglichkeit und Einsatzfähigkeiten testen kann. Letztendlich kommt ein solcher Prüfprozess der Qualitätssicherung von Reparaturmaßnahmen an der Infrastruktur der Bundeswasserstraßen entgegen. Darüber hinaus wird die BAW die gewonnenen Sachkenntnisse gezielt in die WSV tragen, damit die eigentlichen Anwender vor Ort mehr Sicherheit im Umgang mit partiellen Schädigungen am Bauwerk und deren Ausbesserung erhalten.

Im BMVI-Expertennetzwerk können sich die beteiligten Ressortforschungseinrichtungen über kurze Wege und mit einer gemeinsamen Arbeitsstruktur konstruktiv austauschen. Dieser Umstand ermöglichte es, Forschungsvorhaben wie dieses in einem größeren Interessenkreis zu diskutieren und vor allem verschiedene Blickpunkte auf die Thematik zu berücksichtigen. Eine erweiterte Übertragbarkeit der Ergebnisse in die verschiedenen Anwendungsfelder der einzelnen Verkehrsträger wird somit sichergestellt.

Zudem gilt in vielen Bereichen das Motto "Bauen unter Betrieb" als ein zielführendes Verfahren zur In-Betrieb-Haltung des Infrastrukturbauwerkes bei gleichzeitiger Instandsetzung. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich somit auch auf die anderen Verkehrsinfrastrukturen übertragen. Dies gilt insbesondere für die Verkehrsträger Schiene und Straße, bei denen Korrosionsschutz vornehmlich auf Brücken zum Einsatz kommt. Eine systematische Nutzung von Reparatursystemen im Korrosionsschutz konnte dort bisher nicht festgestellt werden.

Über die Arbeitsgruppe des Schwerpunktthemas 304 wurden durch die BAST Kontakte mit der Straßenverwaltungs-

behörde des Landes Hessen hergestellt. Die Erneuerung der Rheinbrücke Schierstein in Stahlbauweise wurde als Standort zum fachlichen Austausch über Nutzen und Grenzen von Beschichtungsreparaturen genutzt. Zusätzlich wurde der Kontakt zur Deutschen Bahn über das DZSF/EBA aufgebaut. Einige der Diskussionsergebnisse flossen letztendlich in die Bearbeitung dieses Teilprojektes mit ein.

5.3.5 Verwendung von standardisierten Eisenbahnüberführungen zur Beschleunigung von Ersatzmaßnahmen

5.3.5.1 Aufgabenstellung und Ziel

Die Infrastrukturbauwerke der Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße haben vielfach ihre bei der Errichtung geplante Nutzungsdauer überschritten. Durch die Investitionsprogramme des Bundes in die Verkehrsinfrastruktur wird den entstandenen Erhaltungsdefiziten derzeit begegnet.

Die erfolgreiche Umsetzung der Vorgaben aus den Investitionsprogrammen erfordert die Optimierung von Bauverfahren und Bauprozessen. Eine Möglichkeit zur Optimierung von Ersatzmaßnahmen ist die Verwendung standardisierter Bauwerke, z. B. Brücken. Es werden dadurch Vorteile für die Durchführung der Maßnahmen (Planung, Bauverfahren und Bauprozesse) erwartet, die insbesondere zu Kostenvorteilen und Zeiteinsparungen führen können.

Die Erfahrungen der DB AG mit der Standardisierung von Brücken von 2 m bis 6 m sind positiv, so dass die Erweiterung der Standardisierung auf 16 m als günstig erachtet wird. Von den ca. 25.000 Brücken im Netz der DB AG sind ca. 80 % kleiner als 16 m. Viele dieser Brücken kommen derzeit ans Ende der Lebensdauer und es stellt sich die Herausforderung des Neu- bzw. Ersatzneubaus. Berücksichtigt man die Zusagen der DB AG aus der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, in 3 Jahren 875 Brücken neu zu erstellen, könnte das Verfahren ca. 200 Mal pro Jahr angewendet werden.

Ziel ist die Anpassung der DB Richtlinie 804 und die Bauartzulassung durch das Eisenbahn-Bundesamt.

5.3.5.2 Untersuchungsmethoden

Gegenstand der baustatischen Standardisierung sind Rahmenbauwerke mit einer lichten Weite von 10 bis 16 m und lichten Höhen von 5,5 m sowie einer Überschüttung von bis zu 1,5 m. Grundlage der statischen Berechnung und Bemessung sind die europäischen technischen Baubestimmungen einschließlich der entsprechenden nationalen Anhänge. Der Bemessung sind die Lastmodelle nach DIN EN1991-2 unter Berücksichtigung des Lastklassenbeiwerts mit 1,21 zu Grunde zu legen. Als Entwurfsgeschwindigkeit ist $v \leq 300$ km/h anzunehmen. Die Errichtung von Lärmschutzwänden auf der Kappe mit Höhen bis 4 m über Kappe ist zu berücksichtigen. Die baustatischen Berechnungen sind in prüffähiger Form aufzustellen. Die Dimensionierung und Berechnung wurde an Zilch + Müller Ingenieure GmbH aus München vergeben.

Zuerst wurden die benötigten Bauteilabmessungen definiert, wodurch ein Raster mit sinnvollen Größen für die Stützweiten erstellt wurde. Dabei wurden vor allem die Regelquerschnitte der im innerstädtischen Bereich zu erwartenden Straßen als Grundlage genommen. Darauf aufbauend wurden das Tragwerk dimensioniert und entsprechende Gründungsarten untersucht. Standardisierte Fundamente und Bodenverbesserungen eröffnen die Möglichkeit, das System nahezu überall einzusetzen. Nur seltene, spezielle Untergründe schließen eine Nutzung aus. Der statische Nachweis aller relevanten Größen führte zur Erstellung der Schal- und Bewehrungspläne, mit denen das Projekt vollständig ist.

5.3.5.3 Ergebnisse

Die Grundlagen für die Erweiterung der DB Richtlinie 804, die seit 2013 die Standardisierung von Rahmenbauwerken für Spannweiten von 2 m bis 6 m enthält, auf die Standardisierung von Spannweiten bis nunmehr 16 m wurden erfolgreich erarbeitet.

Die Verwendung standardisierter Rahmenbauwerke birgt vielfältige Vorteile: Zum einen wird die Bauzeit durch den Verzicht auf individuelle Planungen maßgeblich verkürzt,

da schon bei der Planung auf standardisierte Unterlagen zurückgegriffen wird. Hierdurch reduziert sich ebenfalls der Prüfaufwand durch die Behörde. Auch sind die Bauabläufe durch die Standardisierung der Planung sehr ähnlich, wodurch sich Lerneffekte und damit langfristig Optimierungen in der Bauzeit einstellen.

Des Weiteren reduzieren sich die Baukosten im Vergleich zu individuell geplanten Bauwerken, da sich die Planungsleistungen auf die Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen und damit die Wahl der passenden Variante reduziert und sich mittelfristig Planungsfehler aufgrund der ähnlichen Erfahrungen reduzieren und damit die Zahl der gestellten Nachträge abnimmt.

Durch den einmalig höheren Planungsaufwand bei der Erstellung der standardisierten Unterlagen und die positiven Lerneffekte wird auf Dauer die Möglichkeit von Planungsfehlern nahezu vollständig vermieden. Zusätzlich ergibt sich durch die ähnlichen Erfahrungen im Bauablauf und ein dadurch gut trainiertes Personal, dass sich die Mängel reduzieren. Schlussendlich fließen auch die Erfahrungen aus der Nutzung, damit sind gleich gelagerte bzw. häufig auftretende Schäden oder Probleme gemeint, in die Überarbeitung der Standardisierung ein. Hierdurch steigert sich die Qualität kontinuierlich.

Nachteile sind in erster Linie bei den Kosten zu sehen. Eine Standardisierung funktioniert dann am besten, wenn die verschiedensten Anwendungsfelder mit abgedeckt sind. Das führt zwangsläufig zur Bemessung nach den extremen Belastungsfällen. Daher ist der Materialaufwand in der Regel erhöht gegenüber der individualisierten Lösung. Diese zusätzlichen Kosten werden durch die Einsparungen bei der Planung aufgefangen und insgesamt überwiegen die Vorteile in jeder Hinsicht.

5.3.5.4 Nutzen

Im Bereich des Schienennetzes existieren umfangreiche Erfahrungswerte für die Durchführung von Maßnahmen "unter dem rollenden Rad". Bei der DB AG existiert eigens hierfür die Richtlinie "Fahren und Bauen". Dieses Wissen soll durch die Vernetzungen im BMVI-Expertennetzwerk auch für die anderen Verkehrsträger für ihre Belange zu-

gänglich, verkehrsträgerbezogen angepasst und weiterentwickelt werden.

Die DB AG berichtet von einer erfolgreichen Testphase der Standardisierung der Planung von 2 m bis 6 m und möchte das System konsequent weiter entwickeln. Dieser Erfolg kann genutzt werden, auch Verantwortliche anderer Verkehrsträger vom Sinn der Standardisierung von Ingenieurbauwerken zu überzeugen.

Das Ergebnis dieses Projektes sowie die Zulassung als Bauart sind nicht einfach übertragbar. Allerdings bestehen bspw. beim Verkehrsträger Straße ebenfalls eine große Menge Bauwerke inkl. Instandhaltungs- und Erneuerungsbedarf mit dem Potenzial zur Standardisierung. Insgesamt wurde der Nutzen der Standardisierung erkannt und auf weitere Bereiche übertragen werden können.

5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Thematik "Bauen unter Verkehr" hat sehr viele Facetten und Möglichkeiten der Optimierung. Damit aber Verbesserungen auch in der Praxis ankommen, sind die Arbeiten im SPT auf bestimmte Fragestellungen fokussiert worden. Mit

dem Thema Standardisierung von Eisenbahnüberführungen sind für den großen Bereich "Ersatzneubau" Regelungen in Form von Arbeitshilfen bereitgestellt worden, die es ermöglichen, diese Arbeiten vor Ort in einer Art und Weise durchzuführen, die den Betrieb des jeweiligen Verkehrsträgers möglichst wenig beeinträchtigt. Mit den Ergebnissen des Projektes "Smart Repair" wird den Baulastträgern eine Vorgehensweise an die Hand gegeben, die es ermöglicht, sehr frühzeitig einzugreifen, damit große Maßnahmen mit ihren negativen Einflüssen auf Dritte gar nicht erst oder erst sehr viel später notwendig werden. Weitere Projekte (Maximierung der Verfügbarkeit und Anpassung an geänderte Nutzungsbedingungen) liefern ebenfalls für die Praxis relevante Vorgehensweisen, die dazu dienen, unsere Verkehrssysteme zukunftsfähig zu halten bzw. zu machen.

Somit sind wichtige fachliche Grundlagen identifiziert und gelegt worden, die es gilt, in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks in Bezug auf den realen Einsatz zu erproben und weiterzuentwickeln, indem weitere Nutzer einbezogen werden und das Feedback aus der Praxis erkundet und berücksichtigt wird. Damit ist sichergestellt, dass praxisnah geforscht wird und dass die neuen Methoden auch wirklich Einzug in die Praxis der Anwender finden können und werden (Integrationsphase).

6 Entwicklung eines indikatorgestützten Lebenszyklusmanagements für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur

6.1 Hintergrund und Zielsetzung

Viele Infrastrukturbauwerke erreichen in den nächsten Jahren aufgrund der zunehmenden Nutzung und ihres fortschreitenden Lebensalters das Ende ihrer technischen Lebensdauer. Gegenwärtig werden Entscheidungen über die Maßnahmen während der Nutzungsdauer auf Grundlage der vorliegenden objektbezogenen Informationen getroffen. Die Informationsbeschaffung gestaltet sich mitunter schwierig und langwierig. Ein fortgeschrittenes, intelligentes Lebenszyklusmanagement (LZM) kann diesen Prozess substantiell unterstützen. Dafür werden über die Lebensdauer des Objekts alle relevanten Informationen in Form von Kenngrößen systematisch erfasst und können bei Bedarf zeitnah und umfassend ausgewertet zur Verfügung gestellt werden. Die Kenngrößen und deren Kombinationen sollen sämtliche baulichen, ökonomischen, sozio-kulturellen und ökologischen Belange und Anforderungen berücksichtigen.

Das Ziel dieses Projektes war es, eine Konzeption mit Pilotstudie eines modularen indikatorgestützten Lebenszyklusmanagements hinsichtlich schneller, zielgerichteter und nachvollziehbarer Entscheidungen für die Optimierung von Maßnahmen im Lebenszyklus zu entwickeln.

6.2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Projektes (Gerdes et al. 2019) wurde für die Verkehrsträger Straße, Wasserstraße und Schiene ein verkehrsträgerübergreifendes Konzept für ein indikatorgestütztes LZM-System erarbeitet, wobei sich vereinfacht drei Teilprojekte unterscheiden lassen (Abbildung 33).

In dem Teilprojekt OBJEKT ging es um das Einzelobjekt, d. h. Brücke, Tunnel oder Schleuse als Bauwerk innerhalb eines Teil- bzw. des Gesamtnetzes und dessen zeitabhängige Zustandsentwicklung. Mit diesen Daten und mit praxistauglichen Prognosemodellen sollen Präventionskonzepte formuliert und ein objektspezifisches Unterhaltsmanagement etabliert werden, um die instandsetzungsfreie Lebensdauer deutlich zu verlängern.

In dem Teilprojekt NETZ wurde die strategische Planung von Prävention-, Unterhalts- und Instandhaltungsmaß-

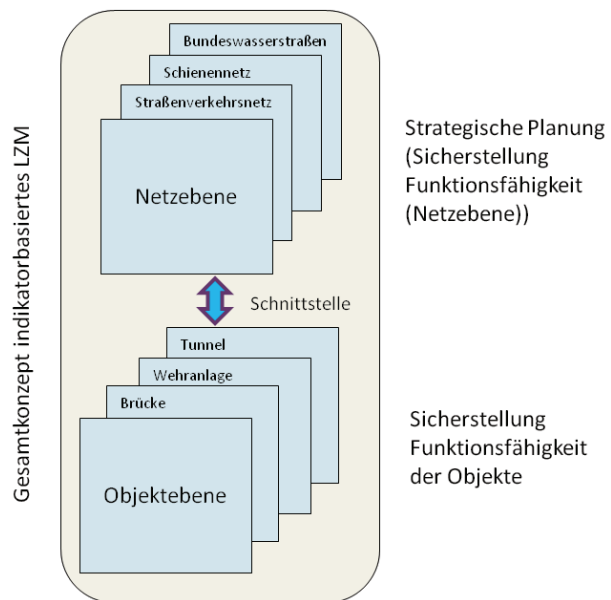


Abbildung 33: Konzept des LZM (Gerdes et al. 2019).

nahmen auf der übergeordneten Netzebene behandelt. Aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen können für das Einzelobjekt optimale Instandhaltungsstrategien nicht immer zum gewünschten Zeitpunkt umgesetzt werden. Darüber hinaus führen Maßnahmen am Objekt stets zu Funktionsbeeinträchtigungen für das Netz eines oder mehrerer Verkehrssysteme.

Im dritten Teilprojekt SCHNITTSTELLE erfolgt eine Verknüpfung der Netzebene mit der Objektebene, was eine wichtige Voraussetzung für die Abstimmung strategischer und operativer Maßnahmen im Rahmen des LZM der Verkehrsnetze bzw. einzelner Verkehrsbauwerke ist.

Für das GESAMTPROJEKT mit dem Anspruch, "verkehrsträgerübergreifend" zu sein, könnten alle Bauwerke idealerweise in einem möglichst einheitlichen LZM-System verwaltet, besser "gemanagt" werden. Wichtige Charakteristika des LZM-Systems sind die Anwendbarkeit für alle Lebenszyklusphasen der betrachteten Einheiten, eine einfache und transparente Verknüpfung der Objektebene mit der Netzebene, Ableitung konkreter Handlungen für Netz- und Objektebene sowie die dafür notwendige Einbeziehung aller relevanten Stakeholder. Das System soll im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses die Erreichung der gesetzten Ziele im LZM unterstützen.

6.3 Ergebnisse

Zentrale Idee des entwickelten Konzepts ist die Erhebung, Auswertung und Nachverfolgung von Materialkennwerten, die allgemeingültige Aussagen und Prognosen zum Zustand des Bauwerks erlauben. Auf den Werkstoff abgestimmte laboranalytische Methoden sollen also visuelle Überprüfungen ergänzen bzw. zum Teil ablösen und als Basis für Lebensdauerprognosen, bedarfsorientierte Instandhaltungsplanungen und Ursachenanalysen verwendet werden. Zur Schaffung einer einheitlichen Informationsgrundlage werden ausgewählte Materialparameter als Indikatoren in Kriteriensteckbriefen erfasst und bewertet (Abbildung 34).

Dieser Arbeitsschritt ist Teil eines umfassenden Qualitätssicherungsprozesses, der neben Materialparametern weitere Indikatoren mit einbezieht. Der Prozess ist im Sinne des PDCA-Zyklus (Plan, Do, Check, Act) ausgestaltet und dient der Formulierung von individuellen Zielen (Plan), der Ausführung (Do), der Überprüfung von Resultaten (Check) sowie der Reaktion auf beobachtete Entwicklungen (Act).

In der Phase **Plan** wird davon ausgegangen, dass eine existierende Instandhaltungsstrategie in einem kurz- bis mittelfristigen Maßnahmenplan umzusetzen ist. Auf Basis vorhandener Informationen wird auf der strategischen Ebene eine optimale Variante gesucht und mit der Planung angrenzender Verwaltungsbereiche der unterschiedlichen Verkehrssysteme in Einklang gebracht.

Die geplanten Maßnahmen werden im Prozessschritt **Do** ausgeführt. Hierbei wird großer Wert auf eine vorausschauende und nachhaltige Ausführung gelegt. Deshalb enthält die Do-Phase neben den üblichen Schritten Ausführungsplanung und Ausführung explizit die Schritte Ursachenanalyse, Bereitstellung von Ausweichmöglichkeiten und Qualitätskontrolle.

Der Prozessschritt **Check** umfasst die Datenerfassung, -haltung und Bewertung auf Objekt- und Netzebene. Kernstück des Arbeitsschritts ist die Erfassung und Auswertung laboranalytischer Untersuchungen. Zur Strategiefindung in der Instandhaltung auf Objektebene werden die Ergebnisse der Analytik anhand der in Kriterien formulierten Indikatoren bewertet und durch weitere Kriterien angereichert. Die Er-

gebnisse der laufenden Bauwerksüberwachung gehen mit den sonstigen Daten, die zum Bauwerk vorgehalten werden, in die Datenhaltung ein.

Auf Basis der erhobenen Daten, der festgelegten Netzstrategie und sonstigen Informationen erfolgt zum Abschluss einer Periode eine Bewertung auf Netzebene, die überprüft, ob die in der Phase **Plan** angestrebten Verbesserungen erreicht wurden.

In der **Act**-Phase des PDCA-Zyklus wird auf Basis der Objekt- und Netzbewertung die vorhandene netzweite Strategie angepasst. Zu diesem Zweck werden anhand der Objekt- und Netzbewertungen Prioritäten im Handlungsbedarf festgestellt. Unter der Randbedingung, dass Sicherheit sonstige Belange schlägt, erfolgt eine Auswahl der effektivsten Projekte gemäß der angepassten Strategie.

6.4 Nutzen

Der Nutzen wird sowohl für die Baulastträger, als auch für die Nutzer der Verkehrsinfrastrukturen und die Gesellschaft als Ganzes darin bestehen, dass mithilfe eines verkehrsträgerübergreifenden indikatorgestützten LZM die Leistungsfähigkeit und die nachhaltige Entwicklung der Verkehrsinfrastruktursysteme besser gewährleistet, gesteuert und ggf. verbessert werden können.

Es wird damit möglich, Entscheidungen, die auf vergleichbaren Kriterien basieren, transparent zu machen und den gesamten Lebenszyklus (Planung, Bau, Betrieb, Ersatz) einzubeziehen. Die Verantwortlichen werden damit unterstützt Entscheidungen schnell, zielgerichtet und nachvollziehbar herbeizuführen.

Der Wunsch bzw. das Ziel, die Verkehrsfunktionen verkehrsträgerunabhängig bzw. -übergreifend gewährleisten zu können, führt zwangsläufig zu Fragen der Priorisierung inklusive der damit verbundenen Finanzmittel. Voraussetzung für eine Beantwortung ist eine Vergleichbarkeit von Entscheidungen, die nur ein solches übergreifendes Konzept liefern kann. Die Entwicklung eines solchen Systems erfordert als Eingangsgrößen die Parameter (Konstruktionen, Schäden, Verhalten, ...) der unterschiedlichen Infrastrukturelemente. Für eine Bereitstellung dieser Informa-



Abbildung 34: PDCA-Zyklus für ein verkehrsträgerübergreifendes Lebenszyklusmanagement.

tionen von und die Verbreitung der Ergebnisse bei den unterschiedlichen Verkehrsträgern ist eine Organisationsform wie das BMVI-Expertennetzwerk prädestiniert.

Das entwickelte Lebenszyklusmanagement richtet sich in erster Linie an die drei Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Aufgrund des allgemeinen Aufbaues (PDCA-Zyklus) lässt es sich darüber hinaus auch sehr gut

auf andere Problemstellungen übertragen, bei denen es um bestimmte Eigenschaften geht, die sich mit der Zeit und durch unterschiedliche Einflüsse verändern können und somit zu Handlungsnotwendigkeiten führen, die dann wiederum als neue Eingangsparameter dienen können (kontinuierlicher Verbesserungsprozess). Somit ist das entwickelte Lebenszyklusmanagement vom Grundsatz her von allen beteiligten Institutionen anwendbar.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Vernetzung und deren Folgen

Es hat sich gezeigt, dass das grundsätzliche Konzept der verkehrsträger- und behördenübergreifenden Zusammenarbeit zur Erarbeitung von gemeinsamen Lösungsansätzen zur Verbesserung der Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastrukturen sehr gute Ergebnisse liefern kann. Die fachlichen Ergebnisse und Erkenntnisse sind in den jeweiligen (Teil-) Projekten beschrieben.

Den wesentlichen neuen Gewinn erzielt das Netzwerk aus der Tatsache, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der unterschiedlichen Behörden, Abteilungen und Fachrichtungen gelernt haben, an größeren Projekten vernetzt zu arbeiten. Dadurch wird es in Zukunft möglich sein, Projekte von der ersten Idee an zusammen mit Wissenschaftlerinnen/Wissenschaftlern anderer Behörden so zu konzipieren und zu bearbeiten, dass die jeweiligen Interessen und fachlichen Belange bestmöglich berücksichtigt werden und zu einer Erhöhung des Mehrwertes und einer Effizienzsteigerung beitragen können. Zudem sind die Mitarbeiter des BMVI-Expertenetzwerks gleichzeitig Ansprechpartner und Multiplikatoren für das Stammpersonal der beteiligten Behörden und verbreiten somit verkehrsträgerübergreifendes Fachwissen schnell und zielgerichtet auch über die eigentliche Forschung des BMVI-Expertenetzwerks hinaus.

Dabei ist zu bedenken, dass alle beteiligten Wissenschaftlerinnen/Wissenschaftler in den jeweiligen Behörden angestellt sind und neben dem Expertenetzwerk den Abläufen und Strukturen dieser Behörden unterliegen. Das bedeutet zum einen, dass zielführend Ergebnisse nur erarbeitet werden können, wenn auch Stammpersonal als Verbindungsglied in begrenztem Umfang sein Fachwissen und seine Erfahrungen einbringt. Zum anderen setzt die bisher vorhandene Struktur des BMVI-Expertenetzwerks sowohl in den beteiligten Behörden als auch im BMVI-Expertenetzwerk selbst ein hohes Maß an Flexibilität und gegenseitiger Toleranz voraus, um gute Ergebnisse liefern zu können.

Langfristig wird ein wichtiges Kriterium für den Fortbestand des BMVI-Expertenetzwerks neben der fachlichen Anpassungsfähigkeit sein, wie es gelingt, diese zwischen den Behörden existierende Institution "BMVI-Expertenetzwerk" vonseiten der Behörden dauerhaft zu unterstützen.

7.2 Verwertung der Ergebnisse

Eine Beschreibung der möglichen Verwertung der jeweiligen Projektergebnisse erfolgt unter "Nutzen" in den jeweiligen Projektkapiteln. An dieser Stelle wird grundsätzlich auf zusätzliche Verwertungsmöglichkeiten eingegangen.

Die Ergebnisse des Themenfeldes 3 sind für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, die beteiligten Behörden und die Nutzer (DB Netz AG, Straßenbauverwaltungen der Länder, Autobahn GmbH/Fernstraßenbundesamt, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung) von großer Bedeutung. Dies erfolgt insbesondere vor dem Hintergrund der Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Verkehre und der Funktionsfähigkeit der Verkehrssysteme.

Schwerpunkt der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks von 2020 bis 2025 ist es, die spätere Nutzung der Forschungsergebnisse weiter in die Praxis zu integrieren. Um dies zu erreichen und potenzielle weitere Anwender sowohl aufseiten der Baulastträger als auch aufseiten der von den Baulastträgern beauftragten Dienstleister zu unterstützen, werden die Ergebnisse in für die Praxis anwendbare Formen gebracht und z. B. in Regelwerke aus dem Geschäftsbereich des BMVI, aber auch relevanter Akteure außerhalb des Geschäftsbereichs des BMVI eingebracht bzw. überführt.

Neben der Diskussion und Verwendung der Forschungsergebnisse in den direkt im Expertenetzwerk beteiligten Behörden und Organisationen bzw. bei deren direkten Anwendern werden diese auch Dritten zugänglich gemacht und mit diesen diskutiert (Anwenderdialog). Dafür werden diese u. a. in nationalen und internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht, auf Konferenzen präsentiert und in die Arbeiten nationaler, europäischer sowie internationaler Gremien (z. B. PIARC, PIANC, TRB) eingebracht und diskutiert.

Damit werden ein intensiver wissenschaftlicher Austausch und eine frühe anschließende Anwendung der Erkenntnisse in der Praxis ermöglicht. Darüber hinaus ergeben sich aufgrund der spezifischen Themenstellungen der einzelnen Kernthemen weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Zum Beispiel stellt die Forschung im SPT 301 ein wichtiges Bindeglied zwischen der hauptsächlich im universitären Bereich angesiedelten Grundlagenforschung sowie der Geräte-/Verfahrensentwicklung auf der einen und der praktischen Anwendung auf der anderen Seite dar. Dementsprechend zielen die Verwertungsstrategien in erster Linie darauf ab, potenzielle Anwender (Baulasträger bzw. Dienstleister) beim Einsatz innovativer Methoden zur Zustandserfassung zu unterstützen. Dies geschieht, indem die Ergebnisse der Forschung aufbereitet und in Form von Leitfäden, Best-Practice-Beispielen und anwendungsbezogenen Arbeitshilfen (u. a. prüfaufgabenorientierte webbasierte Kataloge für ZfP- und Monitoring-Anwendungen) zur Verfügung gestellt werden.

Bezüglich der SPT 302 und 303 wird der Nutzen der Anwender in entscheidungsunterstützenden Werkzeugen liegen, die Entscheidungsprozesse vereinfachen und dadurch beschleunigen werden. Handlungshilfen werden in Form von Leitfäden, Demonstratoren oder softwaregestützten Anwendungen (z. B. webbasierte Handlungshilfen zur Optimierung der Resilienz von Verkehrsinfrastrukturen, Module eines LZM) zur Verfügung gestellt und im Dialog mit den Nutzern zielgruppengerecht angepasst. Durch ihre Praxisnähe füllen die Forschungsarbeiten zu Zuverlässigkeit, Risiko, Resilienz und LZM in Verbindung mit Verkehrsinfrastrukturen eine Lücke im wissenschaftlichen Diskurs, da der universitären Forschung oftmals eine solide Datengrundlage fehlt.

Die Erarbeitung und Weiterentwicklung von Baumaßnahmen unter Betrieb (SPT 304) optimiert die Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit der bestehenden Verkehrsnetze während der Durchführung von Ersatz- und Erhaltungsmaßnahmen. Die Verwendung von standardisierten Bauwerken trägt den begrenzten Ressourcen (Zeit und Haushaltsmitteln) Rechnung. Weitere Verwertungsmöglichkeiten werden sich im Rahmen der Arbeiten und Diskussionen ergeben (Anwenderdialog).

7.3 Offene Forschungsfragen

Die Thematik "Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen erhöhen" ist so weitreichend, dass sicherlich nicht alle Aspekte adressiert und erschöpfend bearbeitet werden können.

Durch die Einteilung in die vier Schwerpunktthemen ist aber sichergestellt, dass die wesentlichen Einflussbereiche erkannt und berücksichtigt werden. Die als wesentlich und geeignet für eine Bearbeitung im BMVI-Expertenetzwerk erachteten Fragestellungen sind in die Grobkonzeption für die zweite Phase eingeflossen. Allerdings erlaubt es die Struktur des BMVI-Expertenetzwerks, insbesondere mit dem geplanten Anwenderdialog, so offen für weitere wichtige Fragestellungen zu sein, dass begleitend neu aufkommende Fragestellungen beachtet und diskutiert werden können. Je nach Relevanz können dann Möglichkeiten zu Bearbeitung dieser Fragestellungen im Netzwerk selbst oder in den beteiligten Behörden gefunden werden.

7.4 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase ab 2020

In der zweiten Arbeitsphase von 2020 bis 2025 stehen die Arbeiten im Themenfeld 3 gemäß der Roadmap des Themenfeldes 3 in der Forschungsstrategie (BMVI-Expertenetzwerk 2018) unter dem Begriff der "Integration" und zwar in mehrfacher Hinsicht. So werden die Arbeiten der einzelnen Mitarbeitenden der Behörden verstärkt in die Forschungsarbeiten der anderen Behörden integriert, nachdem in der ersten Phase fachliche Grundlagen erarbeitet wurden. Darüber hinaus finden sich Forschungsthemen auch in den Aufgabenstellungen der Fachreferate der Behörden wieder und fügen sich ergänzend in diese ein. Zudem sollen verstärkt die Anwender in einem Dialog eingebunden werden, indem ihnen Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung auf unterschiedlichen Ebenen bereitgestellt werden.

U. a. folgende Ziele des BMVI-Expertenetzwerks werden in den einzelnen Schwerpunktthemen adressiert:

- Sicherstellung der Mobilität, indem mittels entsprechender Risikomanagement- und Resilienzbewertungssysteme die Verkehrswege verfügbar gehalten werden (SPT 302 und 303), Wandel vom reaktiven zum prädiktiven Handeln (SPT 301) und Beschleunigung von (Bau-) Maßnahmen (SPT 304),
- Erhöhung der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme durch Verbesserung der Verfügbarkeit.

Ferner integriert die Forschungsstrategie des BMVI-Expertenetzwerks übergeordnete Strategien und Instrumente, wie z. B. die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel und den Bundesverkehrswegeplan.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden vier Schwerpunktthemen (SPT) definiert, die einerseits eine Kontinuität zur ersten Phase darstellen (SPT 301 "Zustandserfassung und -bewertung", SPT 302 "Zuverlässigkeit, Risiko und Resilienz" und SPT 304 "Optimiertes Bauen unter Verkehr") und andererseits eine Erweiterung der Zielrichtung durch das

neue Schwerpunktthema SPT 303 "Lebenszyklusmanagement (LZM)" ermöglichen.

Durch die Verknüpfung der Schwerpunktthemen untereinander wird gewährleistet, dass die richtigen Informationen auf Basis von genau definierten Anforderungen zur Verfügung gestellt werden können. Ferner finden Verknüpfungen mit anderen Themenfeldern statt (z. B. Themenfeld 1 bezüglich Klimawandel und extremen Wetterereignissen und Themenfeld 4 bezüglich Building Information Modeling).

8 Literatur

Akkermann, J., Weiler, S. (2018) Robustheit von Stahlbetonschleusen. FuE-Abschlussbericht, Hochschule Karlsruhe, Institut für Angewandte Forschung. Unveröffentlicht.

Akkermann, J., Weiler, S., Bödefeld, J., Meier, J. (2018) Die Bauwerksrobustheit im Kontext eines risikobasierten Erhaltungsmanagements. In: Beton und Stahlbeton 113(10), 716–726.

Amann, K.-U., Arnold, E., Sawodny, O. (2016) Online real-time scheduled model predictive feedforward control for impounded river reaches applied to the Moselle river. In: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Fort Worth, TX, USA: IEEE, 1276–1281.

Anastasiadou, K. (2019) Quantifizierung und Prognose der Verfügbarkeit und Sicherheit von Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen. Abschlussbericht zur 1. Förderphase des BMVI-Expertennetzwerk. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, In Vorbereitung.

Baldauf, M., Gebhardt, C., Theis, S., Ritter, B., Schraff, C. (2018) Beschreibung des operationellen Kurzzeitvorhersagemodells COSMO-D2 und COSMO-D2-EPS und seiner Ausgabe in die Datenbanken des DWD, v1.0, 2018 Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

Belzner, F., Schmitt-Heiderich, P. (2012) Einfluss urbaner Einzugsgebiete auf die Abfluss- und Stauzielregelung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Innovation mit Tradition: Hydraulischer Entwurf und Betrieb von Wasserbauwerken. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 93–98.

BinSchLV (2010) Verordnung über die Lade- und Löschzeiten sowie das Liegegeld in der Binnenschifffahrt (Lade- und Löschzeitenverordnung). BinSchLV.

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

BMVI (2011) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Ausgabe 05/2011 und 1. Ergänzung 04/2015, Berlin.

BMVI-Expertennetzwerk (2018) Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn.

Bowles, J.B., Peláez, C.E. (1995) Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. In: Reliability Engineering & System Safety 50(2), 203–213.

Brans, J.P., Vincke, P. (1985) A preference ranking organisation method: The PROMETHEE method for MCDM. In: Management Science 31(6), 647–656.

Brüggemann, M. (2010) Langjährige Erfahrungen des Tragverhaltens von Bewehrte-Erde-Brückenwiderlagern. In: Bau-technik 87(2), 61–72.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Masanobu, S., Tierney, K., Wallace, W.A., Von Winterfeldt, D. (2003) A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. In: Earthquake spectra, 19(4), 733–752.

Bundesanstalt für Wasserbau (2017) Instandsetzung von Schleusen unter Betrieb. In: Conference Proceedings zum Kolloquium am 17. und 18. Oktober 2017.

Cramer, M., Haala, N., Laupheimer D., Mandlbürger, G., Havel, P. (2018) Ultra-high precision UAV-based LIDAR and dense image matching. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 42(1), 115–120.

DB Bahnbau Gruppe GmbH (2016) Verschub und Synchronhub, Dresden, Bahnbau Gruppe Brückenwerkstatt.

- DB Netz AG (2016) Richtlinie 406 – Fahren und Bauen, Frankfurt.
- DB Netz AG (2018) Richtlinie 804 – Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instandhalten, Frankfurt.
- DB Netze (2018) Richtlinie 402.0305. Baubedingte Fahrplanregelungen abstimmen und kommunizieren, Frankfurt.
- DBV (2014) DBV-Merkblatt "Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen", Eigenverlag, Berlin.
- DBV (2015) DBV-Merkblatt "Betondeckung und Bewehrung – Sicherstellung der Betondeckung beim Entwerfen, Herstellen und Einbauen der Bewehrung sowie des Betons nach Eurocode 2", Eigenverlag, Berlin.
- DBV(2018) Merkblatt "Monitoring: Planung, Vergabe und Betrieb", Eigenverlag, Berlin.
- Destatis (2017) Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt 2016. In: Fachserie 8 Reihe 4. Hg. v. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Deublein, M., Roth, F., Bruns, F., Zulauf, C. (2018) Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen. Schlussbericht zu FE-Nr. 89.0330/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht.
- Denhard, M. (2020) Adaptive neighbourhoods based on the consistency of time lagged ensemble forecasts, in preparation.
- DIN EN 1097-1:2011-04 (2011), Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß (Micro-Deval), Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN 1076:1999-11 (1999) Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN EN 1991-2:2010-12 (2010) Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01 (2011) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 1992-1-1/NA2013-04 (2013) Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 1992-2:2010-12 (2010) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN ISO 12944, Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme (Teil 1 bis 9), Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN ISO 4628, Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen (Teil 1 bis 10), Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Finger, J., Fischer, K., Hasenstein, S., Rinder, T., Stolz, A. (2018) Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen. Schlussbericht zu FE-Nr. 15.0627/2016/ARB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht.
- Friese, M. (2018) Decommissioned Bridges: Ideal Test Objects for Demonstrating the Capabilities of Non-Destructive Testing Methods. In: Proceedings of the SMT&NDTCE 2018, 27.-29.08.2018, New Brunswick, USA.

- Fritz, E., Neumann, H., Scherrans, T., Richter, F., Györkö, G. (2019) Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels. Los 2 – Energie und Sicherheit und Los 3 – Fahrzeuge. Schlussbericht zu EBA FB 2018-08.08b, Eisenbahn-Bundesamt, Bonn.
- Galiazzo, M. (2018) Streuung des Scherverhaltens von Beton mit gleichmäßigen Scherflächen. Bachelorarbeit. KIT, Karlsruhe.
- GBB (2010) Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen. BAW Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau.
- Geißler, K., Kraus, J. K., Freundt, U., Böning, S. (2018) Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2. Schlussbericht zu FE 15.0629/2016/FRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, In Vorbereitung.
- Gerdes, A, Lennerts, K., Lehardt, A., Seiler, D., Bombeck, A., (2019) Entwicklung eines indikatorgestützten Lebenszyklusmanagements für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur, Schlussbericht zu FE 69.0002/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, In Vorbereitung.
- Hajdin, R., Novak, B., Büchel, B., Bunz, M. (2018) Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Konzeption und fachliche Lösungen, Schlussbericht zu FE 15.0628/2016/LRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht.
- Hajdin, R., Fastrich, A. (2019) Zuverlässigkeitsbasierte Bauwerksprüfung – Feinkonzept, Entwurf Schlussbericht zu FE 89.0333/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht.
- Hasofer, A.M., Lind, N.C. (1974) An exact and invariant first-order reliability format. In: Journal of Engineering Mechanics 100 (1), S. 111–121.
- Helmerich, R., Bien, J., P. Cruz (2007) A guideline for Inspection and Condition Assessment including the NDT toolbox, In: Proceedings of Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and longer lives. Wrocław, 93-104.
- Hessen Mobil (2013) Handbuch Hessen Mobil. Richtzeichnung He-Lsw 07: Lärmschutzwand - Verankerung auf Bauwerk LSW H>4,50m, Wiesbaden.
- Holst, R., Friese, M. (2016) Innovative Zugangstechniken und digitale Bildauswertung für die Bauwerksprüfung im Zuge von Straßen. In: DGZfP (Hrsg.): Berichtsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2016 – Vortrag 8, Berlin 2016.
- Höffgen, J. P. et. al. (2018) Shear-friction behavior of non-reinforced concrete joints at low normal stresses. In: Ludwig, H.-M. (Hg.): Tagungsbericht der 20. Internationalen Baustofftagung, Bauhaus-Universität Weimar, S. 1025-1032.
- Intrapolan Consult GmbH und BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH (2007) Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Schlussbericht zu FE 96.0857/2005. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- Intrapolan Consult GmbH und BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH (2014) Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht zu FE 96.0981/2011. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- JGCM 100 (2008) Joint Committee for Guides in Metrology: JCGM 100: Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Technical Report, JCGM, 2008.
- Kasper, J., Simons, F. (2019) FuE-Abschlussbericht Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. In Vorbereitung.

- Kasper, J., Pranner, G., Simons, F., Denhard, M., Thorenz, C. (2018) Enhancing automated water level control at navigable waterways by high-resolution weather predictions. In: G. La Loggia, G. Freni, V. Puleo, M. De Marchis (Hg.): EpiC Series in Engineering 3. Manchester, UK: EasyChair, S. 1022–1029.
- Linß, G. (2016) Qualitätssicherung – Technische Zuverlässigkeit, Carl Hanser Verlag, München.
- Marx, S., Gebauer, D. (2019) Kategorisierung und Bewertung von Rissen bei Stahlbetonbauteilen. Abschlussbericht zum EBA-Projekt 11vb/018-0099#018. Eisenbahn-Bundesamt, Bonn, In Vorbereitung.
- Metropolis, N.; Ulam, S. (1949) The Monte Carlo Method. In: Journal of the American Statistical Association, 44 (247), S. 335–341.
- Morgenthal, G.; Rodehorst, V., Hallermann, R. (2019a) Unterstützung der Prüfung gemäß DIN 1076 durch (halb-) automatisierte Bildauswertung u.a. mittels UAV (unmanned aerial vehicles). Schlussbericht zu FE 89.0334/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, In Vorbereitung.
- Morgenthal, G., Hallermann, N., Kersten, J., Taraben, J., Debus, P., Helmrich, M., Rodehorst, V. (2019b) Framework for Automated UAS-based Structural Condition Assessment of Bridges. In: Automation in Construction 97, S. 77–95.
- Müller, C., Bertovic, M., Pavlovic, M., Kanzler, D., Ewert, U., Pitkänen, J., Ronneteg, U. (2013) Paradigm Shift in the Holistic Evaluation of the Reliability of NDE Systems. In: Materials Testing, 55(4), 261–269.
- Nyobeu, F., Panenka, A. (2018) Selection Strategy of Failure Modes for Repair and Maintenance Activities. In: PIANC (Hg.): Proceedings. PIANC-World Congress. Panama City. PIANC.
- Panenka, A., Nyobeu, F. (2018a) Condition assessment based on results of qualitative risk analyses. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering. Ghent, Belgien, 3054–3060.
- Panenka, A., Nyobeu, F. (2018b) Maintaining an aging infrastructure based on a fuzzy risk assessment. In: Proceedings of the 6th ISRERM, Singapur, 833–838.
- Peters, M. L.; Zelewski, S. (2007) TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium 36(1), 9–15.
- ProgTrans AG (2007) Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Schlussbericht zu FE 26.0185/2006. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Berlin.
- Ralbovsky, M., Prammer, D., Lachinger, S., Vorwagner, A. (2019) Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Brücken. Schlussbericht zu FE-Nr. 15.0625/2016/LRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- Reinert, D., Prill, F., Frank, H., Denhard, M., Zängl, G. (2019) Database Reference Manual for ICON and ICON-EPS, v1.2.11, Research and Development, DWD, Offenbach.
- Rommelfanger, H.J.; Eickemeier, S.H. (2002) Entscheidungstheorie. Klassische Konzepte und Fuzzy-Erweiterungen. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schnellenbach-Held, M., Welsch, T., Romanski, L. (2018) Anpassungsvermögen von Brückenbauwerken an geänderte Nutzungsbedingungen – konzeptionelle Ansätze zur Optimierung. Schlussbericht zu 15.0624/2016/ARB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht.
- Schubert, M., Faber, M. H., Betz, W., Niemeier, E., Ziegler, D., Majka, M., Straub, D., Walther, C. (2019) Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen - Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen. Schlussbericht zu FE 89.0331/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, In Vorbereitung.

Siefer, T., Schütze, C., Strohbach, M. (2019) Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels. Los 1 – Infrastruktur. Schlussbericht zu EBA FB 2018-08a, Eisenbahn-Bundesamt, Bonn.

Siegert, C., Holst, A., Empelmann, M., Budelmann, H. (2015) Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Schlussbericht zu FE 15.044/2011/LRB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Heft 118, Bergisch Gladbach.

Sorgatz, J.; Kayser, J., Schüttrumpf, H. (2018) Expert interviews in long-term damage analysis for bottom and bank revetments along German inland waterways. In: Caspeele, R.; Taerwe, L.; Fragopol, D. M. Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium.

Sorgatz, J.; Kayser, J., Schüttrumpf, H. (2019) Armor stone displacements at German inland waterways: An approach to schedule inspections coupling reliability analysis with Markov chains. 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk, Taipei, Taiwan.

Spörel, F. (2019) Influence of concrete properties on the resistance against hydroabrasive impact. In: Proceedings of the fib Symposium 2019 Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures, S. 1979-1986.

Spörel, F. (2018) Hydroabrasive exposure and concrete resistance against abrasion erosion. In: ACI SP-326 Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS 2018) – Proceedings 2nd International Workshop, S. 75.1–75.10.

Spörel, F., Helbig, U., Westendarp, A., Stamm, J. (2015) Hydroabrasionsbeanspruchung von Verkehrswasserbauwerken. In: Bautechnik 92(8), 538–548.

Stamm, J. und Helbig, U. (2016) Wissenschaftliche Bearbeitung der Einwirkseite hydroabrasiver Belastungen auf Wasserbauwerke – research report 2014/14, Technische Universität Dresden.

Taffe, A., Wiese, J. (2019) Erfassung, Beschreibung, Bewertung und Verknüpfung der ZfPBau-Verfahren und Techniken für Ingenieurbauwerke bei Straße und Schiene. ZfPBau-Verfahrenskatalog, Los 2 Beton und Los 3 Mauerwerk. EBA Forschungsbericht Az. 11Vb/025-0099#014, Eisenbahn-Bundesamt, Bonn.

Taffe, A., Vonk, S. (2019) Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken – Radar praxisnah. Schlussbericht zu FE 15.0534/2011/GRB, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. In Vorbereitung.

Thoma, K. (Hrsg) (2014) "Resilience-by-Design": Strategie für die technologischen Zukunftsthemen, acatech Studie, München.

Wengrzik, D. (2019) Experimentelle Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Rahmenscherversuchen auf reale Wasserbauwerke. Masterarbeit. KIT, Karlsruhe.

Wiese, J., Reinhardt, M., Taffe, A., Friese, M. (2020) "Der neue ZfPBau-Katalog". In: DGZfP (Hrsg.): Tagungsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2020. In Vorbereitung.

Winkler, J., Denhard, M., Bernhard, A. (2019) Krylov Methods for Adjoint-Free Singular Vector Based Perturbations in Dynamical Systems, submitted to Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

Wirker, A., Donner, R., Bösche, T., Flederer, H. (2019) Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken, Zwischenbericht zu FE 15.059/2014/RRB. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Unveröffentlicht.

Anhang

Veröffentlichungen aus TF3

Allgemein zum Themenfeld 3

Holst, R. (2019) German Network of Experts. Transport Research Board 98th Annual Meeting, Committee „Bridge Management, 13.-17. Jan. 2019, Washington DC, USA.

Holst, R. (2018) Vorstellung des BMVI-Expertennetzwerkes und die von ihm betreuten eisenbahnspezifischen Forschungsprojekte, Tagungsband des 5. Symposium Eisenbahnbrücken und KIB, 22.-23. Feb. 2018, VDEI, München.

Holst, R. (2018) Intermodal research to increase the reliability of transport infrastructures. Proceeding of the 9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 9-13. July 2018, Melbourne, IABMAS, Australia.

Holst, R. (2017) UAS as Part of Regular Bridge Inspection for Special Inspection Problems, TRB 96th Annual Meeting, 12. Jan. 2017, TRB, Washington DC, USA.

Holst, R. (2017) Erhaltungsmanagement Brücken – Notwendigkeit und aktueller Stand "Bundesfernstraßen", Seminar "Systematische Bauwerkserhaltung" der FGVSVI Rheinland-Pfalz/Saarland, 16. März 2017, FGVSVI Rheinland-Pfalz/Saarland, Koblenz.

Holst, R. (2017) BMVI-Expertennetzwerk WISSEN – KÖNNEN - HANDELN; Themenfeld 3, Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastrukturen erhöhen, Tagungsband der 19. EMS-DACH-Tagung, 4. Mai 2017, EMS-DACH-Tagung, Regensburg.

Holst, R. (2016) Innovative Zugangstechniken und digitale Bildauswertung für die Bauwerksprüfung im Zuge von Straßen, Tagungsband der Fachtagung "Bauwerksdiagnose", 25.-26. Feb. 2016, BAM, Berlin.

Holst, R. (2016) Einsatz von unbemannten Flugsystemen an Brücken – Konzeption und erste Erfahrungen. Tagungsband des 2. Brückenkolloquium „Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung“, 21.-22. Juni 2016, TA Esslingen, Esslingen.

Veröffentlichungen im SPT 301

Algernon, D., Walther, A., Denzel, W., Ebsen, B., Feistkorn, S., Friese M., Große, C. U., Kathage, S., Keßler, S., Köpp, C., Krause, M., Maack, S., Schickert, M., Taffe, A., Wilcke, M., Timoveev, J., Wolf, J. (2018) Qualitätssicherung und Validierung der Anwendung zerstörungsfreier Prüfungen von Stahlbetonbauteilen im Bauwesen. DGZfP Jahrestagung 2018. Leipzig.

Algernon, D., Arndt, R. W., Denzel, W., Ebsen, B., Feistkorn, S., Friese, M., Große, C. U., Kathage, S., Keßler, S., Köpp, C., Küttenbaum, S., Lohse, C., Maack, S., Niederleithinger, E., Schickert, M., Schröder, G., Taffe, A., Timofeev, J., Walther, A., Wilcke, M., Wolf, J., Wöstmann, J. (2018) NDT Procedures in Relation to Quality Assurance and Validation of Non destructive Testing, In: Civil Engineering. Proceedings of the SMT&NDTCE 2018, 27.-29.08.2018, New Brunswick, USA.

Algernon, D., Arndt, R. W., Denzel, W., Ebsen, B., Feistkorn, S., Friese, M., Große, C. U., Kathage, S., Keßler, S., Köpp, C., Küttenbaum, S., Lohse, C., Maack, S., Niederleithinger, E., Schickert, M., Schröder, G., Taffe, A., Timofeev, J., Walther, A., Wilcke, M., Wolf, J., Wöstmann, J. (2018) Test Specimen Concepts in Regard to Quality Assurance and Validation of Non destructive Testing, In: Civil Engineering. Proceedings of the SMT&NDTCE 2018, 27.-29.08.2018, New Brunswick, USA.

Algernon, D., Arndt, R. W., Denzel, W., Ebsen, B., Feistkorn, S., Friese, F., Grosse, C. U., Kathage, S., Kessler, S., Köpp, C., Küttenbaum, S., Lohse, C., Maack, S., Niederleithinger, E., Schickert, M., Schröder, G., Taffe, A., Timofeev, J., Walther, A., Wilcke, M., Wolf, J., Wöstmann, J. (2019) Quality Assurance and Validation of Non destructive Testing (NDT) of Concrete Structures in Nuclear Power Plants. In: NDE In Nuclear 2019, Charlotte, NC, USA.

Cramer, M., Haala, N., Laupheimer, D., Mandlbürger, G., Havel, O. (2018) Ultra-High precision UAV-based LiDAR and dense image matching. ISPRS TC I Midterm Symposium – Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications. 10–12 Oktober 2018, Karlsruhe, Germany.

Cramer, M., Mandlbürger, G., Laupheimer, D., Haala, N., Havel, P. (2019) Potenzial ultrahochauflösender und -genauer UAV-basierter 3D-Datenerfassung. 2. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich - Publikationen der DGPF, Band 28, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Wien, Österreich.

Dabringhaus S., Hindersmann I. (2017) Smart Bridge – Way into practice. In: Proceedings of Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures 2017, Zürich, Switzerland.

DGZfP-Fachausschuss Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (Hrsg.), Unterausschuss Ultraschallprüfung (2019) Merkblatt B04 – Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (Autoren: Schickert, M., Flohrer, C., Friese, M., Glaubitt, A., Große, C.U., Hasenstab, A., Krause, M., Krüger, M., Taffe, A., Willmes, M., Mitarbeit: Köhler, B., Mayer, K.), Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin.

DGZfP-Fachausschuss Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (Hrsg.), Unterausschuss Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung (2017) Positionspapier Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung (Autoren: Kurz, J., Ebsen, B., Fischer, C., Flohrer, C., Friese, M., Hillemeier, B., Knapp, S., Krause, J.-J., Sawade, G., Szielasko, K., Taffe, A., Walther, A., Wichmann, H.-J.), Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin.

Feistkorn, S., Algernon, D., Arndt, R.W., Berger, J., Friese, M., Garrecht, H., Große, C.U., Mähner, D., Niederleithinger, E., Schickert, M., Taffe, A., Walther, A., Wilcke, M., Zoëga, A. (2019) Non destructive Testing of Concrete Structures: Development of Standards for Training and Education. In: NDE In Nuclear 2019, Charlotte, NC, USA.

Friese, M. (2018) Erprobung und Demonstration von ZfPBau-Verfahren an Abrissbauwerken. In: DGZfP (Hrsg.): Berichtsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2018 – Poster 10, Berlin.

Friese, M. (2018) Erprobung und Demonstration zerstörungsfreier Prüfverfahren an Abrissbauwerken. In: TAE (Hrsg.): Tagungsband des 3. Brückenkolloquiums "Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken", 19.-20. Juni 2018, Ostfildern.

Friese, M. (2018) Decommissioned Bridges: Ideal Test Objects for Demonstrating the Capabilities of Non-Destructive Testing Methods. In: Proceedings of the SMT&NDTCE 2018, 27.-29.08.2018, New Brunswick, USA.

Galiazzo, M. (2018) Streuung des Scherverhaltens von Beton mit gleichmäßigen Scherflächen. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Hasenstab, A., Friese, M. (2018) Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Bauwerksprüfung im Rahmen der OSA bei der Brückenprüfung. In: TAE (Hrsg.) Tagungsband des 3. Brückenkolloquiums "Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken", 19.-20. Juni 2018, Ostfildern.

- Hindersmann, I. (2019) Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen. Abschlussbericht zur 1. Förderphase des BMVI-Expertenetzwerk. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, Unveröffentlicht.
- Höffgen, J. P. et. al. (2018) Shearfriction behavior of nonreinforced concrete joints at low normal stresses. In: Ludwig, H.-M. (Hg.): Tagungsbericht der 20. Internationalen Baustofftagung, Bauhaus-Universität Weimar, S. 1025-1032, Weimar.
- Höffgen, J. (2016) Identifikation materialtechnologischer Einflussgrößen auf das Tragverhalten von Arbeitsfugen im Betonbau. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Jung, P. (2017) Einfluss des Versuchsaufbaus auf die ermittelten Betonkenngrößen in Rahmenscherversuchen. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Klessing, V. (2017) Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinskörnung auf den Hydroabrasionswiderstand von Beton. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Malarics-Pfaff, V., Höffgen, J.P., Reschke, T., Fleischer, H. (2019) Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. In Vorbereitung.
- Markus, S. (2019) Bestimmung relevanter Rauheitskenngrößen von Betonoberflächen. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Mohs, M. (2016) Untersuchung des Zugtragverhaltens von Arbeitsfugen im Betonbau mittels der Spaltzugprüfung. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Reinhardt, M., Hindersmann I., Friese, M. (2018) Digitale Unterstützung der Zustandserfassung von Ingenieurbauwerken. Verkehr und Infrastruktur 2018 – 1. Tagung des BMVI-Expertenetzwerks, 14. Juni 2018, BMVI, Berlin.
- Reschke T., Malárics-Pfaff, V., Fleischer H. (2018) Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken Reibungsbeiwert in Arbeits- und Betonierfugen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 93/2018. Karlsruhe.
- Reschke T., Malárics-Pfaff, V., Fleischer H. (2019) Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken Reibungsbeiwert in Arbeits- und Betonierfugen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 12/2019. Karlsruhe.
- Siggelkow, M. (2016) Hydroabrasion an Wehranlagen – Hydronumerische Simulation zum Verständnis der Schädigungsmechanismen. Masterarbeit. Karlsruhe University of Applied Science, Karlsruhe.
- Spörel, F. (2018) Hydroabrasive exposure and concrete resistance against abrasion erosion. ACI SP-326 Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS 2018), In: Proceedings of the 2nd International Workshop, pp. 75.1-75.10.
- Spörel, F. (2019) Influence of concrete properties on the resistance against hydroabrasive impact. In: Proceedings of the fib Symposium 2019 Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures, S. 1979-1986.
- Sonderegger, E. (2019) Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Zugtragverhalten von Arbeitsfugen. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Thomas, L. (2017) Einfluss der Probekörpergeometrie auf die Scherkraftübertragung in gerissenem Beton. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Uhrner, C. (2017) Einfluss von Sieblinien und Eigenschaften von Gesteinskörnung auf den Betonwiderstand gegenüber Hydroabrasion. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Dresden.

Ullrich, S. (2016) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Beurteilung wasserbaulicher Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion. Masterarbeit. Karlsruhe University of Applied Sciences, Karlsruhe.

Wengrzik, D. (2019) Experimentelle Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Rahmenscherversuchen auf reale Wasserbauwerke. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Wiese, J., Reinhardt, M., Taffe, A. und Friese, M. (2020) "Der neue ZfPBau-Katalog". In: DGZfP (Hrsg.): Tagungsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2020. In Vorbereitung.

Veröffentlichungen im SPT 302

Nyobeu, F., Panenka, A. (2019) Fuzzy Risk Evaluation in Failure Mode and Effects Analysis: A Risk-Based Approach for ranking Infrastructure Assets for Maintenance Interventions. In: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (ESREL 2019), 22 - 26 Sept. 2019, Hannover, Germany.

Nyobeu, F., Panenka, A. (2018) Selection Strategy of Failure Modes for Repair and Maintenance Activities. In: Proceedings of the 34th PIANC World Congress, 7 - 11 May 2018, Panama City, Panama.

Panenka, A., Nyobeu F., Schmidt-Bäumler, H., Sorgatz, J., Rabe, R., Reinhardt, M. (2019) Reliability assessment of ageing infrastructures: an interdisciplinary methodology. In: Structure and Infrastructure Engineering (SIE). Tayer & Francis Group, London. Accepted for publication.

Panenka, A., Nyobeu F., Schmidt-Bäumler, H., Sorgatz, J., Rabe, R., Reinhardt, M. (2018) Reliability assessment of infrastructure in Germany: Approaching a holistic concept. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 29.-31.Oct. 2018, Ghent, Belgium. London: Taylor & Francis Group, S. 295–300.

Panenka, A., Nyobeu F. (2018) Condition assessment based on results of qualitative risk analyses. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 29 - 31 Oct. 2018, Ghent, Belgium. London: Taylor & Francis Group, S. 3054–3060.

Panenka, A., Nyobeu, F. (2018) Maintaining an aging infrastructure based on a fuzzy risk assessment methodology. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, 31 May - 1 June 2018, Singapore. S. 833–838.

Panenka, A., Sorgatz, J., Kasper, J. (2018) Understanding risk-driving factors, their indicators and resulting decision criteria: the interdisciplinary approach in Germany. In: Proceedings of the 34th PIANC World Congress, 7 - 11 May 2018, Panama City, Panama.

Panenka, A., Nyobeu, F. (2018) Understanding risk-driving factors, their indicators and resulting decision criteria: the interdisciplinary approach in Germany. In: Proceedings of the 34th PIANC World Congress, 7 -11 May 2018, Panama City, Panama.

Schmidt-Bäumler, H. (2019) Zuverlässigkeitsbasierte Expertensysteme: Risikoklassifikation und Priorisierung von Verkehrswasserbauwerken. Abschlussbericht zur 1. Förderphase des BMVI-Expertennetzwerk. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, Unveröffentlicht.

Schmidt-Bäumler, H. (2018) Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken. Risikobasierte Priorisierung von Verkehrswasserbauwerken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2018. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium). S. 59-60.

Schmidt-Bäumler, H. (2017) Risikoklassifikation von Verkehrswasserbauwerken. Analyse möglicher Konsequenzen nach Versagensereignissen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2017. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium). S. 61-62.

Schmidt-Bäumler, H. (2016) Risikobetrachtungen bei der Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Instandhaltung von Wasserbauwerken. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 75-80.

Schmidt-Bäumler, H. (2016) Risk-based maintenance management system for waterway infrastructures in Germany. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016). Delft, The Netherlands. 16-20 October 2016. London: Taylor & Francis Group, S. 559-566.

Sorgatz, J. (2019) Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung. Erweiterung des Bemessungskonzepts mithilfe von Methoden der Probabilistik. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 02/2019. Karlsruhe.

Sorgatz, J., Kayser, J., Schüttrumpf, H. (2019) Application of reliability analysis and Markov chains to predict inspection intervals of bank revetments in regard to traffic in Germany. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2019), 11-13 Dec. 2019, Taipei, Taiwan, In Review.

Sorgatz, J., Kayser, J.; Schüttrumpf, H. (2018) Expert interviews in long-term damage analysis for bottom and bank revetments along German inland waterways. In: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 Oct. 2018, Ghent, Belgium. CRC Press, S. 749-756.

Sorgatz, J. (2018) Zuverlässigkeitsbasierte Deckwerksbemessung. Erweiterung des deterministischen Bemessungssystems zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in Modell und Eingangsparametern. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 02/2019. Karlsruhe.

Veröffentlichungen im SPT 303

Anastassiadou, K., Holst, R., Kasper, J., Simons, F., Denhard, M., Winkler, J. Holtkämper, M., Reinhardt, M. (2020) Assessing and enhancing resilience to extreme weather for transport infrastructure in Germany. In: Proceedings of the 8th Transport Research Arena TRA 2020, 27-30 April 2020, Helsinki, Finland. In Review.

Anastassiadou, K., Bergerhausen, U., Roth F., Deublein M. (2020) Identification and prioritization of resilience measures for road infrastructures. In: Proceedings of the 8th Transport Research Arena TRA 2020, 27-30 April 2020, Helsinki, Finland. In Review.

Anastassiadou K., Deublein M., Roth F. (2019) Road infrastructure resilience during natural and man-made disasters, In: Proceedings of the 26th World Road Congress, 6-10 Oct. 2019, Abu Dhabi, UAE.

Anastassiadou K., Holst R., Kasper J., Simons F., Denhard M., Winkler J., Holtkämper M., Reinhardt M. (2019) Assessing the availability and safety of transport infrastructure in Germany. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, 23-26 June, 2019, Chania, Greece.

Anastasiadou K., Roth F., Deublein M. (2019) A practice-oriented approach for increasing road infrastructure resilience. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, 23-26 June 2019, Chania, Greece.

Anastasiadou, K. (2018) Resilience of road infrastructure during extreme events. Visit of a Delegation from France, CEREMA-BASSt Workshop, 27. Nov. 2018, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

Anastasiadou K. (2018) Resilience of road infrastructure during extreme events, In: Critical Infrastructure Protection & Resilience Europe - 2018, 2-4 Oct. 2018, The Hague, Netherlands.

Anastasiadou, K., Kaundinya, I., Kammerer, H., Mitsakis, E., Stamos, I. (2018) Assessing the resilience of land transport networks against extreme rainfall events, In: Proceedings of the Transport Research Arena 2018, 16-19 April 2018, Vienna, Austria.

Deublein M., Roth F., Willi C., Anastasiadou K., Bergerhausen U. (2019) Linking science to practice: a pragmatic approach for the assessment of measures to improve the resilience of transportation infrastructure systems. In: Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference 22 - 26 September 2019, Hannover, Germany.

Klose M., Anastasiadou K., Krieger J. (2019) Resilienz der Straßeninfrastruktur – Konzept und Fallstudie. In: Tagungsband des 1. Kolloquium Straßenbau in der Praxis, Technische Akademie Esslingen, 29. Jan. 2019, Ostfildern.

Krieger J., Anastasiadou K., Stolz A. (2019) Road infrastructure resilience during natural and man-made disasters. In: Safety and Security of Bridges and Structures Subcommittee. Transport Research Board 98th – Annual Meeting, 13.-17 January 2019, Washington D.C., USA.

Finger J., Fehling-Kaschek M., Fischer K., Stolz A., Anastasiadou K. (2019) Optimization of the respond and recovery processes within a holistic resilient management, In: Proceedings of the 26th World Road Congress, 6 - 10 Oct. 2019, Abu Dhabi, UAE.

Finger J., Fischer K., Anastasiadou K., Stolz A. (2018) Resilience of road infrastructure during unforeseen disruptions. In: Proceedings of the Transport Safety and Security Research Day (ITF Forum), 22 May 2018, Leipzig, Germany.

Finger J. Harder J., Anastasiadou K., Fischer K., Stolz A. (2018) Safety and availability of road infrastructure during extreme natural and man-made events, In: Proceedings of the Transport Research Arena 2018, 16-19 April. 2018, Vienna, Austria.

Kasper, J. (2019) Entscheidungsunterstützung bei Starkregen für die Abfluss- und Stauregelung am Neckar. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung. BAWKolloquium, 20.-21. Februar 2019. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Kasper, J., Pranner, G., Simons, F., Denhard, M., Thorenz, C. (2018) Enhancing automated water level control at navigable waterways by high-resolution weather predictions. In: La Loggia, Goffredo; Freni, Gabriele; Puleo, Valeria; De Marchis, Mauro (Hg.): HIC 2018. EPiC Series in Engineering Vol 3, EasyChair, S. 1022–1029.

Kasper, J., Simons, F., Belzner, F., Schmitt-Heiderich, P. (2017) Einfluss von Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauregelung am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.): Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen. Koblenz. Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 139–146 (Veranstaltungen 5/2017).

Panenka, A., Sorgatz, J., Kasper, J. (2018) Understanding risk-driving factors, their indicators and resulting decision criteria: the interdisciplinary approach in Germany. In: Proceedings of the 34th PIANC World Congress, 7-11 May 2018, Panama City, Panama.

Pranner, G. (2018) Anwendung einer modellprädiktiven Vorsteuerung für die Abfluss- und Stauregelung von Wasserstraßen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Simons, F., Kasper, J. (2018) Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen – Nutzung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 50/2018. Karlsruhe.

Simons, F., Kasper, J. (2018) Strategien zur Abfluss- und Stauregelung der Wasserstraßen bei extremen Wetterereignissen – Nutzung von kurzfristigen Niederschlags- und Abflussvorhersagen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 111/2018. Karlsruhe.

Winkler, J., Denhard, M. and Bernhard, A. (2019) Krylov Methods for Adjoint-Free Singular Vector Based Perturbations in Dynamical Systems, submitted to Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

Veröffentlichungen im SPT 304

Hellmann, J. (2017) Untersuchungen der Eignung organischer Beschichtungen für Reparaturen im Stahlwasserbau, Bachelorarbeit, Hochschule Kaiserslautern, Bundesanstalt für Wasserbau, Kaiserslautern, Karlsruhe.

Hörnig, M. (2019) Reparatur bzw. Ersatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion – Smart Repair. Abschlussbericht zur 1. Förderphase des BMVI-Expertenetzwerk. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, Unveröffentlicht.

Hörnig, M. (2018) Erfahrungen und Möglichkeiten zur Prüfung von Ausbesserungsstoffen im Stahlwasserbau. Vortrag, Korrosionsschutz für Meerwasserbauwerke, Workshop der Hafentechnischen Gesellschaft, 24. Okt. 2018 Hamburg.

Hörnig, M. (2018) Smart Repair von Korrosionsschutzbeschichtungen. In: BAW Geschäftsbericht 2018, FuE-Thema der Abteilung Bautechnik, Karlsruhe.

Hörnig, M. (2018) Reparatur bzw. Ersatz von Korrosionsschutzmaßnahmen zum Erhalt des Korrosionsschutzes und der Stahlkonstruktion. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung Xpress 06/2018. Karlsruhe.

Pepernik, S. (2019) Leistungsuntersuchungen von Reparaturprodukten von Korrosionsschutzbeschichtungen im Stahlwasserbau. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

Team "Themenfeld 3"

Dr.-Ing. Kalliopi Anastassiadou (BASt)	(SPT 303, SPT-303- und stv. TF-Koordination)
Jennifer Bednorz, M.Eng. (BASt)	(SPT 303, SPT-303- und stv. TF-Koordination)
Gerd Berthold (BASt)	(Unterstützung TF-Koordination)
Karsten Böhm, M.Sc. (BfG)	(SPT 301)
Dr. Michael Denhard (DWD)	(SPT 303)
Dipl.-Phys. Markus Duschl (BASt)	(SPT 304)
Mehdi Fedan, M.Sc. (BfG)	(SPT 301)
Dr.-Ing. Martin Friese (BASt)	(SPT 301, SPT-301-Koordination)
Dr. Iris Hindersmann (BASt)	(SPT 301)
Dipl.-Meeresbiol. Mario Hörnig (BAW)	(SPT 304)
Dipl.-Ing. Ralph Holst (BASt)	(TF-Koordination)
Dipl.-Ing. Meike Holtkämper (DZSF/EBA)	(SPT 304, SPT-304-Koordination)
Julia Kasper, M.Sc.(BAW)	(SPT 303)
Dr.- Ing. Jan Kayser, (BAW)	(SPT 303)
Dr.-Ing. Viktória Malárics-Pfaff (BAW/KIT)	(SPT 301, SPT-301-Koordination)
François Marie Nyobeu Fangue, M.Sc. (BAW)	(SPT 302)
Dipl.-Ing. Andreas Panenka (BAW)	(SPT 302, SPT-302-Koordination)
Dipl.-Ing. Rolf Rabe (BASt)	(SPT 301, SPT 302, SPT 304)
Dr. Christina Primo Ramos (DWD)	(SPT 303)
Dipl.-Ing. Markus Reinhardt (DZSF/EBA)	(SPT 301, SPT 303)
Dipl.-Ing. Ulrich Schmelter (BASt)	(SPT 304)
Dipl.-Wi.-Ing. Heike Schmidt-Bäumler (BAW)	(SPT 302)
Dipl.-Ing. Franz Simons (BAW)	(SPT 303)
Dipl.-Ing. Julia Sorgatz (BAW)	(SPT 302)
Dr.-Ing. Frank Spörel (BAW)	(SPT 301)
Simeneh Temesgen Tibebu, B.Sc. (BAW)	(SPT 301)
Jens Winkler, M.Sc. (DWD)	(SPT 303)

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Internet: www.bmvi.de
E-Mail: poststelle@bmvi.bund.de

Redaktionsteam

Anastassiadou, Friese, Hindersmann, Holst, Holtkämper, Malárics-Pfaff, Panenka

Stand

September 2020, 3. Auflage

Gestaltung | Druck

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Referat Z 32, Druckvorstufe | Hausdruckerei

Bildnachweis

Titelseite:
links: [travelpeter/Fotolia](#)
rechts oben: [helmutvogler/Fotolia](#)
rechts unten: [BBB-Digitalfotos/Fotolia](#)
Abbildungsverzeichnis

Diese Broschüre ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung.
Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

BMVI-Expertennetzwerk (2020) Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen.
Ergebnisbericht des Themenfeldes 3 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019,
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. DOI: [10.5675/ExpNBMVI2020.2020.14](https://doi.org/10.5675/ExpNBMVI2020.2020.14)

