

Dauerüberwachung von Bestandsbrücken Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 163

bast

Dauerüberwachung von Bestandsbrücken Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

von

Iris Hindersmann

Bundesanstalt für Straßenwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 163

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 2116014
Dauerüberwachung von Bestandsbrücken -
Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Referat
Betonbau

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-573-6

Bergisch Gladbach, Juni 2021

Kurzfassung – Abstract

Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Die Tragreserven der Brücken der Bundesfernstraßen sind aufgrund gestiegener Verkehrslast, Defiziten aufgrund des Alters und der Bauart und der Verschlechterung des Erhaltungszustandes teilweise aufgebraucht. Eine Ertüchtigung und/oder Ersatz aller betroffenen Bauwerke ist kurzfristig nicht möglich, daher müssen Konzepte und Verfahren entwickelt werden, um die vorhandenen Brücken bis zur Sanierung oder dem Neubau sicher weiter nutzen zu können. Monitoring kann zur begrenzten Sicherstellung der Verfügbarkeit Teil einer Lösung sein, indem relevante Informationen über das Bauwerk und seine Reaktionen erfasst und für Analysen bereitgestellt werden. Ziel des Projekts ist die Beantwortung der Frage, welche Konzepte und Vorgehensweisen im Zusammenhang mit Monitoring helfen können, um Brücken bis zu ihrer Sanierung bzw. einem erforderlichen Neubau weiter nutzen zu können.

Der Einsatz von Monitoring kann einen Sicherheitsgewinn bedeuten, dieses ist besonders im Rahmen der Nachrechnungsrichtlinie relevant, da hier kompensierende Überwachungsmaßnahmen als Möglichkeit zur Aufrechterhaltung der Verfügbarkeit von Brücken genannt werden. Der Sicherheitsgewinn durch Monitoringmaßnahme wurde aber bisher nicht quantifiziert. Im Rahmen des Teilprojekts zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bestandsbrücken wurde zum ersten Mal ein Verfahren für die Überwachung von Schwellwerten entwickelt, welches die Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit einer Monitoringmaßnahme ermöglicht.

Der Einsatz von Monitoringmaßnahmen ist immer mit Kosten verbunden, um den monetären Nutzen einer Monitoringmaßnahme darlegen zu können, wurde im Rahmen eines weiteren Teilprojekts zur Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen 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.

Der Einsatz von Monitoring in der Erhaltungsplanung bietet die Möglichkeiten erste Schritte von der zustandsbasierten, reaktiven zu einer prädiktiven, vorausschauenden Erhaltungsstrategie zu machen. Die bessere Kenntnis des Zustands eines Ingenieurbauwerks ermöglicht es, Erhaltungsmaßnahmen besser zu planen und damit Kosten einzusparen. Möglichkeiten der Einbindung von Monitoring im Rahmen der Dringlichkeitsreihung von Maßnahmen, mit der Optimierung von Erhaltungsstrategien und die Einbindung von Monitoring in Regelwerke werden im Bericht beschrieben.

Der praktische Einsatz von Monitoring und ZfP-Methoden wurde an einer Spannbetonbrücke aus dem Jahr 1972 an der duraBAST erprobt. Im Rahmen einer grundhaften Instandsetzung wurde die Brücke mit Dauerhaftigkeitssensoren und Sensoren zur Ermittlung der Bauwerksreaktionen und Verkehrsbelastung ausgestattet mit dem Ziel Einbau und Datenerhebung und -auswertung unter realen Bedingungen zu testen. Diese Einsatzbeispiele sollen zeigen, welches Potenzial Monitoringanwendungen haben. Der Einsatz von ergänzenden zerstörungsfreien Prüfmethode (ZfP) wurde im Rahmen der Bestimmung der Schichtdicke der Fahrbahn und der Ortung der Längsspannglieder an der duraBAST-Brücke erprobt.

Continuous monitoring of existing bridges - quantification of reliability and benefits

The load-bearing reserves of the bridges on the federal highways have partly been used. This is due to increased traffic loads, deficits due to age and design and the deterioration in the state of preservation. A strengthening and/or replacement of all affected structures is not possible in the short term. Concepts and procedures have to be developed in order to be able to continue to use the existing bridges safely until they are renovated or new bridges are built. Monitoring can be part of a solution to ensure limited availability by collecting relevant information about the structure and its reactions and making it available for analysis. The aim of the project is to answer the question, which

concepts and procedures in connection with monitoring can help to ensure that bridges can continue to be used until they are rehabilitated or a new bridge is built.

The use of monitoring can lead to an increase in safety. This is particularly relevant in the context of the recalculation guideline, where compensatory monitoring measures are mentioned as a possibility to maintain the availability of bridges. However, the safety gain by monitoring measures has not been quantified so far. Within the framework of the project on the quantification of the reliability of existing bridges, a procedure for monitoring threshold values was developed for the first time. It enables the estimation of the failure probability of a monitoring measure.

The use of monitoring is always associated with costs. In order to demonstrate the monetary benefit of a monitoring, a procedure for estimating the costs and benefits was developed. This was achieved by comparing operation with monitoring and operation without monitoring. The costs resulting from installation and operation of the monitoring system, failure costs of the bridge, costs for maintenance and repair and total economic costs were included. The total economic costs are represented by the parameters operating costs, travel times, traffic safety, noise, air pollution, climate protection and accessibility.

The use of monitoring in conservation planning offers the possibility of taking the first steps from a condition-based, reactive to a predictive, forward-looking conservation strategy. The better knowledge of the condition of a civil engineering structure enables better planning of maintenance measures and thus cost savings. The report describes the possibilities of integrating monitoring within the framework of the prioritisation of measures, with the optimisation of maintenance strategies and the integration of monitoring into regulations.

The practical use of monitoring and non-destructive testing (NDT) methods was tested on a prestressed concrete bridge built in 1972 at duraBASt. In the course of a fundamental repair, the bridge was equipped with durability sensors and sensors for determining the reactions of the structure and traffic loads. The aims are the testing of installation, data collection and evaluation under real conditions. The use of supplementary NDT methods was tested on the duraBASt bridge with the framework of

determining the layer thickness of the carriageway and locating the longitudinal tendons.

Inhalt

Abkürzungen	7	3.2	Wirkungsanalyse von Verkehrsmaßnahmen	33
Symbole	7	3.3	Verfahren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Monitoringmaßnahmen ...	35
1 Einleitung	10	3.3.1	Bayes'sche Theorie und Value of Information Konzept	36
1.1 Problem / Hintergrund	10	3.3.2	Konzept zur Quantifizierung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen	36
1.2 Ziel und Nutzen	10	3.4	Beispiele	40
1.3 Vorgehen	10	3.4.1	Schwelmetalbrücke	40
1.4 Bearbeitung im Expertennetzwerk	11	3.4.2	Duisburg-Beeck	42
2 Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bestandbrücken mit Monitoringsystemen	12	3.4.3	Vergleich der Beispiele	44
2.1 Begriffsdefinition	12	3.5	Anwendung des Verfahrens in der Praxis	45
2.2 Monitoring von Brücken	13	4 Monitoring in der Erhaltungsplanung	45	
2.2.1 Verfahrensbeschreibung zum Monitoring von Brücken	13	4.1	Erhaltungsplanung	46
2.2.2 Nutzung der Informationen aus Monitoringmaßnahmen	15	4.1.1	Erhaltungsmanagement von Straßenbrücken	46
2.2.3 Messunsicherheiten	16	4.1.2	Strategie zur Modernisierung von Straßenbrücken	47
2.3 Verfahren zur Beschreibung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer	16	4.1.3	Bauwerksmanagementsystem	48
2.3.1 Tragfähigkeit	16	4.1.4	Lebenszyklusmanagement	48
2.3.2 Restnutzungsdauer	17	4.2	Nutzung von Monitoring in der Erhaltungsplanung	49
2.3.3 Anforderungen an die Messung	20	4.2.1	Dringlichkeit der Erhaltungsmaßnahme ..	49
2.4 Zuverlässigkeit	22	4.2.2	Optimierung der Erhaltungsstrategie	50
2.4.1 Methode zur Quantifizierung des Zuverlässigkeitsgewinns	22	4.3	Anbindung von Monitoring an bestehende Regelwerke	51
2.4.2 Anwendung am Fallbeispiel (Hochstraße Gifhorn)	27	5 Pilotstudie „duraBAST“	52	
2.4.3 Nutzung der Methode in der Praxis	30	5.1	duraBAST	52
3 Wirtschaftliche Bewertung von Monitoringmaßnahmen	30	5.1.1	Allgemeine Beschreibung der duraBAST	52
3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	30	5.1.2	Beschreibung der Brücke an der duraBAST	52
3.1.1 Methoden der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	30	5.1.3	Ziel und Nutzen dieses Projektes	53
3.1.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Verkehrsplanung	31	5.2	Dauerhaftigkeit	53
		5.2.1	Feuchte	54

5.2.2	Korrosion.....	58
5.2.3	Einsatz von Dauerhaftigkeitssensorik in der Praxis	61
5.3	Nachrechnung.....	62
5.4	Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden	65
5.4.1	Bestimmung der Fahrbahnschichtdicke ...	65
5.4.2	Ortung der Längsspannglieder	68
5.5	Tragfähigkeit der Brücke	71
5.5.1	Erste Ausstattung der Brücke mit Messtechnik	72
6	Fazit	73
	Literatur	74
	Bilder	80
	Tabellen	81

Abkürzungen

A	Anode	LZM	Lebenszyklusmanagement
BAB	Bundesautobahn	NOx	Stickoxide
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	OSA	objektbezogene Schadensanalysen
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen	PM	Engl. particulate matter, Partikelgröße
BMF	Bundesministerium für Finanzen	RAS-W	Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Wirtschaftlichkeitsberechnungen
BMS	Bauwerksmanagementsystem	RFID	radio-frequency identification
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	RI-WI-BRÜ	Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	RWS	Richtlinie für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich	S1-3	Rissweitensensoren
BRH	Bundesrechnungshof	SAFT	Synthetic Aperture Focusing Technique
BVWP	Bundesverkehrswegeplan	SIB	Straßeninformationsbank
C	Kathode	SORM	Second Order Reliability Method
CDF	Verteilungsfunktion (Cumulative Distribution Function)	SPT	Schwerpunktthema im BMVI-Expertenetzwerk
CO ₂	Kohlendioxid	T1-8	Temperatursensor 1-8
CR	Bewehrungsanschluss der Kathode	TB	Teilbauwerk
DB1-8	Durchbiegungssensor 1-8	TF	Themenfeld im BMVI-Expertenetzwerk
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.	VBS	Verkehrsbetriebsszenario
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.	ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten
DIN	Deutsche Industrienorm		
DMS	Dehnungsmessstreifen		
duraBAST	Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BAST		
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen		
Fa	Fahrbahnübergang		
FBG	Faser-Bragg-Gitter		
FE	Forschung und Entwicklung		
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen		
FORM	First Order Reliability Method		
FR	Fahrtrichtung		
LM	Lastmodell		

Symbole

Lateinische Buchstaben

D_{grenz}	Grenzschädigung
D_{vorh}	Schädigungsfaktor
E	Einwirkung
E_A	Aktivierungsenergie für den Ionenfluß (9 kJ/mol)
E_d	Bemessungswert der Beanspruchung
E_k	charakteristischer Wert der Beanspruchung

F	Bauteilversagen	$Q(t_{act})$	Verkehrslast während der Umsetzung der risikoreduzierenden Maßnahme
G	Grenzzustand	$Q(t_p)$	Verkehrslast in der Reaktionsphase
k_F	Versagenskosten	Q_k	charakteristischer Wert der Verkehrslast
k_{im}	Koeffizient aus Verteilungen der Versagenswahrscheinlichkeit der maximalen Verkehrslast und der Verkehrslast, die Alarmwerts auslöst	Q_{max}	höchste aufnehmbare Verkehrslast
k_m	Kosten des Monitoring	Q_{Xlim}	Verkehrslast beim Erreichen des Indikator-Schwellwertes
$k_{m,b}$	Betriebskosten des Monitoring	r	Diskontierungssatz
$k_{m,i}$	Investitionskosten des Monitoring	R	Widerstand
k_u	Kosten für Erhaltung	R_d	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit
k_v	Kosten der Verkehrsbehinderung	R_G	universale Gaskonstante ($8,3144 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
npv	Gegenwartswert der Kosten	R_k	charakteristischer Wert der Beanspruchbarkeit
P	spezifischer Betonwiderstand bei der Messtemperatur	T	gemessene Temperatur
P	Wahrscheinlichkeit	t_0	aktueller Zeitpunkt
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks	t_{act}	Dauer der Umsetzung einer risikoreduzierenden Maßnahme
$P_{f,ID}$	Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks in der Schadenserkennungsphase	t_m	normale Messdauer
$P_{f,Re}$	Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks in der Reaktionsphase	$t_{N(cal)}$	rechnerische Lebensdauer
$P_{f,Ü}$	Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks unter Berücksichtigung der Überwachungsmaßnahme	$t_{N(SOLL)}$	Lebensdauer nach Erfordernissen
$P_{f,Xlim}$	Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks vor dem Erreichen des Schwellwertes	t_p	Dauer der Reaktionsphase
$P_{f,Xmax}$	Versagenswahrscheinlichkeit, wenn der Schwellwert so hoch gesetzt, dass selbst wenn dieser nicht überschritten wird, ein Versagen möglich ist	t_{pr}	Dauer der Datenverarbeitung
P_{Qmax}	Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von maximal aufnehmbarer Verkehrslast	u	Erhaltung
P_{QXlim}	Wahrscheinlichkeit von Verkehrslastüberschreitung, welche die Überschreitung des Indikator-Schwellwertes zu folge hat	u_i	Erhaltung mit Monitoring
P_S	Überlebenswahrscheinlichkeit	u_o	Erhaltung ohne Monitoring
Q	Verkehrslast	X	messbasierter Indikator
		X_{lim}	Indikator-Schwellwert
		X_{Qmax}	Indikatorwert beim Erreichen des Grenzzustands
		Y	Schadensindikator
		Z	Zustand
		Z	Zustandsentwicklung/Schwellwertentwicklung

Griechische Buchstaben

$\Delta\mu_x$	Differenz zwischen dem aktuellen Tagesmaximum des Indikators und dem Mittelwert der zuvor ermittelten Verteilung der Tagesmaxima
$\Delta\sigma_i$	Schwingbreite
μ_E	Mittelwert der Einwirkung
μ_G	Mittelwert der Grenzfunktion
μ_R	Mittelwert der Reaktion
$n(\Delta\sigma_i)$	auf tretende Lastwechsel einer Schwingbreite $\Delta\sigma_i$
$N(\Delta\sigma_i)$	ertragbare Lastwechsel einer Schwingbreite $\Delta\sigma_i$
β	Sicherheitsindex
α_E	Sensitivitätsfaktor der Beanspruchung
α_R	Sensitivitätsfaktor der Beanspruchbarkeit
σ_E	Standardabweichung der Einwirkung
σ_G	Standardabweichung der Grenzfunktion
σ_R	Standardabweichung der Reaktion

1 Einleitung

1.1 Problem / Hintergrund

Die Bundesfernstraßen umfassten im Jahr 2019 ein Netz von 39.700 Brücken. Ein großer Teil dieser Brücken muss instandgesetzt, ertüchtigt oder neugebaut werden. Ursachen sind die Zunahme und Veränderung des Verkehrs, Defizite aufgrund des Alters und der Bauart und die Verschlechterung des Erhaltungszustandes. Der Verkehr auf Bundesfernstraßen ist in den letzten Jahren stark angestiegen und der Güterverkehr hat dabei überproportional an Menge und Gesamtgewicht zugelegt. Die Tragreserven der Brücken sind dadurch teilweise aufgebraucht, da faktisch eine Nutzungsänderung für die Brücken stattgefunden hat. Der Großteil der Brückenbauwerke in Westdeutschland wurde in den 1960er bis 1980er Jahren gebaut. Bedingt durch hohe Materialpreise und geringe Lohnkosten wurde der Materialeinsatz optimiert, dadurch gibt es heute beispielsweise Probleme mit filigranen Querschnitten. Als zusätzliches Problem kommt die Verschlechterung des Erhaltungszustandes der Brücken hinzu, die auf einen Rückstau der Erhaltungsmaßnahmen schließen lässt (BMVI 2016; MARZAHN 2016).

Da eine Ertüchtigung und/oder Ersatz aller betroffenen Bauwerke kurzfristig nicht möglich sein wird, ist es notwendig Konzepte und Verfahren zu entwickeln um die vorhandenen Brücken bis zur Erhaltungsmaßnahme oder dem Neubau sicher weiter genutzt werden können. Monitoring kann zur Sicherstellung der Verfügbarkeit nutzbringend eingesetzt werden.

1.2 Ziel und Nutzen

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Konzepten und Vorgehensweisen für das Monitoring in Verbindung mit einer zuverlässigkeitsbasierten Bewertung von Bestandsbauwerken. Mit den hier vorstellten Teilprojekten sollen die Einsatz- und Nutzungsmöglichkeiten von Monitoringmaßnahmen aufgezeigt, ihr Nutzen im Sinne eines Gewinns an Zuverlässigkeit demonstriert und der Einsatz in der Erhaltungsplanung dargestellt werden.

Der Nutzen aus dem Projekt ergibt sich durch die mögliche Aufrechterhaltung bzw. Weiternutzung von Brücken aufgrund von Monitoringmaßnahmen, die ihre eigentlichen Laufzeit überschritten bzw.

Tragreserven bereits aufgebraucht haben. Hierdurch wird eine Verschlechterung der Verfügbarkeit durch Umleitungen, Verkehrsstau usw. vermieden. Weiterhin kann Zeit für die Instandsetzung, die Ertüchtigung oder den Ersatzneubau gewonnen werden. Durch den Einsatz und Vergleich von verschiedenen Sensorsystemen können Erfahrungen im Hinblick auf die Aspekte Einbau, Datengewinnung und Datenauswertung gemacht werden.

1.3 Vorgehen

Die Bearbeitung erfolgt systematisch in den Schritten a) Machbarkeitsstudie zur Klärung des Sachstandes und Durchführung von Bedarfsanalysen, b) Ausarbeitung, Analyse und Bewertung konzeptioneller Lösungen und c) Durchführung einer Pilotstudie zur Erfahrungssammlung und Demonstration der Projektergebnisse. Es werden folgenden Teilprojekte bearbeitet:

- Bereitstellung von Verfahren und Methoden zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bestandsbrücken mit Monitoringmaßnahmen (Kapitel 2):

In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Verfahren zum Monitoring dargestellt. Verfahren zur Berücksichtigung verbesserter Erkenntnisse zu Einwirkungen und Widerständen im Hinblick auf die Beschreibung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit und ihre Entwicklung im Lebenszyklus werden beschrieben. Zuverlässigkeitsbasierte Modelle für Grenzfunktionen der Bauwerksstruktur im Hinblick auf Einwirkungen und Widerstände werden analysiert. Die Zuverlässigkeit des Monitorings in Hinblick auf Parameter, Modelle und Bewertungen wird beschrieben.

- Wirtschaftliche Bewertung von Strategien des Monitorings (Kapitel 3):

Der Einsatz von Monitoringmaßnahmen wird durch einen Nutzensgewinn begründet. Die Analyse von Nutzen und Kosten einer Monitoringmaßnahme erfolgt über eine wirtschaftliche Bewertung. In diesem Kapitel werden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und deren Einsatz in der Verkehrsplanung vorgestellt. Im weiteren Verlauf wird ein Verfahren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Monitoringmaßnahmen vorgestellt. Ziel ist es den Nutzen von Monitoring quantifizieren zu können. Anschließend wird das Verfahren anhand eines Beispiels erläutert.

- Klärung des zielführenden Einsatzes von Monitoring als Grundlage für die Planung von objektbezogenen Erhaltungsstrategien (Kapitel 4):

In diesem Kapitel wird die Einbindung von Monitoringstrategien in die Strukturen des Erhaltungsmanagements von Brücken untersucht. Insbesondere Verfahren zur Bewertung der Ergebnisse des Monitorings im Hinblick auf die Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen sowie Verfahren zur Nutzung von Ergebnissen des Monitorings für die Optimierung von Erhaltungsstrategien im Lebenszyklus werden entwickelt. Ebenfalls wird die Anbindung an das bestehende Regelwerk (hier: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand) untersucht.

- Pilotstudie (Kapitel 5):

Im Rahmen von Pilotstudien zur Einbindung von Ergebnissen von Monitoringmaßnahmen in der Erhaltungsplanung von Brückenbauwerken wird die Einwirkungsüberwachung zur Bewertung der Restnutzungsdauer, die Schwellwertüberwachung von Grenzzuständen der Tragfähigkeit und das Monitoring von Dauerhaftigkeitsparametern zur Zustandsbewertung demonstriert.

1.4 Bearbeitung im Expertennetzwerk

Die Bearbeitung des Themas erfolgt im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks im Themenfeld 3 (TF

- 3) „Verlässlichkeit der Verkehrsinfrastruktur erhöhen“ und hier im Schwerpunktthema 301 (SPT 301) „(Weiter-) Entwicklung von Verfahren und Vorgehensweisen für die Erfassung und Beurteilung des Bestandes“.

Bild 1 zeigt die Vernetzung der Behörden innerhalb des SPT 301. Das Thema „Dauerüberwachung von Bestandsbrücken“ befasst sich mit dem Zustand von Bestandsbrücken. Mit der Bearbeitung im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks wird das Ziel verfolgt, die hier entwickelten Methoden auch auf die anderen Verkehrsträger zu übertragen. Beispielsweise kann die hier vorgestellte Methode zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Monitoringmaßnahmen auch bei den anderen Verkehrsträgern eingesetzt werden. Hierzu ist im Anschluss an die Bearbeitung des externen Projekts zum Thema „Wirtschaftliche Bewertung von Monitoringmaßnahmen“ die Übertragung der Ergebnisse auf andere Verkehrsträger und Bearbeitung eines Fallbeispiels bei der Schiene und der Wasserstraße notwendig. Auch Erkenntnisse die an Straßenbrücken zu den Themen Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit gemacht werden, können auf die anderen Verkehrsträger übertragen werden. Die praktische Anwendung könnte so aussehen, dass Messtechnik, die zur Bestimmung von konkreten Teilaspekten, z. B. zur Ermittlung von Verformungen oder Feuchtigkeit im Beton vorhanden ist, bei allen Verkehrsträgern eingesetzt werden und die Ergebnisse dann gemeinsam evaluiert werden.

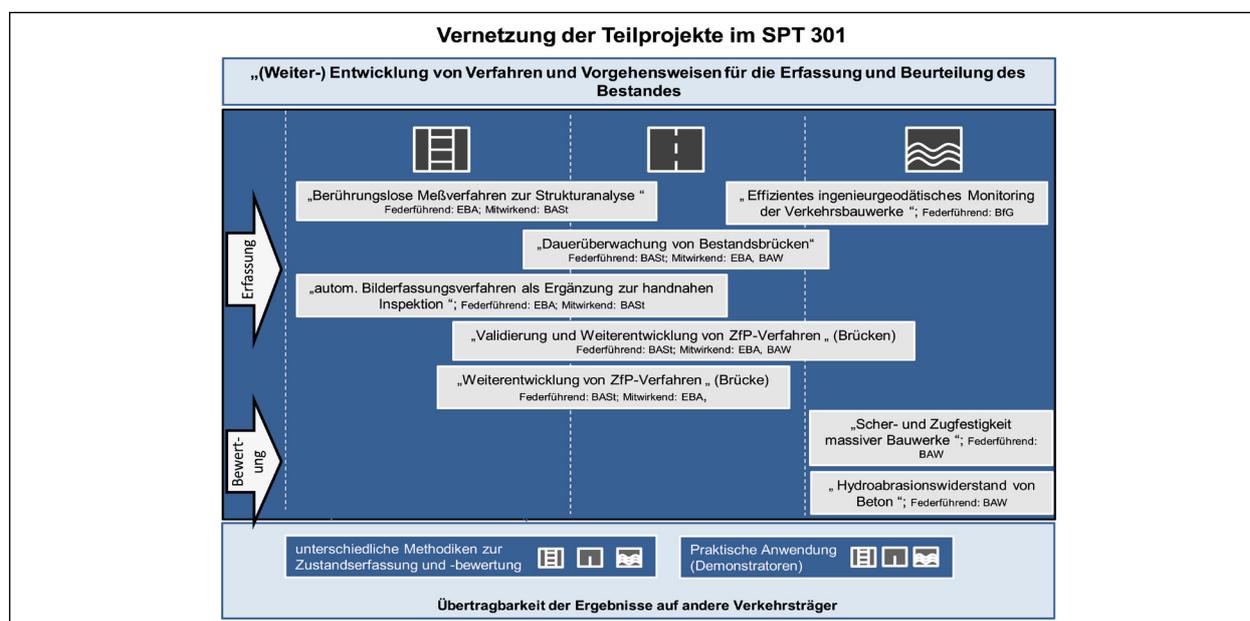


Bild 1: Vernetzung im Schwerpunktthema 301 „(Weiter-) Entwicklung von Verfahren und Vorgehensweisen für die Erfassung und Beurteilung des Bestandes“

2 Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bestandbrücken mit Monitoringsystemen

Monitoringmaßnahmen an Brücken werden eingesetzt, um zusätzliche Informationen zu generieren. Hierbei werden beispielsweise Informationen über das Zuverlässigkeitsniveau einer Brücke in Bezug auf Dauerhaftigkeit, Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit erfasst. Im ersten Teil des Kapitels werden die Begriffe Messen, Erfassen, Überwachung und Monitoring definiert (Kapitel 2.1). Anschließend wird beschrieben an welchen Stellen im Lebenszyklus einer Brücke Monitoringmaßnahmen zum Einsatz kommen können (Kapitel 2.2). Zudem wird auf die Nutzung der Informationen aus Monitoringmaßnahmen und Messunsicherheiten eingegangen. Kapitel 2.3 geht auf das Monitoring an Brücken ein, es werden Verfahren zur Beschreibung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer dargestellt. Es wird dargelegt welche Parameter zur Erfassung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer über Sensoren bestimmt werden können und welche Anforderungen an die Messtechnik gestellt werden. Die Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Monitoringmaßnahmen wird in Kapitel 2.4 beschrieben. Die Bearbeitung dieses Themas erfolgt im Rahmen des externen Projekts FE 15.0625 „Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken“.

2.1 Begriffsdefinition

Eine einheitliche Definition der Begriffe Überwachung und Monitoring liegt nicht vor. In dieser Arbeit wird den Definitionen des Merkblatts „Monitoring: Planung, Vergabe und Betrieb“ des Deutschen Beton- und Bautechnik Vereins (DBV) gefolgt (DBV 2018). Demnach gelten die folgenden Definitionen:

- Messen: Beobachtung einer physikalischen Größe ggf. zum quantitativen Vergleich mit einer Einheit
- Erfassen: zeitlich diskrete Aufnahme von Daten
- Überwachen: der Teil des Monitorings, bei dem nach ggf. erforderlicher Umrechnung des Messwerts in Überwachungswert ein Vergleich mit Erwartungs- bzw. Grenzwerten erfolgt
- Monitoring: Gesamtprozess zur Erfassung, Analyse und Bewertung von Bauwerksreaktionen und/oder der einwirkenden Größen mittels eines Messsystems über einen repräsentativen Zeitraum (zeitliche Entwicklung der Messgröße; kontinuierliche, periodische oder ereignisbasierte Messung, global - lokal). Zu unterscheiden sind hierbei:
 - Kurzzeitmonitoring (Datenerfassung über Minuten bis Tage, z. B. während Probelastung)
 - Langzeitmonitoring (Datenerfassung über Wochen bis Jahre, z. B. zur Schadensüberwachung)

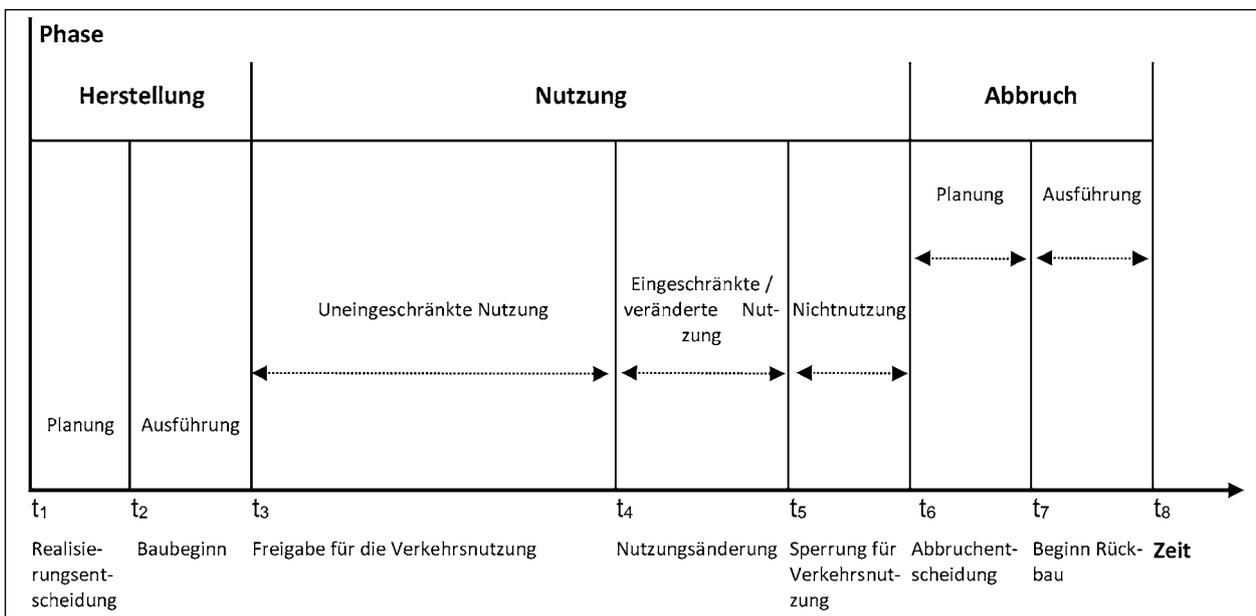


Bild 2: Lebenszyklus einer Brücke (HAARDT 2017)

- Dauermonitoring (permanente Datenerfassung ohne geplantes Ende, z. B. für kath. Korrosionsschutz)

2.2 Monitoring von Brücken

2.2.1 Verfahrensbeschreibung zum Monitoring von Brücken

Monitoring ist als Ergänzung zur Bauwerksprüfung (DIN 1076:1999) zu sehen. Ziel ist es zuverlässige, objektive Daten des Bauwerks abzubilden, dessen Langzeitentwicklung zu beobachten und die Entwicklung von neuen Schäden aufzuzeigen (SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015). Monitoring kann an verschiedenen Stellen im Lebenszyklus von Brückenbauwerken zur Anwendung kommen. Der Lebenszyklus einer Brücke kann Bild 2 entnommen werden.

Der Lebenszyklus einer Brücke umfasst die Abschnitte Herstellung, Nutzung und Abbruch. Der Einsatz von Monitoring kann wertvolle Hilfestellung bei der Erreichung der Ziele der Erhaltung eines bestmöglichen Zustandes während der gesamten Nutzungsdauer bei minimalem Kapitaleinsatz und Ressourcenverbrauchs sein.

Folgende Einsatzgebiete von Monitoringmaßnahmen im Lebenszyklus sind möglich (HAARDT 2017; HAARDT und HOLST 2017):

- Monitoring in der Planungs- und Bauphase (Herstellung)
 - Monitoring in der Planungsphase
 - Monitoring zur Qualitätssicherung und Funktionskontrolle
- Monitoring in der Betriebsphase (Nutzung)
 - Monitoring des Zustands
 - Monitoring von Instandsetzungsmaßnahmen
 - Monitoring zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer
 - Überwachung sicherheitsrelevanter Systemelemente
 - Monitoring als Kompensationsmaßnahme
- Monitoring in der Rückbauphase (Abbruch)

2.2.1.1 Monitoring in der Planungs- und Bauphase

Monitoring in der Planungsphase

In der Planungsphase dienen Monitoringmaßnahmen als Instrument zum Gewinn von Informationen und zur Minimierung von Risiken. Bei anspruchsvollen Bauwerken, neuen Bauweisen, nicht geregelten Bauteilen oder schwierigen Rahmenbedingungen können Informationen aus Monitoringmaßnahmen eine sinnvolle Grundlage für die Zustimmung im Einzelfall geben. Bei der Errichtung von Teilen des Bauwerks vorab kann Monitoring genutzt werden um Bauwerksreaktionen unter Beanspruchung festzustellen, aber auch um Dehnung, Verformung oder Temperatur zu messen. Die Ergebnisse der Messungen können in die Planung zurückfließen und da zu einer objektbezogenen Verbesserung führen.

Monitoring zur Qualitätssicherung und Funktionskontrolle

Der Einsatz von Monitoring im Brückenneubau ist derzeit nicht geregelt, eine messtechnische Begleitung von Neubaumaßnahmen kann sinnvoll für Qualitätssicherung und Funktionskontrolle sein.

Einsatzgebiete für Monitoring in der Neubauphase für die Qualitätssicherung und Funktionskontrolle sind (HAARDT 2017):

- Messtechnische Begleitung kritischer Bauzustände oder Bauphasen: Als Beispiel kann die Erfassung der Tragwerksreaktion beim Takt-schiebe- oder Freivorbau genannt werden.
- Überwachung von benachbarten Bauwerken während der Herstellung: Hierbei können beispielsweise Setzungen, Wasserstände oder Rissweitenveränderung im bzw. am Bauwerk gemessen werden.
- Messungen zur Inbetriebnahme von Bauwerken: Ein Beispiel sind Belastungsversuche zur Überprüfung des tatsächlichen Lastabtrags.

Einsatzgebiete für Monitoringmaßnahmen zeigen sich auch in der Bauphase von bei Instandhaltungsmaßnahmen (HAARDT 2017):

- Messtechnische Begleitung von kritischen Bauphasen: z. B. die Messung von Schwingungen bei Instandsetzungsmaßnahmen.

2.2.1.2 Monitoring in der Betriebsphase

Zustandsüberwachung

Neubau und Verstärkung vieler Brücken ist notwendig, aber die sofortige Umsetzung der Maßnahmen ist in finanzieller und zeitlicher Hinsicht problematisch. Deshalb ist es notwendig die bisherigen Brücken weiter zu nutzen, das Zustandsmonitoring kann helfen die Brücken in einer Übergangszeit kontrolliert und sicher zu nutzen, bis der Austausch bzw. die Sanierung der Brücke abgeschlossen ist (KOHLBREI 2012).

Die Erfassung des Zustandes von Brücken und das frühzeitige Erkennen von Schäden erfolgt derzeit durch Bauwerksprüfungen nach DIN 1076:1999. Die Bauwerksprüfung kann bei einigen Schäden durch Monitoring ergänzt werden, hier sind zu nennen (FREUNDT et al. 2014):

- Übermäßige Verformung des Überbaus
- Durchfeuchtung, Ausblühung und Aussinterung am Überbau
- Abplatzungen mit freiliegender korrodierter Tragbewehrung
- Unterschreitung der Betondeckung
- Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront
- Eindringtiefe der Chloridfront
- Risskontrolle
- Undichte Abdichtungen

Monitoring bei Instandsetzungsmaßnahmen

Monitoring kann eingesetzt werden um den Erfolg von Instandsetzungsmaßnahmen zu protokollieren. Bei der Planung von Maßnahmen zur Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit kann der Einsatz von Monitoring mit geplant werden. Bei Instandhaltungsmaßnahmen zur Erhaltung der Passivität der Bewehrung oder zum Schutz gegen das Eindringen von Schadstoffen kann im Zuge der Instandhaltung zusätzlich Sensorik eingebaut werden. Diese Sensorik dient dann der Überwachung der Dauerhaftigkeitsparameter Korrosion und Feuchte. Ziel ist es den Erfolg und die Effektivität dieser Maßnahme zu dokumentieren (HAARDT und HOLST 2017; MÜLLER und VOGEL 2008).

Monitoring zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer

Siehe Kapitel 2.3 Verfahren zur Beschreibung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer.

Monitoring von sicherheitsrelevanten Systemelementen

Bei Bauwerken mit ausgeprägtem Risiko- und Schadenspotenzial ist das Monitoring kombiniert mit einem Frühwarnsystem von großer Bedeutung. Das Monitoringkonzept wird an das spezifische Problem angepasst, beispielsweise der Einsatz von Wegeaufnehmern zur Beobachtung der Rissweitenentwicklung. Grundsätzlich sind bei dieser Art des Monitorings die genaue Kenntnis des Grenzzustandes und verlässliche, robuste Sensorik von Bedeutung. Bei dieser Art der Monitoringstrategie spielt die Festlegung des Schwellwerts eine bedeutende Rolle. Bei der Schwellwertüberwachung werden durch ein kontinuierliches Monitoring bestimmte Aspekte, wie beispielsweise Rissweitenveränderung oder Grenzdehnung überwacht. Der Schwellwert beschreibt hierbei eine maximal zulässige Anzahl von Einzelereignissen oder die Überschreitung eines vorher festgelegten Bereiches (HAARDT und HOLST 2017).

Eine Standardmethode zur Festlegung von Schwellwerten steht aktuell nicht zu Verfügung. Die Festlegung des Schwellwertes erfolgt direkt für den Messwert oder für einen Vergleichswert. Die Messung eines Vergleichswertes erfolgt dann, wenn der Messwert nicht direkt bestimmt werden kann. Wichtig ist, dass zwischen Mess- und Vergleichsgröße ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Für den Fall das ein komplexer Zusammenhang zwischen Mess- und Vergleichsgröße besteht, beispielweise im Fall der Temperatur durch einen zyklischen Verlauf, ist diesem Umstand Rechnung zu tragen (HAARDT und HOLST 2017).

Verbunden mit dem Schwellwertverfahren ist immer auch die Erstellung eines Notfall- oder Alarmplans, den mit der Überschreitung der Schwellwerte ist auch der Einsatz von entsprechenden Maßnahmen erforderlich (Bild 3).

Die Verarbeitung der Messdaten und die nachfolgende Erstellung einer Prognose können über die Erstellung eines physikalischen Modells erfolgen. Ein parametrisiertes Rechenmodell wird anhand der Messungen an das reale Tragwerk angepasst. Diese Methode ist sehr aufwendig und muss für jede Brücke separat erstellt werden. Eine Alternative ist die Nutzung einer datenbasierten Methode. Über dynamische und statische Messungen wird ein Referenzzustand ermittelt. Über die Abweichung vom Referenzzustand kann dann auf Veränderungen im Tragwerk geschlossen werden. Vorteil die-

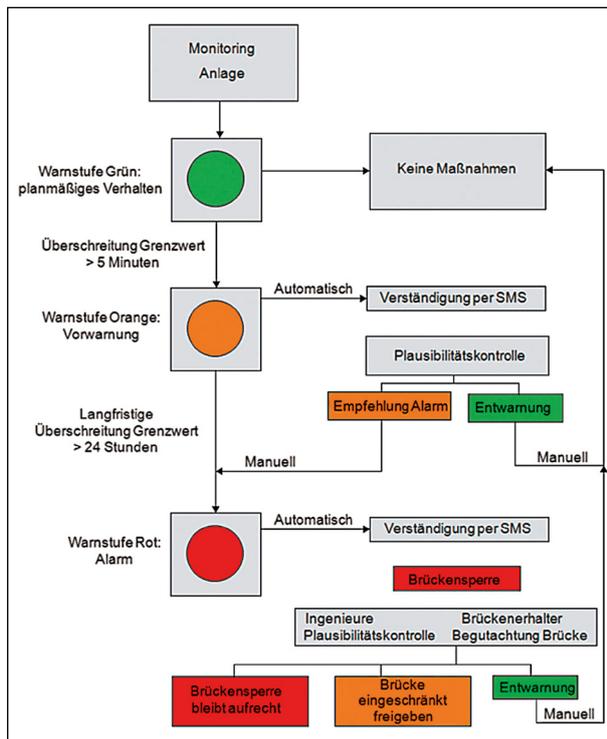


Bild 3: Beispiel für einen Alarmplan zur Regelung der Zuständigkeiten im Fall von Grenzwertüberschreitungen für ein Schwellwertmonitoring an einer Brücke (HAARDT und HOLST 2017; SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015).

ser Methode ist, dass sie eine relativ schnelle Auswertung ermöglicht und auf andere Brücken übertragbar ist. Die Messungen zur Definition eines Referenzzustand sind aber aufwendig (HAARDT und HOLST 2017; SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015).

Monitoring als Kompensationsmaßnahmen

Siehe Kapitel 4.3 Anbindung von Monitoring an bestehende Regelwerke.

2.2.2 Nutzung der Informationen aus Monitoringmaßnahmen

Die Ergebnisse aus den Monitoringmaßnahmen können für die Bewertung der Tragwerkszuverlässigkeit genutzt werden. Relevant sind in diesem Fall Konzepte und Indikatoren zur Überwachung von Verkehrslasten (Einwirkungsüberwachung), der spezifischen Bauwerksreaktionen und der Erfassung der relevanten messbaren Indikatoren von Tragwerksschäden.

Die Ergebnisse der Monitoringmaßnahmen der Einwirkungsüberwachung können folgendermaßen genutzt werden (RALBOVSKY et al.):

- Strecken- oder objektspezifische Lastmodelle: Aus den gemessenen Daten lassen sich zu erwartende Maximalwerte der Verkehrsbelastungen für die Brücken identifizieren und Lastmodelle beispielsweise für Nachrechnungen ableiten.
- Anpassung der Teilsicherheitsfaktoren für Verkehrslasten: Mit der Überwachung der Einwirkung wird die ursprüngliche Unsicherheit in Bezug auf die Einwirkungen reduziert, im semi-probabilistischen Konzept entspricht dies einer Reduktion der Teilsicherheitsbeiwerte.
- Anpassung der Schadensakkumulationsprognose bei Ermüdungsprozessen: siehe Kapitel 2.3.2.1

Das Tragwerksverhalten kann mit verschiedenen Indikatoren untersucht werden; die wichtigsten sind:

- Modale Eigenschaften (Schwingung, Frequenz, Dämpfung): Modale Parameter werden von der Tragwerkssteifigkeit beeinflusst. Wenn Änderungen der Steifigkeit auftreten, können diese durch die Messung von Eigenfrequenz, Schwingungsform und Dämpfungen abgeleitet werden. Modale Parameter wurden als Schadensindikatoren intensiv erforscht und werden typischerweise im Rahmen einer außerordentlichen Inspektion oder zur Systemidentifikation verwendet (RETZE 2007; HOLST 2006; RALBOVSKY et al.).
- Lastabtragseigenschaften (Einflusslinien, Lastverteilungsfaktoren): Die Lastabtragseigenschaften spiegeln die Verteilung der Verkehrslasten im Tragwerk wider. Sie werden typischerweise für einen konstruktiven Nachweis mit angepasstem Lastabtrag oder für die Systemidentifikation genutzt (RALBOVSKY et al.; REIFF et al. 2016; STRAUSS et al. 2012).
- Statische Deformation (Durchbiegung, Neigung, Dehnung, Rissweite): Die statische Deformation wird durch die Tragwerkssteifigkeit und die Umverteilung der ständigen Lasten bestimmt. Diese Indikatoren werden beispielsweise bei Probebelastungen genutzt (RALBOVSKY et al.; RETZE 2007).

Diese genannten Indikatoren können als Schadensindizien oder zur Systemanalyse genutzt werden. Bei Schäden dienen die Indikatoren zum Auslösen einer Warnung und einer Inspektion vor Ort, mit dem Ziel den Schaden zu erkennen, zu bewerten und notfalls zu beheben. Bei der Systemidentifikation ist das Ziel ein ex ante Modell des Tragwerks

soweit anzupassen, dass es möglichst gut mit dem beobachteten Verhalten/Messergebnissen übereinstimmt (RALBOVSKY et al.2018).

2.2.3 Messunsicherheiten

Bei der Nutzung von Monitoringanwendungen können im gesamten Prozess der messtechnischen Erfassung Fehlerquellen auftreten (RALBOVSKY et al. 2018) und zu fehlerhaften Einschätzungen führen:

- Messwerterfassung: Fehler können durch ungenaue Sensorinstallation, ungenaue Sensorspezifikation (zum Beispiel: Empfindlichkeit, Linearität, Wiederholbarkeit) und eine Störung des analogen Signals z. B. infolge Beschädigung des Sensors erfolgen. Die Fehler der ungenauen Sensorinstallation lassen sich durch genaues Arbeiten und die Störung der Signale durch Abschirmung vermeiden. Die Angaben zu den Sensorspezifikationen sind zwischen den einzelnen Herstellern nicht abgeglichen. Es werden unterschiedliche Angaben gemacht. Teilweise wird manchmal nur der Wert der „Genauigkeit“ angegeben, in anderen Fällen zwischen Wiederholbarkeit (Hysterese), Linearität, Querempfindlichkeit, Langzeitstabilität, Temperaturempfindlichkeit und Rauschniveau differenziert.
- Erkennung von Indikatoren: Häufig werden nicht die Messwerte selbst, sondern daraus abgeleitete Indikatoren genutzt, die mit speziellen Algorithmen extrahiert werden. Auch in diesem Prozessablauf können Fehler auftauchen. Es können Fehler durch ungenaue Erkennung bei der Anwendung von Postprocessing-Algorithmen entstehen oder die Eindeutigkeit bei inversen Erkennungsalgorithmen fehlt.
- Kompensation der Betriebszustände: Hier kann es zu Fehlern durch die unvollkommene Erfassung der Betriebszustände und die Verwendung eines ungenauen Kompensationsmodells kommen.
- Umweltbedingungen: Eine relevante Fehlerquelle bei der Interpretation von Messwerten liegt in den wechselnden Umgebungsbedingungen, hier ist insbesondere der Temperatureinfluss zu beachten. Diese Unsicherheit kann reduziert werden, in dem eine Temperaturkompensation der Messwerte stattfindet.

2.3 Verfahren zur Beschreibung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer

Die Verfahren zur Beschreibung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer können durch verbesserte Erkenntnisse zu Einwirkungen und Widerständen von Bauwerken und ihrem prognostiziertem Verhalten profitieren. Die verbesserten Kenntnisse können über den Einsatz von Monitoring erreicht werden. Die vorhandenen Verfahren zur Ermittlung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer werden in diesem Kapitel beschrieben und die möglichen Einsatzgebiete von Monitoringmaßnahmen dargelegt.

2.3.1 Tragfähigkeit

Tragfähigkeit ist nach DIN EN 1990:2010-12 definiert als „mechanische Eigenschaft eines Bauteils oder Bauteilquerschnitts im Hinblick auf Versagensformen, z. B. Biege- und Knickwiderstand, Zugwiderstand“. Die Zuverlässigkeit der Tragfähigkeit wird über die Bemessung der Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt.

Grundlage für die Bemessung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks ist die Gegenüberstellung von Einwirkung (E) und Widerstand (R).

Einwirkungen auf Bauteile können durch ständige oder veränderliche Lasten hervorgerufen werden. Ständige Lasten sind die Eigenlast des Überbaus und die Eigenlasten des Aufbaus (Fahrbahnbelag, Kappen, Geländer, Leitplanken, Signalanlage, Gradientenausgleich). Veränderliche Lasten sind Verkehrslasten, Windlasten, Temperatur- und Schneelasten. Für das Einwirkungsmodell werden Lasten aufgrund von Beobachtungen und Messungen in Form von Belastungsnormen niedergeschrieben. Der Widerstand des Bauwerks ist von der Geometrie und den Werkstoffeigenschaften abhängig. Die Ermittlung der Widerstände ist über baustoffspezifische Normen möglich (MEHLHORN 2010).

Das Versagen eines Bauwerks lässt sich als Grenzfunktion (G) formulieren (z. B. SIEGERT et al. 2015):

$$G = R - E$$

Die Einwirkungen und Widerstände werden als Funktion abgebildet, da die Einwirkungs- und Widerstandsgrößen streuen. Die Funktionen zeigen die Verteilungsdichte von Einwirkung und Wider-

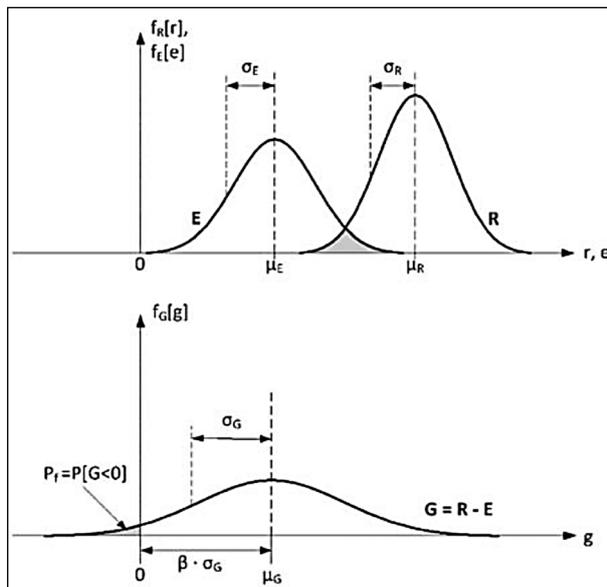


Bild 4: Zustandsfunktion $G = R - E$, Definition von Versagenswahrscheinlichkeit P_f und Sicherheitsindex β (SIEGERT et al. 2015)

stand. Bedingt durch die Streuung der Einwirkungs- und Widerstandsfunktionen, kommt bei der Auswertung der Grenzzustandsgleichungen die Probabilistik zur Anwendung. Das Ergebnis bei der voll-probabilistischen Auswertung ist die Definition der Versagenswahrscheinlichkeit P_f , die aussagt mit welcher Wahrscheinlichkeit die Grenzfunktion überschritten wird, das heißt, dass $E > R$ ist. Die Zuverlässigkeit im mathematischen Sinn wird als Überlebenswahrscheinlichkeit P_s angegeben, wobei gilt $P_s = 1 - P_f$. Aus dem Mittelwert μ_G und der Standardabweichung σ_G der Grenzfunktion kann der Sicherheitsindex β bestimmt werden (Bild 4) (SIEGERT et al. 2015). Die Auswertung der Grenzfunktion kann über stochastische Näherungsverfahren erfolgen. Relevant im Rahmen der probabilistischen Näherungsverfahren sind die FORM (First Order Reliability Method) und SORM (Second Order Reliability Method). Diese Methoden bieten den Vorteil, dass sie bei beliebigen statischen Verteilungen einsetzbar sind. Die Grenzzustandsfunktion wird mit einer Hyperfläche (bezeichnet eine Kurve im zweidimensionalen und eine Fläche im dreidimensionalen Raum) angenähert (SCHNETGÖKE 2008).

Relevant für die Fragestellung zur Abschätzung der Zuverlässigkeit sind die probabilistischen Konzepte „Bayes'sches Updating“ und Extremwertverteilung. Mit dem Bayes'schen Updating (siehe auch Kapitel 3.3.1) wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem Ausgangsinformationen mit neuen Informationen (z. B. Messwerten) upgedatet werden. Beispielsweise gibt es zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme eines

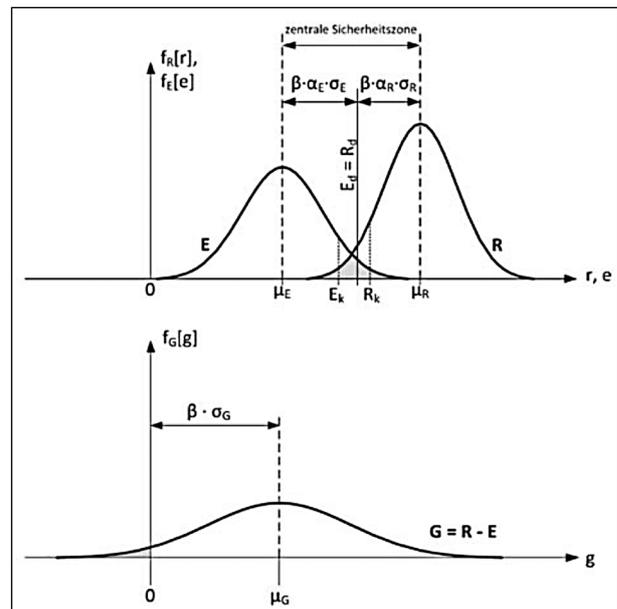


Bild 5: Semi-probabilistisches Sicherheitskonzept (SIEGERT et al. 2015)

Monitoringsystems nur Herstellerangaben zu den Versagenswahrscheinlichkeiten der Sensoren. Wenn es aber Erfahrungswerte zum Ausfall der Sensoren gibt, können diese die ursprüngliche Information aktualisieren. Für das Verfahren der Extremwertverteilung ist relevant, wie oft ein Ereignis in einem bestimmten Zeitraum minimal oder maximal auftreten kann. Beispielsweise ist es für Brücken relevant, wie häufig die Extremwerte der Einwirkungen (Verkehr) auftreten (RALBOVSKY et al.).

Um die Bestimmung der Grenzzustände zu vereinfachen, werden im semi-probabilistischen Modell feste charakteristische Größen für Widerstand und Einwirkung angenommen. Durch die Berücksichtigung dieser festen Werte für Widerstand und Einwirkung in Verbindung mit Teilsicherheitsfaktoren können Bemessungen durchgeführt werden (MEHLHORN 2010). Dieses Vorgehen wird auch als Teilsicherheitskonzept bezeichnet. Im Gegensatz zum voll-probabilistischen Modell geht es hierbei um die Bestimmung einer zentralen Sicherheitszone, welcher zwischen den Mittelwerten der Einwirkung (μ_E) und Reaktion (μ_R) zu finden ist (Bild 5) (SIEGERT et al. 2015).

2.3.2 Restnutzungsdauer

„Restnutzungsdauer ist die Anzahl an Jahren bis zur voraussichtlichen Erneuerung des Bauwerks oder Bauwerkteils“ (BMVBS 2004).

Die Restnutzungsdauer eines Bauwerks kann über die Ermüdung und die Darstellung der Dauerhaftigkeit bestimmt werden.

2.3.2.1 Ermüdung

„Unter Materialermüdung wird die Schädigung oder das Versagen von Werkstoff und Bauteil unter zeitlich veränderlicher, häufig wiederholter Beanspruchung verstanden.“ (RADAJ 1995). Die Ermüdung eines Bauteils aus Beton bzw. Stahlbeton durch wiederholte Beanspruchung verursacht Risse (Entstehung bzw. Einleitung), Rissaufweitung und schließlich das Versagen des Bauteils. Parameter die die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen beeinflussen sind der Spannungszustand, die Mikrostruktur des Materials und die Geometrie. Allerdings ist das Ermüdungsverhalten von unbewehrtem Beton noch nicht abschließend geklärt (FEHLMANN 2012; SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015; TOPUROVA-TODOROVA 2015).

Bei Brücken liegt die Ursache für die Ermüdung in den zyklisch wechselnden Beanspruchungen zum Beispiel durch den Verkehr. Diese führen zu einer Schädigung des Materialgefüges und in der Konsequenz zu einem Ermüdungsversagen des Bauteils (SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015).

Für die Bestimmung der Lebensdauer bezogen auf die Ermüdung können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Zu nennen sind (KESSLER-KRAMER 2002; RADAJ 1995; TOPUROVA-TODOROVA 2015; ZILCH 2011):

- Schwingbreitennachweis
- Rissfortschrittskonzept
- Schadensakkumulation

Der einfachste Nachweis für die Ermüdungssicherheit ist der Schwingbreitennachweis. Mit diesem Nachweis wird belegt, dass die aus der Belastung resultierenden Schwingbreiten kleiner sind als die Grenzschiwingbreite. Dauerschwingversuche bieten die Möglichkeit das Ermüdungsverhalten von Bauteilen von Massivbrücken zu bestimmen. Der Werkstoff wird einer wiederholten Belastung bis zum Versagen ausgesetzt. Die Gegenüberstellung von Spannschiwingbreiten und ertragener Lastwechsel zeigt die Ermüdungsfestigkeit. Für metallische Werkstoffe lassen sich aus einer Vielzahl dieser Versuche die sogenannten Wöhler-Linien bestimmen, welche jeder Spannungsschiwingbreite ($\Delta\sigma$) die er-

tragbaren Lastspiele zuordnen (ZILCH 2011). Aus diesem Konzept können jedoch keine Angaben zum Schädigungsfortschritt oder zur Lebensdauer gemacht werden.

Das Rissfortschrittskonzept wurde auf Basis der linear-elastischen Bruchmechanik, über die Ermittlung des Spannungszuwachses an der Spitze eines Ermüdungsrisses im Stahl ermittelt. Das Ende der Lebensdauer wird in diesem Konzept durch die Bildung eines Risses definiert. Das Verfahren bietet die Möglichkeit bereits vorhandenen Schädigungen mit einzubeziehen und die Reihenfolge der Belastungen zu berücksichtigen. Bei bereits vorhandenen Rissen kann bei einem stabilen Risswachstum die Möglichkeit der weiteren Nutzung bestehen. In diesem Fall kann das Konzept als Mittel zur Lebensdauererlängerung gesehen werden. Dieses Konzept eignet sich allerdings kaum für den Stahlbetonbau, da bei einbetonierten Bewehrungsstäben nicht die Möglichkeit besteht den Riss in zu erkennen (RADAJ 1995; TOPUROVA-TODOROVA 2015; ZILCH 2011).

Eine weitere Möglichkeit den Nachweis der Ermüdungssicherheit zu führen, ist das Verfahren auf Basis der Schadensakkumulation von Palmgren-Miner. Diese Nachweisform wird auch als expliziter Betriebsfestigkeitsnachweis bezeichnet. Grundlage der Hypothese ist die Annahme, dass jeder Wechsel in der Spannung eine Schädigung im Baustoff hervorruft. Diese Schädigungen addieren sich so lange bis eine Grenzschiwingbreite erreicht ist. Die Schädigungen lassen sich durch die Gegenüberstellung der tatsächlichen und ertragen Lastwechsel für jede Spannungsschiwingbreite ermitteln. Die ertragbaren Lastwechsel können aus den Wöhlerlinien des Materials entnommen werden. Darstellbar ist die Schädigung durch den Schädigungsfaktor:

$$D_{vorh} = \sum \frac{n(\Delta\sigma_i)}{N(\Delta\sigma_i)}$$

mit

D_{vorh} Schädigungsfaktor [-]

$n(\Delta\sigma_i)$ auftretende Lastwechsel einer Schwiwingbreite $\Delta\sigma_i$

$N(\Delta\sigma_i)$ ertragbare Lastwechsel einer Schwiwingbreite $\Delta\sigma_i$

Wenn die Grenzschiwingdung $D_{grenz} = 1$ eintritt liegt per Definition Ermüdungsversagen vor (KESSLER-KRAMER 2002; RADAJ 1995; ZILCH 2011).

Die Bestimmung der Ermüdung kann über die beschriebenen Modelle erfolgen. Für den Schwingbreitennachweis und das Konzept der Schadensakkumulation sind die Bestimmung der auftretenden Lastwechsel und deren Schwingbreiten erforderlich. Die auftretenden Schwingbreiten können über den Parameter Dehnung am Stahl, welcher die direkte Messung der Bauwerksreaktion darstellt, bestimmt werden. In Kombination mit den auf das Bauwerk wirkenden Beanspruchungen wie beispielsweise Verkehr, Wind, Temperatur können die Schwingbreiten ermittelt werden. Alternativ kann über die Messung oder Simulation der Verkehrslasten, welche in eine Häufigkeitsverteilung überführt werden, die Spannungsschwingbreite mithilfe von mechanischen Modellen bestimmt werden (ZILCH 2011). Das Konzept der Rissfortschrittsentwicklung erfordert die Bestimmung der Veränderung der Rissweiten. Hierzu eignen sich Dehnungsmessstreifen, induktive Wegeaufnehmer, faseroptische Sensoren oder Schallemissionssensorik (SCHNELLENBACH-HELD ET AL. 2015).

2.3.2.2 Dauerhaftigkeit

Eine weitere Möglichkeit die Restnutzungsdauer eines Bauwerks abzuschätzen besteht in der Bewertung der Dauerhaftigkeit. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird die Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils im Rahmen eines deskriptiven Bemessungskonzepts betrachtet. Wenn die Anforderungen aus DIN EN 206-1:2000 und DIN 1045-2:2001 zu Zusammensetzung und Eigenschaften des Betons erfüllt sind und eine regelmäßige Instandsetzung stattfindet beträgt die Nutzungsdauer 50 Jahre (MÜLLER und VOGEL 2009). Ein geeignetes Konzept auf probabilistischer Basis kann helfen die tatsächliche Lebensdauer bzw. Restlebensdauer abzuschätzen. Eine Möglichkeit bietet das „Performance-Konzept“, in welchem die Lebens- oder Nutzungsdauer ($t_{N(SOLL)}$) entsprechend den Erfordernissen gewählt werden kann. Aus dem zeitlichen Verlauf der Entwicklung von Einwirkung und Widerstand wird die rechnerische Lebensdauer ($t_{N(cal)}$) bestimmt. Die Bemessung nach dem „Performance-Konzept“ soll den Nachweis erbringen, dass die rechnerische Lebensdauer ($t_{N(cal)}$) größer als die gewählte Lebensdauer ($t_{N(SOLL)}$) ist, also $t_{N(cal)} \geq t_{N(SOLL)}$. Dieses Konzept unterscheidet sich vom deskriptiven Konzept dadurch, dass die Lebensdauer nach Erfordernissen ($t_{N(SOLL)}$) gewählt werden kann, der Instandhaltungsaufwand berücksichtigt wird, die zeitliche Entwicklung von Einwirkung und Wider-

stand rechnerisch erfasst wird und der Nachweis $t_{N(cal)} \geq t_{N(SOLL)}$ geführt wird (MÜLLER und VOGEL 2008).

Ziel der Modelle zur Darstellung der Dauerhaftigkeit ist es den Zusammenhang zwischen Einwirkung und Widerstand und der Zustandsentwicklung eines Bauteils aufzuzeigen (Bild 6).

Im oberen Teil von Bild 6 werden Einwirkungen und Widerstand gegenüber gestellt. Für das Lebensdauerprognosemodell wird ein Grenzzustand formuliert, der sich aus der Gegenüberstellung von Einwirkung und Widerstand ergibt. Da Einwirkung und Widerstand Streuungen unterliegen, müssen die jeweiligen physikalischen Modelle probabilistisch formuliert werden. Die Größe des Überschneidungsbereichs bildet ein Maß für die Schädigungswahrscheinlichkeiten (Versagenswahrscheinlichkeit P_f) (MÜLLER und VOGEL 2009, 2008; SCHIEßL und MAYER 2009). Die Schädigungsprozesse lassen sich als Schädigungs-Zeit-Gesetze abbilden und der Schädigungsprozess in verschiedene Phasen einteilen (Bild 6 unten). Ein Grenzzustand ist erreicht, wenn das Bauwerk nicht mehr dem eigentlichen Nutzenstand entspricht (MÜLLER und VOGEL 2008). Ein Beispiel ist die Bewehrungskorrosion, bei der ein Grenzzustand erreicht sein kann, wenn die Depassivierung des Bewehrungsstahls aufgehoben ist (Ende der Einleitungsphase, in Bild 6 unten) (MÜLLER und VOGEL 2008, 2009).

Für die Bestimmung der Lebensdauer von Bestandsbauwerken kann für Bauteile und das komplette

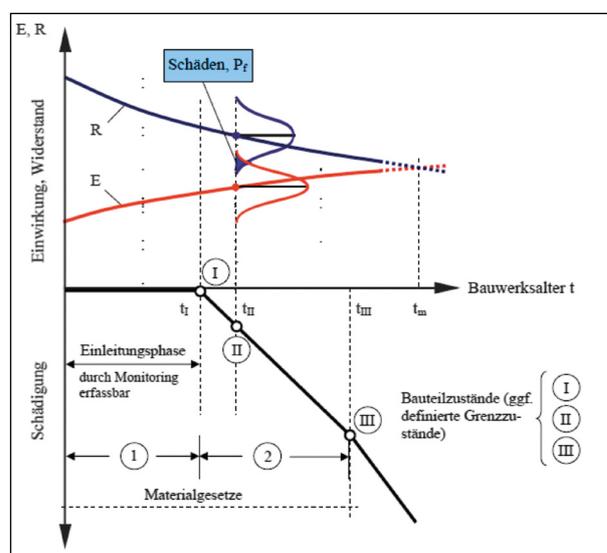


Bild 6: Zustandsentwicklung eines Betonbauteils infolge veränderlicher Einwirkungen und Widerstand (MÜLLER und VOGEL 2009)

Arbeitsschritte	Tätigkeiten
Bauteil- bzw. Bauwerksuntersuchungen	Identifikation von Bauteil- und Bauwerkszustand bzw. der Schäden
	Bestimmung relevanter Materialparameter
	Erfassung und Quantifizierung von Einwirkung und Widerstand
	Identifizierung der Schädigungsart zur Festlegung geeigneter Schädigungs-Zeit-Gesetze
	Statistische Quantifizierung der Modellparameter
Festlegung am Bauteil/ Bauwerk	Definition von Grenzzuständen für entsprechende Schädigungsprozesse
	Festlegung der Nutzungsdauer und zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit
Analytisch-statische Untersuchungen	Statistische Modellierung der Parameter von Einwirkung und Widerstand
	Berechnung der grenzzustandsbezogenen Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit
	Abschätzen der Restlebensdauer

Tab. 1: Arbeitsschritte zur Durchführung einer Lebensdauerprognose (MÜLLER und VOGEL 2008, 2009)

Bauwerk erfolgen. Für die Lebensdauerprognose von Bauteilen sind die folgenden Arbeitsschritte notwendig (MÜLLER und VOGEL 2008, 2009):

Die Tabelle 1 zeigt eine mögliche Vorgehensweise für die Bestimmung der Lebensdauer bei Bauteilen. Bei der Abschätzung der Lebensdauer eines gesamten Bauwerks sind weitere Arbeitsschritte notwendig. Nachdem der Zustand der Bauteile unabhängig voneinander prognostiziert wurde, müssen zur Abschätzung der Lebensdauer des gesamten Bauwerks die Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen und ihr Bedeutung für das Gesamtsystem geklärt werden. Wesentlich sind hierbei die Beurteilung des Versagens einzelner Bauteile und die damit verbundenen Schadensfolgen. Bei dieser Beurteilung handelt es sich um eine Risikoanalyse, welche aus den folgenden Komponenten besteht (MÜLLER und VOGEL 2008, 2009):

- Systemanalyse (Systembeschreibung, Ausfall-effekte, Fehlerbaumanalyse)
- Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit der Systemelemente und Analyse des Systemversagens
- Quantifizierung des Risikos

Bei der Bestimmung der Restlebensdauer über die Dauerhaftigkeit kann Monitoring an unterschiedli-

chen Stellen zum Einsatz kommen. Den Nutzen, den das Monitoring schafft, kann durch die prä-posteriori Bayes'sche Entscheidungsanalyse beschrieben werden. Der Nutzen der Monitoringmaßnahme kann in diesem Fall bereits vor ihrem Einsatz quantifiziert werden. Der Satz von Bayes stellt ein Modell für das Aufnehmen und Verarbeiten von Informationen dar, hierbei wird das Ziel verfolgt die getroffenen Annahmen zu aktualisieren und damit zu verbessern. Im Fall der prä-posteriori Bayes'sche Entscheidungsanalyse wird also der Nutzen quantifiziert, der sich aus der Beschaffung von neuen Informationen ergibt (FABER et al. 2015).

Monitoring kann hier angesetzt werden bei der Bestimmung der Einwirkung (beispielsweise: Verkehrslast, Temperatur und eindringende Feuchtigkeit), der Widerständen (beispielsweise ermittelt über Dehnung oder Schwingungen) und den Schädigungsmodellen. Bei den Schädigungsmodellen ist je nach Modell die Erfassung unterschiedlicher Parameter von Bedeutung (SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015), Tabelle 2.

2.3.3 Anforderungen an die Messung

Für die verschiedenen Ansätze welche in Kapitel 2.3.1 und 2.3.2 beschrieben wurden, werden unterschiedliche Sensoren und Monitoringkonzepte benötigt. In SCHNELLENBACH-HELD et al. (2015) wurde eine Übersicht zu den relevanten Parametern und Sensoren erstellt. Jedem Parameter wie Verkehr, Temperatur oder Dehnung wurden Sensoren zugeordnet, die es ermöglichen diese Parameter zu messen. Aus dem Überblick wird ersichtlich, dass eine Vielzahl von Sensoren zur Verfügung stehen, die Anforderung, die an die Sensoren und die Übertragung gestellt werden sind aber weitestgehend gleich. Wichtige Aspekte sind:

- Langlebige, robuste und redundante Sensoren
- Einfaches und verständliches Handling in Bezug auf Einbau und Datenübertragung
- Auswertung der Daten von Seiten der Nutzer möglich
- Wahre und reproduzierbare Werte
- Störungsfreie Messung
- Sicherheit der Datenübertragung
- Auswahl der Sensorik und der Messperipherie auf die Anwendung bezogen

Schädigungsprozess	Schädigungsmodell	Relevante Parameter
Karbonatisierung	nach SCHIEBL	Betondeckung, Diffusionskonstante, CO ₂ -Gehalt der Luft
	nach Model Code	Feuchteabhängigkeit, Nachbehandlungsabhängigkeit, CO ₂ -Konzentrationsgradient, Witterungsfunktion
Chlorideindringung	nach Model Code	Kritische Chloridkonzentration, Chloridkonzentration in der Tiefe, Betondeckung, Chloridmigrationskoeffizient, Temperatur, Alter des Betons
Bewehrungskorrosion	zum Materialabtrag infolge Korrosion	Jährlicher Korrosionsabtrag, Temperatur
	zum Materialabtrag infolge Korrosion	Korrosionsaktive Zeit, Korrosionsabtragsrate,
	Zur Rissbildung infolge Korrosion	u. a. Zugfestigkeit, Betondeckung, Korrosionsrate, korrosionsaktive Zeit, Porenraum, Expansionsfaktor
Spannungsrissskorrosion	kein Modell vorhanden	
Frost-/Frost-Tausalz-Angriff	Zur Schädigung der Betonstruktur	Kritischer Wert des Wassersättigungsgrades (Widerstandseite), Wassersättigungsgrad (Einwirkungsseite)
	Zur Abwitterung der Betonoberfläche	Temperatur, Betontemperatur,
	Zur Beschreibung der Abwitterung von Beton	Nachbehandlungsfaktor, Alterungsfaktor, Luftgehalt des Betons, Würfeldruckfestigkeit
Alkali-Kieselsäure-Reaktion	kein Modell vorhanden	

Tab. 2: Schädigungsprozesse, -modelle und relevante Parameter (SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015)

Die Langlebigkeit und Robustheit von Sensoren ist von Bedeutung, da es notwendig ist für einen bestimmten längeren Zeitraum zuverlässig Daten produzieren zu können. Um den Fall des Ausfalls von Sensoren kompensieren zu können, ist der Einsatz von redundanten Sensoren notwendig. Wichtig ist dieses beispielsweise bei Korrosionssensoren, die nach einer Instandhaltungsmaßnahme aufgrund von chloridinduzierten Korrosionsschäden eingebaut werden. Es muss gewährleistet sein, dass die Sensoren das erneute Eindringen von Chloriden anzeigen, auch wenn dieses erst nach einigen Jahren oder Jahrzehnten der Fall ist.

Der Einbau der Sensoren sollte nach Möglichkeit relativ einfach möglich sein, da die Nutzung der Sensoren gefördert wird und Fehler vermieden werden können. Von großer Bedeutung ist auch die Übertragung der Messdaten, diese sollte möglichst drahtlos möglich sein. Die einfachste Lösung ist das Auslesen der Daten vom PC des Nutzers. Komplexer ist die Übertragung von Messdaten mittels Telefonie oder Internet. Lange Anfahrten zur Messstelle und mögliche Sperrung von Straßen zum Auslesen der Daten sollten vermieden werden.

Die Auswertung der Daten sollte von den Nutzern der Sensoren selbst durchgeführt werden können. Hierbei können entsprechende Softwaretools helfen den Umgang mit den Daten zu vereinfachen.

Notwendig ist, dass die gemessenen Werte richtig und reproduzierbar sind. Im Hinblick auf Korrosionssensoren heißt das beispielsweise, dass bei der Anzeige von Korrosion Instandhaltungsmaßnahmen aufgenommen werden, dieses ist aber nur bei tatsächlich vorhandener Korrosion wirtschaftlich sinnvoll. Eine Plausibilitätsprüfung der Daten sollte automatisch erfolgen.

Mit störungsfreier Messung ist gemeint, dass störende Einflüsse auf die Sensoren an der Messstelle und bei der Übertragung vermieden werden müssen. Hier sind beispielsweise elektrische Felder zu nennen. Hier ist auch von Bedeutung, dass der Einfluss von Temperatur als Stör- und Einflussgröße bestimmt wird und bei der Datenauswertung kompensiert werden kann.

Die Datenübertragung muss geschützt ablaufen, da teilweise wichtige oder geheime Daten übertragen werden.

Die Sensorik muss in Bezug auf die Anwendung und deren Rahmenbedingungen angepasst sein hinsichtlich Anzahl und Position, aber auch in Bezug auf die Monitoringintensität (Messintervall), Messbereich und Auflösung der Daten.

2.4 Zuverlässigkeit

Mit dem Einsatz von Monitoringsystemen an Brücken kann u. a. das Ziel verfolgt werden, die rechnerische Zuverlässigkeit der Brücke zu aktualisieren. Die Zuverlässigkeit eines technischen Systems ist ein Verhaltensmerkmal, das angibt, wie verlässlich eine dem System zugewiesene Funktion in einem Zeitintervall erfüllt wird. Sie unterliegt einem stochastischen Prozess und ist nicht unmittelbar messbar. Der Gewinn an Zuverlässigkeit einer Brücke durch Monitoringmaßnahmen ist allgemein anerkannt, allerdings bisher noch nicht quantifiziert. Aus diesem Grund wurde das Projekt FE15.0625 „Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken“ initialisiert. Das Projekt verfolgt das Ziel, Methoden zur Bewertung des Zuverlässigkeitsgewinns durch Monitoring weiterzuentwickeln. Hierbei ist insbesondere eine Methode zur Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit von Monitoringmaßnahmen relevant und die Faktoren Messfehler, Einfluss von Umweltbedingungen und Ausfall von Messkomponenten spielen eine Rolle.

2.4.1 Methode zur Quantifizierung des Zuverlässigkeitsgewinns

Die nachfolgenden Ausführungen sind (RALBOVSKY et al.) entnommen.

Bei einer Brückenprüfung werden die vorhandenen Schäden am Bauwerk dokumentiert und bewertet. Im Zeitintervall bis zur nächsten Brückenprüfung kann sich ein unerkannter Schaden zu einem gravierenden Schaden entwickeln und damit zu einem Anstieg der Versagenswahrscheinlichkeit führen (Bild 7).

Eine Möglichkeit das Risiko einen gravierenden Schaden nicht zu entdecken zu minimieren sind Monitoringmaßnahmen. Das Monitoring liefert Informationen zum Bauwerk in deutlich kürzeren Abständen und ermöglicht das Einleiten von geeigneten Maßnahmen. Durch dieses Vorgehen ergibt sich ein Zugewinn an Zuverlässigkeit, welcher quantifiziert werden kann.

Relevant für die Bestimmung des Zugewinns ist die Versagenswahrscheinlichkeit der Monitoringmaßnahme. Ein Versagen der Monitoringanlage tritt auf, wenn ein gravierender Schaden nicht rechtzeitig erkannt wird und es so trotz Monitoring zum Versagen des Bauwerks kommt. Das Versagen der Monitoringmaßnahme kann in zwei Arten unterschieden werden:

- Ein gravierender Schaden wird trotz funktionierender Monitoringmaßnahme nicht erkannt (Schadensphase).
- Ein gravierender Schaden tritt auf, bevor die Messdaten ausgewertet und entsprechenden Maßnahmen eingeleitet sind, dies ist möglich durch die normale Dauer der Messwertauswertung oder durch eine Fehlfunktion der Messanlage (Reaktionsphase).

Die Versagenswahrscheinlichkeit der überwachten Tragwerke ($P_{f,\ddot{U}}$) hängt demnach von der Versagenswahrscheinlichkeit in der Schadenserkennungsphase ($P_{f,1D}$) und der Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase ($P_{f,Re}$) ab:

$$P_{f,\ddot{U}} \leq 1 - (1 - P_{f,1D})(1 - P_{f,Re})$$

2.4.1.1 Schadenserkennungsphase

In diesem Kapitel soll die Möglichkeit des Versagens in der Schadenserkennungsphase vorgestellt

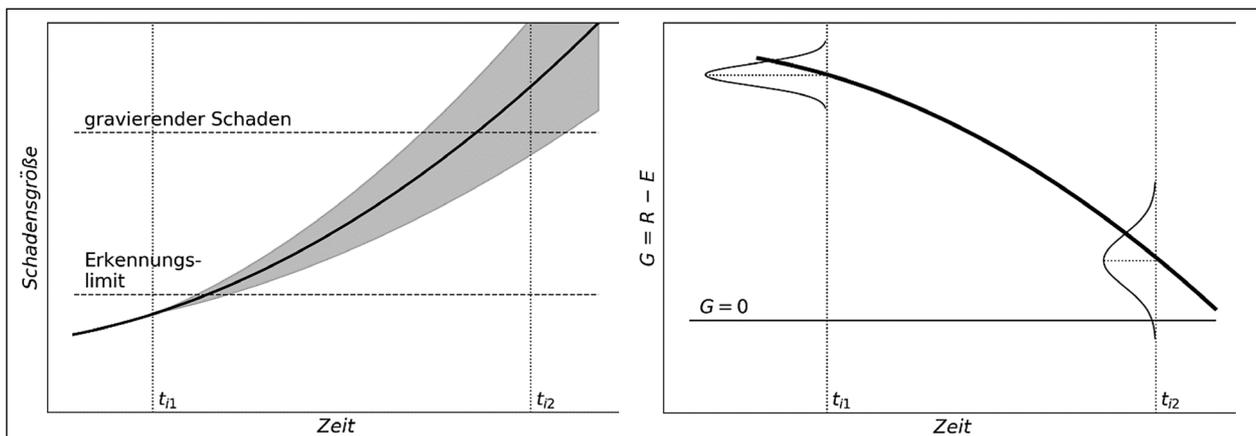


Bild 7: Schema der Schadensentwicklung und der Grenzzustandsfunktion (RALBOVSKY et al.)

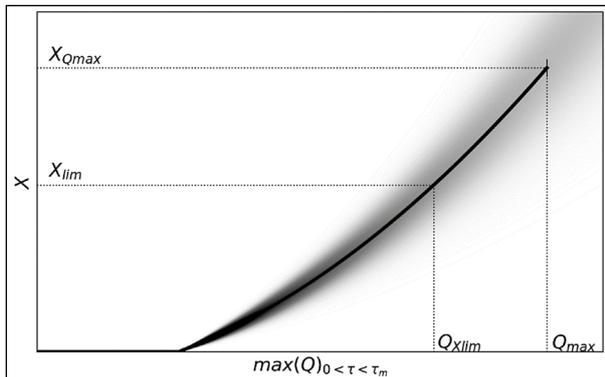


Bild 8: Beziehung zwischen dem Indikator x und der Verkehrslast Q (RALBOVSKY et al.)

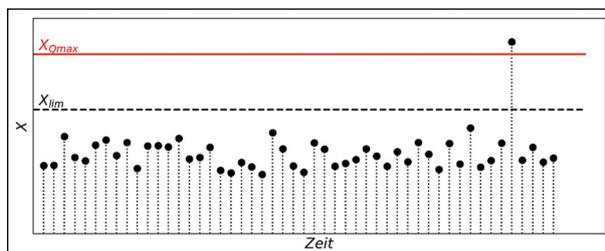


Bild 9: Maximal aufnehmbare Verkehrslast wird erreicht, ohne dass vorher der Schwellwert überschritten wurde (RALBOVSKY et al.)

werden. Relevante Annahmen in diesem Zusammenhang sind, dass der Versagensmechanismus nicht spröde sondern duktil, d. h. mit Vorankündigung ist, ein Verkehrseignis die versagensauslösende Ursache ist und die Indikatoren auf die Verkehrsbelastung sensitiv reagieren. Bild 8 zeigt den Zusammenhang zwischen einem Indikator X (beispielsweise Durchbiegung) und der Verkehrsbelastung Q . Hierbei ist X_{lim} der Schwellwert, der einen Alarm auslöst, X_{Qmax} ist der Indikatorwert, ab dem die Brücke rechnerisch versagt, Q_{xlim} ist die zum Schwellwert gehörende Verkehrslast, die Auslösung einer Alarms führt und Q_{max} ist der Wert der Verkehrsbelastung, der zum rechnerischen Versagen führt.

In der Schadenerkennungsphase ($P_{f,ID}$) können zwei relevante Situationen auftreten:

- Ein Schaden tritt auf, ohne dass vorher der Schwellwert überschritten wurde (Bild 9). Hier wird die maximal aufnehmbare Verkehrslast (Q_{max}) erreicht, ohne dass vorher eine Überschreitung des Schwellwerts (X_{lim}) aufgetreten ist. In diesem Fall versagt die Überwachungsmaßnahme.
- Der Schwellwert wird überschritten und eine Warnmeldung ausgelöst, bevor die maximal aufnehmbare Verkehrslast (Q_{max}) überschritten wird

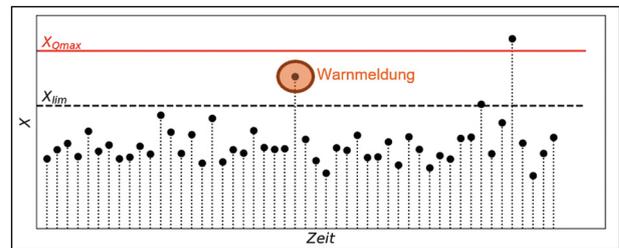


Bild 10: Warnmeldung löst eine risikoreduzierende Maßnahme aus und verhindert das Versagen (RALBOVSKY et al. 2018)

und damit ein Schaden entstanden ist (Bild 10). Mit der Überschreitung des Schwellwert (X_{lim}) werden risikoreduzierende Maßnahmen, wie beispielsweise eine Sanierung oder Lastbeschränkung eingeleitet, um das Tragwerksversagen zu verhindern.

In der Schadenerkennungsphase werden die Auswirkungen von Verkehrseignissen auf das Tragwerk erst nach dem jeweiligen Ereignis durch die Überwachungsanlage ausgewertet. Wenn sich eine versagensauslösende Laststellung bereits auf der Brücke befindet, gibt es keine Möglichkeit des Eingriffs mehr. Daher setzt sich die Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks in der Schadenerkennungsphase ($P_{f,ID}$) bei der Schwellwertüberwachung aus der Wahrscheinlichkeit von zwei Versagensfällen zusammen:

- Ein plötzlich versagensauslösendes Verkehrseignis (Q_{max}) tritt ein, bevor X_{lim} durch ein kleineres Verkehrseignis (Q_{xlim}) überschritten wurde; hier gilt $Q_{max} > Q_{xlim}$. Die Wahrscheinlichkeit dieses Falls wird mit $P_{f,xlim}$ bezeichnet.
- Der Schwellwert wurde so hoch gesetzt wurde, dass selbst bei dessen Einhaltung ein Versagen nicht ausgeschlossen werden kann; hier gilt $Q_{max} < Q_{xlim}$. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird in diesem Fall mit $P_{f,xmax}$ bezeichnet.

Dann gilt in der Schadenerkennungsphase:

$$P_{f,ID} = 1 - (1 - P_{f,xlim}) \cdot (1 - P_{f,xmax}) \\ \approx P_{f,xlim} + P_{f,xmax}$$

Auf die Ermittlung von $P_{f,xmax}$ wird hier nicht näher eingegangen. Es ist sinnvoll, den Schwellwert so zu wählen, dass ein Tragwerksversagen vor dessen Erreichen praktisch ausgeschlossen werden kann. Dann ist $P_{f,xmax} \approx 0$. Notwendig ist dann nur noch die Bestimmung von $P_{f,xlim}$:

$$P_{f,xlim} = P_{Qxlim} \cdot k_{lm}$$

- Der Faktor k_{lm} ist ein Koeffizient, der sich aus unterschiedlichen Verteilungen der Versagenswahrscheinlichkeit der maximalen Verkehrslast ($P_{Q_{max}}$) und der Verkehrslast, welche zum auslösen eines Alarmwerts (P_{Qxlim}) führt, ergibt. Aufgrund der Unsicherheiten für Q_{max} und Q_{xlim} handelt es sich um eine Verteilungsfunktion. Die Auswertung der Verteilungsfunktion ist nur über eine nichtlineare probabilistische Simulation möglich. Es wird daher vorgeschlagen, vereinfachte Annahme zur Streuung der Parameter anzunehmen. In Bezug auf die Brückeneigenschaften ist dieses beispielsweise über die Materialeigenschaften möglich.
- P_{Qxlim} wird als die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, dass Q_{xlim} überschritten wird. P_{Qxlim} kann aus der Messdatenanalyse bestimmt werden.
Die Bestimmung von P_{Qxlim} setzt sich aus diesen Schritten zusammen:
 - Messung der Verkehrslast (Indikator X)
 - Auswertung der Tagesmaxima von Indikatorwerten,
 - Anpassung einer Extremwertverteilung (z. B. Gumbel) an diese Werte,
 - Umrechnung der Extremwertverteilung für den Bezugszeitraum von 1 Jahr (Jahresmaxima),
 - Bestimmung der Überschreitungswahrscheinlichkeit von X_{lim} für aktuelle Werte der Tagesmaxima aus laufender Überwachung.

In einem ersten Schritt wird über einen repräsentativen Zeitraum der Indikatoren X (beispielsweise Durchbiegung verursacht durch Verkehrsbelastung) gemessen. Im Anschluss wird aus dem Verlauf der Indikatorwerte (beispielsweise Mittelwerte von temperaturkompensierten Durchbiegungsmessdaten) die Verteilung der Extremwerte (hier Tagesmaxima) ermittelt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Anpassung an die Tagesmaxima der Indikatorwerte an eine Verteilung.

Diese Verteilung der Tagesmaxima kann dann zur Verteilung der Jahresmaxima umgerechnet werden, unter der Annahme, dass der Verlauf der Indikatorwerte einen stationären Prozess darstellt. Bild 11 zeigt die Überschreitungswahrscheinlichkeiten der bezogenen Verkehrslast Q/Q_k in vier Zeiträ-

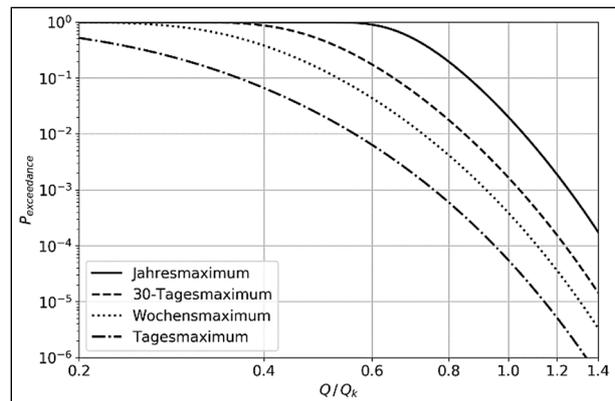


Bild 11: Überschreitungswahrscheinlichkeiten der bezogenen Verkehrslast in den Perioden Tag, Woche, 30 Tage und Jahr (RALBOVSKY et al.)

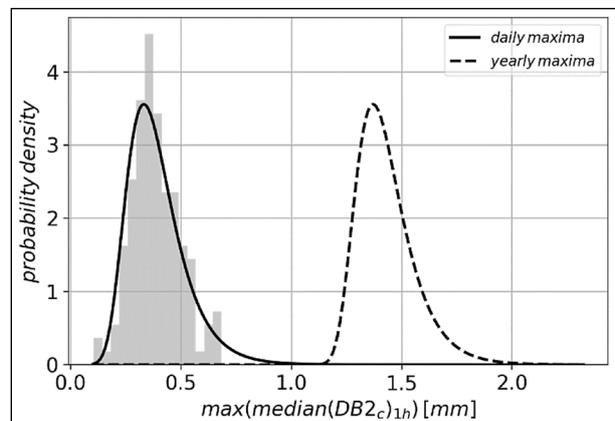


Bild 12: Extremwertverteilung der Tages- und Jahresmaxima am Beispiel der temperaturkompensierten Durchbiegung (RALBOVSKY et al.)

men (1 Tag, 7 Tage, 30 Tage, 1 Jahr). Hierbei ist die Verkehrslast Q auf den charakteristischen Wert Q_k bezogen.

Bild 12 zeigt die Verteilung der Extremwerte bei Tages- und Jahresmaxima am Beispiel der temperaturkompensierten Durchbiegung.

Während des aktiven Monitorings sollte die Verteilung der Jahresmaxima der Indikatorwerte an aktuelle Messwerte angepasst werden. Wenn das aktuell gemessene Tagesmaximum den Mittelwert des Tagesmaximums überschreitet, kommt es zur Anpassung des Jahresmaximums, welcher in die Berechnung einfließt. Das Tagesmaximum wird um den Betrag $\Delta\mu_x$ verschoben. Der Betrag $\Delta\mu_x$ ist die Differenz zwischen dem aktuellen Tagesmaximum des Indikators und dem Mittelwert der zuvor ermittelten Verteilung der Tagesmaxima. Falls diese Differenz negativ ist, kann dieser Schritt übersprungen werden. Die Verteilung der Jahresmaxima verschiebt sich dann um den gleichen Wert ($\Delta\mu_x$). Bild

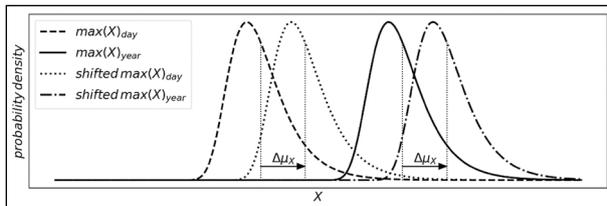


Bild 13: Verschiebung der Indikator-Extremwertverteilung während der laufenden Überwachung (RALBOVSKY et al.)

13 zeigt die Verschiebung der Extremwerte um den Betrag $\Delta\mu_x$.

Die Bestimmung von P_{Qxlim} ist mit der folgenden Gleichung möglich:

$$P_{Qxlim} = 1 - CDF_{\max(X)_{year,shifted}}(X_{lim})$$

Hierbei stellt $CDF_{\max(X)_{year,shifted}}(X_{lim})$ die Verteilungsfunktion der verschobenen Jahresmaxima dar.

2.4.1.2 Reaktionsphase

Die Reaktionsphase ist der Zeitraum zwischen dem Auftreten eines gravierenden Schadens und der benötigten Zeit die Messdaten auszuwerten oder die risikoreduzierenden Maßnahmen umzusetzen. Der Zeitraum kann durch Fehlfunktionen der Monitoringanlage verlängert werden. Die Zeitverzögerung zwischen dem Auftreten eines detektierbaren gravierenden Schadens und der Einleitung entsprechender Maßnahmen wird als Reaktionsphase bezeichnet.

Die gesamte Dauer der Reaktionsphase t_p beinhaltet:

- normalen Messdauer (t_m)
- Dauer von Datenverarbeitung und Prüfung (t_{pr})
- Messdauererweiterung aufgrund von Ausfällen (Δt_m)
- Dauer der Maßnahmenumsetzung (t_{act}).

Die normale Messdauer (t_m) ist abhängig vom Indikator und seiner Messdauer. Wenn beispielsweise der 1 h-Median der Durchbiegung als Indikator genutzt wird, beträgt die normale Messdauer 1 Stunde. Für den Fall das der Indikator durch das Tagesmaximum abgebildet wird, beträgt die normale Messdauer 24 Stunden.

Die Datenverarbeitung und Prüfung erfolgt meist über automatisierte Prozesse, welche relativ schnell

ablaufen, teilweise in Echtzeit. Daher kann für die Dauer von Datenverarbeitung und Prüfung (t_{pr}) von einer Zeitspanne von maximal 1 Stunde ausgegangen werden.

Weiterhin kann es zu Verlängerungen in der Reaktionsphase aufgrund von Ausfällen (Δt_m) kommen. Ausfälle oder Defekte der Monitoringanlage werden als temporärer Funktionsverlust der Anlage betrachtet, unter der Annahme, dass eine Reparatur der Monitoringanlage veranlasst wird. Die Verlängerung aufgrund von Ausfällen oder Defekten konnte im Rahmen der Bearbeitung nicht aus Literaturdaten oder Herstellerangaben abgeschätzt bzw. bestimmt werden. Daher wurde im Projekt eine Umfrage für die Anbieter von Bauwerksüberwachungen als Dienstleitung (z. B. Ingenieurbüros) erstellt. Das Hauptinteresse dieser Umfrage liegt in der Zuverlässigkeit der Anlagen. Die Anbieter wurden nach den Aspekten: temporäre Ausfälle der Anlage mit Unterbrechung der Datenerfassung; temporäre Ausfälle der Funkverbindung ohne Unterbrechung der Datenerfassung; teilweise fehlende Daten einzelner Sensoren; teilweise ungültige/nicht-plausible Daten; mangelhafte Datenqualität (z. B. starkes Rauschen, Störeinflüsse); problematische Interpretation der Daten, Reparaturdauer und dem Gesamtanteil fehlender Daten gefragt. Mit den Daten wurden dann Ausfallraten für einzelne Sensorarten, der Gesamtanteil der fehlenden Daten und die Dauer der Reparatur bestimmt. Die Fragebogen wurden ausgewertet und Verteilungsfunktionen für alle erhobenen Daten ermittelt. Diese Verteilungsfunktionen können genutzt werden, wenn keine Herstellerangaben vorliegen. Für den Anteil an fehlenden Daten und die durchschnittliche Reparaturdauer hat die Auswertung der Fragebogen die in Bild 14 gezeigte Verteilung ergeben.

Das Monitoringsystem besteht aus einer Kette von Komponenten, die Kombination der Ausfallrate der einzelnen Komponenten ist relevant für die Gesamtausfallrate. Weiterhin können Daten ungültig sein, d. h. die Daten fehlen. Die Verfügbarkeit der Daten ergibt sich aus der Kombination von Komponentenausfall und fehlenden Daten. Mit dem Ausfall des Systems ergibt sich eine Verlängerung der Messdauer um die Reparaturdauer bis der benötigte Indikator zur Verfügung steht. Die Messdauererweiterung ist als probabilistische Variable definiert, die Werte bis zu ca. 30 Tage annehmen kann. Bild 15 zeigt die Messdauererweiterung (Δt_m):

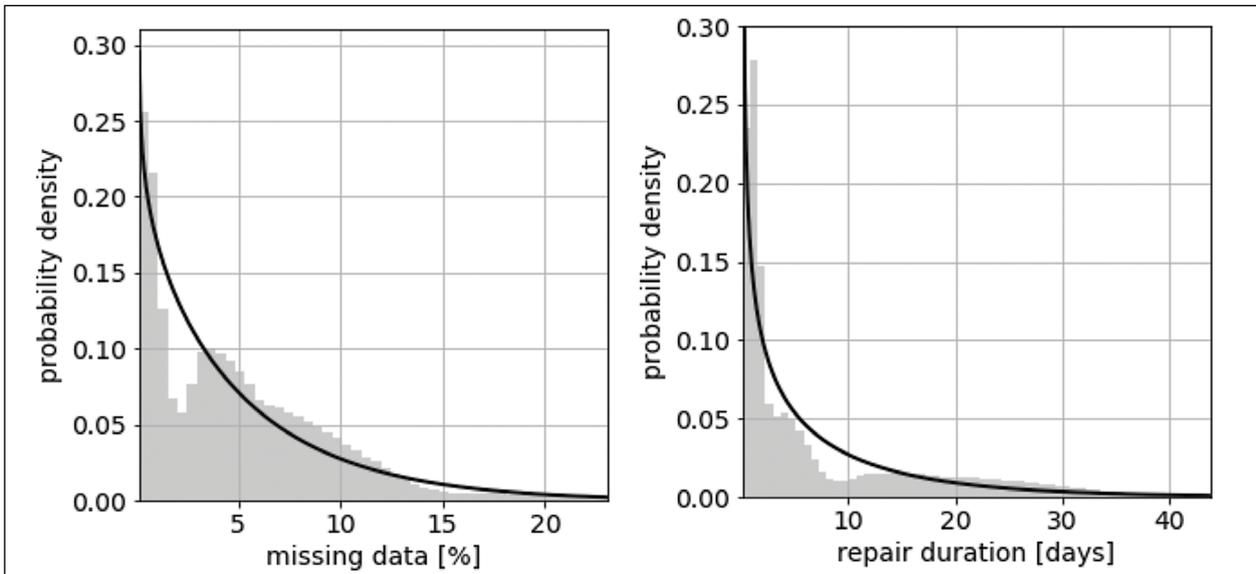


Bild 14: Ausgewertete Verteilung für den Gesamtanteil der fehlenden Daten und der durchschnittlichen Reparaturdauer (RALBOVSKY et al.)

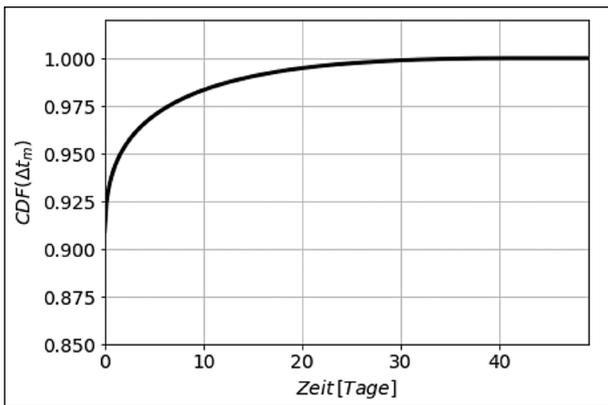


Bild 15: Verteilungsfunktion der Messdauererlängerung Δt_m für einen Indikatoren (RALBOVSKY et al.)

Die Dauer der Maßnahmenumsetzung (t_{act}) hängt von der gewählten Maßnahme, und von der Organisation ihrer Umsetzung ab. Sie kann grundsätzlich Werte von ein paar Stunden bis zu mehreren Monaten annehmen.

Die Reaktionsphase lässt sich dann aus der Addition der einzelnen Messzeiten bestimmen:

Bei der Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase sind die beiden folgenden Fälle zu unterscheiden:

$$t_p = t_m + t_{pr} + \Delta t_m + t_{act}$$

- Der Schwellwert des Indikators wurde nicht überschritten.
- Eine Warnmeldung wurde durch die Schwellwertüberschreitung ausgelöst.

Für den Fall, dass der Indikatorschwellwert nicht überschritten wird, ist die Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks $P_{f,Re,1}$ dadurch definiert, dass die maximal aufnehmbare Verkehrslast im Zeitraum der Reaktionsphase (t_p) überschritten wird. Die Versagenswahrscheinlichkeit im Zeitraum t_p kann durch eine voll-probabilistische Berechnung mit reduzierten Lastannahmen ($Q(t_p)$) ermittelt werden.

Für den Fall, dass eine Warnmeldung ausgelöst wurde, wird davon ausgegangen, dass eine entsprechende Maßnahme eingeleitet wird. Die Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f,Re,2}$ ist hier durch die maximal aufnehmbare Verkehrslast im Zeitraum (t_{act}), also dem Zeitraum der Maßnahmenumsetzung, definiert ($P_f(Q(t_{act}))$). Grundsätzlich ist t_{act} kleiner als t_p ist. Aber durch die Überschreitung des Schwellwertes $X \geq X_{lim}$, kann sich die Schädigung auf eine Reduktion des Tragwerkswiderstandes auswirken. Falls der Tragwerkswiderstand durch die Schwellwertüberschreitung nicht betroffen ist, und zeitabhängige Degradation vernachlässigt werden kann, reduziert sich $P_{f,Re,2}$ zu ($P_f(Q(t_{act}))$) und braucht nicht ermittelt werden, da $P_{f,Re,1}$ dominiert.

Die beiden Fälle haben keine Überschneidungen, deshalb kann als Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase $P_{f,Re}$ der größere Wert von $P_{f,Re,1}$ und $P_{f,Re,2}$ angesetzt werden.

$$P_{f,Re}(t) = \max[P_{f,Re,1}(t), P_{f,Re,2}(t)]$$

2.4.2 Anwendung am Fallbeispiel (Hochstraße Gifhorn)

Die nachfolgenden Ausführungen sind (RALBOVSKY et al.) entnommen.

Das entwickelte Verfahren wurde am Fallbeispiel Hochstraße Gifhorn angewendet. Es handelt sich um eine zweifeldrige vorgespannte Plattenbrücke mit 9 Feldern. Die Brücke wurde für ein Eigenprojekt der Universität Braunschweig mit Sensorik ausgestattet und Messdaten liegen vor. Das Monitoringsystem der Brücke überwacht in den Feldern 8 und 9 Schubverformung, Längsdehnung, Durchbiegung und Temperatur (Bild 16).

Am Bauwerk wurden u. a. zwei Durchbiegungssensoren (DB1 und DB2), vier Rissweitesensoren (S1 bis S3) und zehn Temperatursensoren (T1 bis T10) installiert. Bild 17 zeigt die Position der Sensoren an der Brücke. Mit den Messungen wird das Ziel verfolgt die langsam veränderlichen Tragwerksverformungen der Brücke zu bestimmen.

2.4.2.1 Messdatenauswertung

Der erste Schritt der Analyse ist die Temperaturkompensation der Messdaten. Im vorliegenden Fall wurde die Temperaturkompensation über ein Regressionsmodell vorgenommen. Dieses war notwendig, da die Temperaturverteilung im Bauwerk

für die Kompensation der Messwerte entscheidend ist.

Im nächsten Schritt wurden aus den temperaturkompensierten Messwerten Indikatoren gebildet. Die Indikatoren wurden aus den 1-Stunden-Medianen der Messwerte gebildet.

Für die Indikatoren (1-Stunden-Mediane) wurden im nächsten Schritt die Extremwertverteilungen bestimmt. Als Grundlage wurden die Tagesmaxima gewählt. Aus der Verteilung der Tagesmaxima wurde dann die Verteilung der Jahresmaxima bestimmt. Das Vorgehen entspricht dem in Kapitel 2.4.1.1.

2.4.2.2 Nichtlineare Finite-Element-Modellierung

Für die weitere Analyse der Daten ist es notwendig, dass die Indikatoren zur Verformung mit den Verkehrsextremlasten in Bezug gesetzt werden. Hierzu wurde ein nichtlineares Finite-Element-Modell der Brücke erstellt. Der Oberbau der Brücke wurde als Volumenmodell abgebildet und die schlaaffe Bewehrung und die Vorspannung wurden modelliert. Um das Brückenmodell zu testen wurde ein Vergleich mit den Ergebnissen der Probelastung aus SIEGERT et al. (2015) vorgenommen. Hierbei konnte eine relativ gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten festgestellt wer-

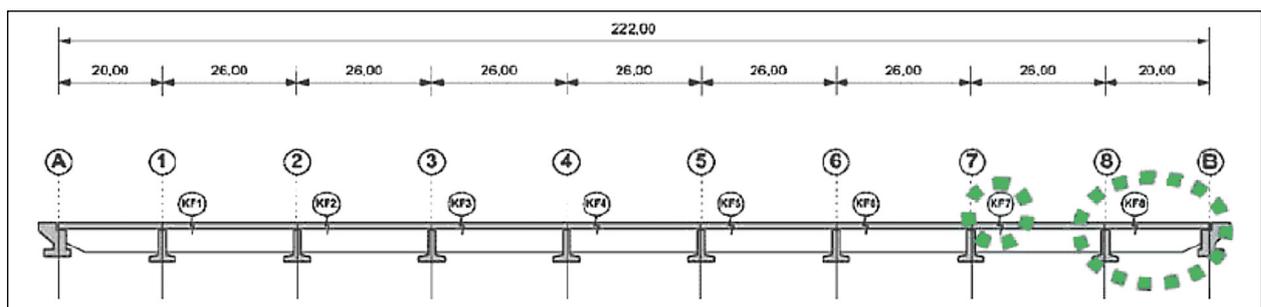


Bild 16: Hochstraße Gifhorn: Darstellung der überwachten Bereiche (SIEGERT et al. 2015)

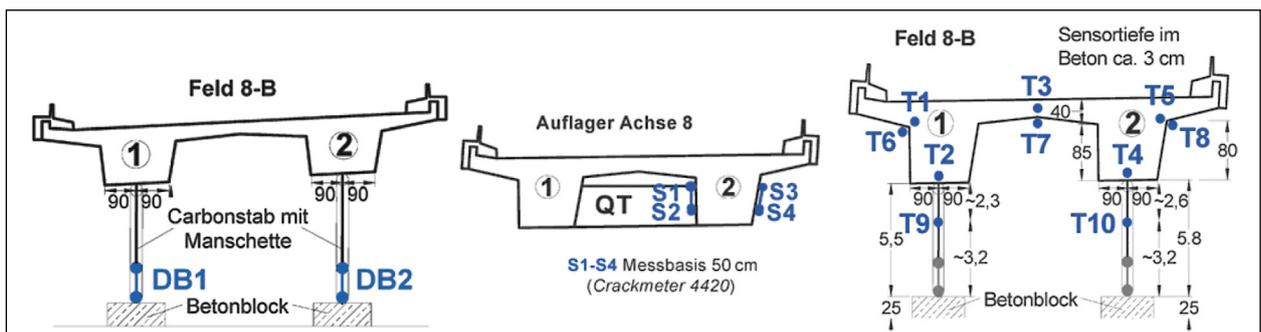


Bild 17: Position der Durchbiegungssensoren (DB), der Rissweitesensoren (S) und der Temperatursensoren (T) (SIEGERT et al. 2015)

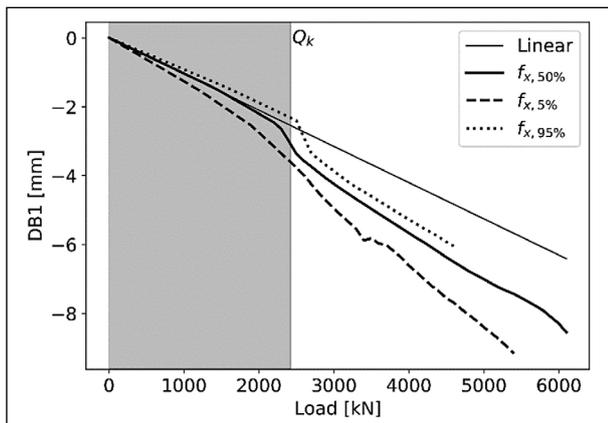


Bild 18: Deformation im Feld 9 bei Sensor DB1 bei Biegebelastung für 5 %-, 50 %- und 95 %-Quantile der Materialkennwerte (RALBOVSKY et al.)

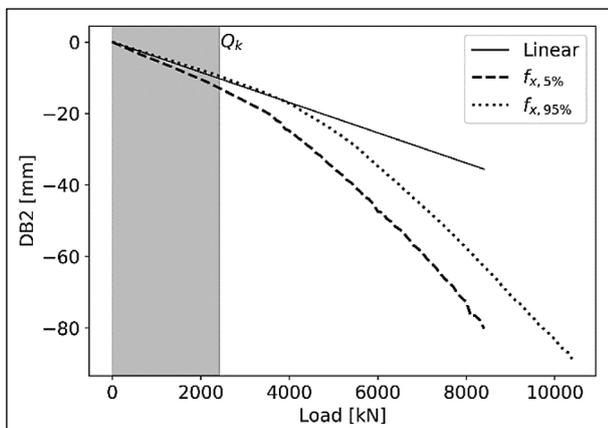


Bild 19: Deformation im Feld 9 bei Sensor DB2 bei Schubbeanspruchung. Laststellung 3,43 m vom Lager entfernt (20°) für das 5 %-, und 95 %-Quantil der Materialfestigkeiten (RALBOVSKY et al.)

den. Abweichungen können u. a. auf Messfehler zurückgeführt werden.

Um die Verformung der Brücke unter Verkehrslast bestimmen zu können, wurden Lasten an verschiedenen Stellen des Modells angebracht. Um ein Biege- und Schubversagen zu simulieren, wurden nichtlineare Berechnungen in vier Laststellungen durchgeführt.

Als Biegebelastung wurden vier Lastflächen simuliert, welche in der Feldmitte positioniert wurden. Es zeigt sich, dass bereits unter der charakteristischen Verkehrslast ($Q_k = 2421$ kN) plastische Verformungen und Risse an der Balkenunterseite zu erkennen sind. Plastische Verformungen nehmen mit der Erhöhung der Belastung zu und bei 4310 kN beginnen die Bewehrungsstäbe sich zu verformen und ab 5700 kN die Vorspannung. Die Biegungsbeanspruchung kann mit den Dehnungssensoren in der Feldmitte gut abgeschätzt werden. Um die Streuung der

Ergebnisse abzuschätzen, wurden Simulationen der 5 % und 95 % - Quantile der Materialkennwerte bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 18 gezeigt. Die Simulationen lassen sich mit gemessenen Daten der Sensoren übereinbringen.

Für die Schubbelastung wurden Belastungsflächen im Abstand von 1,25 m, 2,16 m und 3,43 m entfernt vom Lager positioniert. Bei der Laststellung von 1,25 m lassen sich erste Risse erst nach Erreichung der charakteristischen Verkehrslast (Q_k) erkennen. Bei den Laststellungen von 2,16 m und 3,43 m bilden sich Risse deutlich früher aus. Um die Streuung der Ergebnisse abzuschätzen, wurden auch die Simulationen mit dem 5 % und 95 %-Quantil der Materialkennwerte durchgeführt. Hier ergeben sich für die Laststellung in 3,43 m Entfernung vom Lager für die Durchbiegung die in Bild 19 gezeigte Deformationen. Auch hier lassen sich die Simulationen mit gemessenen Daten der Sensoren übereinbringen.

2.4.2.3 Zuverlässigkeit

Um den Zugewinn an Zuverlässigkeit zu bestimmen zu können, werden die Zuverlässigkeit ohne Überwachung und mit Überwachung miteinander verglichen.

Die Bestimmung der Zuverlässigkeit erfolgte durch eine voll-probabilistische Berechnung mit einem linearen Finite-Element Modell. Die Berechnungen wurden mit einer Sampleanzahl von 100.000 durchgeführt, hiermit wurden Einwirkungen und Widerstände bestimmt und die entsprechenden Grenzfunktionen erstellt.

Die Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen in Form von Versagenswahrscheinlichkeiten und Zuverlässigkeitsindexe ausgewählter Grenzzustände.

Die Versagenswahrscheinlichkeit in der Schadenserkennungsphase ($P_{f,ED}$) hängt von dem Reduktionsfaktor k_{lm} und der Überschreitungswahrscheinlichkeit (P_{QXlim}) des gewählten Indikator-Schwellwertes (X_{lim}) ab. Der Schwellwert X_{lim} wird idealerweise so gewählt, dass er einerseits ausreichend Abstand zu den aktuellen Messwerten, andererseits auch ausreichend Abstand zu den Indikatorwerten im Grenzzustand hat. Der Reduktionsfaktor k_{lm} wurde durch eine Samplingmethode bestimmt. Das heißt es wurde eine große Anzahl von Samples modelliert, mit der die Bestimmung von k_{lm}

möglich ist. Die Überschreitungswahrscheinlichkeiten (P_{Qxlim}) wurde gemäß dem in Kapitel 2.4.1.1 beschriebenen Vorgehen bestimmt.

Die Versagenswahrscheinlichkeiten für verschiedene Messwerte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase ist von der Dauer dieser Phase abhängig, diese setzt sich aus Mess- und Reaktionsdauer zusammen. Für die normale Messdauer wird ($t_m = 24h$) angesetzt, da für die Indikatorbildung die 1-Tages-Maxima der temperaturkompensierten Messwerte benutzt wurden. Die Verlängerung der normalen Messdauer Δt_m ist durch Ausfälle der Überwachungsanlage möglich. Für die Bestimmung der Verlängerung der normalen Messdauer wurden die Auswertungen der Befragung der Betreiber von Monitoringanlagen genutzt. Die Reaktionsdauer wird mit $t_{act} = 7 \text{ Tage}$ angesetzt, d. h. es wird angenommen, dass spätestens 7 Tage nach dem Auslösen einer Warnmeldung eine risikoredu-

Grenzzustand	P_f	β
Biegemoment Randfeld	7.627e-13	7.072
Schubkraft Randfeld	0.855	-1.057

Tab. 3: Versagenswahrscheinlichkeiten P_f und Zuverlässigkeitsindexe β ausgewählter Grenzzustände (RALBOVSKY et al.)

$P_{f,ID}$	DB2 [mm]	S3 [mm]	S4 [mm]
10^{-8}	0.84	0.123	0.144
10^{-7}	1.07	0.134	0.159

Tab. 4: Schwellwerte für verschiedene Versagenswahrscheinlichkeiten, mit berücksichtigten Messunsicherheiten (RALBOVSKY et al.)

Grenzzustand	$P_{f,Re,1}$	$\beta_{Re,1}$
Biegemoment Randfeld	1.504e-15	7.891
Schubkraft Randfeld	0.621	-0.307

Tab. 5: Versagenswahrscheinlichkeiten $P_{f,Re,1}$ und zugehörige Zuverlässigkeitsindexe (RALBOVSKY et al.)

Grenzzustand	$P_{f,ID}$	$P_{f,Re,1}$	$P_{f,\bar{U}}$
Biegemoment Randfeld	10^{-8}	$1,504 \cdot 10^{-15}$	10^{-8}
Schubkraft Randfeld	10^{-7}	0,621	0,621

Tab. 6: Versagenswahrscheinlichkeiten $P_{f,ID}$, $P_{f,Re,1}$ und $P_{f,\bar{U}}$ (RALBOVSKY et al.)

Grenzzustand	Ohne Überwachung		Mit Überwachung		$\Delta\beta_{\bar{U}}$
	P_f	β	$P_{f,\bar{U}}$	$\beta_{\bar{U}}$	
Biegemoment Randfeld	$7,627 \cdot 10^{-13}$	7,072	10^{-8}	5,612	-1,46
Schubkraft Randfeld	0,855	-1,057	0,621	-0,308	+0,749

Tab. 7: Zugewinn der Zuverlässigkeit durch die Überwachungsmaßnahme (RALBOVSKY et al.)

zierende Maßnahme umgesetzt ist. Die Dauer der Datenverarbeitung t_{pr} , die normalerweise bis ca. 1 Stunde dauert, kann vernachlässigt werden.

Als nächstes erfolgt die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase. Bei der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wird von einem verkehrslastbedingten Schadensmechanismus ausgegangen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass es beim Erreichen des Schwellwertes, der die Warnmeldung auslöst, noch zu keiner Reduktion der Tragfähigkeit kommt. Deshalb braucht $P_{f,Re,2}$ nicht ermittelt werden.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f,Re,1}$ gemäß Kapitel 2.4.1.2 sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Um den operativen Gewinn an Zuverlässigkeit bestimmen zu können, werden die Versagenswahrscheinlichkeiten der Schadenerkennungs- und Reaktionsphase verbunden. An dieser Stelle wird ein akzeptierter Wert von $P_{f,ID} = 10^{-8}$ für das Biegeversagen und $P_{f,ID} = 10^{-7}$ für das Schubversagen gewählt. Bei Einhaltung dieser Grenzwerte und unter Berücksichtigung der Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase ergeben sich für die Versagenswahrscheinlichkeit des Tragwerks unter Berücksichtigung der Überwachungsmaßnahme ($P_{f,\bar{U}}$) die Werte in der Tabelle 6.

Der Vergleich dieser Versagenswahrscheinlichkeiten mit der Versagenswahrscheinlichkeit ohne Überwachung ist in der Tabelle 7 dargestellt. Der Zugewinn der operativen Zuverlässigkeit durch die Überwachungsmaßnahme $\Delta\beta_{\bar{U}}$ ist in der letzten Spalte gelistet.

Beim Biegemoment im Randfeld war der Zuverlässigkeitsindex schon ohne Überwachung hoch. Dadurch, dass bei der Schwellwertüberwachung eine akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit in der Schadenerkennungsphase gewählt wurde, die höher als ohne Überwachung war, ergab sich hier ein negativer Zugewinn. Die Überwachung dieses Grenzzustandes erscheint deshalb nicht zweckmäßig. Beim Grenzzustand des Schubs, der ohne Überwachung kritisch war, ergab sich ein Zugewinn

der operativen Zuverlässigkeit. In der Schadenserkennungsphase konnte hier eine geringere Versagenswahrscheinlichkeit erreicht werden. Das ist vor allem dadurch bedingt, dass es laut den nichtlinearen Simulationen noch genug Verformungsreserven vor dem Erreichen des Grenzzustandes gibt. Bei der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit in der Reaktionsphase wurde auf die linearen Modelle zurückgegriffen, hierdurch konnte die Versagenswahrscheinlichkeit reduziert werden. Bei der Nutzung der nichtlinearen Finite-Element-Simulationen könnten wahrscheinlich höhere Reduktionen der Versagenswahrscheinlichkeit erreicht werden.

2.4.3 Nutzung der Methode in der Praxis

Eine einfache Anwendung des Verfahrens in der Praxis ist aktuell nicht möglich, da zur Quantifizierung des Zuverlässigkeitsgewinns belastbare Messdaten vorhanden sein müssen und aufwendige Berechnungen (z. B. nichtlineare Finite-Element-Simulationen) notwendig sind. Eine Vereinfachung der Methode, die Erweiterung auf weitere Anwendungsfälle (bisher Tragfähigkeit und Schwellwertverfahren) und die Entwicklung einer Handlungsanweisung bzw. eines Umsetzungstool (z. B. in Excel) sind notwendig, um einen Eingang in die Praxis zu ermöglichen. Die Nutzer des Verfahrens sind Straßenbauverwaltungen und Ingenieurbüros.

Die Nachrechnungsrichtlinie des BMVI, welche das Ziel hat, die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit einer bestehenden Brücke unter Beachtung des gestiegenen Verkehrsaufkommen und der Weiterentwicklung der Bautechnik zu beurteilen, benennt Kompensationsmaßnahmen. Kompensationsmaßnahmen sind Maßnahmen, welche die weitere verkehrliche Nutzung eines Bauwerks sicherstellen. Hierbei wird zwischen verkehrlichen Kompensationsmaßnahmen (z. B. Geschwindigkeitsbeschränkung) und kompensierenden Überwachungsmaßnahmen unterschieden. Zu den kompensierenden Überwachungsmaßnahmen sind gehören u. a. auch der Einsatz von Monitoringanlagen (BMVBS 2011b).

Die kompensierenden Überwachungsmaßnahmen werden bis heute selten eingesetzt, u. a. deshalb, weil nicht klar ist, welchen Gewinn an Zuverlässigkeit der Einsatz eines Monitorings bringt. Das hier gezeigt Verfahren ist ein Schritt um die Anwendung der kompensierenden Überwachungsmaßnahmen zu fördern. Relevant ist, dass die Methode weiterentwickelt wird, sodass die Möglichkeit be-

steht, den Zuverlässigkeitsgewinn bereits vor der Installation des Monitorings abzuschätzen.

Eine Möglichkeit um den Nutzen einer Maßnahme vor der Installation der Monitoringanlage zu bestimmen kann die Verwendung von Metamodellen sein. Das Ziel von Metamodellen ist die Annäherung an ein komplexes Phänomen. Die Erstellung eines Metamodells ist komplex, aber die spätere Anwendung mit wenig Aufwand verbunden. Ziel ist dann die Abschätzung des voraussichtlichen Zugewinns der operativen Zuverlässigkeit, eventuell in Form eines Wertebereichs mit definiertem Konfidenzintervall (RALBOVSKY et al.).

3 Wirtschaftliche Bewertung von Monitoringmaßnahmen

Der Einsatz von Monitoringmaßnahmen setzt immer voraus, dass die Nutzung unter wirtschaftlichen Aspekten erfolgt. Eine wirtschaftliche Bewertung von Monitoringmaßnahmen wurde bislang noch nicht vorgenommen. In diesem Kapitel werden eine allgemeine Einführung in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gegeben (3.1.1), Beispiele für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Verkehrsplanung genannt (3.1.2), ein Verfahren für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen vorgestellt (3.2) und das Verfahren an zwei Beispielen demonstriert (3.3).

3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

3.1.1 Methoden der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wirtschaftlichkeit ist das günstige Verhältnis zwischen dem verfolgten Zweck einer Maßnahme und den eingesetzten Mitteln. Hierbei wird zwischen dem Minimal- bzw. Sparsamkeitsprinzip und dem Maximalprinzip unterschieden. Im Minimalprinzip wird angestrebt das beste Ergebnis mit dem geringsten Mitteleinsatz zu erreichen. Im Maximalprinzip soll bei einem festen Mitteleinsatz das beste Ergebnis erreicht werden (BMF 2015; Präsident des BRH 2013).

Zu unterscheiden sind in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einzel- und gesamtwirtschaftliche Methoden. Einzelwirtschaftliche Methoden kommen zur Anwendung, wenn die gesamtwirtschaftlichen As-

pekte vernachlässigbar sind, gesamtwirtschaftliche Methoden, wenn es sich um Maßnahmen mit gesamtwirtschaftlicher Ausprägung handelt (BMF 2015).

Unterschiedliche Methoden können zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herangezogen werden. Bei der Kostenvergleichsrechnung werden unter Voraussetzung gleicher Leistungen nur die Kosten miteinander verglichen. Dieses kommt nur zur Anwendung bei Maßnahmen mit geringen finanziellen Beträgen und es wird nur der monetäre Aspekt betrachtet. Auch bei der Kapitalwertmethode stehen die monetären Aspekte im Vordergrund. Bei dieser Methode werden die mit der Maßnahme verbundenen Ein- und Ausgaben auf einen einheitlichen Zeitpunkt abgezinst. Diese Methode kommt bei der Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ) zum Einsatz (BMVBS 2004). Die Höhe und der Zeitpunkt der Ein- und Ausgabe für die Instandsetzung bzw. Erneuerung werden durch Auf- und Abzinsung auf einen Bezugszeitraum bezogen. Die Nutzen-Kosten-Analyse stellt die Kosten und Nutzen einer Maßnahme gegenüber. Diese Methode findet u. a. in der Bundesverkehrswegeplanung und der Empfehlung für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen Anwendung. Nur Bauvorhaben mit einem Kosten-Nutzen-Verhältnis von über 1 dürfen durchgeführt werden (DAHL et al. 2015; FGSV 1997). Bei dieser Maßnahme stehen ebenfalls die monetären Aspekte im Vordergrund. Eine Methode bei der nicht nur die monetären Aspekte betrachtet werden, ist die Nutzwertanalyse. Bei dieser Methode werden Ziele bzw. Bewertungskriterien und deren Gewichtungen festgelegt. Der Nutzwert wird durch die Verrechnung der Bewertungskriterien und deren Gewichtung erreicht (BMVBS 2004; FGSV 1997; Präsident des BRH 2013; WÜSTHOLZ 2016).

3.1.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Verkehrsplanung

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen im Bereich der Verkehrsplanung verfolgen das Ziel, alle Wirkungen, die eine Maßnahme haben kann, abzudecken. Folgende Wirkungsspektren sind dabei von Bedeutung (FGSV 2010):

- Wirkungen auf das Verkehrssystem
- Wirkungen auf die Umwelt

- Effekte auf den Lebensraum und das soziale Umfeld
- Effekte auf die Wirtschaft
- Maßnahmenkosten

Die Abdeckung dieser Wirkungen sollte in jeder Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen. Als Beispiele für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in der Verkehrsplanung sind zu nennen (BMVBS 2004; FGSV 1997):

- Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ)
- Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)
- Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030

3.1.2.1 RI-WI-BRÜ

Für Brücken in der Baulast des Bundes ist vorgegeben, dass ab einem Auftragsvolumen > 3 Mio. € oder 50 % der reinen Baukosten des Bauwerks zum heutigen Preisstandard eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung durchzuführen ist. In der RI-WI-BRÜ werden die Varianten „Instandsetzung“ und „Erneuerung“ miteinander verglichen, mit dem Ziel die Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Maßnahmen zu belegen. Bei der Methode handelt es sich im Kern um die Kapitalwertmethode, die um eine Beurteilungsmatrix erweitert wird, um auch nicht monetäre Aspekte mit in Betracht zu ziehen. Das Vorgehen in dieser Richtlinie ist wie folgt (BMVBS 2004):

- Problemdarstellung und Zielformulierung: Ziele hinsichtlich der Kriterien im Ingenieurbau (bspw. Standsicherheit), Verkehrsplanung, Umweltschutz und Durchführbarkeit werden formuliert.
- Entwicklung und Erläuterung der zu untersuchenden Varianten.
- Wirtschaftlichkeitsuntersuchung: Die Baukosten (tatsächliche Baukosten und Kosten für Abbruch, Behelfe, Betriebserschwerisse, Verkehrsführung und Verwaltung), Unterhaltskosten und der Restwert der Brücke zum Ende des Bewertungszeitraums werden in die Rechnung einbezogen. Die gesamten Kosten werden kapitalisiert, das heißt auf ein gleiches Jahr bezogen.

- Beurteilung nicht monetärer Aspekte: Aspekte des Ingenieurbaus (Standicherheit, Dauerhaftigkeit, Verkehrssicherheit und Gestaltung), Verkehrsplanung (Verkehrsführung und Leitungsfähigkeit), Umweltschutz (Lärmschutz, Gewässer- und Bodenschutz, Natur- und Landschaftsschutz und weitere Umweltaspekte) und die Durchführbarkeit (Personal, Bau- und Planungsrecht, Grunderwerb, Haushalt und Bauzeit) werden mit den Kategorien sehr gut bis sehr schlecht bewertet.
- Erarbeitung einer Empfehlung: Unter Beachtung der Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und der Beurteilung nicht-monetärer Aspekte wird eine Empfehlung erarbeitet.

3.1.2.2 EWS

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach der EWS hat entweder das Ziel einen Variantenvergleich alternativer Ausführungen eines Projekts bezüglich seiner Wirtschaftlichkeit zu betrachten und /oder eine Dringlichkeitsreihung von Straßenbaumaßnahmen durchzuführen. Diese Ziele sollen mit einer Kosten-Nutzen-Analyse erreicht werden, das heißt ein monetärer Ansatz wird gewählt und sämtliche Kosten und Nutzen werden in monetärer Form ausgedrückt. In der EWS (1997) werden die folgenden Kosten einbezogen:

- Investitionskosten (Baukosten)
- laufende Kosten (Unterhalt, Verkehrssicherung und Verkehrslenkung).

Unter Nutzen werden alle sonstigen Maßnahmewirkungen verstanden, diese können positiv (Gewinn) oder negativ (Verlust) ausfallen (KUHLMANN et al. 2007). Nach dem Wissenstand von 1997 werden die folgenden Nutzen monetär bewertet (FGSV 1997):

- Veränderung der Betriebskosten: Durch Veränderungen der Fahrweiten können Einsparungen aufgrund von höheren Fahrgeschwindigkeiten erreicht werden.
- Veränderungen der Fahrzeiten: Der geringe Zeitverlust wird über einen Zeitkostensatz verrechnet.
- Veränderung des Unfallgeschehens: Abnahme von Unfällen und damit geringe Personen- und Sachschäden können durch vorgegebene Bewertungsansätze ermittelt werden.

- Veränderung der Lärmbelastigung: Kosten können über den Vermeidungskostenansatz für nächtliche Lärmbelastigung und den Zahlungsbereitschaftsansatz für Lärmbelastigung am Tag ermittelt werden.
- Veränderung der Schadstoffbelastung: Der Nutzen der Veränderung der Belastung wird auf Grundlage der volkswirtschaftlich bewerteten direkten Schäden durch Schadstoffimmissionen angesetzt.
- Veränderung der Klimabelastung: Bezug wird auf den CO₂ Ausstoß genommen und ermittelt werden die Kosten über einen Vermeidungskostenansatz.
- Veränderung der Trennwirkung von Straßen: Zeitverlust der beim Überqueren der Straße entsteht wird mit dem Zeitkostenansatz berechnet.
- Veränderung der Flächenverfügbarkeit in bebauten Gebieten: Der Kostenansatz zur Herstellung von Verkehrsflächen für Radfahrer und Fußgänger wird genutzt.

Bis zum Jahr 2016 ist die EWS überarbeitet worden und soll als Richtlinie für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS) (auch unter der Bezeichnung Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Wirtschaftlichkeitsberechnungen (RAS-W) zu finden) eingeführt werden. Die Richtlinie wurde bis zum März 2020 noch nicht eingeführt.

3.1.2.3 Bundesverkehrswegeplan 2030

Im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 wurden für die Bewertung von Neu- und Ausbauprojekten verschiedene Analysen durchgeführt. Bild 20 zeigt das Ablaufschema zur Aufstellung des BVWP, der Abschnitt Planfallrechnung und Projektbewertung zeigt verschiedene Module, die genutzt werden, um die Wirkungen der verkehrsbaulichen Maßnahme zu bewerten (DAHL et al. 2015).

Im Modul A wird eine Nutzen-Kosten-Analyse vorgenommen, hier werden soweit möglich alle monetarisierbaren Wirkungseffekte einbezogen (DAHL et al. 2015). Es werden u. a. die folgenden Kriterien betrachtet (Deutscher Bundestag 2016): Investitionskosten, Veränderungen von Betriebszeiten, Reisezeiten und Verkehrssicherheit, Emissionen von Treibhausgasen und der Nutzen bei konkurrierenden Verkehrsträgern. Da mit der Nutzen-Kosten-Analyse nicht alle relevanten Ziele und Wirkungsbereiche abgedeckt werden können, erfolgt in Mo-

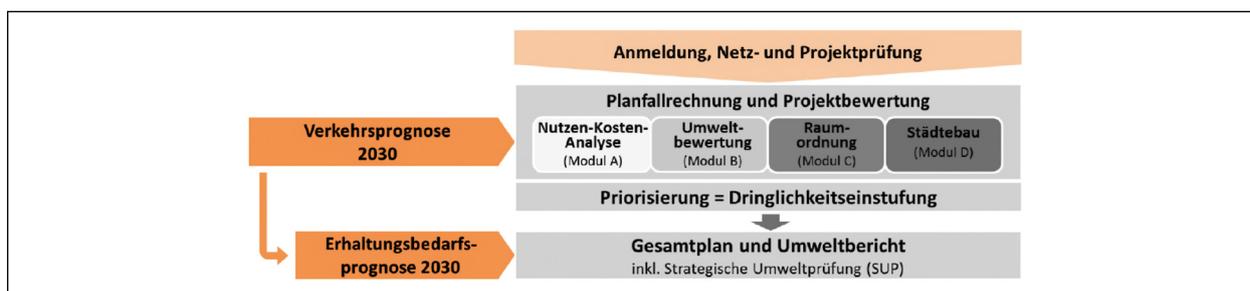


Bild 20: Ablaufschema zur Aufstellung des BVWP (DAHL et al. 2015)

dul B eine Bewertung der Umwelt und der naturschutzrechtlichen Aspekte. In Modul C werden die Qualität der An- und Verbindung und die Erreichbarkeit und in Modul D die städtebaulichen Aspekte beurteilt (DAHL et al. 2015).

3.2 Wirkungsanalyse von Verkehrsmaßnahmen

Verkehrsmaßnahmen haben immer Auswirkungen, welche ökonomische, ökologische und sozialen Aspekte beinhalten. Die Zuordnung der Wirkungen zu einzelnen Aspekten ist häufig nicht möglich, da sich Auswirkungen mehreren Aspekten zuordnen lassen. Beispielsweise hat die Reduktion der Fahrzeit eine ökonomische Auswirkung, da sich gesamtwirtschaftlich betrachtet durch geringere Fahrzeit die Produktivität und damit die Wirtschaftsleistung erhöht. Der ökologische Aspekt ist, dass weniger Luftschadstoffe produziert werden. Eine soziale Komponente ist beispielsweise, dass die Fahrten weniger zeitaufwendig sind und damit die Koordinierung von Beruf und Familie einfacher wird (JONES und LUCAS 2012).

Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen stehen häufig die ökonomischen Auswirkungen im Vordergrund, da diese Wirkungen relativ gut monetarisiert werden können und damit die Einbindung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erleichtern. Von Maßnahmen gehen aber auch ökologischen und sozialen Wirkungen aus. Bei den ökologischen Wirkungen werden die Wirkungsspektren der Maßnahme betrachtet, die sich auf die Umwelt auswirken. Die Abgrenzung und Definition von sozialen Wirkungen gegenüber den anderen Wirkungsspektren ist schwierig. Häufig wird daher der Ausdruck sozio-ökonomische Wirkungen verwendet. Die sozio-ökonomischen Auswirkungen werden im englisch Raum als „social impacts“ bezeichnet, diese können als beabsichtigte und unbeabsichtigte positive und negative soziale Folgen geplanter Interventio-

nen (Politiken, Programme, Pläne, Projekte) und aller durch diese Interventionen hervorgerufenen sozialen Veränderungsprozesse verstanden werden (BMVIT 2013).

Ein Überblick zu den Auswirkungen von Verkehrsmaßnahmen wurden aus den folgenden Quellen zusammengetragen: SCHUBERT et al. 2019; DAHL et al. 2015; BMVIT 2013. Für die Beschreibung der Auswirkungen werden unterschiedliche Begriffe und Definitionen gewählt, in der hier aufgeführten Aufzählung wurden die Auswirkungen unter Oberbegriffen zusammengefasst. In Bild 21 sind die einzelnen Auswirkungen den ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten zugeordnet. Hierbei wurde keine Wertung bzw. Abstufung nach Wichtigkeit vorgenommen.

Die genannten Aspekte werden im Folgenden näher erläutert. Bei den ökonomischen Aspekten sind die folgenden Punkte aufgeführt:

- **Reisezeiten:** Durch die Verringerung der Reisezeiten können diese Zeiten besser produktiv genutzt werden. Zudem kommt es zu einer Verringerung der Abgase, der Lärmbelastung und Betriebskosten.
- **Kosten für Erhalt und Betrieb:** Die Kosten für den Erhalt und Betrieb von Verkehrswegen werden z. B. bei Ausbauprojekten erhöht, da ein erhöhter Aufwand nötig ist.
- **Transportzeiten im Güterverkehr:** Die Kosten im Transportsektor können mit der Verringerung der Transportzeiten gekürzt werden und die notwendige Lagerhaltung kann reduziert werden.
- **Zuverlässigkeit:** Mit dem Bau von Verkehrswegen, kann die Zuverlässigkeit, mit dem ein Transportziel erreicht werden kann, erhöht werden. Das spart beispielsweise Kosten, da eine frühere Abfahrt vermieden wird.

- **Verkehrsverlagerung:** Die Verkehrsverlagerung kann innerhalb eines Verkehrsträgers stattfinden, das bedeutet neue Wege werden gewählt, oder eine Verlagerung auf einen anderen Verkehrsträger findet statt.
- **Betriebskosten:** Betriebskosten beschreiben die Kosten, welche bei dem Betrieb von Fahrzeugen, Flugzeugen, Schiffen und Eisenbahnen anfallen.

Zu den ökologischen Aspekten gehören die folgenden Punkte:

- **Abgase:** Mit dem Betrieb von Verkehrsmitteln werden Luftschadstoffe emittiert, welche sich negativ auf Flora, Fauna und Menschen auswirken. Weiterhin stellt die Freisetzung von Treibhausgasen, welche sich auf die Klimaveränderung

und die Erderwärmung auswirken, ein Problem dar.

- **Biodiversität:** Hier ist die Verinselung von Lebensräumen von Tieren und Pflanzen, Störungen des Verhaltens von Tieren und Auswirkungen auf der Populationsebene und Einschleppung von nicht heimischen Tier- und Pflanzenarten von Bedeutung.
- **Flächeninanspruchnahme (Naturschutzflächen):** Die Inanspruchnahmen von Natura-2000-Gebietsnetz/Naturschutzgebiet/Nationalpark/Kern- und Pflegezonen von Biosphärenreservaten/Naturschutzgroßprojekt des Bundes, UNESCO-Weltnaturerbe und Ramsar-Feuchtgebiete bei Verkehrsmaßnahmen sind relevant. Auch die Aspekte Durchführung von Wasserschutzge-

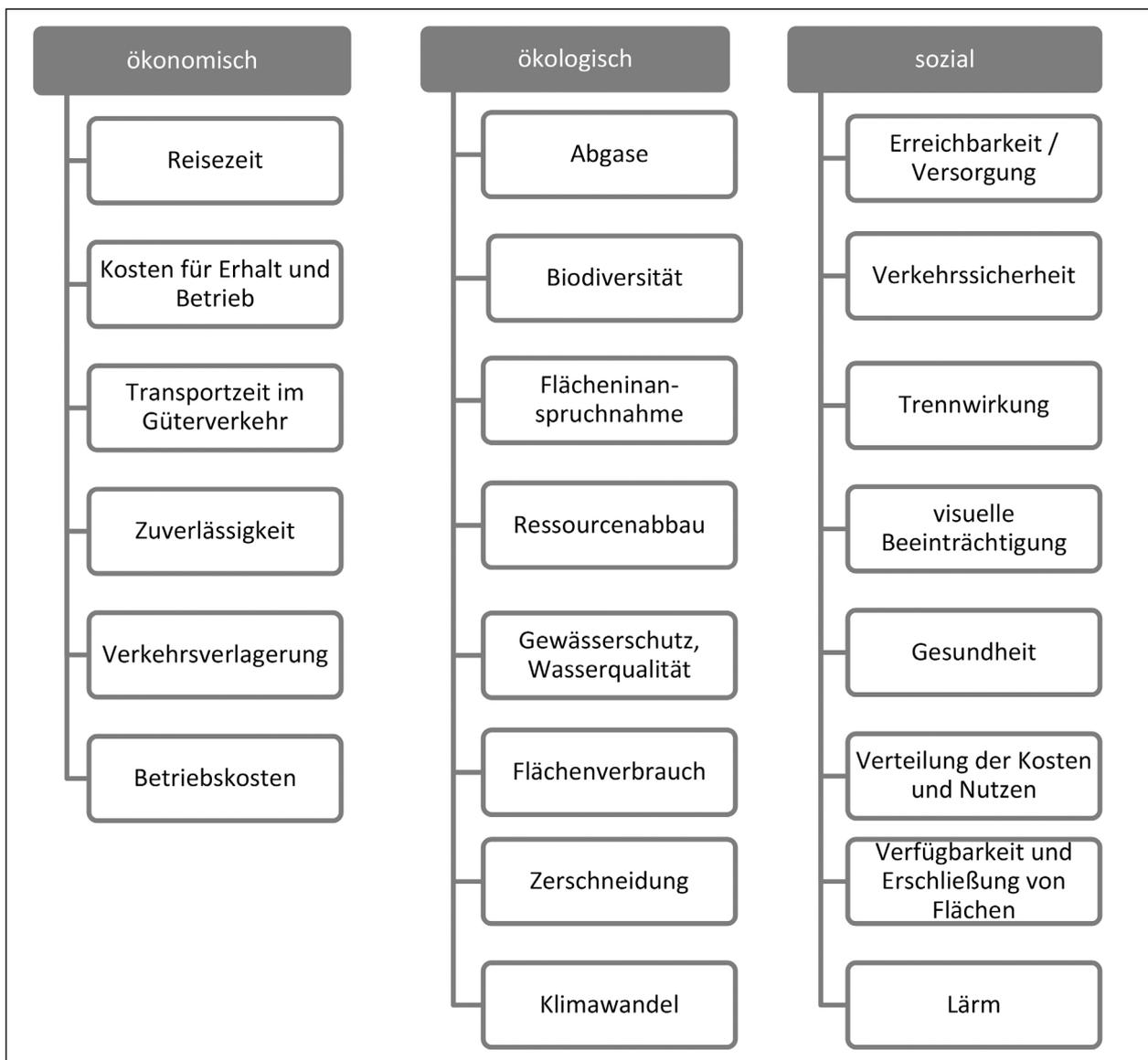


Bild 21: Auswirkungen von Verkehrsmaßnahmen (SCHUBERT et al. 2019; DAHL et al. 2015; BMVIT 2013)

bieten und Überschwemmungsflächen können unter diesen Punkt fallen.

- Ressourcenabbau: Mit Verkehrsmaßnahmen ist der Verbrauch von Flächen und Rohstoffen verbunden.
- Gewässerschutz/Wasserqualität: Gefährdung für die Umwelt, beispielsweise der Eintrag von Schadstoffen in Gewässer spielt eine Rolle.
- Flächenverbrauch: Der Verbrauch von Flächen, die vorher einer anderen Nutzung zur Verfügung standen, beispielsweise Ackerflächen, Wald, Naturschutzgebiete ist relevant für diesen Punkt.
- Zerschneidung/Trennwirkung: Die Zerschneidung von Flächen kann negative Auswirkungen für Flora und Fauna haben. Negativ kann das auch für die Mensch sein, durch geringe Aufenthaltsqualität oder visuelle Beeinträchtigungen (Trennwirkung).
- Klimawandel: Durch die Nutzung von Verkehrsmitteln werden Treibhausgase erzeugt, diese wirken sich negativ auf den Klimawandel und die Erderwärmung aus.

Zu den sozialen Aspekten gehören die folgenden Punkte:

- Erreichbarkeit/Versorgungssicherheit: Die Erreichbarkeit von zentralen Einrichtungen (Oberzentren, Autobahnanschlussstellen, Flughafen und IC-Bahnhof) und die Sicherstellung der Grundversorgung sind für alle Bevölkerungsschichten von zentraler Bedeutung.
- Verkehrssicherheit: Mit dem Bau von verkehrssicheren Wegen können die Kosten für Unfälle, für Personen- und Sachschäden minimiert werden.
- Trennwirkung/Räumliche Barrieren: Unter diesem Aspekt wird die Einschränkung der Bewegungsfreiheit, die Zerschneidung von Flächen und Veränderung der Mobilität durch beispielsweise Umwege oder Umfahrungen verstanden.
- Visuelle Intrusionen: Beeinträchtigungen durch Verkehrsprojekte wie beispielsweise die Sicht oder Beleuchtung werden hier aufgegriffen.
- Gesundheit: Die Gesundheit kann als Oberbegriff für Aspekte wie Beeinträchtigung von Lärm, Schadstoffimmissionen und Folgewirkungen durch Unfälle gesehen werden.

- Verteilung der Kosten und Nutzen: Hierbei geht es um die Frage, wer profitiert von den Maßnahmen, wie verteilen sich Kosten und Nutzen.
- Verfügbarkeit und Erschließung von Flächen: Beschreibt die Möglichkeit einer anderen Raumnutzung, etwa durch Umgestaltung und Erhöhung der Aufenthaltsqualität bei Veränderungen der Verkehrsbelastung. Die Anbindungen von Flächen, die vorher wenig genutzt wurden, können durch Verkehrsmaßnahmen erschlossen werden und so beispielsweise als Wohnraum zur Verfügung stehen. Eine weitere Möglichkeit ist die neue Verfügbarkeit von Flächen für Wohnbebauung, durch beispielsweise weniger Verkehr. Damit einher geht auch die erhöhte Wohnqualität.
- Lärm: Die gesundheitliche Beeinträchtigung durch Verkehrslärm wird ist relevant.

Bei der Betrachtung von Verkehrsmaßnahmen werden nicht alle Aspekte betrachtet, sondern meistens nur einige ausgewählte. In der hier vorgestellten Methode zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Monitoringmaßnahmen wurden die folgenden Aspekte aufgenommen:

- Betriebskosten
- Reisezeiten
- Verkehrssicherheit
- Lärm
- Luftverschmutzung
- Klimaschutz
- Erreichbarkeit

Es wurden die Kriterien ausgewählt, die den größten Einfluss auf die Kosten haben (Betriebskosten, Reisezeit und Verkehrssicherheit) und Kriterien, denen von Seiten der Bevölkerung eine große Bedeutung zugesprochen wird.

Die einzelnen Aspekte werden in Kapitel 3.3.2 beschrieben.

3.3 Verfahren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Monitoringmaßnahmen

Die Bearbeitung des Themas erfolgt unter Berücksichtigung der Ergebnisse des externen Projekts FE 89.0331 „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen“.

Im Rahmen dieses Projekts wurden auf Grundlage der Bayes'schen Theorie ein Verfahren zur Quantifizierung der Kosten und Nutzen entwickelt. Die Bayes'sche Theorie, der Einbezug von Wirkungen von Verkehrsmaßnahmen in das Konzept und das Konzept sollen im folgenden Kapitel beschrieben werden.

3.3.1 Bayes'sche Theorie und Value of Information Konzept

Die Bayes'sche Theorie ist, wie bereits in Kapitel 2.3.2.2 beschrieben ein Modell für das Aufnehmen und Verarbeiten von Informationen. Das Ziel ist es, die getroffenen Annahmen zu aktualisieren und damit zu verbessern (FABER et al. 2015).

Das Value of Information Konzept baut auf der Bayes'schen Theorie auf. In Bezug auf Monitoringmaßnahmen ist das Value of Information Konzept definiert als „Differenz zwischen dem Erwartungswert der Kosten für den Betrieb der Infrastruktur, wenn kein Monitoring installiert ist, und dem Erwartungswert der Kosten für den Betrieb der Infrastruktur, wenn ein Monitoring installiert. Der Value of Information kann als maximaler Preis verstanden werden, welchen der Infrastrukturbetreiber bereit ist für die Informationen aus dem Monitoring zu bezahlen.“ (SCHUBERT et al. 2019).

Das Ziel für Planung, Bau, Betrieb und Erhalt von Infrastrukturen ist es, den Nutzen unter Beachtung der Anforderungen an Sicherheit und Umwelt zu maximieren. Als Basis für die Entscheidungsfindung steht eine Vielzahl von Alternativen zur Verfügung, welche mithilfe eines Entscheidungsbaums dargestellt werden können. Da die verfügbaren Informationen unsicher bzw. unvollständig sind, handelt es sich um ein Entscheidungsproblem bei unsicheren Informationen. Der Ereignisbaum besteht

aus der Entscheidung, dem Zustand (Zufallsvariable) und den Konsequenzen.

Für die Auswertung des Entscheidungsbaums gibt es drei Möglichkeiten, die sich im Informationsstand zur Zeit der Entscheidung unterscheiden (SCHUBERT et al. 2019; FABER 2012):

- A-priori-Analyse: Diese Analyse wird bei bekannten gegebenen Informationen durchgeführt. Bei bekannter Nutzenfunktion und bekannten Wahrscheinlichkeiten kann für jede Handlungsoption der Nutzen ermittelt werden.
- A-posteriori-Analyse: Bei dieser Analyse wird beachtet, dass zusätzliche Informationen zur Verfügung stehen. In unserem Fall stehen Informationen aus Monitoringmaßnahmen zum Zustand zur Verfügung, so dass der Zustand aktualisiert werden kann. Die zusätzliche Information führt dazu, dass eine bessere Entscheidungsgrundlage vorhanden ist und der Nutzen besser abgeschätzt werden kann.
- Prä-Posteriori-Analyse: Die zusätzliche Information, welche zu einer verbesserten Entscheidungsgrundlage führt, verursacht Kosten. Das Ziel ist bereits vor dem Einbau der Monitoringmaßnahme abzuschätzen, ob sie einen Nutzen bringt. In diesem Fall wird das Entscheidungsproblem auf die Frage reduziert, ob ein Monitoringsystem installiert werden soll. Hierdurch werden die Kosten für den Brückenbetrieb mit und ohne Monitoringsystem bestimmt.

3.3.2 Konzept zur Quantifizierung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen

3.3.2.1 Konzeptüberblick

Die folgenden Ausführungen sind CUSTER et al. (2018) und SCHUBERT et al. (2019) entnommen.

Die Quantifizierung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen soll nach dem Konzept erfolgen, welches in Bild 22 gezeigt ist.

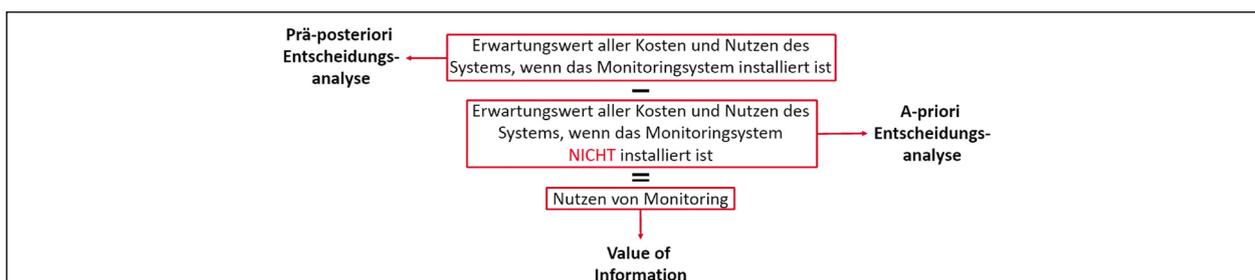


Bild 22: Konzept zur Quantifizierung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen (CUSTER 2018)

Das Konzept sieht vor, dass der Nutzen des Monitorings bestimmt wird, indem vom Erwartungswert der Kosten und Nutzen des Systems mit Monitoring der Erwartungswert der Kosten und Nutzen des Systems ohne Monitoring abgezogen wird (Bild 22). Der Erwartungswert der Kosten und Nutzen ohne Monitoring wird durch eine A-priori-Entscheidungsanalyse bestimmt, da die Informationen bezüglich der Kosten vorhanden sind. In diese Berechnung gehen die Kosten für Unterhalt, Instandsetzung und Verkehrsbehinderung (z. B. verlängerte Reisezeit oder erhöhte Betriebskosten) ein. Der Erwartungswert der Kosten und Nutzen mit Monitoring kann nicht über die A-priori-Entscheidungsanalyse bestimmt werden, hier ist eine Prä-Posteriori-Entscheidungsanalyse notwendig. Bei der Prä-Posteriori-Analyse steht die Frage im Vordergrund, welchen Nutzen bringt es eine zusätzliche Information, in unserem Fall durch Monitoring, zu kaufen (CUSTER 2018; SCHUBERT et al. 2019).

Die für den Fall mit und ohne Monitoring wichtigen Aspekte und Berechnungsschritte sind in Bild 23 und 24 dargestellt.

Für den Fall, dass kein Monitoring installiert wird, werden die Kosten für die Erhaltungsmaßnahme (k_u) und die indirekten Kosten aus der Verkehrsbehinderung (k_v) einbezogen.

- Die Kosten für die Erhaltungsmaßnahme (k_u) ergibt sich aus der Erhaltungsmaßnahme (u), welche nach der Brückenzustandserfassung festgelegt werden (nach Brückenprüfung). Die Erhaltungsmaßnahme (u) ist abhängig vom Zustand (z_0) des Bauteils.
- Die Kosten für die Verkehrsbehinderung (k_v) ergeben sich aus dem Verkehrsbetriebsszenario ($VBS(t)$). Das Verkehrsbetriebsszenario wird unter Berücksichtigung des Bauteilzustands und der Erhaltungsmaßnahme festgelegt. Die Kosten, welche durch ein Verkehrsbetriebsszenario für das Verkehrssystem, Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt entstehen, werden für sämtliche Wirkungsspektren pro Zeiteinheit mittels Wirkungsanalyse berechnet.

Das Verkehrsbetriebsszenario und die Kosten k_u und k_v werden als Funktion der Zeit t modelliert und

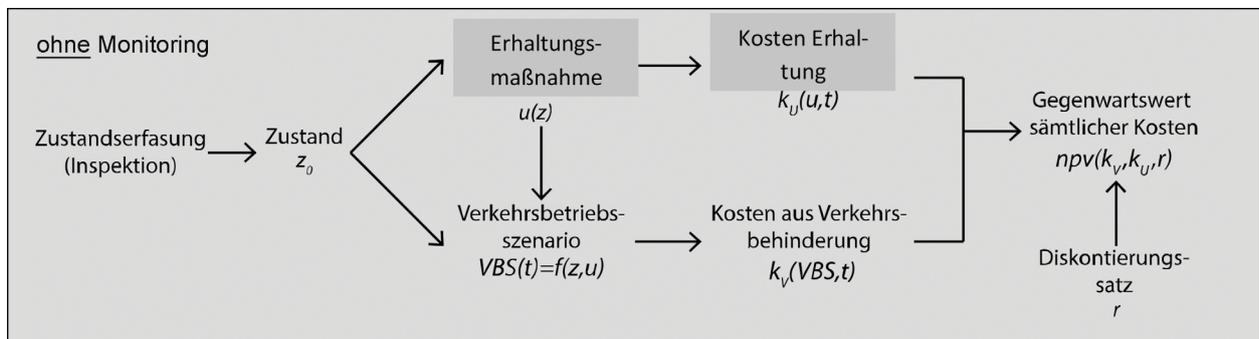


Bild 23: Schematische Modelldarstellung der Kosten ohne Monitoring (SCHUBERT et al. 2019)

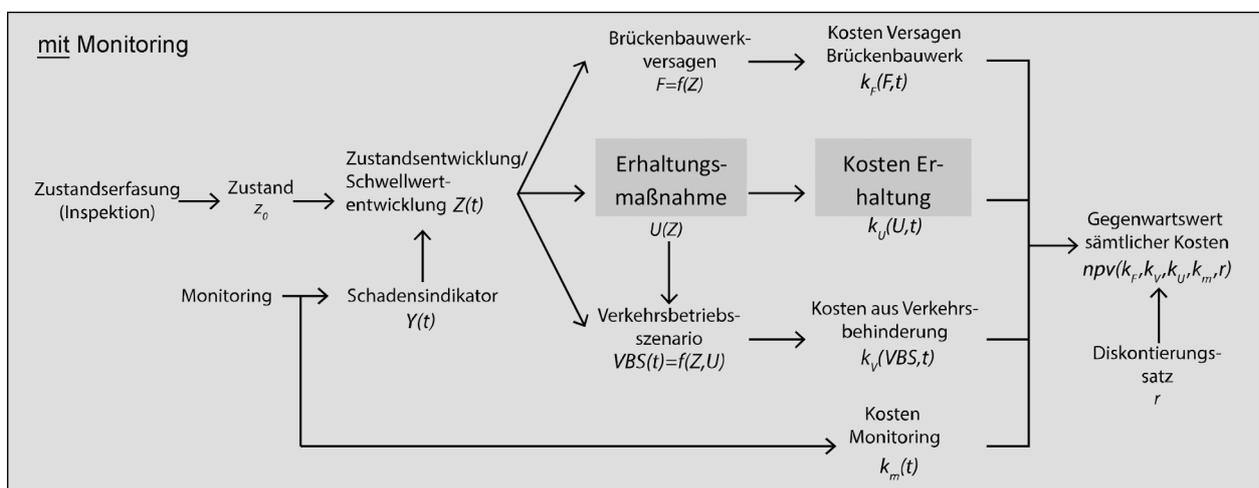


Bild 24: Schematische Modelldarstellung der Kosten mit Monitoring (SCHUBERT et al. 2019)

mittels Diskontierung (r) zum einem Gegenwartswert ($npv(a_0)$) summiert:

$$npv(a_0) = \sum_{\tau=0}^T \left((k_{ut,\tau} + k_{vt,\tau}) \cdot \frac{1}{(1+r)^\tau} \right)$$

Die Berechnung der Kosten für den Betrieb mit Monitoring erfolgt nach dem gleichen Prinzip, es liegen jedoch die folgenden Unterschiede vor:

- Die Unsicherheiten der Zustandsentwicklung werden in das Modell integriert.
- Die Kosten für ein mögliches Versagen des Bauwerks werden berücksichtigt.
- Die Kosten für Installation und Betrieb des Monitoringsystems werden einbezogen.

Für die Modellierung mit Monitoring werden die folgenden Kosten berücksichtigt:

- Die Kosten für das Versagen des Brückenbauwerks ($k_F(F,t)$) setzen sich zusammen aus den direkten Kosten für Aufräumarbeiten nach dem Brückeneinsturz und Ersatzneubau und den volksindirekten Kosten, welche sich aus den Verkehrsbehinderungen ergeben.
- Die Kosten für Erhaltung ($k_v(U,t)$) ergeben sich aus der gewählten Erhaltungsmaßnahme.
- Die Kosten aus der Verkehrsbehinderung ($k_v(VBS,t)$) ergeben sich analog zum Fall ohne Monitoring.
- Die Kosten für das Monitoring ($k_m(t)$) setzen sich aus den einmaligen Installationskosten und den Betriebskosten des Monitoringsystem zusammen, welche pro Zeitabschnitt entstehen.

Die Kosten werden addiert und durch die Verrechnung mit einer Diskontierungssatz (r) erhält man den Gegenwartswert der Kosten ($npv(a_0)$):

$$npv(a_1) = \sum_{\tau=0}^T \left((k_{ut,\tau} + k_{vt,\tau} + k_{ut,\tau} + k_{mt,\tau}) \cdot \frac{1}{(1+r)^\tau} \right)$$

3.3.2.2 Einzelne Aspekte der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse müssen einzelne Aspekte genau betrachtet werden. Hierzu zählen:

Zustandsentwicklung und Schwellwertgruppe

Die Entscheidung, ob ein Monitoringsystem installiert werden soll, ist abhängig vom aktuellen Brücken-

zustand. Das Ergebnis der Zustandserfassung der Brücke ist eine Zustandsnote, diese wird jedoch nicht verwendet, sondern eine ordinale Skala, die das Tragwerk bewertet. Die Einführung einer ordinalen Skala ist notwendig, da die Zustandsnote nicht uneingeschränkt auf den Schädigungsmechanismus zu übertragen ist und generell weiter gefasst ist. Zudem sind Schädigungsmodelle in der Praxis (bisher) nicht immer verfügbar und eine Modellierung mit den zur Verfügung stehenden Informationen zum Entscheidungszeitpunkt nicht immer möglich. Die ordinale Skala wird im Konzept als Schwellwertgruppe bezeichnet und repräsentiert den Zustand des Bauteils (Bild 25).

Die Schwellwertgruppen sind an das Schwellwertmonitoring gekoppelt. Das Monitoring misst den aktuellen Zustand und mit der Überschreitung eines Schwellwertes wird davon ausgegangen, dass der Zustand sich verschlechtert und damit geht der Zustand in die nächste Schwellwertgruppe über. Der Zustand der Brücke wird dann mit einem Monitoring überwacht. In den meisten Fällen kann der Zustand nicht direkt überwacht werden, daher wird ein Schadensindikator Y gewählt, der einen guten Rückschluss auf den Zustand und des Schadensentwicklung zulassen soll. Beispielsweise kann bei einer Risschädigung die Risslänge überwacht werden, oder bei Bewehrungskorrosion die Eindringtiefe des Chlorids.

Monitoring

Das Monitoring wird auf den gewählten Schadensindikator abgestimmt. Er setzt sich zusammen aus den einmaligen Investitionskosten ($k_{M,i}$) und in die Betriebskosten ($k_{M,b}$) pro Zeiteinheit.

Versagen Bauwerk

Das Versagen des Bauwerks ist möglich, kommt aber nur selten vor. Um eine Kostenabschätzung vornehmen zu können, werden die Zielversagens-

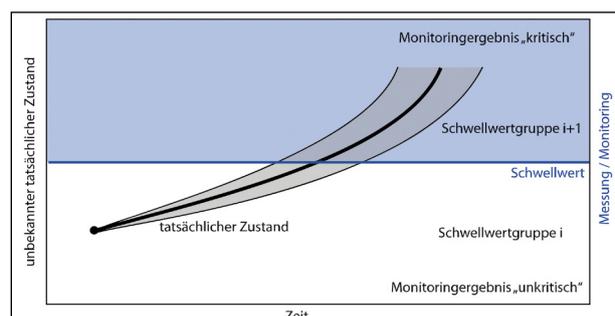


Bild 25: Schematische Darstellung des Schwellwertmonitorings und der Schwellwertgruppe (SCHUBERT et al. 2019)

wahrscheinlichkeiten eines Bauteils genutzt. Für neue Brückenbauwerke liegen diese bei $1.0E-7$, hierbei handelt es sich um die Zielversagenswahrscheinlichkeit für Bauwerke mit großen Konsequenzen aus dem Eurocode (EN1990:2010-12). Bei Brücken mit signifikanten Schäden, kommt es zu einer Sperrung der Brücke, daher wird angenommen, dass die Zielversagenswahrscheinlichkeiten eines geschädigten Bauwerks nicht unter $1.0E-3$ liegen. Die Zielversagenswahrscheinlichkeiten liegen damit zwischen $1.0E-7$ und $1.0E-3$. Bei angenommenen Kosten von 500 Mio. € bei einem Einsturz (direkte Kosten und volkswirtschaftliche Kosten des Einsturzes) liegen die Versagenskosten dann zwischen 50 und 500.000 €, wird rechnen in den Beispielen mit 50.000 €.

Erhaltungsstrategie

Die Erhaltungsstrategie setzt sich aus einer oder mehreren Maßnahmen zusammen, welche z. B. in der RI-WI-PRÜF aufgelistet sind (BMVI 2017). Hier sind u. a. die Strategien Verstärkung, Ersatzneubau oder Instandsetzung genannt. Im Konzept gibt es jeweils eine Erhaltungsmaßnahme mit Monitoring (u_i) und ohne Monitoring (u_0).

Verkehrsbetriebsszenarien:

Durch beschädigte Brückenbauwerke oder Instandsetzungsmaßnahmen kann es zu Verkehrsbehinderungen auf Brücken kommen. Hierzu wurden im Projekt verschiedenen Verkehrsszenarien definiert, die sich gegenseitig ausschließen. Diese Szenarien sind:

- vbs_0 : Keine Beeinträchtigung
- vbs_1 : Teilschließung (Spurenweise Schließung)
- vbs_2 : Tempobegrenzung
- vbs_3 : Lkw-Schließung
- vbs_4 : Tempobegrenzung und Lkw-Schließung
- vbs_5 : Tempobegrenzung, Lkw-Schließung und Spurenschließung
- vbs_6 : Schließung

Die verschiedenen Verkehrsbetriebsszenarien können während eines Monitorings oder eine Instandsetzung miteinander verknüpft werden, beispielsweise ändert sich die Verkehrsführung in den Phasen der Instandsetzung.

Wirkungsanalyse

Für jedes Verkehrsbetriebsszenario entstehen, bei gegebener Erhaltungsstrategie, Kosten für Verkehr, Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt. Die Kosten für ein Verkehrsbetriebsszenario ($k_v(VBS,t)$) setzen sich zusammen aus den folgenden Wirkungen (SCHUBERT et al. 2019; DAHL et al. 2015):

- **Betriebskosten:** Die Betriebskosten entstehen aus dem mit den Verkehrsprojekten verbundenen Fahrzeitveränderungen und Veränderungen in Bezug auf die Fahr- bzw. Transportleistungen. Die Monetarisierung dieser Kosten erfolgt über die Betriebsgrundkosten (z. B. Pkw mit Ottomotor 14,65 € pro 100 Fahrzeugkilometer), Vorhaltungskosten (z. B. Pkw mit Ottomotor 0,71 € pro Fahrzeugstunde), Personalkosten Lkw-Fahrer (17,64 € pro Einsatzstunde bei Lkw mit 3,5 t) und den Energiekosten (z. B. Ottokraftstoff 0,76 € pro Liter). Die Kosten werden dem BVWP entnommen.
- **Reisezeiten:** Die Kosten entstehen, da die Reisenden die Zeit nicht produktiv nutzen können bzw. die Transportzeiten für Güter erhöht werden. Die Mehrreisezeiten berechnen sich aus der Summe der Fahrzeugstunden von Lkw und Pkw über alle Strecken im Netz. Es wurde für den Bezugs- und Planfall für jede Strecke aus der Division der Fahrleistung mit der streckenbezogenen Geschwindigkeit die Reisezeit bestimmt. Die Mehrreisezeit ergibt sich dann durch den Vergleich zwischen Bezugs- und Planfall. Die Monetarisierung für die Reisezeiten im Personenverkehr wird unterschieden in geschäftlichen und nicht geschäftlichen Verkehr (z. B. geschäftlicher Verkehr bei einer Distanz von über 500 km 75 € pro Personenstunde) und im Güterverkehr (z. B. 6,88 € pro Fahrzeugstunde für Fahrzeuge über 12 t Gesamtgewicht). Die Kosten werden dem BVWP entnommen.
- **Verkehrssicherheit:** Unfälle sind die relevante Größe zur Bestimmung der Verkehrssicherheit. Hier erfolgt eine Unterteilung der Kosten in Personen- und Sachschäden. Die Wertansätze für unfallbedingte Personenschäden setzen sich aus dem Ressourcenverzehr (Kosten für die Bewältigung der Unfallfolgen und Produktionsaus) und den Risk-Value-Komponenten (Zahlungsbereitschaft zur Senkung des Risikos eines tödlichen Verkehrsunfalls) zusammen. Hinzu kommen noch die Sachkosten, welche bei Sachschäden entstehen. Die Kosten werden dem

BVWP entnommen. Für den Vergleich zwischen Bezugs- und Planfall werden Unfälle pro Strecke und Jahr verglichen.

- **Lärm:** Lärm kann gesundheitliche Folgen haben, daher wird Innerorts der Lärmpegel ($ab(A)$) für Anwohner je 100 m Streckenlänge mit Wertkostenansätzen aus dem BVWP 2030 verrechnet. Außerorts erfolgt die Berechnung über den Vermeidungskostenansatz, also den Kosten für Lärmschutzwände um den Lärmpegel und 55 dB(A) in 100 m Entfernung zur Lärmquelle zu erreichen.
- **Luftverschmutzung und Klimaschutz:** Die Wertansätze für Schadstoffemissionen für NO_x , Partikel PM und CO_2 (z. B. NO_x bei Verbrennungsmotoren Innerorts 15.400 € pro Tonne) wurden dem BVWP entnommen.
- **Erreichbarkeit:** Hier wird der Aufwand beschrieben, der notwendig ist, um einen relevanten Standort zu erreichen. Dieser Faktor kann nicht monetär ausgewiesen werden, wird aber dennoch ins Konzept aufgenommen.

3.4 Beispiele

Die folgenden Ausführungen sind CUSTER et al. (2018) und SCHUBERT et al. (2019) entnommen.

Das entwickelte Konzept zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Monitoringmaßnahmen wurde an zwei bereits durchgeführten Monitoringmaßnahmen getestet. Es wurden bereits abgeschlossene Maßnahmen gewählt, da für diese Projekte die Kosten, Laufzeiten und Auswirkungen bekannt sind und genutzt werden können.

Es wurde die Schwelmetalbrücke bei Wuppertal gewählt, hier wurden Risse in der Brücke mithilfe von digitalen und analogen Rissensoren überwacht. Als zweites Beispiel wurde eine Autobahnbrücke in Duisburg-Beeck gewählt, hier erfolgte eine Überwachung der Rissweiten der Koppelfugen.

3.4.1 Schwelmetalbrücke

Die Schwelmetalbrücke befindet sich im Zuge der Autobahn A1 im Bereich der Anschlussstelle Wuppertal-Langerfeld. Die Brücke besteht aus 4 Einzelteilbauwerken (Bild 26).

An der Brücke konnten ausgeprägte Risse in den Stegen und Hohlkästen beobachtet werden, u. a. daher wurde die Brücke nach der Nachrechnungsrichtlinie nach analysiert (BMVBS 2011b). Die Nachrechnung ergab für die Teilbauwerke 2 und 3 Defizite in der Schubbewehrung und der Nachweis der Hauptzugspannung im Bruchzustand könnte nicht



Bild 26: Unterseite der Schwelmetalbrücke; Foto von Annette Jarosch, BBV, 2015

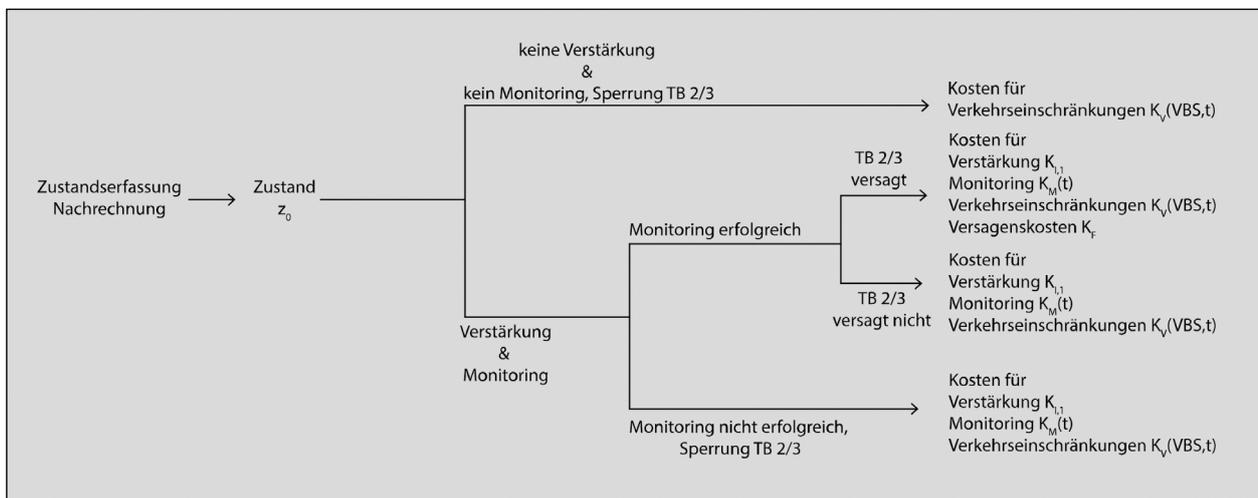


Bild 27: Darstellung der Kosten für die Entscheidungsalternativen (SCHUBERT et al. 2019)

ausreichend belegt werden. Aufgrund der Probleme sind 2 Entscheidungssituationen möglich, Sperrung der Teilbauwerke 2 und 3 bis zum Neubau oder Verstärkung und Überwachung der Teilbauwerke 2 und 3 und damit Weiterbetrieb dieser Teilbauwerke bis zum Neubau. Die Entscheidungssituation ist in Bild 27 dargestellt.

Bei dem an der Schwelmetalbrücke angewandten Monitoring handelt es sich um ein Rissmonitoring, welches aus analogen und digitalen Rissmonitoren besteht, welche die vorhandenen Risse in ihren Rissbreiten überwachen. Zusätzlich zu der Rissüberwachung wurden Einschränkungen des Verkehr vorgenommen, wie die Sperrung für genehmigungspflichtigen Schwerverkehr >44 t, Einschränkung auf vier verengte Fahrstreifen und Überholverbot für Lkw.

Im nächsten Schritt wurden die Verkehrsbetriebs-szenarien erstellt, das Ergebnis zeigt die Tabelle 8. Den einzelnen Verkehrsbetriebs-szenarien sind Informationen zu Fahrspuren, Kapazität, Höchstgeschwindigkeit, Fahrverboten und einem Monitoring zugeordnet.

Anschließend wurden die volkswirtschaftlichen Kosten aus den Verkehrseinschränkungen für die einzelnen Szenarien bestimmt. Zur Verdeutlichung der Kostenunterschiede wurden die Differenzen zwischen dem Basisfall (Szenario 6 ohne Einschränkung) und den anderen Szenarien erstellt. Die Differenz pro Tag, aufgeteilt in die verschiedenen Wirkungsbereiche zeigt Bild 28. Die Ermittlung der Kosten erfolgt anhand der in Kapitel 3.3.2.2 aufgezeigten Wirkungsanalyse.

Die größten Mehrkosten ergeben sich bei den Szenarien 2 und 4, da hier die Teilbauwerke 2 und 3 gesperrt werden und nur je 1 Fahrstreifen pro Fahr-richtung zu Verfügung steht. Den größten Anteil an den Kostenunterschieden machen die Reisezeit und die Betriebskosten aus.

In nächsten Schritt wurden die Kosten für das Monitoring und die Erhaltungsstrategie (beispielsweise Verstärkung) bei den zuständigen Behörden erfragt.

Für die Durchführung der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird dann das Excel-Tool genutzt, welches im Rahmen des Projekts zur Durchführung der Wirtschaftlichkeitsanalyse entwickelt wurde. Hierzu werden Verkehrsbetriebs-szenarien mit Kosten verbunden und im nächsten Schritt Schwellwertgruppen definiert. Die Zuordnung der Schwellwerte ergibt sich aus dem Entscheidungsproblem, kombiniert mit zeitlichen Aspekten (Bild 29). Die Schwellwertgruppen sind:

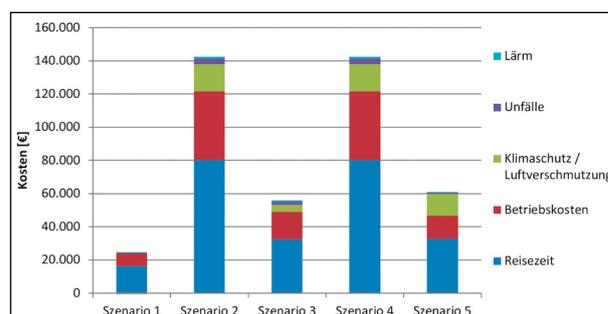


Bild 28: Kostenveränderung pro Tag zwischen Basisfall (Szenario 6) und den anderen Szenarien (SCHUBERT et al. 2019)

Verkehrsführung		Anzahl Fahrspuren je Richtung	Kapazität (in Pkw-E/h und Richtung)	Zul. Höchstgeschwindigkeit	Fahrverbote und Sonstiges	Monitoring
Szenario 1	FR Dortmund	3	4.950	60	Teilbauwerk 2 und 3: Sperrung für Lkw > 3,5t	ja
	FR Köln	3	4.950	60		
Szenario 2	FR Dortmund	1	1650	60	Teilbauwerk 2 und 3 komplett gesperrt	nein
	FR Köln	1	1650	60		
Szenario 3	FR Dortmund	3	4.200 (85 %)	60	Sperrung Teilbauwerk 2 /Lkw ab 3,5t gesperrt auf Teilbauwerk 3	ja
	FR Köln	3	4.200 (85 %)	60		
Szenario 4	FR Dortmund	1	1650	60	Teilbauwerk 2 und 3 komplett gesperrt	ja
	FR Köln	1	1650	60		
Szenario 5	FR Dortmund	3	4.200 (85 %)	60	Sperrung Teilbauwerk 3	nein
	FR Köln	3	4.200 (85 %)	60		
Szenario 6 (Basisfall)	FR Dortmund	3	4.950	80		nein
	FR Köln	3	4.950	100		

Tab. 8: Verkehrsszenarien für die Schwelmetalbrücke (eigene Darstellung nach SCHUBERT et al. 2019)

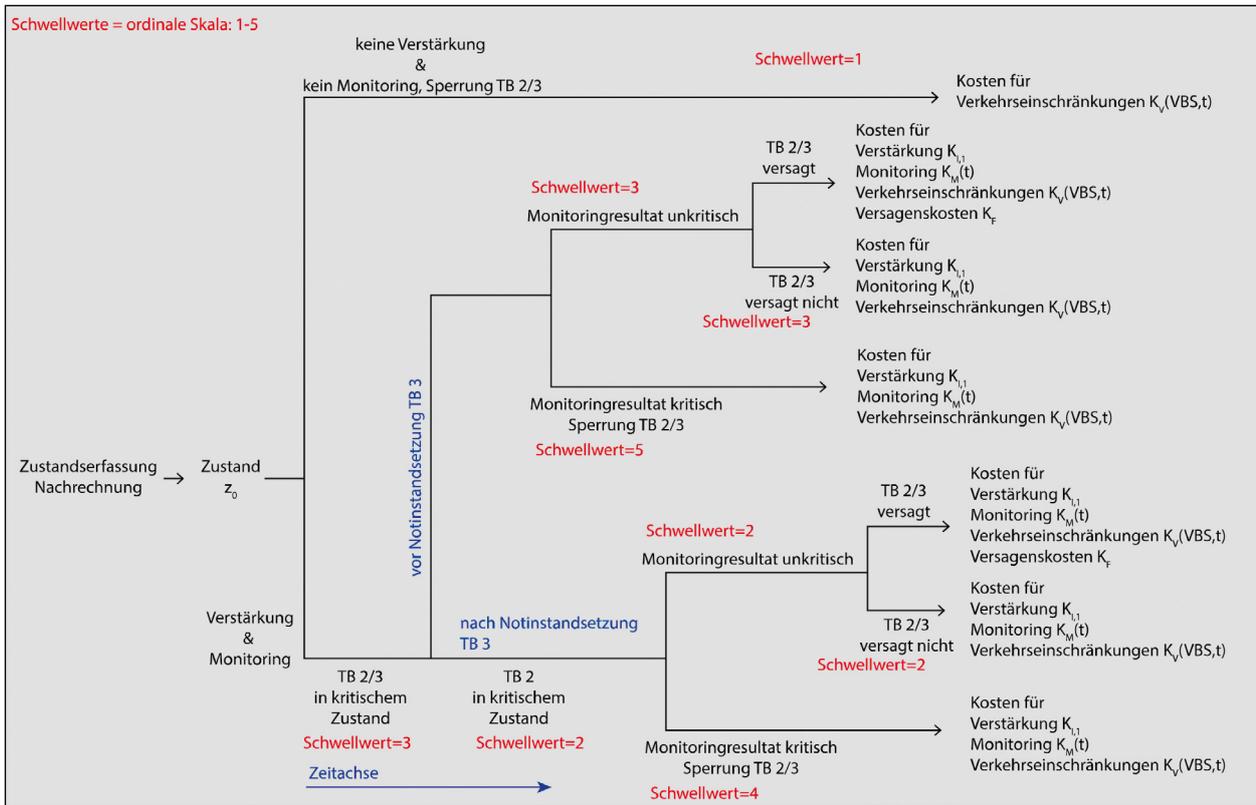


Bild 29: Ereignisbaum mit Schwellwertgruppen (SCHUBERT et al. 2019)

- 1: Mindestens eines der beiden Teilbauwerke wurde bereits erneuert.
- 2: Teilbauwerk 2 wurde noch nicht erneuert, Teilbauwerk 3 wurde bereits notinstandgesetzt.
- 3: Weder Teilbauwerk 2 noch Teilbauwerk 3 wurden bisher erneuert/verstärkt.
- 4: Monitoring lieferte ein kritisches Ergebnis nach der Verstärkung von Teilbauwerk 3.
- 5: Monitoring lieferte ein kritisches Ergebnis vor der Verstärkung von Teilbauwerk 3.

Relevant für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit ist, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Monitoring einen kritischen Wert liefern könnte. Diese Information kann aus einer Expertenschätzung oder aus der Bestimmung der Grenzwahrscheinlichkeit erfolgen. Die Expertenschätzung geht davon aus, dass das Monitoring bis zu einer Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines kritischen Wertes von 0,05 wirtschaftlich ist. Im Exceltool wurde eine Optimierung die Möglichkeit geschaffen, dass die Grenzwahrscheinlichkeit bestimmt wird, bei dem das Monitoring gerade noch wirtschaftlich ist. Bei der Schwelmetalbrücke ergibt sich eine Grenzwahrscheinlichkeit von 0,067 das bedeutet das Monitoring ist wirtschaftlich. Die monetären Einsparungen können der Tabelle 9 entnommen werden.

	ohne Monitoring	mit Monitoring	Differenz
total (Summe direkte + indirekte + Versagen)	224.000.000	219.000.000	4.840.000
direkte Kosten	26.400.000	25.900.000	416.000
Volkswirtschaftliche Kosten	197.000.000	193.000.000	4.430.000

Tab. 9: Simulationsergebnis: erwartete Kosten (verändert nach SCHUBERT et al. 2019)

Im Ergebnis ist das Monitoring wirtschaftlich, dieses lässt sich insbesondere auf die reduzierten volkswirtschaftlichen Kosten bei der Anwendung des Monitorings zurückführen.

3.4.2 Duisburg-Beeck

Die Autobahnbrücke in Duisburg Beeck ist das zweite Beispiel, die Autobahnbrücke im Zuge der A 42 überführt über die Landstraße L287 (Bild 30). Es handelt es sich um eine Spannbetonbrücke, die 1980 mit vollgestoßenen Spanngliedern errichtet wurde. Die Brücke wurde aus 2 Teilbauwerken (Teilbauwerk 2 und 3) erreicht. Das Problem dieser Brücken liegt in den Koppelfugen der Spannglieder, da diese Risse ausbilden und damit die Ermüdungsbelastung der Brücke wächst.



Bild 30: Autobahnbrücke Duisburg Bееk (SCHUBERT et al. 2019)

war der Nachweis der Tragfähigkeit nicht gegeben, daher wurde die Brücke mit externen Spanngliedern verstärkt. Trotz der externen Vorspannung konnte nicht die angestrebte Brückenklasse 60 nachgewiesen werden. Um das Ziel der Brückenklasse 60 doch zu erreichen, sollte über ein Monitoring der Koppelfugen belegt werden, dass die vorhandenen Risse in den Koppelfugen keine ermüdungsrelevanten Spannungen in den Koppelankern induzieren. Hiermit ergibt sich die in Bild 31 gezeigte Entscheidungssituation, Neubau oder Verstärkung und Monitoring.

Die Brücke wurde 2014 gemäß Nachrechnungsrichtlinie nachgerechnet (BMVBS 2011b). Hierbei

Für die Überwachung der Koppelfugen wurden Weg- und Temperatursensoren eingesetzt. Ziel war

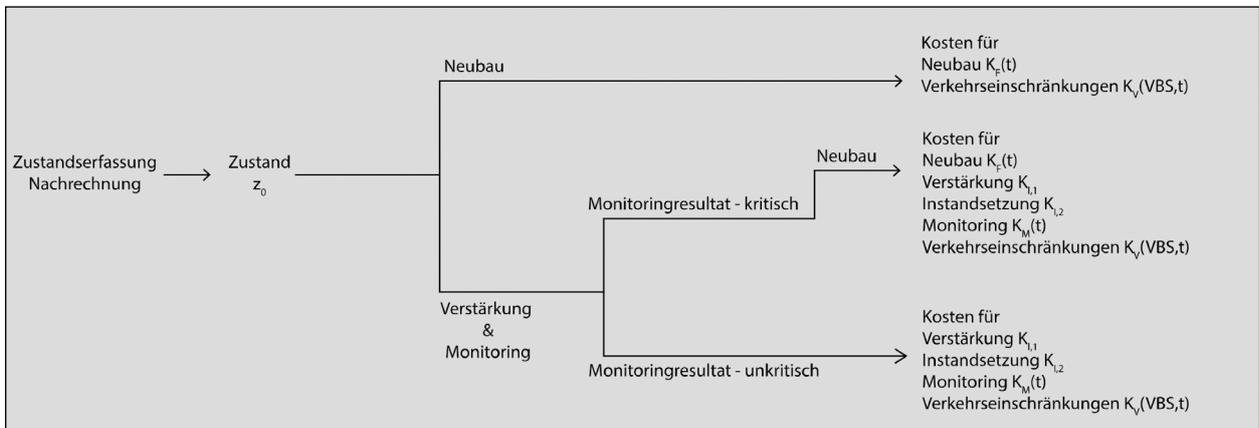


Bild 31: Darstellung der Kosten für die Entscheidungsalternativen (SCHUBERT et al. 2019)

Verkehrsführung		Anzahl der Fahrspuren je Richtung	Kapazität (in Pkw-E/h und Richtung)	Zul. Höchstgeschwindigkeit	Fahrverbote und Sonstiges	Monitoring	BK
Szenario 1 (Basisfall)	FR Kamp-Lintfort	3	5250	120	nach Neubau	nein	60
	FR Dortmund	3	5250				
Szenario 2	FR Kamp-Lintfort	3	5250	120	Teilbauwerk 2 und 3: Sperrung für Sonderschwertransport, während Verstärkungsmaßnahme	nein	45
	FR Dortmund	3	5250				
Szenario 3	FR Kamp-Lintfort	2	2975	80	Teilbauwerk 3 komplett gesperrt; Sperrung für Sonderschwertransport	ja	45
	FR Dortmund	2	2975				
Szenario 4	FR Kamp-Lintfort	2	2975	80	Teilbauwerk 2 komplett gesperrt	ja	45
	FR Dortmund	2	2975				
Szenario 5	FR Kamp-Lintfort	3	5250	120	Teilbauwerk 2 und 3: Sperrung für Sonderschwertransport, Sperrung bis Neubau	nein	45
	FR Dortmund	3	5250				
Szenario 6	FR Kamp-Lintfort	2	2975	80	Sperrung Teilbauwerk 2 + Sperrung Teilbauwerk 3 für Sonderschwertransport	nein	45
	FR Dortmund	2	2975				
Szenario 7	FR Kamp-Lintfort	2	2975	80	Teilbauwerk 3 komplett gesperrt, Teilbauwerk 2 neu gebaut	nein	60
	FR Dortmund	2	2975				

Tab. 10: Verkehrsszenarien für Duisburg-Bееk (eigene Darstellung nach SCHUBERT et al. 2019)

die Überwachung der Rissöffnung (Rissweite) der Koppelfuge im Vergleich zu ungerissenen Bereichen.

Im nächsten Schritt wurde dann analog zur Schwelmetalbrücke die Verkehrsszenarien erarbeitet (Tabelle 10)

Das Szenario 1 stellt hier den Basisfall dar. Die Kostenveränderungen der volkswirtschaftlichen Kosten pro Tag zwischen dem Basiszenario und den anderen Szenarien ist in Bild 32 dargestellt. Im hier vorliegenden Beispiel machen die Zeitkosten den größten Kostenunterschied aus.

Nachdem die Verkehrsbetriebsszenarien mit Kosten verbunden wurden, werden auch hier wieder die Schwellgruppen ausgewiesen (Bild 33).

Die Schwellwertgruppen sind:

1. es liegen keine Probleme vor, da das Monitoring erfolgreich abgeschlossen wurde oder der Neubau fertiggestellt ist.
2. aktive Schwellwertgruppe vor Abschluss des Monitorings
3. Monitoring liefert ein kritisches Ergebnis und der Neubau ist damit notwendig

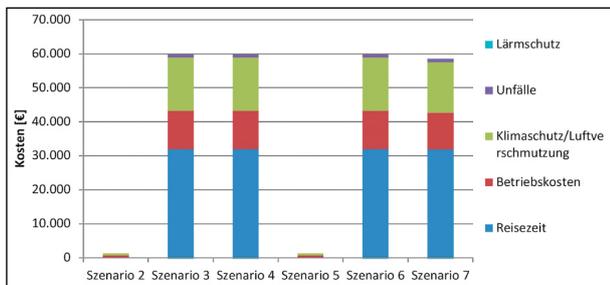


Bild 32: Kostenveränderung pro Tag zwischen Basisfall (Szenario 1) und den anderen Szenarien (SCHUBERT et al. 2019)

Für die Brücke in Duisburg-Beeck ergeben sich die folgenden möglichen Maßnahmen:

- Neubau
- Verstärkung (externe Vorspannung)
- Instandsetzung (notwendig wenn der Neubau nicht sofort oder gar nicht erfolgt)

Im Anschluss an die Eingabe alle Parameter im Excel-Tool erfolgt die Optimierung der Grenzwahrscheinlichkeit, also die Bestimmung des Wertes bis zu dem das Auftreten eines kritischen Werts noch wirtschaftlich ist. Die Optimierung ergibt einen Wert von 0,659. Bei einer angenommen Wahrscheinlichkeit von 0,05 aus der Expertenschätzung, dass das Monitoring einen kritischen Wert liefert, ist der monetäre Vorteil der Maßnahme als sehr hoch zu bewerten. Die Ergebnisse der erwarteten Kosten für die Brücke sind in Tabelle 11 dargestellt.

3.4.3 Vergleich der Beispiele

In beiden gezeigten Beispielen konnte die Wirtschaftlichkeit der Monitoringmaßnahmen dargelegt werden. Im Fall der Brücke in Duisburg-Beeck fällt der wirtschaftliche Nutzen mit einer Einsparung von 44 Mio. € deutlich höher aus als bei der Schwelmetalbrücke. Auch die Grenzwahrscheinlichkeit, bis

	ohne Monitoring	mit Monitoring	Differenz
total (Summe direkte + indirekte + Versagen)	78.200.000	28.300.000	44.400.000
direkte Kosten	11.800.000	4.370.000	7.420.000
indirekte Kosten	61.000.000	24.000.000	37.000.000

Tab. 11: Simulationsergebnis: erwartete Kosten (verändert nach SCHUBERT et al. 2019)

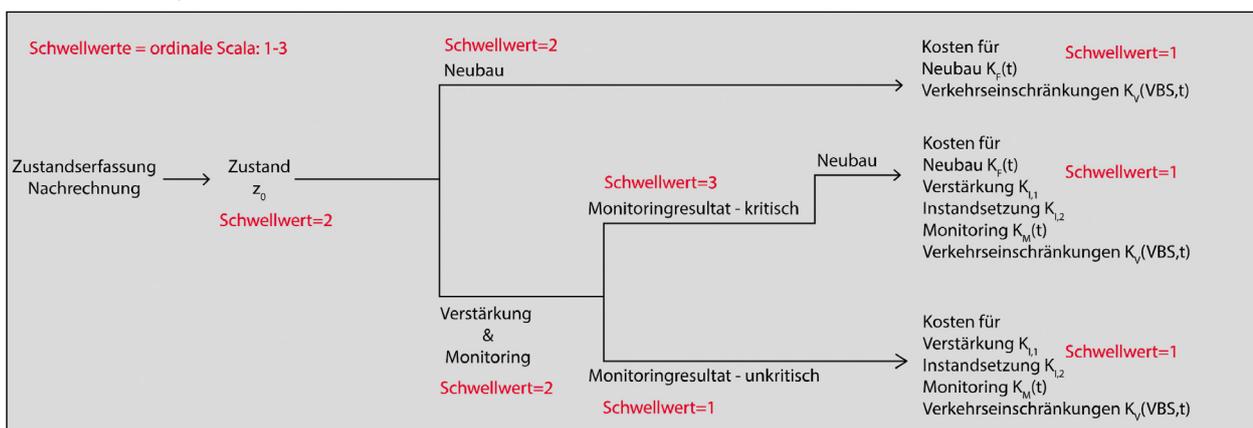


Bild 33: Ereignisbaum mit Schwellwertgruppen (SCHUBERT et al. 2019)

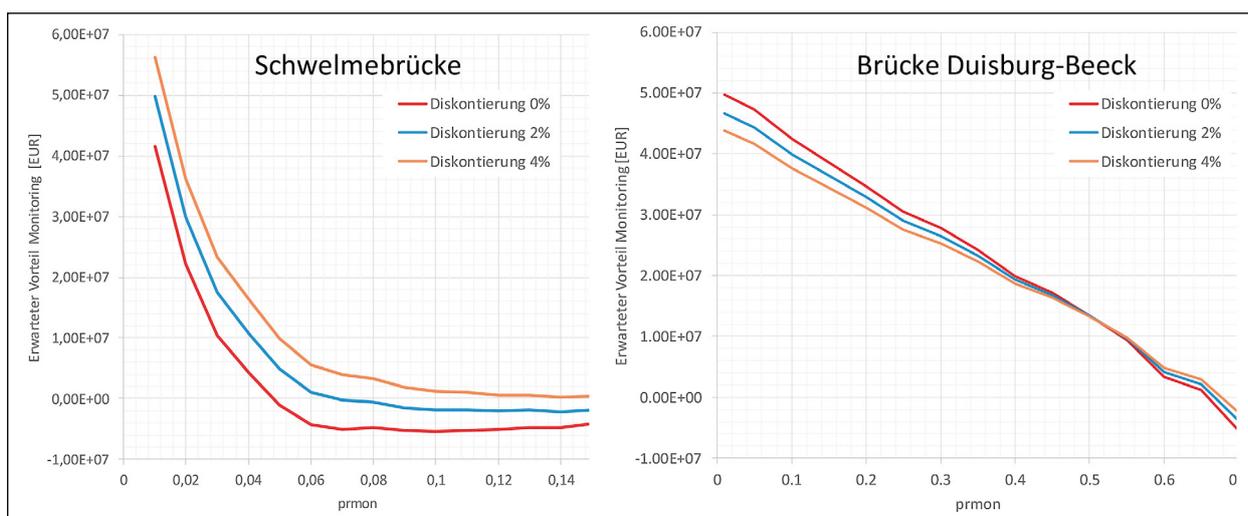


Bild 34: Einfluss des Diskontierungssatzes auf die Grenzwahrscheinlichkeit und den wirtschaftlichen Vorteil aus dem Monitoring (links Schwelmebrücke und rechts Brücke in Duisburg-Beeck) (SCHUBERT et al. 2019)

zu der das Monitoring einen kritischen Wert liefern könnte und trotzdem noch wirtschaftlich ist, liegt bei 0,659. Das bedeutet, dass selbst wenn eine 50 % Wahrscheinlichkeit (Expertenschätzung = 0,5) besteht, dass das Monitoring einen kritischen Wert liefert, die Maßnahmen noch wirtschaftlich ist.

Beim Beispiel der Schwelmetalbrücke fällt das Ergebnis nicht so deutlich aus, hier unterscheiden sich Grenzwahrscheinlichkeit mit 0,067 und Grenzwert aus der Expertenschätzung mit 0,05 nicht sehr deutlich. Der wirtschaftliche Nutzen mit 4,8 Mio. € fällt daher auch geringer aus.

Die Kosten für Erhaltung, Verkehrsbehinderung, Monitoring und Versagen wurden als Funktion der Zeit bestimmt. Im Anschluss wird der Erwartungswert pro Zeitschnitt bestimmt und dann diskontiert. Der Diskontierungssatz hat ebenso wie die Expertenschätzung zu dem Aspekt, bis zu welchem Erwartungswert das Monitoring einen kritischen Wert liefern könnte um trotzdem noch wirtschaftlich zu sein, einen deutlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

Bild 34 zeigt den Einfluss des Diskontierungssatzes auf die Grenzwahrscheinlichkeit und erwarteten wirtschaftlichen Vorteil bei der Schwelmetalbrücke (links) und auf die Brücke in Duisburg Beeck (rechts).

Das Beispiel der Schwelmetalbrücke reagiert sehr sensitiv auf Diskontierung und Experteneinschätzung der Grenzwahrscheinlichkeit. Das Beispiel der Brücke in Duisburg-Beeck hingegen reagiert weniger sensitiv auf die beiden genannten Aspekte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich das Monitoring in beiden Fällen wirtschaftlich gelohnt hat. Bei der Brücke in Duisburg-Beeck fällt das Ergebnis jedoch eindeutiger aus.

3.5 Anwendung des Verfahrens in der Praxis

Das Konzept wurde in Form eines Excel-Tools umgesetzt, bei diesem Excel-Tool handelt es sich um einen Prototypen. Mit der Weiterentwicklung des Tools, ist der Einsatz bei Straßenbauverwaltungen möglich. Hierzu sollten eventuell noch Vereinfachungen an der Wirkungsanalyse vorgenommen werden, sodass die Wirkungen leichter erfasst werden können.

Das Konzept bietet eine gute Möglichkeit die Anwendung von Monitoring in der Praxis weiter zu verbreiten. Das Tool schafft die Möglichkeit die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme bereits vor Installation der Maßnahme darzulegen.

Die Anwendung des Vorgehens in der Praxis an einer neuen, noch nicht durchgeführten oder begonnenen Monitoringmaßnahme könnte Verbesserungen für das Tool aufzeigen und die Nutzbarkeit belegen.

4 Monitoring in der Erhaltungsplanung

Der Einsatz von Monitoring in der Erhaltungsplanung soll in diesem Kapitel untersucht werden.

Hierbei ist die Ausgangsfrage, wie kann Monitoring ins Erhaltungsmanagement eingebunden werden?

Die grundlegenden Aspekte zum Thema Monitoring wurden bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Im Kapitel 4.1 wird die Praxis der derzeitigen Erhaltungsplanung in Deutschland dargestellt. Im Kapitel 4.2 wird die Nutzung von Monitoring in der Erhaltungsplanung anhand von zwei Beispielen erläutert. Im letzten Kapitel 0 wird die Anbindung von Monitoring an bestehende Regelwerke beschrieben.

4.1 Erhaltungsplanung

Die Erhaltungsplanung im Bereich der Straßenbrücken in Deutschland wird aktuell auf Grundlage der Bauwerkprüfungen nach DIN 1076:1999 durchgeführt. Im Jahr 2013 wurde die planmäßige Erhaltungsplanung um die systematische Brückenerhaltung auf Grundlage der Strategie zur Ertüchtigung von Straßenbrücken erweitert. Zukünftig könnte die Erhaltungsplanung im Rahmen des Lebenszyklusmanagement erfolgen. Die relevanten Aspekte zu diesen Themen werden im folgenden Kapiteln beschreiben.

4.1.1 Erhaltungsmanagement von Straßenbrücken

Unter Erhaltung von Bauwerken werden alle Maßnahmen verstanden, die die Sicherheit und Funktionalität gewährleisten sollen. Damit sind die folgenden baulichen und verwaltungsmäßigen Aufwendungen gemeint:

- die bauliche Unterhaltung (kleiner Umfang, heben den Gebrauchswert nicht an),
- die Instandsetzung (größerer Umfang, heben den Gebrauchswert deutlich an),
- die Erneuerung (Ersatz von Bauwerksteilen, Wiederherstellung des vollen Gebrauchswerts) und
- Umbau-/Ausbaumaßnahmen ohne kapazitive Wirkung (d. h. ohne Verbesserung von Tragfähigkeit oder verkehrlicher Kapazität).

In Abgrenzung zur Erhaltung stehen die Maßnahmen der „betrieblichen Unterhaltung“ (u. a. Betriebskosten, Pflege, Winterdienst, Vorhaltung von Immobilien und Gerät) und die „Erweiterungsmaßnahmen“ (Umbau-/Ausbaumaßnahmen mit kapazi-

tiver Wirkung auf das Straßennetz und Neubau-Ersatzanlagen) (HAARDT 1998).

Die Vorgehensweise zur Inspektion von Bauwerken ist in der DIN 1076:1999 „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung“ geregelt. Im Rahmen der Bauwerksprüfung werden die Brücken auf Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit geprüft. Die Standsicherheit kennzeichnet die Eigenschaften der Brücke die planmäßige Beanspruchung ohne Schäden aufnehmen zu können. Die Verkehrssicherheit gibt an, ob die Brücke nach den anerkannten Regeln der Technik den Anforderungen an Sicherheit und Ordnung zur gefahrlosen Nutzung der Brücke durch alle Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge erfüllt. Die Dauerhaftigkeit kennzeichnet die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks gegenüber den Einwirkungen, mit dem Ziel die planmäßige Nutzungsdauer bei regelmäßiger Bauwerksunterhaltung zu erreichen.

Die Bauwerksüberwachung teilt sich in laufende Überwachungen, Besichtigungen und Bauwerksprüfung (einfache Prüfung, Hauptprüfung und Prüfung aus besonderem Anlass). Die laufenden Überwachungen finden im Rahmen der Streckenkontrolle und zweimal jährlich im Rahmen von Überwachungen ohne Hilfsmittel zur Feststellung grober Schäden/Mängel statt. Ein Schaden ist definiert als Veränderungen an einem Bauwerk (Abweichung vom Ist-Zustand), durch die seine vorgesehene Funktion (Aussehen, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit, Standsicherheit) wesentlich beeinträchtigt oder unmöglich gemacht wird. Ein Mangel ist die Abweichung von einem Soll-Zustand oder das Fehlen einer vereinbarten Beschaffenheit oder wenn nicht vertraglich spezifiziert, von der gewöhnlichen Verwendung bzw. normalerweise zu erwartenden Beschaffenheit (GÄNßMANTEL & HORN 2012). Die Besichtigungen finden einmal im Jahr statt, zusätzlich zur äußeren Sichtprüfung werden die am Bauwerk vorhanden Besichtigungseinrichtungen, wie begehbare Hohlkästen auf grobe Schäden/Mängel untersucht. Die Hauptprüfung findet alle 6 Jahre statt, hier werden alle Bauwerksteile handnah überprüft und Schäden/Mängel dokumentiert. Die einfache Prüfung finden 3 Jahre nach der Hauptprüfung als erweiterte Sichtprüfung statt und wird soweit vertretbar ohne Hilfsmittel (z. B. Untersichtgerät) durchgeführt. Die in der Hauptprüfung festgestellten Schäden/Mängel werden überprüft. Die Prüfungen nach besonderem Anlass finden nach besonderen Ereignissen statt (z. B. Hochwas-

ser) oder wenn die Ergebnisse aus der laufenden Beobachtung dieser erforderlich machen (BMVBS 2013a; STRAUSS et al. 2009).

Der Bauwerksprüfer muss alle Schäden/Mängel nach den Aspekten Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit mithilfe eines Notenschlüssels bewerten. Für die Vergleichbarkeit der Bewertungen der Bauwerksüberprüfung wurde die „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)“ eingeführt (BMVI 2017). Im Programm SIB Bauwerke wurde hierzu eine Datenbank mit Schadenbeispielen eingestellt, so kann zu jedem dokumentierten Schaden/Mangel aus der Datenbank ein Schadenbeispiel gewählt werden. Die Zustandsnote des Bauwerks wird von den SIB Bauwerksdatenbank im Anschluss automatisch berechnet (BMVBS 2013a; STRAUSS et al. 2009).

4.1.2 Strategie zur Modernisierung von Straßenbrücken

Die folgenden Textteile sind der Strategie zur Modernisierung von Straßenbrücken des BMVBS (2013b) und dem Bericht zum „Stand der Ertüchtigung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen“ des BMVBS (2016), die Strate entnommen. Das Ziel der Bundesregierung ist die Sicherstellung der Mobilität, hierzu gehört auch die Verfügbarkeit der Brücken. Aufgrund des Alters, des gestiegenen Verkehrs und höherer Verkehrslasten weisen die Brücken Tragfähigkeitsdefizite auf. Vor diesem Hintergrund wurde eine Strategie zur Modernisierung der Brückenbauwerke entwickelt.

Wesentliche Aspekte dieser Strategie sind:

- Bundeseinheitliches Vorgehen
- Objektbezogene Nachrechnung
- Systematische Brückenertüchtigung

Das bundeseinheitliche Vorgehen besteht darin, dass wissenschaftliche Erkenntnisse genutzt werden und eine zentrale Auswahl und Reihung der zu untersuchenden Brücken festgelegt wird. Die Auswahl erfolgt anhand verschiedener Kriterien, das sind beispielsweise Spannbetonbrücken, die vor 1985 gebaut wurden, Brücken mit Zustandsnote > 3,0 oder Spannbetonbrücken mit bauzeitbedingten Defiziten (konstruktiv oder materialbezogen). Im Ergebnis wurden ca. 2500 Brücken-Teilbauwerke identifiziert, die näher analysiert werden müssen.

Ein weiterer Aspekt ist die objektbezogene Nachrechnung, welche in die folgenden Arbeitsschritte aufgeteilt ist:

- Feststellung des aktuellen Bauwerkszustands,
- Nachrechnung der Bauwerke gemäß Nachrechnungsrichtlinie (BMVBS 2011b),
- Ermittlung der erforderlichen Maßnahmen zur Instandsetzung und Verstärkung sowie Klärung, ob eine ausreichende Anhebung der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit technisch überhaupt möglich ist,
- soweit erforderlich Anordnung verkehrsbeschränkender Maßnahmen und/oder Sofortinstandsetzungsmaßnahmen,
- Ermittlung der Kosten für die gewählten Maßnahmen einschließlich Verkehrssicherung, ggf. Ermittlung der Kosten des Ersatzneubaus einschließlich der Kosten für den Abbruch,
- Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Instandsetzung/Verstärkung oder Ersatzneubau

Der letzte Arbeitsschritt ist die systematische Brückenertüchtigung, welche die bisherige planmäßige Bauwerkserhaltung um die netzbezogene Brückenertüchtigung und objektbezogene bauliche Maßnahmenplanung erweitert. Die netzbezogene Brückenertüchtigung verfolgt das Ziel der optimalen Abwicklung von Baumaßnahmen mit möglichst gering gehaltenen verkehrlichen Einschränkungen. Die objektbezogene Maßnahmenplanung hat das Ziel, alle Informationen zur Planung des Bauwerks in einem Bauwerksentwurf zusammenzustellen und damit das Ziel der netzbezogenen Brückenertüchtigung konsequent verfolgen zu können.

Um die Finanzierung der notwendigen Verstärkungs- bzw. Ersatzneubauten zu ermöglichen, wurde vom BMVI das Programm Brückenmodernisierung ins Leben gerufen, welches für die Jahre 2017 bis 2020 2,9 Mrd. € für die Modernisierung bereitstellt. Dieses Budget steht zusätzlich zu den Geldern zum Budget für das Erhaltungsmanagement zur Verfügung.

Das BMVI gibt jährlich einen Bericht mit dem Stand der Modernisierung von Straßenbrücken aus. Dem Bericht vom 10.02.2020 kann entnommen werden, dass von den 2500 Brücken, 24 % noch nicht bearbeitet waren, 44 % aktuell bearbeitet werden und 32 % bereits abgeschlossen sind (BMVI 2020).

4.1.3 Bauwerksmanagementsystem

Das Bauwerksmanagementsystem (BMS) wurde für die Planung der Erhaltung von Brücken in Deutschland entwickelt. Es ist ein „Instrumentarium mit technischen und operativen Funktionen, das Empfehlungen für die Erreichung definierter Ziele eines effizienten Betriebs, die Auswahl optimaler Erhaltungsmaßnahmen sowie Dringlichkeitsreihungen und Erhaltungsprogramme auf Netzebene für Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen liefert“ (BMVBS 2007).

Aufbauend auf den objektbezogenen Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076: 1999 werden diese netzweit Netz optimiert und zu Erhaltungsprogrammen zusammengefasst. Das BMS besteht aus mehreren Modulen, der Aufbau ist in Bild 35 gezeigt (HAARDT 2003).

Das Modul 1 „Grunddaten“ beinhaltet die Vorhaltung und Bereitstellung von Informationen, beispielsweise aus der SIB-Bauwerksdatenbank. Aber auch die Verknüpfung mit anderen Datenbanken ist möglich. In Modul 2 „Zustandsdaten und Bewertung“ werden die Ergebnisse der Bauwerksprüfung nach DIN 1076:1999 mit den Bauwerksdaten verknüpft. Im Ergebnis stehen eine netzweite Zustandsreihung der Erhaltungsmaßnahmen und die Ermittlung des Finanzbedarfs zur Durchführung der Erhaltungsmaßnahmen. Im Modul 3 „Objektbezogene Schadensanalyse“ werden die Daten der Ob-

jektbezogenen Schadensanalyse (OSA) mit den bestehenden Daten verknüpft, um eine weitergehende Auswertung der Zustands- und Grunddaten (aus Modul 1) zu ermöglichen (BMVBS 2007; HAARDT 2003). In Modul 4 „Erhaltungsmaßnahmen“ werden Erhaltungsmaßnahmen vorgeschlagen, dies ermöglicht eine Auswahl der bestmöglichen Lösung für den Schadensfall. Im Modul 5 „Wirtschaftlichkeitsberechnung“ erfolgt eine ökonomische Bewertung der Erhaltungsmaßnahmen. In diesem Modul werden die Daten, die auf der Netz- und Objektebene ermittelt wurden, zusammengefasst und anschließend analysiert. Die verschiedenen Erhaltungsmaßnahmen werden gegenübergestellt und nach wirtschaftlichen Kriterien erfolgt die Auswahl der „optimalen“ Erhaltungsmaßnahme. Im Modul 6 „Planung und Durchführung“ erfolgt die Ausstellung und Umsetzung der ausgewählten Maßnahme mit Bauvorbereitung und Abwicklung. Der Modul 7 „Erfolgskontrolle“ stellt ein Kontrollinstrument dar (HAARDT 2003).

Eine bundeseinheitliche IT-Lösung wurde im Rahmen eines IT-Ko-Projektes entwickelt, kam aber über die Testphase nicht hinaus und wurde nicht eingeführt.

4.1.4 Lebenszyklusmanagement

Der Begriff Lebenszyklusmanagement (LZM) ist in Deutschland nicht allgemeine definiert. In diesem

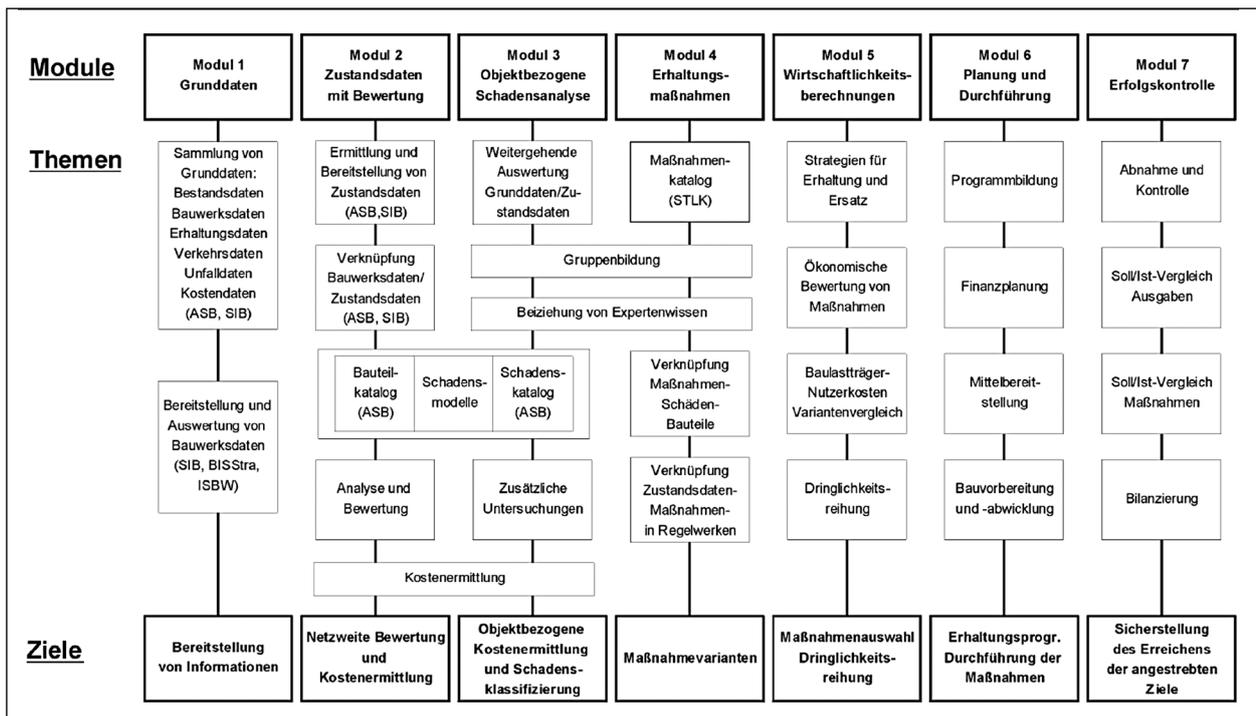


Bild 35: Module des Bauwerksmanagementsystems (HAARDT 2003)

Bericht wird der Definition von BOMBECK et al. (2019) gefolgt: LZM ist demnach die „Kombination aller technische und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit mit dem Ziel einer lebenszyklusphasen-übergreifenden Nutzungs-, Ressourcen- und Informationsoptimierung.“.

Unter dem Ziel der Nutzungsoptimierung werden alle Aktivitäten verstanden, welche die geplante Nutzung des Objekts ermöglichen, hierbei werden die Ziele Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit verfolgt. Die Ressourcenoptimierung verfolgt den wirtschaftlichen Umgang mit allen Ressourcen, wie Finanzmittel, Rohstoffen oder Energie. Mit dem Ziel der Informationsoptimierung wird die Verfügbarkeit, Aktualität und Strukturierung der vorhandenen Informationen verfolgt.

Im Rahmen der Arbeiten von BOMBECK et al. (2019) wurde eine indikatorgestütztes verkehrsträgerübergreifendes LZM entwickelt, welches sich mit der Erreichung dieser Ziele auseinandersetzt. Das LZM wurde in 3 Teilprojekt aufgeteilt: Objektebene (z. B. Straßenbrücke), Netzebene (z. B. Verkehrskorridor) und die Schnittstelle zwischen beiden Ebenen. Für jede Ebene ist es wichtig, dass relevante Indikatoren ausgewählt werden, welche den Zustand eines Bauwerks objektiv und reproduzierbar erfassen können bzw. Wirkung einer Maßnahme im Netz beurteilen können. Insbesondere für die Objektebene besteht die Möglichkeit den Zustand eines Bauwerks und dessen Entwicklung durch den Einsatz von Monitoringmaßnahmen abzuleiten.

Ein praktikables Lebenszyklusmanagement für Brückenbauwerke steht und fällt mit der Qualität und Vollständigkeit von Informationen rund um das Bauwerk. Diese Informationen betreffen u. a. nicht nur Bewertungen von Schäden im Hinblick auf die aktuelle Standsicherheit und Verkehrssicherheit sondern auch prognostische Aspekte z. B. hinsichtlich der Dauerhaftigkeit. Zuverlässige Prognosen aus Ingenieurmodellvorstellungen werden erst ermöglicht durch die Erfassung relevanter Messdaten über die Einwirkungen und das Verhalten des Bauwerks im Lebenszyklus. Hierfür können lebenszyklusbezogene Monitoringlösungen zielführend sein.

Die Ergebnisse in Kapitel 3 haben gezeigt, dass mit dem Einsatz von Monitoring ein Gewinn an Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur und Kosteneinsparungen möglich sind. Im Rahmen des Projekts FE 69.002 „Entwicklung eines verkehrsträ-

gerübergreifenden indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementsystems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur“ wurde eine erste Idee für den Aufbau eines LZM für Ingenieurbauwerke entwickelt. Im Rahmen der 2. Phase des BMVI-Experten-netzwerks sollen die Möglichkeiten der Einbindung von Monitoring in ein solches Lebenszyklusmanagement systematisch untersucht werden.

4.2 Nutzung von Monitoring in der Erhaltungsplanung

Der Einsatz von Monitoring in der Erhaltungsplanung kann einen Nutzen bringen. In diesem Kapitel soll anhand von 2 Beispielen erläutert werden, an welchen Stellen in der Erhaltungsplanung Monitoring zum Einsatz kommen kann. Hierzu wurden zwei Detailfragen ausgearbeitet.

- Wie kann die Bewertung der Monitoringergebnisse im Hinblick auf die Dringlichkeit der der Erhaltungsmaßnahmen Aussagen treffen?
- Kann Monitoring genutzt werden für die Optimierung der Erhaltungsstrategien im gesamten Lebenszyklus der Brücke

4.2.1 Dringlichkeit der Erhaltungsmaßnahme

Die Dringlichkeit von Erhaltungsmaßnahmen und damit die Reihung der Maßnahmen erfolgt auf der Objektebene, wie in Bild 36 dargestellt. Die Dringlichkeit der Maßnahmen ergibt sich aus den Daten der Bauwerksprüfung nach DIN 1076:1999, der OSA, Maßnahmenvarianten und der ökonomischen Bewertung (BMVBS 2007; HAARDT 2003). Hierbei

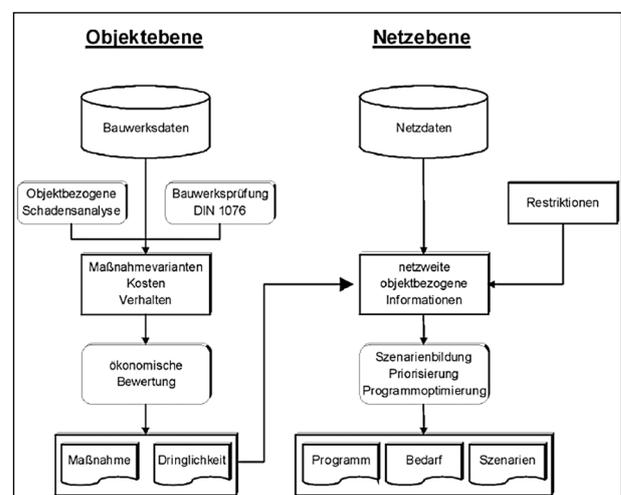


Bild 36: Bauwerksmanagementsysteme für die Straßenbauverwaltungen (HAARDT 2003).

wird immer das Ziel der optimalen Verteilung der vorhandenen Investitionsmittel auf die vorhandenen notwendigen Maßnahmen verfolgt.

Das Hauptkriterium für die Verteilung der Investitionsmittel ist die Zustandsnote die im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076:1999 vergeben wird. Warum dieses Vorgehen in Teilen problematisch ist, sollen die folgenden Ausführungen zeigen. Die Bauwerksprüfung nach DIN 1076:1999 wird von Bauwerksprüfern durchgeführt, diese besitzen zumeist große Erfahrungen bei der Bewertung der Schäden und die vorhanden Vorgaben (Auswertbögen,...) helfen die Bewertung weitestgehend zu objektivieren. Ein Rest an Subjektivität bleibt jedoch bestehen. Weiterhin stellte sich die Frage, ob ein Vergleich der Bauwerkszustandsnoten zwischen unterschiedlichen Bauwerkstypen möglich ist (RETZE 2007). Zudem gibt es auch Schäden, die versteckt innerhalb des Bauwerks auftreten und daher nicht bei der Sichtprüfung der Bauwerke durch den Bauwerksprüfer erkannt werden können. An dieser Stelle kann Monitoring einen Beitrag leisten, um den Zustand des Bauwerks und dessen zukünftige Entwicklung besser abschätzen zu können. Monitoring kann die Bauwerksprüfung nicht ersetzen, an einigen Stellen aber wertvolle Hinweise geben.

Der Einsatz von Feuchtesensoren kann die Bauwerksüberwachung und damit auch die Dringlichkeitsreihung von Maßnahmen verbessern, da viele Schäden Brücken aus dem Eindringen von Wasser resultieren. Der Einsatz von Feuchtesensoren in der Brückentafel, Fahrbahn oder der Brückenkappe kann z. B. helfen, eine undichte Abdeckung zu erkennen. Ein rechtzeitiger Eingriff kann verhindern, dass größere Korrosionsschäden an der Stahlbewehrung auftreten. In der Dringlichkeitsreihung der Maßnahmen, haben auch kleinen Eingriffe eine Chance, da ihre Wirtschaftlichkeit als hoch gewertet werden muss.

4.2.2 Optimierung der Erhaltungsstrategie

Im Rahmen des Einsatzes in der Erhaltungsplanung, besteht auch die Möglichkeit Monitoring für die Optimierung der Erhaltungsstrategien im gesamten Lebenszyklus der Brücke zu nutzen. Das Erhaltungsmanagement in Deutschland beruht, wie bereits in Kapitel 4.1.1 erwähnt, auf den turnusmäßig durchgeführten Bauwerksprüfungen nach DIN 1076:1999. Das bedeutet, dass jedes Jahr eine Sichtprüfung an der Brücke stattfinden und alle 6 Jahre eine Hauptprüfung durch einen fachkundigen Ingenieur. Bei der Prüfung wird die Brücke auf Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit geprüft.

Bei diesem Vorgehen handelt es sich um ein schadensbasiertes und reaktives Vorgehen. Schäden werden häufig erst entdeckt, wenn sie an der Oberfläche zu sehen sind (HAARDT et al. 2017).

Die Idee ist, dass mit kontinuierlich bereitgestellten umfassenden Informationen über den Zustand des Bauwerks die Grundlage für ein zukünftiges, präventiv (bzw. prädiktives) orientiertes Erhaltungsmanagement gelegt werden kann. Das Wissen über die tatsächlichen Einwirkungen beispielsweise aus dem Verkehr und den Widerstand sowie ihre wahrscheinliche Entwicklung spielt für das präventive (bzw. prädiktives) Erhaltungsmanagement eine wichtige Rolle. Monitoringmaßnahmen liefern dem Brückenprüfungingenieur zusätzlich zur Bauwerksprüfung weitere Informationen zu einzelnen Parameter oder zum gesamten Bauwerk (HAARDT et al. 2017). Bild 37 zeigt, wie sich das Management von Brücken vom heutigen zustandsorientierten Erhaltungsmanagement hin zu einem monitoringorientierten Erhaltungs- und Vorhersagemanagement entwickeln kann.

Mit zunehmender Zeit und steigendem Wissen, kann sich, wie Bild 37 zeigt, das vorausschauende

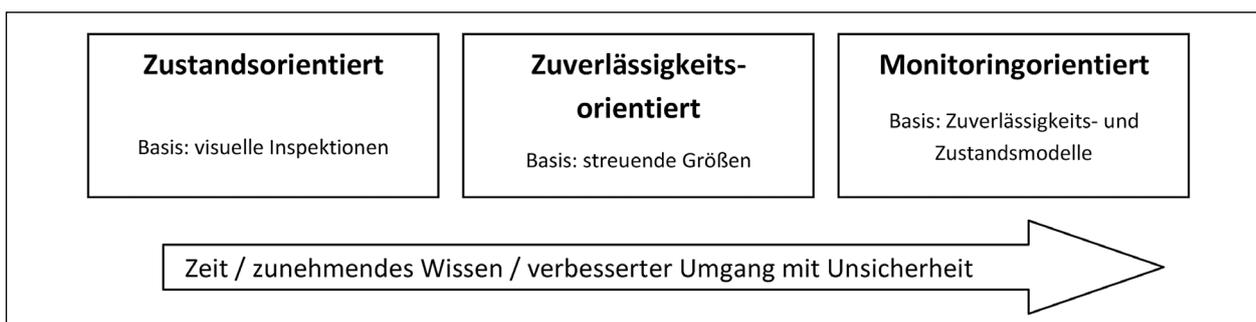


Bild 37: Entwicklung von Brücken-Management-Programmen (nach STRAUSS et al. 2009)

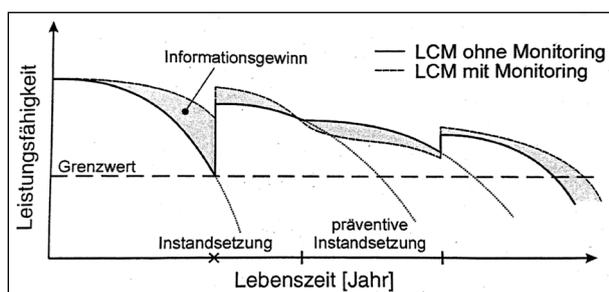


Bild 38: Veränderung der Leistungsfähigkeit einer Struktur, abgeleitet aus diskreten Untersuchungen (LCM ohne Monitoring) und Monitoring im Prognosenmodellen (LCM mit Monitoring) (STRAUSS et al. 2009)

Erhaltungsmanagement entwickeln. Das Monitoring spielt hierbei eine große Rolle, da die Erfassung des Zustands und die Entwicklung des Zustands maßgeblich von den vorhandenen Daten abhängt. Das Monitoring kann die benötigten Daten liefern.

Bild 38 zeigt, dass eine Bestimmung der Leistungsfähigkeit mit Monitoring (LCM mit Monitoring) im Gegensatz zu diskreten Untersuchungen (LCM ohne Monitoring) einen Informationsgewinn bedeutet. Das wiederum bedeutet, dass das Erhaltungsmanagement auf den tatsächlichen Zustand und seine erwartete Entwicklung abgestimmt werden kann. Damit kann bestenfalls eine Erhaltungsentcheidung getroffen werden, welche mit weniger Aufwand, weniger Kosten oder weniger Verkehrsbehinderungen einhergeht.

Der Einsatz von ganzheitlichen Monitoring-Ansätzen (Top-Down-Ansätzen) für eine ganzheitliche Betrachtung von Brücken kann das Wissen um den tatsächlichen Zustand der Brücke deutlich erhöhen. Allerdings sind hier auch Kosten für die Installation und den Betrieb solcher Anlagen mit in die Lebenszykluskosten-Rechnung einzubeziehen. Zum aktuellen Zeitpunkt scheint es nicht realistisch, dass sich ein Dauermonitoring an allen Brücken durchsetzt.

4.3 Anbindung von Monitoring an bestehende Regelwerke

Für die Erhaltungsplanung gibt es einige Regelwerke, die zur Anwendung kommen und den Einsatz von Monitoring möglich bzw. notwendig machen. Dieses betrifft die folgenden Regelwerke:

- Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA) (06-2004) (BMVBS 2007)

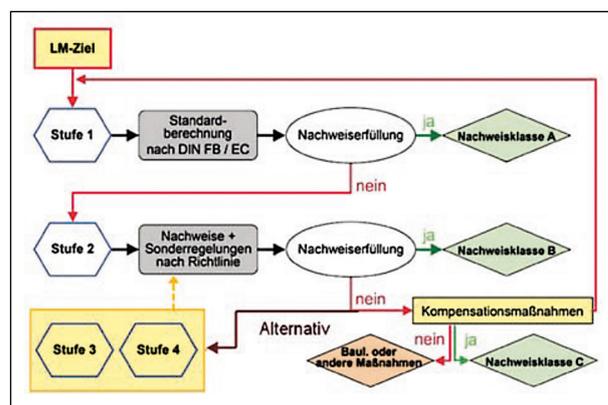


Bild 39: Stufen der Nachrechnung (FISCHER et al. 2016; MARZAHN et al. 2014)

- Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion (06-2011) (BMVBS 2011a)
- Handlungsanweisung zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonüberbauten (BASt 1998)
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) (BASt 1998) (BASt 2019)
- BMVI Nachrechnungsrichtlinie (05-2011) (BMVBS 2011b)

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Nachrechnungsrichtlinie des BMVI näher betrachtet werden. Die Nachrechnungsrichtlinie wurde im Jahr 2011 eingeführt. Mit ihr wurde ein Instrument geschaffen um Bestandbrücken in Bezug auf ihre Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu bewerten (BMVBS 2011b). Im Rahmen der Richtlinie erfolgt die Nachrechnung in verschiedenen Stufen, wie Bild 39 zeigt.

In der 1. Stufe erfolgt die Nachrechnung nach der Standardberechnung für Neubauten. Wenn die Nachweise nicht erfüllt werden können, wird in der 2. Stufe der Nachweis mit Sonderregeln aus der Nachrechnungsrichtlinie nachgerechnet. Eine solche Sonderregel ist z. B. die Abminderung von Zwangsbedingungen, die beispielsweise aufgrund von Temperatur entsteht, die unter Zugrundlegung einer linear elastischen Materialverhaltens berechnet wird. Falls der Nachweis hier auch nicht erfüllt werden kann, erfolgt die Nachrechnung nach einer kleineren Brückenklasse und der Einführung von Kompensationsmaßnahmen (FISCHER et al. 2016). Einschränkungen bei der Restnutzungsdauer sind die Folge.

Die Kompensationsmaßnahmen dienen dazu, eine weitere verkehrliche Nutzung der Bestandsbrücke sicherzustellen. Diese Kompensationsmaßnahmen lassen sich in verkehrlichen Kompensationsmaßnahmen und kompensierenden Überwachungsmaßnahmen unterteilen. Als kompensierende Überwachungsmaßnahmen nennt die Richtlinie die Einrichtung permanenter Kontrollmechanismen, wie beispielsweise die Einrichtung eines Monitorings, oder Einführung zusätzlicher Maßnahmen der Bauwerksprüfung nach (DIN 1076:1999), beispielsweise verringerte Prüfabstände (BMVBS 2011b).

Die kompensierenden Überwachungsmaßnahmen können unterschieden werden in einmalige diskrete, wiederholende diskrete und kontinuierlich kompensierende Überwachung. Beispiele für einmalige diskrete Überwachungsmaßnahmen sind die Durchführung einer Probelastung oder die Ermittlung von Materialeigenschaften. Mit dieser Maßnahme wird die Unsicherheit auf der Einwirkungsseite bis zur Versuchslast hin gesenkt. Hiermit kann die Nachrechnung mit genaueren Daten durchgeführt werden, dies kann zu einer Erhöhung des Zuverlässigkeitsniveaus führen. Die wiederholende diskrete Überwachung liegt vor bei in zeitlichen Intervallen wiederkehrenden Inspektionen oder in wiederholenden Probelastungen. Eine kontinuierliche Überwachungsmaßnahme stellt beispielsweise die Überwachung der Verkehrslast, also der tatsächlichen verkehrlichen Einwirkung, dar. Ab dem Überschreiten einer vorher festgelegten Grenze kommt es zur Sperrung einzelner Fahrbahnen oder der gesamten Brücke. Der Sicherheitsgewinn findet auch hier auf der Einwirkungsseite statt und führt im Endeffekt zur Reduzierung der Teilsicherheitsbewerte (HAARDT 2017; SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015; SIEGERT et al. 2015).

Ziel der kompensierenden Überwachungsmaßnahme ist es, durch die Überwachung einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn zu generieren und damit das Zuverlässigkeitsniveau der Bestandsbrücke zu erhöhen. Dieser Ansatz ist in SIEGERT et al. (2015) theoretisch beschrieben. Um diesen Sicherheitsgewinn zu quantifizieren und damit eine Reduzierung der Teilsicherheitsbewerte zu erreichen wurde im Projekt FE15.0625 „Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken“ ein Verfahren entwickelt (RALBOVSKY et al.). Dieses Verfahren wird im Kapitel 2.4 beschrieben und die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung dieses Verfahrens wird in Kapitel 2.4.3 erläutert.

5 Pilotstudie „duraBASt“

5.1 duraBASt

5.1.1 Allgemeine Beschreibung der duraBASt

Das Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der Bundesanstalt für Straßenwesen - kurz duraBASt ist erbaut worden um auf die veränderte Situation der der Straßenverkehrsinfrastruktur in der Bundesrepublik Deutschland reagieren zu können. Hervorgerufen werden diese Veränderungen durch die Globalisierung, einen Anstieg im Individual- und Güterverkehr, einer alternde Straßenverkehrsinfrastruktur, den Klimawandel und den demografischen Wandel. Die im Rahmen des Forschungsprogramms „Straße im 21. Jahrhundert“ (BMVBS 2012) erarbeiteten innovativen Lösungen müssen vor ihrer standardmäßigen Umsetzung im Straßennetz beweisen, dass sie dem hohen Sicherheitsbedürfnis genügen und ökonomische, ökologische sowie sozial verträgliche Alternativen zu den bisherigen Standards sind. Hierzu sind realitätsnahe großmaßstäbliche Untersuchungen auf geeigneten Testflächen notwendig, welche die duraBASt bereitstellt. Die Betrachtung der Straßeninfrastruktur, die Erhaltung und die Erhaltungsplanung sind von großer Bedeutung. Grundlage für die Erhaltungsplanung ist u. a. die regelmäßige Straßenzustandserfassung, hierzu bedarf es einer Referenzstrecke, welche ebenfalls auf der duraBASt geschaffen wurde. Die duraBASt dient als Referenzstrecke und ermöglicht realitätsnahe Untersuchungen im Maßstab 1:1 (BASt 2017).

Das Gelände liegt auf einer bisher ungenutzten Fläche im Autobahnkreuz Köln-Ost (BAB A3/A4). Auf dem Gelände befinden sich unterschiedliche Brückenbauwerke, eine tunnelähnliche Situation und freie Streckenabschnitte. Das Areal hat eine Grundfläche von ca. 25.000 m² und einer Gesamtlänge von gut einem Kilometer. Es befindet sich unmittelbar neben der A3 und ist durch die Verbindungsrampe von Frankfurt (A3) nach Köln und der Auffahrt der A4 auf die A3 in Richtung Oberhausen begrenzt (BASt 2017).

5.1.2 Beschreibung der Brücke an der duraBASt

Auf der duraBASt befindet sich ein Brückenbauwerk, welches in der Datenbank SIB-Bauwerke unter der Bauwerksnummer 5008737 2 geführt wird. Das Bauwerk ist eines von 4 parallel zueinander lie-

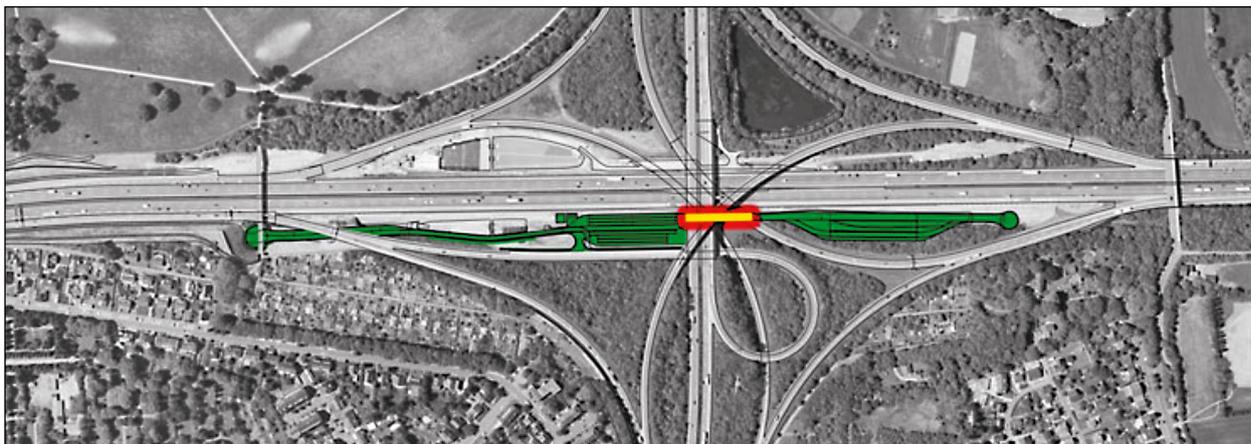


Bild 40: Lage der intelligenten Brücke an der duraBAST (BAST 2017)

genden und bauähnlichen Teilbauwerken im Autobahnkreuz Köln-Ost und wird in den Bestandsplänen mit 2d bezeichnet. Die Lage der Brücke kann Bild 40 entnommen werden.

Das Bauwerk wurde 1973 gebaut, jedoch nie in Betrieb genommen. Es handelt sich um eine zweifeldrige Hohlkastenbrücke mit einer Gesamtlänge von 66 m bei Einzelstützweiten von 30,50 m und 35,50 m. Mit einer Breite von 14,25 m weist das Bauwerk eine Brückenfläche von 941 m² auf. Das Bauwerk ist schiefwinklig mit einem Winkel von 45 gon – rechts, so dass der Fahrbahnübergang eine Konstruktionslänge von 24,77 m aufweist. Die Konstruktionshöhe beträgt 1,40 m.

Die letzte Bauwerksprüfung fand im Juni 2010 statt und der Zustand der Brücke wurde mit 2,3 benotet. Begründet wird diese Note durch die defekte Absturzsicherung an der Revisionsöffnung, die die Verkehrssicherheit beeinträchtigen und Schäden an den Widerlagern, welche die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen.

Im Zuge des Baus der duraBAST wurde das Bauwerk grundhaft instandgesetzt. Hierbei wurden der Fahrbelag inklusive der Abdichtung und die Brückenkappen erneuert. Als Fahrbahnübergang der Brücke wurde eine Polyflex-Dehnungsfuge eingebaut.

5.1.3 Ziel und Nutzen dieses Projektes

Das Ziel der geplanten Maßnahmen im Rahmen der duraBAST ist die Realisierung von Teilaspekten der Intelligenten Brücke.

Beabsichtigt ist die Integration der Ergebnisse abgeschlossener und laufender Projekte aus den The-

menbereichen Modellierung zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung, Datenerfassung mithilfe von Sensorsystemen und die Datenverarbeitung. Das Vorhaben an der duraBAST-Brücke ist ein wichtiger Schritt im Hinblick auf die Realisierung der Meilensteine der „Straße im 21. Jahrhundert“.

Hervorstechende Merkmale des Bauwerks sind, dass eine Instandsetzung des Fahrbahnbelags, der Kappen und des Fahrbahnübergangs erfolgt, sodass Sensorik unmittelbar in die neuen Bauteile eingebaut werden kann und dass zum anderen der Zugang zum Bauwerk ohne Einschränkungen des Verkehrs auch nach Instrumentierung möglich ist. Somit eignet sich das Bauwerk an dieser Stelle in hohem Maße als Demonstrationsobjekt. Das Bauwerk kann über die gesamte Nutzungsdauer der duraBAST betrachtet und begleitet werden und dient damit zur wichtigen Erfahrungssammlung hinsichtlich Anwendbarkeit, Handhabung und Verarbeitung realer Daten. Auch die Langzeitstabilität der Messtechnik kann hier unter realen Bedingungen beobachtet und bewertet werden.

5.2 Dauerhaftigkeit

Dauerhaftigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen gegenüber äußeren Einflüssen wie Feuchte, Hitze und Kälte, Temperaturwechsel und Frost, Sonneneinstrahlung und chemischem Angriff (z. B. Tausalz). Die Dauerhaftigkeit von Beton- bzw. Stahlbetonbrücken wird insbesondere durch den Einfluss von Feuchte und dem Eindringen von Chloriden, welche zur Korrosion führen, bestimmt. In den folgenden Kapiteln wird auf die Aspekte Korrosion und Feuchte eingegangen. Hierbei werden die Prozesse beschrieben und die

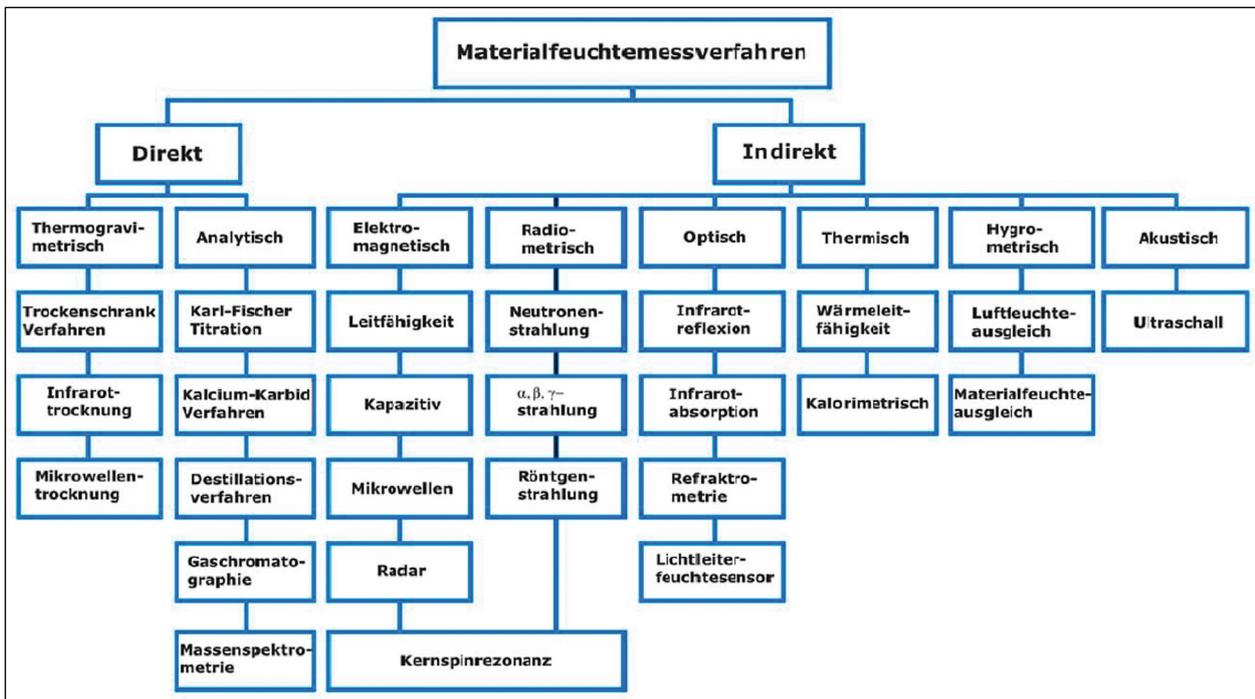


Bild 41: Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte (MOUHASSEB 2007)

eingesetzten Sensorik an der duraBAST. Den Abschluss bildet ein Kapitel zum Thema Einsatz von Sensorik bei der Bauwerksprüfung und der Intelligenen Brücke.

5.2.1 Feuchte

60 % der Kosten des Bauvolumens werden für Instandsetzungen verwendet. Hierbei stellen feuchteinduzierte Prozesse neben mechanischen Belastungen die wesentlichste Ursache für Schäden an Bauwerken dar. Die Bestimmung der Feuchtigkeit im Beton ist ein wichtiger Aspekt, da die Feuchtigkeit in Beton ein wesentlicher Faktor für Korrosionsprozesse ist (KRUSCHWITZ 2014; MOUHASSEB 2007; STRANGFELD et al. 2016).

Baustoffe wie Betone weisen auch im trockenen Zustand einen gewissen Feuchtegrad auf. Dieses Wasser ist fest gebunden und als fester Bestandteil des Baustoffs anzusehen. Es handelt sich um das chemisch gebundene Wasser. Für die Bestimmung der Feuchtigkeit im Beton spielt das so gebundene Wasser keine Rolle. (MOUHASSEB 2007; UNGRICHT 2004)

Relevant für die Feuchtigkeit des Betons sind das physikalische gebundene und das freie Wasser. Das physikalisch gebundene Wasser wird durch van der Waals-Kräfte an die Oberfläche des Zementsteins gebunden. Mit zunehmendem Abstand

von der Zementsteinoberfläche werden diese Anziehungskräfte kleiner und die Beweglichkeit der Wassermoleküle grösser, bis von ungebundenem oder freiem Wasser gesprochen werden kann (UNGRICHT 2004).

Der Transport von Wasser im Beton wird durch die Prozesse Adsorption und Desorption an den Poren bestimmt. Entscheidend für den Transport sind die Aspekte Porenvolumen, Verteilung der Poren GröÙe der Poren, Sättigungsgrad des Betons und das Wasserangebot. Der Transport des Wassers im Beton kann in flüssiger Form oder als Wasserdampf stattfinden (ANTONS 2017).

Die Verfahren zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Beton sind vielfältig. Es kann zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden werden. Bild 41 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten Materialfeuchten zu bestimmen.

Die direkten Verfahren haben den Vorteil, dass die Feuchte sehr genau bestimmt werden kann, allerdings handelt es sich um zerstörende Verfahren. Ihr Einsatz an Brücken ist daher nur bedingt geeignet. Den zerstörungsfreien indirekten Methoden wird der Vorzug gegeben. Bei indirekten Verfahren erfassen die Sensoren den Feuchtegehalt über die Messung von Substanzeigenschaften des Wassers, welche einen funktionalen Zusammenhang aufweisen. Beispielsweise wird die Leitfähigkeit des

Wassers bestimmt und über spezifische Kalibrierkurven ein Rückschluss auf den tatsächlichen Feuchtegehalt geschlossen. Nachteil ist, dass bei den indirekten Verfahren die Messwerte beispielsweise durch die Temperatur, Dichte oder Salzgehalt beeinflusst werden können.

5.2.1.1 Sensorik zur Bestimmung von Feuchte

An der duraBAST wurden drei verschiedene Sensortypen installiert. Es handelt sich um

- 5 Multiringelektroden



Bild 42: Feuchtesensoren (BS2 links oben und BAM rechts unten) auf der duraBAST (eigene Aufnahme)

- 8 RFID Feuchtesensoren der BAM
- 9 RFID Feuchtesensoren von der Firma BS2 Sicherheit GmbH

Die Feuchtesensoren wurden an den Abläufen der Fahrbahn, am Fahrbahnübergang, in der Mitte der Fahrbahn und in der Kappe eingebaut. Für den Einbau der Sensoren in der Fahrbahn wurden Kernbohrungen durchgeführt. Durch Ankoppelmörtel wurden die Bohrlöcher, nach dem Einsetzen der Sensoren, verschlossen. An den 4 Abläufen der Fahrbahn wurden jeweils eine Multiringelektrode, ein RFID Sensor der BAM und ein RFID-Sensor von BS2 eingebaut. Zusätzlich wurde jeweils ein Sensor von jedem Hersteller in der Mitte der Fahrbahn als Referenz zu den Sensoren an den Fahrbahnabläufen eingebaut. Die Feuchtigkeitssensoren von BS2 und der BAM sind in Bild 42 zu erkennen.

Zusätzlich werden Sensoren in der Nähe des Fahrbahnübergangs eingebaut. Jeweils drei Sensoren von BS2 und der BAM wurden installiert. Ein weiterer Sensor von BS2 wurde in der Brückenkappe eingebaut. Die Lage aller Sensoren ist in Bild 43 gezeigt.

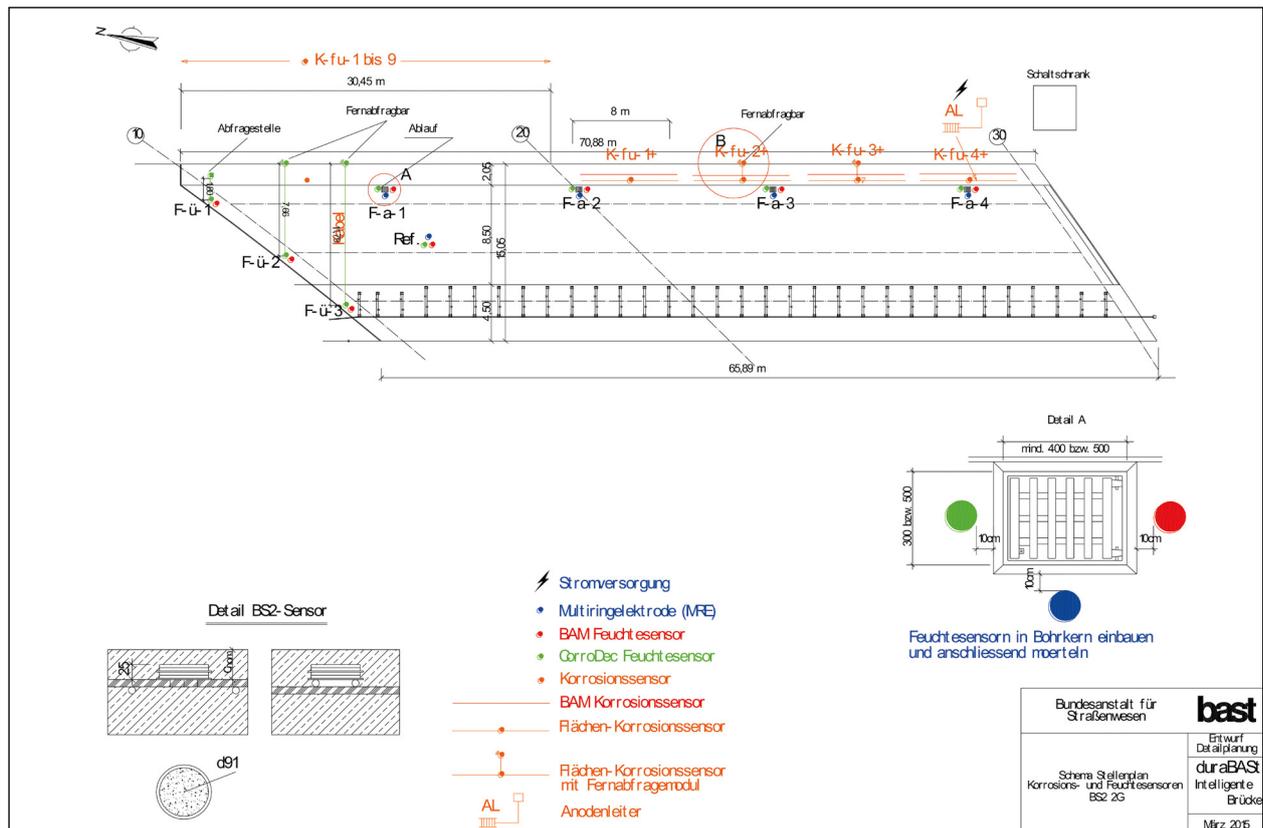
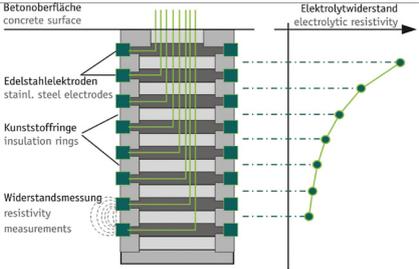


Bild 43: Lage der Korrosions- und Feuchtesensoren an der duraBAST-Brücke

Sensor	Hersteller	Technik	Messprinzip	Aufbau der Sensoren
CorroTec Feuchtesensoren	BS2 Sicherheitssysteme GmbH	RFID	Das Messprinzip des CorroDec®2G Feuchtesensors beruht auf der Bestimmung des elektrolytischen Widerstands sowie der Temperatur des umgebenden Betons. Die so gemessene elektrische Leitfähigkeit kann anhand von Kalibrierkurven in Feuchtigkeit in Masseprozent umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt automatisch mit der CorroDec2 Software. Für jeden Beton ist die Erstellung von eignen Kalibrierkurven zur Bestimmung der Feuchtigkeit notwendig (BS2 Sicherheitssysteme GmbH 2017).	
Multiringelektrode	Sensortec GmbH	Kabelgebunden	Die Multiringelektrode besteht aus mehreren übereinander angeordneten Edelstahlingen, die durch Kunststoffringe voneinander getrennt sind. Durch die Messung des Wechselstromwiderstands zwischen zwei benachbarten Ringen ergibt sich ein Widerstandsprofil über die Sensorlänge. Anhand von Kalibrierkurven kann aus dem Widerstand die Feuchte in Masseprozent ermittelt werden (Sensortec GmbH 2018a).	
Feuchtesensor	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	RFID	Im RFID-Feuchtesensor ist ein Luftfeuchtesensor mit einem sehr geringen Energieverbrauch integriert. Der Feuchtesensor wird durch einen Quarzglasfilter geschützt. Der Sensor misst die relative Luftfeuchte im Hohlraum, in dem der Sensor im Beton eingebaut ist. Der Feuchtegehalt des umgebenden Betons wird indirekt über die Sorptionsisotherme bestimmt. Das Ausgangssignal des Feuchtesensors wird zum Mikrochip, welcher sich auf der Platine befindet, übergeben, welcher dieses dann mittels RFID Übertragung zum Transmitter weiterleitet (STRANGFELD 2017).	

Tab. 12: Feuchtesensoren in der duraBAST-Brücke (BS2 Sicherheitssysteme GmbH 2017; Sensortec GmbH 2018a; STRANGFELD 2017)

Die Funktionsweise der einzelnen Sensoren ist in der Tabelle 12 beschrieben.

5.2.1.2 Ergebnisse der Bestimmung der Feuchte

Die Bestimmung der Feuchte in der duraBAST-Brücke kann über die Multiringelektroden und die Feuchtesensoren von BS2 erfolgen.

Die Multiringelektrode bietet eine Möglichkeit die Feuchte im Beton zu messen. Es handelt sich um ein indirektes Verfahren, da die elektrischen Widerstände erfasst werden. Die Multiringelektrode besteht aus mehreren übereinander angeordneten Edelstahlingen. Durch das Anlegen einer Wechselspannung zwischen zwei beieinanderliegenden Ringen kann der spezifische Widerstand erfasst werden. Gemessen werden Absolutwerte des elektrischen Widerstands. Diese Werte sind geometrieabhängig und müssen daher mit einer Zellkonstanten in den spezifischen elektrischen Widerstand umgerechnet werden (UNGRICHT 2004). Die Zellkonstante muss experimentell bestimmt werden

und beträgt für die Multiringelektroden $k = 0,1$. Im nächsten Schritt werden die gemessenen spezifischen Widerstände mithilfe der Arrhenius-Gleichung auf eine Bezugstemperatur von 25°C umgerechnet. Diese Umrechnung erfolgt anhand der folgenden Formel:

$$\rho_{298K} = \rho_T e^{\left[\left(\frac{E_A}{R_G}\right) \left(\frac{1}{298K} - \frac{1}{T}\right)\right]}$$

mit

ρ_{298K} = spezifischer Betonwiderstand bei 298 K (25°C)

ρ_T = spezifischer Betonwiderstand bei der Messtemperatur

E_A = Aktivierungsenergie für den Ionenfluss (9 kJ/mol)

R_G = universale Gaskonstante ($8,3144 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T = gemessene Temperatur

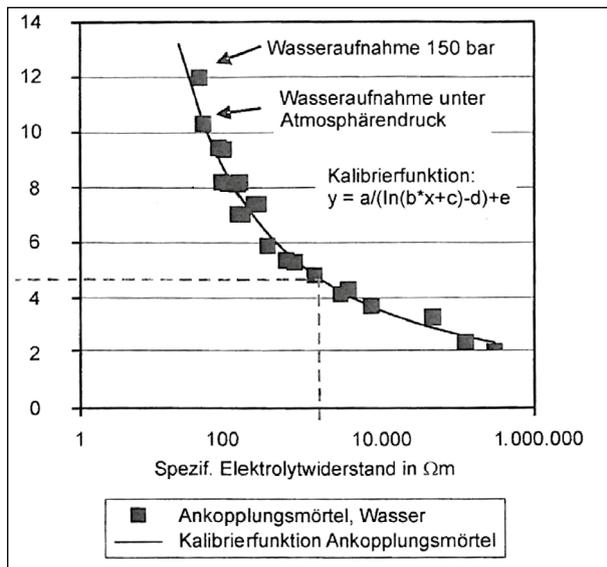


Bild 44: Kalibrierkurve des Ankoppelmörtels an der Brücke Rietbüsche (BRAMESHUBER et al. 2008)

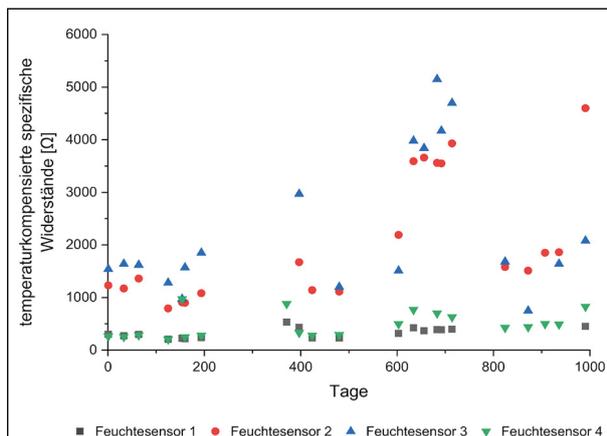


Bild 45: Temperaturkompensierte spezifische Widerstände der Multiringelektroden in ca. 10 cm Tiefe

Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt der spezifische elektrische Widerstand des Betons ab bzw. die spezifische elektrische Leitfähigkeit zu (UNGRICHT 2004). Bild 44 zeigt den Zusammenhang zwischen spezifischen Widerständen und Feuchtegehalt für den Ankoppelmörtel an der Brücke Rietbüsche in Meschede (BRAMESHUBER et al. 2008).

An der duraBAST wurden drei Multiringelektroden nachträglich in Bohrlöchern eingebaut. Die Sensoren wurden an der Brücke aufgrund von bautechnischen Vorteilen, so eingebaut, dass sich der 1. Edelstahlring unten befindet und der 8. Edelstahlring oben, also näher zur Oberfläche. Die Bohrkern wurden anschließend mit Ankoppelmörtel abdichtet. Der Ankoppelmörtel übernimmt innerhalb von etwa 2 Monaten den Feuchtegehalt des umgebenden Betons (BRAMESHUBER et al. 2008). Zur

Bestimmung der absoluten Baufeuchte ist eine Kalibrierung des Baustoffs hinsichtlich seiner Wassergehalt-Elektrolytwiderstand-Relation notwendig. Dieses wurde für unser Fallbeispiel nicht gemacht, es wurden nur die Veränderungen des temperaturkompensierten spezifischen Widerstand beobachtet (RAUPACH 2009).

Bild 45 zeigt die Entwicklung der temperaturkompensierten spezifischen Widerstände der Multiringelektroden in ca. 10 cm Tiefe. Die Daten zeigen den Zeitraum vom 24.02.2017 (Tag 1) bis zum 11.11.2019 (Tag 991). Für die Feuchtesensoren 1 und 4 ergibt sich über den gesamten Messzeitraum von ca. 3 Jahre, dass die spezifischen temperaturkompensierten Widerstände in einem Bereich bis 1000 Ω liegen. Es sind keine klaren Tendenzen zu erkennen und die Daten schwanken innerhalb des gesamten Messzeitraums. Die Feuchtesensoren 2 und 3 liegen zumeist in einem Bereich zwischen 1000 und 3000 Ω und weisen damit eine geringere Feuchtigkeit auf. Diese Erkenntnis lässt sich aus Bild 44 ablesen, mit steigenden Widerständen im Beton sinkt der Feuchtegehalt ab. In Tagen 600 bis 700 zeigen sich sogar deutlich höhere Messwerte von bis zu 6000 Ω , zu dieser Zeit ist der Beton deutlich ausgetrocknet. Die Gründe hierfür sind nicht bekannt, der Messzeitraum liegt nicht im Sommer.

Die Sensoren der Firma BS2 wurden am Fahrbahnübergang und an den Fahrbahnabläufen eingesetzt. Die Bestimmung der Feuchte erfolgt ebenfalls anhand der Bestimmung des elektrolytischen Widerstands und der Temperatur. Bei dem gemessenen elektrolytischen Widerstand handelt es sich um einen Absolutwert. Dieser ist geometrieabhängig und wird mit einer Zellkonstanten in den spezifischen elektrolytischen Widerstand umgerechnet (UNGRICHT 2004). Die Zellkonstante für die Sensoren beträgt 0,78. In einem weiteren Schritt werden die spezifischen Widerstände auf eine Bezugs-temperatur von 20°C umgerechnet. Diese Umrechnung erfolgt mithilfe der Arrhenius-Gleichung, welche bei den Multiringelektroden definiert wurde. Die Bestimmung der Feuchtegehalte in Masseprozent erfolgt dann anhand von Kalibrierkurven (BS2 Sicherheitssysteme GmbH 2017). Der beschriebene Prozess wird durch eine Spezialsoftware ausgeführt, das heißt im Ergebnis liegen Daten zu Temperatur und Feuchte in Masseprozent vor.

Der zeitliche Verlauf der Feuchte an den Fahrbahnabläufen ist in Bild 46 zu sehen. Hierbei wird die Entwicklung der Daten vom Einbau der Sensoren

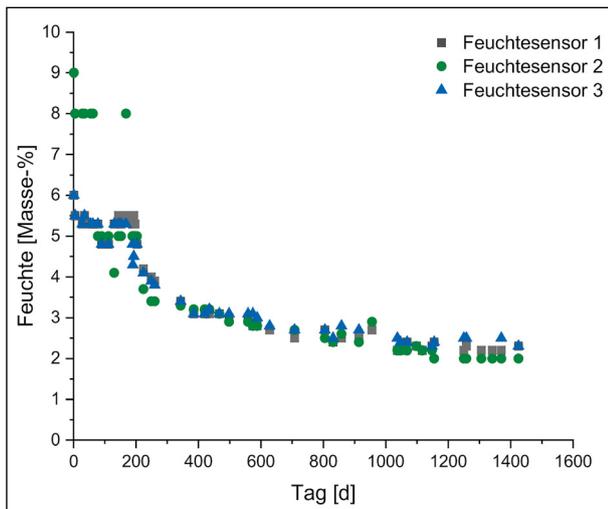


Bild 46: Feuchtegehalt an den Fahrbahnabläufen

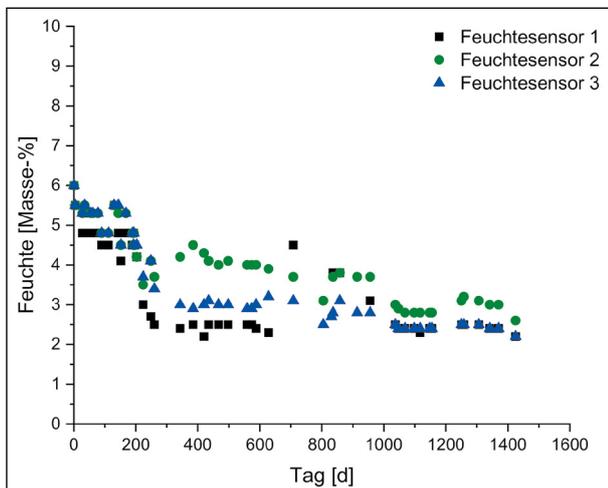


Bild 47: Feuchtegehalt am Fahrbahnübergang

am 18.12.2015 (Tag 1) bis zum 11.11.2019 (Tag 1425) gezeigt.

Der Feuchtegehalt an den Fahrbahnabläufen hat sich von einem Bereich zwischen 5 und 6 Masseprozent Feuchte auf einen Bereich zwischen 2 und 3 Masseprozent Feuchte entwickelt. Die hohen Werte zu Beginn sind auf die Feuchte im Mörtel und die nicht abgedichtete Fahrbahn zurückzuführen. Am Tag 220 wurde die Fahrbahn abgedichtet. Ab diesem Zeitpunkt lässt sich eine deutliche Abnahme der gemessenen Feuchte feststellen.

Die Entwicklung der Feuchte am Fahrbahnübergang zeigt Bild 47.

Auch am Fahrbahnübergang haben die Feuchtegehalte zu Beginn in einem Bereich zwischen 5 und 6 Masseprozent Feuchte gelegen. Nach etwa 200 Tagen hat der Feuchtegehalt deutlich abgenommen. Bis zum Einbau des Fahrbahnübergangs um den Tag 950 zeigen die Feuchtesensoren 1 und 3

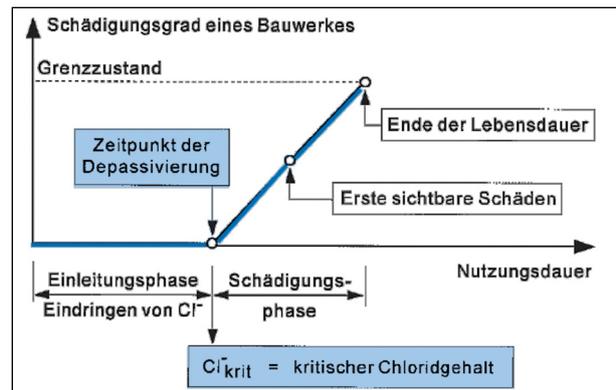


Bild 48: Schädigungsgrad eines Bauwerkes durch Korrosion in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer (BREIT 2001)

Feuchtegehalte zwischen 2 und 3 Masseprozent. Der Feuchtesensor 2 zeigt für den Zeitraum zwischen Tag 200 und 950 höhere Feuchtegehalte in einem Bereich zwischen 3 und 5 Masseprozent. Mit dem Einbau des Fahrbahnübergang um den Tag 950 zeigen die Werte für den Feuchtesensor 2 eine Rückgang der Feuchtegehalte, aktuell liegen die Werte in einem Niveau zwischen 2 und 3,5 Masseprozent Feuchte.

5.2.2 Korrosion

Korrosion führt jährlich zu volkswirtschaftlichen Einbußen in Milliardenhöhe. Wenn der Beginn der Korrosion rechtzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen in Form von Erhaltungsmaßnahmen ergriffen werden, können Kosten eingespart und Risiken gemindert werden. Die chloridinduzierte Korrosion ist eine der häufigsten Schädigungsarten an Betonbrücken (DREßLER et al. 2015; SCHNELLENBACH-HELD et al. 2015).

Chloride sind in Beton im geringen Maße als Zuschlagsstoff enthalten, die enthaltenden Chloride führen aber nicht zu chloridinduzierter Korrosion des Stahls im Beton. Für diesen Prozess muss durch äußere Einwirkungen Chlorid in den Beton eindringen. Im Fall von Brückenbauwerken ist die Ursache die Tausalzeinwirkung verursacht durch den Winterdienst (BREIT 2001). Grundsätzlich wird der Bewehrungsstahl durch einen Passivfilm an seiner Oberfläche vor Korrosion geschützt. Wird jedoch ein kritischer Chloridgehalt an der Bewehrungs Oberfläche überschritten oder verliert der Beton seine Alkalität infolge von Karbonatisierung (Depassivierung), so wird die natürliche Schutzschicht des Stahls angegriffen und Korrosionsprozesse können einsetzen (Bild 48) (DREßLER et al. 2015).

Für den kritischen Chloridgehalt sind zwei Definitionen denkbar (SCHIEßL und RAUPACH 1990):

- Ein kritischer Chloridgehalt ist erreicht, wenn die Depassivierung der Stahloberfläche eintritt und die Eisenauflösung beginnt, unabhängig davon, ob diese zu sichtbaren Korrosionsschäden an der Betonoberfläche führt.
- Ein kritischer Chloridgehalt ist erreicht, wenn er zu einer als Schaden einzustufenden Korrosionserscheinung führt.

Bild 48 zeigt den Zusammenhang zwischen Schädigungsgrad und Nutzungsdauer. Mit dem Eindringen von Chloriden kommt es zum Ende der Einleitungsphase zur Depassivierung des Bewehrungsstahls (BREIT 2001). Mit diesem Prozess wird die Schädigungsphase eingeleitet und die Nutzungsdauer des

Bauwerks eingeschränkt. Die Entwicklung des Chloridgehalts in Beton kann durch den Einsatz von Monitoring überwacht werden. Diese hat den Vorteil, dass bereits vor dem Eintritt der Schädigungsphase Erhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden können und damit die Nutzungsdauer eines Bauwerks verlängert werden kann und die Kosten für die Instandsetzung niedrig gehalten werden können.

5.2.2.1 Korrosionssensorik

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben können um den Prozess der Korrosion frühzeitig zu erkennen Sensoren mit unterschiedlicher Funktionsweise eingesetzt werden. An der duraBAST wurden die in Tabelle 13 aufgeführten Korrosionssensoren eingebaut. In dieser Tabelle werden die einzelnen Senso-

Sensor	Hersteller	Technik	Messprinzip	Schematischer Aufbau
CorroTec Korrosionssensor	BS2 Sicherheitssysteme GmbH	RFID	Der CorroDec®2G Korrosionssensor wird vor (mittels Rödel-Draht) oder nach dem Betonieren über dem Bewehrungsstahl angebracht. Um den Sensorkörper ist ein spezieller Sensordraht geführt, der durch korrosive Einflüsse zerstört wird. Mithilfe des RFID Lesegeräts können Informationen zur Temperatur und zum Zustand der Sensordrähte abgerufen werden. Der Sensordraht meldet für den Fall, dass er zerstört ist, dass Korrosion vorliegt (BS2 Sicherheitssysteme GmbH 2017).	
Anodenleiter	Sensortec GmbH	Kabelgebunden	Der Anodenleiter besteht aus sechs Einzelanoden, die tiefengestaffelt zwischen der äußeren Bewehrung und der Bauteiloberfläche angeordnet werden, einer Titanmischoxid-Kathode und einem Temperatursensor. Die Korrosion der Einzelanode ist durch Messung des Korrosionspotenzials und des Korrosionsstroms gegen die Titanmischoxid-Kathode von außen messbar. Durch zyklische Messungen kann das Eindringen der Schädigungsfront durch den Bauwerksbetreiber verfolgt und die zu erwartende Schädigungsentwicklung rechnerisch extrapoliert werden. Elektrolytwiderstandsmessungen zwischen benachbarten Anoden geben Aufschluss über die Feuchteverteilung innerhalb des Bauteils (Sensortec GmbH 2018b).	
Korrosionssensor	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	RFID	Das elektrochemische Potenzial zwischen der Bewehrung und einer definierten Referenz-Elektrode (Silber-Silber-Chlorid) wird gemessen. Die Elektrode ist offenmaschig umwickelt, um einen direkt elektrischen Kontakt zur Bewehrung zu verhindern. Korrosion verschiebt das elektrochemische Potenzial. Der Sensor kann zwischen passivierter Bewehrung und aktiver Korrosion unterscheiden. Elektrochemisches Potenzial von 0 bis 100 mV steht für passivierte Bewehrung und Spannungen von über 150mV sprechen für eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von aktiver Korrosion (STRANGFELD 2016).	

Tab. 13: Korrosionssensoren in der duraBAST (BS2 Sicherheitssysteme GmbH 2017; Sensortec GmbH 2018b; STRANGFELD 2016)

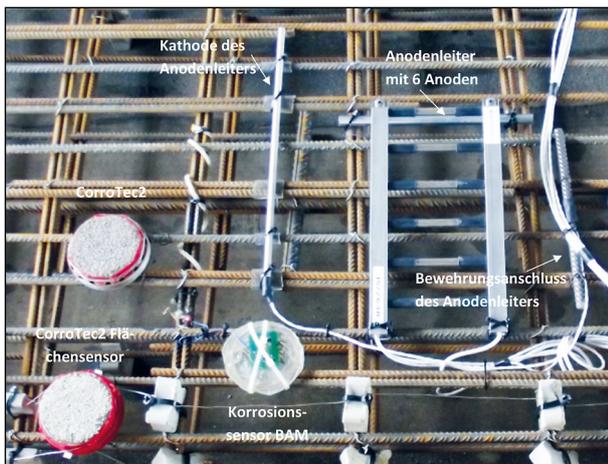


Bild 49: Korrosionssensoren an der duraBAST-Brücke vor der Betonage (eigene Aufnahme)

ren, Hersteller, Auslesetechnik, Messprinzip und der schematische Aufbau des Sensors erklärt.

Die verschiedenen Korrosionssensoren wurden in die Brückenkappen vor der Betonage eingebaut.

- 1 Anodenleiter von Sensortec
- 5 RFID Korrosionssensoren der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- 12 CorroTec 2 Korrosionssensoren von BS2 Sicherheitssysteme GmbH

Bild 49 zeigt die eingebauten Sensoren in der Brückenkappe vor der Betonage. Zusehen sind ein Anodenleiter der Firma Sensortec GmbH, ein Korrosionssensor der BAM und 2 Korrosionssensoren „CorroTec2“ der BS2 Sicherheitssystem GmbH. Einer der Corrotec2 Sensoren ist ein Flächensensor, das bedeutet, dass der Sensordraht verlängert wird und um den vorhandenen Bewehrungsstahl gewickelt wird. Somit kann die Korrosion in einer Länge von 6 m detektieren kann.

Die Lage aller Sensoren ist in Bild 43 dargestellt.

5.2.2.2 Ergebnisse zur Bestimmung der Korrosionsgefährdung des Bewehrungsstahls

Die Korrosionssensoren werden regelmäßig ausgelesen (alle 1 bis 2 Monate) und die Daten ausgewertet. An der duraBAST-Brücke konnte bisher keine Korrosion des Bewehrungsstahls festgestellt werden. Die Sensoren kommen hier zu den gleichen Ergebnissen.

Die Korrosionssensoren der Firma BS2 GmbH geben eine Warnmeldung zur Korrosion heraus, sobald ein Sensordraht korrodiert und damit zerstört ist. Der Auswertung der Korrosionssensoren kön-

nen zwei Informationen entnommen werden. Es wird eine Information zum Messwert herausgegeben, beträgt der Messwert 0, liegt keine Korrosion vor. Weiterhin wird eine Information zum Status des Sensors übertragen, der Status 0 bedeutet, dass der Sensor intakt ist. Die Messungen im Zeitraum 18.12.2015 (Tag 1) bis zum 11.11.2019 (Tag 1425) zeigen keine Korrosion und alle eingesetzten Sensoren sind intakt.

Beim Anodenleiter erfolgt die Bestimmung der Korrosion über die Messung der elektrischen Ströme (μA) zwischen den 6 Anoden des Anodenleiters und dem Bewehrungsanschluss des Sensors gegen die Kathode. Bei Werten die niedriger als $15 \mu\text{A}$ liegen, liegt keine Korrosion vor, die Anode ist passiv. Bei Werten von über $15 \mu\text{A}$ liegt eine Depassivierung vor und die Anode ist aktiv. Diese Grenzwerte gelten, wenn sich der Anodenleiter nicht in wassergesättigtem Beton befindet oder die Kathode in trockenem und die Anode in wassergesättigtem Beton eingebaut wurde. In diesem Fall liegen die Grenzwerte deutlich höher. Die Bestimmung des Grenzwertes erfolgt dann gleichzeitig mit den Daten zum elektrischen Widerstand und dem Korrosionspotential, welche ebenfalls mit dem Anodenleiter gemessen werden können. Der elektrische Widerstand (mV) wird über die Anoden und den Bewehrungsanschluss gegen die Kathode bestimmt. Das Korrosionspotential (Ohm) wird über Wechselstrom zwischen 2 benachbarten Anoden und Anode gegen den Bewehrungsanschluss gemessen. In diesem Fall liegt er Grenzwert und damit eine Depassivierung vor, wenn die elektrischen Ströme deutlich anstiegen und das Korrosionspotential plötzlich abfällt (Sensortec GmbH 2018b).

An der duraBAST Brücke liegt der Anodenleiter nicht in einem wassergesättigten Beton, Anode und Kathode liegen nahe beieinander und der Feuchtegehalt im Beton ist gleichmäßig verteilt. Daher ist in diesem Fall die Überwachung der elektrischen Ströme und dem Grenzwert von $15 \mu\text{A}$ ausreichend.

Die Tabelle 14 zeigt einen Ausschnitt der Messergebnisse des Anodenleiters. Angegeben ist der elektrische Strom zwischen den Anoden (A1 bis A6) und der Kathode (C) und zwischen dem Bewehrungsanschluss des Anodenleiters (CR) und der Kathode (C). Im Ergebnis zeigt sich, dass keine Korrosion vorliegt.

Die Sensoren der BAM (siehe Kapitel 5.2.2.1 Tabelle 13) können nicht mehr ausgelesen werden. Auf-

Datum	Einheit	A1 ¹ -C ²	A2-C	A3-C	A4-C	A5-C	A6-C	CR ³ -C
24.02.17	µA	0	0	0	0	0	0	0
01.03.18	µA	0	0	0	0	0	0	0
11.11.19	µA	0	0	0	0	0	0	0
1 Anoden A1 2 Kathode 3 Bewehrungsanschluss								

Tab. 14: Elektrische Ströme des Anodenleiters

grund der Überdeckung der Sensoren mit etwa 10 cm, ist die Feldstärke des RFID Signals nicht mehr ausreichend um ausgelesen zu werden. (Hierzu erfolgt noch eine Überprüfung durch die BAM.)

5.2.3 Einsatz von Dauerhaftigkeitssensorik in der Praxis

Bisher werden Sensoren zur Überwachung der Dauerhaftigkeit an Brücken nur selten eingesetzt. Der Einsatz ist beispielsweise während einer Instandsetzungsmaßnahme möglich. Hierbei können die Sensoren zur Überprüfung der Abdichtung dienen. Dieses Vorgehen wurde beispielsweise bei der Brückeninstandsetzung der Candidbrücke in München erprobt. In die Fahrbahnplatte wurden in Kernbohrungen Multiringelektroden eingesetzt, die Ausleseeinheiten wurden in die Hohlkästen der Brücke verlegt. Ziel war es die Abdichtung der Brücke zu überprüfen, hierzu wurde die Sensoren an den Stellen der Brücke eingesetzt, an den die Gefahr des Versagens der Abdichtung am größten ist. Daher wurden die Sensoren in der Nähe des Fahrbahnübergangs und an den Fahrbahnabläufen eingesetzt. Zusätzlich wurden Sensoren in der Mitte der Fahrbahn, an Punkten installiert, an dem die Abdichtung unter normalen Umständen keine Probleme aufweist (SODEIKAT 2010).

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist der Einsatz von Sensorik zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit im Brückenneubau. Auch dieser Anwendung ist noch nicht weit verbreitet. Ein Anwendungsbeispiel für den Einsatz von Dauerhaftigkeitssensoren ist eine Fußgängerbrücke in München, hier wurden beim Bau der Brücke drei Anodenleiter in die Oberfläche der Brücke integriert. Hierbei sollte die Gefährdung des Betons durch Chloride abgeschätzt werden, da die Randbereiche der Brücke aus gestalterischen Gründen nicht beschichtet wurden (SODEIKAT 2010).

Für die Steigerung des Einsatzes von Sensorik sind verschiedene Aspekte von Relevanz. Hier sind zu nennen:

- **Kosten:** Relevant sind die Kosten für die Beschaffung der Sensorik und der Auswertanlage und die Betriebskosten, die während der Laufzeit der Sensoren entstehen.
- **Lebensdauer der Sensoren:** Bei der Dauerhaftigkeit werden Prozesse betrachtet, welche erst nach einigen Jahren, teilweise erst nach Jahrzehnten entstehen. Daher sollen die Sensoren langlebig, robust und redundant sein.
- **Handling der Sensoren:** Ein einfaches und verständliches Handling in Bezug auf Einbau und Datenübertragung der Sensoren ist von großer Bedeutung. Der Einbau sollte möglichst einfach sein, dass er von eingewiesenem Personal erfolgen kann, da dieses die Kosten senkt. Auch die Datenübertragung sollte einfach sein, am einfachsten ist die automatisierte Datenübertragung und Auswertung der Daten über eine Software. Ein mögliches Vorgehen, kann die Festlegung von Schwellenwerten sein. Bei Überschreitung der Schwellenwerte wird die Information automatisiert an die Brückenverantwortlichen gesendet und damit kann zeitnah eingegriffen werden. Wenn die Datenauswertung von Seiten der Nutzer möglich ist, reduziert das zum einem die Kosten und die Möglichkeit des schnellen Eingriffs ist gegeben.
- **Sicherheit der Datenübertragung:** Die automatisierte Datenübertragung ist ein wichtiger Aspekt, die Übertragung der Daten müssen den neusten Sicherheitsstandards entsprechen.
- **Messdaten:** Es ist relevant, dass wahre und reproduzierbare Werte erzeugt werden und die Messungen störungsfrei laufen. Dieses ist notwendig, da eine Überschreitung von Schwellenwerten auch entsprechende Prozesse in Gang setzen und diese sollten nur bei tatsächlichen Problemen ausgelöst werden.
- **Auswahl der Sensorik und der Messperipherie:** Auf dem Markt gibt es eine Vielzahl von möglichen Sensoren. Wichtig ist, dass die Sensorik und die Messperipherie auf die Anwendung bezogen ausgewählt werden. Hierzu ist eine ge-

naue Beschreibung von Seiten der Betreiber nötig, welche Information wird benötigt. (Wie oft, wie genau, ...)

- Darlegung des Nutzens: Um den Einsatz von Sensorik weiter voranzubringen, ist es wichtig, die Nutzen der Monitoringmaßnahme belegen zu können.

Vorstellbare Einsätze von Dauerhaftigkeitssensorik:

- Bauwerksprüfung: Die eingebauten Korrosionssensoren werden bei jeder Prüfung ausgelesen. Ein Einbau während des Neubaus oder Instandsetzungsmaßnahmen ist hier ebenso denkbar, wie der nachträgliche Einbau von Sensoren.
- Überprüfung der Abdichtungsmaßnahme: Feuchte- und Korrosionssensoren werden automatisiert ausgelesen und übertragen. Bei der Übertretung von zuvor festgelegten Schwellenwerten erfolgt eine Information an die Brückenbetreiber.

5.3 Nachrechnung

Das Ziel der Nachrechnung einer bestehenden Brücke ist es, die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Beachtung des gestiegenen Verkehrsaufkommen und der Weiterentwicklung der Bautechnik zu beurteilen (BMVBS 2011b). Im Fall der duraBAST-Brücke wurde mit der Nachrechnung das Ziel verfolgt die Defizite der Brücke herauszuarbeiten. Geplant ist die Brücke nach Kenntnis ihrer Defizite mit Sensorik an den entsprechenden Stellen auszustatten um eine Analyse des Tragverhaltens durchzuführen und ein entsprechendes Tragsystem zu modellieren.

Die Nachrechnung ist ein mehrstufiges Verfahren auf Grundlage von Bemessungsreserven und angepassten Regelungen. Die Nachrechnung der duraBAST Brücke erfolgt nach den ersten beiden Stufen. In der ersten Stufe erfolgt der Nachweis nach DIN Fachbericht 102:2009 bzw. nach DIN EN 1992-1:2010. Diesen Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit müssen auch neue zu bauende Brücken erbringen. In der zweiten Stufe werden spezielle, die Stufe 1 ergänzende Regelungen zur Berechnung getroffen (BMVBS 2011b).

Die Nachrechnung der duraBAST-Brücke erfolgte durch das Ingenieurbüro „Schlüßler-Plan“, die folgenden Ausführungen sind aus dem zugehörigen

Bericht zur Nachrechnung entnommen (MOERLAND und ROMANSKI 2018).

Um die Nachrechnung durchzuführen zu können, wurde der Überbau der Brücke als Stabmodell abgebildet.

Im nächsten Schritt wurden die Einwirkungen für das Bauwerk definiert:

- Eigengewicht: Das Eigengewicht wird über die Wichte des Betons bestimmt.
- Ausbaulasten: Es wurden Ausbaulasten für Fahrbahnbelag, Kappe und Geländer berücksichtigt.
- Vorspannung: Zur Generierung der Vorspannung wurden die Angaben aus den Bestandsplänen verwendet.
- Kriechen und Schwinden: Die Beiwerte für das Kriechen und Schwinden wurden programmintern ermittelt unter Annahme von Betonalter und Gesamalter des Bauwerks.
- Verkehrslastmodell: Das Lastmodell 1 nach DIN Fachbericht 101:2009 wurde gewählt.
- Ermüdungslastmodell: Die Verkehrslasten werden aus dem Lastmodell LM3 nach DIN Fachbericht 101:2009 ausgewählt. Das LM3 ist ein Modell, das aus vier Achsen mit je zwei identischen Radlasten besteht.
- Temperatur: Die Einwirkung wird auch hier nach DIN Fachbericht 101:2009 bestimmt. Zusätzlich erlaubt die Nachrechnung, dass die Temperatureinwirkung um 40 % reduziert wird. Möglich wird dies durch den Abbau der Zwangsschnittgröße infolge Rissbildung.
- Windlasten: Die Einwirkungen des Windes werden nach DIN Fachbericht 101:2009 modelliert.
- Stützensenkung: Eine Senkung von 10 mm der einzelnen Lagerachsen wird angenommen.
- Bremsen und Anfahren: Die Einwirkungen von Bremsen und Abfahren auf den Überbau berechnet und angesetzt.

Die Einwirkungen werden in sogenannten Lastfallkombinationen nach DIN Fachbericht 101:2009 und DIN Fachbericht 102:2009 zusammengefasst. Hierbei werden die folgenden Kombinationen erfasst: ständige und vorübergehende Kombination, charakteristischen Kombination, häufige Kombination, quasi ständige Kombination und nicht häufige Kom-

bination. Die unterschiedlichen Lastfallkombinationen werden für verschiedene Nachweise benötigt.

Im nächsten Schritt werden Schnittgrößen ermittelt. Unterschiede der Schnittgrößen werden zwischen der Bestandstatistik und dem entwickelten Stabmodell abgeleitet. Hierbei werden die Schnittgrößen für Biegemoment, Normalkräfte und Querkkräfte berücksichtigt. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Biegemoment infolge des Eigengewichts eine große Abweichung aufweist. Die Ursache hierfür ist, dass in der Bestandsstatistik die Querschnitte des Hauptträgers anhand der Nullpunkte des Schubflusses eingeteilt werden. Zusätzliche Abweichungen gibt es in der Längssteifigkeit der Hauptträger.

Abweichungen werden darauf zurückzuführen, dass früher häufig Vereinfachungen des Trageverhaltens angenommen wurden, zum Beispiel bei der Lastausbreitung von Einzellasten bei Überbauten im Plattenquerschnitt oder der Berücksichtigung von Vouten. Typisch bei alten Brücken ist die Unterschätzung der Querverteilung von Verkehrslasten, deshalb fehlt es bei Plattenquerschnitten häufig an der benötigten Bewehrung (MEHLHORN 2010).

Anschließend erfolgt in der 1. Stufe der Nachrechnung der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit gibt bei einer Brücke die maximal ertragbare Belastung an.

- Nachweis für Biegung mit Normalkraft: In diesem Fall wird untersucht, ob die Biegebewehrung für Hauptträger, Querträger, Fahrbahnplatte und Bodenplatte ausreichend ist. Dieser Nachweis wird bei der vorliegenden Brücke erfüllt.
- Nachweis für Querkraft und Torsion: Die Bügelbewehrung wird durch die Querkraft und die Torsion gleichzeitig beansprucht, daher kann der Nachweis nicht getrennt geführt werden, sondern nur differenziert nach Bewehrungsrichtungen. Es erfolgt ein Vergleich der vorhandenen Bügelbewehrung mit der notwendigen Bügelbewehrung für Querkraft und Torsion. Neben der ausreichenden Bewehrung muss auch der Nachweis der Druckstreben erfüllt sein, das heißt der Neigungswinkel für die Druckstrebe darf 45° nicht überschreiten. Für den Hauptträger kann der Nachweis der Druckstrebe der Nachweis der ausreichend eingebauten Bügelbewehrung für Einwirkungen aus Querkraft und Torsion nicht erbracht werden. Für Querträger, Fahrbahnplatte und Bodenplatte ist die Bügelbe-

wehrung ausreichend, um den Einwirkungen aus Querkraft und Torsion standzuhalten.

- Überprüfung der Ermüdungsfestigkeit: Diese Nachweise müssen getrennt für Betonstahl, Spannstahl und Beton erfolgen. Der Nachweis erfolgt anhand der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreiten (siehe Kapitel 2.3.2.1). Der Nachweis wird geführt, indem die auftretenden Schwingbreiten mit den Schwingbreiten verglichen werden, die maximal zulässig sind. Der Nachweis wird für Hauptträger, Querträger, Fahrbahnplatte und Bodenplatte erbracht werden.

Weiterhin muss für die Nachrechnung in der Stufe 1 der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit erbracht werden. Die Gebrauchstauglichkeit beschreibt die Eigenschaft eines Bauwerks, die uneingeschränkte Nutzung für den vorgesehenen Zweck zu gewährleisten. Hierfür müssen die folgenden Nachweise erbracht werden:

- Nachweis der Dekompression: Laut dem Dekompressionsnachweis dürfen am Rand keine Zugspannungen unter der gegebenen Einwirkungskombination entstehen (GORIS und HEGGER 2010). Der Nachweis der Dekompression kann für Hauptträger und Querträger an den Rändern nicht erfüllt werden. Für die Bodenplatte kann der Nachweis ebenfalls nicht erbracht werden. Für die Fahrbahnplatte wird der Nachweis erbracht.
- Nachweis der Rissbreitenbegrenzung: Die maximal zulässigen Rissbreiten betragen 0,2 mm. Die möglichen Rissbreiten werden nicht gemessen sondern analytisch ermittelt. Hierbei zeigte sich, dass der Nachweis für den Hauptträger im oberen Rand und bei der Bodenplatte punktuell nicht eingehalten wird. Für den Querträger und die Fahrbahnplatte konnte der Nachweis geführt werden.
- Nachweis der Betondruckspannung: Hier muss der Nachweis geführt werden, dass die zulässige Betondruckspannung unter nicht häufigen Einwirkungskombinationen nicht überschritten wird. Für den Hauptträger wird die Betondruckspannung um bis zu 29 % überschritten, für Querträger, Bodenplatte und Fahrbahnplatte wird der Nachweis erbracht.
- Nachweis der Spannstahlspannung: Es muss der Nachweis geführt werden, dass die zulässige Spannstahlspannung nicht überschritten

wird, dieser Nachweis wird für alle Bestandteile des Überbaus erfüllt.

- Nachweis der Betonstahlspannung: Auch bei der Betonstahlspannung gilt, dass die zulässige Spannung nicht überschritten wird. Auch dieser Nachweis wird für alle Bestandteile des Überbaus erfüllt.

Das Ergebnis der Nachrechnung nach Stufe 1 ist, dass die folgenden Nachweise nicht erbracht werden konnten:

- Im Grenzzustand der Tragfähigkeit konnte der Nachweis der ausreichenden Bewehrung für Querkraft und Torsion für den Hauptträger nicht erfüllt werden.
- Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit konnten die folgenden Nachweise nicht erfüllt werden:
 - Der Nachweis der Dekompression konnte für Hauptträger, Querträger und Bodenplatte nicht erfüllt werden.
 - Der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung konnte für Hauptträger und die Bodenplatte nicht erfüllt werden.
 - Beim Nachweis der Spannungsbegrenzung konnte der Nachweis der Betondruckspannung für die Hauptträger nicht erfüllt werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Nachrechnung nach Stufe 2 der Nachrechnungsrichtlinie. Hierzu werden die folgenden Annahmen getroffen, welche als mögliche zusätzliche Annahmen in der Nachrechnungsrichtlinie in der Stufe 2 genannt sind:

- Erhöhung des zulässigen Grenzwertes $\cot \theta$ auf 2,5. Das bedeutet, dass für die Druckstreben ein Neigungswinkel von $21,8^\circ$ erlaubt ist. Dies gilt in Bezug auf die Querkraft.
- Festlegung des Druckstrebenneigungswinkels für den Torsionsnachweis auf 30° .
- Anpassung der Streubeiwerte auf $r_{sup} = 1,0$ und $r_{inf} = 0,95$. Die anzusetzende Streuung der Vorspannung beim Nachweis der Dekompression wird mit der Anpassung der Streubeiwerte erweitert.

In der Stufe 2 der Nachrechnung werden nur die Nachweise geführt, die in der 1. Stufen nicht erfüllt werden können. Hierbei zeigt sich beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Querkraft und Torsion, dass durch die Reduzierung des Druckstrebenneigungswinkels der Torsionsnachweis für eine ausreichende Bügelbewehrung vorliegt. Für die kombinierte Beanspruchung von Torsion und Querkraft und für die Torsionslängsbewehrung ist der Nachweis aber auch in der 2. Nachrechnungsstufe nicht erfüllt. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit war es notwendig die Nachweise für Dekompression, Rissbreitenbegrenzung und Spannungsbegrenzung erneut zu führen. Hierbei zeigt sich in Bezug auf die Dekompression, dass der Nachweis für Hauptträger und Querträger nicht erfüllt werden kann. Für die Bodenplatte wurde der Nachweis erfüllt. Die Begrenzung der Rissbreite kann in der 2. Stufe nur für den Hauptträger erfüllt werden, für die Bodenplatte weiterhin nicht. Die Betondruckspannung für den Hauptträger kann in der 2. Nachrechnungsstufe erfüllt werden.

Defizit	Parameter	Sensor	Bereich
Unzureichende Druckstreben­tragfähigkeit und Torsions­längsbewehrung der Haupt­träger	<ul style="list-style-type: none"> • Dehnungen / Spannungen • Verformung / Verschiebung 	<ul style="list-style-type: none"> • Dehnmessstreifen • Faser­optische Sensoren • Weg­aufnehmer 	Anzubringen im Bereich der Haupt­träger I und III hauptsächlich an den Steg­au­ßen­sei­ten in Feld 2 an­gren­zend an das Mit­tel- und End­auf­lager
Zu hohe Zug­span­nun­gen (De­fizit bei Dekom­pres­sion) des End­quer­trä­gers Süd	<ul style="list-style-type: none"> • Dehnungen • Riss­ent­wick­lung / Riss­öff­nung 	<ul style="list-style-type: none"> • Dehnmessstreifen • Faser­optische Sensoren • Weg­aufnehmer 	Anzubringen an der Unter­sei­te des End­quer­trä­gers Süd im An­schluss­be­reich des Haupt­trä­gers III
Zu hohe Zug­span­nun­gen (De­fizit bei Dekom­pres­sion und Riss­brei­te) der Boden­platte in Feld 2	<ul style="list-style-type: none"> • Dehnungen • Riss­ent­wick­lung / Riss­öff­nung 	<ul style="list-style-type: none"> • Dehnmessstreifen • Faser­optische Sensoren • Weg­aufnehmer 	Anzubringen an der Unter­sei­te der Boden­platte in Feld 2 zwi­schen Haupt­trä­ger I und II im Be­reich der Querspann­glieder

Tab. 15: Sensorkonzept für die duraBAST-Brücke im Bezug auf die in der Nachrechnung festgestellten Defizite (MOERLAND und ROMANSKI 2018)

Im Ergebnis der Nachrechnung nach Stufe 2 bleiben also Defizite. Diese Defizite sollen mit entsprechenden Sensoren überwacht werden. Tabelle 15 zeigt die Defizite, zu messende Parameter, geeignete Sensoren und den Bereich, in dem die Sensoren angebracht werden sollten.

Bild 50 zeigt die Stellen an der duraBAST-Brücke, an der das Anbringen von Sensoren sinnvoll ist.

5.4 Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden

Im Rahmen der Erstellung eines realitätsnahen Strukturmodells (hier: Finite-Element-Modell) der Brücke sollten im Vorfeld die Schichtdicke der Fahrbahn auf der Brücke ermittelt und die Ortung der tatsächlichen Lage der Spannglieder durchgeführt werden. Diese Informationen sind wesentlich zur Beschreibung des tatsächlichen Tragverhaltens der Brücke.

Grundlage für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfmethode soll das DBV Merkblatt „Anwen-

dung von zerstörungsfreier Prüfmethode im Bauwesen (DBV 2014) sein. Dieses Merkblatt gibt Hinweise auf die möglicherweise anzuwendenden Methoden und deren Grenzen. Die Methoden und deren Grenzen werden in den jeweiligen Kapiteln beschrieben (s. u.).

5.4.1 Bestimmung der Fahrbahnschichtdicke

Die folgenden Ausführungen sind einem Bericht der ausführenden Firma KIWA GmbH Bauconsulting (2019), entnommen. Für die Erstellung des Finite-Element-Modells der duraBAST Brücke, welche das Tragverhalten der Brücke realitätsnah abbildet, stellt das Wissen über die Schichtdicke und den Aufbau der Fahrbahn eine relevante Information dar. Die äußeren Maße der Brücke liegen in Form eines photogrammetrisch ermittelten 3D-Modells inklusive der Fahrbahn vor. Das Finite-Element-Modell soll jedoch ohne den Fahrbahnbelag dargestellt werden, da dieser als nicht mittragend angenommen wird. Angaben zur tatsächlichen Schichtdicke der Fahrbahn liegen nicht vor, daher sollte eine zerstörungsfreie Schichtdickenmessung erfolgen.

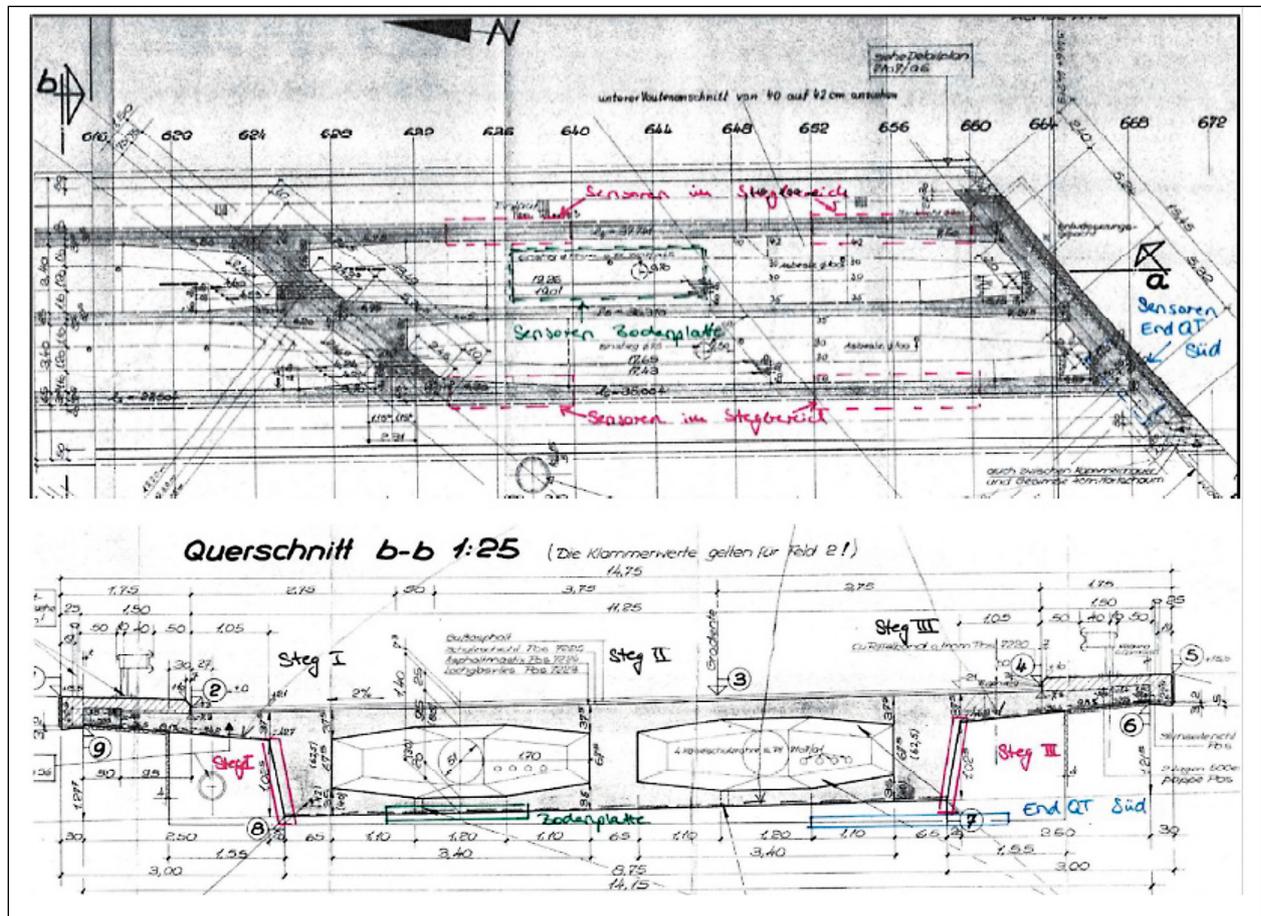


Bild 50: Geeigneter Bereich für Sensoren an der duraBAST-Brücke um Defizite zu überwachen (Landschaftsverband Rheinland - Fernstraßen - Neubauamt Gummersbach 1972b; MOERLAND und ROMANSKI 2018)

Für die Dickenbestimmung von Fahrbahndecken aus Beton und Asphalt ist grundsätzlich der Einsatz der folgenden Verfahren möglich (DBV 2014):

- Radar
- Ultraschallecho
- Impaktecho

Bei Radaruntersuchungen werden elektromagnetische Wellen (20 MHz bis 2,5Hz) in Form von Impulsen ausgesendet. Die Ausbreitung der Wellen hängt von den dielektrischen Materialeigenschaften ab, an Diskontinuitäten und am Übergang von Medien wird die Welle gestreut, reflektiert und gebeugt. Die gesendeten und empfangenen Signale werden in Radargrammen (B-Bildern) dargestellt (Bild 51). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen ist abhängig von der Dielektrizitätskonstanten, welche repräsentativ für das Bauteil bestimmt werden muss (DBV 2014). Unter anderem hängt die Dielektrizitätskonstante von der Feuchtigkeit des zu untersuchenden Bauteils und dem Chloridgehalt ab.

Die B-Bilder ermöglichen die Einschätzung der Geometrie, da typische Reflektor-Geometrien auch zu typischen Mustern in B-Bildern führen.

Das Ultraschallechoverfahren beruht auf der Ausbreitung elastischer Wellen in einem Festkörper.

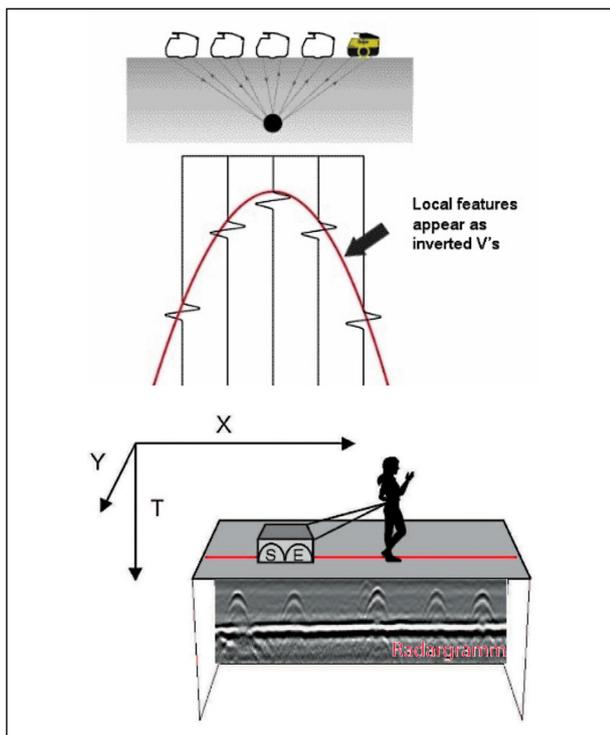


Bild 51: Radar-Verfahren zur Ermittlung von Schichtenaufbau; Funktionsprinzip und schematische Darstellung (KIWA GmbH Bauconsulting 2019)

Die Wellen im Frequenzbereich zwischen 20 und 400 kHz breiten in Festkörper in unterschiedlichen und unabhängigen Schallgeschwindigkeiten aus. Die einzelnen Schallgeschwindigkeiten sind materialabhängig. Das Ultraschallechoverfahren beruht im Speziellen auf der Reflexion von Schallwellen an Werkstoffinhomogenitäten wie Bauteilrückwänden oder anderen Grenzflächen.

Anhand einer Fotodokumentation der grundhaften Instandsetzung der Brücke Jahr 2016 konnte der Aufbau der Fahrbahnschichtdicke nachvollzogen werden. Die Tabelle 16 zeigt den Schichtaufbau der Fahrbahn auf der Brücke.

Es konnten zwei Kalibrierpunkte ermittelt werden, an denen die Kappenhöhe vor dem Einbau der Gussasphaltschicht erkennbar sind. Diese Punkte werden genutzt, um die Einsatzfähigkeit der verschiedenen Systeme zu testen und das System im nächsten Schritt zu kalibrieren. Bild 52 zeigt die Kalibrierpunkte vor und nach der Aufbringung der Abdichtung und Gussasphaltschichten. Über den bekannten Höhenunterschied konnten diese Punkte genutzt werden, um das Radarsystem zu kalibrieren.

Die Messungen erfolgt nach einem flächenhaften Raster, siehe Bild 53.

Die Untersuchungen mit verschiedenen Messsystemen zeigen, dass es nur mit dem Radarsystem (hier Hilti PS1000) möglich ist, die Grenze zwischen Asphaltbelag und Beton deutlich zu detektieren.

Nr.	Schichtaufbau	Bemerkung
1	Brückentafel aus Beton	Der alte Fahrbahnaufbau wurde bis auf die Brückentafel entfernt.
2	Mörtelstreifen	Dehnungsmessensorik wurde direkt auf der Brückentafel aufgebracht und mit Mörtelschichten abgedichtet. Schlitz für die Sensoren konnte nicht gefräst werden, da die Bewehrung der Brücke an der Oberfläche der Brückentafel zu sehen war
3	Polymerbitumen-Schweißbahnen	Abdichtung Fahrbahn mit Polymerbitumen-Schweißbahnen. An den Seiten zu den Brückenkappen wurden metallkaschierte Polymerbitumen-Schweißbahnen eingesetzt.
4	1. Gussasphaltschicht	Die erste Gussasphaltschicht wurde in einzelnen Teilflächen aufgebracht
5	Deckschicht mit Gussasphalt	Zum Schluss wurde die Deckschicht mit Gussasphalt ausgeführt. Die zwischenzeitlich aufgebrauchte Baustraße wurde vor diesen Arbeiten wieder entfernt.

Tab. 16: Schichtaufbau der Fahrbahn an der duraBAST-Brücke



Bild 52: Vergleich der Kalibrierpunkte vor (links) und nach (rechts) Aufbringung der Abdichtung und Gussasphaltschichten (Quelle: BAST 2015 (links) und KIWA GmbH Bauconsulting 2019 (rechts))

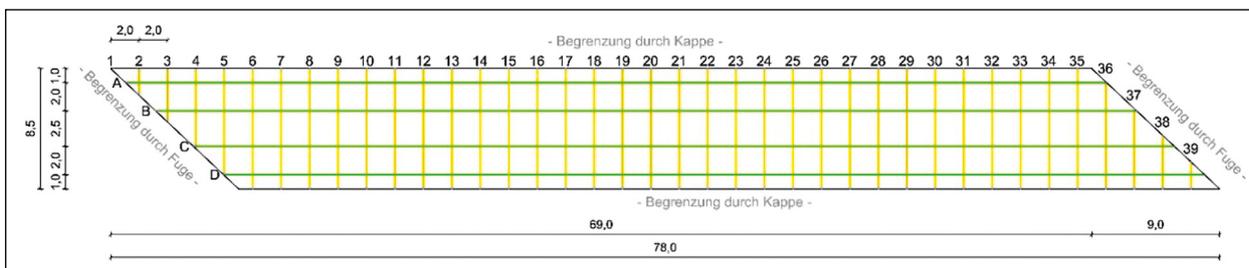


Bild 53: Messraster der Radarmessungen mit der Hilti PS 1000 (KIWA GmbH Bauconsulting 2019)

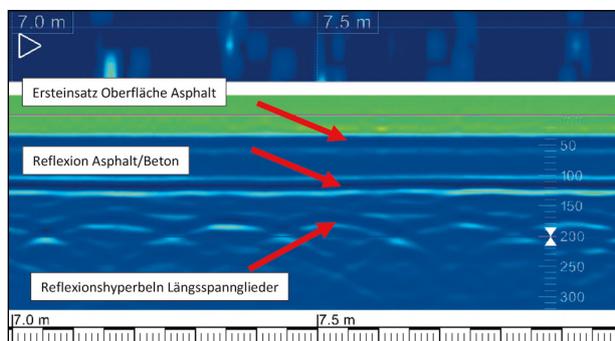


Bild 54: Beispiel für ein aufgenommenes B-Bild an der duraBAST-Brücke (KIWA GmbH Bauconsulting 2019)

Mit einer Dielektrizitätskonstanten von 5,5 konnte am 1. Kalibrationspunkt die zu erwartende Schichtdicke gemessen werden. Am 2. Kalibrationspunkt ist es wegen einer zusätzlichen Schicht (wahrscheinlich die metallkaschierte Schweißbahn) nicht möglich gewesen, eine Dielektrizitätskonstante zu wählen, die dem erwarteten Schichtaufbau entspricht.

Mit dem Radarmessgerät wurden die flächenbezogenen Daten aufgezeichnet, es entstanden B-Bilder, wie sie in Bild 54 zu sehen sind. Es ist die Reflexion an der Oberseite der Asphaltsschicht erkennbar (Ersteinsatz) sowie die Reflexion am Übergang von Asphalt zu Beton. Tiefer liegende Bewehrung

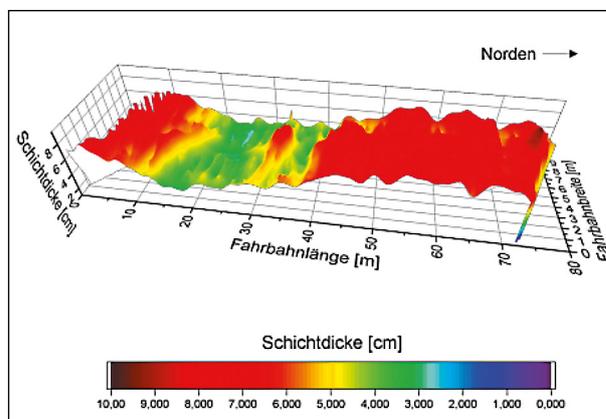


Bild 55: Grafische Darstellung der Asphaltsschichtdicke der duraBAST-Brücke für die einzelnen Messlinien von Nord (links) nach Süd (rechts)

und Spannglieder sind an den Reflexionshyperbeln erkennbar.

Die Auswertung der B-Bilder ermöglicht es, die Schichtdicke des Fahrbahnausbaus entlang des Messrasters für die gesamte Fahrbahntafel aufzuzeigen. Das Ergebnis der Messungen ist in Bild 55 gezeigt.

Es zeigt sich, dass der Belag der Fahrbahn über die Brückenfläche deutlich unterschiedliche Schichtdicken aufweist. Auffällig sind die starken Unter-

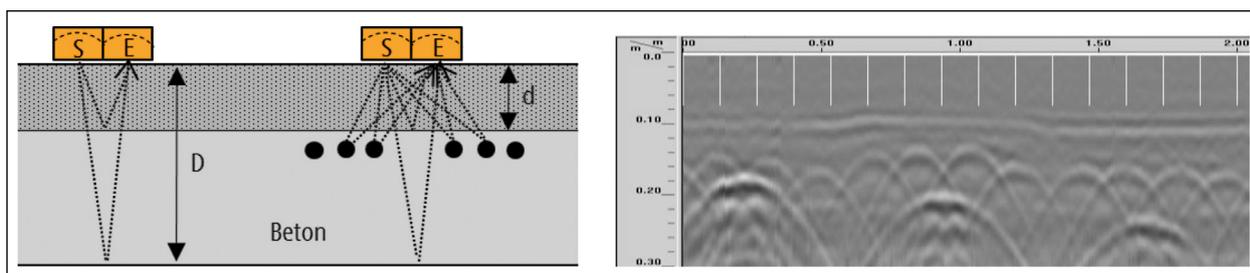


Bild 58: Prinzipschema des Radarverfahrens (links) und Radargramm (rechts) (WILMES und SCHULZE 2019)

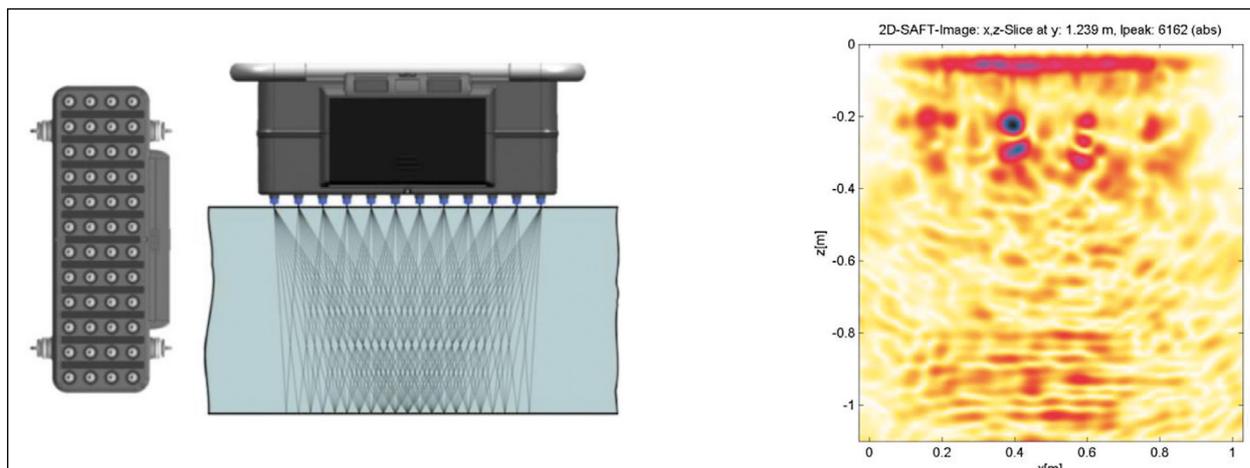


Bild 59: Übersicht auf das Linear-Prüfkopfarray A1040 MIRA mit zwölf Prüfkopfmodulen und Messprinzip mit Schallwegen der multistatischen Messung (links), Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion an der duraBAST-Brücke (rechts) (DGZfP 2018; WILMES und SCHULZE 2019)

Das Radarverfahren bietet den Vorteil, dass eine relativ zügige Messung möglich ist. Das zeitlich aufwendigere Ultraschall-Verfahren bietet den Vorteil, dass tieferliegende und mehrlagig angeordnete Hüllrohre detektiert werden können.

Das Radarverfahren nutzt die Tatsache, dass elektromagnetische Impulse an metallischen Objekten vollständig reflektiert werden. Bei der Messung wurde der Reflexionsmodus genutzt, hierbei befinden sich Sender und Empfänger auf einer Bauteilseite und werden verschoben. Das Prinzip des Radarverfahrens ist in Bild 58 links gezeigt. Von der Sendeantenne werden in vorgegebenen Messabständen (z. B. alle 2 mm) elektromagnetische Impulse ausgesendet, diese breiten sich je nach Material unterschiedlich schnell aus und ändern (reflektiert, gebeugt, gestreut oder geschwächt) sich an Diskontinuitäten (Veränderungen der elektrischen Eigenschaften) sprunghaft. Diese Änderungen werden von der Empfängerantenne aufgezeichnet und können in Form einer Radargramms (Bild 58 rechts) dargestellt werden (DBV 2014; WILMES und SCHULZE 2019).

Auch das Ultraschall-Echo-Verfahren wurde an der duraBAST-Brücke angewendet. Für Messungen mit

dem Ultraschallverfahren werden elastische Wellenimpulse durch Erregerprüfköpfe an der Betonoberfläche erzeugt. Die Signale breiten sich im Beton aus und werden an Grenzflächen zu anderen Stoffen reflektiert und durch die Empfängerprüfköpfe aufgezeichnet. Wenn die Schallgeschwindigkeit bekannt ist, kann über die Laufzeit des Signals die Entfernung zum Prüfkopf bestimmt werden. Bild 59 links zeigt das Ultraschallecho mit dem Mehrkopfsystem A1040 MIRA. An dem Gerät sind mehrere Prüfköpfe angebracht, welche als Sender und Empfänger dienen und direkt bildgebende Resultate ermöglichen. Mit dem Ultraschallecho können Bewehrungen bis in 80 cm Tiefe detektiert werden, hier liegt auch der Vorteil gegenüber dem Radar-Messsystem. Bild 59 rechts zeigt eine SAFT-Rekonstruktion der Messergebnisse. Bei der SAFT-Rekonstruktion (Synthetic Aperture Focusing Technique) handelt es sich um ein Abbildungsverfahren, welches eine größere Anzahl von Messungen auf einem einseitigen Linien- oder Flächenraster direkt zu einem Bild der Objektgrenzen im Messvolumen verarbeitet (DGZfP 2018; WILMES und SCHULZE 2019).

Für die Kalibration des Radars wurden die Messungen bzgl. Hüllrohre 9 und 36 genutzt, welche von

Abstand Unterkante Überbau bis Achse Spannglieder in m															
Spannglied Nr.		Nummer der Spanngliedunterstützung													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
28	Soll		1,019	0,910	0,814	0,731	0,661	0,605	0,561	0,530	0,514	0,511	0,518	0,535	0,562
	Radar		n.z.	0,898	0,830	0,736	0,648	n.z.	0,540	0,516	0,486	0,485	0,513	n.z.	0,539
	Ultraschall				0,809	0,724									
27	Soll		1,019	0,910	0,814	0,731	0,661	0,605	0,561	0,530	0,514	0,511	0,518	0,535	0,562
	Radar		n.z.	–	–	–	–	n.z.	–	–	–	–	–	n.z.	–
	Ultraschall				0,798	0,715									
26	Soll		1,019	0,910	0,814	0,731	0,661	0,605	0,561	0,530	0,514	0,511	0,518	0,535	0,562
	Radar		n.z.	–	–	–	–	n.z.	–	–	–	–	–	n.z.	–
	Ultraschall				–	–									
25	Soll		1,019	0,910	0,814	0,731	0,661	0,605	0,561	0,530	0,514	0,511	0,518	0,535	0,562
	Radar		n.z.	–	–	–	–	n.z.	–	–	–	–	–	n.z.	–
	Ultraschall				–	–									

Tab. 17: Exemplarische Darstellung für den Abstand Unterkante Überbau bis Achse Spannglied für Längsträger III, Feld I, Seitenfläche (WILMES und SCHULZE 2019)

zwei Bauseiten geortet werden konnten. Bei dem Ultraschallecho konnte die Kalibration anhand des Rückwandechos durchgeführt werden (WILMES und SCHULZE 2019).

Vor der Ortung wurde ein Messraster angelegt, welches quer zum Verlauf der Hüllrohre angeordnet ist. In den Bestandspläne für die Längsvorspannung im Überbau (Plan 725-118) sind für die beiden Felder der Brücke Höhenlagen der Längsspannglieder in den 23tel Punkten angegeben. Aus den Unterlagen lassen sich Achse und Unterkante der Hüllrohre entnehmen. Zum Abgleich der Soll- mit der Ist-Lage wurde ein Teil der der 1/23 Punkte durch einen Vermessungsingenieur aufgenommen und markiert und die fehlenden 1/23 Punkte mit einem Maßstab nachgetragen. Die Messpunkte wurden um ca. 10 cm Richtung Auflager verschoben, da in den 1/23l Punkten Bügel zur Montage der Längsspannglieder einen störenden Einfluss haben (WILMES und SCHULZE 2019).

Die Tabelle 17 und die Tabelle 18 zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Längsspanngliedortung. Die Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Ortung der Längsspannglieder für den Längsträger III, Feld I, Seitenfläche, gemessen wird mit dem Radar- und Ultraschallverfahren der Abstand zwischen der Unterkante des Überbaus und dem Spannglied.

Die Tiefenlage der Hüllrohre wurde ebenfalls ermittelt, hierfür wurde die Tiefenlage der Spannglieder

bis zur Achse des Spanglieds ermittelt. Die Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse für Längsträger III, Feld I, Seitenfläche.

Wie auch schon die nicht vollständig mit Messergebnissen ausgefüllten Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen, können mit den Verfahren nicht alle Längsspannglieder geortet werden. Bild 60 zeigt, bei welchen Längsspanngliedern eine Ortung möglich ist. Die außen liegenden Längsspannglieder konnten mit dem Radarverfahren relativ gut und auch an vielen Messstellen geortet werden, dieses wird durch die gefüllten farbigen Kreise angezeigt. Die tiefer liegenden Spannglieder konnten mit dem Ultraschallverfahren teilweise geortet werden, dieses wird durch die nicht gefüllten farbigen Kreise angezeigt.

Ziel des Einsatzes der beiden Verfahren war der Vergleich zwischen der Soll- und Ist-Lage der Spannglieder. Die Messergebnisse, die in Tabelle 17 aufgeführt sind, zeigen für das Spannglied 28 im Längsträger III in den Feld 1 eine gute Übereinstimmung der Soll und Ist-Lage der Spannglieder. Dieses gilt auch für die anderen Spannglieder, bei denen der Abstand von der Unterkante des Überbaus bis zur Achse der Spannglieder gemessen wurde. Bei den Messungen der Tiefenlagen zeigt sich, dass die Messergebnisse teilweise deutlich von den Soll-Lagen der Pläne abweichen. Beispiel: Tiefenlage des Längsspannglieds 28 von Längsträger III,

Tiefenlage der Spannglieder bis Achse Spannglied in m															
Spannglied Nr.		Nummer der Spanngliedunterstützung													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
28	Soll	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	Radar		n.z.	0,230	0,251	0,219	0,207	n.z.	0,221	0,219	0,231	0,227	0,223	n.z.	0,227
	Ultraschall				0,264	0,234									
27	Soll														
	Radar		n.z.	-	-	-	-	n.z.	-	-	-	-	-	n.z.	-
	Ultraschall				0,502	0,532									
26	Soll														
	Radar		n.z.	-	-	-	-	n.z.	-	-	-	-	-	n.z.	
	Ultraschall				-	-									
25	Soll														
	Radar		n.z.	-	-	-	-	n.z.	-	-	-	-	-	n.z.	
	Ultraschall				-	-									

Tab. 18: Exemplarische Darstellung für Tiefenlage der bis Achse Spannglied für Längsträger III, Feld I, Seitenfläche (WILMES und SCHULZE 2019)

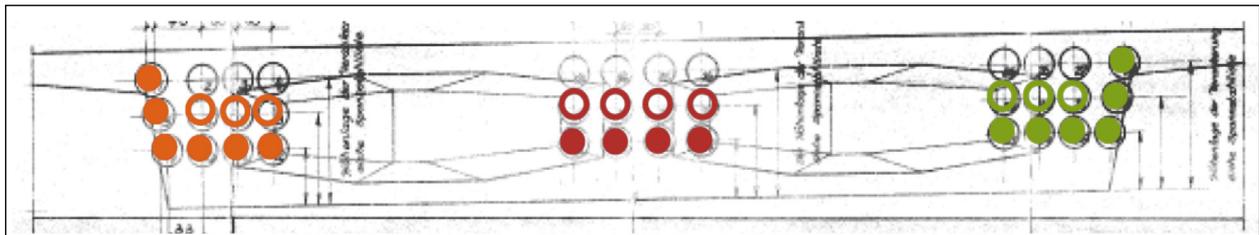


Bild 60: Geortete Längsspannglieder (ausgefüllter Kreis → deutliche Ortung möglich; nicht gefüllter Kreis → Ortung nur an wenigen Stellen möglich)

Feld I zeigt deutliche Abweichungen der Soll-Lage von der Ist-Lage. Die Tiefenlage soll 10 cm betragen, die Ortung zeigt, dass die Spannglieder aber in einer Tiefe von mehr als 20 cm liegen. Die Lage in einer anderen Tiefe hat keine Auswirkung auf die Standfestigkeit der Brücke. Genutzt werden können diese Ergebnisse für die Erstellung des Finite-Element-Modells und für den Einbau von Sensorik.

5.5 Tragfähigkeit der Brücke

Für die duraBAST-Brücke soll das globale Tragverhalten möglichst realitätsnah mit einem Strukturmodell abgebildet werden. Ein Finite-Element-Modell bietet die Möglichkeit die vorhandene Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks zu bewerten. Problem hierbei ist, dass das reale Tragverhalten bzgl. Geometrie, Materialeigenschaften und -verhalten nur angenähert in einem Modell abgebildet werden kann, so dass oftmals eine Diskrepanz zwischen gemessenem und berechnetem Verhalten vorliegt.

Gründe hierfür können auch fehlerhafte bzw. nicht wirklichkeitsnahe Annahmen bezüglich der Struktur des Modells und seiner Parameter oder Messfehler sein. Dieses hat zur Folge, dass Annahmen bezüglich der Tragreserven auf der sicheren Seite liegend getroffen werden müssen, die Tragreserven also nicht voll ausgenutzt werden und damit auch schlussendlich das Potenzial der Verfügbarkeit von Bestandsbrücken nicht vollständig ausgenutzt werden kann. Daher sollen die Möglichkeiten und Chancen der Abschätzung von Tragreserven mit kalibrierten Finite-Element-Modellen untersucht werden. Die Kalibration soll die Annäherung des Rechenmodells an das gemessene Tragwerksverhalten unter definierter Belastung ermöglichen.

Die Erstellung des kalibrierten Finite-Element-Modells wird in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks durchgeführt werden. In der 1. Phase des BMVI-Expertenetzwerks wurden hierzu einige Vorarbeiten geleistet, zu nennen sind die Nachrechnung gemäß Nachrechnungsrichtlinie des BMVI

(Kapitel 5.3), mit dem Ziel die Defizite der Brücke aufzuzeigen (BMVBS 2011b). Weiterhin wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Schichtdicke der Fahrbahn und zur Längsspanngliederortung als Grundlage eines realitätsnahen geometrischen Modells durchgeführt.

Für die Kalibration sind Messdaten nötig, welche das Strukturmodell speisen, so dass das FEM-Modell im Hinblick auf das tatsächliche Tragverhalten des Bauwerks aktualisiert werden kann (Model Updating). Das hierzu notwendige Sensorkonzept wird ebenfalls im Rahmen eines Projekts in der 2. Phase des BMVI-Expertenetzwerks erstellt und die Brücke im Anschluss mit entsprechender Sensorik ausgestattet.

5.5.1 Erste Ausstattung der Brücke mit Messtechnik

Ein Teil der Sensoren konnte nur während der grundhaften Instandsetzung der Brücke am Gelände der duraBAST im Jahr 2016 eingebaut werden. Daher ist ein Einbau bereits vor dem Abschluss der Nachrechnung und der Kenntnis der tatsächlichen Defizite der Brücke erfolgt. Für die Identifikation des Tragverhaltens des Bauwerks müssen die Senso-

ren so angeordnet werden, dass eine nachvollziehbare Abbildung der Spannungsverhältnisse im Brückenquerschnitt sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ermöglicht wird. Die Sensoren zur Dehnungsmessung wurden seinerzeit im Stützbereich und in den benachbarten Feldern oberflächennah in der Fahrbahn eingesetzt. Die Anordnung der Sensoren ist in Bild 61 gezeigt. Die Erfassung der Dehnungszustände findet an den drei Stegen (Längsrichtung) sowie im benachbarten Bereich der Platte (Querrichtung) statt. An den Stegen herrschen unter Eigengewicht und Verkehrslasten in Längsrichtung Druckspannungen im Feldbereich sowie im mittleren Stützbereich Zugspannungen. Durch den Einsatz von Temperatursensoren in der Fahrbahnplatte ist es möglich, den temperaturbedingten Anteil der Dehnung aus den Messungen herauszurechnen.

An der duraBAST-Brücke wurden zwei unterschiedliche Dehnungsmesstechniken berücksichtigt. Es wurden übliche elektrische Widerstands-Beton-Dehnungsmesssensoren (DMS) und in der Praxis seltener eingesetzte faseroptische Sensoren auf Faser-Bragg-Gitter Basis in die Fahrbahnplatte eingesetzt. Die Sensoren wurden nebeneinander an-

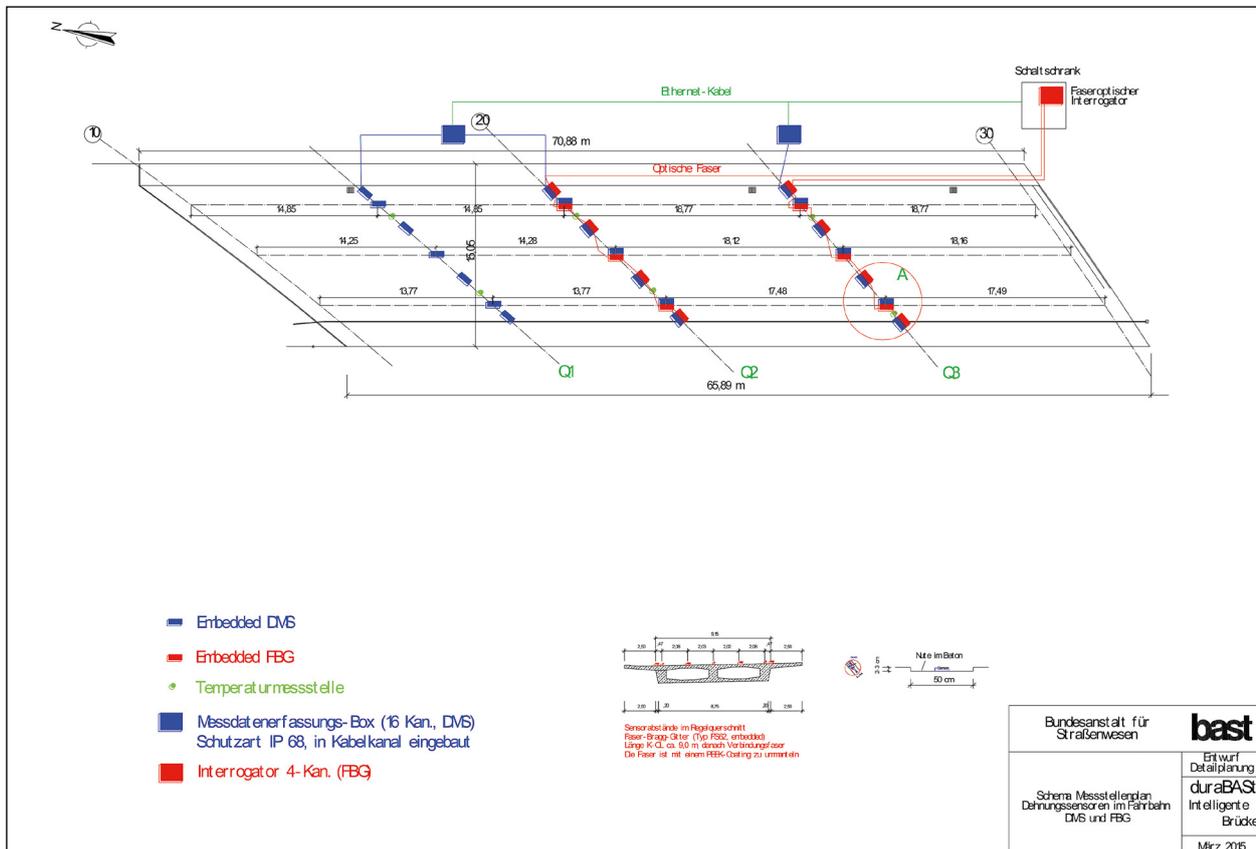


Bild 61: Draufsicht der Brücke mit Messstellenplan der Dehnungssensoren

gebracht, um einen direkten Vergleich der Sensoren pro Messstelle zu ermöglichen.

Bei den DMS verändert sich bei Stauchung oder Dehnung der gemessene elektrische Widerstand, mithilfe der Messung dieser Veränderung kann dann die tatsächliche Dehnung abgeleitet werden. Da der Prozess der Dehnung temperaturabhängig ist, wird zusätzlich die Temperatur in der Fahrbahn über einen elektrischen Temperatursensor gemessen, hiermit kann eine Temperaturkompensation der gemessenen Dehnung erfolgen.

Bei den optischen Sensoren handelt es sich um Sensoren auf Faser-Bragg-Gitter (FBG)- Basis für dieses Messverfahren sind Fasern, in die optische Interferenzfilter (Gitter) eingeschrieben werden und durch die Licht mit einer korrespondierenden Wellenlänge gesendet wird. Veränderungen bei Temperatur und Dehnung führen zu einer Verschiebung der in der Ausleseinheit erfassten Reflexions- bzw. Transmissionsspektren. In eine Faser können mehrere FBGs mit jeweils korrespondierenden Wellenlängen eingeschrieben werden und somit kann eine Faser viele einzelne Sensoren ersetzen.

Die Sensoren wurden bereits am Messschrank vor Ort angeschlossen, damit wird das Auslesen der Sensordaten und das Erstellen von Messkampagnen ermöglicht. Zur Vermeidung von Signalverlusten aufgrund großer Kabellängen, wurden die Dehnungsmesssensoren an zwei Messverstärker, die im Kabelkanal der Brücke liegen, angeschlossen (Bild 61). An der Übertragung der vorverarbeiteten Messdaten in das Hauptgebäude der BASt wird aktuell noch gearbeitet, eine Datenspeicherung ist aktuell mithilfe eines PCs im Messschrank möglich.

6 Fazit

Im Rahmen dieses Projekts sollte die Frage beantwortet werden, welche Konzepte und Vorgehensweisen im Zusammenhang mit Monitoring helfen können, um Brücken bis zu ihrer Sanierung bzw. Neubau weiter nutzen zu können.

Um diese Frage zu beantworten, wurden drei verschiedene Konzepte bzw. Vorgehensweisen näher betrachtet. Weiterhin wurde die praktische Anwendung von Monitoring erprobt.

In der Nachrechnungsrichtlinie des BMVI ist der Einsatz von Monitoring als Kompensationsmaßnah-

me genannt. Da aber der Sicherheitsgewinn durch den Einsatz von Monitoring bislang nicht quantifizierbar ist, wird Monitoring bislang selten als Kompensationsmaßnahme eingesetzt. Im Rahmen des Teilprojekts „Quantifizierung der Zuverlässigkeit von Bestandsbrücken“ wurde ein Verfahren für die Überwachung von Schwellwerten entwickelt, welches die Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit 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 konnte am Fallbeispiel der Plattenbalkenbrücke „Hochstraße Gifhorn“ im Zuge der Bundesstraße B4 positiv getestet werden und ein Gewinn an Zuverlässigkeit dargelegt werden. Das Verfahren bietet eine gute Möglichkeit um den Einsatz von kompensierenden Überwachungsmaßnahmen zu unterstützen. Für den Einsatz in der Praxis ist eine Vereinfachung des Verfahrens und die Entwicklung eines Tools zum Einsatz des Verfahrens jedoch noch notwendig.

Um den monetären Nutzen einer Monitoringmaßnahme darlegen zu können, wurde im Rahmen des Teilprojekts „Wirtschaftlichkeit von Monitoringmaßnahmen“ 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 entstehen, Versagenskosten der Brücke, Kosten für Unterhalt und Instandsetzung und gesamtwirtschaftlichen Kosten, abgebildet durch die Parameter Betriebskosten, Reisezeiten, Verkehrssicherheit, Lärm, Luftverschmutzung, Klimaschutz und Erreichbarkeit, berücksichtigt. Als Beispiel konnte der monetäre Nutzen des Monitorings an der Schwelmetalbrücke (BAB 1) mit Überschreitung der zugelassenen Rissweiten und an einer Brücke der BAB 42 in Duisburg-Beeck mit Überwachung der Koppelfugen im Bereich der gestoßenen Spannglieder gezeigt werden. Die Überwachung der Schwachstellen ermöglichte in beiden Fällen die Weiternutzung der Bestandsbauwerke. Das Vorgehen ist in Form eines Excel-Tools aufgearbeitet worden und

kann in der Praxis zum Einsatz kommen. Vor einem verbreiteten Einsatz muss das Tool noch validiert werden. Die Entwicklung dieses Verfahrens ist ein weiterer Schritt zur Bewertung von Monitoringmaßnahmen um die Nutzung von Monitoringanwendungen im Brückenbau zu intensivieren.

Der Einsatz von Monitoring für Zwecke der Erhaltungsplanung bietet die Möglichkeit von reaktiven zur prädiktiven Erhaltungsstrategie zu kommen. Die bessere Kenntnis des Zustands eines Ingenieurbauwerks ermöglicht es, Erhaltungsmaßnahmen rechtzeitig einzuleiten und so Kosten einzusparen. Erste Möglichkeiten des Einsatzes von Monitoring in der Erhaltungsplanung sind im Kapitel aufgezeigt. Im Rahmen der Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementsystems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur wurden Indikatoren zur Abschätzung des Zustands der Bauwerke und dessen zukünftige Entwicklung eingesetzt. Diese Indikatoren können beispielweise aus den Ergebnissen von Monitoringanwendungen stammen. Die Einbindungsmöglichkeit von Monitoring in das Erhaltungsmanagement von Bauwerken soll im Rahmen der weiteren Arbeiten im BMVI-Expertennetzwerk betrachtet und analysiert werden. In dieser Vorgehensweise wird ein großes Potenzial für den zukünftigen Monitoring Einsatz an Bauwerken gesehen.

Der praktische Einsatz von Monitoring und ZfP-Methoden wurde an der Spannbetonbrücke an der duraBAST erprobt. Im Rahmen der grundhaften Instandsetzung wurde die Brücke mit Dauerhaftigkeits- und Tragfähigkeitssensoren ausgestattet. Ziel war es Einbau und Datenerhebung und -auswertung unter realen Bedingungen zu testen. Mit dem Einsatz der Sensoren zur Ermittlung von Dauerhaftigkeitsparametern konnten positive Erfahrungen bezüglich der Bestimmung von Feuchte und Korrosionsaktivität in Betonbauteilen gemacht werden. Diese Einsatzbeispiele sollen zeigen, welches Potenzial Monitoringanwendungen haben, aber auch welche Aspekte beim Einbau der Sensoren, der Datenerhebung und auswertung und der Dauerhaftigkeit der Sensoren relevant sind. Der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethode (ZfP) wurde im Rahmen der Bestimmung der Schichtdicke der Fahrbahn und der Ortung der Längsspannglieder an der duraBAST-Brücke erprobt. Die Ergebnisse sollen bei der Entwicklung eines Finite-Element-Modells der Brücke genutzt werden.

Im Rahmen der Arbeiten konnte gezeigt werden, dass der Einsatz verschiedener Verfahren im Zusammenhang mit Monitoring und Pilotstudien einen Gewinn für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Ingenieurbauwerke darstellen und der Einsatz in Zukunft verstärkt werden sollte.

Literatur

- ANTONS, U. (2017): Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit hydrophober Schichten im Beton mittels NMR. Dissertation. RWTH Aachen, Aachen.
- BAST (1998): Handlungsanweisung zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit vorgespannter Bewehrung von älteren Spannbetonüberbauten. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Fachveroeffentlichungen/Ingenieurbau/Downloads/b4-Handlungsanweisung.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BAST (2017): duraBAST Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der Bundesanstalt für Straßenwesen. Online verfügbar unter www.durabast.de, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BAST (2019): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Online verfügbar unter https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Baudurchfuehrung/ZTV-ING-Teil-1-10-Baudurchfuehrung.html;jsessionid=0D2332CB974301AC0FEB5E2B270AD2E9.live21302?nn=1828226, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMF (2015): Das System der öffentlichen Haushalte. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finzen/Bundshaushalt/Haushaltsrecht_und_Haushaltssystematik/das-system-der-oeffentlichen-haushalte-anl.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVBS (2004): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-

- BRÜ). BMVBS. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Erhaltung/RI-WI-BRU-Richtlinientext-Erhaltung.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVBS (2007): Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten RI-ERH-ING - Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA). Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Erhaltung/RI-ERH-ING-OSA-Leitfaden-Erhaltung.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVBS (2011a): Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosions-gefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion). Online verfügbar unter https://mobil.hessen.de/sites/mobil.hessen.de/files/content-downloads/AN-HANG_C_XV_Handlungsanweisung_SpRK_Juni_2011.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVBS (2011b): Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/Nachrechnungsrichtlinie-Ausgabe-5_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVBS (2012): Straße im 21. Jahrhundert. Hg. v. BMVBS. Online verfügbar unter https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Publikationen/Medien/Dokumente/S-strasse-21-jahrhundert.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVBS (2013a): Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 20.03.2020.
- BMVBS (2013b): Bericht „Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen“.
- BMVI (2017): Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen - RI-EWB-PRÜF. Online verfügbar unter http://www.hochstrasse-halle.de/fileadmin/download/pdf/RI-EBW-PRUEF__2007_1_.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- BMVI (2020): Bericht zum Stand der Modernisierung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/berichtsstand-modernisierung-von-strassenbruecken-2020.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft 30.03.2020
- BMVIT (2013): WIFAS - Ein Modell zur Folgeabschätzung sozialer Wirkungen missionsorientierter Forschungsförderungsprogramme am Beispiel der Personen- und Gütermobilität. Mobilität der Zukunft, 2. Ausschreibung 2013.
- BOMBECK, A.; LEBHARDT, A.; SEILER, D.; GERDES, A.; LENNERTS, K. (2019): Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden indikatorgestützten Lebenszyklusmanagementsystems für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur. Unveröffentlichter Schlussbericht zu FE 69.0002/2017. Karlsruher Institut für Technologie; Institut für funktionelle Grenzflächen; Institut für Technologie und Management im Baubetrieb.
- BRAMESHUBER, W.; SPÖREL, F.; WARKUS, J. (2008): Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4. Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 64).
- BREIT, W. (2001): Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt -Sachstand und neuere Untersuchungen. In: Gerd Thielen (Hg.): Betontechnische Berichte.
- BS2 Sicherheitssysteme GmbH (2017): CorroDec 2G | Feuchte- / Potenzial- / Korrosionssensoren. Online verfügbar unter <http://www.bs2-sicherheitssysteme.de/de/produkte/corrodec2g-feuchte-potential-korrosions-sensoren>.

- CUSTER, R. (2018): Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen. Projekttreffen zu FE 89.0331/2017. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach, 06.07.2018.
- CUSTER, R.; NIEMEIER, E.; STRAUB, D.; BETZ, W.; WALTHER, C.; SCHUBERT, M. (2018): Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten von Monitoringmaßnahmen. Unveröffentlichter Zwischenbericht zu FE 89.0331/2017.
- DAHL, A.; KINDL, A.; WALTER, C.; PAUFLER-MANN, D.; ROSS, A.; WASSMUTH, V. et al. (2015): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030. FE 97.358.
- DBV (2014): Merkblatt: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen.
- DBV (2018): Merkblatt: Monitoring: Planung, Vergabe und Betrieb.
- Deutscher Bundestag (2016): Drucksache 18/9350 Unterrichtung durch die Bundesregierung - Bundesverkehrswegeplan 2030.
- DGZfP (2018): Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Merkblatt B 04.
- DIN 1045-2:2001: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Deutsche Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 Beton.
- DIN 1076:1999: DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung.
- DIN EN 1992-1:2010: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.
- DIN EN 206-1:2000: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- DIN Fachbericht 101:2009: DIN Fachbericht 101: Einwirkung auf Brücken.
- DIN Fachbericht 102:2009: DIN Fachbericht 102: Betonbrücken.
- DREBLER, I.; WICHMANN, H.-J.; BUDELMANN, H. (2015): Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken mit einem funkbasierten Drahtsensor. In: Bautechnik 92 (10), S. 683–687. DOI: 10.1002/bate.201500051.
- DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- EN 1990:2010-12 (2010) Eurocode - Basis of Structural Design.
- FABER, M. H. (2012): Statistics and probability theory. In pursuit of engineering decision support. Dordrecht, New York: Springer (Topics in safety, risk, reliability and quality).
- FABER, M.; VAL, D.; THÖNS, S. (2015): Value of Information in SHM - Consideration on the Theoretical Framework. In: Sebastian Thöns (Hg.): Workshop on Quantifying the Value of Structural Health Monitoring. Proceedings of the 1st Workshop, 04.-05-05-2015, DTU, Denmark. Kopenhagen.
- FEHLMANN, P. (2012): Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.
- FGSV (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen.
- FGSV (2010): Hinweise zu Einsatzbereichen von Verfahren zur Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung.
- FISCHER, O.; LECHNER, T.; WILD, M.; MÜLLER, A.; KESSNER, K. (2016): Nachrechnung von Betonbrücken - systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke. Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 124).
- FREUNDT, U.; VOGT, R.; BÖNING, S.; MICHAEL, D.; KÖNKE, C.; BEINERSDORF, H. (2014): Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken. Hannover, Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 106).
- GÄNBMANTEL, J.; HORN, K. (2012): Bauwerksdiagnostik. Ein wichtiger Faktor zur Qualitätssicherung bei der Werterhaltung und Sanie-

- rung von Gebäuden (Teil 1) In: Bausubstanz 3(2), S. 36–40.
- GORIS, A.; HEGGER, J. (2010): Stahlbetonbau aktuell. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Bauwerk-Verl.
- HAARDT, P. (1998): Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken. Schlussbericht zu AP 97244.
- HAARDT, P. (2003): Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz. Stufen 1 und 2 ; [Bericht zum Forschungsprojekt 99245]. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 43).
- HAARDT, P. (2017): Monitoring im Lebenszyklus von Brückenbauwerken. In: VDI (Hg.): VDI-Wissensforum: Einwirkungen, Mängel und Schäden bei Brückenbauwerken erkennen und bewerten. Berlin, 27. und 28.06.2017. VDI-Forum.
- HAARDT, P.; DABRINGHAUS, S.; FRIEBEL, W. D.; BAYERSTORFER, R.; BÄUMLER, T.; FREUNDT, U. (2017): Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn. In: Bau-technik 94 (7), S. 438–444. DOI: 10.1002/bate.201700035.
- HAARDT, P.; HOLST, R. (2017): Monitoring during life cycle of bridges to establish performance indicators. In: Ana Mandić, Ivanković, José Matos, Sebastian Thöns, Niels Peter Høj (Hg.): Proceedings of the Joint COST TU1402 - COST TU1406 - IABSE WC1 Workshop. Zagreb.
- HOLST, R. (2006): Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 50).
- JONES, P.; LUCAS, K. (2012): The social consequences of transport decision-making. Clarifying concepts, synthesising knowledge and assessing implications. In: Journal of Transport Geography 21, S. 4–16. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2012.01.012.
- KESSLER-KRAMER, C. (2002): Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation. Universität Fridericiana zu Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- KIWA GmbH Bauconsulting (2019): Bestimmung der Schichtdicke des Belags oberhalb der Fahrbahnplatte an der duraBAST-Brücke. Unveröffentlicht. Berlin.
- KOHLBREI, U. (2012): Sicherheit durch Bauwerksmonitoring. In: Deutsches Ingenieurblatt (7–8).
- KRUSCHWITZ, S. (2014): Feuchtemessung im Bauwesen - ein Überblick. In: DGZfP (Hg.): Fachtagung Bauwerksdiagnose.
- KUHLMANN, U.; PELKE, E.; HAUF, G.; HERRMANN, T.; STEINER, J.; AUL, M. (2007): Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Verbundbrücken unter Berücksichtigung des Bauverfahrens und der Nutzungsdauer. In: Stahlbau 76 (2), S. 105–116. DOI: 10.1002/stab.200710012.
- Landschaftsverband Rheinland - Fernstraßen - Neubauamt Gummersbach (1972a): Längsvorspannung des Überbaus Bauwerk 2d. Plan 725/118.
- Landschaftsverband Rheinland - Fernstraßen - Neubauamt Gummersbach (1972b): Schalplan Überbau Bauwerk 2d. Plan 725/54b.
- MARZAHN, G. (2016): Instandsetzungsbedarf von Infrastrukturbauten in Deutschland. In: Harald S. Müller, Ulrich Nolting und Michael Haist (Hg.): Bauwerkserhaltung - Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau. 12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe, 10.03.2016. Karlsruher Institut für Technologie.
- MARZAHN, G.; MAURER, R.; ZILCH, K.; DUNKELBERG, D.; KOLODZIEJCZYK, A. (2014): Die Nachrechnung von bestehenden Straßenbrücken aus Beton. In: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Werner (Hg.): Beton-Kalender 2013. Lebensdauer und Instandsetzung-Brand-

- schutz, Bd. 82. 2nd ed. Hoboken: Wiley (Beton-Kalender).
- MEHLHORN, G. (2010): Handbuch Brücken. Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. 2., erw. und bearb. Aufl. Hg. v. Gerhard Mehlhorn. Berlin, Heidelberg: Springer.
- MOERLAND, P.; ROMANSKI, L. (2018): Brückennachrechnung - 5008737 BW 2d. Unveröffentlicht. Schüßler-Plan.
- MOUHASSEB, H. (2007): Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens. Universität Friedericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe.
- MÜLLER, H. S.; VOGEL, M. (2008): Lebenszyklusmanagement von Betonbauwerken. In: Harald S. Müller, Ulrich Nolting und Michael Haist (Hg.): Betonbauwerke im Untergrund - Infrastruktur für die Zukunft. 5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe, 13.03.2008. Universität Karlsruhe (TH). Hannover, Karlsruhe: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek.
- MÜLLER, H. S.; VOGEL, M. (2009): Lebensdauerprognose für Betonbrücken - Wo stehen wir heute. In: Verein „Freunde des Bauingenieurwesens der Technischen Universität Dresden e.V.“ (Hg.): 19. Dresdner Brückenbausymposium - Tagungsband. Dresdner Brückenbausymposium. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen.
- Präsident des BRH (Hg.) (2013): Anforderungen an Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen finanzwirksamer Maßnahmen nach § 7 Bundeshaushaltsordnung. Empfehlungen des Präsidenten des Bundesrechnungshofes als Bundesbeauftragter für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung (Schriftenreihe des Bundesbeauftragten für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung, 18).
- RADAJ, D. (1995): Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. Berlin: Springer-Verlag.
- RALBOVSKY, M.; PRAMMER, D.; LACHINGER, S.; VORWAGNER, A.: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Brücken. FE 15.0625/2016/LRB. Hannover, Bremen: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau).
- RAUPACH, M. (2009): Beurteilung von Feuchte- und Chloridprofilen verschiedener Bauteile. In: Harald S. Müller, Ulrich Nolting und Michael Haist (Hg.): Dauerhafter Beton - Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost-Taumittel-Beanspruchung. 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe, 12.06.2009. Universität Karlsruhe (6.), S. 13–20.
- REIFF, A. J.; SANAYEI, M.; VOGEL, R. M. (2016): Statistical bridge damage detection using girder distribution factors. In: Engineering Structures 109, S. 139–151. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.006.
- RETZE, U. (2007): Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke. Dissertation. Universität der Bundeswehr, München.
- SCHIEßL, P.; MAYER, T. F. (2009): Lebensdauermanagement von Stahlbetonbauwerken. In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (11), S. 747–753. DOI: 10.1002/best.200900058.
- SCHIEßL, P.; RAUPACH, M. (1990): Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete. In: C.L Page, K.W.J Treadaway und P.B Bamforth (Hg.): Corrosion of reinforcement in concrete. Papers presented at the 3. International symposium on corrosion of reinforcement in concrete, Wishaw, Warwickshire 1990. London: Elsevier.
- SCHNELLENBACH-HELD, M.; PEETERS, M.; MIEDZINSKI, G. (2015): Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen B, Brücken und Ingenieurbau, B 110).
- SCHNETGÖKE, R. (2008): Zuverlässigkeitsorientierte Systembewertung von Massivbauwerken

- ken als Grundlage für die Bauwerksüberwachung. Braunschweig: Technische Uni Braunschweig Inst. f. Baustoffe (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 204).
- SCHUBERT, M.; 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. Unveröffentlichter Schlussbereich zu FE 89.0331/2017.
- Sensortec GmbH (2018a): Feuchtesensor „Multiringelektrode. Datenblatt. Online verfügbar unter http://sensortec.de/images/pdf/Datenblatt_Multiringelektrode_de.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- Sensortec GmbH (2018b): Korrosionssensor „Anodenleiter“. Online verfügbar unter http://www.sensortec.de/images/pdf/Datenblatt_Anodenleiter_de.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2020.
- SIEGERT, C.; HOLST, A.; EMPELMANN, M.; BUDELMANN, H. (2015): Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Bremen, Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 118).
- SODEIKAT, C. (2010): Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung. In: Beton- und Stahlbetonbau 105 (12), S. 770–777. DOI: 10.1002/best.201000058.
- STRANGFELD, C. (2016): Einbettung der RFID basierten Korrosionssensoren in die duraBAST Brücke. Interner Bericht. Unveröffentlicht.
- STRANGFELD, C. (2017): Einbettung der RFID basierten Feuchtesensoren in die duraBAST Brücke. Interner Bericht. Unveröffentlicht.
- STRANGFELD, C.; KRUSCHWITZ, S.; HASE, F.; NAGEL, S.; WÖSTMANN, J. (2016): Multimethodische Bestimmung von Feuchtegradienten in Estrich. Poster 11. In: DGZfP (Hg.): Berichtsband Fachtagung Bauwerksdiagnose.
- STRAUSS, A.; BERGMEISTER, K.; WENDNER, R.; HOFFMANN, S. (2009): System- und Schadensidentifikation von Betontragstrukturen. In: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann Dietrich Wörner (Hg.): Beton-Kalender 2009: John Wiley & Sons, Ltd, S. 53–134.
- STRAUSS, A.; WENDNER, R.; FRANGOPOL, D. M.; BERGMEISTER, K. (2012): Influence line- model correction approach for the assessment of engineering structures using novel monitoring techniques. In: Smart Structures and Systems 9 (1), S. 1–20. DOI: 10.12989/sss.2012.9.1.001.
- TOPUROVA-TODOROVA, I. (2015): Tragfähigkeits- und Restnutzungsdaueranalyse stählerner Straßenbrücken unter detaillierter Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung. Aachen: Shaker (Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen / Book series of the Department of Civil Engineering, Technische Universität Berlin).
- UNGRICHT, H. (2004): Wasserhaushalt und Chlорideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.
- WILMES, M.; SCHULZE, S. (2019): Prüfbericht Ortung der Längsspannglieder der duraBAST-Brücke Kreuz Köln-Ost. Unveröffentlicht. Implenja.
- WÜSTHOLZ, T. (2016): Instandsetzung oder Neubau. In: Harald S. Müller, Ulrich Nolting und Michael Haist (Hg.): Bauwerkserhaltung - Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau. 12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe, 10.03.2016. Karlsruher Institut für Technologie.
- ZILCH, K. (2011): Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung. Bremerhaven, Hannover: Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, B 85).

Bilder

- Bild 1: Vernetzung im Schwerpunktthema 301 „(Weiter-) Entwicklung von Verfahren und Vorgehensweisen für die Erfassung und Beurteilung des Bestandes“
- Bild 2: Lebenszyklus einer Brücke
- Bild 3: Beispiel für einen Alarmplan zur Regelung der Zuständigkeiten im Fall von Grenzwertüberschreitungen für ein Schwellwertmonitoring an einer Brücke
- Bild 4: Zustandsfunktion $G = R - E$, Definition von Versagenswahrscheinlichkeit P_f und Sicherheitsindex β
- Bild 5: Semi-probabilistisches Sicherheitskonzept
- Bild 6: Zustandsentwicklung eines Betonbauteils infolge veränderlicher Einwirkungen und Widerstand
- Bild 7: Schema der Schadensentwicklung und der Grenzzustandsfunktion
- Bild 8: Beziehung zwischen dem Indikator x und der Verkehrslast Q
- Bild 9: maximal aufnehmbare Verkehrslast wird erreicht, ohne dass vorher der Schwellwert überschritten wurde
- Bild 10: Warnmeldung löst eine risikoreduzierende Maßnahme aus und verhindert das Versagen
- Bild 11: Überschreitungswahrscheinlichkeiten der bezogenen Verkehrslast in den Perioden Tag, Woche, 30 Tage und Jahr
- Bild 12: Extremwertverteilung der Tages- und Jahrmaxima am Beispiel der temperaturkompensierten Durchbiegung
- Bild 13: Verschiebung der Indikator-Extremwertverteilung während der laufenden Überwachung
- Bild 14: Ausgewertete Verteilung für den Gesamtanteil der fehlenden Daten und der durchschnittlichen Reparaturdauer
- Bild 15: Verteilungsfunktion der Messdauerverlängerung Δt_m für einen Indikatoren
- Bild 16: Hochstraße Gifhorn: Darstellung der überwachten Bereiche
- Bild 17: Position der Durchbiegungssensoren (DB), der Rissweitesensoren (S) und der Temperatursensoren (T)
- Bild 18: Deformation im Feld 9 bei Sensor DB1 bei Biegebelastung für 5 %-, 50 %- und 95 %-Quantile der Materialkennwerte
- Bild 19: Deformation im Feld 9 bei Sensor DB2 bei Schubbeanspruchung. Laststellung 3,43 m vom Lager entfernt (20°) für das 5 %-, und 95 %- Quantil der Materialfestigkeiten
- Bild 20: Ablaufschema zur Aufstellung des BVWP
- Bild 21: Auswirkungen von Verkehrsmaßnahmen
- Bild 22: Konzept zur Quantifizierung des Nutzens von Monitoringmaßnahmen
- Bild 23: Schematische Modelldarstellung der Kosten ohne Monitoring
- Bild 24: Schematische Modelldarstellung der Kosten mit Monitoring
- Bild 25: Schematische Darstellung des Schwellwertmonitorings und der Schwellwertgruppe
- Bild 26: Unterseite der Schwelmetalbrücke
- Bild 27: Darstellung der Kosten für die Entscheidungsalternativen
- Bild 28: Kostenveränderung pro Tag zwischen Basisfall (Szenario 6) und den anderen Szenarien
- Bild 29: Ereignisbaum mit Schwellwertgruppen
- Bild 30: Autobahnbrücke Duisburg Beeck
- Bild 31: Darstellung der Kosten für die Entscheidungsalternativen
- Bild 32: Kostenveränderung pro Tag zwischen Basisfall (Szenario 1) und den anderen Szenarien
- Bild 33: Ereignisbaum mit Schwellwertgruppen
- Bild 34: Einfluss des Diskontierungssatzes auf die Grenzwahrscheinlichkeit und den wirtschaftlichen Vorteil aus dem Monitoring (links Schwelmebrücke und rechts Brücke in Duisburg-Beeck)

- Bild 35: Module des Bauwerksmanagementsystems
- Bild 36: Bauwerksmanagementsysteme für die Straßenbauverwaltungen
- Bild 37: Entwicklung von Brücken-Management-Programmen
- Bild 38: Veränderung der Leistungsfähigkeit einer Struktur, abgeleitet aus diskreten Untersuchungen (LCM ohne Monitoring) und Monitoring im Prognosenmodellen (LCM mit Monitoring)
- Bild 39: Stufen der Nachrechnung
- Bild 40: Lage der intelligenten Brücke an der duraBAST
- Bild 41: Verfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte
- Bild 42: Feuchtesensoren (BS2 links oben und BAM rechts unten) auf der duraBAST
- Bild 43: Lage der Korrosions- und Feuchtesensoren an der duraBAST-Brücke
- Bild 44: Kalibrierkurve des Ankoppelmörtels an der Brücke Rietbüsche
- Bild 45: Temperaturkompensierte spezifische Widerstände der Multiringelektroden in ca. 10 cm Tiefe
- Bild 46: Feuchtegehalt an den Fahrbahnabläufen
- Bild 47: Feuchtegehalt am Fahrbahnübergang
- Bild 48: Schädigungsgrad eines Bauwerks durch Korrosion in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer
- Bild 49: Korrosionssensoren an der duraBAST-Brücke vor der Betonage
- Bild 50: Geeigneter Bereich für Sensoren an der duraBAST-Brücke um Defizite zu überwachen
- Bild 51: Radar-Verfahren zur Ermittlung von Schichtenaufbau; Funktionsprinzip und schematische Darstellung
- Bild 52: Vergleich der Kalibrierpunkte vor (links) und nach (rechts) Aufbringung der Abdichtung und Gussasphaltschichten
- Bild 53: Messraster der Radarmessungen mit der Hilti PS 1000
- Bild 54: Beispiel für ein aufgenommenes B-Bild an der duraBAST-Brücke
- Bild 55: Grafische Darstellung der Asphalt-schichtdicke der duraBAST-Brücke für die einzelnen Messlinien von Nord (links) nach Süd (rechts)
- Bild 56: duraBAST-Brücke Schalplan Überbau Bauwerk 2d (725/54b)
- Bild 57: duraBAST-Brücke Lage der Längsspannglieder in Feld 1 (725/118)
- Bild 58: Prinzipschema des Radarverfahrens (links) und Radargramm (rechts)
- Bild 59: Untersicht auf das Linear-Prüfkopffarray A1040 MIRA mit zwölf Prüfkopfmodulen und Messprinzip mit Schallwegen der multistatischen Messung (links), Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion an der duraBAST-Brücke (rechts)
- Bild 60: Geortete Längsspannglieder
- Bild 61: Draufsicht der Brücke mit Messstellenplan der Dehnungssensoren

Tabellen

- Tab. 1: Arbeitsschritte zur Durchführung einer Lebensdauerprognose
- Tab. 2: Schädigungsprozesse, -modelle und relevante Parameter
- Tab. 3: Versagenswahrscheinlichkeiten P_f und Zuverlässigkeitsindexe β ausgewählter Grenzzustände
- Tab. 4: Schwellwerte für verschiedene Versagenswahrscheinlichkeiten, mit berücksichtigten Messunsicherheiten
- Tab. 5: Versagenswahrscheinlichkeiten $P_{f,Re,1}$ und zugehörige Zuverlässigkeitsindexe
- Tab. 6: Versagenswahrscheinlichkeiten $P_{f,ID}$, $P_{f,RE,1}$ und $P_{f,Ü}$
- Tab. 7: Zugewinn der Zuverlässigkeit durch die Überwachungsmaßnahme
- Tab. 8: Verkehrsszenarien für die Schwelmetalbrücke
- Tab. 9: Simulationsergebnis: erwartete Kosten
- Tab. 10: Verkehrsszenarien für Duisburg-Beeck

- Tab. 11: Simulationsergebnis: erwartete Kosten
- Tab. 12: Feuchtesensoren in der duraBASt-Brücke
- Tab. 13: Korrosionssensoren in der duraBASt
- Tab. 14: Elektrische Ströme des Anodenleiters
- Tab. 15: Sensorkonzept für die duraBASt-Brücke im Bezug auf die in der Nachrechnung festgestellten Defizite
- Tab. 16: Schichtaufbau der Fahrbahn an der duraBASt-Brücke
- Tab. 17: Exemplarische Darstellung für den Abstand Unterkante Überbau bis Achse Spannglied für Längsträger III, Feld I, Seitenfläche
- Tab. 18: Exemplarische Darstellung für Tiefenlage der bis Achse Spannglied für Längsträger III, Feld I, Seitenfläche

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2016

B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur
Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen
Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 131: Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus
Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken
Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken
Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourastad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln
Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken
Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln
Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke
Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen
Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheuffler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BASt-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lehardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.