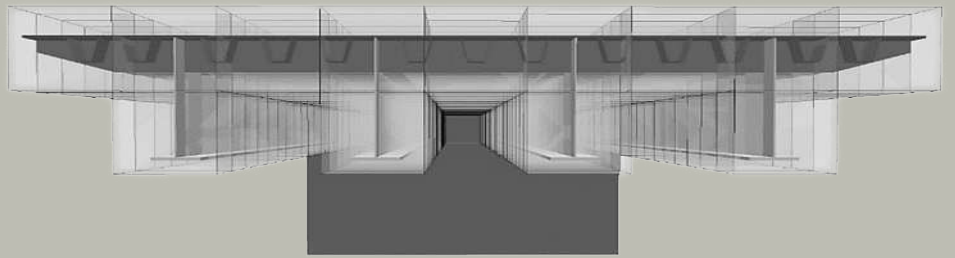


DORTMUNDER MODELL BAUWESEN

ARCHITEKT UND INGENIEUR

Annika Hundrup (geb. Peters)

BEITRAG ZUR BAUWERKSINSPEKTION UND
ZUSTANDBEWERTUNG STÄHLERNER
BRÜCKEN MIT ORTHOTROPER
FAHRBAHNPLATTE



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND
SCHRIFTENREIHE STAHLBAU

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. D. Ungermann

HEFT 13

2024

Beitrag zur Bauwerksinspektion und Zustandsbewertung stählerner Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte

Technischen Universität Dortmund
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von

Annika Hundrup (geb. Peters)

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr. W. Sonne
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. D. Ungermann
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Flügge

Technische Universität Dortmund
Technische Universität Dortmund
Universität Rostock

Tag der mündlichen Prüfung:

04.09.2024

Essen, Februar 2024

Kurzfassung

Der Begriff der Bauwerksprüfung erlangte besonders in den letzten Jahren durch einen Anstieg des Verkehrs, steigender Lasten und hohem Bauwerksalter immer mehr an Bedeutung [156]. Mit einem Halt des Anstiegs des Güterverkehrs ist laut einer Verkehrsprognose für 2030 nicht zu rechnen [324]. Fuhren 1960 noch 25.000 Fahrzeuge pro Tag über eine Brücke, waren es im Jahr 2021 70.000 Vehikel pro Tag, was einem Anstieg von 280 % entspricht [165]. Die Hauptproblematik auf den Straßen ist jedoch nicht die Zunahme des Verkehrsaufkommens, sondern der steigende Anteil des Schwerlastverkehrs. Das zulässige Gesamtgewicht eines LKWs hat sich von 24 Tonnen im Jahr 1956 auf 44 Tonnen bis heute nahezu verdoppelt. Die damals für diese Belastungen nicht erbauten Brücken unterliegen folglich heute einer Nutzungsänderung. [44][48][347]

Es ist daher dringend eine Optimierung der Bauwerkserhaltung in Deutschland erforderlich, um die Brücken und damit die Infrastruktur möglichst wirtschaftlich und über einen langen Lebenszyklus erhalten zu können. Als Teil des Bauwerk-Management-Systems (BMS) bildet die Bauwerksprüfung die entscheidende Grundlage und Voraussetzung für eine zielgerichtete und langfristige Bauwerkserhaltung. Eine sichere Analyse des Bauwerkszustands bildet das Fundament eines optimierten Ressourceneinsatzes, wofür eine Bauzustandsbewertung nach einheitlichen Kriterien unverzichtbar ist [156]. [183]

In dieser Arbeit werden daher die Grundlagen für eine Bauwerksinspektion entwickelt, welche die Prüfung von stählernen Brücken mittlerer Spannweite mit orthotropen Fahrbahnplatten mithilfe von Bildmaterial unterstützen soll. Dafür wird untersucht, inwieweit sich das u.a. durch Drohnen (Unmanned Aerial Systems-UAS) aufgenommene Bildmaterial für eine nachträgliche Schadensanalyse durch das Prüfpersonal am Computer eignet und welche Bereiche der Brücke vom UAS befliegen bzw. aufgenommen werden können. Es wird ein Eingabetool entwickelt, das den prozentualen, vom UAS aufgenommenen Anteil der Brücke errechnet und für Prüfer und Baulastträger als Entscheidungshilfe genutzt werden kann. Anschließend wird ein Schadenskatalog erarbeitet, welcher auf Grundlage des Bildmaterials vom Bauwerk besteht und schadensbasiert ist. Dieser soll allgemeingültig gelten und ist unabhängig von dem technischen Hilfsmittel, welches das Bildmaterial ggf. in Zukunft aufnimmt.

Nach Analyse nationaler und internationaler Bewertungsverfahren und durch die Entwicklung eines neuartigen Schadenskatalogs sollen in dieser Arbeit zudem die Grundlagen für einen Bewertungsalgorithmus erarbeitet werden. Dieser ist ebenfalls allgemeingültig zu entwickeln und unabhängig von der UAS-Bildaufnahme. Dabei sollen alle essentiellen Aspekte von führenden Bewertungsverfahren sowie die aktuell geltenden Grundlagen einfließen, um das derzeitige Verfahren zu optimieren, nicht zu ersetzen. Dafür ist eine voxelisierte Punktwolke von der Brücke notwendig, welche die Basis für das neue Bewertungsverfahren bildet. Eine abschließende Wirtschaftlichkeitsanalyse vergleicht die Arbeitsschritte und Kosten zwischen einer handnahen Prüfung nach DIN 1076 [69] sowie einer UAS- bzw. bildunterstützten Brückenprüfung und zeigt die Vor- aber auch Nachteile des hier entwickelten Systems auf.

Abstract

The concept of structural testing has become increasingly important, particularly in recent years, due to an increase in traffic, rising loads and the increasing age of structures [156]. According to a traffic forecast for 2030, the increase in freight traffic is not expected to stop [324]. While 25,000 vehicles crossed a bridge every day in 1960, this figure had risen to 70,000 vehicles per day by 2021, which corresponds to an increase of 280% [165]. The main problem on the roads is not the increase in traffic volume, but the rising proportion of heavy goods vehicles. The permissible total weight of a truck has almost doubled from 24 tons in 1956 to 44 tons today. The bridges that were not built for these loads at the time are now subject to a change of use. [44][48][347]

Therefore there is an urgent need to optimize structural maintenance in Germany in order to maintain the bridges and thus the infrastructure as economically as possible and over a long life cycle. As part of the building management system (BMS), structure inspection forms the decisive basis and requirement for targeted and long-term structure maintenance. A reliable analysis of the condition of the structure forms the basis for an optimized use of resources, for which an evaluation of the structure's condition according to uniform criteria is indispensable [156]. [183]

This work therefore develops the basis for a structural inspection system to support the inspection of medium-span steel bridges with orthotropic plates with the aid of photographic material. To this end, it is being investigated to what extent the photographic material recorded by drones (Unmanned Aerial Systems - UAS) is suitable for retrospective damage analysis by the inspection personnel on the computer and which areas of the bridge can be flown over or recorded by the UAS. An input tool is being developed that calculates the percentage of the bridge recorded by the UAS and can be used as a decision-making aid for inspectors and construction authorities. A damage catalog is then drawn up, which is based on the pictures of the building and is damage-based. This should apply universally and is independent of the technical aid that may be used to record the photographic material in the future.

After analyzing national and international evaluation procedures and by developing a new type of damage catalog, this work will also provide the basis for an evaluation algorithm. This is also universally valid and independent of the UAS image acquisition. All essential aspects of leading assessment procedures and the currently applicable principles are to be incorporated in order to optimize, not replace, the current method. This requires a voxelized point cloud of the bridge, which forms the basis for the new evaluation system. A final profitability analysis compares the work steps and costs between a manual inspection according to DIN 1076 [69] and a UAS-supported bridge inspection and shows the advantages and disadvantages of the system developed here.

Vorwort des Herausgebers

Regelmäßig durchgeführte Bauwerksprüfungen sind die Grundlage für den sicheren Betrieb und den Erhalt von Brückentragwerken.

Frühzeitig erkannte Mängel und Veränderungen der Bausubstanz sind Voraussetzung einer zeitnahen Instandsetzung unter Vermeidung fortschreitender Degradation. Eine nachhaltige Bewirtschaftung in der vorgesehenen Lebensdauer ist damit gegeben. Derzeit werden im Abstand von 6 Jahren handnahe Hauptprüfungen durchgeführt. Sie erfordern einen hohen personellen Aufwand und sind häufig verbunden mit Einschränkungen der Verkehrssituation bedingt durch das Erfordernis von stationären oder mobilen Besichtigungseinrichtungen.

Eine Befliegung durch Drohnen mit darauf angebrachten Kameras, verbunden mit einer automatisierten Erfassung von Schäden aus dem vorliegenden Bildmaterial könnte diesen hohen Aufwand vermeiden und eine objektive Beurteilung der Bausubstanz ermöglichen.

Eine zeitlich dichtere Abfolge von Inspektionsflügen erlaubt zudem die Schadenserkenkung bereits in der Anfangsphase.

Dieser neuartigen Möglichkeit der Bauwerksprüfung nimmt sich Frau Annika Hundrup in der vorliegenden Arbeit an. Die Möglichkeiten zur Befliegung, das Aufzeigen der Grenzen der Schadenserfassung aus dem Bildmaterial, die Analyse flugtauglicher Bereiche sind essentiell für die Beurteilung der Möglichkeiten und der Chancen dieser Art der Bauwerksprüfung.

Die Qualität und der Umfang der automatisierten Erfassung und objektiven Bewertung von Schäden mißt sich an den Vorgaben der handnahen Prüfung. Frau Hundrup nimmt sich in der Arbeit besonders dem Bewertungsalgorithmus der RI-EBW-PRÜF an und erarbeitet einen für den Einsatz von digitalen Hilfsmitteln ausgelegten verbesserten Bewertungsalgorithmus.

Mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der neuartigen Bauwerksprüfung werden die Chancen und Grenzen aufgezeigt. Die Arbeit liefert damit einen wichtigen Beitrag zur Weiterführung von Bauwerksprüfungen hin zu einer objektiven, wirtschaftlichen und zeitnahen Erfassung von Bausubstanz.

Die vorliegende Arbeit entstand auf der Grundlage des Forschungsprojektes „Inspektion, Überwachung und Dokumentation von stahlbaulichen Strukturen“, FOSTA P 1326, AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V, 2020.

Den Forschungspartnern im Projekt gilt mein Dank für die sehr gute und inspirierende Zusammenarbeit, die den Erfolg des Projektes ermöglicht hat.

Der AiF gilt ein herzlicher Dank für die finanzielle Förderung. Besonders die Unterstützung der FOSTA Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. während der gesamten Laufzeit des Vorhabens war den Forschungspartner eine großartige Hilfe bei der Durchführung und Umsetzung der Forschungsarbeiten

Meinem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge danke ich herzlich für die intensive und kompetente Begleitung der vorliegenden Arbeit im Rahmen des Zweitgutachten.

Prof. Dr. Wolfgang Sonne hat mit der Übernahme des Vorsitzes der Promotionsprüfung Vortrag und mündliche Prüfung souverän moderiert. Dafür mein bester Dank.

Dortmund, im März 2024

Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation ist während und nach meiner Forschungstätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Stahlbau der Technischen Universität Dortmund entstanden.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann für die Ermöglichung dieser Arbeit, für die Betreuung sowie die zahlreichen Gespräche und Anmerkungen. Seine Ratschläge und das mir entgegengebrachte Vertrauen haben bei der Bearbeitung sehr geholfen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge möchte ich mich für das Interesse an meiner Arbeit, den sehr freundlichen und hilfreichen Austausch sowie für das bereitwillige Korreferat bedanken. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr. Wolfgang Sonne für den Vorsitz der Prüfungskommission und seiner ruhigen Energie während meiner Disputation.

Meinen ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls Stahlbau danke ich für die schöne Zeit, für die fachlichen Diskussionen sowie für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ebenso sind an dieser Stelle die wissenschaftlichen Hilfskräfte sowie alle Bachelor- und Masterabsolventen zu erwähnen, denen ebenfalls mein Dank für ihr stahlbauliches Interesse gilt.

Danke auch an Prof. Dr.-Ing. habil. Bettina Brune für das immer offene Ohr und den – auch mal weiblichen – Rat sowohl auf wissenschaftlicher als auch persönlicher Ebene.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Forschungspartnern des Lehrstuhls Informatik VII der TU Dortmund sowie des Fraunhofer Instituts IGP in Rostock bedanken. Die anderthalb gemeinsamen Forschungsprojekte waren nicht nur fachlich höchst interessant und spannend, sondern auch durch ein wunderbares Team und gemeinschaftliches Arbeiten geprägt.

Abschließend möchte ich mich abseits des Fachlichen bei meiner Familie bedanken. Mein Vater, der in der ersten Woche am Lehrstuhl damals (m)einen „Doktorbaum“ gepflanzt hat, war scheinbar von der Anfertigung und Beendigung dieser Arbeit direkt gänzlich überzeugt. Ich freue mich darauf, das weitere Wachsen dieses Baumes zu verfolgen. Auch geht mein Dank an meine Freundin, die besonders am Ende mitverantwortlich für mein psychisches Wohlergehen war.

Das größte Danke geht an meinen Ehemann und besten Freund, ohne den es die vorliegende Arbeit vermutlich nicht gegeben hätte.

Essen, im September 2024

Annika Hundrup

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	IV
TABELLENVERZEICHNIS	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG	1
1.2 ZIELSETZUNG.....	3
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	5
2 STAND DER TECHNIK.....	7
2.1 BAUWERKSPRÜFUNG.....	7
2.1.1 <i>Konventionelle Prüfung, Richtlinien und Bewertung von Ingenieurbauwerken bei Straßenbrücken</i>	<i>7</i>
2.1.2 <i>Konventionelle Prüfung, Richtlinien und Bewertung von Ingenieurbauwerken bei Bahnbrücken</i>	<i>19</i>
2.1.3 <i>Konventionelle Prüfung, Richtlinien und Bewertung von Ingenieurbauwerken bei Verkehrswasserbauwerken.....</i>	<i>22</i>
2.1.4 <i>Bauwerks-Management-Systeme (BMS).....</i>	<i>25</i>
2.2 BAUWEISEN STÄHLERNER BRÜCKEN UND TRAGVERHALTEN ORTHOTROPER FAHRBAHNPLATTEN.....	27
2.3 TYPISCHE SCHÄDIGUNGEN AN BRÜCKEN AUS STAHL.....	31
2.4 UNMANNED AERIAL SYSTEM (UAS).....	37
2.4.1 <i>Kurzdarstellung UAS</i>	<i>37</i>
2.4.2 <i>EU-Regularien für den Drohnenflug.....</i>	<i>38</i>
2.4.3 <i>Deutsche Regularien für den Drohnenflug.....</i>	<i>40</i>
2.4.4 <i>Spezifische Regelungen für den Einsatz von UAS zur Inspektion von Anlagen und Gebäuden.....</i>	<i>41</i>
2.5 OPTISCHE VERFAHREN ZUR SCHADENSDETEKTION	42
2.5.1 <i>Inspektion und Schadenserkenung mittels Bildmaterial und UAS.....</i>	<i>42</i>
2.5.2 <i>Automatisierte Schadenserkenung.....</i>	<i>44</i>
2.5.3 <i>Kamera- und Fototechnik</i>	<i>46</i>
2.6 VOXELISIERUNG VON OBJEKTEN	50
2.7 ANFORDERUNGEN AN DAS ZU ENTWICKELNDE VERFAHREN UND FORSCHUNGSBEDARF	53
3 UNTERSUCHUNG FLUGTAUGLICHER BEREICHE VON ORTHOTROPEN PLATTEN	56
3.1 BAUWERKSANALYSE.....	56
3.1.1 <i>Schädigungsrelevante Bereiche an Stahlbrücken.....</i>	<i>56</i>
3.2 GRAFISCHE UNTERSUCHUNGEN ZU INSPIZIERENDER BRÜCKENBEREICHE	61
3.2.1 <i>Untersuchung von Brennweite und Abstand zum Bauwerk</i>	<i>61</i>
3.2.2 <i>Parameterdefinition</i>	<i>64</i>

3.2.3	<i>Graphische Analyse der parametrischen Brückenvariationen – Linienbetrachtung</i>	67
3.2.4	<i>Graphische Analyse – Flächenbetrachtung</i>	74
3.2.5	<i>Graphische Analyse – Schweißnahtlängen</i>	82
3.3	ERGEBNISSE EINER UAS-BEFLIEGUNG.....	83
3.3.1	<i>Messergebnisse und Auswertung</i>	83
3.3.2	<i>Excel-Auswertetool</i>	86
3.3.3	<i>Fazit und Grenzen der geometrischen Bauwerksanalyse für UAS-Befliegung</i>	89
4	SCHADENSKATALOG	91
4.1	SCHADENSANALYSE.....	91
4.1.1	<i>Schadensverteilung von Schäden an (Stahl-) Brücken</i>	91
4.1.2	<i>Schadensverortung</i>	95
4.1.3	<i>Vergleich bestehender Regularien der BASt und Deutschen Bahn</i>	101
4.2	NEU ENTWICKELTER SCHADENSKATALOG UND FAZIT.....	105
5	BEWERTUNGSLGORITHMUS	111
5.1	NATIONALE BEWERTUNGSVERFAHREN.....	111
5.1.1	<i>RI-EBW-PRÜF 1988</i>	111
5.1.2	<i>Verfahren von Kraft</i>	113
5.1.3	<i>TH Darmstadt</i>	116
5.1.4	<i>BASt 1997 und 1999</i>	119
5.2	INTERNATIONALE BEWERTUNGSVERFAHREN.....	122
5.2.1	<i>United States of America</i>	122
5.2.2	<i>Japan</i>	129
5.2.3	<i>Fazit der bestehenden Bewertungsverfahren</i>	131
5.3	ERARBEITUNG EINES NEUEN BEWERTUNGSLGORITHMUS.....	136
5.4	SENSITIVITÄTSANALYSEN UND VERIFIZIERUNG DES BEWERTUNGSLGORITHMUS	142
6	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG EINER UAS-UNTERSTÜTZTEN BRÜCKENPRÜFUNG	146
6.1	DARSTELLUNG DER ZU VERGLEICHENDEN INSPEKTIONSVERFAHREN.....	146
6.1.1	<i>Brückenprüfung mit konventionellem Prüfverfahren nach DIN 1076</i>	146
6.1.2	<i>Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung</i>	147
6.2	KOSTENERMITTLUNG.....	148
6.2.1	<i>Brückenprüfung mit konventionellem Prüfverfahren nach DIN 1076</i>	148
6.2.2	<i>Zeit- und Kostenberechnungstool für konventionelles Prüfverfahren nach DIN 1076</i>	153
6.2.3	<i>Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung</i>	155
6.2.4	<i>Zeit- und Kostenberechnungstool für UAS-unterstütztes Prüfverfahren</i>	159
6.3	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG.....	160

6.4	AUSWERTUNG UND FAZIT	164
7	FAZIT UND AUSBLICK.....	167
7.1	FAZIT	167
7.2	AUSBLICK	170
8	QUELLENVERZEICHNIS	173
9	ANHANG	207

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Prinzip der zu entwickelnden Prüfmethodik.....	4
Abb. 1.2:	Aufbau der Arbeit.....	6
Abb. 2.1:	Auszug aus Schadenskatalog der RI-EBW-PRÜF 2017 [300].....	9
Abb. 2.2:	Übersicht der Regelwerke zur Bauwerkserhaltung von Straßenbrücken [37] ...	10
Abb. 2.3:	Differenzierung Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung nach DIN 1076 (nach [69])	11
Abb. 2.4:	Brückenhauptprüfungen (H) mit Hilfsmitteln wie Hub- (l. [257] u r. [277]) und Teleskopsteiger (l.) bzw. stationärem Besichtigungswagen (m. [250])	13
Abb. 2.5:	Übersicht Rechenschritte Algorithmus der BAST [154][303].....	16
Abb. 2.6:	Auszug Bewertungsschlüssel nach Haardt zur Ermittlung der Basiszustandszahlen Z_i [154].....	16
Abb. 2.7:	Regelwerke zur Bauwerkserhaltung von Eisenbahnbrücken [286]	21
Abb. 2.8:	Maske zur Erfassung von Schäden der Software WSVPruf ([149], S.1).....	24
Abb. 2.9:	Beispiel eines Diagramms zur Schadenszuordnung in eine Schadensklasse ([39], S.12).....	25
Abb. 2.10:	Abfolge von Bauwerksdaten bis zu maßgeblichen Erhaltungsmaßnahmen (nach [124])	26
Abb. 2.11:	Prinzipieller Aufbau einer orthogonal anisotropen (= orthotropen) Fahrbahnplatte ([126], S.8)	28
Abb. 2.12:	Durchbiegung der Rippen und des Querträgerstegs ohne Freischnitt ([55], S.28)	29
Abb. 2.13:	Schema Flächenkorrosion (l.) (nach [275]); Schema Kontaktkorrosion (m.) (nach [275]); Lochkorrosion (r.) [274]	32
Abb. 2.14:	Ermüdungsrisse an Längsrippen (links; ([215], S.47) und Deckblech (rechts; ([331], S.17).....	35
Abb. 2.15:	Übersicht der Schäden der Kategorien 1 bis 4 an Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte (nach [125], S.2).....	36
Abb. 2.16:	Beispiel für ein Inspektions-UAS [53]	37
Abb. 2.17:	Verarbeitungsschritte der Bildanalyse ([140], S. 27).....	44
Abb. 2.18:	Annotierung von korrodiertem Verbindungsmittel (l.) und Rissen in Stahl (r.) ([140], S. 93).....	45

Abb. 2.19:	Automatische Erkennung von Korrosion (l.) und Blasen in der Beschichtung (r.) ([140], S. 96).....	45
Abb. 2.20:	Funktionsweise von Spiegelreflex- und spiegelloser Kompaktkamera [251].....	47
Abb. 2.21:	Systemskizze zur Erklärung von „Brennweite“ und „Brennpunkt“ (f') [249].....	48
Abb. 2.22:	Bildaufnahmen mit Vollformatkamera; 18, 24, 35 mm Brennweite (von links nach rechts) ([25], S.26).....	49
Abb. 2.23:	Bildausschnitte bei Verwendung eines Vollformat- (l. + r.o.) und APS-C-Sensors (l. + r.u.) (l.: [365]; r.: nach [25], S.27).....	49
Abb. 2.24:	Detaillierungsgrad der Voxelisierung am Beispiel eines Hasen ([141], S.54).....	51
Abb. 2.25:	Einfluss von UAS-Abmessungen auf die Voxelgröße, hier beispielhaft 60 cm Kantenlänge ([140], S. 66).....	52
Abb. 3.1:	Beispielhafte Laststellung (LM 1) auf einer Bogenbrücke nach Eurocode (EC) 1 [82].....	57
Abb. 3.2:	l.: Aufteilung der Brückenquerfläche ([179], S.13); r.: Beispiel Nummerierung Fahrstreifen ([83], S.32).....	59
Abb. 3.3:	Beispielhafte Spannungsverteilung eines Längssteifenquerschnitts einer Balkenbrücke bei einseitiger Belastung durch einen PKW (Größenverhältnis nicht realitätstreu).....	59
Abb. 3.4:	Beispiel eines FE-Modells einer 40 m langen belasteten Balkenbrücke ohne Kragarm mit orthotroper Fahrbahnplatte.....	60
Abb. 3.5:	Testmotiv fotografiert mit 24 mm-Objektiv aus 2 m Entfernung (l.: Original; r.: vergrößert) ([25], S. 31).....	62
Abb. 3.6:	l.: Testmotiv fotografiert mit 24 mm-Objektiv aus 1,5 m Entfernung ([25], S.31).....	63
Abb. 3.7:	l.: Testmotiv fotografiert mit 50 mm-Objektiv aus 10 m Entfernung ([25], S. 33).....	64
Abb. 3.8:	l.: Beispiel eines einzelnen Querschnitts für die Untersuchung der Plattenunterseite in Querrichtung; r: Eindruck über mögliche Kombinationen für Untersuchung der Plattenunterseite in Querrichtung (nach [25]).....	66
Abb. 3.9:	Grafische Darstellung des Blickwinkels je Brennweite (lila = 24 mm, türkis = 35 mm, dunkelbau = 50 mm, grün = 70 mm) (nach [25]).....	67
Abb. 3.10:	Beispielhafte Analyse eines Brückenquerschnitts bzgl. der Plattenunterseite mit 70 mm Brennweite und 1,0 m Sicherheitsabstand (nach [25]).....	68
Abb. 3.11:	Prinzipdarstellung der betrachteten Plattenunterseite in Längsrichtung (nach [25]).....	69
Abb. 3.12:	Prinzipdarstellung des betrachteten Plattenüberstands auf der Unterseite (l.) und des Hauptträgers (r.) (nach [25]).....	70

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.13:	Beispiele von Trägerabstandskombinationen; oben: Längsschnitt; Mitte: Plattenuntersicht mit HT-Abstand 4,20 m; unten: Plattenuntersicht mit HT-Abstand 5,40 m (nach [25]).....	73
Abb. 3.14:	o.: isometrische Darstellung der einzelnen Teilflächen; u.: Darstellung der einzeln zu ermittelnden Flächen pro Feld (nach [25]).....	75
Abb. 3.15:	o.: Isometrische Darstellung der Plattenunterseite; u.: Darstellung sichtbarer Einzelbereiche an Plattenunterseite (nach [25])	77
Abb. 3.16:	Beispiel für Sichteinschränkung der seitlichen Steifen in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands (beispielhaft hier l.: 1,50 m; r.: 2,50 m) (nach [25])	77
Abb. 3.17:	Darstellung sichtbarer Einzelbereiche an Plattenunterseite im Bereich der Plattenüberstände (nach [25]).....	80
Abb. 3.18:	l.: Verdeckter Bereich Querträger (rot) durch Längssteifen; r.: ‚Blinder Fleck‘ an Seitenfläche der Steife (rot) (nach [25]).....	81
Abb. 3.19:	Darstellung verschiedener zu ermittelnden Schweißnähte (nach [25])	82
Abb. 3.20:	Beispiel einer Ergebnisseite des Excel-Auswertetools	88
Abb. 4.1:	Ergebnisse der Schadensanalyse (alle Schäden)	93
Abb. 4.2:	Ergebnisse der Schadensanalyse (reduzierte Stahlschäden)	94
Abb. 4.3:	Beispiel der Einteilung in fünf Bauwerksbereiche einer Fachwerkbrücke (Piktogrammdarstellung Längsansicht)	96
Abb. 4.4:	Beispiel der optischen Schadensverortung an einer Bogenbrücke (Piktogrammdarstellung).....	98
Abb. 4.5:	Mittelwert der Schadensverteilung in fünf Bauwerksbereiche.....	99
Abb. 4.6:	l.: Mittelwert der Schadensverteilung nur Überbau; r.: tragkonstruktiv relevante Schäden	100
Abb. 4.7:	Beispielauszug aus Schadenskatalog der BAST bzw. RI-EBW-PRÜF ([300], S.1)	103
Abb. 4.8:	Vergleich Hauptmerkmale von RI-EBW-PRÜF [303] und Ril 804 [57]	105
Abb. 4.9:	Sankey-Diagramm der Filterstufen 2 bis 4	107
Abb. 4.10:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Korrosionsschäden	109
Abb. 4.11:	Ausschnitt des neu entwickelten Schadenskatalogs	110
Abb. 5.1:	Zustandsbewertung nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301].....	112
Abb. 5.2:	Bedarfsleiste des LVR [177].....	114
Abb. 5.3:	Zustandsbewertung nach Kraft	115
Abb. 5.4:	Zustandsbewertung nach TH Darmstadt.....	117

Abb. 5.5:	Zustandsbewertung nach BAST 1997	119
Abb. 5.6:	Zustandsbewertung nach BAST 1999	121
Abb. 5.7:	Zustands- bzw. Suffizienzbewertung USA	123
Abb. 5.8:	Kernthemen nach Analyse der Bewertungsverfahren für neuen Algorithmus .	135
Abb. 5.9:	Ablauf einer Brückenprüfung nach neuem System.....	137
Abb. 5.10:	l.:Prinzipdarstellung voxelisierter Brückenquerschnitt; r.: verschieden farbige Voxel.....	138
Abb. 5.11:	Gewichtungen der diversen Voxel bzw. Voxelfarben.....	140
Abb. 5.12:	Logikdiagramm von neu erzeugtem Algorithmus	142
Abb. 5.13:	Zusammenhang zwischen Schadensanzahl und Bauwerksbewertung B	143
Abb. 5.14:	Einfluss Schäden in orangefarbenen Voxeln auf skalierte Endnote.....	144
Abb. 5.15:	Linearität zwischen Bauwerksbewertung B und skaliertes Endnote	144
Abb. 6.1:	Eingabe und Auswahl des Geometriefaktors F für handnahe Prüfungen	154
Abb. 6.2:	Beispiel Eingabefelder für Bauwerksgeometrie, Prüfungsvorbereitungen und Mietgeräte.....	155
Abb. 6.3:	l.: Grid Flight Plan; r.: Umfliegsplan ([240], S. 10).....	156
Abb. 6.4:	l.: Flugroute zur Ermittlung der Bildanzahl ([116], S. 61)	158
Abb. 6.5:	Vergleich der Kosten für Verfahren handnah und UAS-unterstützt.....	162
Abb. 6.6:	Vergleich des Zeitaufwands für Verfahren handnah und UAS-unterstützt	163
Abb. 9.1:	Bewertungsschlüssel BAST-Algorithmus nach ([154], S.39)	208
Abb. 9.2:	Sankey-Diagramm, Korrosionsschäden, 4. Filterung	221
Abb. 9.3:	Sankey-Diagramm, Verbindungsmittelschäden, 4. Filterung	221
Abb. 9.4:	Sankey-Diagramm, Beschichtungsschäden, 4. Filterung	222
Abb. 9.5:	Sankey-Diagramm, Schäden freiliegender Bewehrung, 4. Filterung	222
Abb. 9.6:	Sankey-Diagramm, Risschäden, 4. Filterung	223
Abb. 9.7:	Sankey-Diagramm, Schweißschäden, 4. Filterung.....	223
Abb. 9.8:	Sankey-Diagramm, Verschmutzungsschäden, 4. Filterung	224
Abb. 9.9:	Sankey-Diagramm, Verformungsschäden, 4. Filterung	224
Abb. 9.10:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Korrosionsschäden	225
Abb. 9.11:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Beschichtungsschäden	226
Abb. 9.12:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Risschäden	227
Abb. 9.13:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Verbindungsmittelschäden.....	228

Abbildungsverzeichnis

Abb. 9.14:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Schweißnahtschäden.....	229
Abb. 9.15:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Verschmutzungsschäden.....	230
Abb. 9.16:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Verformungsschäden.....	231
Abb. 9.17:	Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Schäden freier Bewehrung.....	232
Abb. 9.18:	Vorschläge zur Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301].....	236
Abb. 9.19:	Beispiel Bewertungsblatt TH Darmstadt [325]	241
Abb. 9.20:	Datenblatt Strukturinventar USA [295]	249
Abb. 9.21:	Reduzierung der Tragfähigkeit $B(S_1)$ [295].....	251
Abb. 9.22:	Beispiel einer voxelisierten einfeldrigen Balkenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte.....	257
Abb. 9.23:	Beispiel Verteilung orangener Voxel (= konstruktiv mit Priorität)	258
Abb. 9.24:	Beispielhafter Auszug von Analyse der Gewichtungsfaktoren	258
Abb. 9.25:	Vergabeleistungen für handnahe oder UAS-unterstützte Brückenprüfung (nach [116], S. 36)	260
Abb. 9.26:	Kosten und Zeitansätze für Genehmigungen für Brückenprüfung (nach [352])	261
Abb. 9.27:	Anteil des Grundaufwands aus (Gl. 70) an der gesamten Prüfzeit ([116], S. 45)	264
Abb. 9.28:	Kosten und Zeitansätze für Fluggenehmigungen (nach [116])	267
Abb. 9.29:	Bilderanzahl in Abhängigkeit der Überlappung ([116], S. 62)	268

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Definierte Begriffe zur Auswahl des Schadensumfangs und ΔZ_1 [154].....	17
Tab. 2.2:	Zu-/Abschlag ΔZ_1 nach [154].....	17
Tab. 2.3:	Zu-/Abschlag ΔZ_2 für Bauteilgruppe Überbau (l.) und alle anderen Bauteilgruppen (r.) [154]	17
Tab. 2.4:	Zu-/Abschlag ΔZ_3 [154]	18
Tab. 2.5:	Definition der Schadensklassen für Prüfungen von Verkehrswasserbauwerke ([39], S.4).....	23
Tab. 2.6:	Gliederung eines Bauwerk-Management-Systems [106].....	26
Tab. 2.7:	Details zur offenen Betriebskategorie ([99], Anhang Teil A; EU-Verordnung 2019/947)	39
Tab. 3.1:	Beeinflussende Parameter für die zu untersuchenden Bauteile	65
Tab. 3.2:	Zu untersuchende Werte der diversen Parameter.....	65
Tab. 3.3:	Geometrische Sichtbarkeitseinschränkungen durch Querträgerabstände	74
Tab. 3.4:	Geometrische Sicherheitseinschränkungen durch Hauptträgerabstände	74
Tab. 3.5:	Regel für Anzahl zu subtrahierender Steifen von Gesamtsteifenfläche; eingeschränkt sichtbarer Plattenbereich zwischen zwei Steifen; Anzahl sichtbarer Steifenseiten	78
Tab. 3.6:	Regel für Anzahl zu subtrahierender Steifen von Gesamtsteifenfläche; Anzahl sichtbarer Steifenseiten (gültig jeweils für seitlichen Plattenüberstand).....	79
Tab. 3.7:	Optimale Parameterkombination für Untersuchung einzelner Teilbereiche	84
Tab. 3.8:	Querträgerhöhen und Kombinationen, welche mind. 80 % Sichtbarkeit erzielen	85
Tab. 4.1:	Reihenfolge der fünf häufigsten Schäden der insgesamt 6.332 Einzelschäden	92
Tab. 4.2:	Reihenfolge der zehn häufigsten Schäden der reduzierten 3.407 Einzelschäden	94
Tab. 4.3:	Zustandskategorien gemäß Ril 804 [57].....	103
Tab. 4.4:	Prüfungsarten und -umfang gemäß RI-EBW-PRÜF [303] und Ril 804 [57]	104
Tab. 5.1:	Festlegungen für Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301].....	112
Tab. 5.2:	Vor- und Nachteile Verfahren nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301].....	113
Tab. 5.3:	Festlegungen für Schadensbewertung nach Kraft [177].....	115
Tab. 5.4:	Festlegungen für Ausbreitungstendenz f_2 nach Kraft [177].....	116

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.5:	Festlegungen für Auswirkungen auf andere Bauteile f_3 nach Kraft [177]	116
Tab. 5.6:	Vor- und Nachteile Verfahren nach Bedarfsleiste / Kraft / TH Darmstadt	119
Tab. 5.7:	Vor- und Nachteile Verfahren nach BAST 1997	120
Tab. 5.8:	Vor- und Nachteile Verfahren nach BAST 1999 bzw. heute	121
Tab. 5.9:	Faktor $A(S_1)$ [295]	123
Tab. 5.10:	Faktoren $A(S_2)$, $B(S_2)$, $C(S_2)$, $D(S_2)$, $E(S_2)$, $F(S_2)$ [295]	124
Tab. 5.11:	Beschreibung für Item 100 [295]	125
Tab. 5.12:	Beispiele für Codierung von Item 53 (Addition der Breiten) [295]	125
Tab. 5.13:	Beispiele für Codierung von Item 29 [295]	125
Tab. 5.14:	Beschreibung für Codierung von Item 36 [295]	126
Tab. 5.15:	Festlegungen für S_1 bzw. Item 58, 59 und 60 [295]	127
Tab. 5.16:	Festlegungen für S_2 bzw. Item 1, 57, 68, 69, 70, und 72 [295]	127
Tab. 5.17:	Vor- und Nachteile Verfahren Amerika	129
Tab. 5.18:	Schadensbewertung Verfahren Japan [278]	130
Tab. 5.19:	Bedeutung Ergebnis Verfahren Japan [278]	130
Tab. 5.20:	Vor- und Nachteile Verfahren Japan	131
Tab. 5.21:	Vergleich der deutschen Verfahren	133
Tab. 5.22:	Vergleich nationaler und internationaler Bewertungsverfahren	134
Tab. 5.23:	Notenbereiche für die Zustandsbewertung	142
Tab. 6.1:	Zuschläge für Stundenlohn bei Abweichung zur Regelarbeitszeit (in Anlehnung an [352][381])	149
Tab. 6.2:	Zuschlagsfaktor für Vorbereitung von Brückenprüfungen (in Anlehnung an [381])	149
Tab. 6.3:	Neuer Geometriefaktor F (in Anlehnung an [381])	153
Tab. 6.4:	Geometriefaktor G	157
Tab. 6.5:	Beispiel Grundwerte für Drohnen- und Kamertechnik zur Kostenermittlung .	159
Tab. 6.6:	Wirtschaftlicher Vergleich zweier Brücken hinsichtlich unterschiedlichem Prüfverfahren	160
Tab. 6.7:	Tabellarischer Vergleich der beiden Prüfverfahren (+ besser, o gleich, - schlechter)	165
Tab. 9.1:	Notenbereiche für die Zustandsbewertung nach BAST [303]	210
Tab. 9.2:	Traglastindex der Arbeitsgruppe Schwerverkehr [7]	211

Tab. 9.3:	Rangfolge der ersten 100 stählernen Brückenschäden von 6.332 Einzelschäden	214
Tab. 9.4:	Schadensbewertung für „Standicherheit“ gemäß RI-EBW-PRÜF ([303], S. 11)	215
Tab. 9.5:	Schadensbewertung für „Verkehrssicherheit“ gemäß RI-EBW-PRÜF ([303], S. 12)	215
Tab. 9.6:	Schadensbewertung für „Dauerhaftigkeit“ gemäß RI-EBW-PRÜF ([303], S. 12)	216
Tab. 9.7:	Tabellarischer Vergleich RI-EBW-PRÜF [303] mit DB Ril 804 [57].....	220
Tab. 9.8:	Neu entwickelter Schadenskatalog	234
Tab. 9.9:	Schweregrade von Einzelschäden nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]	237
Tab. 9.10:	Noten des Gesamtbauwerks nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]	237
Tab. 9.11:	Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach RI-EBW-PRÜF 1988.....	238
Tab. 9.12:	Schadenszonen [177]	239
Tab. 9.13:	Faktor f_2 Ausbreitungstendenz [177].....	239
Tab. 9.14:	Faktor f_3 Auswirkungen auf andere Bauteile [177]	239
Tab. 9.15:	Faktor f_4 Verkehrsnutzung nach RAS-N [177]	240
Tab. 9.16:	Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach Kraft.....	240
Tab. 9.17:	Bauteilkategorien mit Gewichtungen [325]	242
Tab. 9.18:	Normierung der Schäden [325]	242
Tab. 9.19:	Zuordnung Prioritätspunkte p_1 [325]	243
Tab. 9.20:	Verkehrsbedeutung je Bauteilkategorie [325].....	243
Tab. 9.21:	Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach TH Darmstadt	244
Tab. 9.22:	Bedeutung der Bauteile B_B [156]	247
Tab. 9.23:	Bedeutung der Bauteilkategorie B_K [156]	247
Tab. 9.24:	Festlegungen für Schadensbewertung nach BAST 1997	248
Tab. 9.25:	Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach BAST 1999	248
Tab. 9.26:	Beschreibung für Item 58/59/60 [295]	250
Tab. 9.27:	Beschreibung für Item 57/68/69/70/71/72 [295].....	251
Tab. 9.28:	Beschreibung für Item 19 [295]	252
Tab. 9.29:	Beispiele für Codierung von Item 51 [295]	252
Tab. 9.30:	Ziffer 1 und 2 + 3 für Codierung von Item 43 [295]	253

Tabellenverzeichnis

Tab. 9.31:	Beispiele für Codierung von Item 32 (Addition der Breiten) [295]	253
Tab. 9.32:	Beispiele für Codierung von Item 28 [295]	254
Tab. 9.33:	Nachbildung und Ergebnisse nach Verfahren Amerika	255
Tab. 9.34:	Bauteilkategorien Verfahren Japan [254]	256
Tab. 9.35:	Beispiel für Subtracting Point Methode nach Verfahren Japan [163][254]	257
Tab. 9.36:	Vergleich BAST-Algorithmus mit neuem Algorithmus	259
Tab. 9.37:	Anlieferungs- und Abholungskosten für Mietgeräte [203][352][390]	262
Tab. 9.38:	Tagespauschalen für Mietgeräte ohne Bedienpersonal [203][352][390]	262
Tab. 9.39:	Tagespauschalen für Mietgeräte mit Bedienpersonal [203][352][390]	263
Tab. 9.40:	Kosten für Sicherungsmaßnahmen bei Straßen und Gleisen (vgl. [352])	263
Tab. 9.41:	Kostenmatrix für handnahe Brückenprüfung nach DIN 1076 (nach [116])	266
Tab. 9.42:	Kostenmatrix für Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung (nach [116])	270

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In Deutschland gibt es heute knapp 66.000 Brücken. Circa 40.000 davon sind Bundesfernstraßen mit einer Gesamtfläche von über 31,5 Millionen m² und weitere ca. 26.000 Eisenbahnbrücken fallen in den Verantwortungsbereich der Deutschen Bahn [35][36][63]. Mehr als 40% von ihnen sind älter als 80 Jahre. Die normative Nutzungsdauer von 100 Jahren hat ein Großteil der deutschen Eisenbahnbrücken erreicht. Von den Straßenbrücken sind nur circa 60 % jünger als 40 Jahre [36][63][160][348]. Schlagzeilen wie „Brücken maroder als bekannt“ [255], „Marode Brücken in ganz NRW“ [229], „Nach Unglück in Italien: So sicher sind die Brücken in NRW“ [15] oder ganze Sperrungen von Hauptverkehrsadern wie auf der A45 Richtung Lüdenscheid durch defekte Brücken ziehen die Aufmerksamkeit stetig auf den deutschen Brückenbestand [355]. Fehlender Nachwuchs im Berufstand des Bauingenieurs und ein jahrelang zu knapp bemessenes Budget für die Instandhaltung der deutschen Infrastruktur erschweren den Erhalt des deutschen Brückenbestands und somit den uneingeschränkten Güterverkehr [357]. [358][376]

„Die Prognose 2030 zeigt, dass unsere Infrastruktur vor einer Belastungsprobe steht. Wir müssen deshalb weiterhin kräftig in den Ausbau und die Modernisierung des Gesamtnetzes investieren [...].“ [43]

Bei dem Brückenbestand handelt es sich in Anlagevermögen ausgedrückt um 45 Milliarden € [160]. Somit ist der Erhalt der deutschen Brücken von höchster Priorität für die Mobilität Deutschlands und damit einhergehend einer wettbewerbsfähigen und wachstumsorientierten Wirtschaft. Straßenbrücken sind dabei von besonderer Bedeutung, da ca. 70 % der Gütertransporte über den Straßenweg erfolgen [194]. Es ist somit essentiell, einen genauen Kenntnisstand über den Zustand der Brücken zu haben, um Bundesinvestitionen gezielt anwenden zu können. [27]

Der Begriff der Bauwerksprüfung erlangte besonders in den letzten Jahren durch einen Anstieg des Verkehrs, steigender Lasten und steigendem Bauwerkalter immer mehr an Bedeutung [156]. Mit einem Halt des Anstiegs des Güterverkehrs ist laut einer Verkehrsprognose für 2030 nicht zu rechnen [324]. Die Transportleistung soll von 2010 bei den Straßenbrücken von 437,3 Milliarden tkm auf 607,4 Milliarden tkm im Jahr 2030 steigen, was einem Zuwachs von 38,9 % entspricht. Bei den Bahnbrücken wird ein Zuwachs von sogar 42,9 % erwartet [328]. Fuhren 1960 noch 25.000 Fahrzeuge pro Tag über eine Brücke, waren es im Jahr 2021 70.000 Vehikel pro Tag, was einem Anstieg von 280 % entspricht [165]. Die Hauptproblematik auf den Straßen ist jedoch nicht die Zunahme des Verkehrsaufkommens, sondern der steigende Anteil des Schwerlastverkehrs. Das zulässige Gesamtgewicht eines LKWs hat sich von 24 Tonnen im Jahr 1956 auf 44 Tonnen bis heute nahezu verdoppelt [347]. Es wird eine exponentielle Zunahme von Anträgen für genehmigungspflichtige Schwerlasttransporte beobachtet [54]. Neue Fahrzeugkonzepte für bspw. 60t-Lastkraftwagen werden diskutiert [54]. Immer

mehr Brückenbauwerke erreichen daher die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit und sind besonders bei der Bauwerkserhaltung zu berücksichtigen [183]. Zudem wurde ca. die Hälfte deutscher Brücken zwischen den 1960 und 80er Jahren gebaut [33][34][36]. Diese Brücke unterliegen folglich einer ungeplanten Nutzungsänderung, da bei den damaligen statischen Annahmen nicht die heutige Entwicklung absehbar war [54]. Es ist daher dringend eine Optimierung der Bauwerkserhaltung in Deutschland erforderlich, um die Brücken und damit die Infrastruktur möglichst wirtschaftlich und über einen langen Lebenszyklus erhalten zu können. Als Teil des Bauwerk-Management-Systems (BMS) bildet die Bauwerksprüfung die entscheidende Grundlage und Voraussetzung für eine zielgerichtete und langfristige Bauwerkserhaltung [183]. Eine sichere Analyse des Bauwerkszustands bildet das Fundament eines optimierten Ressourceneinsatzes, wofür eine Bauzustandsbewertung nach einheitlichen Kriterien unverzichtbar ist [156]. Sie bietet nicht nur Aussagen über den Sicherheitszustand eines Bauwerks, sondern ist ebenso maßgebend für erforderliche, durch den Bauherrn zu wählende Erhaltungsmaßnahmen. [41][44][48][160][183][347]

Die heutige, nach DIN 1076 [69] vorgeschriebene, regelmäßig durchzuführende (Straßen-) Brückenprüfung ist bei dem derzeitigen Brückenbestand daher überaus sinnvoll und die obigen Darlegungen machen ihre Notwendigkeit deutlich. Diese Regelung für regelmäßig durchzuführende Prüfungen gilt seit 1930 und hat seitdem sicherlich zum maßgeblichen Erhalt der deutschen Brückenbauwerke beigetragen [44]. Dennoch bergen die Vorgaben für die subjektiven und handnah durchgeführten Brückenprüfungen Problematiken in der Objektivität und somit der Vergleichbarkeit zwischen zwei Prüfungen derselben Brücke sowie zwischen verschiedenen Brückenbauwerken. Bei einer besagten handnahen Prüfung inspiziert ein speziell ausgebildeter Prüfer das Bauwerk handnah. Dabei wird jede Stelle einer Brücke genau auf optische Weise untersucht. Eine gefundene Schadstelle wird notiert, bestenfalls fotografiert und anschließend mittels der bundesweit seit 1998 zu verwendenden Software SIB-Bauwerke [387] katalogisiert und bewertet [153]. Dabei hat der Prüfer weder die Möglichkeit noch die Verpflichtung, die Verortung des Schadens exakt anzugeben. Diese kann nach Ermessen lediglich anhand von Anhaltspunkten wie Himmelsrichtungen, Fahrbahnsuren oder anderen örtlichen Gegebenheiten angegeben werden. Die Bewertung eines Schadens ist ebenfalls zum Teil von subjektiver Einschätzung. Die Regelwerke, DIN 1076 [69] sowie RIEBW-PRÜF [303], geben mögliche Einteilungen eines gefundenen Schadens vor, welche in den Kategorien S = Standsicherheit, V = Verkehrssicherheit sowie D = Dauerhaftigkeit bewertet werden. Der Prüfer hat dabei dennoch häufig die Möglichkeit bzw. die Verpflichtung der subjektiven und eigens ausgewählten Bewertung. [69][153][303]

Wird die nächste größere Prüfung, nach spätestens drei Jahren, von einem anderen Prüfer vorgenommen, ist nicht sichergestellt, dass dieser alle zuvor katalogisierten Schäden wiederfindet und zum anderen nach ähnlichen Maßstäben bewerten wird. Dieser Umstand ist problematisch, weil so jegliche objektive Vergleichbarkeit verloren geht. Eine Brücke, welche beispielsweise schlecht bewertet wurde, kann bei der folgenden Prüfung aufgrund anderer Einschätzungen den zuvor ausschlaggebenden Schaden anders bewerten oder gar nicht wiederfinden, sodass sich die Gesamtnote zum Teil drastisch verbessern kann. Diese Tatsache ist nicht nur durch die subjektive Prüfweise, sondern auch der abschließenden Berechnung der

Bauwerksbewertung verschuldet. Dieser verwendete Bewertungsalgorithmus schreibt nur dem jeweils schlimmsten Schaden alle Bedeutung für die Endnote zu. Wird dieser also bei einer Folgeprüfung nicht gefunden oder anders bewertet, ändert sich somit schlagartig die Gesamtbewertung eines Bauwerks und somit ggf. auch seine Gewichtung in der Instandhaltungspriorisierung des Bundes oder der Länder. Im schlimmsten Falle führt der nicht wiedergefundene Schaden zum Bauwerksversagen, obwohl das Bauwerk eine Endbewertung im unteren Mittelbereich erhalten hat.

Entsprechend der zuvor genannten Gründe, ist eine feste und klare Verortung eines gefundenen Schadens einer Brücke sowie einer Bewertung, welche mehr den Gesamtzustand als lediglich die gravierendsten Schäden betrachtet und daraus eine Gesamtnote erstellt, immens wichtig für alle zukünftigen Brücken- und Bauwerksprüfungen, bei denen eine objektive Vergleichbarkeit gegeben sein soll.

1.2 Zielsetzung

Aus den oben genannten Gründen soll in dieser Arbeit eine Methodik für eine objektivere Inspektion von stählernen, einfeldrigen (Balken-)Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte und anschließender Bewertung erarbeitet werden. Es sollen alternative optische Inspektionsverfahren, wie der Einsatz von auf Drohnen (Unmanned Aerial Systems, UAS) angebrachten Kameras, aufgezeigt und für den Einsatz zur Bauwerksinspektion analysiert werden. Dafür wird untersucht, wie gut das UAS an die Brücke bzw. die orthotrope Platte heranfliegen kann und ob die aufgenommene Bildqualität für eine anschließende Schadensauswertung ausreicht. Der Fokus wird auf Stahlbalkenbrücken mit orthotroper Platte gelegt, weil diese durch ihre spezielle geschweißte Konstruktionsweise zu häufigen und zum Teil maßgeblichen Schädigungen neigen [126]. Das aufgenommene Bildmaterial soll neben der Schadenserkenkung auch der Erzeugung einer Punktwolke der Brücke dienen. Diese wird voxelisiert und das aufgenommene Bildmaterial den jeweiligen Voxeln (= dreidimensionale Variante eines Pixels) fest zugeordnet. Nach dem aktuellen Stand der Technik erfolgt die Schadensdetektion auf dem Bildmaterial durch den Prüfsachverständigen. Eine automatisierte Schadenserkenkung ist für die Komplexität von Stahlschäden noch nicht ausgelegt, soll in Zukunft jedoch die Arbeit des Prüfpersonals durch eine Vordetektion von Unregelmäßigkeiten auf dem Bildmaterial erleichtern. Die hier erarbeitete Methodik ist für diesen zukünftigen Entwicklungsschritt der automatischen Schadenserkenkung mittels KI jedoch ausgelegt. Auf den Bildern erkannte Schäden sollen zum einen fest verortet und somit jederzeit wieder auffindbar sein und anschließend von einem Prüfsachverständigen bewertet werden. Dafür soll dem Prüfpersonal ein neuer Schadenskatalog zur Verfügung gestellt werden, welcher auf dem von UAS oder anderen technischen Hilfsmitteln aufgenommenen Bildmaterial und der Anwendung von Voxeln gründet. Er soll die optischen Stahlschäden fokussieren und mithilfe einer neuen Gliederung zu einer vereinfachten, zeitsparenden und zielführenden Anwendung verhelfen. Zudem soll der derzeit verwendete Bewertungsalgorithmus der RI-EBW-PRÜF [154][303] auf Schwachstellen hin untersucht werden. Mithilfe der Analyse diverserer anderer internationaler und nationaler Bewertungssysteme für Bauwerke wird ein alternatives Berechnungsverfahren für das Ergebnis einer Brückenprüfung erarbeitet, welches zudem auf den Einsatz von optischen und digitalen Hilfsmitteln ausgelegt sein soll.

Abb. 1.1 stellt die in dieser Arbeit zu entwickelnde Prüfmethodik dar. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse soll die konventionelle handnahe Brückenprüfung mit dem neu entwickelten UAS-unterstützten System vergleichen. Es soll ein Berechnungstool entstehen, mit welchem die Prüfkosten einer Brücke für beide Verfahren vorab errechnet werden können. So können Baulast- oder Entscheidungsträger bei der Frage unterstützt werden, ob eine UAS-Befliegung für eine vorliegende Stahlbrücke mit orthotroper Platte wirtschaftlich sinnvoll ist. [362]

Für dieses Ziel ist es zunächst notwendig, die Machbarkeit und Regelwerke von UAS zu untersuchen. Durch verpflichtende Sicherheitsabstände und die Abmessungen solcher Flugsysteme, welche Kameras tragen können, kann gegebenenfalls nicht jede Stelle einer konstruktiv komplexen Stahlbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte mit ausreichend guter Bildqualität aufgenommen werden. Dafür ist eine ausführliche grafische Analyse der Konstruktion notwendig. Das Ziel ist es, ein automatisches Berechnungstool zu erzeugen, in das die Grunddaten einer Stahlbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte eingegeben werden können. Als Ergebnis soll der prozentuale Anteil der Brücke errechnet werden, welcher mittels UAS befliegen werden kann und dabei Bildmaterial ausreichend guter Qualität erzeugt, um dieses für die weitere Schadensanalyse durch einen Prüflingenieur verwenden zu können.

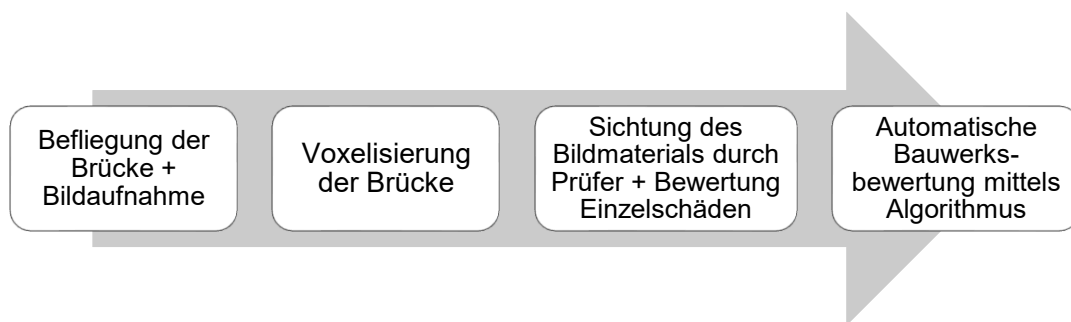


Abb. 1.1: Prinzip der zu entwickelnden Prüfmethodik

Für die Schadensanalyse (derzeit noch) durch den Prüflingenieur wird ein neuer Schadenskatalog entwickelt, welcher sich auf optische Schäden an stählernen Brücken spezialisiert. Durch die feste Verortung der Bilder an der Brücke mithilfe der Voxelisierung können Aufbau und Gliederung des Schadenskatalogs von Grund auf neu aufgebaut und ein präziser Katalog für optisches Bildmaterial erarbeitet werden.

Schäden, welche der Prüflingenieur durch seine anschließende Durchsicht des Bildmaterials findet, sollen bewertet werden und ggf. zu einer gesamtheitlichen Aussage über den Bauwerkszustand führen. Ob Einzelnote und/oder eine Gesamtnote für den Bauwerkszustand und eine anschließende objektive Vergleichbarkeit für Baulast- oder Entscheidungsträger am sinnvollsten sind, soll untersucht werden. Die Erkenntnisse sollen die Grundlage für einen neu erarbeiteten Bewertungsalgorithmus bilden. Das neue Bewertungsverfahren gründet außerdem auf der Voxelisierung der Punktwolke der zu untersuchenden Brücke. Das heißt, die mittels Befliegung erzeugten Bauwerksbilder werden dem Bauwerk entsprechend fest zugeordnet, sodass definierte Schäden in Zukunft nicht mehr übersehen werden können. Der Bewertungsalgorithmus soll diese Neuerung aufnehmen und gleichzeitig für eine feinere Bewertung und

damit besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Bauwerke sorgen. Es ist außerdem zu prüfen, ob mehr als ein Endergebnis für eine bessere Instandsetzungsplanung sinnvoll ist.

Im letzten Schritt sollen die handnahe und UAS-unterstützte Brückenprüfung monetär erchenbar gemacht werden. Die einzelnen Arbeitsschritte werden aufgelistet und analysiert, um diese mithilfe von Erfahrungs- und Literaturwerten und neuen Berechnungsmethoden zu einem Gesamtwert zu vereinen. Dadurch soll dem Baulast- oder Entscheidungsträger geholfen werden, ob die UAS-Unterstützung bei einer vorliegenden Brücke sinnvoll ist. Besonders zu beachten sind dabei die Straßensperrung bzw. Verkehrsbehinderung durch konventionelle Brückenprüfungen, welche durch das UAS reduziert werden können und ebenfalls zur Entscheidungsfindung beitragen sollen.

So soll diese Arbeit einen Beitrag zur Verbesserung des Brückenbestands in Deutschland leisten, indem das Bewertungsverfahren zwar weiterhin auf optische Weise, jedoch objektiver, vergleichbarer und durch technische Unterstützung stattfindet. Eine Instandhaltungsstrategie kann somit sicherer vollzogen und stark defekte Brücken klar priorisiert werden.

Die vorliegende Dissertation baut auf den Forschungsarbeiten des IGF-Vorhabens ‚InÜDosS‘ (Inspektion, Überwachung und Dokumentation von stahlbaulichen Strukturen) auf [140].

1.3 Aufbau der Arbeit

Um die Zielsetzung aus Kapitel 1.2 zu erreichen, wird in Kapitel 2 zunächst der Stand der Technik bezüglich der zu entwickelnden Methodik beleuchtet. Dafür werden Brückenprüfverfahren und -richtlinien für Straßen-, Bahn- und Kanalbrücken beleuchtet. Die Bauweise der orthotropen Fahrbahnplatte wird allgemeingültig erklärt und anschließend ein Überblick über häufig auftretende Schäden an stählernen Bauteilen gegeben. Außerdem wird die Bau- und Funktionsweise von Unmanned Aerial Systems (UAS, Drohnen) erklärt und die gültigen Regelwerke in Deutschland und Europa betrachtet. Anschließend werden kurz Grundbegriffe der Fotografie undameratechnik erklärt als Basis für die optische Analyse der Flugbereiche in Kapitel 3. Es wird ein Überblick über bereits verwendete Verfahren zur optischen oder automatischen Schadenserkenkung gegeben und darauf aufbauend der Forschungsbedarf für diese Arbeit erörtert. Abb. 1.2 zeigt eine übersichtliche Darstellung des allgemeinen Aufbaus der vorliegenden Arbeit.

Kapitel 3 beschreibt die Untersuchung flugtauglicher Bereiche einer stählernen Brücke mit orthotroper Fahrbahnplatte mittels UAS. Dafür wird zunächst eine Bauwerksanalyse durchgeführt, um die essentiellsten Stellen der betrachteten Brückenbauweise zu erarbeiten. Anschließend wird mithilfe von grafischen Analysen die orthotrope Platte allgemeingültig untersucht und diese Ergebnisse in einem Auswertetool zusammengeführt.

Das darauffolgende Kapitel 4 nutzt das Wissen aus Kapitel 3, um einen Schadenskatalog zu entwickeln, welcher sich nur auf die optisch erkennbaren Schädigungen an stählernen Bauteilen bezieht. Dafür werden Prüfberichte aus der Praxis [290] hinsichtlich der wichtigsten Schädigungen und deren Auftrittsort und -wahrscheinlichkeit analysiert. Außerdem weist dieser Katalog eine schadensbasierte Sortierung auf, da die Schadensverortung über die Voxelisierung

der Brücke funktioniert. Der Schadenskatalog aus diesem Kapitel funktioniert allgemeingültig und ist nicht von einer UAS-Befliegung abhängig. Es ist an dieser Stelle irrelevant, auf welche Weise das Bildmaterial der Brücke (ggf. in Zukunft) erzeugt wird.

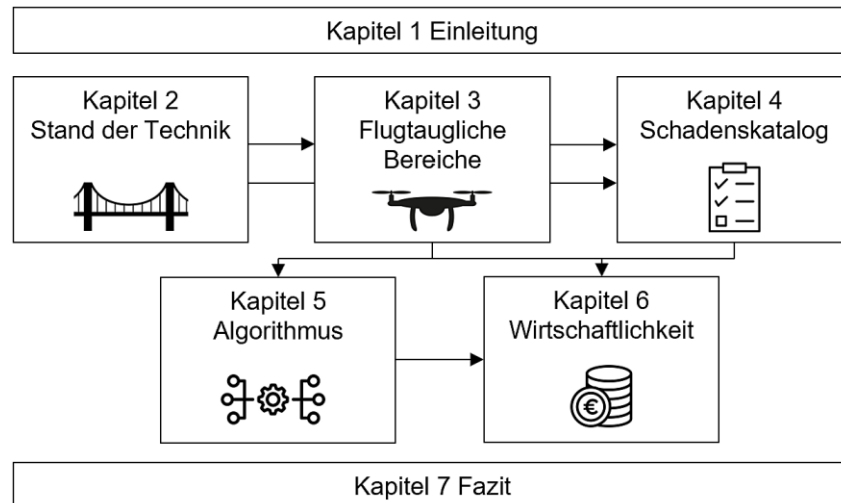


Abb. 1.2: Aufbau der Arbeit

Die Analyse der flugtauglichen Bereiche aus Kapitel 3 sowie dem neuen Schadenskatalog aus Kapitel 4 bilden die Grundlage für den zu entwickelnden Bewertungsalgorithmus in Kapitel 5. Es werden nationale und internationale Bewertungsverfahren analysiert, um die Essenz dieser Analyse in den neuen Algorithmus zu integrieren. Mit diesem Wissen und dem Schadenskatalog wird ein Bewertungsalgorithmus auf Basis der voxelisierten Brücke entwickelt. Der Algorithmus wird ebenfalls allgemeingültig entwickelt und ist nicht von UAS-erzeugtem Bildmaterial abhängig.

Anschließend wird in Kapitel 6 ein Wirtschaftlichkeitsvergleich durchgeführt. Es sollen das konventionelle sowie das neu entwickelte Bewertungsverfahren mit ihren einzelnen Arbeitsschritten und Auswirkungen auf den Straßenverkehr monetär bewertet und verglichen werden können. Am Ende wird auch hier ein Berechnungstool entwickelt, in das Brücken eingegeben werden können und die Kosten für die beiden Inspektionsverfahren das Ergebnis sind.

Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und gibt gleichzeitig einen Ausblick auf weiteren Forschungs- bzw. Entwicklungsbedarf für die Anwendung von UAS bzw. die Unterstützung optischer Hilfsmittel bei der Prüfung von stählernen Brücken mit orthotropen Platten.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik für die Entwicklung eines UAS-unterstützten Prüf- und Bewertungssystems an stählernen (Balken-)Brücken mittlerer Spannweite mit orthotroper Fahrbahnplatte untersucht. Dafür wird zunächst ein Überblick über die aktuell durchgeführte Bauwerksprüfung von Straßen- und Bahnbrücken sowie Brücken an Wasserstraßen hinsichtlich ihrer Regelwerke gegeben. Außerdem werden UAS-Systeme erklärt und derzeit gültige Regularien für den Drohnenflug in Deutschland beleuchtet. Außerdem werden das besondere Tragprinzip orthotroper Fahrbahnplatten und typische Schäden an Stahlbrücken beschrieben. Es werden Grundlagen zurameratechnik erläutert, welche hier für die UAS-Befliegung zum Einsatz kommen soll, und das Prinzip der Voxelisierung von digitalen Modellen bzw. Punktwolken erklärt. Abschließend werden der Entwicklungsbedarf und Ziele der Arbeit beschrieben.

2.1 Bauwerksprüfung

2.1.1 Konventionelle Prüfung, Richtlinien und Bewertung von Ingenieurbauwerken bei Straßenbrücken

Verantwortlichkeit

Straßenbrücken fallen unter die allgemeinen Vorschriften des Straßenrechts. Dieses fügt sich aus dem Straßen- und Wegegesetz des jeweiligen Bundeslandes, hier des Landes Nordrhein-Westfalens (StrWG NRW) [356], sowie dem Bundesfernstraßengesetz (FStrG) [131] zusammen. So werden in §9, Absatz 1 des StrWG NRW und dem §3, Absatz 1 des FStrG die zugehörigen Aufgaben für die Verantwortung der sogenannten Straßenbaulast definiert:

„Die Straßenbaulast umfasst alle mit dem Bau und der Unterhaltung zusammenhängenden Aufgaben. Die Träger der Straßenbaulast haben nach ihrer Leistungsfähigkeit die Straßen in einem dem regelmäßigen Verkehrsbedürfnis genügenden Zustand zu bauen, um- und auszubauen, zu erweitern oder sonst zu verbessern sowie zu unterhalten.“ (StrWG, § 9, Abs. 1) [356] *„Die Straßen sind so herzustellen und zu unterhalten, dass sie den Erfordernissen der Sicherheit und Ordnung genügen.“* (StrWG, § 9a, Abs. 2) [356]

Grundsätzlich ist der Bund der Baulastträger aller Fernstraßen, kann diese Verantwortung jedoch nach §85 bzw. §90 des Grundgesetzes an die Länder übertragen. Diese sind folglich für den Bau, die Unterhaltung sowie der Instandsetzung aller Straßen und Brücken verantwortlich [44]. In Deutschland läuft die Verantwortlichkeit für die Straßenbrückenbauten bei der BAST, der Bundesanstalt für Straßenwesen zusammen. [45][185][316]

Definition Bauwerksprüfung

Bauwerksprüfung und -überwachung dienen der Zustandsermittlung eines Bauwerks und bilden somit den Ausgangspunkt für Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen [105]. Eine Bauwerksprüfung findet regelmäßig statt und dient der Ermittlung des Ist-Zustands, während die Bauwerksüberwachung einer frühzeitigen Erkennung Schäden dient. Ihr Ziel ist es, sowohl

die Sicherheit eines Bauwerks hinsichtlich der Tragsicherheit als auch die wirtschaftliche Betrachtung und Bewertung [103]. Es wird unterschieden zwischen Einfachen Prüfungen und Hauptprüfungen. Ein Mangel gilt hierbei als „*Abweichung der Bauwerks- oder Bauteilausbildung vom planmäßigen Sollzustand oder von den zum Prüfzeitpunkt geltenden Regelwerken*“ ([303], S. 6), der Beeinträchtigungen der Stand-, Verkehrssicherheit sowie der Dauerhaftigkeit bewirken kann, wohingegen eine Zustandsveränderung als Schaden definiert wird [104][303]. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zur Vereinfachung der Begriff des Schadens verwendet. Die Bauwerksprüfung dient folglich nicht nur der bloßen Zustandsermittlung, sondern fungiert ebenfalls als Einschätzung des wirtschaftlichen Werts für den Bauherrn bzw. Bauträger. So können auf dieser Grundlage kurz- und langfristige Instandhaltungen erarbeitet werden [156]. Bauwerksüberwachungen teilen sich auf in Besichtigungen und laufende Beobachtungen. Überwacht werden auch Bauwerke, die nicht geprüft werden müssen. Bauteile, die unter normalen Umständen nicht zugänglich sind, wie zum Beispiel die Bauteile, die unter dem Fahrbahnbelag liegen, sind zu prüfen, wenn sich die Gelegenheit dazu ergibt. Solche besonderen Gelegenheiten ergeben sich unter Umständen im Rahmen von Bauarbeiten. Die Prüfung dieser Bauteile erfolgt außerhalb der regelmäßigen Prüfungen und Überwachungen. [44][69][256][303][316]

Übersicht geltender Regelwerke

Maßgebend für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen ist die derzeit gültige Ausgabe aus 1999 der ‚DIN 1076-Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen-Überwachung und Prüfung‘ [69]. Diese Norm wurde erstmals 1930 als ‚Richtlinie für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken‘ veröffentlicht. Die aktuelle Fassung von 1999 regelt, welche Bauwerke mit welchem Aufwand, welcher Qualifikation des Prüfpersonals und wie zu prüfen sind. Die Norm befasst sich nicht nur mit Brücken, sondern auch mit anderen Ingenieurbauwerken. Darunter fallen Verkehrszeichenbrücken, Tunnel, Trogbauwerke, Stützbauwerke, Lärmschutzbauwerke und sonstige Ingenieurbauwerke. Für all diese Bauwerke gelten die gleichen Regelungen bezüglich Überwachung und Prüfung. Im Rahmen dieser Arbeit sollen jedoch nur die Prüfung und Überwachung von Brücken von Belang sein [69]. DIN 1076 [69] regelt Inhalte, Umfänge und Zeitintervalle, in denen Brücken geprüft werden müssen, und wird ergänzt durch die ‚Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauten‘ (RI-ERH-ING) [304]. In ihr ist die ‚Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)‘ [303] enthalten. Diese gibt Anhaltspunkte zur Beschreibung und Bewertung von Schäden mit einem allgemeingültigen Schadenskatalog [300], in dem Beispiele von Schäden mit Bewertungen und Bewertungsvorschlägen enthalten sind, sowie die algorithmische Berechnung einer Gesamtnote des inspizierten Bauwerks [300][303]. Die Schäden werden nach Bauwerksart, z. B. Brücke oder Tunnel, und Hauptbauteil, z. B. Überbau oder Unterbau, Lager oder Fahrbahnübergang sortiert aufgelistet. Jedem Schadensbeispiel wird eine Nummer (BSP-ID) zugewiesen. Der Schadenskatalog gibt zu jedem existierenden Schadensbeispiel eine Bewertung zu den drei Sicherheitskategorien gemäß RI-ERH-ING [304] Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit vor (siehe Abb. 2.1) [300]. So sollen Bauwerke hinsichtlich ihrer

Stand sicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) sowie ihrer Dauerhaftigkeit (D) überprüft werden, um damit den Ist-Zustand jeder Brücke Deutschlands regelmäßig zu erfassen. [44][185][253]

RI-EBW-PRÜF 2017		Schadensbeispiele - Stand SIB-Bauwerke 1.93				
BSP_ID	Bauwerksart, Hauptbauteil / Konstruktionsteil / Bauteilergänzung oder Hauptbaustoff / Schaden	S-V-D-Bereich	S	V	D	BEMERKUNG
001-00	BRÜCKEN, ÜBERBAU / * / * / * (weitere BSP durch Angabe des Baustoffs, Schadens)		S	V	D	
001-01	Graffiti an Sichtflächen		0	0	0	
001-02	Optische Veränderung durch Bewitterung		0	0	0	
001-04	Bauwerksuntersicht verunst		0	0	1	
001-05	Verschmutzung/Schalungsreste/ Packer/ Verdämmung o.ä		0	0	1	
001-06	Vogelkot o.ä.		0	2	2	

Abb. 2.1: Auszug aus Schadenskatalog der RI-EBW-PRÜF 2017 [300]

Der Begriff Standsicherheit (S) wird definiert als die Eigenschaft eines Bauwerks oder Bauteils, Lasten aus der planmäßigen Beanspruchung schadlos aufnehmen zu können. Voraussetzungen dafür sind ein planmäßiger Zustand des Bauteils und eine entsprechende Qualität der Baustoffe, aber auch Bauteilabmessungen und Beschilderungen, die den Vorgaben entsprechen. Außerdem müssen die tatsächlichen Beanspruchungen mit denen aus der Bemessung übereinstimmen. Die Verkehrssicherheit (V) betrifft sowohl Personen und Fahrzeuge im Verkehr als auch Personen und Sachen im Umfeld des Bauwerks. Sie ist gegeben, wenn die Nutzung des Bauwerks ohne Gefährdung möglich ist. Wenn eine Gefährdung besteht, der Nutzer diese aber früh genug erkennen kann oder eine entsprechende Beschilderung vorhanden ist, ist die Verkehrssicherheit allerdings auch erfüllt. Die Dauerhaftigkeit (D) betrifft die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks oder Bauteils. Sie ist gegeben, wenn der aktuelle Zustand des Bauwerks oder Bauteils voraussichtlich eine uneingeschränkte Nutzung des Bauwerks für die vorhergesehene Dauer zulässt, ohne dass Instandsetzungen oder Erneuerungen notwendig sind. [1][303][334]

Etwaige Schäden sollen frühzeitig erkannt und Gefahren für die Tragsicherheit und folglich für das Volk als Nutzer abgewendet/abgewehrt werden [69]. DIN 1076 [69] hat, als ‚Allgemein anerkannte Regel der Technik‘, zudem rechtlich bindende Wirkung und ihre Vorgaben sind somit einzuhalten [44][69]. Kann die Schadensursache oder das Schadensausmaß nicht festgestellt werden, ist eine ‚Objektbezogene Schadensanalyse‘ (OSA) nach RI-ERH-ING durchzuführen. Diese schlägt „Verfahren zur Erfassung, Auswertung und Bewertung von Schäden, die zusätzliche Untersuchungen erfordern [...]“ ([281], S.6) vor. Hier handelt es sich um eine Ergänzung zum zuvor genannten Schadenskatalog mit seinen Schadensbeispielen und Bewertungen, welcher zentral von der BASt verwaltet, aktualisiert und ausgegeben wird (siehe Abb. 2.1) [300]. Zudem wird in der RI-EBW-PRÜF auf die sogenannte ABS-ING, der ‚Anweisung Straßeninformationsbank Teilsystem Bauwerksdaten‘ und die ‚Zusätzliche[n] Technische[n] Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten‘ (ZTV-ING) [10] verwiesen. Eine Brückenbauwerkserhaltung erfordert somit die Bauwerksdaten nach ASB-ING [10], während die ZTV-ING Informationen über weitere Vertragsbedingungen enthält [392]. Die ‚Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzung-

/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ) [306] betrachtet den wirtschaftlichen Aspekt von Bauwerkserhaltungen und ist für die weitere Betrachtung in dieser Arbeit nicht von Bedeutung (siehe Abb. 2.2) [306]. [253]

Insgesamt dienen die vielen Richtlinien und Vorgaben der genauen und detaillierten Datensammlung über den Brückenbestand für eine zielführende Bestandsverwaltung und Instandsetzungsplanung.

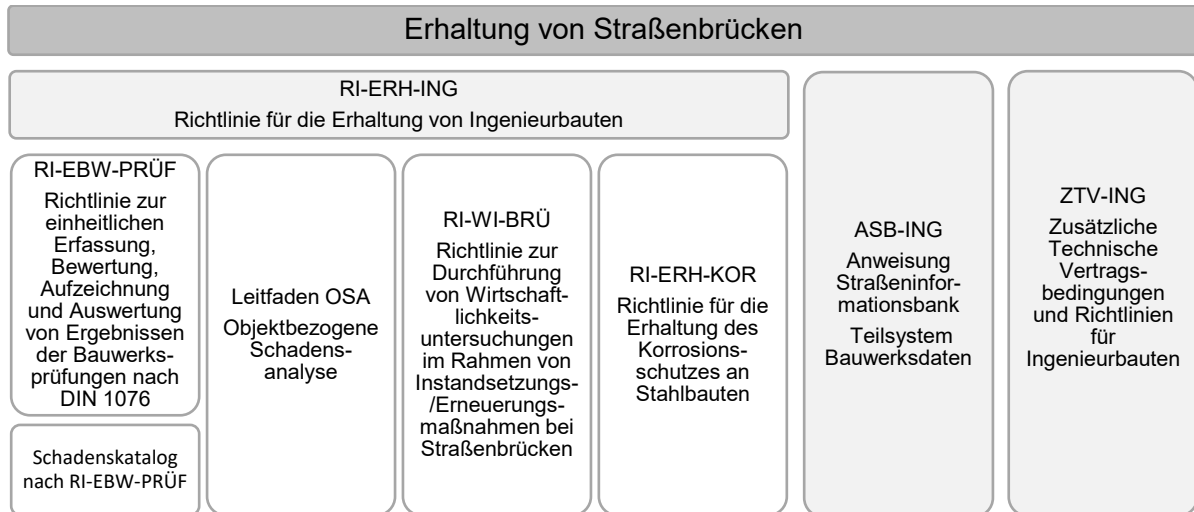


Abb. 2.2: Übersicht der Regelwerke zur Bauwerkserhaltung von Straßenbrücken [37]

Übersicht der Prüfungsformen

Die für optischen Bauwerksprüfungen maßgebendsten Richtlinien sind die DIN 1076 [69] und mit dieser immer einhergehend die bereits genannte ‚Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)‘ [303]. Die DIN 1076-‚Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen-Überwachung und Prüfung‘-wurde im November 1999 vom Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. herausgegeben und beschäftigt sich mit der *„Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit“* ([69], S. 2). Die erste Version der DIN 1076 wurde im August 1930 unter dem Titel *„Richtlinien für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken“* veröffentlicht [70]. Zusätzlich zu dieser Norm gab es ab Juni 1933 die DIN 1077-‚Richtlinien für die Überwachung und Prüfung massiver Straßenbrücken‘ [71]. Im Dezember 1959 wurden diese Richtlinien zu einer gemeinsamen Norm, der DIN 1076, zusammengefasst und im März 1983 durch eine aktuellere Version ersetzt, die bis zur Veröffentlichung der jetzigen DIN 1076 gültig war [67][68]. Laut Definition der DIN 1076 sind Brücken *„Überführungen eines Verkehrsweges über einen anderen Verkehrsweg, über ein Gewässer oder tiefer liegendes Gelände, wenn ihre lichte Weite rechtwinklig zwischen den Widerlagern gemessen 2,00 m oder mehr beträgt.“* ([69], S. 2) Es wird normativ unterschieden zwischen Bauwerksprüfungen und Bauwerksüberwachungen. Bauwerksprüfungen werden unterteilt in Hauptprüfungen (H), Einfache Prüfungen (E), Prüfungen aus be-

sonderem Anlass (S) und Prüfungen nach besonderen Vorschriften. Die Überwachungen werden unterteilt in Besichtigung (B) und laufende Überwachung (LB). Hauptprüfungen (H) müssen alle sechs Jahre durchgeführt werden, die erste schon vor Abnahme des Bauwerks und die zweite vor Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung. Gegenstand der Hauptprüfung „sind alle, auch die schwer zugänglichen Bauwerksteile, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Besichtigungseinrichtungen, Rüstungen und ähnlichem“ ([69], S. 3). [69]

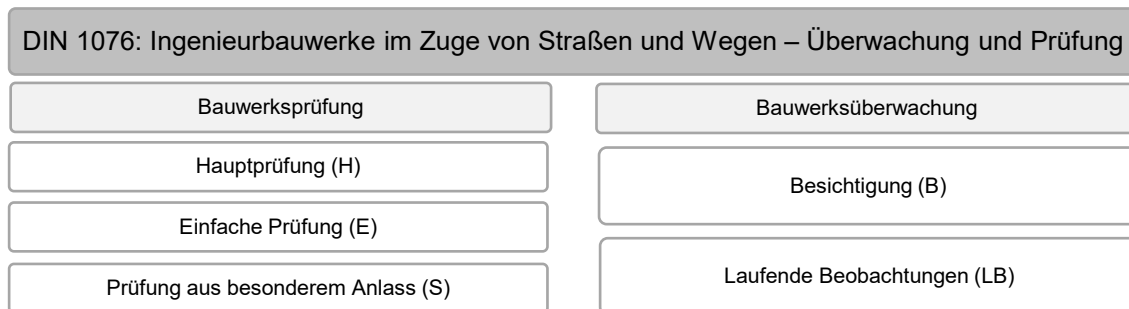


Abb. 2.3: Differenzierung Bauwerksprüfung und Bauwerksüberwachung nach DIN 1076 (nach [69])

Auch versteckte Schäden sollen aufgedeckt werden, daher gehören Abdeckungen von Bauteilen entfernt und die Bauteile vor der Prüfung gereinigt. Neben dem eigentlichen Bauwerk müssen auch Besichtigungseinrichtungen wie Treppen oder Podeste kontrolliert werden. Bei der Hauptprüfung (H) handelt es sich um die umfangreichste und genaueste aller Überprüfungen der Brücken, welche die DIN 1076 [69] insgesamt vorschreibt, bei der auf jeden Fall auf technische Hilfsmittel und Besichtigungseinrichtungen für eine genaue optische Kontrolle zurückgegriffen werden muss. Mit dieser Bauwerksprüfung ist laut Norm „ein sachkundiger Ingenieur zu betrauen, der auch die statischen und konstruktiven Verhältnisse der Bauwerke beurteilen kann“ ([69], S. 3). Um die Qualifikation von Ingenieuren zu garantieren, wurde 2008 der „Verein zur Förderung der Qualitätssicherung und Zertifizierung der Aus- und Fortbildung von Ingenieurinnen/Ingenieuren der Bauwerksprüfung e.V. (VFIB)“ gegründet. Der VFIB bietet Lehrgänge für die Grund- und Weiterbildung von Prüfindingenieuren an, die mit einer Prüfung abschließen und durch ein entsprechendes Zertifikat bestätigt werden [371]. Die Ingenieure müssen neben der Teilnahme am Lehrgang und Kenntnissen im Umgang mit der Dokumentations- und Bewertungssoftware „SIB-Bauwerke“ sowohl ein abgeschlossenes Studium des Bauingenieurwesens als auch fünf Jahre Berufserfahrung im konstruktiven Ingenieurbau vorweisen können. Davon müssen mindestens zwei Jahre im Brückenbau und/oder in der Mitarbeit bei der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 absolviert worden sein. [69][371]

Die Einfache Prüfung (E) ist ebenfalls alle sechs Jahre, immer drei Jahre nach der letzten Hauptprüfung, von einem zuvor erörterten Prüfindingenieur durchzuführen. Sie kann ohne Besichtigungseinrichtungen vorgenommen werden, trotzdem soll die Brücke gründlich visuell geprüft werden. Bei dieser Prüfung sollen auch Funktionsbauteile wie Lager oder Fahrbahnübergangskonstruktionen sowie die Verankerungen z. B. von Leitungen und Schutzeinrichtungen wie Geländern oder Lärmschutzwänden untersucht werden. Außerdem müssen bei der letzten Prüfung festgestellte Schäden geprüft werden. Für den Fall, dass bei der Einfachen Prüfung

(E) schwerwiegende Schäden oder starke Veränderungen im Vergleich zum letzten Prüfbericht erkannt werden, muss die Prüfung auf den Umfang einer Hauptprüfung erweitert werden. [69]

Kommt es zu außergewöhnlichen Ereignissen, die den Zustand einer Brücke beeinflussen zum Beispiel Unfälle, Hochwasser oder Unwetter, ist eine Sonderprüfung (S) durchzuführen. Je nach Anlass der Prüfung müssen dabei unterschiedliche Kontrollen vorgenommen werden, die sich aus den möglichen Schäden ergeben. Eine solche Prüfung aus besonderem Anlass (S) ersetzt keine Haupt- oder Einfache Prüfung. Es ergibt sich daher insgesamt eine handnahe, sehr genaue, optische Beurteilung aller Bauwerksteile im von sechs Jahren bei einer Hauptprüfung (H), eine erweiterte Sichtprüfung um drei Jahre versetzt bei einer Einfachen Prüfung (E) und die Möglichkeit von Sonderprüfungen bei außergewöhnlichen Anlässen (S). [69]

Die Bauwerksüberwachung lässt sich hingegen in Besichtigungen (B) und laufende Beobachtungen (LB) gliedern. Besichtigungen (B) von Brücken haben nach DIN 1076 [69] einmal jährlich, außer in den Jahren, in denen eine Haupt- oder Einfache Prüfung stattfindet, zu erfolgen. Das Bauwerk wird dabei *„ohne größere Hilfsmittel wie Besichtigungsfahrzeuge, Rüstung usw., aber unter Benutzung von am Bauwerk vorhandenen Besichtigungseinrichtungen, von begehbaren Hohlräumen des Bauwerks, von der Verkehrsebene und dem Geländeniveau, soweit zugänglich, auf offensichtliche Mängel oder Schäden hin“* ([69], S. 5) untersucht. Grundsätzlich sind hier vor allem erhebliche optische Schäden zu dokumentieren, welche von der Verkehrsebene oder dem Gelände ersichtlich sind [69][303]. Laufende Beobachtungen (LB) werden während der Streckenkontrollen zur Überwachung der Verkehrssicherheit durch die Straßenbetriebe durchgeführt. Streckenkontrollen erfolgen im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung VwV-StVO, die der gefahrlosen Verkehrsteilnahme dient [28]. Dabei sind die Brücken zweimal im Jahr ohne Hilfsmittel von der Verkehrsebene aus zu ‚beobachten‘. Nur die erheblichen und eventuell die Stand- und Verkehrssicherheit beeinflussenden Schäden sollen dabei dokumentiert werden. [69]

Durchführung und Dokumentation der Prüfungen

Zu der zwingend benötigten Ausstattung gehört eine Kamera oder ein Handy, womit Fotos von den einzelnen Schäden gemacht werden können. Auch ein Fernglas sowie eine Lupe sind erforderlich, um Schäden besser erkennen zu können. Ansonsten sind einfache Werkzeuge wie Hämmer und Schlüssel, Schraubendreher, Akkuschrauber, Bohrer und Zangen sowie Zollstock, Bandmaß, Wasserwaage und Lot notwendig. Zusätzlich gehören Kreide oder ein anderes Markierungsmaterial sowie Schaufel und Spaten zur Grundausstattung. Auch Geräte für einfache Prüfverfahren wie Rückprallhammer für die Bewertung der Betonqualität, Betondeckungsmessgerät, Endoskop, Ultraschallmessgerät sowie Materialien für einfache chemische Prüfverfahren wie Farbeindringverfahren zur Lokalisierung von Rissen im Stahl oder Indikatorflüssigkeit zur Messung der Karbonatisierungstiefe gehören zur Grundausrüstung [44]. Zudem wird in der RE-ING (Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung

von Ingenieurbauten) Teil 2, Abschnitt 3 vorgegeben, welche Besichtigungseinrichtungen bei dem Neubau von Brücken errichtet werden müssen. [256][316][374]



Abb. 2.4: Brückenhauptprüfungen (H) mit Hilfsmitteln wie Hub- (l. [257] u r. [277]) und Teleskopsteiger (l.) bzw. stationärem Besichtigungswagen (m. [250])

Brücken sollen „*jederzeit einfach, sicher, handnah und wirtschaftlich*“ ([297], S. 3) geprüft werden können. In der Richtlinie ist festgelegt, welche Voraussetzungen eine neu erbaute Brücke erfüllen muss, damit eine Prüfung nach DIN 1076 [69] möglich ist. Dazu gehören ausreichende Zufahrts- und Zugangswege, eine entsprechende bauliche Durchbildung der Brücke mit ausreichenden Lichträumen, Zugängen und Durchstiegen zu Hohlräumen sowie das Vorhandensein weiterer Einrichtungen. Diese werden unterschieden in ortsfeste Einrichtungen wie z. B. Laufstege, Treppen und Steigleitern und ortsveränderliche Einrichtungen wie Besichtigungsfahrzeuge, Hubbühnen, Unterflurbühnen, Hängegerüste usw. (siehe Abb. Abb. 2.4) [297]. Für stationäre Einrichtungen (Besichtigungswagen) ist festgelegt, dass diese vorhanden sein müssen, „*wenn Brückenflächen nur mit unverhältnismäßig hohem Rüst- und Zeitaufwand erreichbar sind oder der Einsatz von ortsveränderlichen Besichtigungsgeräten nicht möglich, mit unvermeidbaren Verkehrsbeschränkungen verbunden oder unwirtschaftlich ist*“ ([297], S. 7). [19][210][297]

Zuhilfenahme dieser genannten Werkzeuge, ist jedes Brückenbauwerk nach DIN 1076 [69] so genau wie möglich zu überprüfen. Eine Prüfung ist jedoch auch stets als zerstörungsfreie Prüfung zu verstehen [237][381]. Ist ein Schaden gefunden, wird dieser dokumentiert. Im Optimalfall wird vom Prüfenieur ein Foto von dem Schaden aufgenommen und es wird so genau wie möglich notiert, wo am Bauwerk, global als auch lokal betrachtet, sich der gefundene Schaden findet. Auch eine Einschätzung des Schweregrades des Schadens sollte direkt vor Ort vorgenommen werden. Nach RI-EBW-PRÜF [303] hat für jeden einzelnen Schaden getrennt eine Bewertung für jedes der drei zuvor genannten Kriterien Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) zu erfolgen. Die Bewertung wird grundsätzlich, außer in begründeten Einzelfällen, aus dem ebenfalls oben genannten Schadenskatalog der Bundesanstalt für Straßenwesen übernommen (siehe Abb. 2.1) [300]. Dafür wird der zu bewertende Schaden so genau wie möglich einem der dort definierten sogenannten ‚Schadensbeispiele‘ und dessen Bewertung zugeordnet. Die Bewertung erfolgt in den Schadensstufen 0 bis 4, wobei generell zwischen gegebener und nicht gegebener Sicherheit unterschieden wird.

Als Anhaltspunkte dienen generell Beschreibungen nicht gegebener Sicherheit. Die Standsicherheit ist nicht gegeben bei mangelnder Tragfähigkeit und daraus resultierender Nutzungsbeschränkung. Die Verkehrssicherheit fehlt, wenn Gefahrenstellen für den Verkehrsteilnehmer nicht als solche gekennzeichnet werden. Die Dauerhaftigkeit ist nicht mehr gegeben, wenn die planmäßige Nutzungsdauer unter der zu erwartenden Nutzung nicht erzielt werden kann. Eine klare Definition der einzelnen Stufen in den jeweiligen Kategorien nach der Richtlinie ist Tab. 9.4 und Tab. 9.5 zu entnehmen. Teilweise sind keine exakten Werte für alle drei Bewertungen (S-V-D) vorgegeben. In dem Fall trifft der Prüfer eine subjektive Entscheidung über den Schaden je nach Ausmaß und persönlicher Erfahrung. Zum Teil sind in der Spalte „S-V-D-Bereich“ dafür Richtwerte angegeben, wie z. B. „D = 1–2“, aus denen der Prüfer auswählen kann. [80][300][303]

Im Anschluss an die Bauwerksprüfung vor Ort, welche zum Teil einige Tage bis Wochen je nach Größe der Brücke dauern kann, müssen die gefundenen Schäden in die bundesweit und von der RI-EBW-PRÜF [303] vorgeschriebene Software und Datenbank ‚SIB-Bauwerke‘ eingegeben werden [387]. Bis 1998 waren die Bauwerksdaten in der ‚Anweisung Straßendatenbank, Teil BII‘, Ausgabe 1979 (ASB 79) festgelegt [153]. Die steigende Datenmenge und technische Entwicklung begründete jedoch die notwendige Überarbeitung und Entwicklung eines einheitlichen Programmsystems (SIB-Bauwerke), was den Straßenbauverwaltungen bei der Erfassung und Auswertung der Bauwerksdaten helfen sollte [388]. SIB-Bauwerke, heute in Version 1.7, wird verwendet, um die bei der Brückenprüfung festgestellten Schäden zu dokumentieren und zu bewerten. Zu jeder erfassten Brücke existiert ein Übersichtsblatt mit allen wichtigen Informationen wie Art, Baujahr, Maße und der aktuellen Zustandsnote. Auch Bilder, Pläne sowie Informationen zu bereits durchgeführten Baumaßnahmen und Statiken können hinzugefügt werden [389]. Es wird jeder Schaden einzeln in das System eingegeben und somit einem der Schadensbeispiele des Schadenskatalogs zugeordnet. Den vorhandenen Schäden einer Brücke werden dabei vom System eindeutige Nummern zugewiesen, d. h. jede Nummer wird nur einmal vergeben. Auch muss der Umfang eines Schadens ausgewählt werden. Dafür gibt es eine Liste von Worten, welche eine Mengenzahl bzw. ein Aufkommen in seiner Quantität beschreiben und differenzieren. Die Material- oder Ortsangabe zum Schaden kann frei eingegeben werden. Dazu gibt es keine Vorgaben oder obligatorische Eingaben in der Software. Die generelle Eingabestruktur eines Schadens wird durch die Anweisung Straßeninformationsbank (ASB-ING) [10] vorgegeben: Bauwerksart bzw. Hauptbauteil-Konstruktionsbauteilergänzung-Schaden [300][303][387]. Insgesamt wird die Brücke von SIB-Bauwerke in insgesamt 14 sogenannte Bauteilgruppen (Überbau, Unterbau, Bauwerk, Vorspannung, Gründung, Erd- und Felsanker, Brückenseile, Lager, Fahrbahnübergang, Abdichtung, Beläge, Kappen, Schutz Einrichtung und Sonstige) unterteilt. [10][153][300][303][387][389]

Die Angabe von bewerteten Einzelschäden bildet die Grundlage zur Bewertung des Zustandes des Gesamtbauwerks mittels einer Zustandsnote von 1,0 bis 4,0, welche durch Auswertung der einzelnen Schadensbewertungen mit einem Zustandsalgorithmus nach Haardt ermittelt wird, worauf im Weiteren genauer eingegangen wird [154]. Die Note berücksichtigt die Schadensauswirkungen in den genannten Kategorien unter Einbezug des Schadensumfangs bzw. der Schadensanzahl. Die zugehörigen Definitionen der Noten können Tab. 9.1 entnommen

werden [303]. Die Ergebnisse der Brückenprüfung werden nach der Eingabe in SIB-Bauwerke und der automatischen Bewertung in Form eines Prüfberichts dokumentiert. Auf dem Deckblatt des Prüfberichts sind die wichtigsten Informationen zu Bauwerk und Prüfung sowie die Zustandsnote angegeben. Ein „H“ (Hauptprüfung), „E“ (Einfache Prüfung) oder „S“ (Sonderprüfung) gibt die Prüfungsform an. Außerdem werden die Bauwerksnummer sowie der nächstgelegene Ort angegeben. Darauf folgen Angaben zur Konstruktion wie Bauwerksart und Tragfähigkeit. Sowohl für Über- als auch Unterbau wird das Baujahr angegeben. Auch zur Prüfung werden Angaben gemacht. So wird die Prüfrichtung genau definiert und sowohl der Name des Prüfers als auch das Datum der Prüfung genannt. Auf das Deckblatt folgen mehrere Seiten mit Schadensbeschreibungen. Die Schäden sind nach Bauteilgruppen geordnet aufgelistet und werden so aufgeführt, wie sie in SIB-Bauwerke eingegeben wurden. Am Ende des Berichts befindet sich eine Tabelle, welche die Noten sämtlicher bewerteter Bauteilgruppen angibt. Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, welche Bauteilgruppennote die höchste und für die Zustandsnote der Brücke verantwortlich ist. Zudem wird die sogenannte Substanzkennzahl der einzelnen Bauteilgruppen dargestellt. Die Substanzkennzahl berücksichtigt zwar Standsicherheit und Dauerhaftigkeit, aber nicht die Verkehrssicherheit. Unter der Tabelle werden, falls vorhanden, Schäden mit Besonderheiten bei der Bewertung aufgelistet wie z. B. Schäden, für die kein passendes Schadensbeispiel vorhanden ist. Außerdem befindet sich im Beiblatt eine Zusammenfassung der empfohlenen Maßnahmen. Dabei wird der jeweiligen Schadens-ID die zugehörige Bauteilnummer sowie die ID der empfohlenen Maßnahme zugeordnet. Substanzkennzahlen für den Überbau, welche größer sind als 2,5, weisen auf einen nicht mehr befriedigenden Zustand des Überbaus hin. [126][303]

Bewertungsalgorithmus

Die Grundlage für jede Bauwerksprüfung nach DIN 1076 [69] bildet ein Bewertungsverfahren, das in der vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2017 zuletzt aktualisierten RI-EBW-PRÜF [303] definiert ist. Dieses Verfahren gründet auf einem Algorithmus, welcher 1999 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durch die Forschungsprojekte „Analyse und Weiterentwicklung von Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken“ [154] und „Erarbeitung von Kriterien zur Zustandserfassung und Schadensbeurteilung von Brücken- und Ingenieurbauwerken“ [156] erarbeitet wurde und somit die Grundlage für die Software SIB-Bauwerke [387] darstellt.

Der Algorithmus ordnet jedem Einzelschaden und anschließend jeder Bauteilgruppe sowie dem Gesamtbauwerk eine Zustandsnote von 1,0 bis 4,0 zu. Diese ist maßgebend für die wirtschaftliche Bewertung ebendieses hinsichtlich seiner Unterhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen. Da der Baulastträger, als Verantwortlicher für die Zustandserhaltung, aufgrund dieser Kennzahl seinen Ingenieurbauwerken die weiteren Maßnahmen zuweist, ist eine bestmögliche und aussagekräftige Zustandsbewertung auf Grundlage der Einzelschadensbewertung entscheidend. Die einheitliche Software ermöglicht die Dokumentation aller verkehrstechnischen Bauwerke deutschlandweit und gibt durch die Bewertung einen Überblick über die Sanierungsbedürftigkeit und die Instandhaltungsplanung. Für die Ermittlung der Zustandsnote einer Brücke sieht der Algorithmus vier Arbeits-, bzw. Rechenschritte vor (siehe Abb. 2.5 und für eine detaillierte Betrachtung der Berechnung Anhang 9.1.3) Es wird zunächst für jeden

Einzelschaden einer Bauteilgruppe eine Zustandszahl mithilfe des Bewertungsschlüssels nach Haardt ermittelt (siehe Abb. 2.6). Diese Bauteilgruppen gemäß der „ASB-ING 2013, Segment Bauwerksdaten“ [10] wie Überbau, Unterbau oder Gründung wurden zuvor bereits aufgelistet. Sämtliche Einzelbauteile des Bauwerks können in SIB-Bauwerke diesen Bauteilgruppen zugeordnet werden. Auf Grundlage der Schadensbewertungen für Verkehrssicherheit (V), Standsicherheit (S) und Dauerhaftigkeit (D) der einzelnen Bauteile kann mit Hilfe des in Anhang 9.1.1 bzw. auf Abb. 2.6 abgebildeten Bewertungsschlüssels jedem Bauteil eine sogenannte Zustandszahl Z_i zugewiesen werden. [154]

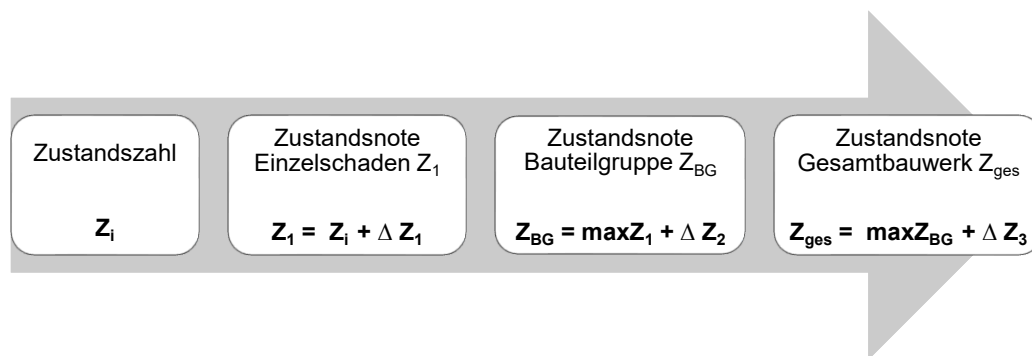


Abb. 2.5: Übersicht Rechenschritte Algorithmus der BASt [154][303]

Abhängig der Größe des Schadensumfangs U wird diese Zahl durch einen Zu- bzw. Abschlag ΔZ_1 ergänzt. Der Schadensumfang wird in die Kategorien „klein“, „mittel“ und „groß“ eingeteilt (siehe Tab. 2.2). Diese Einteilung findet in SIB-Bauwerke mithilfe von vordefinierten Begriffen wie „wenig“ oder „punktuell“ für kleine Schäden, „stellenweise“ oder „an einigen Bauteilen“ für mittlere Schäden und „großflächig“ oder „flächendeckend“ für einen großen Schadensumfang statt (siehe Tab. 2.1).

		V				
D = 2		0	1	2	3	4
S	0	1,8	2,1	2,2	2,7	4,0
	1	2,2	2,3	2,4	2,8	4,0
	2	2,3	2,5	2,6	2,9	4,0
	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

Abb. 2.6: Auszug Bewertungsschlüssel nach Haardt zur Ermittlung der Basiszustandszahlen Z_i [154]

Die Zustandsnote des Einzelschadens berechnet sich mit Gleichung (Gl. 1) .

$$Z_1 = Z_i + \Delta Z_1 \quad (\text{Gl. 1})$$

Umfang klein	Umfang mittel	Umfang groß
gering vereinzelt punktuell beginnend eine Stelle ein Stück	häufig zahlreich bereichsweise mehrfach teilweise stellenweise an einigen Bauteilen	gesamtes Bauteil flächendeckend alle durchgehend vollständig ausgeprägt an allen Bauteilen großflächig größtenteils

Tab. 2.1: Definierte Begriffe zur Auswahl des Schadensumfangs und ΔZ_1 [154]

Die Zustandsnote einer Bauteilgruppe Z_{BG} setzt sich anschließend zusammen aus der größten zugehörigen Zustandszahl Z_1 eines Bauteils und einem weiteren Zu- bzw. Abschlag ΔZ_2 , der abhängig ist von der Schadensanzahl n innerhalb der jeweiligen Bauteilgruppe. [154]

Schadensumfang U	ΔZ_1
klein	- 0,1
mittel	$\pm 0,0$
groß	+ 0,1

Tab. 2.2: Zu-/Abschlag ΔZ_1 nach [154]

Für die Bauteilgruppe „Überbau“ gelten andere Werte für ΔZ_2 als für die anderen 13 Bauteilgruppen (siehe Tab. 2.3). Die Höhe des Zu- bzw. Abschlags ist somit abhängig von der Bauteilgruppe, in welche der jeweilige Schaden einzuordnen ist, und muss nach der entsprechenden Tabelle ausgewählt werden.

Schadensanzahl n	ΔZ_2	Schadensanzahl n	ΔZ_2
$n < 3$	- 0,1	$n < 5$	- 0,1
$3 \leq n \leq 5$	$\pm 0,0$	$5 \leq n \leq 15$	$\pm 0,0$
$n > 5$	+ 0,1	$n > 15$	+ 0,1

Tab. 2.3: Zu-/Abschlag ΔZ_2 für Bauteilgruppe Überbau (l.) und alle anderen Bauteilgruppen (r.) [154]

Die Zustandsnote der Bauteilgruppe errechnet sich mit Gleichung (Gl. 2).

$$Z_{BG} = \max Z_1 + \Delta Z_2 \quad (\text{Gl. 2})$$

Abschließend ist ein Zu- bzw. Abschlag ΔZ_3 zu ermitteln, um die Zustandsnote des Gesamtbauwerks Z_{ges} zu errechnen. Dieser Hilfswert ergibt sich aus der Anzahl der betroffenen bzw. geschädigten Bauteilgruppen. Die endgültige Zustandsnote des Gesamtbauwerks Z_{ges} ergibt sich aus der maximalen Zustandsnote der Bauteilgruppen und dem Zu- bzw. Abschlag ΔZ_3 (siehe Tab. 2.4). [154]

Geschädigte Bauteilgruppen	ΔZ_3
< 25 %	- 0,1
25 % - 50 %	$\pm 0,0$
> 50 %	+ 0,1

Tab. 2.4: Zu-/Abschlag ΔZ_3 [154]

Die Zustandsnote des Gesamtbauwerks errechnet sich mit Gleichung (Gl. 3).

$$Z_{ges} = \max Z_{BG} + \Delta Z_3 \quad (\text{Gl. 3})$$

Für die endgültige Zustandsnote gibt RI-EBW-PRÜF Tabellen mit Erklärungen vor, welche den Zustand hinter den einzelnen numerischen Bewertungen der Bauwerke erläutern und den bekannten Schulnoten wie „sehr gut“ oder „ausreichend“ zuordnen (siehe Tab. 9.1 in Anhang 9.1.3).

Mit dem zuvor beschriebenen Algorithmus kann sowohl für jede Bauteilgruppe eine Zustandsnote als auch eine Zustandsnote für das Gesamtbauwerk berechnet werden. Diese Ergebnisse werden in der Software SIB-Bauwerke jeweils einzeln für den Bauherrn ausgegeben. Außerdem wird die sogenannte Substanzkennzahl ermittelt. Dabei handelt es sich um die gleiche Bewertung von S, V und D mit dem Unterschied, dass hier die Bewertung der Verkehrssicherheit (V) gleich Null gesetzt wird. Begründet wird dies mit dem Interesse an der reinen Bausubstanz für eine Instandhaltungsplanung. Dabei ist es irrelevant, ob der Verkehr wohlmöglich Beeinträchtigungen erfährt. Die einzelnen Rechenschritte aus dem zuvor beschriebenen Algorithmus (siehe Abb. 2.5) ändern sich dabei nicht. SIB-Bauwerke ermittelt somit eine Bewertung für das Gesamtbauwerk mit Berücksichtigung für die Bewertung der Verkehrssicherheit (V) als auch ohne. Rein für die Betrachtung des Bauwerkszustandes ist die Substanzkennzahl daher häufig aussagekräftiger. [303][318]

Traglastindex

Die erörterte Zustandsnote als Ergebnis einer äußeren, handnahen Sichtprüfung des Bauwerks hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einer Brücke. Sie bewertet lediglich die äußeren Schäden, die an einem Brückenbauwerk erkennbar sind. Vor diesem Hintergrund hat die AG Schwerverkehr, welche aus einer Unterarbeitsgruppe aus Mitgliedern des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sowie der Länder Bayern, Mecklenburg-Vorpommer, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Thüringen besteht, am 09.10.2017 zusätzlich den sogenannten Traglastindex eingeführt [7]. Der Traglastindex hat die Fähigkeit, die strukturellen Eigenschaften eines Tragwerks, die maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Brücke haben, zu bewerten. Um die strukturelle Eigenschaft eines Brückenbauwerks zu bewerten, bedarf es eines Vergleichs zwischen der erforderlichen Brückentragfähigkeit (Ziellastniveau) und der nachgewiesenen Brückenklasse eines Bauwerks [35][36]. Die Einstufung erfolgt demnach aus dem Vergleich zwischen Soll- und Ist-Tragfähigkeit der Brücke. Das Ziellastniveau wird hierbei anhand der Verkehrsstärke, der Verkehrszusammensetzung sowie dem Straßenquerschnitt festgelegt. Die Regelung erfolgt über die von dem BMVI eingeführte Richtlinie für „Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“. Damit erfolgt die Einordnung des Traglastindex als ein eigenständiger statischer Zustandskennwert in das Erhaltungsmanagement der Ingenieurbauwerke. [83][155]

Für die Bewertung der Brücken im Traglastindex wurden die Stufen I bis V (vgl. Tab. 9.2 in Anhang 9.1.4) eingeführt. Dabei werden die aktuelle Brückentragfähigkeit des Bauwerks, die Einzelstützweite und die vorhandene durchschnittliche Verkehrsstärke (DTV-SV) berücksichtigt [7]. In die Stufe I werden vor allem diejenigen Bauwerke eingeordnet, welche die statischen und konstruktiven Anforderungen vollumfänglich erfüllen oder sogar überschreiten. Dies sind in der Regel Bauwerke, die in den letzten 20 Jahren gebaut wurden, da sie nach aktuellem Regelwerk geplant wurden [42]. In die Stufe V fallen hingegen die Bauwerke, die in der Regel mehr als 50 Jahre alt sind und ihre Nutzungszeit überschritten haben. Hintergrund ist die Planung nach nicht aktuellem Regelwerk und der deutliche Anstieg des Schwerlastverkehrs. Damit weisen diese Bauwerke im Vergleich zu den heutigen Anforderungen die meisten statisch-konstruktiven Defizite auf [42]. Der Nutzen des Traglastindex liegt darin, Hinweise im Hinblick auf die Notwendigkeit der Brückenmodernisierung zu erhalten und so die Straßenbauverwaltung zu unterstützen. Der Traglastindex sollte jedoch nicht allein als Grundlage für die Bewertung von Erhaltungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Brückenbauwerken herangezogen werden. Vielmehr sollten auch der Bauwerkszustand, die vorhandene Brückentragfähigkeit sowie die Verkehrsbedeutung der Strecke berücksichtigt werden. [7][42]

2.1.2 Konventionelle Prüfung, Richtlinien und Bewertung von Ingenieurbauwerken bei Bahnbrücken

Verantwortlichkeit

Um bei Bahnbrücken einen sicheren Betrieb der Eisenbahn zu gewährleisten sowie ein attraktives Verkehrsangebot zu schaffen, gilt für die rechtlichen Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG) [2]. Es dient somit eines sicheren Bahnbetriebs

unter Berücksichtigung der Nutzerinteressen. Weitere Sicherheitsanforderungen der Bahnanlagen kann der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) [102] entnommen werden. Diese regelt die Anforderungen, welche erfüllt sein müssen, wenn es um die Erschaffung einer Bahnanlage sowie der Fahrzeuge geht ([102], § 2). Die Einhaltung und Umsetzung der Forderungen unterliegen unterschiedlicher Organisationseinheiten. So stellt das Eisenbahnbundesamt (EBA) die Bauaufsichtsbehörde für Eisenbahnangelegenheiten dar. Die Deutsche Bahn AG (DB AG) ist hingegen als Verkehrs- und Infrastrukturunternehmung verantwortlich für die Verkehrsorganisation und die betriebssichere Instandhaltung der Bahnanlagen. Da Brücken zu den Betriebs- und Bahnanlagen gehören, fällt die Zuständigkeit für eine ordnungsgemäße Instandhaltung der Brücken auf die DB AG [180]. Artikel 4, Absatz 1 und 3 des AEGs ist der Umfang der Sicherheitspflichten der Deutschen Bahn AG mit Aufsicht durch das Eisenbahnbundesamt (EBA) zu entnehmen:

„Eisenbahninfrastrukturen und Fahrzeuge müssen den Anforderungen der öffentlichen Sicherheit

- 1. an den Bau zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme und*
 - 2. an den Betrieb*
- genügen“ ([2], § 4, Abs. 1)*

Bauaufsichtliche Prüfungen erfolgen durch das EBA, wohingegen unternehmensinterne Prüfungen in den Verantwortungs- und Ausführungsbereich der Deutschen Bahn AG fallen. Regelmäßige Prüfungen der Eisenbahnbrücken sind folglich durch die DB AG als Eigentümer und Nutzer dieser Bauwerke durchzuführen. [286]

Übersicht geltender Regelwerke

Zusätzlich zu den verbindlichen Regelungen der Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung (EBO) gibt es eigene Regelungen der DB AG, die bauaufsichtlich als bautechnische Regelwerke vom Eisenbahnbundesamt (EBA) eingeführt wurden. Hinzu kommen weitere Vorschriften des ehemaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), aktuell das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) [180]. Für die hier betrachtete Bauwerksprüfungen sind jedoch die Richtlinien der DB AG dominierend, da diese zuständig für die Durchführung der Prüfungen und Kontrollen ist. Hier gilt grundlegend die „Richtlinie 804-Ingenieurbauwerke planen, bauen und instand halten“ [57]. Die Inspektion von Ingenieurbauwerken ist in 804.80XX geregelt. Das Modul 8001 [57] gibt allgemeine Grundsätze zur Inspektion von Ingenieurbauwerken vor z.B., dass Ingenieurbauwerke nach dieser Richtlinie bezüglich ihrer Betriebs-, Verkehrs- und Standsicherheit regelmäßig inspiziert werden müssen [57]. Modul 8002 [58] bezieht sich dagegen rein auf die Inspektion von Eisenbahnüberführungen. Auch hier liegt die Bewertung zwischen den Stufen 0 und 4. Die Struktur der relevanten Bestandteile der Richtlinie 804 ist Abb. 2.7 zu entnehmen.

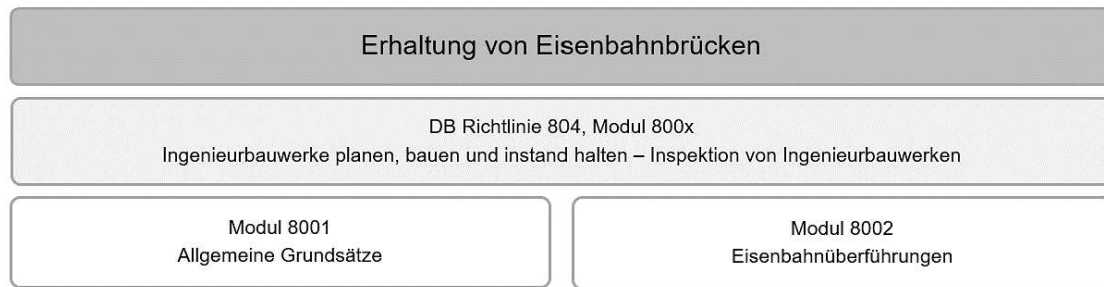


Abb. 2.7: Regelwerke zur Bauwerkserhaltung von Eisenbahnbrücken [286]

Übersicht der Prüfungsformen

Modul 8001 der Richtlinie 804 [57] unterscheidet ähnlich wie die RI-EBW-PRÜF [303] und die DIN 1076 [69] differente Inspektionsformen und -intensitäten eines Brückenbauwerks.

So erfolgt die „Überwachung“ ohne besondere Hilfsmittel und beschränkt sich auf äußerlich erkennbare Schäden. Eine Überwachung findet meist im Regelinspektionsabstand nach der Richtlinie 821.2003 [59] statt. Diese gibt vor, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei Überprüfungen abhängig von den Inspektionsergebnissen ist, jedoch in der Regel jährlich gesetzt wird [57][59]. „Untersuchungen“ beziehen sich auf Schäden an allen zugänglichen Bauwerksteilen. Die Priorität soll auf der Veränderung bereits festgestellter Schäden liegen. Bei erheblichen Schäden und Schadensentwicklungen sind Sonderinspektionen zu beantragen. Die sogenannten Untersuchungen sind bei Bauwerken alle sechs Jahre durchzuführen und deren Ergebnisse als Befund festzuhalten [57]. Bei „Begutachtungen“ sind zusätzlich auch die schwer zugänglichen Bauwerksteile zu untersuchen. Das Inspektionsergebnis ist ebenfalls als Befund aufzunehmen. Bei außergewöhnlichen Ereignissen, die außerhalb der sonstigen Inspektionen geschehen, sind Sonderinspektionen im Umfang einer „Untersuchung“ oder „Begutachtung“ durchzuführen. Ursache können sowohl äußerliche Einwirkungen aus Unfällen etc. als auch Umweltereignissen sein. Analog zu den Straßenbrücken wird auch hier ein computergestütztes Datenverarbeitungssystem verwandt, um die Begutachtungen bzw. Untersuchungen zu katalogisieren. [57]

In den allgemeinen Grundsätzen der DB Richtlinie sind zudem Anmerkungen zu Maßnahmenangaben nach den Inspektionen vorhanden. Das bedeutet, der Bauwerksprüfer nennt Maßnahmen, die er aufgrund der von ihm gefundenen Schäden empfehlen würde. Die anlagenverantwortliche Stelle bestimmt dann im Rahmen einer Entscheidungskonferenz, wie mit den Maßnahmen umgegangen werden soll. [57]

Durchführung und Dokumentation der Prüfungen

Detailliertere Angaben bezüglich der Eisenbahnbrücken sind dem „Modul 8002-Eisenbahnüberführungen“ [58] zu entnehmen. Dort wird hervorgehoben, dass die Inspektionsbefunde mit einem EDV-Programm zu erstellen seien. Zusätzlich werden alle zu betrachtenden Bauwerksteile aufgelistet. Dabei handelt es sich um alle tragenden Bauteile, Lager und Übergänge, Verbindungsmittel und den Korrosionsschutz [58]. Die Befunde, als Ergebnis einer

Bauwerksprüfung, müssen alle festgestellten Schäden unter Angabe und Erläuterung der Sicherheitsrisiken katalogisiert werden. Die Sicherheitsrisiken werden bei Bahnbrücken in die drei Kategorien Standsicherheit, Betriebssicherheit sowie Verkehrssicherheit unterteilt. Die Beseitigungsfrist sowie eine Zustandskategorie mit einer Zustandsentwicklung sind ebenfalls anzugeben. Maßnahmvorschläge sind, falls erforderlich, beizufügen. Erläuterungen oder Orientierungen für eine Zuordnung in die oben genannten Schadensstufen 0 bis 4 gibt es nicht. Die Schadensbewertung ist hier folglich eine rein subjektive Einschätzung des Bahnmitarbeiters. [58]

2.1.3 Konventionelle Prüfung, Richtlinien und Bewertung von Ingenieurbauwerken bei Verkehrswasserbauwerken

Verantwortlichkeit

In Europa zeichnet sich Deutschland mit dem größten Wasserstraßennetz aus. Die deutschen Seeschiffahrtsstraßen sind essentiell für den Handel sowie Teil nachhaltiger Logistik. Offiziell ist die Bundesrepublik Deutschland Eigentümer der Bundeswasserstraßen. Der Erhalt, Neubau sowie Betrieb der Wasserstraßen sowie der vielen Verkehrswasserbauwerke unterliegen dabei der Verantwortlichkeit des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV). Dieses übergibt die Verwaltung der Bundeswasserstraßen an eigene Behörden wie dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Somit ist das WSV verantwortlich für die Unterhaltung bzw. Instandhaltung aller Brücken im Bereich der Wasserstraßen. Zusätzlich gibt es die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), das Kompetenzzentrum für den Verkehrswasserbau. Sie ist ein wissenschaftlicher Dienstleister für das BMDV sowie das WSV. Die BAW gibt Hilfestellungen in Form von Projekt- und Politikberatung, um den Anforderungen an das wachsende Wasserstraßennetz gerecht zu werden. [45][271][273]

Übersicht geltender Regelwerke

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr hat im Jahr 2022 die aktualisierte Fassung der Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (VV-WSV 2101) herausgegeben. Sie regelt die Bauwerksprüfungen aller in die Unterhaltungslast der WSV fallenden Bauwerke. Darunter fallen nicht Kanalbrücken, da diese wiederum unter die Regelung der DIN 1076 [69] fallen. Das bedeutet, alle gängigen Brücken, welche über Wasserstraßen führen, werden entsprechend der Regelungen der DIN 1076 [69] sowie RI-EBW-PRÜF [303] behandelt (siehe 2.1.1). Dennoch soll die Vorschrift VV-WSV 2101 an dieser Stelle näher beleuchtet werden, um diese Erkenntnisse im späteren Verlauf in die hier zu erarbeitende Bauwerksbewertung ggf. mit aufzunehmen. Zusätzlich gibt es das BAW Merkblatt „Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken“ von 2018, welches auch eine Art Schadenskatalog für die Bauwerksinspektion zur Verfügung stellt. [39][40][69][303]

Übersicht der Prüfungsformen

Die Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101 ähnelt der DIN 1076 sehr. Es werden ebenfalls Haupt- und einfache Prüfungen sowie alle weiteren Inspektionsarten aus DIN 1076 beschrieben. Schäden und Mängel werden definiert, genauso wie Standsicherheit, Tragfähigkeit sowie

Gebrauchstauglichkeit. In diesem Bereich gibt es keine Unterschiede zwischen den beiden Richtlinien. [40][69]

Durchführung und Dokumentation der Prüfungen

Für die Bewertung eines gefundenen Schadens gelten hier die Schadensklassen SK 1-4. Dabei steht SK 1 für eher harmlose Schäden ohne Schadensentwicklung, während SK 2 bis SK 4 den Schadensentwicklungsprozess beschreiben, die sich sowohl auf die Tragfähigkeit als auch auf die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils auswirkt (siehe Tab. 2.5).

SK 1	Schaden, der aktuell die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit nicht beeinträchtigt und vermutlich auch zukünftig nicht beeinträchtigen wird. Dies können z. B. Schäden sein, die seit der Errichtung des Bauwerks vorhanden sind und sich seither nicht mehr verändert haben.
SK 2	Schaden, der aktuell die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit nicht oder nur geringfügig beeinträchtigt, aber mit vermuteter Entwicklung eine Beeinträchtigung darstellen wird. Eine weitere Beobachtung im Rahmen des vorgesehenen Prüfzyklus ist ausreichend.
SK 3	Schaden, der aktuell die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt; beide sind aber noch gegeben. Es ist zu prüfen, ob die weitere Beobachtung im Rahmen des vorgesehenen Prüfzyklus ausreichend ist oder ob eine Verkürzung des Intervalls erforderlich ist.
SK 4	Die Tragfähigkeit und/oder Gebrauchstauglichkeit des Bauteils sind nicht mehr gegeben. Schaden, der eine akute Gefährdung für die Menschen darstellt und/oder die Nutzung dieses Bauteils nicht mehr möglich macht. Während der Bauwerksprüfung sind sofortige Maßnahmen erforderlich, welche die Gefahr für Leib und Leben ausschließen bzw. abwenden.

Tab. 2.5: Definition der Schadensklassen für Prüfungen von Verkehrswasserbauwerke ([39], S.4)

Im Anschluss ermittelt eine Software „WSVPruf“ Prüfungsnoten für die Konstruktion, den Stahlbau und den Korrosionsschutz. Die Noten liegen auch hier zwischen 1,0 und 4,0 und ergeben sich aus den zuvor beschriebenen Schadensklassen. Demnach hängt die Art und Schwere der Schädigung und damit die Zustandsnote auch eng mit den abzuleitenden Maßnahmen zusammen. Während für die Zustandsnoten 1,0 - 2,4 die vorgegebenen Prüfzyklen beibehalten werden können, ändert sich dies ab den Zustandsnoten 2,5 - 3,4, die einen ausreichenden Zustand beschreiben und ggf. eine Anpassung des Inspektionszyklus erforderlich machen. In diesem Zustand sind mittelfristige bauliche Maßnahmen an einem Objektteil und/oder am Objekt zu erwarten. Noch drastischer fallen die Konsequenzen ab einer Zustandsnote von 3,5 oder schlechter aus, die einen ungenügenden Zustand ausweisen. Um die Funktionsfähigkeit zu erhalten bzw. wiederherzustellen, sind in diesem Falle sofortige Maßnahmen einzuleiten. Das Programmsystem „WSVPruf“ unterstützt das Prüfpersonal bei der Erfassung der Anlage, über die Terminplanung bis zur Dokumentation der Prüfergebnisse.

Auch ein Zustandsbericht wird erstellt. Ergebnisse inspizierter Objekte lassen sich anhand einer Anlagenstruktur dokumentieren, dazu liegt eine Maske zur Schadenserfassung vor (siehe Abb. 2.8). Der Bericht enthält ebenso die automatisch ermittelte Bewertungsnote. [39][149]

The screenshot shows the 'IMS' software interface for recording damage. The window title is 'IMS'. It is divided into several sections:

- Beschädigtes Anlagenteil** (Anlagenstruktur): Schiffschleusenanlage Himmelstadt, Kammer 1, Standort, Einfahrtbereich.
- Verwendetes Material**: Stahl-/Beton (dropdown), Stahlbeton (dropdown).
- Lfd. Schadensnr.:** 1
- Berichtsnr.:** 01-2007
- Schadengruppe:** Beton/Mörtel (dropdown)
- Schaden:** Ausbruch (dropdown)
- Grösse1:** (dropdown)
- Grösse2:** (dropdown)
- Menge:** eine Stelle (dropdown)
- Ort längs:** (dropdown)
- Ort quer:** (dropdown)
- Ort Höhe:** (dropdown)
- Ort allg.:** (dropdown)
- Schadensklasse:** 2 (dropdown) langfristige Gefährdung
- Bemerkung:** (dropdown)
- Altschaden:** (dropdown)
- Schadenstext:** (text area)
- Buttons:** Textbaustein, Speichern + Kopieren, Speichern, Abbrechen
- Image area:** Bild 1 (with image of a crack) and Bild 2 (empty), with buttons for Bild auswählen and Bild löschen.
- Online-Hilfe** button.

Abb. 2.8: Maske zur Erfassung von Schäden der Software WSVPruf ([149], S.1)

Im Vergleich zum Ausführlichen Schadenskatalog der RI-EBW-PRÜF [300], ist dieser Katalog kapitel- bzw. themenweise erfasst. Als Hauptkapitel gehen jeweils die Bauweise (z.B. Massivbau, Stahl(wasser)bau) bzw. übergeordnete Baustoffe/Systeme (z.B. Kunststoff und Elastomer, Korrosionsschutz) voran. In den Unterkapiteln werden dann die auftretenden Schäden konkretisiert. Die Zuordnung zu einer der vier Schadensklassen von 1 bis 4 erfolgt nach folgendem Schema: Zunächst werden dem Prüfer mögliche Schadensursachen an die Hand gegeben. Als Beispiel wird das Kapitel 3.1.2 Oberfläche geschädigt gewählt, welches den Kapiteln 3.1 Oberflächenschäden Beton und Stahlbeton und 3. Massivbau untergeordnet ist. Eine Auswahl möglicher Schadensursachen ist etwa Verschleiß, Schiffsanfahrt oder Frost-(Tausalz)-Angriff. Die eigentliche Zuordnung der Schädigung zu einer Schadensklasse erfolgt im Anschluss über ein Baumdiagramm. Dabei verfolgt der Prüfer den Weg der zutreffenden Diagrammpunkte, um die Schadensklasse identifizieren zu können. [39]

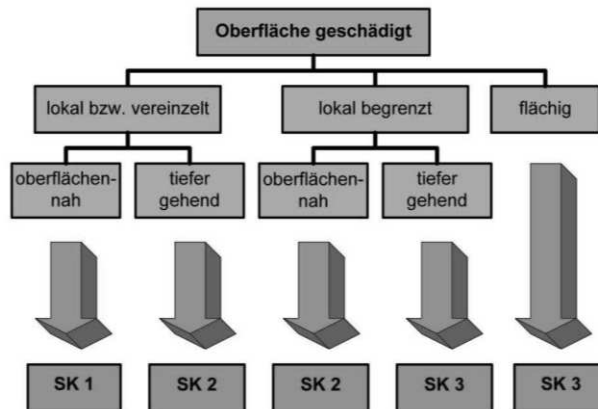


Abb. 2.9: Beispiel eines Diagramms zur Schadenszuordnung in eine Schadensklasse ([39], S.12)

Damit das Prüfergebnis möglichst objektiv gestaltet werden kann, sind im Anschluss konkrete Beispiele mit Schadensbildern gegeben, anhand derer exemplarisch das Vorgehen gezeigt wird. Im dargestellten Beispiel handelt es sich um einen Kantenabbruch. Als erstes wird die Schiffsanfahrt als Schadensursache aus der beschriebenen Liste identifiziert. Im Anschluss verfolgt man das Baumdiagramm. Demnach ist der Schaden lokal begrenzt und oberflächen-nah, sodass eine Bewertung in SK 2 vorgenommen werden muss. Es folgen weitere Beispiele mit Fotos ähnlicher Schädigungen und Zuordnungen in zum Teil andere Schadensklassen, sodass der Prüfer ein Gefühl für die Bewertung entwickelt. Es fällt auf, dass der Schadenskatalog vor allem für Betonbauwerke ausgelegt ist, da es sich hier bei den zu prüfenden Bauwerken meist um die Umwandlungen der Wasserstraßen oder Schleusen handelt. Da die Brücken der DIN 1076 zugeordnet werden, ist ein ausführliches Kapitel zum Thema Stahlbau nicht nötig. Außerdem ist dieser Katalog durch die vielen Erläuterungen, Beispiele und Bilder intuitiver nutzbar und anwenderfreundlicher. [39][69]

2.1.4 Bauwerks-Management-Systeme (BMS)

Bauwerks-Management-Systeme (BMS) dienen der Datenerfassung und Datenverwaltung. Diese Daten ergeben sich aus den allgemeinen Bauwerksdaten wie Altersstruktur, Bauwerkszustand und Tragfähigkeit, den Schadensdaten, welche Prüfergebnisse und Zustandsbewertungen enthalten, und den Kostendaten für Instandhaltungen und Instandsetzungen. Diese Substanzdaten werden abschließend für eine Erhaltungsplanung bei den verantwortlichen Baulastträgern genutzt. Diese Substanzdaten werden digital in eine Objektdatenbank sowie eine Zustandsdatenbank unterteilt. Die Objektdatenbank bildet ein elektronisches Bauwerksbuch und enthält daher alle relevanten Bauwerksdaten. In der Zustandsdatenbank hingegen werden lediglich Informationen gesammelt, die aus Prüfergebnissen der Bauwerksprüfungen stammen und daher sowohl Informationen über den aktuellen Zustand als auch die Zustandsentwicklung enthalten. [19][106][137][211]

Ein Bauwerks-Management-System wird daher wie in Tab. 2.6 gegliedert:

Objektdatenbank	Zustandsdatenbank	Ergänzungsmodule
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwaltungsdaten ▪ technische Daten ▪ Bauwerksgeometrie ▪ Materialien ▪ Ausstattungselemente ▪ Bauwerksunterlagen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfergebnisse und Schadensbewertungen ▪ Definition Inspektionselemente 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abschätzung Schadensentwicklung ▪ Budget ▪ Lebens- und Nutzungsdauer

Tab. 2.6: Gliederung eines Bauwerk-Management-Systems [106]

Für Brücken und Ingenieurbauten im Zuge von Straßen des Bundes gibt es das bereits genannte Programmsystem „SIB-Bauwerke“, welches die Bauwerksdaten erfass-, verwert- und verwaltbar macht. SIB-Bauwerke stellt eine Bauwerksdatenbank der Länder und des Bundes nach den Vorgaben der Anweisung Straßeninformationsbank-Teilsystem Bauwerksdaten (ASB-ING) [10] zur Erfassung, Verwaltung und Auswertung dar [303][387]. Die Daten werden in 61 untereinander verknüpften Tabellen gespeichert, welche hierarchisch u.a. nach Bauwerk, Bauwerksart, und Sachverhalt geordnet sind [387]. In dem aktuellen Managementsystem des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) liegt der Fokus klar auf den wirtschaftlichen Aspekten. Ein Zusammenführen von Bauwerksdaten, Zustandsanalysen, Finanzmitteln und technischen Möglichkeiten liefert Aussagen bezüglich der zu erwartenden Kosten hinsichtlich der Erhaltung des Bauwerks für seine vorgesehene Nutzung und Nutzungsdauer [156]. Die Bauwerksprüfung ist somit als Teil des BMS Grundlage für eine zielgerichtete Bauwerkserhaltung, weil sie alle notwendigen Informationen zum Bauwerkszustand liefert [183]. Die Zustandsnote nach einer Brückenprüfung ist maßgeblich für Erhaltungsmaßnahmen, die ggf. an dem Bauwerk zu treffen sind. Durch eine Datenanalyse im BMS können die Vorgaben des Bauherrn bzw. Baulastträgers so sortiert werden, dass für ihn eine klare Ausgabe der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen ausgegeben wird (siehe Abb. 2.10). [124][156][183]

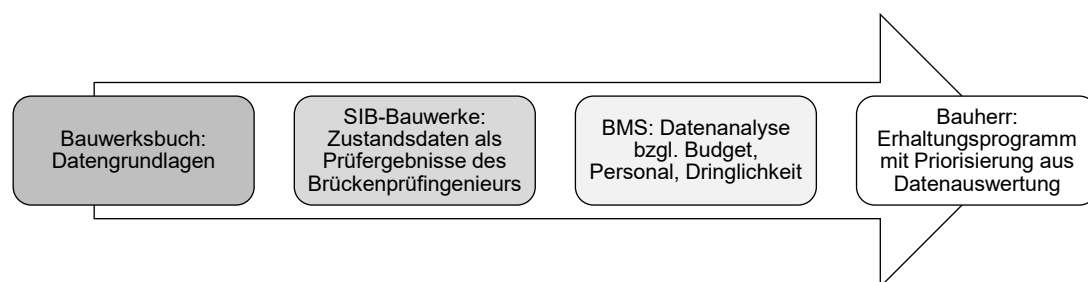


Abb. 2.10: Abfolge von Bauwerksdaten bis zu maßgeblichen Erhaltungsmaßnahmen (nach [124])

Ziel der Bauwerksprüfung und des BMS ist es daher immer, sowohl die Sicherheit des Bauwerks hinsichtlich der Stand-, Verkehrssicherheit und der Dauerhaftigkeit als auch die wirtschaftliche Tragbarkeit gewährleisten zu können. Das BMS stellt somit ein Optimierungsverfahren dar, um eine möglichst hohe Sicherheit für einen möglichst geringen Aufwand erzielen zu können [103]. Es verwendet die Zustandsbewertung als Basis der Erhaltungsplanung und stellt daher maßgeblich einen entscheidenden Teil eines Erhaltungsmanagements dar, indem

unter anderem auch durch die Bauwerksbewertungen eine Instandsetzungsreihenfolge für die Bauwerke festgelegt wird. [124][211]

2.2 Bauweisen stählerner Brücken und Tragverhalten orthotroper Fahrbahnplatten

Im Jahr 2021 gibt es rund 40.000 einzelne Straßenbrückenbauwerke, welche eine Brückenfläche von rund 31 Mio. m² ausmachen. Stahl- und Stahlverbundbrücken erheben davon einen Anteil von circa 5 Mio. m², was rund sechs Prozent entspricht. Über die Hälfte aller Brücken ist älter als 40 Jahre. Bei den Bahnbrücken ist sogar knapp die Hälfte aus dem Material Stahl gebaut. Da in der vorliegenden Arbeit die Betrachtung von stählernen Balkenbrücken mittlerer Spannweiten bis 100 m, was ca. 92 % aller stählernen Straßenbrücken entspricht, mit orthotroper Fahrbahnplatte fokussiert werden, soll die Konstruktions- und Funktionsweise von orthotropen Platten im Folgenden erörtert werden [36]. Im Bereich von Stahlbrücken kommt diese bei verschiedene Tragsysteme wie z.B. Fachwerk-, Balken- oder Bogenbrücken vor. Der Aufbau der Fahrbahnplatte ist jedoch meist der gleiche. Hierbei handelt es sich um ein geschweißtes Bauteil, welches aus einem durch Längsrippen ausgesteiftes Stahlblech besteht, das durch ein Quer- und Hauptträgersystem gestützt wird. Die Haupt- und Querträger sind meist geschweißte I-Profile. Die Längsrippen können unterschiedlichen Querschnitts sein von offen bis geschlossenen Trapezprofilen. [3][36][63][150]

Insgesamt wird diese Konstruktion ‚orthotrope Fahrbahnplatte‘ genannt. Der Name leitet sich von der besonderen Bauart und Tragwirkung der Platte ab, da diese senkrecht, also orthogonal, zueinander konstruiert ist, aber in beide Hauptrichtung durch unterschiedliches Tragverhalten aufweist, also anisotrop ist, da die Steifigkeiten richtungsabhängig sind. Auf Abb. 2.11 ist ein Beispiel für einen Regelquerschnitt einer orthotropen Platte dargestellt. [55][126][130][329]

Das Konstruktionsprinzip der orthotropen Platte stammt ursprünglich aus dem Schiffsbau und wurde erst in den 1930er Jahren zum ersten Mal für den Brückenbau eingesetzt, hatte da aber noch keine tragende Funktion. Diese folgte in den folgenden Jahrzehnten. In Europa entstanden viele Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte in der Nachkriegszeit, da aufgrund der Ressourcenknappheit Materialeinsparung von besonderer Bedeutung war. Parallel wurde die Stahlherstellung, Schweiß- und Walztechnik verbessert, sodass die orthotrope Platte stetig trag- und leistungsfähiger wurde. Ein Grund dafür war die Erweiterung, dass die Platte gleichzeitig als Hauptträgerobergurt diente [55]. Durch diese Entwicklung, waren bereits 1960 circa 40 Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte gebaut [385]. Durch die geringen Blechabmessungen sind die Konstruktionen jedoch sehr anfällig für Schädigungen infolge Ermüdung, was damals jedoch noch nicht erforscht war [55]. Stahlbrücken machen in Deutschland mit 6,4 % aller Straßenbrückenquadratmeter zwar nicht den größten Anteil aus, finden aber den Einsatz an zahlreichen zentralen Verkehrswegen und vor allem bei überdurchschnittlich vielen Großbrücken aufgrund ihres geringen Eigengewichts bei großen Spannweiten. [126][130][332][333]

Vertikale Radlasten werden direkt vom Deckblech aufgenommen, auf das z. B. ein rutschfester Fahrbahnbelag aus Asphalt aufgebracht ist, der der Lastverteilung dient. Das dünnwandige

Deckblech muss in geringen Abständen ausgesteift und unterstützt werden. Dies erfolgt durch Längsrippen bzw. Längssteifen, welche an das Deckblech geschweißt werden. Über Rahmenwirkung vom Deckblech in die Steifen werden die Momente aus Radlasten übertragen. Die Steifigkeit des Anschlusses Steife an Deckblech bestimmt die Rahmenwirkung. Die Längsrippen erhalten wiederum Stützung durch die Querträger. Das Deckblech dient als Gurt für die Längsrippen, die Querträger und in Kombination mit den Längssteifen als Gurt für die Hauptträger. [3][175][329][362]

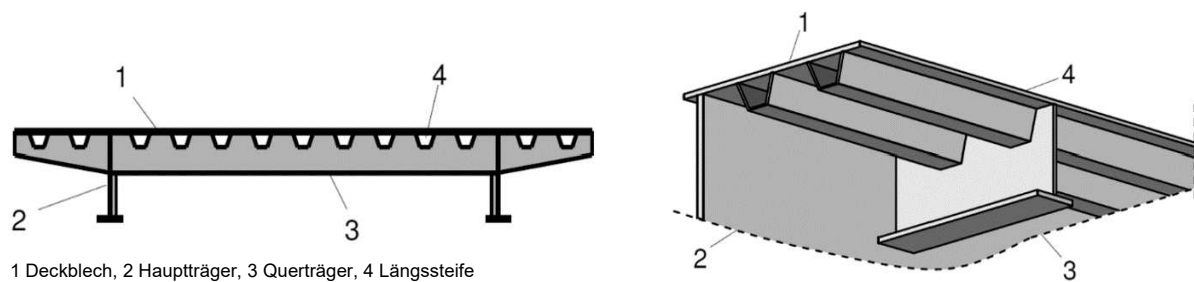


Abb. 2.11: Prinzipieller Aufbau einer orthogonal anisotropen (= orthotropen) Fahrbahnplatte ([126], S.8)

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Profile als Längssteifen verwendet: offene Profile, z.B. I- oder L-Profile, oder geschlossene wie U-, V- oder Trapezprofile. Bei den Letzteren handelt es sich um die wirtschaftlichere Lösung, da die geschlossenen Profile mit nur zwei Nähten geschweißt werden, sie zum Teil als Walzprofil hergestellt werden können und der Korrosionsschutz mühelos aufgebracht werden kann. Diese Schweißverbindung zwischen Deckblech und Rippen wurde in der Vergangenheit als Kehlnaht, heute eher als Stumpfnah ausgeführt [333]. Aus diesen Gründen haben sich Trapezprofile durchgesetzt [215]. Der Abstand zwischen den Längssteifen ist abhängig von der Gesamtkonstruktion sowie der Querträgerabstände. Ein üblicher Abstand der Längssteifen zueinander ist jedoch ca. 300 mm. [3][150][215]

Im Feldbereich wird die orthotrope Platte generell sowie das dünne Deckblech, ausgesteift durch die Längsrippen, auf Druck beansprucht. Druckbeanspruchte Bauteile mit Längsrippen werden im Allgemeinen der Querschnittsklasse 4 zugeordnet. Das Verhältnis $b/t \leq 12,5 \varepsilon$ ist einzuhalten, um die aussteifende Wirkung der Längsrippen durch örtliches Beulen nicht zu verlieren. Die Blechstärke der Rippe wird hierbei mit t , die Breite mit b bezeichnet. [150][157]

Die Rippen erfahren eine Stützung durch die Querträger. Abhängig von der Querschnittsart der Rippen sind die Querträgerabstände zu konstruieren. Für diese Abstände ist der Regelfall bei offenen Rippenquerschnitten jedoch 2 – 5 Meter, bei geschlossenen Rippen sind größere Abstände möglich [6]. Die Längssteifen können entweder zwischen den Querträgerstegen eingepasst werden oder durch einen Freischnitt in ebendiesem geführt und anschließend in Feldmitte gestoßen werden. Das direkte Stoßen an den Querträgersteg führte früh zu Problemen, da die Durchbiegung der Rippe zu großen Verformungen sowie Kerbspannungen am Querträgersteg führt. Daher bildet der Freischnitt im Querträgersteg eine konstruktiv sinnvolle Lösung, weil sich die Längsrippen so frei verformen können und örtlichen Überbeanspruchungen entgegengewirkt wird (siehe Abb. 2.12). [26][169]

Freischnitte sind gemäß DIN-Fachbericht 103 auszuführen. Diese Querschnittsminderung wirkt sich gleichzeitig auf die Spannungsverteilung im Querträgersteg aus und führt an dieser Stelle zu einer Schwachstelle, welche bei der konstruktiven Durchbildung der orthotropen Platte beachtet werden muss. Bei sehr großen Ausnehmungen erfolgt die Berechnung zwischen den Freischnitten und dem unteren Teil des Querträgeruntergurts als idealisierter Vierendeelträger. [150]

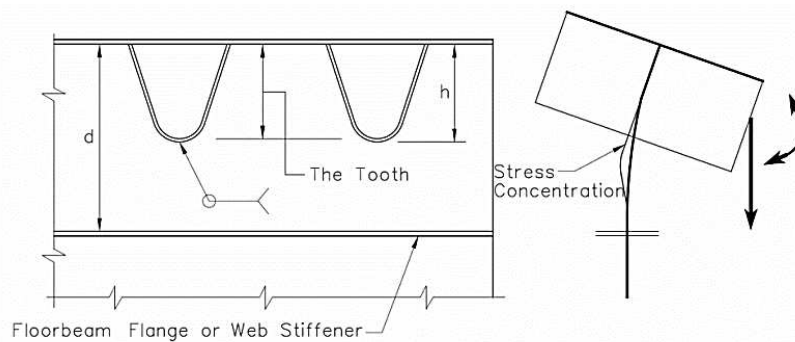


Abb. 2.12: Durchbiegung der Rippen und des Querträgerstegs ohne Freischnitt ([55], S.28)

Durch die Schweißverbindung der Längssteife an den Querträgersteg entsteht eine nachgiebige Stützwirkung. Diese stellt sich ein sowohl bei freigeschnittenen Stegen und durchgeführten Steifen als auch bei eingepassten Längsrippen. Die Längssteifen erhalten somit eine nachgiebige Durchlaufwirkung. Diese Durchlaufwirkung ist im mittigen Bereich der Querträger nachgiebiger als am Rand des Querträgers. Die unterschiedlichen Steifigkeiten der Stützungen entstehen durch die Durchbiegung der Querträger. Je mehr sich dieser in Feldmitte durchbiegt, desto nachgiebiger ist die Lagerung für die Rippe. Demzufolge entstehen bei Längsrippenreihen in der Mitte der Konstruktion geringere Stützmomente als an den Rändern. Der Querträger ist ebenfalls wie die Rippe über die Länge mit dem Deckblech verschweißt und erfährt eine Stützung durch die Hauptträger. Sein Profil ist ein geschweißtes I-Profil, wobei das Deckblech den Obergurt bzw. oberen Flansch des Querträgers bildet. Die Biegelinie verdeutlicht die nachgiebige Einspannung der Querträger am Steg des Hauptträgers. Diese hat ursprünglich eine Verdrehung φ am Anschluss, jedoch wird diese durch die Einspannung verhindert. An der einspannstelle gilt daher $\varphi(x) = 0$. [3][6]

Die Querträger bilden sowohl einen Teil der orthotropen Fahrbahnplatte als auch des Quersystems. Das Quersystem besteht in den meisten Fällen aus den Querträgern selbst, ggf. den Quersteifen der Hauptträgerstege und Querschotten. Quersteifen unterstützen die Stegbleche gegen Ausbeulen und sind in den Querträger-Achsen angeordnet. Ihre Aufgabe ist es, zusammen mit den Querträgern als Rahmen wirkend, vertikale Lasten aus den Querträgern an die Stege der Hauptträger weiterzuleiten und gleichzeitig die Untergurte der Hauptträger in seitliche Richtung zu stabilisieren. Innerhalb des Gesamtsystems haben diese Bauteile gleichzeitig unterschiedliche tragkonstruktive Funktionen und dienen somit zum dreidimensionalen Lastabtrag. [362]

Die Ausbildung der Hauptträger findet als geschweißtes I-Profil, Plattenbalken oder Kastenquerschnitt statt. In dieser Arbeit werden nur Systeme mit dem ersten Fall untersucht [234]. Insgesamt ist die Steifigkeit des Hauptträgerstegs verantwortlich für die Steifigkeit des Anschlusses der Querträger an den Hauptträger. Hier wird eine geringe Einspannwirkung erzeugt, da der Widerstand des Stegs bei Querbeanspruchung gering ist. Die Durchbiegung des Hauptträgers in Feldmitte verstärkt diesen Effekt, weswegen das Tragverhalten des Querträgers mit dem eines Einfeldträgers verglichen werden kann. Das Anordnen von Steifen in diesen Anschlussbereichen können diese Blechbereiche verstärken. Innerhalb des Gesamtsystems haben diese Bauteile gleichzeitig differente tragkonstruktive Funktionen und dienen somit zum dreidimensionalen Lastabtrag. [6][362]

Die zuvor übliche Stapelbauweise, bei dem die einzelnen Bauteile hierarchisch gestapelt werden und unabhängig voneinander wirken und tragen, wurde vom Konstruktionsprinzip der orthotropen Fahrbahnplatte abgelöst. Hierbei handelt es sich um einen globalen Lastabtrag, bei dem die Bauteile mehr als nur einen Tragmechanismus besitzen. Das Deckblech wird von den Längsrippen nicht nur gestützt und ausgesteift, es wirkt ebenso als Obergurt des Hauptträgers. Diese Interaktion mündet in einer durch das Zusammenwirken der Querschnitte insgesamt größeren Tragfähigkeit. [55][362]

Wie zuvor erwähnt, ist nicht nur eine Art des Lastabtrags einzelnen Bauteilen einer orthotropen Platte zugeordnet. Für ein Bauteil wirken parallel mehrere Tragmechanismen, die Platte wirkt global als ein Gesamtsystem. Eine klare tragwirkende Trennung zwischen dem Haupt- und Querträgersystem gibt es hier daher nicht. Diese Komplexität verlangte eine rechnerische Vereinfachung, welche ohne Berechnungssoftware damals durchführbar war. [362]

Daher wurden orthotropen Platten in der Vergangenheit üblicherweise bei der statischen Berechnung in Teilsysteme unterteilt und mit der sogenannten Stapelbauweise berechnet. Die Stapelbauweise definiert sich durch den hierarchischen Stapel und das Berechnen voneinander unabhängiger Bauteile bzw. Teilsysteme. Die Teilsysteme geben Lasten als Auflagerreaktionen an das nächste Bauteil bzw. Teilsystem weiter. Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Annahme, welche ohne die Verfügbar intelligenter Berechnungssoftware getroffen werden musste und nicht berücksichtigt, dass die einzelnen Bauteile zusammenwirken und tragkonstruktiv interagieren. Dies führt zu konservativen Ergebnissen bei der Bemessung. Auch die zunächst vorherrschenden Fertigungsmethoden beeinflussten dieses Konstruktionsprinzip. Erst mit der Weiterentwicklung von Softwarelösungen und Berechnungsprogrammen, fand die Ablösung der Stapelbauweise statt. [55][362]

Die Huber'sche Differentialgleichungen sowie Publikationen von Pelikan & Esslinger stellen eine Weiterentwicklung der Stapelbauweise dar [285][332]. Es mussten für eine wirtschaftliche Vordimensionierung differente mathematische Näherungsverfahren entwickelt werden, wobei zunächst einzelne mechanische Systeme identifiziert wurden, welche das Gesamtsystem unterteilten. Mithilfe der Superposition der einzelnen Teilergebnisse sollte die Beanspruchung des Gesamtsystems bestimmt werden. Die einzelnen Untersysteme orientierten sich an unterschiedlichen Deformationsmechanismen sowohl auf lokaler als auch auf globaler Ebene einzelner Bauteile. Dabei gibt es insgesamt sieben Teilsysteme, welche unter anderem die

lokalen Deformationen des Deckblechs, die Durchbiegung der längsrippen, die Verformung der Querträger oder die globale Verformung darstellen und superponiert werden müssen. [55][285][332]

Heutzutage kann das räumliche Tragwerk dank der Finite-Elementen-Methode (FEM) sowie der fortgeschrittenen Rechnerleistung rechnerisch erfasst und wirtschaftlich optimal bemessen werden. Diese Neuerung hilft nicht nur der Neubauplanung, sondern kann die Bestandsanalyse und die Instandsetzungsmaßnahmen unterstützen. Dennoch weisen die damals konstruierten Brücken mit orthotropen Fahrbahnplatten die zuvor beschriebene Problematik bzgl. Ihrer Anfälligkeit für Risschäden hin, weswegen diese Bauart von besonderer Wichtigkeit bei der Bauwerksinspektion ist.

2.3 Typische Schädigungen an Brücken aus Stahl

Die Bedeutung des Werkstoffes Stahl für die deutsche Bauindustrie ist enorm. Im Jahr 2018 hat allein die Baubranche einen relativen Anteil von 35 % am Stahlbedarf in Deutschland - dem größten Stahlerzeuger in der EU mit einer jährlichen Rohstahlproduktion von knapp 40 Mio. Tonnen (2019) [252]. Neben den vielen Vorteilen wie hoher Belastbarkeit und vielfältiger Verarbeitbarkeit, existieren typische Schadensmuster für Stahlkonstruktionen. Diese können lediglich das Erscheinungsbild, aber vor allem auch die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Konstruktionen beeinflussen. Die grundlegendsten Schadensursachen sollen folgend kurz aufgezeigt werden. [234][334]

Korrosion

Die entscheidende Schwäche des Werkstoffes Stahls ist seine Anfälligkeit für Korrosion. DIN EN ISO 8044 „Korrosion von Metallen und Legierungen-Grundbegriffe“ [92] definiert Korrosion folgendermaßen: „*Physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und häufig zu Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann.*“ ([92], S. 5) Die Korrosion selbst ist durch den Herstellungsprozess des Stahls aus Eisen begründet, in dem durch die Zuführung von Energie im Hochofen aus Eisenoxid reduziertes Eisen entsteht. Dadurch erlangt das Eisen einen energetisch höheren Zustand und strebt stets seinen Ausgangszustand an [317]. Es muss eine Potentialdifferenz in Form einer Anode sowie einer Kathode in Kombination eines Elektrolyten vorhanden sein, dass ein korrosiver Prozess stattfinden kann. Da Stahl bzw. das Eisen im Stahl stets seinen energetisch kleinsten Zustand anstrebt, wird bei diesen Voraussetzungen der Stahl zur Anode. Das bedeutet, der Stahl gibt Elektronen ab und oxidiert mit dem Sauerstoff aus dem Wasser. So entsteht eine Wechselwirkung an den Phasengrenzen zwischen dem Elektrolyten und der Anode [191]. In DIN EN ISO 9223 [93] werden diverse Korrosivitätskategorien definiert, um die Korrosionswahrscheinlichkeit abzuschätzen. Dort wird die Atmosphäre, in der sich das Bauteil befindet, abgeschätzt, um anschließend die Korrosivität in die Kategorien von „C1 unbedeutend“ bis „CX extrem“ einzuteilen. Je höher die Korrosivitätskategorie, desto mehr muss das Bauteil vor Korrosion geschützt werden. [93]

Korrosionserscheinungen an stählernen Bauwerken wie Brücken sind vielseitig sowie von der Konstruktion abhängig. Es wird unterschieden in Flächenkorrosion, Mulden- und Lochkorrosion, Kontaktkorrosion sowie Spaltkorrosion, um nur die wichtigsten Auftretensformen zu nennen. Während sich bei der Flächenkorrosion ein gleichmäßiger Korrosionsprozess an der Oberfläche des Werkstoffs einstellt und derartige Schäden frühzeitig gut erkannt werden können und das Bauteil nur sehr langsam schädigt, tritt die Mulden-, oder Lochkorrosion in einem punktuellen Bereich auf und sich rasch tief in den Werkstoff ausbreiten [378]. Bei der Kontaktkorrosion haben zwei Metalle unterschiedlichen Ruhepotentials direkten Kontakt mit Vorhandensein eines Elektrolyts, was als galvanisches Element bezeichnet wird. Das unedlere Metall bildet darin die Anode, das Edlere die Kathode. Zwischen den beiden fließt elektrische Spannung, was zur Korrosionsbildung führt. Diese Korrosion tritt häufig auf, wenn Stahlbleche mit Schrauben oder Schweißgut aus unedlerem Metall verbunden werden. Tritt Lochkorrosion auf, gibt es meist Fehlstellen in einer Beschichtung, die zusammen mit dem freiliegenden Werkstoff ein galvanisches Element bildet. Dabei bildet die Beschichtung, zum Beispiel Zink, die edlere Kathode, und ist erheblich größer als der kleine Bereich des freigelegten Stahls, der Anode. Es gilt das Prinzip, je größer die Kathode (Verzinkung) im Vergleich zur Anode (Grundbaustoff) desto beschleunigter erfolgt der Korrosionsvorgang. [111][307][378]

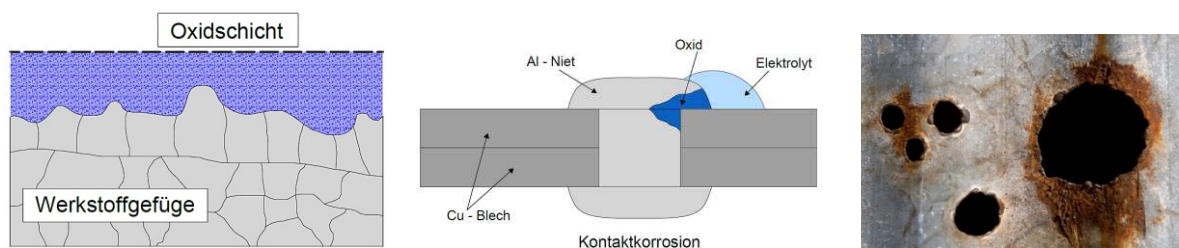


Abb. 2.13: Schema Flächenkorrosion (l.) (nach [275]); Schema Kontaktkorrosion (m.) (nach [275]); Lochkorrosion (r.) [274]

Analog zu ihrer Bezeichnung findet die Spaltkorrosion in Spalten zwischen einem metallischen und einem zweiten Werkstoff statt. Diese können Risse oder Konstruktionsstöße sein, welche mit einer Öffnungsbreite kleiner als 0,1mm keinen Sauerstoff zwischen die Werkstoffe lassen. Unterschiede bei der Sauerstoff- und Metallionenkonzentration bewirken, dass der ionenarme Grund des Spalts anodisch wird, während der äußere Punkt die Kathode bildet. Es entsteht ein Ionenfluss, der für die Korrosion des Spaltgrundes sorgt. Da nicht genug Sauerstoff vorhanden ist, kann sich die Passivschicht nicht ausreichend regenerieren. Dies führt nicht selten zum Aufbrechen der Verbindung durch den entstehenden Druck. Auch die Ansammlung von Dreck oder Moos begünstigt die Entstehung von Korrosion und sollte daher konstruktiv vermieden werden. [111][193]

Verbindungsmittel

Viele Schäden an Bauwerken entstehen nicht auf Grund von unvermeidbaren Umwelteinflüssen, sondern resultieren aus menschlichem Versagen. Sei es ein Fehler in der Planung der Konstruktion, der Ausführung auf der Baustelle oder der Wahl des Materials: Viele Schäden könnten schon im Voraus vermieden werden. Da Bauwerke selten als ein Teil geliefert werden können, müssen die vorproduzierten Einzelteile gefügt und verbunden werden. Dabei werden

häufig die äußeren Umwelteinflüsse außer Acht gelassen, was meist zum Versagen des jeweiligen Verbindungsmittels führt. Schrauben sind reversibel, das heißt sie sind lösbar und ermöglichen den Austausch von Bauteilen und können in der Regel mehrfach genutzt werden. Dagegen lassen sich Niete zwar ebenfalls leicht lösen, indem der Nietkopf abgeschlagen oder das Loch aufgebohrt wird, doch sind diese nicht mehrfach nutzbar. Bei Schweißnähten handelt es sich um einen „*Fügeprozess, bei dem zwei oder mehr Teile verbunden werden, wobei eine Kontinuität der Werkstoffe der zu verbindenden Teile hergestellt wird, unter Anwendung von Wärme oder Kraft oder beiden und mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff*“. ([72], S. 4) Diese Form der Fügung ist irreversibel, also nicht ohne weiteres lösbar. Die häufigsten Schädigungen von Verbindungsmitteln an Brücken sind korrodierte, defekte oder fehlende Fügemitte. Schweißnähte weisen meist Risse oder Fehler bei der Herstellung auf. [279]

Zu den defekten Schraubverbindungen kommt es beispielsweise, wenn Schraubverbindungen nicht fachgerecht angezogen und vorgespannt sind. Während zu niedrig vorgespannte Verbindungen eine Lockerung der Schraube nach sich ziehen können und diese aufgrund der exzentrischen Belastung brechen kann, besteht bei zu hohen Vorspannkräften die Gefahr, dass das Verbindungsmittel unmittelbar durch eine Überbeanspruchung zerstört wird [204]. Besonders Spaltkorrosion ist bei Schraub- und Nietverbindungen von Wichtigkeit [232]. Es kommt zur Korrosion der Schweißnaht, wenn der Werkstoff in oder neben der Naht angegriffen wird. Als Ursache dafür können v.a. Seigerungen genannt werden. Dies sind Entmischungen, die eintreten, während der Stahl nach dem Schweißvorgang in der Hochtemperatur- oder Wärmeeinflusszone erstarrt [263]. Bei zu schneller Abkühlung besteht außerdem die Gefahr, dass Risse infolge der inneren thermischen Spannungen entstehen können [201]. Eine weitere Konsequenz der Wärmeeinwirkung kann eine Verformung der Bauteile sein. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass sich Materialinhomogenitäten wie beispielsweise ein zu hoher Schwefelanteil an den Korngrenzen absetzen können, wodurch sich Verunreinigungen innerhalb des Stahls ansammeln und damit zum Terrassenbruch führen können. [14][232][300]

Beschichtungen

Stahl verlangt weitestgehend eine Schutzbeschichtung, um die oben beschriebenen korrosiven und weitere Angriffe wie Feuer, Chemikalien oder Mikroorganismen für die gesamte Lebensdauer des Bauwerks abwehren zu können. Besonders hervorzuheben ist hier die Korrosionsschutzbeschichtung, der sogenannte passive Korrosionsschutz, welche in DIN EN ISO 12944 genau erfasst ist [89]. Beschichtungssysteme bestehen meistens aus Polymeren und werden in DIN EN ISO 12944-5 erläutert [88]. Korrosionsschutzbeschichtungen sind hoch entwickelte Systeme, welche jedoch nur funktionieren, wenn sie einwandfrei sein. Fehler wie Blasen oder fehlende Stellen sind eine Gefahr für die Funktionsweise der Beschichtungswirkung und bergen Gefahr von Korrosionsentstehung. Grund dafür können mangelnde Untergrundvorbereitung, unsachgemäße Applikation, falsche Umgebungsbedingungen oder mechanische Einwirkungen sein. Dringt einmal Feuchtigkeit an die Fehlstelle, führt die Korrosion meist zu fortführenden Beschichtungsschäden wie Abplatzungen. Ein rechtzeitiges und sachgemäßes Instandsetzen von defekten Beschichtungsstelle ist daher essentiell für den Korrosionsschutz und damit einhergehend für die Lebensdauer des stählernen Bauwerks. [90][91][258]

Globale Schadensfälle

Bereits im Jahre 1997 kommt Haardt zu der Prognose, dass „[a]ufgrund der [...] zunehmenden Verkehrsbelastung, dem Ansteigen der Achslasten und dem anwachsenden Alter der Ingenieurbauwerke im Zuge von Fernstraßen [...] in Zukunft mit einem Anstieg der Erhaltungskosten gerechnet werden [muss; Anm. d. Verf.]“ ([156], S.5) Da der aktuelle Brückenbestand in Deutschland zu einem Großteil aus den 1960er Jahren stammt, ist die Wahrscheinlichkeit für globale Schadensfälle wie Verformungen durch Anprall, Risse durch Ermüdung oder Verschleiß groß. Da die meisten Brücken nicht auf den zuvor genannten Belastungsanstieg ausgelegt sind, kommt es zudem zu einer Alterung und Versprödung des Stahls. Dies hat eine Verringerung der Fließgrenze und somit einer Senkung der Bruchdehnung zur Folge. Aus diesen Gründen sind auf dieserart Schäden besonderes Eigenmerk zu legen. Vor allem Risse an neuralgischen Konstruktionspunkten oder an Schweißnähten stellen unentdeckt ein großes Sicherheitsrisiko dar. [35][36][234]

Risse

Stählerne Bestandsbrücken sind häufig von Ermüdungsschäden betroffen [353]. Der Effekt, dass bei einer zyklischen Belastung weitaus geringere Beanspruchungen für das Bauwerk zugelassen sind als bei statischen Lasten, wird Ermüdung genannt. Demzufolge entstehen vor allem Risschäden an Stahlstrukturen wie Brücken nicht nur durch Erreichen der Streckgrenze, sondern auch durch Materialversagen- bzw. ermüdung durch große und häufige zyklische Beanspruchungen [221]. Maßgeblich ist bei der Ermüdung die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ [129]. Für Stahlbrücken ist dieses Phänomen von besonderer Bedeutung, da das Verhältnis von ständigen zu veränderlichen Belastungen bzw. Spannungen aufgrund des geringen Eigengewichts einer Stahlbrücke im Vergleich zu bspw. Beton-, oder Verbundbrücken besonders groß ist. Allein diese Spannungsdifferenz erhöht die Anfälligkeit von stählernen Brücken für Ermüdungsrisschäden. Diese treten sowohl längs als auch quer zur Krafrichtung auf. [129][221][300]

Ermüdungsschäden lassen sich im Grunde auf ungenaue bzw. veraltete Berechnungsverfahren, konstruktive Ausführungsfehler oder Materialversagen durch ungenügende Materialqualität zurückführen, da in den 1960er und 1970er Jahre noch kein Nachweis auf Ermüdung geführt wurde [362]. Das stetig wachsende Verkehrsaufkommen und die erhöhten Belastungswerte durch den Schwerlastverkehr führen in den letzten Jahrzehnten zu vermehrten lokalen Überbeanspruchungen und Spannungskonzentrationen in gewissen Bauteilbereichen z.B. der Lasteinleitungsstelle oder den Schweißnähten [353]. Beispiele für Ermüdungsrisse können Abb. 2.14 entnommen werden. Dort sind der Anschluss einer Längssteife im Laborversuch (links) sowie eine gerissene Schweißnaht zwischen Steife und Deckblech (rechts) zu sehen. [127][353]

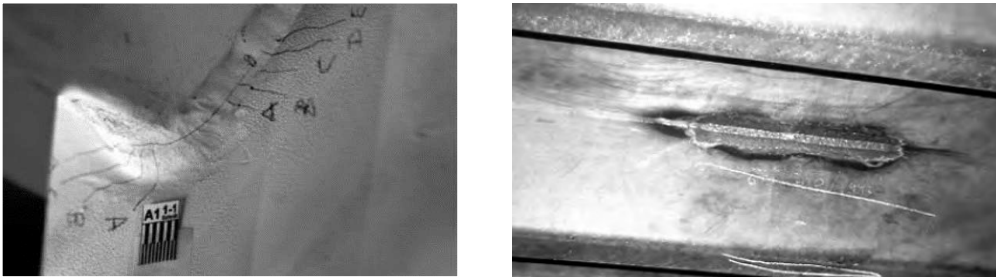


Abb. 2.14: Ermüdungsrisse an Längsrippen (links; ([215], S.47) und Deckblech (rechts; ([331], S.17)

Ermüdungsschäden können anhand ihres Auftretsortes in vier Kategorien eingeteilt werden. Diese folgen in aufsteigender Reihenfolge dem Lastabtrag einer orthotropen Fahrbahnplatte. Schäden an der Platte selbst gehören zur den Kategorien 1 sowie 2. Schäden am Querträger sind Kategorie 3 und Schäden am Hauptträger der Kategorie 4 zuzuordnen (siehe Abb. 2.15). Das Auftreten dieser Risse ist vor allem von der Nähe zu den (Haupt-) Fahrspuren abhängig. Je näher eine Verbindungsstelle zwischen den einzelnen Bauteilen zu einer hochbelasteten Fahrspur liegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für Ermüdungsrisse der Kategorien 1 bis 3. [127][362]

Schäden der Kategorie 1

Schäden in dieser Kategorie umfassen Ermüdungsrisse an Schweißnähten zwischen der Längsrippe und dem Deckblech. Sie sind bauweisenunabhängig, da die Form des Rippenquerschnitts hier keinen Einfluss nimmt. Die Risse der Schadenskategorie 1 treten oft an der Rippe selbst unter der Schweißnaht oder am Blech auf [353]. Die Gründe für diese Schädigungen sind insbesondere der erhöhte Schwerlastverkehr sowie das Nichteinhalten von Mindestabmessungen bei den konstruktiven Vorgaben, weswegen diese Schäden vermehrt in den Fahrspuren des LKW-Verkehrs aufgrund der örtlich hohen Ermüdungsbeanspruchungen entstehen [150]. Derartige Schäden können durch die Instandsetzung der defekten Schweißnaht oder bzw. und dem Reduzieren der Spannungen an dieser Stelle durch eine Verstärkung der Platte behandelt werden. Die Verstärkungen kann mithilfe des Aufklebens eines Stahlblechs oder des Aufbringens von Epoxy-Asphalt geschehen. [353][354]

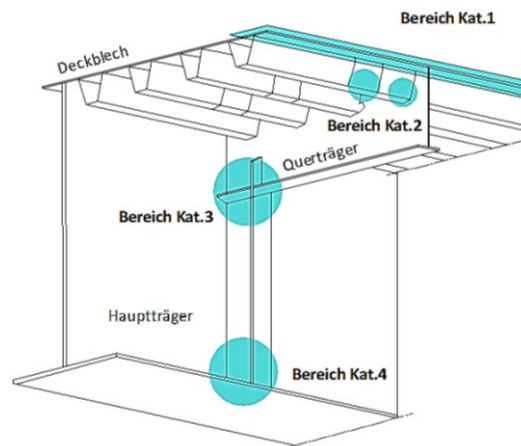


Abb. 2.15: Übersicht der Schäden der Kategorien 1 bis 4 an Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte (nach [125], S.2)

Schäden der Kategorie 2

Risschädigungen am Anschluss der Längsrippe werden der Schadenskategorie 2 zugeordnet. Schäden dieser Kategorie können sowohl an den geschweißten Stößen zwischen den Rippen selbst (Kategorie 2a), an der Schweißnaht eingepasster Längsrippen am Querträger (Kategorie 2b) sowie im Bereich von Aussparungen des Querträgers auftreten (Kategorie 2c). Sie sind an dieser Stelle nicht unabhängig des Rippenquerschnitts. Für die Instandsetzung wurde in der Vergangenheit häufig erneut das Schweißen genutzt, was jedoch nicht die gewünschte Dauerhaftigkeit erreicht hat. Bei Y-Steifen erzeugen bspw. genietete Winkelprofile eine befriedigende Erhaltungsmaßnahme. [215][332]

Schäden der Kategorie 3

Schädigungen, die am nicht direkt befahrenen Quersystem verortet sind, gehören zur Schadenskategorie 3. Sie treten besonders durch Materialermüdung durch stetig wachsenden Verkehr an den Schweißverbindungen, dem Querträger selbst oder den Querverbänden auf. Hohe Spannungskonzentrationen an diesen Stellen durch Lasteinleitung, Kraftumleitung, Eigenspannungen sowie konstruktiven Ungenauigkeiten sind hier die Ursache. Derartige Schäden treten meist zwischen der Quersteife des Hauptträgers und dem Untergurt des Querträgers auf. [362]

Schäden der Kategorie 4

In Bereichen von Anschlüssen im Hauptsystem, zum Beispiel am Steg oder Untergurt des Hauptträgers, treten die Schäden Kategorie 4 auf. Diese Schäden sind aufgrund rechnerischer Methoden zu erwarten, bisher in der Realität aber nicht aufgetreten. [127][332]

Ein mögliches Hilfsmittel, diese Schädigungen am Stahl optisch aufzunehmen, sind die im Allgemeinen als Drohnen bekannte Flugobjekte, welche im folgenden Unterkapitel entsprechend näher erörtert werden.

2.4 Unmanned Aerial System (UAS)

2.4.1 Kurzdarstellung UAS

Der Begriff „Drohne“ wird heute vor allem im zivilen, allgemeinen und nicht mehr nur rein militärischen Sprachgebrauch als unbemanntes Luftfahrzeug (Unmanned Aircraft System, UAS) verwendet. Neben der Abkürzung UAS wird die Abkürzung UAV (Unmanned Aerial Vehicle) mindestens genauso gängig verwendet. Ein UAV bezeichnet jedoch rein das unbemannte Luftfahrzeug, die fliegende Komponente eines UAS. Die meisten unbemannten Luftfahrzeuge besitzen demgegenüber zusätzliche sensorische Komponenten Steuerung oder Datenübertragung. Diese Verschmelzung macht aus einem lediglich flugfähigen UAV ein Unmanned Aircraft System. Es gibt ferngesteuerte (Remotly Piloted Aviation Systems, RPAS) und ganz autonom fliegende Luftfahrzeugsysteme. Bei RPAS steuert stets ein Pilot das Vehikel. Autonom fliegende UAS sind derartig programmiert, dass diese ohne Eingreifen eines Piloten automatisch und selbstständig fliegen können. [224][235][367]

Es wird zwischen zwei grundlegend differenten Bauweisen bei UAS unterschieden: es gibt die sogenannten Starrflügler bzw. Flächenflügler oder ‚Fixed-Wing Drones‘ sowie die Multikopter. Der Vorteil von Starrflüglern ist die große Tragfläche, welche einen Gleitflug und somit das Zurücklegen von weiten Strecken inklusive Nutzlasttransport erlauben. Dies ist für militärische Zwecke oft entscheidend. Multikopter werden hingegen eher als Industriedrohne eingesetzt. Sie haben Propeller und einen Elektromotor, welche einen senkrechten Start und Landung und das Fehlen einer Start- bzw. Landebahn erlauben. Die Anzahl sowie die Anordnung der Motoren bzw. Propeller geben den diversen Bauarten ihre Namen. So werden in der Industrie meist Hexa- oder Octokopter mit sechs bzw. acht Propellern verwendet. [218][241][311]



Abb. 2.16: Beispiel für ein Inspektions-UAS [53]

Industrielle Octokopter werden bereits am häufigsten für Bauwerksinspektionen eingesetzt. Diese haben speziell für die Inspektion seitlich oder unten angebrachte 180-Grad-Kameraaufhängungen, welche sich Gimbal nennt. Meist haben diese Flugobjekte jedoch nur eine kurze Flugzeit von circa 40 Minuten. Die Befliegung von längeren oder aufwendigeren Brückenkonstruktionen wie diese mit orthotropen Fahrbahnplatten müssen somit in mehreren Flügen

durchgeführt werden. Diese speziellen UAS sind spontan und mit wenig Zeitaufwand umrüstbar, um z.B. zwischen Foto-, Video- oder Wärmebildkamera zu wechseln. Die Kosten für derartige Systeme liegt bei circa 50.000 €. [53][96][112][168]

2.4.2 EU-Regularien für den Drohnenflug

Da Drohnen bzw. UAS vor allem im privaten Gebrauch in den letzten Jahren stetig steigend zum Einsatz kommen, hat die deutsche sowie europäische Gesetzgebung darauf reagiert und neue respektive angepasste Regelungen erschaffen. Seit dem 31.12.2020 wurde daher eine europäische Verordnung für den Einsatz und Betrieb von UAS eingeführt (Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24.05.2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge [99], welche im gesamten Europa, d.h. allen Mitgliedsstaaten, gilt und um jeweils nationale Regelungen erweitert werden kann. Sie gilt für alle UAS, welche ab dem 01.07.2022 verkauft werden. Für Deutschland gilt daher zusätzlich die Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). [99][226]

Die europäische Durchführungsverordnung soll der „Sicherheit der Menschen am Boden und anderer Luftraumnutzer während des Betriebs unbemannter Luftfahrzeuge“ ([99], L 152/45) dienen. In dieser werden UAS in drei Kategorien in Abhängigkeit ihres Betriebsrisikos sowie Merkmalen des Betriebsbereichs wie z.B. die Bevölkerungsdichte oder die Bebauung im überflogenen Bereich eingeteilt: ‚offen‘, ‚speziell‘ und ‚zulassungspflichtig‘. Diese sollen im Folgenden kurz erörtert werden. [99][241]

Offene Kategorie

Die offene Kategorie existiert für Einsätze geringen Risikos. Vor Einsatz des UAS sind weder eine Betriebsgenehmigung noch eine Betriebserklärung vonnöten [99]. Als Voraussetzung dafür gilt: „Das UAS fällt unter eine der in der Delegierten Verordnung (EU) 2019/945 genannten Klassen, ist privat hergestellt oder erfüllt die in Artikel 20 genannten Bedingungen“ ([99], L152/49, Artikel 4). Die genannte „Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme“ [61] ist verantwortlich für die EU-Konformitätserklärung der Hersteller von UAS sowie der notwendigen CE-Kennzeichnung der Flugsysteme. Somit soll sichergestellt werden, dass alle für den Verbraucher erhältlichen, im Allgemeinen genannten, Drohnen den europäischen Anforderungen entsprechen. Dazu führt die EU fünf Klassen (Klasse C0-C4) ein. Es gibt diverse Kriterien, nach denen die UAS in eine der genannten Kategorien eingeordnet werden. Darunter fallen u.a. die Höchstgeschwindigkeit, die maximal erreichbare Flughöhe, die Flugstabilität sowie die allgemeine Sicherheit. Eins der wichtigen Unterscheidungskriterien für die genannten Klassen ist das Startgewicht des UAS. In der Klasse C0 darf dieses nicht größer als 250 Gramm sein. In Klasse C4 darf es bis zu 25 Kilogramm betragen. Die Werte der Klassen C1 bis C3 liegen folglich zwischen den genannten Grenzwerten. Das Startgewicht umfasst nicht nur das UAS selbst, sondern auch alle Nutzlasten sowie ggf. vorhandenen Kraftstoff. [61][99]

Die Flugsysteme dürfen nicht über Menschenansammlungen fliegen und muss sich dauerhaft im Sichtbereich des Piloten bewegen. Hierfür gelten die Ausnahmen, wenn das UAS über

einen sogenannten „Follow-me-Modus“ verfügt und dem Piloten automatisch folgt oder wenn es einen zweiten Beobachter bzw. Helfer gibt, welcher dem Piloten stets die Lage des Flugsystems mitteilt. Des Weiteren dürfen keine explosiven, giftigen oder entzündbaren Stoffe oder Gase transportiert oder Material im Allgemeinen abgeworfen werden. [99]

Unterkategorien

Flugsysteme, welche nicht die Kriterien für die offene Klasse erfüllen, werden nach Teil A des Anhangs der EU-Verordnung 2019/947 in drei Unterkategorien eingeteilt. Die Kategorie A1 gilt nur für Flugsysteme, welche zu den Klassen C0 oder C1 gehören oder, falls es selbst gebaut ist, weniger als 250 Gramm wiegen. Auch hier gilt die Regel, dass keine Menschenansammlungen überflogen werden dürfen. Das UAS darf maximal 50 Meter vom Piloten entfernt sein, wenn es sich im „Follow-me-Modus“ befindet. UAS der Klasse C2 werden in die Unterkategorie A2 eingeordnet. Hier muss dauerhaft ein horizontaler Abstand zu unbeteiligten Personen von 30 Metern eingehalten sein. Flugsysteme, welche selbst gebaut wurden und weniger als 25 Kilogramm wiegen oder den Kategorien C2, C3 oder C4 angehören, fallen in die Unterkategorie A3. Hier erhöht sich der horizontale Mindestabstand zu Personen und Wohn-, Gewerbe und sonstigen Gebieten mit Bebauung auf 150 Meter. Es darf zu keinem Zeitpunkt eine unbeteiligte Person überflogen werden. [99]

Für diese genannten Unterkategorien A1-A3 schreibt die EU-Verordnung vor, dass der Pilot einen Online-Lehrgang inklusive theoretischer Prüfung abschließen muss. Diese Prüfung beinhaltet 40 Multiple-Choice-Fragen zu den Themen Flugsicherheit oder Luftrecht. Dieser Lehrgang kann online auf der Website des Luftfahr-Bundesamts absolviert werden. Fällt ein UAS in die Kategorie A2, muss der Pilot einen Nachweis für die Kategorie A1 bzw. A3 sowie über ein Fernpiloten-Zeugnis verfügen, welches eine weitere Prüfung verlangt. [99][222] (siehe Tab. 2.7).

Details zur offenen Betriebskategorie gemäß EU-Verordnung 2019/947						
Unterkategorie	Drohnenklasse	Registrierung	Direkte Fernidentifizierung	EU-Drohnenführerschein	Unbeteiligte Personen	Industrie-, Gewerbe- & Wohngebiete
A1	Privat gebaut < 0,25 kg	Nur Modelle mit Kamera	Nein	Nein	Überflug erlaubt	Überflug erlaubt
	C0 < 0,25 kg	Nur Modelle mit Kamera	Nein	Nein	Überflug erlaubt	Überflug erlaubt
	C1 < 0,90 kg	Ja	Ja	EU-Kompetenznachweis A1/A3	Überflug erlaubt	Überflug erlaubt
A2	C2 < 4,00 kg	Ja	Ja	EU-Fernpilotenlizenz A2	Mindestabstand 30m	Überflug erlaubt
A3	C2 < 4,00 kg	Ja	Ja	EU-Kompetenznachweis A1/A3	Größerer Abstand (keine Gefährdung)	Mindestabstand 150m
	C3 < 25,00 kg	Ja	Ja	EU-Kompetenznachweis A1/A3	Größerer Abstand (keine Gefährdung)	Mindestabstand 150m
	C4 < 25,00 kg	Ja	Nein	EU-Kompetenznachweis A1/A3	Größerer Abstand (keine Gefährdung)	Mindestabstand 150m
	Privat gebaut < 25 kg	Ja	Nein	EU-Kompetenznachweis A1/A3	Größerer Abstand (keine Gefährdung)	Mindestabstand 150m

Tab. 2.7: Details zur offenen Betriebskategorie ([99], Anhang Teil A; EU-Verordnung 2019/947)

Spezielle Kategorie

Für den Einsatz eines UAS, welches nicht die Bedingungen für die ‚offene‘ Kategorie erfüllt, und somit in die ‚spezielle Kategorie‘ fällt, muss der Pilot eine sogenannte Betriebsgenehmigung bei der zuständigen Behörde einholen. Dafür ist vorab eine Risikobewertung zu erstellen, indem der Einsatz mit dem Flugsystem, die durchgeführten Tätigkeiten, der geografische Betriebsbereich sowie die Erfahrung des Piloten beschrieben werden. Das Risiko für am Boden befindliche Personen (Bevölkerungsdichte) sowie den Luftverkehr müssen bewertet und ggf. Gegenmaßnahmen vorgeschlagen werden. Bei den „Sicherheitsmaßnahmen für Menschen am Boden“ ([99], L152/53, Artikel 11) handelt es sich zum Beispiel um zeitliche oder geografische Einschränkungen des Flugeinsatzes. Die ausgestellte Betriebsgenehmigung kann Beschränkungen zeitlicher oder geographischer Art haben und für einen ein- oder mehrmaligen Betrieb gelten. [99][223]

Zulassungspflichtige Kategorie

Werden Menschenansammlungen überflogen, Menschen oder gefährliche Güter transportiert, ist eine Zulassung nach der Delegierten Verordnung (EU) 2019/945 [61] verpflichtend. Dabei handelt es sich um die Konformitätserklärung des Herstellers, die CE-Kennzeichnung des Flugsystems (UAS) und der Pilot muss zusätzlich ein sogenanntes Betreiberzeugnis sowie gegebenenfalls eine Lizenz für Fernpiloten besitzen. [99]

Registrierungspflicht

Die Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) [227] schreibt vor, dass sich Betreiber von UAS immer registrieren müssen, sobald ihr Flugsystem nicht in die oben beschriebene offene Kategorie fällt, also weniger als 250 Gramm Startgewicht besitzt. Die Registrierung kann online auf der Website des Luftfahrtbundesamts erfolgen. Nach erfolgreicher Registrierung, erhält der Betreiber des UAS eine elektronische Registrierungsnummer, welche für die Person, nicht die benutzten Geräte gilt. Das bedeutet, alle UAS der offenen und speziellen Kategorie, welche diejenige Person verwendet, fallen unter diese Registrierungsnummer. Lediglich Flugsystemen, welche in die zulassungspflichtige Kategorie fallen, werden selbst registriert. Die jeweilige Registrierungsnummer muss auf jedem UAS angebracht sein. [99][225]

2.4.3 Deutsche Regularien für den Drohnenflug

Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO)

In der deutschen Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) [226] sind alle Regeln wie Meldepflichten, Verkehrsregeln, die Nutzung des Luftraums oder Vorschriften für das Luftfahrtpersonal beschrieben, die für den nationalen Luftverkehr und Luftfahrzeuge aller Art gelten. Flugmodelle und Drohnen bzw. UAS werden in Abschnitt 5a der genannten Verordnung geregelt. Die Paragraphen 21a sowie 21b sind bei der UAS-unterstützten Bauwerksinspektion maßgebend, da sie unter anderem Eigenschaften und Einsatzbereiche des Flugsystems beinhalten, welche für eine Flugerlaubnis unerlässlich sind. So gibt § 21b unter anderen vor, dass „über und in einem seitlichen Abstand von 100 Metern von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen, soweit nicht die zuständige Stelle dem Betrieb ausdrücklich zugestimmt hat“

([226], § 21b Absatz 1) das Fliegen mit UAS verboten ist. Erlaubt ist der Flugbetrieb „durch oder unter Aufsicht von Behörden, wenn dieser zur Erfüllung ihrer Aufgaben stattfindet“ ([226], § 21a Absatz 2). Auch hier gelten die Regularien des Bundesdatenschutzgesetzes (BDSG) [18] und der Datenschutzverordnung (DSGVO) [98], sollten Aufzeichnungen des Fluges stattgefunden haben. [176][182][226]

2.4.4 Spezifische Regelungen für den Einsatz von UAS zur Inspektion von Anlagen und Gebäuden

DIN 5452-Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS)

Eine Sammlung zum Thema der unbemannten Luftfahrt wurde vom Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL) in der Normenreihe „DIN 5452-Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS)“ zusammengetragen. Die Reihe besteht aus insgesamt acht Teilen, wovon bis heute vier veröffentlicht sind [75][109]. Der 2021 überarbeitete Teil 1 „Begriffe“ [75] fasst alle Aspekte und Begriffe in Zusammenhang mit dem Einsatz von UAS zusammen, welche unter anderem bereits in EU-Verordnungen definiert werden. Der zweite Teil, veröffentlicht im Oktober 2019, „Anforderungen an Fernpiloten“ [76] beinhaltet alle theoretischen und praktischen Anforderungen für Piloten der UAS und deren Ausbildung [76]. Der dritte der bisher veröffentlichten Normenteile ist DIN 5452-Teil 5. Dieser behandelt das digitale Aufmaß von Dächern mittels UAS mit einem standardisierten Vermessungsverfahren, damit die Begehungen von Dächern in ihrer Gefährlichkeit reduziert werden [94]. Teil 6 behandelt das „Geodatenmanagement für UTM-Systeme“ (UTM = UAS Traffic Management) [77]. Hierbei handelt es sich um die effiziente Koordinierung des Luftraums bei einer großen Zahl von fliegenden UAS, um den Luftraum abzusichern. Dieses System basiert auf der Verarbeitung von Geodaten [77]. Die Teile 7 „Inspektion“ und 8 „UAS Operations Manual“ werden die Anforderungen für eine UAS-unterstützte Inspektion sowie eine Art Betriebshandbuch darstellen, sind jedoch noch nicht veröffentlicht [78][79][110][182]

VDI 2879-Inspektion von Anlagen und Gebäuden mit UAS

2018 hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) die Richtlinie „2879-Inspektion von Anlagen und Gebäuden mit UAV (Flugdrohnen)“ [367] veröffentlicht, welche als Leitfaden für Dienstleister von UAS-unterstützten Gebäudeinspektionen dient. Parallel stellt sie eine Hilfe für Auftraggeber einer Inspektion dar, um die Qualität der Dienstleistung einzuschätzen und soll schon vorhandene Instandsetzungsrichtlinien ergänzen, jedoch speziell für den Einsatz von UAS hinsichtlich der rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben [315]. Sie stellt übersichtlich alle geltenden Gesetze sowie Vorschriften und einzuholende Flugerlaubnisse dar, welche abhängig sind vom Einsatzort des UAS (innerhalb/außerhalb geschlossener Ortschaften, innerhalb geschlossener Räume) [369]. Notwendige Schritte von Flugvorbereitung, hier im Speziellen die Risikoanalyse vor dem Flug, über die Flugdurchführung und -nachbereitung werden ebenfalls erläutert. Anhang A der VDI Richtlinie 2879 [367] hilft bei der Risikoanalyse, um Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie die Auswirkung von ggf. eintreffenden Ereignissen ins Verhältnis zu setzen. Ein weiterer Anhang, Anhang B, ist eine Flugprotokollvorlage sowie eine

Checkliste, die vor Beginn eines Flugs bei der Flugvorbereitung helfen soll, die Flugbedingungen und die Sicherheit des Flugsystems zu prüfen und damit sicherzustellen. Die erforderlichen Kenntnisse an den Piloten sind ebenfalls auf dieser Checkliste vermerkt. [110][366][367]

Insgesamt gibt es schon einige industriell fertige Produkte und Einsätze für UAS bei der Inspektion und Maschinen, Strommasten oder industriellen Anlagen wie Tanks oder Schornsteine. Diese Technologien beschränken sich jedoch meist auf immer gleiche Bauweisen, ein Fakt, welcher bei Brücken nicht gegeben ist, und in den meisten Fällen auf Betonkonstruktionen zutrifft [323]. Stahlbrücken sind deutlich komplexere Bauwerke und nahezu immer einzigartig. Sie besitzen Unikatcharakter. Außerdem handelt es sich bei dieser Art von UAS um Industriedrohnen, welche im mittleren fünfstelligen Eurobereich liegen. Derart hohe Anschaffungen sind für kleine Prüffingenieurbüros meist nicht rentabel. [261][266][272]

2.5 Optische Verfahren zur Schadensdetektion

2.5.1 Inspektion und Schadenserkenkung mittels Bildmaterial und UAS

In Literatur, Forschung als auch Praxis werden UAS bereits vielfach und als gängigstes Hilfsmittel für Inspektionen verschiedenster Art eingesetzt und erprobt [260][270]. Vor allem immer gleiche Bauweisen bzw. Bauteile bieten sich für eine UAS-unterstützte Inspektion an [174][359]. Darunter fallen beispielsweise Photovoltaikanlagen, Pipelines, (Stark-) Strommaste, Überlandleitungen, Betontürme oder Offshoreparks [49]. Auch werden Unmanned Aerial Systems für die Erkennung von Naturgefahren oder die geodätische Vermessung von Bauwerken, Straßen oder Landstrichen verwendet, um Größenmessungen, Lageabweichungen, Massenermittlungen oder Vegetationsmanagement aufzunehmen bzw. durchzuführen [46][383]. Die genannten Anwendungen basieren alle auf dem Prinzip der Photogrammetrie, bei der aus dem aufgenommenen Bildmaterial eine texturierte Punktwolke entsteht [132]. Auf diese werden die Bilder angewandt und so entsteht eine Art realitätstreue Ansicht der aufgenommenen Landstriche oder Bauwerke, an der Lageabweichungen oder Veränderungen der Sollfläche erkennbar sind [206]. Auch werden neben reinen Bildaufnahmen (thermische) Aufnahmesysteme wie Wärmebildkameras oder Laser verwendet [311]. Bei der Anwendung für Bauwerke, insbesondere für Brücken, zeigt sich eine Dominanz des Werkstoffs Beton [162]. Das liegt bei Bauwerken wie Türmen oder Tunneln an der Einfachheit der Bauweise [56]. Wenn Brücken mittels UAS untersucht werden, sind diese derzeit ebenfalls nur aus Beton, weil diese den Großteil der Straßenbrücken ausmachen, eine eher einfache und simple Bauweise bzw. Oberfläche mit großflächigen Bauteilen aufweisen sowie eher wenige und dabei recht ähnliche Schädigungen wie Risse oder Riesenster aufweisen [100][345]. Da Stahlbrücken komplexerer Bauweise sind und eher Unikatcharakter aufweisen, stellt sich die Befliegung mittels UAS und bildbasierte Schadensauswertung an dieser Bauweise als schwierig heraus [244]. [38][95][265][344]

Neben dem UAS gibt es einige Hilfsmittel im aktuellen Forschungs- und Anwendungsfeld, welche die Bild- bzw. Datenerfassung auch auf andere Weise ermöglichen [162]. So werden beispielsweise bei einigen Inspektions-Apps für die Brückeninspektion Tablets oder Handys verwendet, um die Bilder direkt aufzunehmen und Schäden daran verzeichnen zu können [335].

Der Prüfer befindet sich dabei jedoch wie gewohnt am Gebäude, um die Fotos aus der Nähe aufnehmen zu können. Um alternativ Bilder, und besonders Laserscandaten, aufnehmen zu können, gibt es marktfertig ein tragbares System, das ähnlich eines Rucksacks vom Prüfer angezogen wird. Mit diesem bewegt sich der Prüfer am Bauwerk entlang, während dieses mittels Laserscan und Kamera für die anschließende photogrammetrische Modellbildung aufgenommen wird [245]. Für den Innenraum von Brückenhohlkästen oder Ausnahmesituationen wie einsturzgefährdete Bauwerke gibt es Roboterhunde, welche ebenfalls mit einer 360-Grad-Kamera sowie einem Laserscanner ausgestattet sind und ferngesteuert das Bildmaterial aufnehmen können [384]. Diese besonderen Roboter kosten derzeit jedoch ca. 75.000 US Dollar [259]. Im Bereich des Kanalbaus wird an Robotersystemen geforscht, welche mit einer Sensorkombination aus Mehrkamarasystemen und 3D-Ultraschallscanner ausgestattet sind, um die Kanalinnenwände aus Beton auf Risse und Fugenveränderung hin zu untersuchen [117]. Oft sind es nicht Bildaufnahmen, sondern Laserdaten, welche vor allem für Betonbauwerke eingesetzt werden. So können Lasersysteme den Hammerschlagtest im Betonbau durchführen, um Fehlstellen durch Resonanzschwingungen zu untersuchen [17]. [186][228][269]

In einem weiteren Schritt im technologischen Fortschritt sollen nicht nur die Bauwerke oder Landstriche photogrammetrisch aufgenommen und dargestellt werden, es sollen auch die Abweichungen bzw. Schädigungen mit Hilfe von automatischen Algorithmen erkannt werden, was in der Automobilindustrie, aber auch bei Betonbauwerken, bereits in der Praxis umgesetzt wird [299]. Bei Stahlbrücken wiederum ist diese Automatisierung derzeit nur für großflächige Schäden wie Korrosion oder abplatzende Beschichtung möglich [108][140]. Detaillierte Erkennungen funktionieren derzeit nur unter Laborbedingungen [140]. Aufgrund des geringen Kontrasts zwischen Oberfläche und Riss im Stahlbrückenbau, im Vergleich zu Betonoberflächen, machen auch Verschattungen auf dem Bildmaterial das Erkennen von Abnormalien mittels Algorithmus bzw. maschinellen Lernens schwierig [233]. Zudem sind diese Konstruktionen feingliedriger und unikaler als Betonbrücken [167]. Eine vollständig automatisierte Schadenserkennung ist bei Stahlbrücken folglich bisher nicht umsetzbar, weswegen in dieser Arbeit eine händische Durchsicht durch einen Prüflingenieur vorgesehen ist. [152][187][282]

Hinzu kommt, dass eine Prüfung mittels UAS nach DIN 1076 derzeit kein anerkanntes Prüfverfahren darstellt und folglich nur als visuell unterstützendes Hilfsmittel bei einfachen Prüfungen und Bauwerksüberwachungen eingesetzt werden darf [69]. Dahingegen hat der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) eine Richtlinie für die „Inspektion von Anlagen und Gebäuden mit UAV (Flugdrohnen)“ [367] als Leitfaden für dieses Anwendungsgebiet veröffentlicht (siehe Kapitel 2.4.3). Diese Richtlinien ergänzt bestehende Instandsetzungsrichtlinien um den Aspekt des UAS und ist ein weiterer Grund für den erhöhten Einsatz von UAS für Schadenserkennungen bei Bauwerken wie industriellen oder technischen Anlagen, Strommasten, Windrädern oder Silos im Gegensatz zu stählernen Brücken. [336][367]

2.5.2 Automatisierte Schadenserkennung

Mithilfe von künstlicher Intelligenz (KI) ist es derzeit bereits einfach möglich, bestimmte Objekte wie Gesichter oder PKW auf Bild- bzw. Videomaterial automatisch erkennen und analysieren zu lassen [330]. Dieses Prinzip funktioniert mithilfe von Algorithmen, welche über das Klassifikationskonzept bestimmte Analysen automatisch durchführen können. Dieses Prinzip wird ‚Maschinelles Lernverfahren‘ genannt. Für die Anwendung von automatisierter Erkennung bzw. die Analyse bestimmter Objekte oder Schadenstypen, welche für diese Arbeit von Bedeutung sind, kommen insbesondere sogenannte ‚Neural Networks‘ (neuronale bzw. fallende Netze) zum Einsatz (siehe Abb. 2.17). Im allgemeinen Sprachgebrauch werden diese auch ‚Künstliche Intelligenz‘ oder ‚Deep Learning‘ genannt. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist das notwendige Training mit sehr großen Datenmengen, welche manuell von Experten erzeugt bzw. entsprechend annotiert (= markiert bzw. definiert) werden müssen, um die Lerngrundlage für das neuronale Netz zu bilden. Für Stahlschäden sind Annotationen händische Markierungen von fehlerhaften Stellen in Bilddateien z.B. von Rost oder Rissen (siehe Abb. 2.18). [140][148][166][190][212]

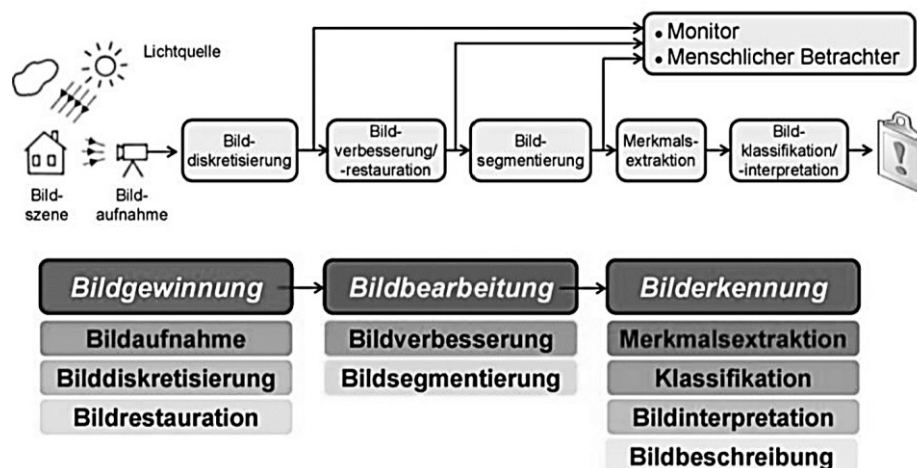


Abb. 2.17: Verarbeitungsschritte der Bildanalyse ([140], S. 27)

Automatisierte Schadenserkennung ist in anderen Bereichen des Baugewerbes als auch in der Industrie bereits im Einsatz. Besonders bei Betonbauteilen ist die Erkennung aufgrund der wenigen unterschiedlichen Schadensmechanismen fortgeschritten [47]. Auch bei der Inspektion vom Inneren von Kanalsystemen aus Betonrohren werden Kamerasysteme mit nachgeschalteten Deep Learning-Verfahren zur Erkennung von Rissen im Beton verwendet [118]. In der Automobilindustrie ist der Einsatz ebenfalls gut möglich, weil es sich auch hier um nur wenige und immer sehr ähnliche Schädigungen in der Lackierung der PKW handelt. Bei einem praxiserprobten System fährt das PKW dabei durch einen Tunnel, wo seine Oberfläche gescannt wird [299]. Dieses Verfahren funktioniert auch ohne das zuvor beschriebene Verfahren der Photogrammetrie, sondern rein über die optische Betrachtung. [119][242][308]

Durch den Unikatcharakter von Stahlbrücken sind diese Verfahren für die diversen und sehr unterschiedlichen Schäden im Stahlbrückenbau derzeit noch nicht geeignet. Die Schäden an Stahlbrücken begrenzen sich nicht nur auf Risse oder Kiesnester wie im Betonbau. Hier gibt es fehlende, lockere oder korrodierte Verbindungsmittel, verschiedene Arten und Ausprägungen von Korrosion, haarfeine Risse in Schweißnähten, abgeplatzte Beschichtung und vieles mehr, was eine zuverlässige automatisierte Erkennung bisher erschwert hat. Erste Versuche haben diesbezüglich in der Forschung jedoch stattgefunden. Dabei muss die automatisierte Erkennung sowohl die Lokalisation eines Schadens als auch die Schadensart klassifizieren können. Ein zweistufiges Verfahren soll dabei helfen, auf dem Bildmaterial zunächst die relevante stahlbauliche Struktur zu erkennen. In der zweiten Stufe sollen anschließend innerhalb der erkannten stahlbaulichen Struktur die Unregelmäßigkeiten wie Korrosion, Risse, Beschmutzungen oder fehlerhafte Verbindungsmittel erkannt werden. Eine weitere Schwierigkeit ist die variierende Abbildungsgröße durch den UAS-Flug. Abstand zum Objekt, Lichtverhältnisse und Qualität variieren bei dem Bildmaterial stark. [140]

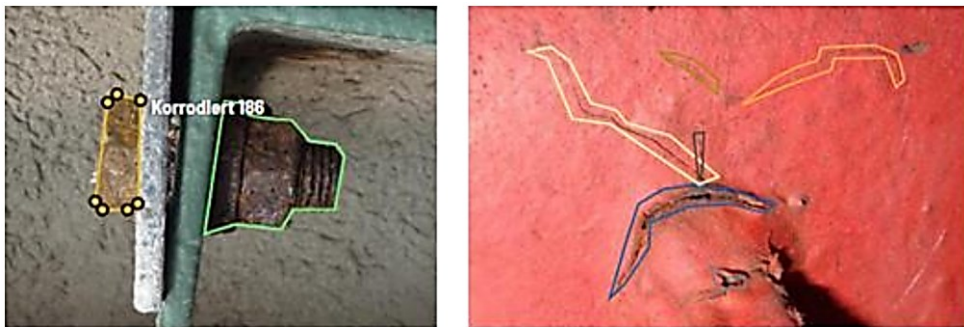


Abb. 2.18: Annotierung von korrodiertem Verbindungsmittel (l.) und Rissen in Stahl (r.) ([140], S. 93)

In [140] konnten erste Erkennungen von Schäden wie Korrosion ab einer Größe von 1 cm² oder abgeblätterte Beschichtung dieser Größe stattfinden. Auch Verschmutzungen wie Moos, Graffiti oder Vogelkot sowie Risse ab 0,5 mm Rissweite können unter Laborbedingungen automatisch erkannt werden (siehe Abb. 2.19).

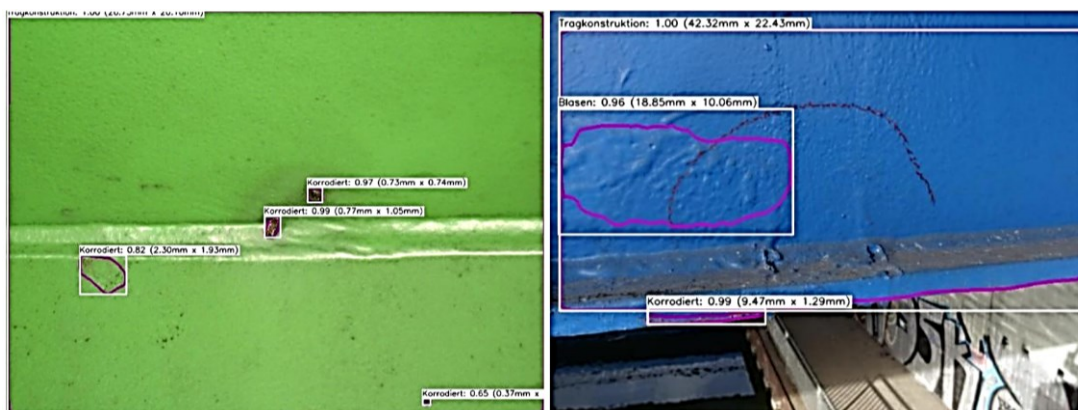


Abb. 2.19: Automatische Erkennung von Korrosion (l.) und Blasen in der Beschichtung (r.) ([140], S. 96)

Die automatisierte Schadenserkennung an aufgenommenem Bildmaterial würde für die Brückenprüfung im Allgemeinen und das in dieser Arbeit zu entwickelnde Bewertungskonzept im Speziellen eine erhebliche Arbeitserleichterung und Qualitätsverbesserung auf allen Ebenen darstellen. Der maßgebliche Zeitaufwand für eine Brückenprüfung liegt besonders in der Betrachtung der Brücke bzw. des Bildmaterials und der dabei stattfindenden Schadenssuche und -analyse (siehe Kapitel 6.2.1). Könnte ein neuronales Netz bzw. eine Künstliche Intelligenz zumindest eine Voranalyse vom Bildmaterial der Brücke durchführen bzw. eine Vorauswahl der vorhandenen Schäden an der Brücke treffen, könnte ein Prüfer eine höhere Anzahl von Brücken in derselben Zeit prüfen (siehe auch Kapitel 6.4 und 7.2). Daher ist es wichtig, diese Möglichkeit, sobald die automatische Erkennung durch neuronale Netze für stählerne Schäden weit genug entwickelt ist, als grundlegende Einsatz- und Entwicklungsmöglichkeit für das hier zu entwickelnde Verfahren zu sehen.

Da jedoch die Qualität zur automatisierten Schadenserkennung zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht von ausreichender Qualität und noch sehr grob ist [140], wird das hier zu erarbeitende Konzept mit einer händischen Schadenserkennung, welche vom Prüfer anhand des aufgenommenen Bildmaterials erfolgt, erstellt. Die Methodik dieser Arbeit wird jedoch so konzipiert, dass eine Erweiterung durch eine automatisierte Schadensanalyse mithilfe von neuronalen Netzen vorgesehen und für eine Implementierung dieser vorbereitet ist, sodass sich der Nutzen des Konzeptes mit der Entwicklung der Künstlichen Intelligenz noch einmal stark erhöhen kann.

2.5.3 Kamera- und Fototechnik

Kamera

Es gibt diverse Kameratypen wie Kompakt-, Bridge-, Spiegelreflex- sowie spiegellose Systemkameras, welche sich in ihrer Funktionsweise und Ausstattung unterscheiden. Sind Objektiv und Blitz fest im Gehäuse eingebaut, handelt es sich um Kompakt- oder Bridgekameras. Spiegelreflex- und Systemkameras können verschiedenste Objektive oder Blitze extern anschließen. [31]

Abgeleitet vom Namen, befindet sich im Inneren einer Spiegelreflexkamera ein Spiegel. Schaut der Fotografierende durch den Sucher, tritt durch das Objektiv bzw. die Linse Licht, welches auf ebendiesem Spiegel fällt. Dort wird es reflektiert und mithilfe eines Prismas in den Sucher, oder Okular, geleitet. Bei Betätigung des Auslösers klappt der Spiegel hoch, das Licht erreicht den dahinterliegenden Sensor. Der verwendete Sensor dieserart Kamera ist in zwei Größen möglich: 24 x 36 mm für Vollformat bzw. Kleinbild und ca. 15 x 23 mm als Advanced Photo System Classic (APS-C) bzw. Crop. Diese Werte können jedoch je nach Hersteller variieren. Dieserart Vollformat-Sensoren sind kostspieliger als die der Kompaktkameras, jedoch weisen sie geringeres Bildrauschen, eine höhere Lichtempfindlichkeit sowie einen größeren Kontrastumfang (das Verhältnis zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Punkt) auf. Der Grund dafür ist, dass sich auf einem größeren Sensor größere und eine höhere Zahl Pixel befinden. [12][31][143]

Bei einer spiegellosen Kamera gelangt das Licht jederzeit zum Sensor, da kein Spiegel vorhanden ist. Der Fotografierende kann dabei durch den digitalen Sucher jederzeit das Bild sehen, das der Sensor bei Knopfdruck aufnehmen wird. Durch den fehlenden Spiegel handelt es sich hier um eine kompaktere Bauweise, was der Grund für die Namensgebung der Kompaktkamera ist. Hier ist die Sensorgröße circa 6,2 x 8,3 mm (siehe Abb. 2.20). [12][143][251]

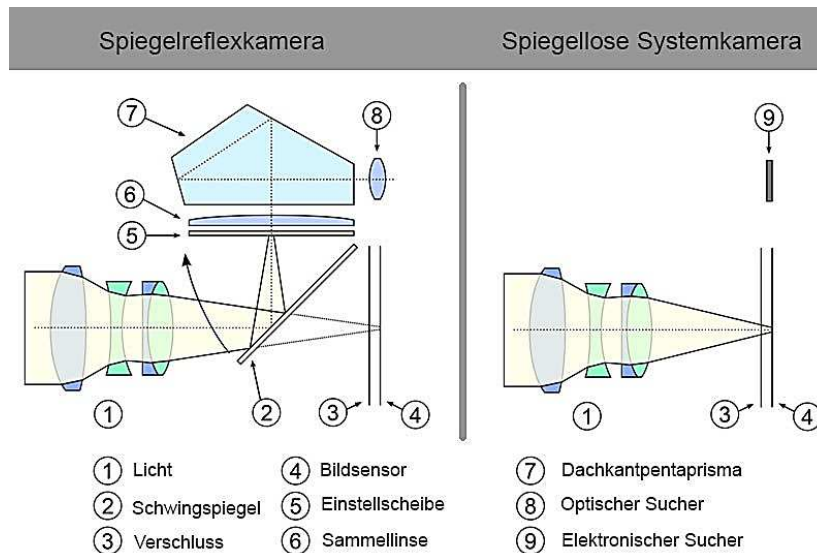


Abb. 2.20: Funktionsweise von Spiegelreflex- und spiegelloser Kompaktkamera [251]

Bei einer UAS-unterstützten Bauwerksinspektion ist eine Kamera mit ausreichender Bildqualität essentiell, da aus einer Entfernung von bis zu zwei Metern bspw. feine Risschäden auf dem Bildmaterial zu erkennen sein müssen. Da Spiegelreflex- oder Kompaktkameras über den zuvor genannten größeren Sensor verfügen, nehmen diese grundsätzlich Bildmaterial besserer Qualität auf. Aus diesem Grund wird für das hier geplante Verfahren eine solche Kamera gewählt. Neben diesen Eigenschaften ist die Brennweite für die Bildaufnahmen von stählernen Brückenteilen essentiell. Je größer der Blickwinkel einer Kamera ist, desto mehr kann die UAS-unterstützte Aufnahme vom Bauwerk ablichten und als Analysematerial zur Verfügung stellen.

Objektiv

Da ein Objektiv an Spiegelreflex- oder Kompaktkameras extern angeschlossen werden muss, ist hier die richtige Auswahl ebenfalls essentiell für die finale Bildqualität. Ein Objekt besteht aus multiplen Linsen. Die genaue Anzahl kann je nach Objektiv variieren. Durch das Zusammenspiel der verschiedenen Charakteristiken der einzelnen Linsen wirken sie wie eine Sammellinse, durch die die eintreffenden Lichtstrahlen gebrochen werden und anschließend in einem Punkt, dem Brennpunkt, zusammenkommen (siehe Abb. 2.21). Einige der Linsen dienen gleichzeitig der Fokussierung. Ihr Abstand zum Sensor kann je nach Entfernung des zu fotografierenden Objekts variiert werden. Dementsprechend ist auch die Entfernung, in welcher die Motive scharf gestellt werden können, variierbar. [12]

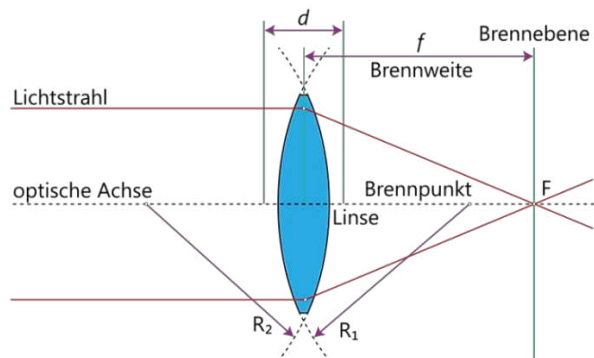


Abb. 2.21: Systemskizze zur Erklärung von „Brennweite“ und „Brennpunkt“ (F') [249]

Brennweite

Das wesentlichste Merkmal eines Objektivs ist die Brennweite. Dabei handelt es sich um die Distanz zwischen dem Linsenmittelpunkt sowie dem Brennpunkt (siehe Abb. 2.21). Auf einer Fotografie wird mehr Inhalt abgebildet, je kleiner die Brennweite des Objektivs ist. Das heißt, der Blickwinkel für den Betrachter wird größer. Abb. 2.22 dient der Verdeutlichung dieses Prinzips. Es sind Bildaufnahmen mit Brennweiten von 18 mm, 24 mm sowie 35 mm dargestellt, welche von derselben Aufnahmeposition gemacht sind. Mit zunehmender Brennweite wird das aufgenommene Motiv größer. Da sich jedoch der Blickwinkel pro Fotoaufnahme reduziert, wird ein immer geringerer Anteil des Motivs abgebildet. Eine Brennweite von 50 mm entspricht in etwa dem Blickwinkel des menschlichen Auges, weswegen Objektive mit dieser Brennweite als Standardobjektiv gelten. Objektive mit geringeren Brennweiten werden Weitwinkelobjektiv genannt und meist für Landschaftsaufnahmen genutzt. Für weit entfernte Motive wie beispielsweise Tiere sind sogenannte Teleobjektive sinnvoll, da sie eine Brennweite größer als 50 mm haben. [170]

Objektive mit nur einer unveränderlichen Brennweite werden Festbrennweitenobjektive genannt. Optische Qualität und Lichtstärke sind hier optimal, da die Objektive nur für diese Brennweite konstruiert sind. Dagegen kann bei Zoomobjektiven die Brennweite stufenlos eingestellt werden, ein Wechsel des Objektivs ist hier nicht vonnöten. Durch diese Flexibilität leiden jedoch die Lichtstärke sowie die Qualität der Bildaufnahmen. Die Größe des Blickwinkels, welcher eine Kamera bietet und für die Aufnahme von Bauwerksbereichen wichtig ist, ist nicht allein von der soeben erklärten Brennweite abhängig. Die bereits oben erwähnte Sensorgröße ist ebenfalls ein Indikator für die Größe des Blickwinkels. Je kleiner der Sensor ist, desto kleiner ist der aufnehmbare Bildausschnitt. [12][170]

Zusätzlich ist die sogenannte Bodenauflösung (Ground Sample Distance = GSD) von Bedeutung. Sie beschreibt, wie viele Zentimeter des aufgenommenen Motivs pro Bildpixel dargestellt werden. Dieses Wissen ist wichtig, um den (Flug-) Abstand zum aufzunehmenden Objekt zu ermitteln. Um beispielsweise Stahlrisse erkennen zu können, ist ein GSD von 0,02 cm/pixel (1 Pixel = 0,04 mm²) sinnvoll. Das menschliche Auge hat im Vergleich dazu beispielsweise bei einem Abstand von einer Armlänge (63,5 cm) ein GSD von 0,1 mm. [142][287][352]



Abb. 2.22: Bildaufnahmen mit Vollformatkamera; 18, 24, 35 mm Brennweite (von links nach rechts) ([25], S.26)

Auf Abb. 2.23 ist dargestellt, dass die mit einem APS-C-Sensor aufgenommene Fotografie lediglich einen Ausschnitt der mit einem Vollformat-Sensor aufgenommenen Fotografie abbildet. Ausschnitte von Aufnahmen mit einer Vollformatkamera sind größer (siehe Abb. 2.23, r.o.), wohingegen die der APS-C-Kamera abgeschnitten sind (siehe Abb. 2.23, r.u.). Objektiv sowie Brennweite variieren bei diesen Aufnahmen nicht.

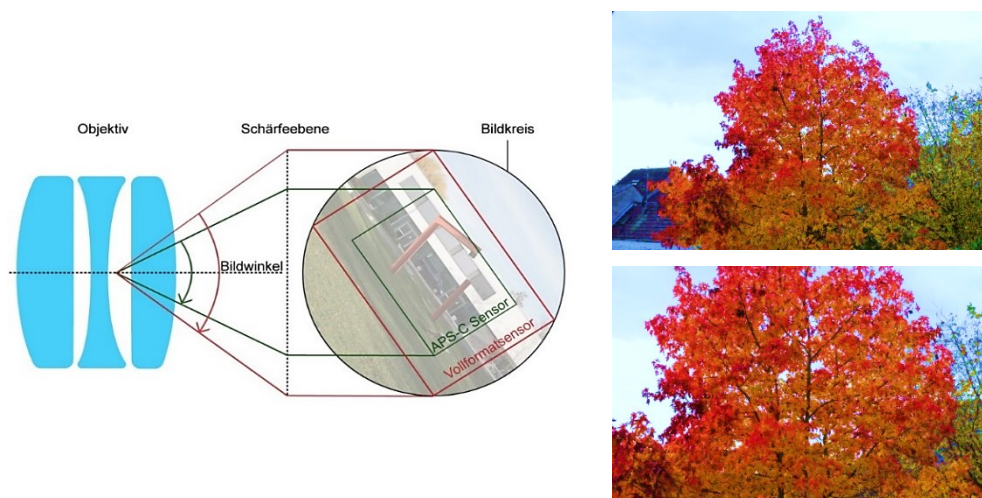


Abb. 2.23: Bildausschnitte bei Verwendung eines Vollformat- (l. + r.o.) und APS-C- Sensors (l. + r.u.) (l.: [365]; r.: nach [25], S.27)

Wegen dieser Differenz zwischen Vollformat- und APS-C-Kameras gibt es Umrechnungsfaktoren bzw. Formatfaktoren. Die auf einem Objekt angegebene Brennweite bezieht sich stets auf das Vollformat. Da ein Objektiv ebenfalls auf Kameras mit APS-C-Sensor verwendet werden kann, gibt der Formatfaktor an, welchem Wert das Objektiv bzw. die Brennweite bei einer Vollformatkamera entspricht. Durchschnittlich liegt der Formatfaktor zwischen 1,5-1,6. Das bedeutet, wird beispielsweise ein 35 mm-Objektiv in Kombination mit einer APS-C-Kamera und

einem Formatfaktor von 1,6 verwendet, würde der Bildausschnitt genauso groß sein als wenn mit einer Vollformatkamera und einem 56 mm-Objektiv gearbeitet werden würde. [170]

Lichtstärke

Die maximale Blendenöffnung ist das Maß einer weiteren Eigenschaft eines Objektivs. Je weiter die Blende eines Objektivs öffnen kann, desto mehr Licht gelangt ins Objektiv und desto größer ist die Lichtstärke. Wird bei nicht optimalen Lichtverhältnissen fotografiert, beispielsweise unter Brücken, zwischen zwei Nebenträgern oder in Nähe der Auflager, ist ein lichtstarkes Objektiv essentiell. [12][170]

2.6 Voxelisierung von Objekten

Für die Befliegung eines Bauwerks mit einem UAS und anschließender Bewertung des konstruktiven Zustands ebendieses ist eine strukturierte Aufnahme bzw. Einteilung des Bauwerks und die Zuordnung des Bildmaterials zum jeweiligen Bauteil notwendig. Die Herausforderung hier liegt vor allem in der Fluggerätetechnik und -navigation sowie in der anschließenden Datenauswertung [133]. Welchen Einfluss ein detektierter Schaden auf die Konstruktion hat, ist nicht nur von der Art des Schadens selbst abhängig, sondern auch von der Lage innerhalb der Gesamtkonstruktion. So ist oberflächliche Korrosion am Obergurt des Hauptträgers in der Mitte der Spannweite aufgrund der Druckbeanspruchung weniger besorgniserregend als wenn diese im Anschlussbereich zwischen Haupt-, Nebenträger und Deckblech auftritt. [140]

Um diese Ortsinformationen zu erhalten, dient eine Art 3D-Modell des Bauwerks als Grundlage. Dieses Modell wird in den meisten Fällen mittels 3D-Laserscanner als Punktwolke erzeugt. Das daraus erzeugte Modell dient der Orientierung am Bauwerk, ähnlich einer Karte. 3D- bzw. terrestrische Laserscanner sind optische Messgeräte, welche eine Oberfläche hochauflösend und berührungslos abtasten. Dabei werden synchron sowohl Vertikal- und Horizontalwinkel als auch die Entfernung des Geräts erfasst und infolgedessen die räumlichen 3D-Koordinaten berechnet. Die Oberfläche wird dann als eben beschriebene 3D-Punktwolke abgebildet. Moderne terrestrische Laserscanner verfügen über einen GNSS-Empfänger (Global Navigation Satellite System; globales Satellitennavigationssystem), mit dessen Hilfe die digitalisierte Oberfläche mit globalen Koordinaten verknüpft werden kann. Aber auch mithilfe von GPS-Koordinaten des mittels UAS aufgenommenen Bildmaterials kann eine Punktwolke erzeugt werden. [140][264]

Da die generierte Punktwolke zunächst wenig Aussagekraft hat, aufgrund fehlender Verknüpfung der einzelnen Punkte untereinander, ist eine Verbindung der Punkte im Raum mit Flächen- und Volumeninformationen durch Modellrechnungen erforderlich [141]. Um eine Punktwolke zu generalisieren gibt es diverse Clustermethoden wie beispielsweise das sogenannte Polygonmodell, welches der Punktwolke Flächeninformationen in Form von Dreiecken zuordnet [134]. Dieser Vorgang ist jedoch sehr rechenintensiv, weswegen eine volumenhafte Modellierungsmethode gebräuchlicher ist. Dabei werden regelgeometrische Elemente wie Ebenen, Quader, Kugeln, Zylinder oder Kegel in die Punktwolke eingepasst. Darunter fallen diverse Verfahren wie u.a. die sogenannte Medianteilung, die gleichmäßige Teilung oder die Teilung in Hauptkomponenten. Die Voxelisierung, als ein weiteres Verfahren, bildet hierbei bei

Modellierungsmethode mit dem geringsten Rechenaufwand. Dabei wird die Punktwolke in gleichgroße Würfelstrukturen, sogenannte Voxel, gerastert und die abgebildete Oberfläche bzw. das abgebildete Bauwerk vereinfacht dargestellt. Ein Voxel ist die dreidimensionale Variante eines Pixels und das kleinste Element in einem dreidimensionalen Raum. Bei der Voxelisierung findet folglich eine Umwandlung eines physischen Objekts in eine Vielzahl von Voxeln statt [128]. Dieses Verfahren erlaubt es computergestützten Systemen, reale Umgebungen oder Objekte auf digitale Weise darzustellen und zu erfassen und Datenwerte an beliebiger Stelle eines dreidimensionalen Objektraumes zu erlangen [262]. Die Größe eines einzelnen Voxels beeinflusst dabei den Detaillierungsgrad der Darstellung des gescannten Objekts (siehe Abb. 2.24). [140][144][213][276]

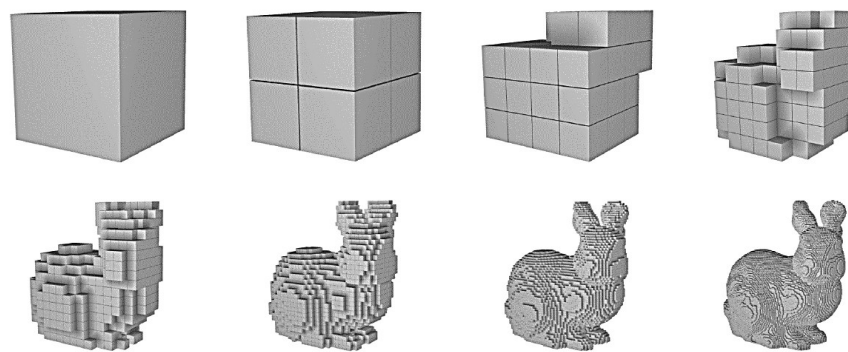


Abb. 2.24: Detaillierungsgrad der Voxelisierung am Beispiel eines Hasen ([141], S.54)

Nur in Bereichen der 3D-Punktwolke, welche Strukturen abbilden, werden Voxel generiert. Es findet eine Überprüfung statt, ob sich Punkte in einem Voxel befinden, welche dem Bauwerk zuzuordnen sind. Diese 3D-gerasterten Volumenkörper bilden abschließend das Bauwerk ab. Das Ergebnis der Voxelisierung ist eine Art von dreidimensionaler Karte bzw. Darstellung und erfordert erheblich weniger Speicherplatz für die Modellrechnungen als die ursprüngliche Punktwolke oder ein übliches 3D-Modell. Des Weiteren kann die Voxelisierung als Referenzsystem für weitere Berechnungen wie beispielsweise automatisierten Flugrouten dienen. Dabei wird die Flugroute innerhalb der Voxel geplant. Auch können mithilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) Hindernisse bei der automatisierten Flugroutenplanung erkannt werden [262]. Im Falle einer UAV-basierten Bauwerksbefliegung ist es sinnvoll, die Kantenlänge eines Voxels entsprechend der Außenmaße des Fluggeräts zu bestimmen (siehe Abb. 2.25). [140][145][147][375]

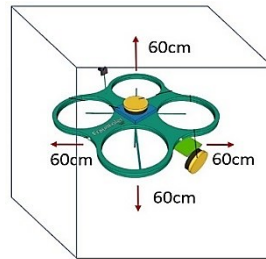


Abb. 2.25: Einflusses von UAS-Abmessungen auf die Voxelgröße, hier beispielhaft 60 cm Kantenlänge ([140], S. 66)

Eine automatisierte Flugroutenplanung ist nicht nur mithilfe von Voxeln möglich, sondern auch mit den GPS-Koordinaten des UAS. Die Planung erfolgt in diesem Fall manuell, während die Befliegung durch das GNS-System anschließend automatisiert funktioniert [219]. Auch das Prinzip der Photogrammetrie erlaubt eine Routenplanung anhand des erzeugten Bildmodells [133]. [11][146]

In der vorliegenden Arbeit ist die Strukturierung des Bauwerks sowie die Verknüpfung des aufgenommenen Bildmaterials zu den entsprechenden Stellen des zu betrachtenden Objekts von übergeordneter Wichtigkeit. Dafür können neben Voxeln auch schlicht GPS-Daten in Form von x-, y- und z-Koordinaten oder andere Segmentierungen wie die Einteilung in grobe Bereiche oder Bauteile gewählt werden [50]. Diese Varianten sind jedoch nicht so strukturiert und übersichtlich wie die geometrische Einteilung in Voxel. Da der Prüferingenieur am voxelisierten Brückenmodell statische Einschätzungen und die Bewertung der Einzelschäden vornehmen soll, ist ein simples, anschauliches sowie handhabbares System essentiell. Der Prüfer kann seine digitale Prüfung durch die Voxelisierung Stück für Stück bzw. Voxel für Voxel durchführen. Zudem erlaubt die Voxelisierung eine völlig neue Anwendungsmöglichkeit für die Bauwerksbewertung. Die Voxel bilden die Grundlage des in dieser Arbeit erzeugten neuartigen Bewertungsverfahrens. Neben dem positiven Effekt auf die Rechen- bzw. CPU-Leistung im Vergleich zu üblichen Punktwolken oder 3D-Modellen, bietet die Voxelisierung ebenfalls die Möglichkeit einer automatisierten Flugroutenplanung, welche positiv auf die zukünftige Erweiterbarkeit des hier erarbeiteten Systems wirken kann. [195][289]

2.7 Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren und Forschungsbedarf

Die derzeit in Deutschland angewandte und nach DIN 1076 [69] verpflichtende handnahe Brückenprüfung zeichnet sich durch ihre zeit- und personalintensive Ausführung aus. Das Prüfpersonal muss jeden Bereich der Brücke genau und handnah begutachten. Die Arbeit ist langwierig und nicht ungefährlich [32]. Es sind Leitern oder technische (Groß-)Geräte wie Brückenuntersichtgeräte oder Hubarbeitsbühnen für die Arbeit in der Höhe notwendig. Oft müssen betroffene Straßen teilweise oder ganz gesperrt werden, um die Hubsteiger für ihren Einsatz platzieren zu können [51]. Die nach Norm vorgeschriebenen Prüfungen finden in großen zeitlichen Abständen von drei bzw. sechs Jahren statt. In dieser Zeit können Schädigungen am Bauwerk fortschreiten und schlimmstenfalls zu massiven Folgen für die Tragfähigkeit der Brücke führen. Die Prüfung selbst als auch das Bewerten eines gefundenen Einzelschadens ist ferner ein subjektives Unterfangen und von der Erfahrung und dem Grad der Akribie des Prüfers abhängig. Schäden aus dem jeweils alten Prüfbericht sollen bei einer Prüfung wiedergefunden und neu bewertet werden. Eine Fotoaufnahme eines Schadens ist nicht verpflichtend und auch die Beschreibung einer Schadensverortung kann in der Auswertesoftware SIB Bauwerke [387] nur grob erfolgen. So kann nicht gewährleistet werden, dass ein bekannter Schaden wiedergefunden und für die aktuelle Prüfung neu bewertet wird. Es fehlt eine sichere Verortung der einzelnen Schäden. Der aktuelle Schadenskatalog [300], welcher dem Prüfpersonal eine Grundlage für die Bewertung der Einzelschäden bietet, ist mit über 1.500 Schadensbeispielen sehr lang, umfangreich und komplex. Durch die bauteilbasierte Sortierung doppelten sich die Schadensbeispiele in hohem Maße, was zu keiner komfortablen Handhabbarkeit des Katalogs für den Prüfer führt. Die Bewertungen sind in den meisten Fällen nicht vollständig vorgegeben, sodass auch hier viel Spielraum für den Prüfer in Abhängigkeit seiner Erfahrung und Einschätzung bleibt. Eine subjektive Vergleichbarkeit geht dabei verloren. Der aktuelle Bewertungsalgorithmus nach RI-EBW-PRÜF [303] errechnet eine gesamtheitliche Bauwerksnote, welche im Prinzip abhängig ist von dem schlimmsten Schaden am Bauwerk. Dieser eine Schaden besitzt alle Dominanz für die Endbewertung. Wird dieser bei der nächsten Prüfung wegen der zuvor genannten Gründe nicht wiedergefunden, würde sich die Bewertung dieser Brücke fälschlicherweise erheblich verbessern. Der Einfluss von dem Umfang bzw. der Schadensanzahl insgesamt ist hingegen marginal. Die Gesamtbewertung spiegelt somit nicht den Gesamteindruck eines Brückenzustands wider. Auch andere nationale und internationale Bewertungsverfahren zeigen eine unnötige Komplexität bei der Bauwerksbewertung, welche eine erhebliche Arbeitsbelastung für das Prüfpersonal darstellt, jedoch diese nicht in der Aussagekraft der Endbewertung aufzeigt [156]. [69][114][303]

Aktuelle Forschung und bestehende Ausarbeitungen behandeln vor allem Monitoringkonzepte oder sensorunterstützte Methodiken zur Schadensaufnahme mit Fokus auf Instandsetzungsmaßnahmen und Eintrittswahrscheinlichkeiten [216][284][320][370]. Die Erkenntnisse sollen in der Zukunft ein Monitoring von Brücken zur Regel werden lassen [136]. Das aktuelle Verfahren zu verbessern oder zu vereinfachen ist nicht Teil der Forschung. Ein Monitoring ist zum aktuellen Zeitpunkt mit erheblichen Kosten verbunden, welche für Bund, Länder und Kommunen nicht tragbar wären [181][342]. Auch kann und wird in Zukunft nicht jede kleine Brücke

eines Landkreises mit einem aufwendigen Sensorsystem zum Monitoring ausgestattet werden [173][386]. Aus diesem Grund wird sich auch in mittelferner Zukunft die Prüfpraxis in Deutschland nicht hin zu einem regel- und dauerhaften Monitoring verändern [120][292]. Des Weiteren liegt dabei der Fokus auf Betonbrücken, da diese die dominante Bauweise der deutschen Brücke sind. Für die aktuelle Prüfpraxis bedeutet dies jedoch keine Verbesserung [178][309]. Bauwerke werden derzeit weiterhin in großen zeitlichen Rhythmen kontrolliert, während in der Zwischenzeit verheerende Schäden unbemerkt auftreten bzw. fortschreiten können [138][202]. Aus diesem Grund soll eine Methodik erarbeitet werden, welche davor ansetzt und sich speziell auf Stahlbrücken fokussiert, nah an der aktuellen Prüfpraxis orientiert ist und diese dauerhaft vereinfachen und optimieren kann, ohne jede Brücke vollständig mit teurer Sensorik für ein dauerhaftes Monitoring ausstatten zu müssen. Die hier zu erarbeitende Methodik soll die aktuelle Prüfpraxis auf simple Weise unterstützen, die Arbeitszeit für das Prüfpersonal verkürzen und die Prüfindervalle deutlich verringern. [52][62][107][313][382]

Durch die Befliegung der Brücke mittels UAS soll die zum Teil gefährliche und aufwendige Arbeit für den Prüfer erleichtert und reduziert werden. Es findet weniger Verkehrsbehinderung durch die fehlenden Besichtigungsgeräte statt [162]. Die Bildaufnahme soll bei der neuen Methodik zum einen der Archivierung des Brückenzustands dienen und zum anderen mithilfe des ‚Structure from Motion‘-Ansatzes eine grobe Punktwolke der Brücke generieren [241]. Dabei handelt es sich um ein mittlerweile gängiges Verfahren, welches in dieser Arbeit nicht mehr näher betrachtet wird [314]. Die Punktwolke bildet die Grundlage für eine feste Einteilung und Strukturierung des Bauwerks, mithilfe derer letztendlich eine fixe Verortung der Schäden gewährleistet werden soll [238]. Dafür soll die Punktwolke in gleich große Quader, sogenannte Voxel, eingeteilt werden [197]. Die aufgenommenen Bilddaten werden den entsprechenden Voxeln zugeordnet, welche anschließend vom Prüfer durchgesehen und bewertet werden können. Durch diese Methodik sollen keine Schäden bei zukünftigen Bauwerksprüfungen mehr übersehen werden können. Diese Strukturierung des Bauwerks verlangt die Entwicklung eines neuen Schadenskatalog, welcher schadensbasiert arbeitet, kompakt ist und auf die neue graphische Auswertung für Stahlbrücken ausgelegt ist [340]. Subjektivität soll durch feste Bewertungen im Katalog auf ein Minimum reduziert werden. Der anschließende Algorithmus zur Bewertung des Bauwerkszustands ist ebenfalls auf Basis des voxelisierten Bauwerks zu erarbeiten und soll sowohl gravierende Schäden, die Anzahl der Schäden als auch einen gesamtheitlichen Eindruck vom Bauwerk geben. Diese Methodik soll eine häufigere Kontrolle von Brücken realisieren können, das Prüfindervall verkürzen und somit die Entstehung von für das Tragwerk gravierenden und zum Teil zu spät oder nicht entdeckten Schäden reduzieren. Die regelmäßige Untersuchung mithilfe des UAS hilft dabei, das Alterungsverhalten der Brücke zu überwachen und Instandsetzungen frühzeitig einzuleiten, was ihre Wirksamkeit gleichzeitig steigert [327]. Insgesamt sollen sich diese Maßnahmen positiv auf die Stand-, Verkehrs- sowie Dauerhaftigkeit eines Brückenbauwerks auswirken. Seine Betriebsfähigkeit und somit durchgehende Befahr- bzw. Nutzbarkeit wird somit sichergestellt und Sperrungen aufgrund von großen Sanierungsarbeiten oder gar Tragfähigkeitsverlusten vorgebeugt. Dadurch sollen die Kosten von großen Instandsetzungsarbeiten reduziert werden. [139][140][244][305]

Die Erarbeitung dieses neuen Systems beschränkt sich auf die Betrachtung von stählernen Brücken mit orthotropen Fahrbahnplatten mittlerer Spannweite bis 100 m.

3 Untersuchung flugtauglicher Bereiche von orthotropen Platten

An dieser Stelle soll mittels optischer und grafisch-geometrischer Analysen untersucht werden, welche Bereiche einer orthotropen Fahrbahnplatte mit einem Unmanned Aerial System (UAS) befliegen und somit inspiziert werden können, um auf diese Weise den Prüfsingenieur bei der Bauwerksprüfung zu unterstützen, indem das UAS die Bildaufnahmen der Brücke generiert. Dafür sind sowohl Untersuchungen hinsichtlich der passenden Brennweite und Sicherheitsabstand des UAS notwendig als auch eine vorgeschaltete konstruktive Analyse der stählernen Brückenkonstruktion. Es soll untersucht werden, welche Stellen an der Brücke als neuralgisch zu betrachten sind, weil dort stets Spannungsspitzen zu erwarten sind, und welche Bauteile in Bezug auf den Lebenszyklus einer Brücke von besonderer Wichtigkeit sind. Abschließend wird untersucht, ob ebendiese Stellen, aber auch das gesamte Bauwerk, mit der ausgewählten Kamertechnik, dem nötigen Sicherheitsabstand zum Bauwerk und den Eigenarten der Bauweise der orthotropen Platte sinnvoll inspiziert werden kann. Dabei bauen Kapitel 3.2 sowie 3.3 auf [25] auf. Im letzten Schritt werden Verallgemeinerungen untersucht und in einem Exceltool zusammengestellt, sodass vor einer Brückeninspektion zunächst überprüft werden kann, wie viel Prozent von dem zu untersuchenden Bauwerk mittels UAS befliegen und gleichzeitig inspiziert werden kann.

3.1 Bauwerksanalyse

3.1.1 Schädigungsrelevante Bereiche an Stahlbrücken

Um zu erarbeiten, an welchen Bauteilen und Bereichen von stählernen Brücken mit orthotroper Fahrbahnplatte die häufigsten Schäden durch verkehrsinduzierte Belastung entstehen, soll an dieser Stelle eine qualitative Betrachtung der allgemeinen Brückenkonstruktion und des normativen Nachweises dieser durchgeführt werden. Die hier relevanten Brücken fallen dabei in die Größenkategorie von 55,00 m bis maximal 100 m Länge und ca. 15 – 20 m Breite. Es handelt sich um zweispurige Balken- und Bogenbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte, um die Ergebnisse anschließend mit den später im Kapitel stattfindenden Untersuchungen vergleichen zu können. Die Betrachtung soll die aus Literatur bekannten Schadstellen der orthotropen Platten (siehe Kapitel 2.3) aufnehmen und bestätigen. Zudem soll eine Systematik von den am meisten belastetsten Bauteilbereichen erarbeitet werden.

Literatur wie ([125], S.2), [362] oder [127] beschreiben bekannte Bereiche für typische Schädigungen an Stahlbrücken, vor allem Risschäden. Dabei handelt es sich um die sogenannten Schäden der Kategorien 1 bis 4. Diese sollen an dieser Stelle zusammengetragen und qualitativ verifiziert werden. Zudem sollen die Ergebnisse bei der anschließenden geometrischen Analyse der Brücke unterstützen, wenn es darum geht, ob ein schadenskritischer Bereich auch mittels UAS per Kamera aufgenommen werden kann. Das Ziel ist, eine Regelmäßigkeit für die Lage der Spannungsmaxima herauszuarbeiten, um diese in die geometrische Analyse sowie die algorithmische Auswertung im Weiteren (Kap. 3.2 und Kap.5.3) einfließen zu lassen.

Heutzutage werden Brücken stets mittels Finite Elemente Methode (FEM) konstruktiv nachgewiesen. Dafür gibt es u.a. normative Vorgaben wie beispielsweise EC 0 [81], EC 1 [82] sowie EC 3 [86], wonach das Tragwerk im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit belastet und nachgewiesen wird. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) beschreibt die Sicherheit von Personen und/oder die Sicherheit des Tragwerkes. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist das Versagen durch übermäßige Verformungen, durch Materialermüdung sowie den Verlust der Lagesicherheit des Tragwerks nachzuweisen. Beim Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) werden Zustände betrachtet, die die Funktion des Tragwerks unter üblichen Gebrauchsbedingungen oder aber das Wohlbefinden der Nutzer oder das Erscheinungsbild betreffen. Die Nachweise werden gegen Verformungen, Verschiebungen oder Schwingung geführt. Dabei werden Unsicherheiten, welche aus dem System oder den Materialien entstammen können, oder der Tatsache, dass alle veränderlichen Lasten nicht zeitgleich auftreten, durch Kombinationsbeiwerte ψ_i abgedeckt. Der Kombinationsbeiwert ψ_i hängt jeweils von den zu untersuchenden Grenzzuständen ab. Mit unterschiedlichen Lastmodellen, z.B. aus EC 1 [82] (siehe Abb. 3.1), und zugehörigen Regelungen wird versucht, die üblichen Verkehrssituation (d.h. Straßenverkehr auf jedem Fahrstreifen) normativ bei Entwurf, Berechnung und Bemessung zu berücksichtigen. [16][81][83]

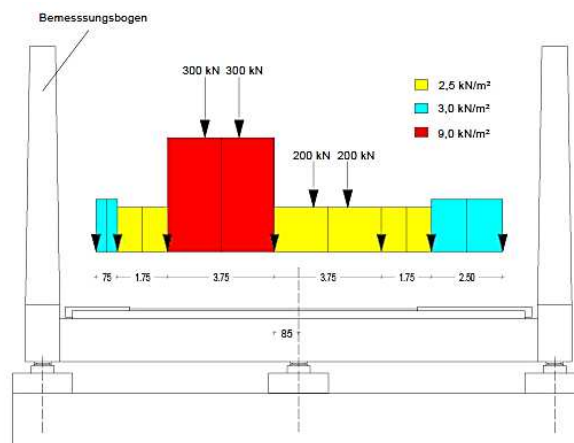


Abb. 3.1: Beispielhafte Laststellung (LM 1) auf einer Bogenbrücke nach Eurocode (EC) 1 [82]

EC 0 [81] beschreibt drei repräsentative Werte einer Einwirkung Q_k , die allgemein bei einer Tragwerksbemessung anzusetzen sind. Für die Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise der Grenzzustände mit nicht umkehrbaren Auswirkungen wird der Kombinationsbeiwert, der durch das Produkt $\gamma_0 \cdot Q_k$ beschrieben wird, angesetzt. Für die Tragsicherheitsnachweise mit außergewöhnlicher Belastung und für umkehrbare Grenzzustände wird der häufige Wert durch das Produkt $\gamma_1 \cdot Q_k$ definiert. Der quasi-ständige Wert, der durch das Produkt $\gamma_2 \cdot Q_k$ beschrieben wird, beinhaltet Tragfähigkeitsnachweise mit außergewöhnlichen Einwirkungen und Gebrauchstauglichkeitsnachweise mit unumkehrbaren Grenzzuständen [81]. Grundsätzlich werden nach DIN EN 1990 [81] folgende fünf Einwirkungskombinationen ((Gl. 4) bis (Gl. 8)) unterschieden:

Flugtaugliche Bereiche

GZT ständige und vorübergehende Beanspruchung E_d :

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} * E_{Gk,j} \oplus \gamma_{Q,1} * E_{Qk,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * E_{Qk,i} \quad ([159], \text{S.41}) \quad (\text{Gl. 4})$$

GZT außergewöhnliche Beanspruchung E_{dA} :

$$E_{dA} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} * E_{Gk,j} \oplus E_{Ad} \oplus \gamma_{QA,1} * \psi_{1,1} * E_{Qk,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{QA,i} * \psi_{2,i} * E_{Qk,i} \quad ([159], \text{S.41}) \quad (\text{Gl. 5})$$

GZG seltene Einwirkungskombination $E_{d,char}$:

$$E_{d,char} = \sum_{j \geq 1} E_{Gk,j} \oplus E_{Qk,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} * E_{Qk,i} \quad ([159], \text{S.43}) \quad (\text{Gl. 6})$$

GZG häufige Einwirkungskombination $E_{d,frequ}$:

$$E_{d,frequ} = \sum_{j \geq 1} E_{Gk,j} \oplus \psi_{1,1} * E_{Qk,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} * E_{Qk,i} \quad ([159], \text{S.43}) \quad (\text{Gl.7})$$

GZG quasi-ständige Einwirkungskombination $E_{d,perm}$:

$$E_{d,perm} = \sum_{j \geq 1} E_{Gk,j} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} * E_{Qk,i} \quad ([159], \text{S.43}) \quad (\text{Gl. 8})$$

Für die zuvor erläuterten Einwirkungskombinationen werden Belastungen wie Wind-, Temperatur oder Verkehrslasten nach Norm ermittelt. Vor allem die Einwirkungen aus dem Straßenverkehr sind für Brücken maßgeblich. Für vertikale Verkehrslasten gibt es beispielsweise vier Verkehrslastmodelle (LM 1 – 4) in EC 1 Teil 2 [83] (siehe Abb. 3.1). Für die FEM-gestützte Ermüdungsbetrachtung einer Brücke gibt es weitere fünf Lastmodelle. Die Brückenfläche wird nach Vorgaben der Norm in Fahrstreifen, Schrammbordbereiche sowie Restflächenbereiche eingeteilt (vgl. Abb. 3.2 links). Die Lage der Fahrstreifen ist dabei so zu wählen, dass sich für das zu untersuchende Bauteil die ungünstigste Beanspruchung ergibt. Der für das Brückenbauwerk ungünstigste Fahrstreifen erhält die Nummer 1 (vgl. Abb. 3.2 rechts). Da sich für jedes Lastmodell die ungünstigste Beanspruchung ergeben muss, können sich Lage und Nummerierung der Fahrstreifen je nach Einzelnachweis ändern. Mit den zuvor beschriebenen Lastmodellen und Lastfällen ist ein Brückenbauwerk schlussendlich zu belasten (siehe Abb. 3.1). [83][350]

Des Weiteren gilt, dass Einwirkungen, die nicht gleichzeitig auftreten können, nicht kombiniert werden müssen. So werden bei Straßenbrücken beispielsweise Schneelasten nicht mit den Lastmodellen (LM) 1 oder 2 kombiniert und Einwirkungen aus Temperatur und Wind ebenfalls nicht gleichzeitig angesetzt. Auch werden Wind- sowie Schneelasten nicht mit horizontalen Verkehrslasten wie Brems- und Beschleunigungskräften, mit Lasten auf Geh- und Radwegen sowie mit Menschenansammlungen (Lastmodell 4) kombiniert. Bei außergewöhnlichen Einwirkungen gilt die Regel, dass in einer außergewöhnlichen Einwirkungskombination keine zusätzliche außergewöhnliche Einwirkung zu berücksichtigen ist. Wind- oder Schneelasten werden ebenfalls nicht betrachtet. Im Falle eines Fahrzeuganpralls unter der Brücke, sollten die Verkehrslasten auf der Brücke als begleitende Einwirkung angesetzt werden. Die tatsächlichen Lasten des Straßenverkehrs werden durch fiktive Modelle für vertikale, horizontale sowie außergewöhnliche Lasten in der Norm idealisiert. [81][83][151]

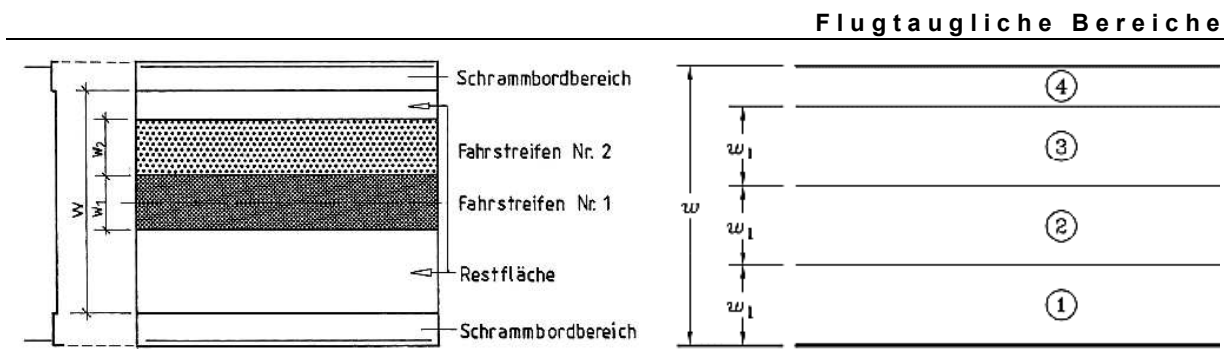


Abb. 3.2: l.: Aufteilung der Brückenquerfläche ([179], S.13); r.: Beispiel Nummerierung Fahrstreifen ([83], S.32)

Das Tragprinzip einer orthotropen Fahrbahnplatte ist detailliert in Kapitel 2.2 beschrieben und wird aus diesem Grund an dieser Stelle nicht wiederholt. Stattdessen sollen Schäden und ihre Auftrittsorte an dieser Konstruktion betrachtet werden, welche in der Praxis meist durch Ermüdung auftreten [362].

Schädigungen am Deckblech sowie an den Längsrippen werden als sogenannte Schäden der Kategorien 1 und 2 bezeichnet [125]. Dabei handelt es sich um Ermüdungsrisse im Bereich des Deckblechs, des Stoßes zwischen zwei Rippen im Feldbereich, im Bereich der angeschweißten Rippe am Plattenblech oder an den Aussparungen der Querträger, durch welche die Längsrippen dringen. Das Deckblech wirkt als Durchlaufträger, welcher auf den Längssteifen starr gelagert ist. Außerdem ist es gleichzeitig als Obergurt der Längssteifen zu sehen, welche wiederum auf den Querträgern lagern. Durch diese Schweißverbindung und örtliche Radlasten, sind Schweißnähte zwischen Längssteifen und Deckblech sehr ermüdungsbeansprucht und somit für die fotografische Aufnahme sehr relevant.

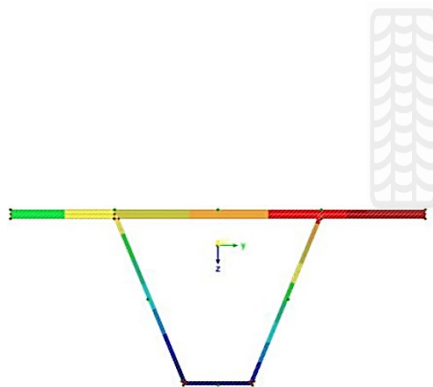


Abb. 3.3: Beispielhafte Spannungsverteilung eines Längssteifenquerschnitts einer Balkenbrücke bei einseitiger Belastung durch einen PKW (Größenverhältnis nicht realitätstreu)

Bei den Längssteifen handelt es sich um ein durchaus sensibles Bauteil der orthotropen Fahrbahnplatte. Daher wird hier nicht nur der maximale Spannungswert, sondern ebenfalls die für Ermüdung so ausschlaggebende Spannungsamplitude betrachtet. Der Verkehr mit den Radlasten ist hier maßgeblich verantwortlich für Bauteilspannung und darausfolgender Ermüdungsreaktion (siehe Abb. 3.3). Die Längsrippen wirken nicht nur als eine Durchlaufträger über die Querträger, wobei die Biegesteifigkeit der Querträger dabei die

Bettung dieses Durchlaufträgers beeinflusst, sondern auch als Trägerrost mit den Querträgern. Durch die untereinander verschweißten Bauteilebenen und diese komplexe Tragwirkung, sind die Durchdringungsbereiche der Querträger sowie die Außenseiten der Längssteifen für die fotografische Aufnahme sehr relevant.

Die Querträger einer orthotropen Fahrbahnplatte lagern auf den beiden Hauptträgern und wirken somit in der Regel wie ein eingespannter Einfeldträger. Bei längeren Brücken kragen die Querträger über die Hauptträgerachse hinaus, sodass es sich um einen eingespannten Einfeldträger mit zwei Kragarmen handelt, was bei Belastung des Kragarms zu entgegengesetzten Systemreaktionen im Quersystem führt (siehe Abb. 3.8 links). Gleichzeitig wirken die Querträger mit den Hauptträgern global ebenfalls als Trägerrost. Das Quersystem ist im Vergleich zu den Längssteifen sowie der Fahrbahnplatte nicht direkt befahren. Dennoch ist die Schadenskonzentration in der Schweißverbindung zwischen Querträger und Quersteife des Hauptträgers und dem Querträgeruntergurt hoch. Das liegt daran, dass es an diesen Stellen durch Lasteinleitung und -umleitung sowie durch die Eigenspannungen zu hohen Spannungskonzentrationen kommt. Diese Schäden fallen in die sogenannte Kategorie 3 [125]. Bei einer Befliegung mittels UAS sollte daher besonderes Augenmerk auf die Verbindung zwischen Quer- und Hauptträger gelegt werden.

Schäden am Hauptträger werden als Schäden der Kategorie 4 bezeichnet. Der Hauptträger lagert auf den vorhandenen Auflagern auf und wirkt in den hier betrachteten Fällen als Einfeldträger (siehe Abb. 3.4). Rechnerisch treten dabei die maximalen Spannungen stets in Feldmitte, dort im Bereich des Untergurts, auf. Durch die meist sehr hohe Materialstärke weist der Hauptträger selbst in der Praxis der Bauwerksprüfung jedoch eher selten Schäden auf (siehe Kapitel 4.1.2) [332]. Eine Befliegung des Untergurts stellt mittels UAS die kleinste Herausforderung dar, sodass das größte Augenmerk auf den zuvor beschriebenen Schäden der Kategorie 1 bis 3 liegen sollte.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schäden der Kategorien 1 bis 4 kann zusätzlich Kapitel 2.3 entnommen werden.

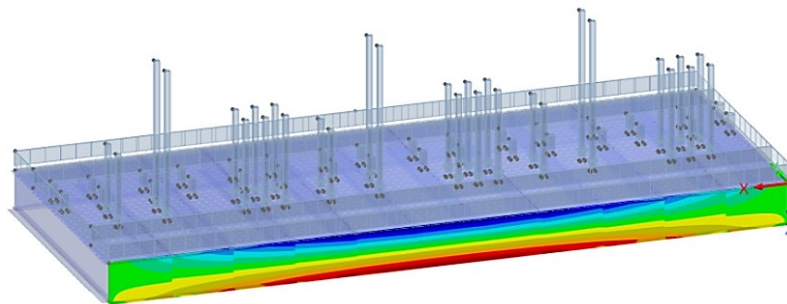


Abb. 3.4: Beispiel eines FE-Modells einer 40 m langen belasteten Balkenbrücke ohne Kragarm mit orthotroper Fahrbahnplatte

Bei der Betrachtung der aus der Praxis und Literatur bekannten häufigsten Schädigungen an orthotropen Fahrbahnplatten sollten in diesem Kapitel spezifische Stellen ermittelt werden, welche durch Spannung am stärksten belastet sind. Diese Bauteilbereiche sind somit für Schäden im Lebenszyklus durch Verkehr, Ermüdung und Alterung besonders schadensanfällig und

sollten bei fortführenden Schadensanalysen des Brückenbauwerks dominierend betrachtet werden. Bei diesen Bereichen handelt es sich vor allem um Verbindungsstellen bzw. Schweißnähte an den Längssteifen und der Fahrbahnplatte, an den Längssteifen untereinander, den dem Querträger sowie an dem Haupt- und Querträger (Schäden der Kategorie 1 bis 3 nach [362], siehe 2.3 oder Abb. 2.15), welche besonders für Ermüdungsrissschäden bekannt sind. Auch Bereiche, welche direkt unter den Fahrspuren liegen, weisen am häufigsten die genannten Schäden auf. Mit diesem Wissen sollen die weiteren Bauwerksanalysen durchgeführt werden. Bei einer optisch-geometrischen Analyse soll überprüft werden, welche Bauteile mit Hilfsmitteln wie Drohnen fotografisch aufgenommen werden können. Die hier erarbeiteten Bauteilbereiche sollen in die folgende Analyse einfließen.

3.2 Grafische Untersuchungen zu inspizierender Brückenbereiche

3.2.1 Untersuchung von Brennweite und Abstand zum Bauwerk

Für die Untersuchung der passenden Kameratechnik sowie der optimalen Brennweite für die hier durchzuführende Anwendung wird eine Vollformatkamera (Modell EOS RP) der Firma Canon verwendet. Es sollen verschiedene Brennweiten hinsichtlich der Erkennbarkeit von kleinen Schäden wie Abblätterungen von Beschichtung oder Korrosion mit einer Größe von ca. 1 cm² erkannt werden können. In welchem Abstand mit welcher Brennweite derartige Schädigungen noch auf einer Fotografie deutlich zu erkennen sind, ist Ziel dieser ersten Untersuchung. Dabei soll bei allen folgenden Analysen davon ausgegangen werden, dass das Bildmaterial bei der vom Prüfungingenieur bei der nachträglichen Betrachtung am PC herangezoomt werden kann, um Schädigen mit Vergrößerung zu betrachten.

Insgesamt werden die Brennweiten 24, 35, 50 sowie 70 mm sowie die Abstände vom potentiellen Motiv zwischen einem und 15 Meter analysiert. Für die Untersuchung der verschiedenen Brennweiten werden folgende Objektive genutzt:

- 24 mm + 35 mm: Canon EF 16-35 mm F2.8 L III USM
- 50 mm: Canon EF 50 mm F1.8 STM
- 70 mm: Tamron AF SP 70–300 mm F4-5.6 Di VC USD für Canon

Die Kamera ist unterhalb des UAS angebracht. Für diese Voruntersuchungen werden Fotos von einem stählernen Testobjekt (Garagentor) gemacht. Dies ist die optimale Untersuchungsbasis, da es jederzeit erreichbar ist im Vergleich zu einer Brücke, eine stahlähnliche und beschichtete Oberfläche besitzt und sogar Schadstellen aufweist, mithilfe derer die Auswertung der Bilder bzgl. der Erkennbarkeit eines potentiellen Schadens gut gelingt. Außerdem soll untersucht werden, ob Schäden auch seitlich fotografiert erkennbar sind. Diese Betrachtung ist relevant für die spätere Analyse der Brückenunterseite, also den Unterseiten der Fahrbahnplatte selbst sowie der Längssteifen, da eine nichtschwenkbare Kamera auf dem UAS verwendet werden soll, um die Anwendbarkeit so realistisch und kostengünstig wie möglich zu gestalten. Es soll untersucht werden, mit welcher Brennweite aus welcher Entfernung die typischsten Schäden wie Risse und Korrosionsschäden auf den Fotografien noch erkennbar sind. Bei der

Flugtaugliche Bereiche

Untersuchung der einzelnen Fotos aus den unterschiedlichen Distanzen zum Motiv (hier Garagentor) wird von einer Betrachtung auf einem 17 Zoll-Laptopmonitor ausgegangen. Diese Situation entspricht einer realistischen, durchschnittlichen Arbeitssituation am Bauwerk direkt oder später im Ingenieurbüro. Die folgenden Ergebnisse basieren auf subjektiver Wahrnehmung, da die Bilder vom Prüfenieur betrachtet werden sollen, also mit dem Auge gut bzw. gerade noch wahrzunehmen sein sollen.

Bei der Verwendung des 24 mm-Objektivs wird deutlich, dass flächigen Schäden mit nachträglicher Vergrößerung bei einem Abstand von 2 m gut zu erkennen sind. Auch Risschäden, hier in Form von Kratzern, sind mit diesen Einstellungen und nachträglicher Vergrößerung des Bildes erkennbar (siehe Abb. 3.5). Für den Fall, dass die Betrachtung ohne nachträgliche Vergrößerung stattfinden sollte, stellt sich eine Entfernung vom Motiv von 1,5 m als der maximal mögliche Abstand heraus, bei dem zumindest flächige Schäden erkannt werden können. Risse müssen bereits einen Rissdurchmesser von mindestens 0,5 mm haben, um mit diesen Parametern auf einer entsprechenden Fotografie mit dem bloßen Auge erkennbar zu sein (siehe Abb. 3.6 links).

Bei der Verwendung eines 35 mm-Objektivs ist ein deutlicher Unterschied zum vorherigen Objektiv erkennbar. Hier ist ein Abstand vom Motiv von 6 Metern möglich, um mit nachträglicher Vergrößerung des Fotos noch Oberflächenschäden problemlos und Risse bis sogar 0,3 mm (gemessen mit handelsüblicher Rissbreitenkarte) zu erkennen (siehe Abb. 3.6 rechts). Ohne nachträgliche Vergrößerung des Fotos ist aus dieser Distanz jedoch kein Schaden mehr zu erkennen. Bei einem Abstand von 2 m vom Referenzmotiv können oberflächliche Schäden wie Korrosion oder fehlende Beschichtung ab einer Größe von 1 cm² erkannt werden. Risschäden sind aus dieser Entfernung nur schwer und mit einer Rissweite von mindestens 1 mm zu erkennen.



Abb. 3.5: Testmotiv fotografiert mit 24 mm-Objektiv aus 2 m Entfernung (l.: Original; r.: vergrößert) ([25], S. 31)

Ein 50 mm-Objektiv ermöglicht das Erkennen von Rissen und Oberflächenschäden mit nachträglicher Vergrößerung aus einer Entfernung von 10 m. Auch hier sind wieder feine Risse von 0,5 mm durchaus für das bloße Auge sichtbar (siehe Abb. 3.7 links). Mit einem Abstand von

maximal 3 m zum Motiv können Korrosion oder Beschichtungsschäden auch ohne nachträglichen Zoom erkannt werden. Risschäden sind aus dieser Entfernung nicht mehr zu erkennen. Ein Abstand von 2 m ist ohne Vergrößerung zielführender.



Abb. 3.6: l.: Testmotiv fotografiert mit 24 mm-Objektiv aus 1,5 m Entfernung ([25], S.31)
r.: Testmotiv fotografiert mit 35 mm-Objektiv aus 6 m Entfernung und Vergrößerung ([25], S. 32)

Die Brennweite von 70 mm ergibt mit nachträglicher Vergrößerung nahezu das gleiche Ergebnis wie das 50 mm-Objektiv bei zehn Metern Distanz (siehe Abb. 3.7 Mitte). Für die Betrachtung ohne nachträgliche Vergrößerung ergibt sich ein maximaler Abstand von vier Metern. Auch hier gilt das gleiche wie beim vorherigen Objektiv. Für Risschäden sollte ein geringerer Abstand als vier Meter gewählt werden. Dieser beträgt hier eher 2 m.

Abb. 3.7 (rechts) zeigt, dass auch die Oberfläche und damit Schäden an der Brückenunterseite optisch ermittelt werden können, welche nicht frontal aufgenommen sind. Für diese Testaufnahmen wird das Motiv von oben fotografiert.



Abb. 3.7: l.: Testmotiv fotografiert mit 50 mm-Objektiv aus 10 m Entfernung ([25], S. 33)
m.: Testmotiv fotografiert mit 70 mm-Objektiv aus 15 m Entfernung und Vergrößerung ([25], S. 35)
r.: Testmotiv fotografiert mit 50 mm-Objektiv aus 10 m Entfernung ([25], S. 36)

Mit den Erkenntnissen der realen Fotografiebetrachtingen und aus welchen Abständen mit welchem Objektiv die wichtigsten Schäden wie Oberflächenfehler sowie Risse zu erkennen sind, soll im nächsten Schritt mithilfe von CAD-Software eine geometrische Analyse von parametrisierten Brückenquerschnitten bezüglich ihrer Eignung für eine UAS-unterstützte Bauwerksprüfung durchgeführt werden.

3.2.2 Parameterdefinition

Für die graphische Untersuchung soll eine Stahlbrücke mit orthotroper Platte parametrisiert werden. Dafür wird eine fiktive und typische Konstruktion im CAD-Programm Allplan Nemet-shek [5] nachgebildet. Diese kann auf einfache Weise um weitere Felder bzw. Bauteile in Längs- und Querrichtung erweitert werden. Die zu untersuchenden Bauteile sind die Platte selbst, die längsverlaufenden Trapezsteifen, die Querträger (QT) sowie die beiden Hauptträger (HT). Die einzelnen Querschnitte der Bauteile sind über die Länge gleichbleibend und verändern sind nicht. Die Platte selbst ist ebenfalls über die gesamte Fläche durchgehend und eben. Mögliche Steifen am Hauptträgersteg oder zwischen den Haupt- und Querträgern werden für diese parametrisierte Untersuchung nicht betrachtet. Auch der Auflagerbereich ist nicht Teil dieser Betrachtung, da die Funktionstauglichkeit der Auflager nicht rein an optischem Bildmaterial überprüft werden sollte und kann und dieser Bereich für die UAS-Befliegung stets überaus kritisch zu betrachten ist.

Mit dieser Grundlage sollen diverse Größen und Sicherheitsabstände des UAS sowie unterschiedlichste Bauteilabmessungen und Brückenparameter hinsichtlich der möglichen zu inspizierenden Bereiche mittels UAS untersucht werden. Dafür werden die Bauteile zunächst einzeln untersucht: Hauptträger, Querträger, die Plattenunterseite in Längs- und Querrichtung sowie der manchmal vorhandene seitliche Überstand der Platte über die Hauptträger hinweg. Dafür ist eine Festlegung der Parameter notwendig, welche Einfluss auf das entsprechende Bauteil haben, was in Tab. 3.1 dargestellt ist.

Bereich	abhängig von diesen Parametern
Hauptträger	Sicherheitsabstand, Brennweite, HT-Abstand, HT-Höhe
Querträger	Sicherheitsabstand, Brennweite, QT-Abstand, QT-Höhe
Unterseite längs	Sicherheitsabstand, Brennweite, QT-Abstand, QT-Höhe
Unterseite quer	Sicherheitsabstand, Brennweite, HT-Abstand, HT-Höhe
Überstand quer	Sicherheitsabstand, Brennweite, Überstand

Tab. 3.1: Beeinflussende Parameter für die zu untersuchenden Bauteile

Für die Festlegung der Brückenparameter eignet sich das Maß des Längssteifenabstands von Schwerpunkt zu Schwerpunkt. Nach [113] beträgt der Steifenabstand bei der Mehrheit der Brücken 60 cm. Dieses Maß wird hier übernommen. Somit ergeben sich parametrisierte Hauptträgerabstände und Längen des seitlichen Überstands, welche ein Vielfaches von 60 cm sind und den durchschnittlichen Brückenabmessungen entsprechen. Die gewählten Querträgerabstände sowie Bauteilgeometrien orientieren sich ebenfalls an den Angaben aus [113]. Zudem sind größere Werte eher positiv für eine Befliegung zu sehen. Je mehr Platz das UAS hat, desto größer wird der sichtbare Anteil einer Brücke. Eine Zusammenstellung der für die Parameter gewählten und zu untersuchenden Werte sind in Tab. 3.2 finden.

Parameter	Werte
Sicherheitsabstand	1,00 m 1,50 m 2,00 m 2,50 m
Brennweite	24 mm 35 mm 50 mm 70 mm
Hauptträger-Abstand	4,20 m 5,40 m 6,60 m 7,80 m 9,00 m 10,20 m
Hauptträger-Höhe	1,00 m 1,25 m 1,50 m 1,75 m 2,00 m 2,25 m 2,50 m 2,75 m 3,00 m 3,25 m 3,50 m
Querträger-Abstand	2,50 m 3,00 m 3,50 m 4,00 m 4,50 m 5,00 m 5,50 m
Querträger-Höhe	0,50 m 0,60 m 0,80 m 1,00 m 1,20 m 1,40 m
Seitlicher Überstand	1,80 m 2,40 m 3,00 m 3,60 m 4,20 m 4,80 m 5,40 m 6,00 m

Tab. 3.2: Zu untersuchende Werte der diversen Parameter

Die graphische Untersuchung sieht vor, jede Parameterkombination anhand eines Längs- bzw. Querschnitts der Brücke zu analysieren. Es werden daher entsprechend so viele Brückenvarianten bzw. -querschnitte erzeugt, wie es Parameterkombinationen gibt (3.200 Stück insgesamt für die Betrachtungsweise in Längs- und Querrichtung). Beispielhaft bedeutet das nur für die Untersuchung der Plattenunterseite in Querrichtung, dass es 66 mögliche zu untersuchende Brückenvarianten gibt. Dies setzt sich zusammen aus den sechs Werten für den Hauptträgerabstand multipliziert mit den elf Varianten der Hauptträgerhöhe. Der mögliche Sicherheitsabstand des UAS, insgesamt vier Stück (siehe Tab. 3.2), werden an den soeben

genannten Querschnitten als parallele Linienzüge im entsprechenden Abstand zur Bauteilaußenkante markiert, was auf Abb. 3.8 für den Fall der Plattenunterseite in Querrichtung dargestellt ist.



Abb. 3.8: l: Beispiel eines einzelnen Querschnitts für die Untersuchung der Plattenunterseite in Querrichtung; r: Eindruck über mögliche Kombinationen für Untersuchung der Plattenunterseite in Querrichtung (nach [25])

Des Weiteren sind diverse Blickwinkel, welche sich aus den unterschiedlichen Brennweiten ergeben, zu ermitteln und grafisch darzustellen. Für die oben beschriebenen Brennweiten 24 mm, 35 mm, 50 mm sowie 75 mm ergeben sich mithilfe von [248] im Vollformat folgende Winkel:

24 mm:	84,1° (diagonal), 73,7° (horizontal), 53,1° (vertikal),
35 mm:	63,4° (diagonal), 54,4° (horizontal), 37,8° (vertikal),
50 mm:	46,8° (diagonal), 39,6° (horizontal), 27,0° (vertikal),
75 mm:	32,2° (diagonal), 27,0° (horizontal), 18,2° (vertikal).

Die Betrachtungsrichtung wird mittels entsprechender zweidimensionaler Dreiecke dargestellt (Abb. 3.9). Diese stellen bei der nachfolgenden geometrischen Untersuchung das Blickfeld der jeweiligen Objektiv dar und werden verdeutlichen, welche Bauteilbereiche mit welchem Objektiv in welchem Sicherheitsabstand optisch inspiziert bzw. von dem UAS in ausreichender Bildqualität aufgenommen werden können. Zum leichteren Verständnis wird jeder Brennweite eine eigene Farbe zugeordnet. Die senkrecht zu Blickrichtung verlaufenden Linien stellen jeweils einen Meter dar. Die Längen der jeweiligen Dreiecke entsprechen den in 3.2.1 ermittelten maximal möglichen Abständen der Kamera zum inspizierenden Bauwerk.

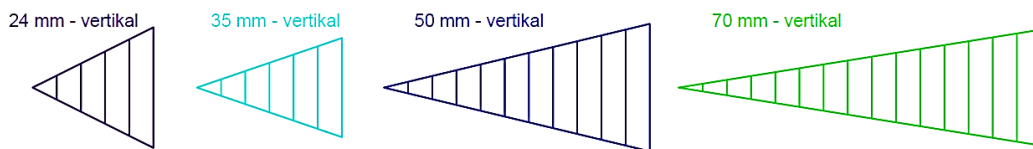


Abb. 3.9: Grafische Darstellung des Blickwinkels je Brennweite (lila = 24 mm, türkis = 35 mm, dunkelblau = 50 mm, grün = 70 mm) (nach [25])

Anschließend werden alle Variationen der Brückenparameter mit jeglichen Brennweiten und Sicherheitsabständen auf die mögliche Sichtbarkeit hin geometrisch untersucht. Es werden die Bereiche festgestellt, von denen Bildmaterial erzeugt werden kann und solche, von denen mittels UAS kein Bildmaterial erzeugt werden kann. Die Ergebnisse werden tabellarisch im Tabellenverarbeitungsprogramm Excel verzeichnet.

3.2.3 Graphische Analyse der parametrischen Brückenvariationen – Linienbetrachtung

Durchführung

Es soll auf zweidimensionale graphische Weise untersucht werden, mit welcher Brennweite, in welchem Sicherheitsabstand des UAS, welche Brückenkonstruktion (Höhe Hauptträger, Abstand Hauptträger etc.) wie gut mittels Unterstützung des Flugobjekts untersucht werden kann. Dafür werden, wie in 3.2.1 erläutert, unterschiedlichste Brückenkonstruktionen samt verschiedener Sicherheitsabstände zusammengestellt. Diese sollen mit den auf Abb. 3.9 dargestellten unterschiedlichen Brennweiten abgetastet werden. So entstehen Bauwerksbereiche, welche fotografisch gut mittels UAS aufgenommen werden können, und Bereiche, welche außerhalb des Sichtfelds des UAS liegen. Die Untersuchung findet zunächst für alle Parameterkonstellationen statt, auch wenn diese in der Praxis unüblich oder nicht sinnvoll sind. Dieses Vorgehen soll der späteren Auswertung und Festlegung von Grenzwerten helfen.

Die Untersuchung findet für jede einzelne Parameterkombination statt: sowohl für die einzelnen Bauwerkskonstellationen als auch mit den unterschiedlichen Brennweiten. Dafür werden die einzelnen Bildwinkel (Abb. 3.9) je Brennweite entlang der jeweiligen Linien, welchen den Sicherheitsabstand kennzeichnen (Abb. 3.8, links), geführt, als sei das UAS imaginär einmal um den Brückenquerschnitt herumgeflogen. Dabei werden die Bereiche, welche im Bildfeld des Brennweitendreiecks liegen, ausgemessen und für die spätere Auswertung tabellarisch festgehalten. Es werden jeweils die Brückenunterseite in Quer- und Längsrichtung, die Hauptträger sowie der Brückenüberstand einzeln untersucht. Dieses Vorgehen wird in Querrichtung für einen Streifen von einem Meter durchgeführt. So ist dieser Streifen im späteren Verlauf auf diverse Brückenlängen übertragbar. Abschließend werden die Werte der sichtbaren Bereiche mathematisch zusammengefasst, sodass ein Endergebnis für jede Brückenkonstellation entsteht. Als Endergebnis entsteht ein Excelsheet, welches nach Eingabe der vorliegenden Brückenparameter, die Befliegbarkeit dieses Bauwerks bewertet. Das heißt, es wird eine Aussage darüber getroffen, welcher prozentuale Anteil der zu betrachtenden Brücke mittels UAS befliegen werden kann und zur Inspektion entsprechend brauchbares Bildmaterial liefert.

Das Vorgehen ist beispielhaft auf Abb. 3.10 dargestellt. Hier werden die Unterseite der Fahrbahnplatte sowie die Querträger in Querrichtung betrachtet. Der Sicherheitsabstand beträgt in diesem Beispiel 1,0 m. Das Verfahren wird aber ebenso für die drei weiteren, grau dargestellten Sicherheitsabstände durchgeführt. Die Brennweite ist in dem Beispiel 70 mm. Es wird deutlich, dass nur ein kleiner Teil der Querträger im Bildbereich liegen (Abb. 3.10, blaues Dreieck). Die Hauptträger dagegen liegen fast vollständig im aufgespannten Dreieck der Brennweite (Abb. 3.10, orangene Linie). Dies ist durchweg positiv zu bewerten, an dieser Stelle jedoch nicht von Bedeutung, da es um die Unterseite der orthotropen Platte sowie die Querträger geht. Für die Hauptträger findet eine gesonderte Untersuchung statt, in der der Bereich des Hauptträgers explizit vermessen wird. Alle Bereiche, welche von der Unterseite der Platte oder des Querträgers im Sichtbereich liegen, werden notiert. Abschließend wird das Ergebnis aus der Untersuchung auf Abb. 3.10 auf die linke Bauwerksseite an der Symmetrieachse gespiegelt.

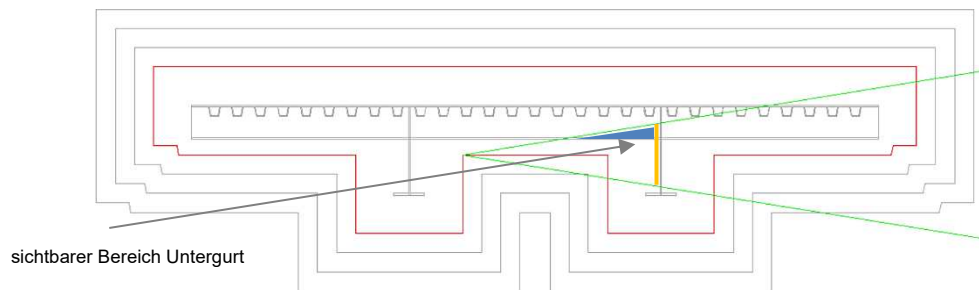


Abb. 3.10: Beispielhafte Analyse eines Brückenquerschnitts bzgl. der Plattenunterseite mit 70 mm Brennweite und 1,0 m Sicherheitsabstand (nach [25])

Die gleiche Untersuchung wird mit den anderen drei Brennweiten und den verschiedenen Sicherheitsabständen durchgeführt. Durch die größeren Bildwinkel kann bei derselben Kameraposition bereits ein Teil der Längssteifen fotografisch aufgenommen werden. Die Ergebnisse werden notiert und im späteren Verlauf mathematisch ausgewertet.

Analyse der Einzelfelder

Durch die graphische Untersuchung soll dargestellt werden, welcher Bereich eines Bauwerksabschnitts mittels Kamera bzw. UAS aufgenommen werden kann. Die Auswertung erfolgt geometrisch. Dabei steht die vorhandene Gesamtfläche der Flächen je Bauteil gegenüber, welche in den Brennweitendreiecken aus der vorherig beschriebenen Untersuchung liegen.

Bei der Betrachtung der Unterseite der Fahrbahnplatte zwischen den Hauptträgern in Querrichtung handelt es sich vor allem um die Oberfläche der Längssteifen sowie den Abschnitten der Platte zwischen den Steifen. Dieser Bereich ist erwartungsgemäß der komplizierteste Bauwerksbereich für Fotoaufnahmen. Die Längssteifen verhindern oft die Betrachtung ihrer der Kamera abgewandten Seite sowie dem dahinterliegenden Plattenabschnitt. Die Analyseergebnisse bestätigen diesen problematischen Bereich. So ist der höchste prozentuale Anteil, welcher bei der Betrachtung der Unterseite der Platte zwischen den Hauptträgern erreicht wird, 48,04 %. Dieser Wert ergibt sich bei einer Hauptträgerhöhe von 1,25 m mit einem Abstand

zueinander von 10,20 m, einem Sicherheitsabstand des UAS von 1,5 m und der Verwendung eines 24 mm-Objektivs. Da es sich hier um eine eher unrealistische Brückenkonfiguration handelt, ist dieses beste Ergebnis kritisch zu betrachten. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Brennweite die möglichen Hauptträgerabstände geringer werden können, um sichtbare Bereiche zu ermitteln. Das heißt, bei einer Hauptträgerhöhe von 2,5 m und einem Sicherheitsabstand von 1,0 m können sichtbare Bereiche mit einem 70 mm-Objektiv ab einem Hauptträgerabstand von 9,0 m aufgezeigt werden. Bei einem 50 mm-Objektiv ist dies bei einem Hauptträgerabstand von 6,60 m, bei einem 35 mm-Objektiv ab 5,40 m und bei dem 24 mm-Objektiv bereits bei einem Abstand der Hauptträger untereinander von 4,20 m der Fall. Einen Grenzfall bilden ein Sicherheitsabstand von 2,5 m und die Objektive mit 24 mm und 35 mm Brennweite. Bei dieser Konfiguration liegt die Plattenunterseite zu weit entfernt vom UAS bzw. der Kamera, sodass hier keine photographischen Aufnahmen von der Platte gemacht werden können und der inspizierbare Bereich somit bei 0 % liegt. Auch zeigt sich allgemein, dass mit zunehmendem Hauptträgerabstand prinzipiell bessere Ergebnisse erreicht werden. Je größer jedoch die Höhe der Hauptträger wird, desto geringer wird der Anteil der Plattenunterseite, welche gut aufgenommen werden kann. Diese Regel gilt jedoch nur bis zu einem gewissen Grenzwert der Hauptträgerhöhe, welcher für jeden Hauptträgerabstand und in Abhängigkeit der Brennweite variiert. Ab dieser Grenzhöhe ändern sich die Ergebnisse nicht weiter, auch bei variierenden Werten für Brennweite und Sicherheitsabstand.

Die Unterseite der orthotropen Platte in Längsrichtung zeigt im Vergleich zur Querrichtung Untersuchungsergebnisse bis zu 100%. Das heißt, die Unterseite der orthotropen Platte kann je nach Parametervariation vollständig mittels UAS in ausreichender Qualität aufgenommen werden. Der Grund dafür liegt an der Nähe der Kamera bzw. des UAS zur Unterseite der Steifen. Diese bilden in der Querrichtung den diffizilsten zu inspizierenden Part. Für die Untersuchung in Längsrichtung wird das Bauteil in drei verschiedene Elemente gegliedert: die Unterseite der Steifen (siehe Abb. 3.11, rot), die seitlichen Flächen der Steifen (siehe Abb. 3.11, orange) sowie die Unterseite der Platte selbst (siehe Abb. 3.11, blau).

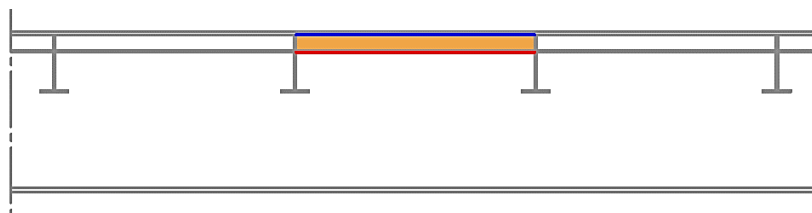


Abb. 3.11: Prinzipdarstellung der betrachteten Plattenunterseite in Längsrichtung (nach [25])

Bei Variation der Brennweite fällt auf, dass, wie zuvor bei der Betrachtung der Unterseite in Querrichtung, mit kleineren Brennweiten größere Bereiche inspiziert werden können. Außerdem werden bei abnehmender Brennweite die möglichen Abstände der Querträger untereinander geringer, bei denen noch Bereiche an der Unterseite der Platte aufgenommen werden können. Vergrößert sich der Querträgerabstand bei ansonsten gleichbleibenden Parametern, erhöht sich der Anteil des aufnehmbaren Bereichs der Plattenunterseite, während er sich bei

steigender Querträgerhöhe verringert. Dieses Verhalten lässt sich gut mit der Prinzipdarstellung auf Abb. 3.10 verdeutlichen und lässt sich durch den gewonnenen Platz für das UAS zwischen den Querträgern erklären. Diese positiven Besichtigungswerte sind jedoch auch in Längsrichtung stark abhängig vom Sicherheitsabstand des UAS. Ist dieser größer als 1,50 m, verringern sich die erkennbaren Bauwerksbereiche. Bei einem Sicherheitsabstand von 2,00 m liegt der Erkennungsbereich, für jede Brennweite, bereits unter 50 %. Bei einem Abstand von über 2,00 m liegen diese größtenteils bei 0 %.

Bei dem Überstand der Platte seitlich über die Hauptträger hinaus ergeben sich die gleichen Werte wie für die zuvor beschriebene Plattenunterseite in Längsrichtung. In Querrichtung verhält sich die Unterseite der Platte im Bereich des seitlichen Überstands different zum Bereich zwischen den Hauptträgern. Abb. 3.12 (l.) zeigt den entsprechenden Bauwerksbereich.



Abb. 3.12: Prinzipdarstellung des betrachteten Plattenüberstands auf der Unterseite (l.) und des Hauptträgers (r.) (nach [25])

Bei einer Brennweite von 24 mm und einem Sicherheitsabstand von 1,00 m ergibt sich ein maximal aufnehmbarer Bereich des Überstandes von 47,91 %. Bei einem Sicherheitsabstand von 6,00 m liegt dieser Anteil bei nur 19,38 %, dem kleinsten Wert. Durchschnittlich liegen die Werte für den Überstand zwischen 30 % und 40 % Sichtbarkeit. Es zeigt sich, dass die sichtbaren Anteile des Überstandes geringer werden je größer der Überstand selbst wird. Die Ausnahme bildet nur die oben genannte Konfiguration. Der Grund dafür liegt in der doppelten Betrachtungsweise der äußersten Steifen. Diese können bei dem geringen Sicherheitsabstand von 1,00 m bei einer Brennweite von 24 mm sowohl nach außen gerichtet, weg vom Hauptträger, als auch nach innen gerichtet, zum Hauptträger, aufgenommen werden. Der Sicherheitsabstand selbst verliert bei den Brennweiten 50 mm und 70 mm an Bedeutung. Bei den Brennweiten 24 mm sowie 35 mm ist mit konstantem Sicherheitsabstand von 2,5 m erkennbar, dass die Länge des Überstandes keinen Einfluss auf die absoluten Werte hat. Hier nimmt jedoch die Gesamtoberfläche zu, sodass sich somit die sichtbaren Anteile relativ reduzieren. Außerdem zeigt die Analyse, dass abnehmende Brennweiten zu größeren erkennbaren Anteilen des Plattenüberstandes führen.

Für die Betrachtung des Hauptträgers in Querrichtung wird dieser untergliedert in Steg und Flansch. Der Steg wird wiederum in ‚Innenseite‘ (zum anderen Hauptträger gerichtet) und ‚Außenseite‘ (zum Überstand gerichtet) unterteilt (siehe Abb. 3.12, rechts). Der innere Steg hat hier zur Verdeutlichung eine rote Färbung, der Äußere eine blaue sowie der Untergurt eine orangefarbene. Die Innenseite des Stegs erreicht als Maximalwert 95,34 % bei einer Brennweite von 24 mm, einer Hauptträgerhöhe von 3,50 m sowie eines Sicherheitsabstands von 1,00 m, 1,50 m und 2,00 m. Der Mindestabstand der Hauptträger untereinander muss dafür bei einem

Sicherheitsabstand von 1,00 m 4,20 m betragen und bei einem Sicherheitsabstand von 2,00 m muss der Abstand zum anderen Hauptträger 6,60 m betragen. Insgesamt werden mit einem Sicherheitsabstand von 1,00 m die besten Erkennungswerte erreicht. Steigt der Sicherheitsabstand auf 2,50 m, liegen nahezu alle Werte unter 50 %. Im Vergleich zu den Steginnenseiten können bei den Stegaußenseiten insgesamt größere Werte für sichtbare Bereiche ermittelt werden. Der maximale Anteil entspricht hier mit 95,34 % (Brennweite 24 mm, Hauptträgerhöhe 3,5 m, Sicherheitsabstand 1,00 m–2,00 m) zwar dem der inneren Stegseite. Insgesamt liegen hier die Werte jedoch über 80 %. Der minimalste Anteil wird bei dieser Betrachtung bei einer Brennweite von 35 mm mit 18,59 % erreicht. Insgesamt nimmt die sichtbare Fläche mit steigender Hauptträgerhöhe zu, während sie sich unabhängig von der Überstandlänge verhält. Die Unterseite der Hauptträger ist stets bei allen Parametervariationen zu 100 % sicht- und inspizierbar. Die Flanschoberseite jedoch wird ebenfalls unterschieden in ‚Innenseite‘ sowie ‚Außenseite‘. Für die Innenseite der Oberseite des Hauptträgeruntergurts gilt, dass ihre Sichtbarkeit von der Hauptträgerhöhe abhängt. Lediglich bei Parameterkombinationen mit sehr geringen Hauptträgerabständen ist die Oberseite grundsätzlich nicht inspizierbar, da das UAS nicht zwischen die Hauptträger fliegen kann. Ansonsten ist die innere Oberseite bei 1,00 m Sicherheitsabstand ab 1,50 m Hauptträgerhöhe, bei 1,50 m Sicherheitsabstand ab 2,00 m Hauptträgerhöhe und bei 2,50 m Sicherheitsabstand ab 3,00 m Trägerhöhe gut mittels UAS aufnehmbar. Die Außenseite der Flanschoberseite, also im Bereich des Plattenüberstands, ist bei den Brennweiten 50 mm und 70 mm bei allen Parameterkombinationen sichtbar. Bei den Brennweiten 24 mm und 35 mm ergibt sich, dass eine bestimmte Höhe des Hauptträgers (2,50 m) einen Maximalwert von 3,60 m für einen möglichen Plattenüberstand bestimmt, für welchen die Oberseite sichtbar bleibt.

Für die Ergebnisbetrachtung der Querträger ist erneut die Unterscheidung zwischen der Oberfläche des Querträgerstegs sowie des Untergurts wichtig. Die Stegoberfläche ergibt einen maximal sichtbaren Flächenbereich von 100 % bei einer Querträgerhöhe von 1,40 m und 35 bzw. 24 mm Brennweite. Der Querträgerabstand muss dafür 4,50 m bei der Brennweite von 35 mm und 3,50 m bei der Brennweite von 24 mm betragen. Insgesamt nehmen die sichtbaren Steganteile mit wachsendem Querträgerabstand zu, während sie bei zunehmender Querträgerhöhe geringer werden. Insgesamt liegen die Werte für sichtbare Bereiche bei geringen Sicherheitsabständen (1,00 m und 1,50 m) im Durchschnitt bei 80 %. Vergrößert sich der Sicherheitsabstand, verringern sich wie bei den Bauteilen zuvor die Werte für sichtbare Bereiche um ca. 30 %. Wird bei diesem Abstand eine Brennweite von 35 mm eingesetzt, liegt das sichtbare Ergebnis sogar bei 0 %.

Die Unterseite der Querträger in Querrichtung ist bei allen Parameterkombinationen bis zu einem Sicherheitsabstand von 2,50 m deutlich sichtbar. Lediglich ab einem Sicherheitsabstand von 2,50 m ermöglicht nur die Brennweite von 50 mm eine sichtbare Querträgerunterseite. Dahingegen ist die Oberseite der Untergurte lediglich bei einem Sicherheitsabstand von 1,0 m und einer Querträgerhöhe von 1,40 m per Fotoaufnahme inspizierbar. Querträgerabstand und Brennweite nehmen auf dieses Ergebnis keinen Einfluss. Dieser Bereich stellt grundsätzlich einen kritischen Bereich dar.

Ein separat betrachteter Bereich sind die Schweißnähte der Brückenkonstruktion mit orthotroper Fahrbahnplatte, da es sich bei Schäden in Schweißnähten nicht um flächenhafte Schädigungen, sondern um feinste Risse handelt. Die Schweißnähte sind vorrangig zwischen den Längssteifen und der Plattenunterseite zu finden, aber auch am Querträgersteg. Wie in 3.2.1 erörtert, sind daher für Schweißnähte für jede Brennweite maximale Sicherheitsabstände definiert, die ein Erkennen zulassen. Die geringen maximalen Abstände führen in Kombination mit den Bildwinkeln bzw. Brennweiten dazu, dass diese nicht die Brückenunterseite und somit die Schweißnähte zwischen Längssteife und Plattenunterseite darstellen können. Schäden der Kategorie 1 aus Abb. 2.15 können somit gar nicht erkannt werden. Die einzige Ausnahme bilden die jeweils äußersten Steifen am Plattenüberstand aufgrund der seitlichen Platzierung des UAS neben der Platte. Die Schweißnähte zwischen den Längssteifen und Querträgern werden bei der Betrachtung noch einmal unterteilt in den Bereich zwischen den Hauptträgern sowie in die Überstandbereiche. Auch diese Schweißnähte sind nahezu nicht aufnehmbar. Lediglich kann mit einer Brennweite von 35 mm und einem Sicherheitsabstand von 1,00 m ca. 50 % der Schweißnähte an den Steifen fotografisch aufgenommen werden. In Querrichtung muss ein Hauptträgerabstand von mindestens 5,40 m gegeben sein, um zumindest Teile der Steifen aufnehmen zu können. Der erkennbare Anteil liegt hier zwischen 14,68 % bei 5,40 m Hauptträgerabstand und 33,83 % bei 10,20 m Hauptträgerabstand. Die Hauptträgerhöhe hat hierauf keinen Einfluss. Im Bereich des seitlichen Überstands ergeben sich erneut wegen der seitlichen Befliegung der Brücke Werte bis zu 52,99 % (35 mm Brennweite, 1,00 m Sicherheitsabstand). Mit zunehmenden Maßen für den seitlichen Plattenüberstand sowie den Sicherheitsabstand nehmen die Werte ab.

Die Schweißnähte im Bereich der Querträger, welche in die Schadenskategorie 3 nach Abb. 2.15 fallen, werden rein qualitativ untersucht („sichtbar“, „nicht sichtbar“), da diese Schädigungen nur selten an realen Brückenbauwerken stattfinden. Diese Art von Schweißnaht kann lediglich bei einer Querträgerhöhe von 1,40 m und einem Sicherheitsabstand von 1,00 m aufgenommen werden. Eine weitere qualitative Analyse umfasst die Schweißnähte zwischen dem Querträgeruntergurt sowie dem Hauptträger. Auch hier kann die Schweißnaht an der Oberseite des Querträgeruntergurts am Hauptträger ebenfalls nur bei einem Sicherheitsabstand von 1,00 m sowie einer Querträgerhöhe von 1,40 m erfasst werden. Die Unterseite des Querträgeruntergurts ist bei 1,00 m Sicherheitsabstand für die Brennweiten 24 und 35 mm vollständig mit dem UAS aufnehmbar. Größere Sicherheitsabstände bewirken hier ebenfalls, dass die Schweißnaht nicht mehr sichtbar ist. Die Seiten des Flansches werden bei der geometrischen Untersuchung vernachlässigt. Für die Schweißnaht zwischen Querträgersteg sowie Hauptträger wird erneut eine quantitative Analyse durchgeführt, weil die aufnehmbaren Schweißnahtlängen stark abhängig sind von Sicherheitsabstand, Querträgerhöhe und -abstand sowie Brennweite. Bei einem Sicherheitsabstand von 1,00 m, einer Brennweite von 35 mm sowie einer Querträgerhöhe von 1,40 m und einem Querträgerabstand von 4,50 m wird das maximale Ergebnis von 84,08 % erreicht. Bei einem Sicherheitsabstand von 1,00 m unterschreiten die Ergebnisse nie 50 %. Erhöht sich der Sicherheitsabstand auf 1,50 m, reduziert sich der aufnehmbare Anteil der Schweißnaht zwischen Querträgersteg und Hauptträger auf 45,99 %. Bei größeren Sicherheitsabständen liegen die Werte bei 0 %.

Die Verbindung zwischen Hauptträgersteg und Hauptträgeruntergurt wird an dieser Stelle in zwei Schweißnahtbereiche unterteilt. Es werden die äußeren Schweißnähte Richtung Plattenüberstand sowie die innenliegenden Nähte, welche im Feld zwischen den beiden Hauptträgern liegen, betrachtet. Bei den innenliegenden Nähten sind die Mindestanforderungen für eine Erkennbarkeit ein Sicherheitsabstand von 1,0 m sowie einer Höhe des Hauptträgers von 1,50 m. Die Brennweite sowie der Abstand zwischen den Hauptträgern sind hier ohne Einfluss. Wird der Sicherheitsabstand auf 1,50 m gesteigert, muss parallel die Hauptträgerhöhe maximiert werden, um die Schweißnähte am Steg aufnehmen zu können. Dabei ist außerdem ein Abstand zwischen den beiden Hauptträgern von mindestens 5,40 m vonnöten. Wird der Sicherheitsabstand erneut auf 2,00 m bzw. 2,50 m erhöht, ist die Schweißnaht nur mit Brennweiten von 35 mm oder 70 mm erkennbar. Bei den außenliegenden Schweißnähten ist die Sichtbarkeit besser. Dort kann das UAS bei kleinen Plattenüberständen gut seitlich neben der Brücke positioniert werden und kann Aufnahmen der Schweißnähte selbst bei geringen Hauptträgerhöhen machen. Die Sichtbarkeit der Schweißnähte ist hier unabhängig von der Hauptträgerhöhe bis zu einem Plattenüberstand von 3,00 m. Erst ab einem Überstand von 3,60 m ist die Entfernung des UAS zur Schweißnaht zu groß, um diese noch in geforderter Qualität aufzunehmen. Ab einem seitlichen Überstand von 4,20 m entsprechen die Ergebnisse denen der innenliegenden Schweißnähte. Üblicherweise sind die seitlichen Überstände eher klein oder gar nicht vorhanden, sodass die Ergebnisse der Sichtbarkeit hier gut ausfallen.

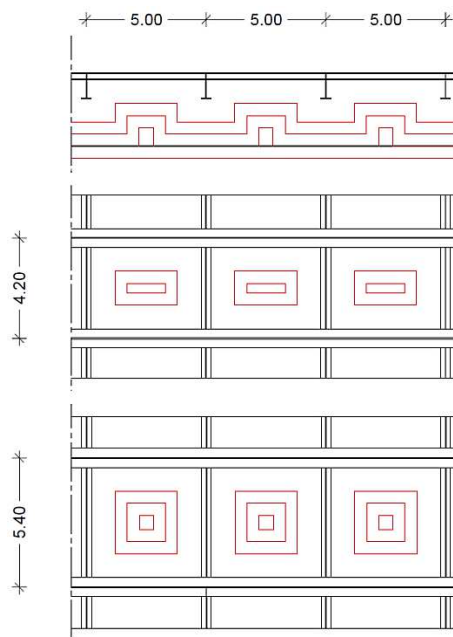


Abb. 3.13: Beispiele von Trägerabstandkombinationen; oben: Längsschnitt; Mitte: Plattenuntersicht mit HT-Abstand 4,20 m; unten: Plattenuntersicht mit HT-Abstand 5,40 m (nach [25])

Neben der reinen Betrachtung der Längs- sowie Querrichtung der Brückenspezifikationen, ergibt sich bei der Verschmelzung beider Richtungen ein Bereich an der Plattenunterseite, welcher durch die getrennte Betrachtung nicht betrachtet werden kann. Dieses Phänomen tritt nicht immer auf, da aufgrund des gleichen Sicherheitsabstands eigentlich jeder sichtbare

Flugtaugliche Bereiche

Punkt in Längs- oder Querrichtung jeweils über die gesamte Breite auch wirklich als sichtbar gilt. Es gibt jedoch parametrische Kombinationen von Querträgerabstand und Hauptträgerabstand bei der zweiaxialen Betrachtungsweise, bei denen einige Sicherheitsabstände geometrisch nicht möglich sind. So zeigt Abb. 3.13 beispielhaft einen Querträgerabstand von 5,00 m. Die roten Linien im oberen Querschnitt zeigen die Fluglinien des UAS mit 1,00 m, 1,50 m und 2,00 m Sicherheitsabstand. Werden diese auf unterschiedliche Hauptträgerabstände angewandt, wird deutlich, dass die 2,00 m Sicherheitsabstand bei einem Hauptträgerabstand von 4,20 m nicht angewandt werden kann. Dieses Phänomen muss auf die bisherigen Messungen übertragen und in den Messergebnissen entsprechend berücksichtigt werden. Tab. 3.3 und Tab. 3.4 zeigen die betreffenden Parameterkombinationen.

Abstand HT	Sicherheitsabstand	Abstand QT	Abstand HT	Sicherheitsabstand	Abstand QT
4,20 m	1,50 m	2,5–3,0 m	7,80 m	2,50 m	2,5–5,0 m
5,40 m	1,50 m	2,5–3,0 m	9,00 m	1,50 m	2,5–3,0 m
5,40 m	2,00 m	2,5–4,0 m	9,00 m	2,00 m	2,5–4,0 m
6,60 m	1,50 m	2,5–3,0 m	9,00 m	2,50 m	2,5–5,0 m
6,60 m	2,00 m	2,5–4,0 m	10,20 m	1,50 m	2,5–3,0 m
6,60 m	2,50 m	2,5–5,0 m	10,20 m	2,00 m	2,5–4,0 m
7,80 m	1,50 m	2,5–3,0 m	10,20 m	2,50 m	2,5–5,0 m
7,80 m	2,00 m	2,5–4,0 m			

Tab. 3.3: Geometrische Sichtbarkeitseinschränkungen durch Querträgerabstände

Abstand QT	Sicherheitsabstand	Abstand HT
4,50 m	2,00 m	4,20 m
5,00 m	2,00 m	4,20 m
5,50 m	2,00 m	4,20 m
5,50 m	2,50 m	4,20–5,40 m

Tab. 3.4: Geometrische Sicherheitseinschränkungen durch Hauptträgerabstände

3.2.4 Graphische Analyse – Flächenbetrachtung

Nach der geometrischen Abtastung und Untersuchung der mittels UAS möglichen zu inspizierenden Bauwerksbereiche, werden die in Längs- und Querrichtung der Brücken gemessenen Strecken mittels geometrischer und mathematischer Berechnungen in Flächen überführt. Das Ziel ist hier, ein automatisiertes Tool zu entwickeln, in welches die Grundparameter einer vorhandenen Brücke mit orthotroper Fahrbahnplatte (Abstand Hauptträger, Abstand Querträger, Höhe Hauptträger etc.) eingetragen werden und als Ergebnis die prozentuale Fläche ausgegeben wird, von welcher mit Hilfe eines UAS qualitativ ausreichendes Bildmaterial aufgenommen werden kann. Das bedeutet, die zuvor einzeln betrachteten Bereiche wie Hauptträger, Querträger oder der Plattenüberstand werden für ein Plattenfeld zwischen zwei Querträgern zusammengeführt und die Oberfläche pro Feld einzeln ermittelt. Abschließend werden sie in ein Gesamtergebnis, abhängig von der Gesamtgröße der vorhandenen Brücke, überführt. Abb. 3.14 (oben) dient der Verdeutlichung der einzeln zu ermittelnden Bauteilbereiche sowie der in rot gefärbten Fläche eines betrachteten Gesamtfeldes (unten).

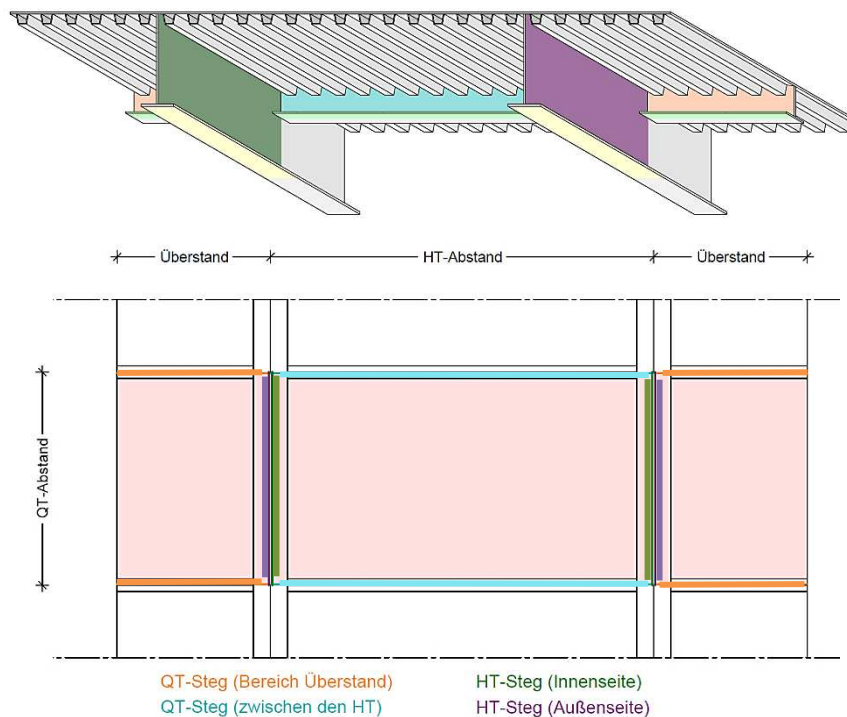


Abb. 3.14: o.: isometrische Darstellung der einzelnen Teilflächen; u.: Darstellung der einzeln zu ermittelnden Flächen pro Feld (nach [25])

Bereich I: Haupt- und Querträger

Bei der Betrachtung eines Feldes wird unterschieden zwischen der Fläche zwischen zwei Haupt- und Querträgern sowie zweimal der Fläche des Plattenüberstands. Für den mittleren Bereich zwischen den Trägern wird der Hauptträgersteg zweimal, jeweils innen pro Seite, einbezogen (Abb. 3.14, grün). Bei den Querträgerstegen verhält es sich genauso (Abb. 3.14, türkis). Die jeweils andere Stegseite gehört zu dem nächsten angrenzenden Feld. Bei den Überstandflächen wird die Stegfläche des Querträgers vier Mal einbezogen (Abb. 3.14, orange) sowie die Außenseite des Hauptträgerstegs zweimal (Abb. 3.14, lila). So werden sowohl die zuvor analysierte inspizierbare Fläche ((Gl. 9) bis (Gl. 12)) als auch die Gesamtfläche des Haupt- und Querträgerstegs ((Gl. 13) bis (Gl. 16)) mithilfe der folgenden Formeln ermittelt.

$$\text{QT-Steg Überstand, orange:} \quad A_{QT-St,\ddot{u},insp.} = 4 \cdot A_{QT-Steg} [m^2/m] \cdot L_{\text{Überstand}} [m] \quad (\text{Gl. 9})$$

$$\text{QT-Steg zw. HT, türkis:} \quad A_{QT-St,HT,insp.} = 2 \cdot A_{QT-Steg} [m^2/m] \cdot \text{Abstand HT} [m] \quad (\text{Gl. 10})$$

$$\text{HT-Steg innen, grün:} \quad A_{HT-St,i,insp.} = 2 \cdot A_{HT-Steg,i} [m^2/m] \cdot \text{Abstand QT} [m] \quad (\text{Gl. 11})$$

$$\text{HT-Steg außen, lila:} \quad A_{HT-St,a,insp.} = 2 \cdot A_{HT-Steg,a} [m^2/m] \cdot \text{Abstand QT} [m] \quad (\text{Gl. 12})$$

Flugtaugliche Bereiche

$$\text{QT-Steg Überstand, orange: } A_{QT-St,\ddot{u},ges} = 4 \cdot h_{QT-Steg} [m^2/m] \cdot L_{\ddot{u}berstand} [m] \quad (\text{Gl. 13})$$

$$\text{QT-Steg zw. HT, türkis: } A_{QT-St,HT,ges} = 4 \cdot h_{QT-Steg} [m^2/m] \cdot Abstand HT [m] \quad (\text{Gl. 14})$$

$$\text{HT-Steg innen, grün: } A_{HT-St,i,ges} = 4 \cdot h_{HT-Steg} [m^2/m] \cdot Abstand QT [m] \quad (\text{Gl. 15})$$

$$\text{HT-Steg außen, lila: } A_{HT-St,a,ges} = 4 \cdot h_{QT-Steg} [m^2/m] \cdot Abstand QT [m] \quad (\text{Gl. 16})$$

mit: QT = Querträger, HT = Hauptträger, St = Steg, a = außen, i = innen, insp. = gemessene inspizierbare Fläche, ges. = Gesamtfläche, h = Höhe, A = Fläche, L = Länge, zw.= zwischen

Hinzuzufügen ist die Oberfläche der Haupt- und Querträgeruntergurte. Die Hauptträgeruntergurte unterteilen sich in die jeweils fast vollständig zu inspizierbaren Unterseiten und Seitenflächen sowie in die nur teilweise mittels UAS aufnehmbaren Untergurtoberseiten. Bei der Berechnung der Querträgerunterseiten ist zu beachten, dass diese nur zur Hälfte in das Ergebnis für ein betrachtetes Feld eingehen, da die andere Hälfte zum nächsten angrenzten Feld gehört. Analog zur Berechnung der inspizierbaren Fläche der Trägerstege, werden die Flächen der Untergurte von Haupt- und Querträger nach folgenden Gleichungen ((Gl. 17) bis (Gl. 20)) errechnet.

$$\text{HT-UG Unterseite, gelb: } A_{HT-UG,u,insp.} = 2 \cdot (A_{HT-UG} [m^2/m] + 2 \cdot A_{HT-UG,Seite} [m^2/m]) \cdot Abstand QT [m] \quad (\text{Gl. 17})$$

$$\text{QT-UG Unterseite, gelb: } A_{QT-UG,u,insp.} = (A_{QT-UG} + 2 \cdot A_{QT-UG,Seitl.}) [m^2/m] \cdot (2 \cdot L_{\ddot{u}berstand} [m] + Abstand HT [m]) \quad (\text{Gl. 18})$$

$$\text{HT-UG, Oberseite, gelb: } A_{HT-UG,o,insp.} = 2 \cdot A_{HT-UG,o} [m^2/m] \cdot Abstand QT [m] \quad (\text{Gl. 19})$$

$$\text{QT-UG, Oberseite, gelb: } A_{QT-UG,o,insp.} = (A_{QT-UG,o} [m^2/m]) \cdot (2 \cdot L_{\ddot{u}berstand} [m] + Abstand HT [m]) \quad (\text{Gl. 20})$$

mit: QT = Querträger, HT = Hauptträger, UG = Untergurt, o = Oberseite, u = Unterseite, seitl. = seitlich, insp. = gemessene inspizierbare Fläche, ges. = Gesamtfläche, L = Länge, A = Fläche

Bereich II: Plattenbereich zwischen den Hauptträgern

Die Plattenunterseite ist ein weiterer Bereich, welcher gesondert zu betrachten ist. Er teilt sich in die Unterseite der Fahrbahnplatte sowie die Oberfläche der Längssteifen in Längs- und Querrichtung auf. Abb. 3.15 zeigt die einzelnen, in 3.2.3 zuvor gemessenen, Bauteilbereiche.

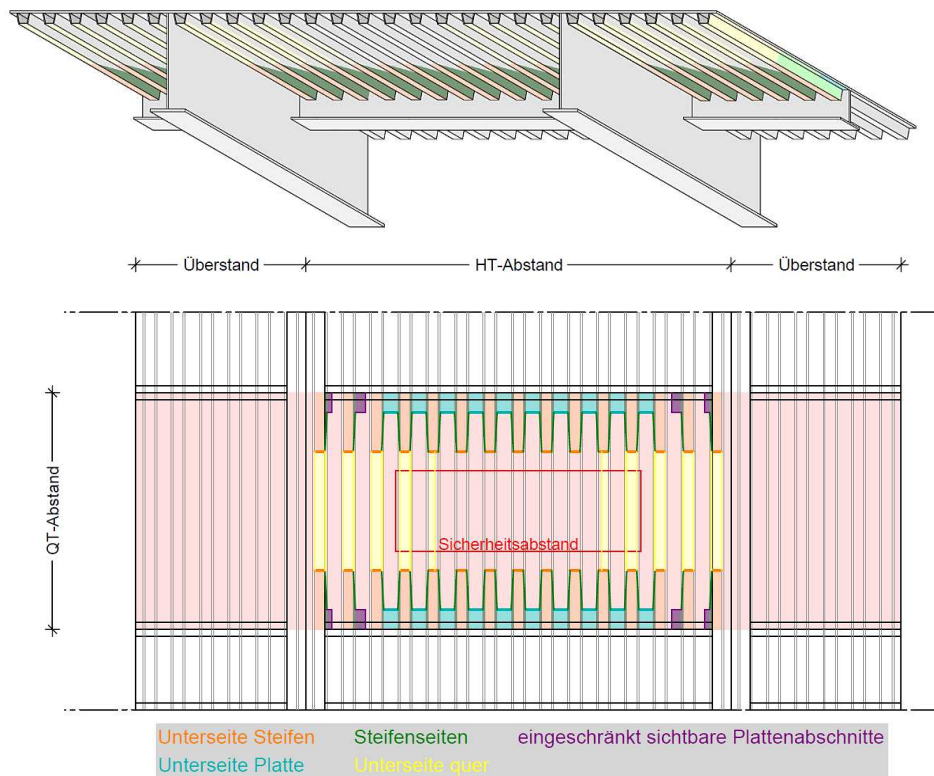


Abb. 3.15: o.: Isometrische Darstellung der Plattenunterseite; u.: Darstellung sichtbarer Einzelbereiche an Plattenunterseite (nach [25])

Dabei ist es wichtig, zu beachten, dass die Plattenunterseite nicht immer über die komplette Breite eines Feldes sichtbar ist, da vor allem ihre Außenseiten in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands und den resultierenden Blickwinkel des UAS von jeweils anderen Steifen bedeckt sind (Abb. 3.15 unten, türkis). Abb. 3.16 verdeutlicht dieses geometrische Phänomen außerdem. Die sichtbare Gesamtoberfläche der Plattenunterseite zwischen den Steifen wird somit stets um eine gewisse Anzahl an Plattenabschnitten zwischen den Steifen bei der automatischen Flächenberechnung auf $n_{PA,red}$ (PA = Plattenabschnitt zwischen zwei Steifen) reduziert.

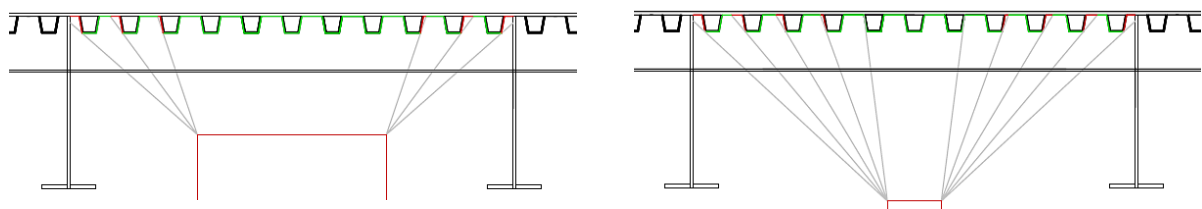


Abb. 3.16: Beispiel für Sichteinschränkung der seitlichen Steifen in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands (beispielhaft hier l.: 1,50 m; r.: 2,50 m) (nach [25])

Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich aufgrund des Bildformats von 3:2 jeder Punkt erfassen lässt, der auf der Horizontalen maximal 1,5-mal weiter von dem UAS entfernt ist als auf der Vertikalen. Durch diese Untersuchung jeder einzelnen Parameterkombination ergibt

sich eine Regel, für welchen Sicherheitsabstand wie viele Steifen von der Oberflächenberechnung ausgeschlossen werden müssen (siehe Tab. 3.5, erste Spalte.).

Sicherheitsabstand	$n_{PA,red}$ [-]	Sichtbare Platte	$n_{Steifen,sichtbar}$ [-]
1,00 m	$n_{Steifen} - 3$	0,3852 m	$(n_{Steifen} \cdot 2) - 4$
1,50 m	$n_{Steifen} - 5$	0,83904 m	$(n_{Steifen} \cdot 2) - 6$
2,00 m	$n_{Steifen} - 7$	1,28336 m	$(n_{Steifen} \cdot 2) - 8$
2,50 m	$n_{Steifen} - 7$	1,16094 m	$(n_{Steifen} \cdot 2) - 8$

Tab. 3.5: Regel für Anzahl zu subtrahierender Steifen von Gesamtsteifenfläche; eingeschränkt sichtbarer Plattenbereich zwischen zwei Steifen; Anzahl sichtbarer Steifenseiten

Auf Abb. 3.16 und Abb. 3.15 (unten, lila) sind ebenfalls die Bereiche der Plattenunterseite zu erkennen, welche aufgrund der Längssteifen und des jeweiligen Sicherheitsabstands des UAS durch die Sichtschatten nur zum Teil fotografisch aufgenommen werden können. Für diese Bereiche zwischen zwei Steifen kann durch die geometrischen Untersuchungen in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands ein fester Wert ermittelt werden, welcher für diese Bereiche immer gilt (Tab. 3.5, mittlere Spalte). Die seitlichen Flächen der Steifen bei Betrachtung in Längsrichtung nehmen linear nach oben hin ab, was an dem Blickwinkel der Kamera liegt (Abb. 3.15, oben, grün). Die ermittelten Regeln für die sichtbaren Plattenbereiche sowie die Anzahl der sichtbaren Seitenflächen der Längssteifen in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands sind in Tab. 3.5 in der zweiten sowie dritten Spalte zusammengefasst.

Bei der Berechnung der sichtbaren Fläche der Plattenunterseite in Längsrichtung ist zu beachten, dass hiervon bereits bei der Betrachtung in Querrichtung Anteile einbezogen sind. Diese dürfen nicht doppelt gewertet, sondern müssen herausgerechnet werden. Die Berechnung der einzelnen Unterseiten von Platte und Steifen im Bereich zwischen den Hauptträgern erfolgt nach den Gleichungen (Gl. 21) bis (Gl. 25).

$$\text{Unterseite Steifen, orange: } A_{Steife,u} = l_{Steife,u,l} [m] \cdot n_{Steife} [-] \cdot b_{Steife} [m] \quad (\text{Gl. 21})$$

$$\text{Unterseite Platte längs, türkis: } A_{Platte,u,l} = l_{Platte,u,l} [m] \cdot n_{PA,red} [-] \cdot b_{PA} [m] \quad (\text{Gl. 22})$$

$$\text{Seite Steifen, grün: } A_{Steife,seidl.} = l_{Steife,u,l} [m] \cdot h_{Steife} [m] \cdot n_{Steife} [m] \quad (\text{Gl. 23})$$

$$\text{Unterseite Platte e. sichtb., lila: } A_{Platte,u,e} = l_{Platte,u,l} [m] \cdot \text{Wert}_{Sichtbare\ Platte} [m] \quad (\text{Gl. 24})$$

$$\text{Unterseite Platte quer, gelb: } A_{Platte,u,q} = (\text{Abstand QT} - l_{Steife,u,l}) [m] \cdot l_{Platte,u,q} [m] \quad (\text{Gl. 25})$$

mit: QT = Querträger, l = Längsrichtung, q = Querrichtung, u = Unterseite, seidl. = seitlich, = gemessene Länge, A = Fläche, Wert = Wert aus Tab. 3.5, n = Anzahl, PA = Plattenabschnitt zwischen zwei Steifen, e = eingeschränkt sichtbar, b = Breite, h = Höhe

Um schlussendlich einen Vergleich durchführen zu können, wird von allen zuvor genannten Einzelflächen die theoretische Gesamtfläche ermittelt. Mit dieser sollen die per UAS aufgenommenen Flächen ins Verhältnis gesetzt werden, um eine Aussage über den Anteil des aufnehmbaren Anteils der Brücke ermitteln zu können.

Bereich III: Plattenüberstand

Analog zur Berechnung der Einzelbereiche der Platte und Längssteifen zwischen zwei Hauptträgern, werden die Einzelflächen der Bauteile im Bereich der beiden Plattenüberstände links und rechts vom jeweiligen Hauptträger ermittelt. Abb. 3.17 zeigt die farbigen zu ermittelnden Einzelflächen. Die farbliche Definition entspricht der aus Abb. 3.15. Ein Unterschied ist hier, dass es sich um zwei Überstände handelt, alle gemessenen Ergebnisse des UAS somit verdoppelt werden müssen.

Die Berechnung der sichtbaren Fahrbahnplattenbereiche zwischen den Steifen im Bereich der seitlichen Plattenüberstände (Abb. 3.17, türkis) ist hier ebenfalls abhängig vom Sicherheitsabstand des UAS und den damit entstehenden Sichtschatten. Die Ermittlung ist Tab. 3.6 (erste Spalte) zu entnehmen und verhält sich analog zu ‚Bereich II: Plattenbereich zwischen den Hauptträgern‘.

Sicherheitsabstand	$n_{PA,red,Überstand}$ [-]	$n_{Steifen,sichtbar,Überstand}$ [-]
1,00 m	$2 \cdot n_{Steifen,Überstand} - 3$	$(n_{Steifen,Überstand} \cdot 2) \cdot 2 - 6$
1,50 m	$2 \cdot n_{Steifen,Überstand} - 5$	$(n_{Steifen,Überstand} \cdot 2) \cdot 2 - 8$
2,00 m	$2 \cdot n_{Steifen,Überstand} - 7$	$(n_{Steifen,Überstand} \cdot 2) \cdot 2 - 10$
2,50 m	$2 \cdot n_{Steifen,Überstand} - 7$	$(n_{Steifen,Überstand} \cdot 2) \cdot 2 - 10$

Tab. 3.6: Regel für Anzahl zu subtrahierender Steifen von Gesamtsteifenfläche; Anzahl sichtbarer Steifen-seiten (gültig jeweils für seitlichen Plattenüberstand)

Dabei ist $n_{PA,red,Überstand}$ (PA = Plattenabschnitt zwischen zwei Steifen) die Anzahl vollständig sichtbarer Plattenabschnitte an einem seitlichen Plattenüberstand. Lila gefärbte Bereiche sind wieder die eingeschränkt sichtbaren Plattenunterseitenabschnitte zwischen zwei Längssteifen (Abb. 3.17, lila). Die Längssteifen sowie der Sicherheitsabstand verursachen einen gewissen Sichtschatten. Der feste Wert, welche zuvor für die lilafarbenen Bereiche ermittelt werden konnte, ist hier ebenfalls gültig (Tab. 3.5, mittlere Spalte) und eliminiert den Einfluss der Länge des Plattenüberstands auf das Endergebnis. Um die sichtbaren Seiten der Steifen zu ermitteln (Abb. 3.17, grün), wird die Flächen der seitlichen Steifen mit der Anzahl sichtbarer Steifen (Werte aus Tab. 3.6, zweite Spalte) multipliziert. Für die gelb gefärbte Unterseite der Fahrbahnplatte in Querrichtung gilt die zuvor ermittelte Gleichung (Gl. 25).

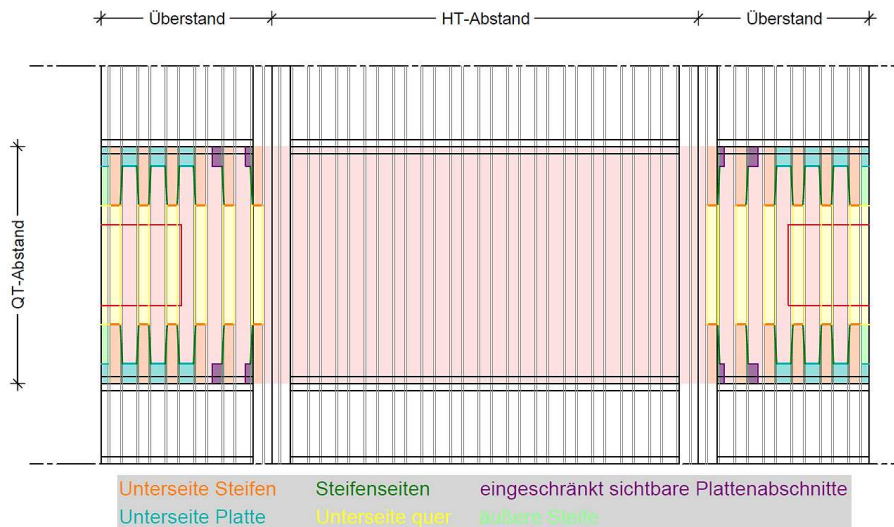


Abb. 3.17: Darstellung sichtbarer Einzelbereiche an Plattenunterseite im Bereich der Plattenüberstände (nach [25])

Eine Besonderheit sind hier die äußersten Seiten der Längssteifen jeweils am Ende des Überstands (Abb. 3.17, hellgrün). Durch ihre nach außen gerichtete Lage sind diese Flächen vollständig sichtbar für das UAS. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass diese zum Teil bereits bei den gelben bzw. türkisfarbenen Flächen eingeflossen sind. Eine Dopplung dieser Flächenbereiche im Gesamtergebnis wird durch entsprechende Subtraktion verhindert, was die Gleichungen (Gl. 26) bis (Gl. 31) verdeutlichen.

Unterseite Steifen, orange:
$$A_{Steife,u} = 2 \cdot l_{Steife,u,l} [m] \cdot n_{Steife,Überst.} [-] \cdot b_{Steife} [m] \quad (Gl. 26)$$

Unterseite Platte längs, türkis:
$$A_{Platte,u,l} = l_{Platte,u,l} [m] \cdot n_{PA,red,Überst.} [-] \cdot b_{PA} [m] \quad (Gl. 27)$$

Seite Steifen, grün:
$$A_{Steife,seitl.} = l_{Steife,u,l} [m] \cdot h_{Steife} [m] \cdot n_{Steife,sichtb.,Überst.} [m] \quad (Gl. 28)$$

Unterseite Platte e. sichtb., lila:
$$A_{Platte,u,e} = l_{Platte,u,l} [m] \cdot Wert_{Sichtbare Platte} [m] \quad (Gl. 29)$$

Unterseite Platte quer, gelb:
$$A_{Platte,u,q} = (Abstand QT - l_{Steife,u,l}) [m] \cdot l_{Platte,u,q} [m] \quad (Gl. 30)$$

Äußere Seite Steife, hellgrün:
$$A_{Steife,seitl.} = 2 \cdot (l_{Steife,u,l} [m] - l_{Platte,u,l} [m]) \cdot 0,5 \cdot b_{Überst.} + (l_{Steife,u,l} [m] \cdot h_{Steife} [m]) \quad (Gl. 31)$$

mit: QT = Querträger, l (Index) = Längsrichtung, q = Querrichtung, u = Unterseite, seitl. = seitlich, l = gemessene Länge, A = Fläche, Wert = Wert aus Tab. 3.5, n = Anzahl, PA = Plattenabschnitt zwischen zwei Steifen, b = Breite, h = Höhe, Überst.= Überstand, e. sichtb. = eingeschränkt sichtbar

Um schlussendlich einen Vergleich durchführen zu können, wird von allen zuvor genannten Einzelflächen im Bereich des Plattenüberstandes auch die Gesamtoberfläche ermittelt. Mit

dieser sollen die per UAS aufgenommenen Flächen ins Verhältnis gesetzt werden, um eine Aussage über den Anteil des aufnehmbaren Anteils der Brücke ermitteln zu können.

Bereich IV: Zu- und Abschläge

In den vorangegangenen Bereichen I bis III wurden Einzeloberflächen betrachtet. Ein teilweises Überschneiden der einzelnen Flächen wurde bereits durch fixe Werte eliminiert oder in den Berechnungsgleichungen einbezogen. Dennoch gibt es Flächen bei der Brückengeometrie, die bisher nicht betrachtet wurden und durch die folgenden Zu- und Abschläge Berücksichtigung finden.

Einer dieser Bereiche ist ein von den Längssteifen verdeckter Teil der Querträger. Dieser ist Teil der bisherigen Flächenberechnungen der Querträger, muss jedoch als Abschlag aus dem Endergebnis herausgerechnet werden. Auf Abb. 3.18 (links) ist der abziehende Bereich rot markiert. Der sichtbare Teil des Querträgers ist türkis.

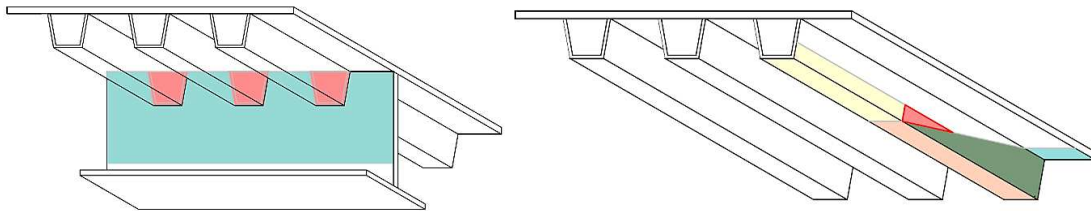


Abb. 3.18: l.: Verdeckter Bereich Querträger (rot) durch Längssteifen; r.: ‚Blinder Fleck‘ an Seitenfläche der Steife (rot) (nach [25])

Der Abschlag wird bei der Berechnung des Gesamtergebnisses sowohl auf die sichtbaren Flächen als auch auf die Gesamtoberfläche angewandt. Dass je nach Parameterkombination der Blickbereich der Kamera nicht bis zur Plattenunterseite reicht, wird an dieser Stelle vernachlässigt. Es werden also einige Flächenergebnisse um einen gewissen Betrag reduziert, obwohl dieser nicht reduziert werden dürfte. Diese Tatsache kann aufgrund der kleinen Werte für den Flächenabschlag, welcher zwischen $1,66 \text{ m}^2$ und $4,73 \text{ m}^2$ liegt, bei Gesamtoberflächen bis zu 386 m^2 vernachlässigt werden, da dieser Einfluss sehr gering ist.

Ein weiteres Bereich, welcher genauer Betrachtung finden muss, ist die Seitenfläche der Längssteife. Diese wird sowohl in Längs- als auch in Querrichtung aufgenommen, was durch die verschiedenen Flächen (Abb. 3.18 gelb, grün, orange) zuvor ermittelt wurde. Abb. 3.18 (rechts) zeigt einen kleinen roten Bereich, welcher trotz Betrachtung in beide Richtungen aus dem Untersuchungsbereich fällt, ein sogenannter ‚blinder Fleck‘. Durch Berechnungen des Flächeninhalts des roten Dreiecks für diverse Brücken- und UAS-Parameterkombinationen kann festgestellt werden, dass der Flächenanteil dieses Bereichs $< 1\%$ des Gesamtflächenanteils entspricht und daher im Weiteren vernachlässigt wird.

Zusätzlich sei an dieser Stelle erneut auf Tab. 3.3 und Tab. 3.4 verwiesen. Die dort genannten Einschränkungen für die geometrische Betrachtung bzw. Analyse müssen bei der Ermittlung des Gesamtergebnisses für das Bauwerk berücksichtigt werden. Zu Beginn einer Analyse

sollte geprüft werden, ob eine der in den o.g. Tabellen beschriebenen Parameterkombinationen zugrunde liegt. Sollte es sich um einen dieser Sonderfälle handeln und der Querträgerabstand zu gering sein, sind die Werte für die Oberfläche des Hauptträgers und den Überstand in Querrichtung entsprechend zu verknüpfen. Sollte der Hauptträgerabstand zu gering sein, sind die Querträgeroberfläche sowie der Bereich der Plattenunterseite in Längsrichtung anzupassen.

3.2.5 Graphische Analyse – Schweißnahtlängen

Da die Schweißnähte bei orthotropen Fahrbahnplatten einen besonderen Stellenwert bei der Schadensanfälligkeit haben, werden sie bei der hier beschriebenen geometrischen Analyse gesondert betrachtet. Dabei wird von an die Querträger geschweißte Längssteifen ausgegangen. Aussparungen an den unteren Ecken der Längssteifen werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Für die Ermittlung werden alle Längen der Schweißnähte aufsummiert. Auch hier wird zunächst der sichtbare Bereich analysiert und anschließend die vorhandene Gesamtlänge aller Schweißnähte ermittelt, um einen abschließenden Vergleich durchführen zu können. Es werden wieder die verschiedenen Betrachtungsbereiche durch unterschiedliche Farbgebung gekennzeichnet (siehe Abb. 3.19).

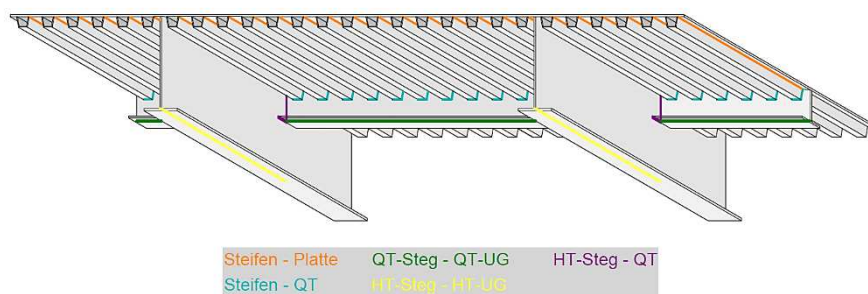


Abb. 3.19: Darstellung verschiedener zu ermittelnden Schweißnähte (nach [25])

Bei den orangen dargestellten Nähten handelt es sich um den Anschluss der Längssteifen an die Plattenunterseite. Hier ist zu berücksichtigen, dass lediglich die jeweils außen liegenden Schweißnähte vom UAS aufgenommen werden können. Die restlichen Nähte dieser Kategorie liegen stets im Sichtschatten bzw. außerhalb des Sichtbereichs aufgrund des Sicherheitsabstands des Flugobjekts. Die in türkis dargestellten Schweißnähte verbinden die Längssteifen mit den Querträgern. Hier wird unterschieden zwischen dem Bereich zwischen den beiden Hauptträgern und dem Überstand. 1,0 m Sicherheitsabstand und eine Brennweite von 35 mm ist die einzige Kombination, bei der sichtbare Schweißnähte in Längsrichtung ermittelt werden können. Daher wird bei dieser Berechnung die Anzahl der Steifen zwischen den Hauptträgern mit dem Wert 0,26693 multipliziert. Dies ist ein Längenmaß, welches bei den oben genannten Parametern als sichtbare Schweißnaht gemessen werden kann. Sollte in Längsrichtung keine Schweißnaht sichtbar sein, wird der Wert für die Betrachtung in Querrichtung verwendet. Grün gefärbt sind die Nähte, welche den Querträgersteg mit dem Querträgeruntergurt verbinden. Die Schweißnaht, welche den Querträger mit dem Hauptträger verbindet, ist lila gefärbt. Diese

sind jedoch in keinem Fall per UAS aufnehmbar. Der Hauptträgeruntergurt wird durch die gelben Schweißnähte mit dem Hauptträgersteg verbunden und dieser wiederum mit der Unterseite der Fahrbahnplatte. Auch hier ist die Verbindung an die Plattenunterseite bei keiner Parameterkombination von dem UAS aufnehmbar. Die Längenberechnung der zuvor beschriebenen Einzelnähte ist den Gleichungen (Gl. 32) bis (Gl. 40) zu entnehmen.

Steife-Platte, orange: $l_{Steife-Platte} = 2 \cdot Abstand\ QT\ [m]$ (Gl. 32)

Steife-QT, türkis: $l_{Steife-QT} = 2 \cdot n_{Steife\ zw.HT} \cdot 0,26693\ [m] + 4 \cdot b_{Überst.}\ [m]$ (Gl. 33)

QT-Steg-Platte, türkis: $l_{QT,Steg-Platte} = 0\ [m]$ (Gl. 34)

QT-Steg-QT-UG, grün: $l_{QT,Steg-HT,Steg} = 2 \cdot Abstand\ HT\ [m] + 2 \cdot b_{Überst.}\ [m]$ (Gl. 35)

QT-Steg-HT-Steg, lila: $l_{QT,Steg-HT,Steg} = 8 \cdot h_{QT,sichtbar}\ [m]$ (Gl. 36)

QT-UG Unterseite-HT, lila: $l_{QT,UG,u-HT} = 4 \cdot b_{QT-UG,u}\ [m]$ (Gl. 37)

QT-UG Oberseite-HT, lila: $l_{QT,UG,o-HT} = 4 \cdot b_{QT-UG,o}\ [m]$ (Gl. 38)

HT-Steg-HT-UG, gelb: $l_{HT,Steg-HT,UG} = 4 \cdot Abstand\ QT\ [m]$ (Gl. 39)

HT-Steg-Platte, gelb: $l_{HT,Steg-Platte} = 0\ [m]$ (Gl. 40)

mit: QT = Querträger, HT = Hauptträger, l (Index) = Längsrichtung, q = Querrichtung, u = Unterseite, o = Oberseite, l = Länge sichtbare Schweißnaht, n = Anzahl, b = Breite, h = Höhe, Überst.= Überstand

3.3 Ergebnisse einer UAS-Befliegung

3.3.1 Messergebnisse und Auswertung

An dieser Stelle werden die Parameterkombinationen betrachtet, welche nach Analyse in 3.2.3 als sinnvolle Kombination herausgearbeitet werden konnten, da die jeweiligen Bereiche eine gute Sichtbarkeit mittels UAS aufweisen. Für die Erkennbarkeit großflächiger Schädigungen an den Stahlbauteilen der Brücke wie Korrosion, abblätternde Beschichtung oder Kotansammlungen ab 3 cm² Größe, sind die optimalen Parameterkombinationen für die einzeln zu untersuchenden Teilbereiche in Tab. 3.7 dargestellt.

Bauteilbereich	Sicherheitsabstand [m]	Brennweite [mm]	Parameter 1	Parameter 2
Plattenunterseite quer	1,00	24	HT-Höhe: 1,25 m	HT-Abstand: 10,20 m
Plattenunterseite längs	viele Möglichkeiten	viele Möglichkeiten	viele Möglichkeiten	viele Möglichkeiten
Überstand	1,00	24	Überstand: 6,00 m	-

Flugtaugliche Bereiche

Oberfläche Hauptträger innen	1,00 1,50 2,00	24	HT-Höhe: 3,50 m	HT-Abstand: ≥ 4,20 m (1,00 m) ≥ 5,40 m (1,50 m) ≥ 6,60 m (2,00 m)
Oberfläche Hauptträger außen	1,00 1,50 2,00	24	HT-Höhe: 3,50 m	Überstand: alle
Oberfläche Querträger	1,00	24 35	QT-Höhe: 1,40 m	QT-Abstand: ≥ 3,50 m (24 mm) ≥ 4,50 m (35mm)

Tab. 3.7: Optimale Parameterkombination für Untersuchung einzelner Teilbereiche

Für jeden Teilbereich (Tab. 3.7, Spalte 1) sind immer zwei Parameter (Tab. 3.7, Spalte 4 und Spalte 5) maßgebend und haben den größten Einfluss auf die Sichtbarkeit des Bauteilbereichs mit Hilfe eines UAS. Bei Variierung dieser verändert sich das Ergebnis jedoch nicht gleichmäßig, was das Ableiten einer Regelmäßigkeit verbietet. Für die Plattenunterseite in Querrichtung ergibt sich somit bei den genannten Parametern (Tab. 3.7, erste Zeile) 62,75 % bei einem Querträgerabstand von 4,00 m bis hin zu 88,76 % Sichtbarkeit für einen Querträgerabstand von 5,50 m. Die Parameterkombinationen für die Plattenunterseite in Längsrichtung (Tab. 3.7, zweite Zeile) ergeben zahlreiche Kombinationen mit Sichtbarkeiten von > 70 %. Die besten Ergebnisse liefern die Kombinationen aus 24 mm Brennweite, 3,00 m Hauptträgerhöhe, ein Mindestabstand zwischen den Hauptträgern von 4,20 m, 1,40 m Querträgerhöhe und ein Mindestabstand zwischen den Querträgern ab 4,50 m. Dafür ergeben sich sichtbare Anteile zwischen 83,30 % und 92,77 %. Dieses beste Ergebnis ergibt sich aus einem Hauptträgerabstand von 10,20 m und einem Querträgerabstand von 5,50 m. Die Parameter der Bauteilabmessungen bzw. -abständen ist zudem äußerst plausibel und realistisch für bestehende Bauwerke. An dieser Stelle wird ebenfalls untersucht, wie sehr sich das gute Ergebnis verändert, sobald einige Parameter wie Sicherheitsabstand oder Brennweite verändert werden. Wird die Brennweite von 24 mm auf 35 mm erhöht, reduziert sich das Ergebnis auf 70,85 %. Bei einer Brennweite von 50 mm sinkt das Ergebnis deutlich auf 45,72 % und bei 70 mm Brennweite auf 37,19 %. Wird der Sicherheitsabstand von 1,00 m, was sehr gering ist für die Praxis, auf 2,00 m erhöht, wird der sichtbare Anteil der Brücke auf 36,10 % reduziert. Ein Sicherheitsabstand von 2,50 m ergibt ein Endergebnis 23,59 %. Was bei dieser Betrachtung ebenfalls auffällt, ist, dass der Abstand der Querträger einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Dieser sollte mindestens bei 4,50 m liegen, um Endergebnisse > 80,00 % zu erzielen. Dahingegen hat der Hauptträgerabstand keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Dieses verändert sich bei Variation dieses Parameters lediglich um maximal 2,00 %. Das gleiche gilt für die Querträger- sowie die Hauptträgerhöhe. Die Variierung des Überstands hat hier ebenfalls eine maximale Reduzierung von 2,00 % zur Folge.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass auch bei anderen als der oben definierten, optimalen Parameterkombination vor allem die Höhe sowie der Abstand des Querträgers den wesentlichsten Einfluss auf das Ergebnis, also den prozentualen Wert der sichtbaren Brückenbereiche, hat. Dieses Ergebnis ist detailliert in Tab. 3.8 zusammengefasst. Für die restlichen Abmessungen gelten mittlere Werte: Hauptträgerhöhe 2,50 m, Hauptträgerabstand 6,60 m sowie die Länge des Überstands ist hier 3,00 m.

Abstand UAS	Brennweite	Querträgerabstand						
		2,50 m	3,00 m	3,50 m	4,00 m	4,50 m	5,00 m	5,50 m
1,00 m	24 mm	0,6 m	0,8 m	1,0 m	1,2 m	1,4 m	1,4 m	1,4 m
	35 mm	0,5 m	0,6 m	0,6 m	0,8 m	0,8 m	1,0 m	1,0 m
	50 mm	-	-	0,5 m	0,6 m	0,6 m	0,6 m	0,8 m
	70 mm	-	-	-	-	-	0,5 m	0,6 m
1,50 m	24 mm	0,6 m	0,8 m	1,0 m	1,0 m	1,0 m	1,0 m	1,0 m
	35 mm	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,6 m	0,6 m	0,6 m	0,5 m
	50 mm	-	-	-	0,5 m	0,6 m	0,6 m	0,6 m
	70 mm	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.8: Querträgerhöhen und Kombinationen, welche mind. 80 % Sichtbarkeit erzielen

Auffällig ist, dass mit steigender Brennweite sowie wachsendem Querträgerabstand Sichtbarkeiten > 80 % erzielt werden können. Andererseits wird deutlich, dass die mögliche Höhe des Querträgers ebenfalls steigt. Insgesamt haben Brennweite, Sicherheitsabstand des UAS, Querträgerhöhe sowie -abstand den maßgeblichsten Einfluss auf das Endergebnis der Sichtbarkeit. Werden diese Parameter variiert, verändert sich das Endergebnis, wie oben beschrieben, signifikant. Große Höhen und Abstände bedeuten hier mehr Platz für das UAS und somit eine verbesserte Sichtbarkeit. Aber auch kleinere Querträgerabstände erzielen Ergebnisse > 80 %, wenn die Höhe der Querträger entsprechend niedrig ist (Tab. 3.8). Nach [113] sind Querträgerhöhen > 1,00 m im Bestand jedoch selten zu finden. Beträgt der Querträgerabstand mindestens 3,50 m, können somit mit einem 24 mm-Objektiv und einem Sicherheitsabstand von 1,00 m stets Ergebnisse > 80 % Erkennbarkeit erzielt werden. Die Analyse der übrigen Parameter wie Hauptträgerhöhe, Hauptträgerabstand sowie Länge des Überstands erzeugen lediglich Veränderungen im Endergebnis um Prozentpunkte im einstelligen Bereich und sind daher gut variierbar. Es zeigt sich somit außerdem, dass die in Kapitel 3.1.1 ermittelten spannungsdominanten Bereiche einer Brücke mit einem UAS befliegen werden können, um Bildmaterial zur Bauwerksprüfung zu sammeln. Lediglich davon ausgenommen sind, wie bereits erwähnt, die Auflagerbereiche. Diese stellen nicht nur aufgrund der viel dunkleren Lichtverhältnisse ein Problem dar, sondern auch wegen der engen Bebauung und Nischen. Brückenlager sollten zudem immer händisch auf ihre Funktionstauglichkeit geprüft werden. Auch ist die Erkenntnis, dass beispielsweise der Hauptträgeruntergurt als schadensintolerantes Bauteil immer inspiziert werden kann, sehr positiv zu bewerten. Ein Riss an ebendiesem ist essentiell für die Tragfähigkeit des gesamten Bauwerks. Eher schadenstolerante Bauteile wie ausbeulende Längssteifen können nicht im selben Maße wie der Hauptträgeruntergurt aufgenommen werden. Da es sich bei ihnen jedoch um schadenstolerante Bauteile handelt, ist der aufnehmbare Anteil der Längssteifen durchaus im annehmbaren Bereich. Insgesamt stimmen die Verteilungen der Erkennbarkeiten mit den schadenstoleranten und -intoleranten Bauteilen überein.

Die Analysen beziehen sich auf die optische Untersuchung parallel zu den Längs- und Querachsen der Brücke. In der Realität kann sich ein UAS um 360° drehen und somit die Brücke

noch aus leicht anderen Blickwinkeln aufnehmen. Es ist davon auszugehen, dass diese zusätzlichen Winkel die Ergebnisse geringfügig verbessern. Bei flächenhafter Untersuchung der Träger ist die Verwendung des UAS zur Bildaufnahme somit eine sinnvolle Unterstützung.

Die Erkennung der Schweißnähte liegt insgesamt deutlich unter den Ergebnissen für die Brückenfläche selbst mit unter 50% Erkennbarkeit. Das beste Ergebnis ergibt sich mit folgender Parameterkombination: Brennweite 35 mm, Sicherheitsabstand 1,00 m, Abstand Hauptträger 4,20 m, Höhe Hauptträger (mind.) 1,50 m, Abstand Querträger 4,50 m, Höhe Querträger 1,40 m sowie Länge Überstand 1,80 m. Mit diesen Werten ergibt sich eine Gesamtschweißnahtlänge von 218,40 m. Davon sichtbar sind lediglich 64,60 m, was einem Anteil von 29,58 % entspricht. Ein Grund für diese immer niedrigen Ergebnisse sind die Längssteifen, welche an die Unterseite der Fahrbahnplatte geschweißt sind (Abb. 3.19, orange). Diese Schweißnähte bilden den Großteil der gesamten Schweißnahtlänge. In diesem Fall sind es 117,00 m von den 218,40 m. Von diesem großen Anteil der Schweißnähte sind lediglich die beiden äußersten vom UAS mittels Kamera aufnehmbar. Alle anderen liegen bei jeder Parameterkombination im nicht sichtbaren Bereich. Aus diesem Grund liegen alle Endergebnisse bei den Schweißnähten stets unter 50 % Sichtbarkeit, bezogen auf die gesamte Länge aller Schweißnähte. Sind diese Schweißnähte beschädigt, handelt es sich um Schäden der Kategorie 1 (siehe Kapitel 2.3). Vor allem im Bereich der LKW-Spuren kommen diese vor und können nicht mittels UAS aufgenommen werden. Im Bereich zwischen den Stegen von Haupt- und Querträger sowie deren Untergurten sind die Schweißnähte immer zu erkennen. An diesen Stellen sind Schweißnahtschäden jedoch für gewöhnlich eher selten (siehe Kapitel 4.1.2). Eine horizontal ausgerichtete Kamera unter dem UAS angebracht erweist sich für die Untersuchung der Schweißnähte somit als nicht durchweg sinnvoll. Die Prüfung der Schweißnähte verlangt eine zusätzliche Überprüfung vor Ort in handnaher Form.

3.3.2 Excel-Auswertetool

Die vorangegangenen geometrischen Analysen bilden die Grundlage für das im folgenden Abschnitt beschriebene Excel-Auswertetool. Es soll durch Programmierung im Tabellenkalkulationsprogramm Excel eine Eingabemöglichkeit geschaffen werden, welche je nach Bauwerkparameter (Hauptträgerabstand, Querträgerabstand, Hauptträgerhöhe, Querträgerhöhe) und Kamertechnik (Brennweite und Sicherheitsabstand UAS) ein prozentuales Ergebnis ausgibt, welches Aussage darüber gibt, wie groß der Anteil der Brücke ist, welcher mittels UAS per Fotoaufnahmen aufgenommen werden kann. So soll im Vorhinein vom Bauwerksprüfer, Baulast- oder Entscheidungsträger überprüft werden können, ob sich eine UAS-Befliegung einer zu prüfenden Brücke mit orthotroper Fahrbahnplatte lohnt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Einzelbereiche aus dem vorherigen Abschnitt bilden für das Berechnungstool die Grundlage und sind, in jeglicher Bauteil- und Parameterkombination zusammengestellt, in einer Art Bibliothek in Excel hinterlegt. Durch diverse Berechnungen, welche im Hintergrund nach den Gleichungen (Gl. 9) bis (Gl. 40) funktionieren, werden die sichtbaren Flächen für die Einzelbereiche aus Kapitel 3.2.4 und 3.2.5 zunächst einzeln ermittelt und anschließend zu einem Gesamtergebnis zusammengeführt. Das Tool arbeitet stets für ein Feld der Brücke (Abstand zwischen zwei Querträgern). Dieses Ergebnis ist für den Bediener

ausreichend, da sich alle Felder einer Brücke in der Regel gleichen. Die Randfelder am Auflagerbereich bilden Ausnahmen. Diese sind nicht Teil der geometrischen Analyse, da die Lager und Lagerbereiche stets handnah geprüft werden sollten und reine Bildaufnahmen für eine Prüfung dieser Bereiche nicht ausreichend sind. Der Sicherheitsabstand des UAS verhindert zudem ausreichend gute Bildaufnahmen aufgrund dunkler Licht- und enger Platzverhältnisse.

Das Eingabeblatt für den Bauwerksprüfer oder Baulastträger, also dem Bediener des Exceltools, verfügt über Drop-Down-Felder für die Kategorien ‚Brennweite‘, ‚Sicherheitsabstand‘, ‚Hauptträgerhöhe‘, ‚Hauptträgerabstand‘, ‚Querträgerhöhe‘, ‚Querträgerabstand‘ sowie die Länge des Überstands (Abb. 3.20, oben links). Diese Werte müssen vom Bediener für eine zu untersuchende Brücke eingegeben werden. Sollte der genaue Wert für beispielsweise den Hauptträgerabstand nicht im Drop-Down-Feld und somit nicht in der Analyse vorhanden sein, empfiehlt es sich, die beiden nächsten Werte einzugeben und das Endergebnis ggf. zu interpolieren. Auf diese Weise ist eine gute Einschätzung für ein Bauwerk möglich. Nach Eingabe der zuvor genannten sieben Grundwerte der Brücke, errechnet das Tabellenkalkulationsprogramm mithilfe der zuvor eingegebenen und erstellten Bibliothek und Gleichungen die einzelnen Ergebnisse für die Brücke. Es werden sowohl alle Einzelergebnisse von Teilbereichen der Brücke, welche in den letzten beiden Kapiteln (3.2.4 und 3.2.5) analysiert wurden, als auch das Gesamtergebnis angezeigt (Abb. 3.20, Mitte und oben rechts). Das Ergebnis für die Schweißnähte wird ebenfalls einzeln ausgegeben, damit der Bediener einen direkten Eindruck von den wichtigsten Bauteilbereichen einer orthotropen Platte erhält (Abb. 3.20, unten). Die Ampelfärbung hilft dem direkten Verständnis der Analyseergebnisse. Ergebniswerte mit 81 bis 100% Erkennbarkeit werden grün hinterlegt. Zwischen 51% und 80% werden sie gelb und ab 50 % rot hinterlegt. Diese Ampelfärbung soll dem Anwender einen direkten Gesamteindruck geben und die Ergebnisse verdeutlichen. So kann der Bediener direkt erkennen, ob es lohnenswert ist, die vorhandene Brücke mit UAS zu befliegen.

Flugtaugliche Bereiche

Gesamtberechnung eines Feldes

Eingabe		Gesamtergebnisse (Übersicht)	
Brennweite	24 mm	Schäden,	81,00%
Sicherheitsabst	1,0 m		
HT-Höhe	3,5 m		
HT-Abstand	4,2 m		
QT-Höhe	1,4 m	Schweißnähten	25,96%
QT-Abstand	5,50 m		
Überstand	1,8 m		

Eingabebereich

Übersicht
Gesamtergebnis

Gesamtergebnisse (detailliert) - großflächige Schäden

Haupt- und Querträger	mit Vergrößerung		
	gesamt [m²]	sichtbar [m²]	sichtbar [%]
QT-Oberfläche Steg (Überstand)	10,08	10,08	100,00%
QT-Oberfläche Steg (zwischen HT)	11,76	11,76	100,00%
HT-Oberfläche 'innen'	38,50	36,71	95,34%
HT-Oberfläche 'außen'	38,50	36,71	95,34%
Unterseite/Seite HT	9,90	9,90	100,00%
Unterseite QT	4,76	4,76	100,00%
Oberseite Flansch HT	8,36	8,36	100,00%
Oberseite Flansch QT	4,06	4,06	100,00%
Zwischen den HT			
Unterseite Steife	8,16	8,16	100,00%
Unterseite Platte	6,60	5,64	85,39%
Steifenseiten	19,44	13,13	67,52%
eingeschränkt sichtbare Plattenabschnitte	4,04	1,81	44,79%
Unterseite quer	0,00	0,00	
Überstand			
Unterseite Steife	6,99	6,99	100,00%
Unterseite Platte	4,23	4,23	100,00%
Steifenseiten	13,89	7,88	56,72%
eingeschränkt sichtbare Plattenabschnitte	4,04	1,81	44,79%
äußere Steife	3,03	3,03	100,00%
Unterseite quer (mit Vergrößerung)	0,00	0,00	
Unterseite quer (automatische Erkennung)	16,71	-	-
Zu-/Abschläge			
Zuschlag 'Problembereiche' Seiten	-	-	
Abschlag Überschneidung QT/Steifen	-1,66	-1,66	
Gesamt (pro Feld) mit Vergrößerung	194,66	173,33	89,04%

detaillierter
Ergebnisbereich
Brücke

Gesamtergebnisse (detailliert) - Risse in Schweißnähten

Schweißnähte gesamt	mit Vergrößerung		
	gesamt [m]	sichtbar [m]	sichtbar [%]
Steife-Platte:	143,00	11,00	7,69%
Steife-QT	18,71	3,43	18,36%
QT-Steg--QT-UG	15,60	15,60	100,00%
QT-Steg--Platte	15,60	0,00	0,00%
QT-Steg--HT-Steg	11,20	9,19	82,10%
QT-UG Unters. - HT:	2,20	2,20	100,00%
QT-UG Obers. - HT	2,08	2,08	100,00%
HT-Steg--HT-UG	22,00	22,00	100,00%
HT-Steg--Platte	22,00	0,00	0,00%
Gesamt (pro Feld)	252,39	65,51	25,96%

detaillierter
Ergebnisbereich
Schweißnähte

Abb. 3.20: Beispiel einer Ergebnisseite des Excel-Auswertetools

3.3.3 Fazit und Grenzen der geometrischen Bauwerksanalyse für UAS-Befliegung

Die vorherigen Untersuchungen haben eine Auswertemöglichkeit für Baulastträger oder Prüfpersonal geschaffen, mit dem der mittels UAS zu untersuchende Anteil einer stählernen Brücke mit orthotroper Platte errechnet werden kann. Dafür wurden 3.200 verschiedene Parameterkombinationen mit einer graphischen Analyse untersucht, wobei von einer nachträglichen Vergrößerung des Bildmaterials am PC ausgegangen wird.

Um selbst feine Risse auf den Bildern erkennen zu können, sollte der Sicherheitsabstand des UAS bei einer Brennweite von 24 mm maximal 2 m betragen, bei 35 mm 3 m, bei 50 mm 4 m sowie bei 70 mm Brennweite 5 m. Für die großflächige Betrachtung von stählernen Brücken mittels UAS liefert die Analyse mit fast durchweg > 80% Erkennbarkeit Ergebnisse, welche eine UAS-Unterstützung der handnahen Prüfung beweisen. Besonders die Höhe und der Abstand der Querträger haben einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtergebnis. Alle anderen Parameter beeinflussen das Gesamtergebnis nur unerheblich. Die besten Ergebnisse werden zudem mit einer Brennweite von 24 mm erzeugt. Schweißnahtschäden sind an orthotropen Platten regelmäßig auftretende Schäden und zum Teil gravierend für die Tragfähigkeit [126][362]. Die Aufnahmen der Schweißnähte für die Betrachtung am PC ist jedoch mit Ergebnissen knapp unter 30% nicht zufriedenstellend. Ein Grund dafür liegt an der oft ungenügenden Sichtbarkeit der Plattenunterseite begründet durch die vielen Sichtschatten von Querträgern und Längssteifen. Die Ergebnisse der geometrischen Analyse für die Schweißnähte zeigt deutlich, dass hier die handnahe Prüfung derzeit noch nicht ersetzt werden kann. Da die Unterseite der Platte und damit die Schweißnähte zwischen Längssteifen und Plattenunterseite nicht vom UAS in ausreichender Qualität aufgenommen werden können, fehlt ein dominanter Teil bei der digitalen Prüfung. Hier müssen Optimierungen geschaffen werden, um entweder den Sicherheitsabstand zum Bauwerk reduzieren zu können, oder die Position der Kamera am UAS zu verändern. Denkbar ist beispielsweise eine zweite, auf dem UAS montierte Kamera, welche direkt nach oben gerichtet ist. So könnte die Plattenunterseite besser aufnehmbar sein. Das erhöht das Gesamtgewicht des UAS jedoch erheblich und würde eine größere Version des Fluggeräts und somit wieder strengere Flugregeln (Flugerlaubnis, Sicherheitsabstände etc.) verlangen. Alternativ kann die eine unter dem UAS angebrachte Kamera beibehalten werden, sollte jedoch leicht nach oben geneigt werden. Auch so werden viele Sichtschattenbereiche eliminiert. Zu beachten ist bei dieser Option, dass gegebenenfalls die Propeller des UAS im Sichtfeld und somit auf dem Bildmaterial sein könnten. Außerdem geht die vorangegangene Analyse davon aus, dass es sich bei dem Sicherheitsabstand gleichzeitig um den Abstand der Kamera zum Bauwerk handelt. Diese Annahme ist nicht ganz korrekt, da sich der Sicherheitsabstand auf die Mittelachse des UAS bezieht, die Kamera jedoch leicht versetzt unter dem UAS angebracht ist. Dieser kleine Unterschied kann ebenfalls Reduzierungen bei den hier berechneten Sichtbereichen ergeben, welche jedoch nicht größer als 2 % sein sollten.

Ein Ergebnis von 100 % Sichtbarkeit in der für Stahlbrücken geforderten und mit der hier definierten Bildqualität kann derzeit noch nicht erreicht werden. Es ist zu beachten, dass die mittels UAS nicht sichtbaren bzw. eingeschränkt sichtbaren Bereiche, welche anschließend handnah

Flugtaugliche Bereiche

vor Ort überprüft werden müssen, ggf. von Anfang an gar nicht befliegen werden, um Flugkosten und -zeit zu sparen und um diese Bereiche nicht doppelt zu betrachten. Zudem muss das verwendete Objektiv Betrachtung finden. Objektive mit Festbrennweiten weisen häufig andere bzw. bessere Qualitäten aus als die hier genutzten Zoomobjektive. Das bedeutet, die Ergebnisse könnten mit festen Brennweiten ggf. verbessert werden. Auch kann in Zukunft der Einsatz einem ggf. kleinerem UAS mit entsprechend geringerem Sicherheitsabstand eine weitere Erhöhung der sichtbaren Bauwerksbereiche ermöglichen.

4 Schadenskatalog

Nach der geometrischen Analyse der Brückenbauwerke bzw. der Bildaufnahme mittels UAS ist der nächste Schritt zur Bauwerksbewertung ein geeigneter Schadenskatalog. In diesem Kapitel wird eine ausführliche Schadensanalyse durchgeführt, bei der Prüfberichte aus der Praxis dahingehend analysiert werden, welche der derzeit vielen Schäden aus dem BAST-Schadenskatalog [300] wirklich in der Prüfpraxis auftreten und am häufigsten Verwendung finden. Auch wird untersucht, an welchen Bauteilen bzw. Bauwerksbereichen diese Schädigungen auftreten, um dieses Wissen in einen neuen, kompakten Schadenskatalog, welcher mittels vom Bauwerk aufgenommenen Bildmaterials Verwendung finden soll, einfließen zu lassen. Für dieses Ziel werden stochastische sowie geometrische Analyseverfahren eingesetzt. Dafür ist außerdem eine Analyse vorhandener Prüfverfahren bzw. Prüfberichte essentiell. Es sollen die wichtigsten Kernthemen aus RI-EBW-PRÜF [303] und Ril 804 [57] der Deutschen Bahn herausgefiltert und Teil des neuen Schadenskatalogs werden.

In diesem und dem darauffolgenden Kapitel soll das Erzeugen des Bildmaterials mittels UAS nicht mehr von Bedeutung sein. Es sei davon ausgegangen, dass das erforderliche Bildmaterial auf jede in der Zukunft erdenkliche Art und Weise aufgenommen werden kann und nicht mehr nur von einem UAS gewonnen wird.

4.1 Schadensanalyse

4.1.1 Schadensverteilung von Schäden an (Stahl-) Brücken

Die Grundlage für einen neuen mit Bildmaterial arbeitenden Schadenskatalog, also ein Katalog, welcher alle Schäden beinhaltet, die mittels der zuvor beschriebenen UAS unterstützen Brückenbefliegung (siehe Kapitel 3.2) oder anderen fotografischen Verfahren aufgenommen werden können, ist zunächst die Analyse von häufig auftretenden Schäden an Brücken. Brücken müssen in Deutschland nach DIN 1076 [69] regelmäßigen Prüfungen unterzogen werden (siehe Kapitel 2.1). Für jede Brückenprüfung wird ein Prüfbericht erstellt, in dem jeder Schaden, welcher bei der Brückenprüfung gefunden wurde, einzeln vermerkt ist. Die Summe und Schwere der Einzelschäden ergibt mithilfe eines Bewertungsalgorithmus die notenähnliche Gesamtbewertung der Brücke, welche ihren Zustand widerspiegelt. [69][300][303]

Um die allgemeine Verteilung der Brückenschäden in Deutschland verstehen zu können, sollen Brückenprüfberichte aus der Praxis hinsichtlich der dort verzeichneten Schäden analysiert werden. Es soll untersucht werden, welche Schäden am häufigsten zu verzeichnen sind, an welcher Art von Baumaterial (z.B. Beton, Stahl, Stein usw.) sie auftreten und ob es sich dabei um statisch relevante oder eher nur optische Schäden handelt. Diese Analyse soll die Grundlagen für den hier zu erarbeitenden Schadenskatalog bilden. Schäden, welche in dieser Analyse zu den am häufigsten auftretenden Schäden gehören, müssen somit grundlegend Teil des neuen Katalogs sein.

Für diese an der Realität angelehnte Betrachtung der Schäden, werden insgesamt 113 Prüfberichte diverser Brücken aus der Praxis analysiert, welche von einem Prüfingenieurbüro zur

internen Verwendung zur Verfügung gestellt werden [290]. Bei den Prüfberichten handelt es sich um keine speziell ausgewählten Brücken (z.B. nur Stahlbrücken), sondern um einen Querschnitt deutscher Straßenbrücken, um einen absolut realistischen Eindruck über die Schadensverteilung widerspiegeln zu können. Daher handelt es sich bei den Bauwerken sowohl um Beton- (22 %) als auch Stahl- (44 %) oder Verbundbrücken (33 %) mit Baujahren zwischen 1933 und 2010. Die letzten Prüfungen haben Benotungen zwischen 1,8 und 3,9 ergeben. Die Tragsysteme variieren von Balkenbrücken, über Bogen-, Dreh-, Trog- und Hohlkastenbrücken und sogar Hubbrücken. Insgesamt verzeichnen die 113 Prüfberichte 6.332 Einzelschäden, welche entsprechend des bekannten BAST-Schadenskatalogs [300] sortiert und anschließend summiert werden. So ergibt sich eine Rangfolge der Schadensbeispiele mit ihren sogenannten Schadens-IDs, welche bei den 6.332 Schäden am häufigsten auftreten. Der Schaden, welcher 198-mal gezählt wird und damit am dominantesten in den 113 Prüfberichten auftritt, ist die Schadens-ID 014-08. Die ID zeigt, dass es sich um einen metallischen Oberflächenschaden am Brückenüberbau handelt. Die Beschichtung ist hier örtlich durchrostet mit weniger als 15 % der Fläche (Tab. 4.1, erste Zeile). Mit einer Anzahl von 161 tritt der Schaden 021-08 am zweithäufigsten auf. Dabei handelt es sich um einen Schaden am Brückenunterbau aus Beton, wobei dieser im oberflächennahen Bereich abgeplatzt ist. Die Bewehrung kann dabei freigelegt sein (Tab. 4.1, erste Zeile). Dieser Schaden ist für die hier betrachteten Stahlbrücken nicht relevant. Es soll lediglich die orthotrope Platte und nicht auch der Brückenunterbau untersucht werden. Die Abkürzung „SK“ steht hier für Schadensklasse.

Rang	ID	Anzahl	[%]	Schadensbeschreibung
1	014-08	198	4,09 %	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 3 bis Ri 4 (< 15% der beschichteten Fläche)(SK = Schadensklasse 2)
2	021-08	161	3,33 %	Abplatzungen im oberflächennahen Bereich mit oder ohne freiliegende Bewehrung
3	001-05	125	2,58 %	Verschmutzung/Schalungsreste/ Packer/ Verdämmung o.ä
4	014-09	110	2,27 %	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 4 bis Ri 5, ohne Substanzverlust (SK 3)
5	025-02	91	1,88 %	Trockene Risse im Spritzwasser- oder Sprühnebelbereich mit Rissweiten 0,1 bis < 0,2 mm

Tab. 4.1: Reihenfolge der fünf häufigsten Schäden der insgesamt 6.332 Einzelschäden

Der Schaden auf Rang 3 (001-05) tritt laut Schadenskatalog der BAST ebenfalls wieder am Brückenüberbau auf und beschreibt Verschmutzungen (Tab. 4.1, erste Zeile). Der Schaden mit der Schadens-ID 014-09 bezieht sich erneut auf die metallische Oberfläche des Brückenüberbaus. Hier handelt es sich wieder um eine örtliche Durchrostung der Oberflächenbeschichtung, diesmal jedoch mit einer stärkeren Intensität der Korrosionsprodukte. Die Schadens-ID, welche 91-mal und somit am fünfthäufigsten auftritt, bezieht sich auf den Brückenunterbau aus Beton und beschreibt dort Rissbildung. Dies ist für diese Arbeit erneut nicht relevant. Die Ränge sechs bis zehn werden hier nicht einzeln aufgeführt, da es sich um Schäden im Beton, der Brückenausstattung oder den Fahrbahnübergängen handelt. Diese sind nicht der Teil hier durchgeführten Analyse und können daher entfallen. Es fällt außerdem auf, dass von insgesamt knapp 1.000 möglichen ID-Schadensnummern nur 417 Stück in dieser Stichprobe Verwendung finden. Circa 60 % der möglichen Schäden sind daher sehr selten und

treten wie beispielsweise ID 203-01 „Drahtbruch bei Seilen“ nur in Ausnahme- und Spezialfällen auf. Diese Erkenntnis deutet bereits darauf hin, dass der Schadenskatalog der BASt [300] ggf. zu ausführlich gestaltet ist und daher für die Prüfpraxis zu aufwendig in der Handhabung ist. Darauf wird in Kapitel 4.2 vertieft eingegangen.

Des Weiteren wird neben der allgemeinen Reihenfolge auch die Verteilung der Materialien analysiert, an denen die Bauwerksschäden auftreten. Dabei zeigt sich, dass Stahlschäden oder Schäden an der Oberflächenbeschichtung mit 40,54 % am häufigsten sind, während Schäden an Beton lediglich einen Anteil von 18,32 % aller Schäden ausmachen (siehe Abb. 4.1, links). Diese Zahlen sind besonders interessant vor dem Aspekt, dass in Deutschland 91 % aller Brücken an Bundesfernstraßen Beton- und Spannbetonbrücken und nur 7,8 % Stahl- und Stahlverbundbrücken sind [267]. Dies verdeutlicht die Relevanz der Vertiefung und Weiterentwicklung der stählernen Brückeninspektion. Neben der Verteilung des Baustoffs ist ebenso die Art des Schadens von Interesse, weswegen außerdem untersucht werden soll, um welche Art von Schaden es sich bei der Auflistung handelt. Ob es sich um Korrosions-, Riss-, Beschichtungs- oder Verbindungsmittelschäden oder um Verschmutzungen, Verformungen, Fahrbahnschäden oder freiliegende Bewehrung handelt – den maßgeblichen acht Schadenskategorien. Diese Schadenskategorien helfen dabei, dass der zu erzeugende Schadenskatalog die maßgebenden Kategorien und Schadens-IDs beinhaltet. So machen beispielsweise die Anteile von Korrosion und Beschichtungsschäden insgesamt ca. 25 % aller Schäden aus (siehe Abb. 4.1, Mitte). Erneut wird deutlich, dass eine Betrachtung von Stahlbrücken durchaus relevant ist, da die Mehrzahl aller auftretenden Schäden am Baustoff Stahl bzw. der Beschichtung vorkommen. Korrosion macht darunter einen der größten Anteile mit 14,11 % aus. Als letztes wird untersucht, wie groß der Anteil der Schäden ist, welche lediglich statisch irrelevante Schönheitsfehler wie Verschmutzungen oder Graffiti sind, und wie viele der 6.332 Schäden statische Relevanz haben und kurz- oder langfristig Einwirkungen auf die Standsicherheit der Brücke haben (siehe Abb. 4.1, Mitte).



Abb. 4.1: Ergebnisse der Schadensanalyse (alle Schäden)

Da hier die Relevanz auf Stahlschäden liegt, wird untersucht, inwieweit sich die Ergebnisse ändern, wenn Schäden an Beton, Asphalt oder den Lagern aus der Liste eliminiert werden. Dadurch reduziert sich die Summe der Einzelschäden auf 3.407 Stück. Es zeigt sich, dass die Korrosionsschäden von zuvor ebenfalls die häufigste Schädigung darstellen. Lediglich der prozentuale Anteil hat sich durch die nahezu Halbierung der Gesamtschäden verdoppelt (siehe Tab. 4.2). Es fällt auf, dass die Beschichtungs- und vor allem Korrosionsschäden abgesehen

Schadenskatalog

von Rang 2 eindeutig dominieren. Diese Auflistung hilft, die in der Praxis wichtigsten Schäden für den zu erstellenden Schadenskatalog zu priorisieren. Die Schäden 226-13 und 226-12 (Rang 4 und 5) sind Schäden am Fahrbahnübergang. Da dieser vorrangig aus Stahl besteht, fallen sie mit in die Betrachtung. Diese Schadensbeispiele bzw. -beschreibungen sollten obligatorisch für den neuen Katalog sein.

Rang	ID	Anzahl	[%]	Schadensbeschreibung
1	014-08	198	8,22 %	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 3 bis Ri 4 (< 15% der beschichteten Fläche) (SK 2)
2	001-05	125	5,19 %	Verschmutzung/Schalungsreste/ Packer/ Verdämmung o.ä
3	014-09	110	4,57 %	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 4 bis Ri 5, ohne Substanzverlust (SK 3)
4	226-13	71	3,00 %	starke Korrosion
5	226-12	67	2,78 %	einsetzende Korrosion
6	234-04	67	2,78 %	Örtlich einsetzende Korrosion
7	261-08	60	2,50 %	Rohrleitung hat geringe Korrosionsschäden
8	014-14	59	2,45 %	Durchrostung an den Kanten (SK 3)
9	014-23	53	2,20 %	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, beginnend, Schwächung [< 10 %] (SK4)
10	014-11	47	1,95 %	großflächige Durchrostung der Beschichtung bis zu Rostgrad Ri 3, örtlich Ri 4 bis Ri 5 (SK 3) (> 15% der beschichteten Fläche)

Tab. 4.2: Reihenfolge der zehn häufigsten Schäden der reduzierten 3.407 Einzelschäden

Die Eliminierung der Betonschäden bestätigt erneut, dass die Korrosions- und Beschichtungsschäden mit fast 38 % die vorherrschenden Schädigungen an Stahlbrücken sind (Abb. 4.2, Mitte). Schäden an Verbindungsmitteln, Risse, Verformungen und Verschmutzungen sind wie zuvor auch mit durchschnittlich ca. 7 % ziemlich gleichmäßig verteilt. Auch die Betrachtung, ob es sich um einen tragkonstruktiv relevanten Schaden oder doch lediglich um Schönheitsfehler handelt, ist ohne die Betonschäden sehr ähnlich verteilt. Die tragkonstruktiv nicht relevanten Schäden wie Verschmutzungen liegen in beiden Fällen bei circa 60 % (Abb. 4.2, rechts).



Abb. 4.2: Ergebnisse der Schadensanalyse (reduzierte Stahlschäden)

Die Analyse zeigt, dass also stets ca. 40 % der Schäden bei Brückenprüfungen Einwirkungen auf die Statik bzw. Standsicherheit der Brücke haben werden. Die erzeugte Rangfolge hilft dabei, die dominantesten Schäden an Stahlbrücken herauszufiltern, einen Überblick über die

Verteilung der Schadensarten zu erhalten und diese Ergebnisse in den zu erarbeitenden Schadenskatalog einfließen lassen zu können. Eine Liste der ersten 100 Schadensbeispiele, welche in den Prüfberichten am häufigsten vorkommen, ist in Anhang 9.2.1, Tab. 9.3 abgebildet.

Bei der Rangfolge der Einzelschäden fällt ebenfalls auf, dass es häufig gleiche Schadensbeschreibungen für unterschiedliche Schadens-IDs gibt. Zum Beispiel lautet die Schadensbeschreibung von 014-08 „örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 3 bis Ri 4 (< 15% der beschichteten Fläche) (SK 2)“ ([300], S.2). Diese Beschreibung gibt es außerdem auch für die Schadens-IDs 031-08, 047-10, 311-09. Diese stehen jeweils für unterschiedliche Bauteile wie Überbau, Unterbau oder sogar Verkehrszeichenbrücken. Diese Dopplung von gleichen Schadensbeschreibungen muss bei der weiteren Analyse des BAST- Schadenskatalog [300] sowie der Erarbeitung eines Schadenskatalogs für das hier zu entwickelnde System beachtet und bestenfalls vereinfacht werden. Die Ausarbeitungen zeigen außerdem, dass der Fokus auf die dominanten Schadenskategorien aus Abb. 4.2 (Mitte) zielführend ist und für diese die Dopplungen der Schäden eliminiert werden sollten. Ein Abgleich mit Tab. 9.3 ist anschließend für einen ganzheitlichen Katalog nötig.

4.1.2 Schadensverortung

Nachdem in Kapitel 3.1.1 stählerne Brückenbauwerke auf empirische Weise mittels FEM-Analyse hinsichtlich der auftretenden Spannungsverteilung sowie Spannungsspitzen untersucht wurden, sollen diese theoretischen Betrachtungen mit Praxiserscheinungen abgeglichen werden. Es soll untersucht werden, ob die zuvor erarbeiteten maximal beanspruchten Bauwerkstellen, an denen somit die häufigsten Schadensvorkommnisse zu erwarten sind, mit der Praxis korrelieren und bei realen Brücken ebenfalls die meisten Schäden aufweisen. Das Ziel der folgenden Abhandlung ist es, die Bauteile einer Brückenkonstruktion herauszufiltern, die in der Praxis am häufigsten von Schäden betroffen sind.

Dafür werden die in Kapitel 4.1.1 eingeführten Brückenprüfberichte aus der Praxis als Grundlage verwendet [290]. Für die hier durchgeführten Untersuchungen sind lediglich Stahlbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte relevant, da diese die Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden. Es werden alle Prüfberichte betrachtet, welche die beiden genannten Kriterien erfüllen (22 Stück). Diese verbleibenden Stahlbrücken haben eine Bewertung laut vorliegender Prüfberichte zwischen 2,0 und 3,5, was nach [303] einem befriedigendem (2,0–2,4) bis ungenügendem (3,5–4,0) Zustand entspricht. Die Berichte stammen von ‚Einfachen Prüfungen‘, ‚Hauptprüfungen‘ und auch ‚Sonderprüfungen‘. Es handelt sich um einen realistischen Querschnitt verschiedenster Brückenzustände, welche durchaus dem deutschen Brückenbestand entsprechen. Da es sich bei Brücken nie um gleiche Standardbauwerke handelt, wie es beispielsweise bei Windkraftanlagen der Fall ist, ist ein neutraler und nach üblichen statistischen Methoden durchgeführter Vergleich von einer so großen Anzahl verschiedenster Bauwerke unmöglich. Aus diesem Grund werden die zu untersuchenden Brücken zunächst in Abschnitte eingeteilt und die dort auftretenden Schäden laut Prüfbericht markiert. Das Einzeichnen der Schäden in simplifizierte Piktogramme der Bauweise findet sowohl in der Brückenuntersicht als auch in der Längs- und Queransicht statt. Anschließend werden diese gezählt und können

einer statistischen Analyse unterzogen werden, um die Ergebnisse mit denen der FEM-Analyse abzugleichen.

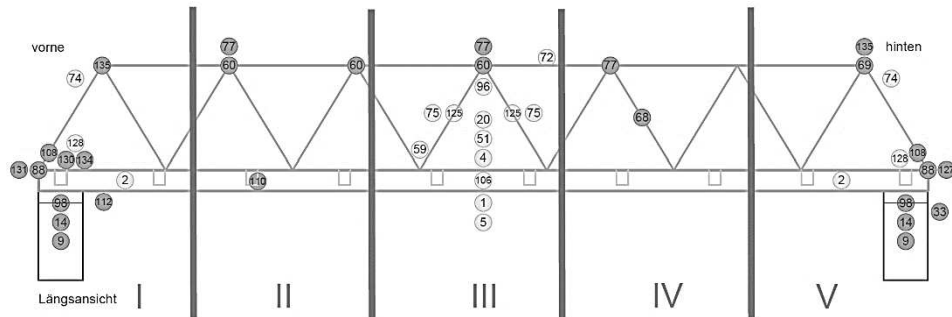


Abb. 4.3: Beispiel der Einteilung in fünf Bauwerksbereiche einer Fachwerkbrücke (Piktogrammdarstellung Längsansicht)

Ein Prüfbericht, welcher nach RI-EBW-PRÜF [303] und DIN 1076 [69] mithilfe der Software SIB Bauwerke [387] erstellt wird, folgt immer demselben Aufbau. Dem am Bauwerk gefundenen Schaden wird eine Positionsnummer zugeordnet. Diese Positionsnummer wird während des Erfassens der Reihe nach verteilt. Zusätzlich erhält jeder Schaden eine Beispiel-ID-Nummer, die die Schadensart näher beschreibt. Die ID-Nummern der Schäden werden aus dem Schadenskatalog der BAST [300] übernommen. Anhand dieser ID-Nummer können bestimmte Informationen zur Schadensart, wie zum Beispiel Material und Ausbreitung, entnommen werden. Zusätzlich hat der Prüfer in einem kurzen Hinweistext die Möglichkeit, den Schaden genauer zu beschreiben. Die endgültige Schadensbeschreibung wird durch verschiedene Textbausteine von SIB-Bauwerke erstellt. So gibt es vorgegebene Informationen, die übermittelt werden müssen. Dazu zählen: Schadensart, Aufttrittsort und Bewertung des Schadens in Hinblick auf die Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Unterhaltung der Brücke. Ein Foto des Schadens kann ebenfalls eingefügt werden, dies ist jedoch eine individuelle Entscheidung des Prüfers. Mit Hilfe der ID-Nummern werden die Schäden im Prüfbericht in Kategorien eingeteilt. Diese Kategorien sind von dem BAST-Katalog [300] vorgegeben und lauten: Brücke-Überbau, Brücke-Unterbau, Lager, Fahrbahnübergänge, Beläge, Ausstattung, Leitungen und Sonstiges. In dieser Analyse werden zuerst die Kategorien Über- und Unterbau, Lager sowie Fahrbahnübergänge betrachtet. Für die vorliegende Arbeit werden die Schäden der hier relevanten und zuvor definierten Schadenskategorien am Überbau analysiert.

Für eine übersichtlichere und vereinfachte Darstellung werden Piktogramme der unterschiedlichen Brückentypen (Balken-, Bogen-, Fachwerkbrücke) verwendet. Diese bilden die relevantesten Tragelemente der Brücken wie Haupt-, Nebenträger und Widerlager ab. Es handelt sich dabei um eine schemenhafte und vereinfachte Darstellung. Bei der Einteilung in Bauwerksbereiche hat sich die Vierteilung, also das Erzeugen von fünf gleich großen Bereichen, als am sinnvollsten erwiesen, da hier die Analogie zum Tragverhalten am größten ist. So sind die Auflagerbereiche einzeln ausgewiesen sowie der Mittelbereich der Brücke. Die Drittelpunkte, welche im Schnittgrößenverlauf ebenfalls von Bedeutung sind, sind in dem zweiten und vierten der insgesamt fünf Teile abgebildet (siehe Abb. 4.3). Die Teilung in fünf Bereiche bedeutet für

jede Brücke, dass ein einzelner Bereich nicht genauso lang ist wie der einer anderen Brücke. Dies ist jedoch irrelevant, da sich das Tragprinzip von einfeldrigen Brücken gleicht und somit die tragkonstruktiven Regeln für alle Brücken und somit auch die fünf eingeteilten Bereiche durchaus ähnlich sind.

Bei dem Eintragen der einzelnen Schäden aus den Prüfberichten werden zwei Fälle unterschieden. Die Lokalisation einiger Schäden sind deutlich im Bericht beschrieben, sodass ein eindeutiges Verorten im zonierten Piktogramm möglich ist (Abb. 4.4, grün gefüllte Kreise). Dadurch ist es auch möglich, dass ein Schaden aus dem Prüfbericht mehrfach im Piktogramm verortet wird. Andere Schäden sind beispielsweise als „am gesamten Bauwerk“ oder „stellenweise“, Begriffe aus SIB-Bauwerke [387], im Prüfbericht beschrieben, sodass hier eine klare Definition der Schadstelle nicht möglich ist. Diese Art von Schäden erhalten eine Lachsfärbung im Piktogramm und werden je nach Schadenstypus in jedem Fünftel einmal gekennzeichnet oder in den jeweiligen Bereich, auf den das originale Schadensfoto hindeuten könnte, um die exemplarische Verortung des Schadens darzustellen (Abb. 4.4). An dieser Stelle wird die Ungenauigkeit der derzeit in der Praxis verwandten Prüfberichte nach DIN 1076 bzw. RI-EBW-PRÜF deutlich. Eine klare Verortung eines Schadens gibt es nicht immer, was zusätzlich das Wiederfinden ebendieses bei der nächsten Brückenprüfung nahezu unmöglich macht. Ist zusätzlich kein Schadensfoto im Prüfbericht vorhanden, welches keine Pflichtleistung für den Prüfsingenieur darstellt, ist die Nutzbarkeit des Prüfberichts für die Betrachtung und Beobachtung von Schadensentwicklungen am Brückenbauwerk und dessen Lebenszyklusbewertung schier nicht vorhanden.

Die Auswertung der Schadensverortung in den vereinfachten Piktogrammen gliedert sich in drei Stufen. In der ersten Stufe werden alle Schäden, welche grafisch dargestellt und in den fünf Bauwerksbereichen I bis V unterteilt sind, betrachtet. In der zweiten Stufe werden nur noch Schäden am Überbau gezählt, während sich die dritte Stufe nur noch um statisch relevante Schäden am Überbau fokussiert. Schädigungen wie Schmiererei, Graffiti, Moos oder ähnliches fallen an dieser Stelle aus der Betrachtung heraus.

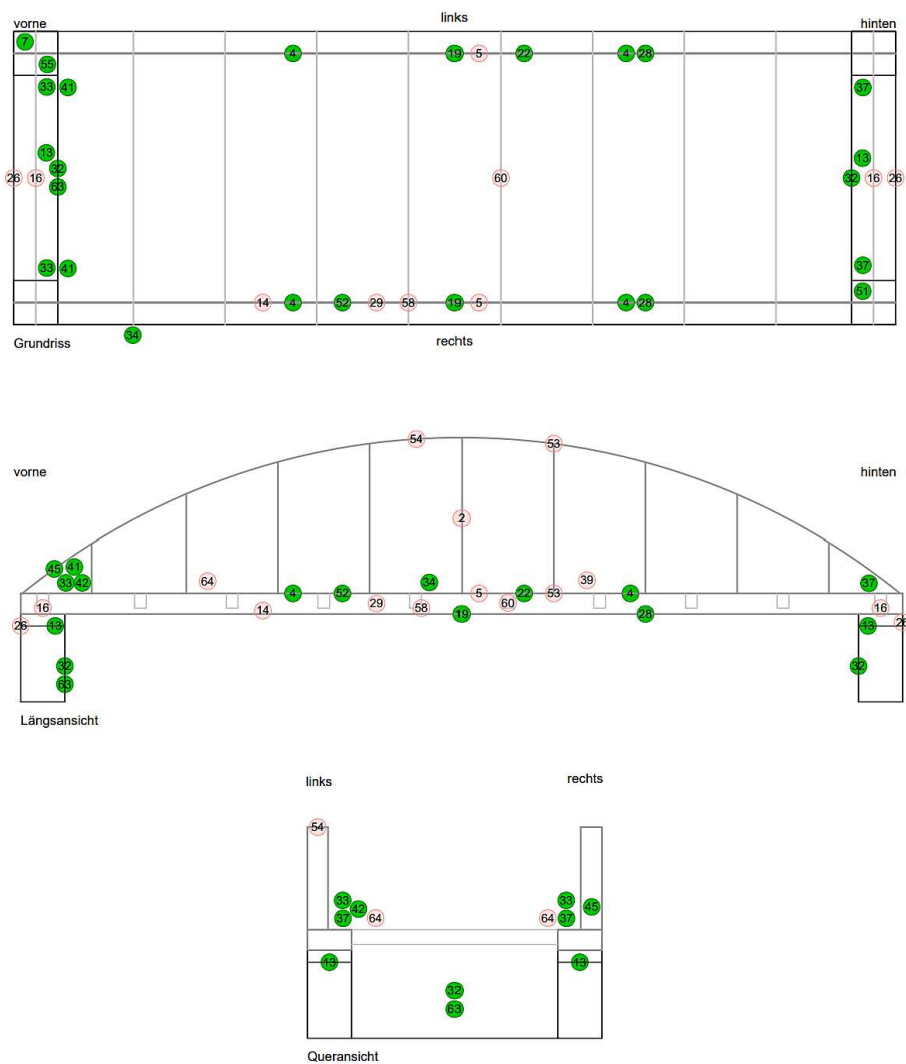


Abb. 4.4: Beispiel der optischen Schadensverortung an einer Bogenbrücke (Piktogrammdarstellung)

In der ersten Stufe ergibt sich eine nach Kapitel 3.1.1 zu erwartende Schadensverteilung. In den äußeren Bereichen I und V lassen sich die meisten Schäden mit 30,49 % (Bereich I) im Mittelwert aller betrachteten Prüfberichte und 31,31 % (Bereich V) verzeichnen. Die Bereiche II (12,35 %), III (14,21 %) und IV (11,65 %) sind nahezu gleichmäßig aufgeteilt. Die Bauwerksmitte ist mit Bereich III leicht mehr betroffen als die beiden anderen Bereiche (siehe Abb. 4.5). Eine maximale Standardabweichung von 5,6 % zeigt, wie ähnlich sich alle Prüfberichte in der Schadensverteilung verhalten. Diese Schadensverteilung entspricht der Erwartung, da viele Schäden die Lager sowie Widerlagen betreffen (Bereiche I und V). Außerdem befindet sich auch dort der am meisten beanspruchte Querträger und somit die Schäden an der Verbindung zwischen Querträger und Längssteife oder Querträger und Hauptträger (siehe 3.1.1). Im mittleren Brückenbereich herrschen zwar die höchsten Spannungen im Hauptträger, dieser ist dort jedoch auch ausreichend dimensioniert und weist selten spannungsinduzierte Schädigungen auf. Hier können diese Spannungsspitzen Schäden wie Risse an Längssteife und/oder Fahr-

bahnplatte verursachen. Des Weiteren zeigt die gleichmäßige Verteilung, dass es sich weiterhin um tragwerksunabhängige Schäden wie Bewuchs, Graffiti, Vogelkot o.ä. handelt. Im Mittelwert weisen die untersuchten Brücken 77,27 Schäden pro Untersuchung auf und haben eine durchschnittliche Bauwerksbewertung der Note 2,78.

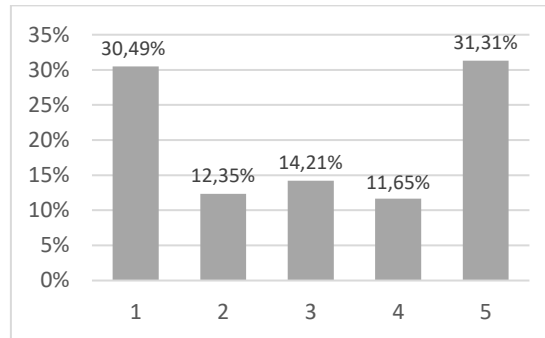


Abb. 4.5: Mittelwert der Schadensverteilung in fünf Bauwerksbereiche

Die zweite Auswertestufe unterscheidet sich merklich von der Ersten. Da in der ersten Stufe noch die Schäden der Kategorien Unterbau, Lager sowie Fahrbahnübergänge eingerechnet sind, sind dort die Bereiche I und V dominierend bei dem Schadensaufkommen. Dies ändert sich in Stufe 2, da nur noch Schäden des Überbaus betrachtet werden. Diese Veränderung zieht reduzierte Schadensaufkommen in den auflagernahen Bereichen I und V nach sich, da die Lager-, Unterbau- sowie Fahrbahnübergangsschäden wegfallen. Hier werden lediglich Schäden am stählernen Überbau betrachtet, welche sich nahezu gleichmäßig auf alle fünf Bauwerksbereiche aufteilen (siehe Abb. 4.6, links). So sind in Bereich I durchschnittlich 17,75 %, in Bereich II 21,24 %, in Bereich III 21,81 %, in Bereich IV 18,95 % sowie in Bereich V 20,26 % aller Schäden zu finden (Standardabweichung 6,5 %). Hier sticht kein Bauwerksbereich so deutlich wie in der vorherigen Analysestufe heraus. Insgesamt handelt es sich hier um durchschnittlich 46,86 Schäden pro Brücke, was 61 % der zuvor betrachteten Anzahl entspricht. Die restlichen 39 % entfallen somit auf die Kategorien Lager, Unterbau sowie Übergangskonstruktion.

Die dritte Analysestufe unterscheidet sich von der zweiten Stufe, dass hier nur noch tragkonstruktiv relevante Schäden wie Risse, Fehler an Verbindungsmitteln, Korrosion oder Verformungen Teil der Betrachtung sind. Eher unwichtige Schäden wie Kot, Beschmierungen oder Moos entfallen. Von durchschnittlich zuvor 46,86 Schäden je betrachtete Brücke gibt es hier noch 38,68 Schäden, was genau 50 % der ursprünglichen Schäden aus Analysestufe 1 und 82,3 % der zweiten Stufe entspricht. Es zeigt sich deutlich, dass somit ein Großteil der Schäden einer Brückenprüfung statisch nicht relevant sind bzw. keine Folgen auf die Tragwirkung haben, sondern es sich eher um kosmetische Schäden handelt und der andere Teil sich auf den Unterbau und die Lager bezieht. Auch in der dritten Stufe verhält sich, wie in der zweiten Stufe zuvor, keiner der fünf Bereiche dominierend. Die Schadensverteilung ist mit einer Spannweite von 16,43 % in Bereich I bis 22,18 % in Bereich II wieder recht gleichmäßig verteilt (siehe Abb. 4.6, rechts). Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bereichen I bis V finden. Nach der Spannungsanalyse aus Kapitel 3.1.1 wäre eine leicht dominante

Verteilung in den Bereichen I und V sowie ggf. in Bereich III zu erwarten gewesen. Dies lässt sich nicht bestätigen. Das lässt die Hypothese zu, dass nicht Materialversagen durch Spannungsspitzen, sondern Material- bzw. Ausführungsfehler (z.B. beim Verschweißen der Plattenkonstruktion) bzw. lokale Gegebenheiten die Ursache der Schäden am Überbau sind. Es ist jedoch zu beachten, dass in den Bereichen I und V keine Lager- oder Übergangskonstruktionsschäden eingerechnet sind. Das bedeutet, der jeweils zweite Querträger, welcher laut Spannungsanalyse in Kapitel 3.1.1 am meisten belastet ist, in diese Bereiche fällt.

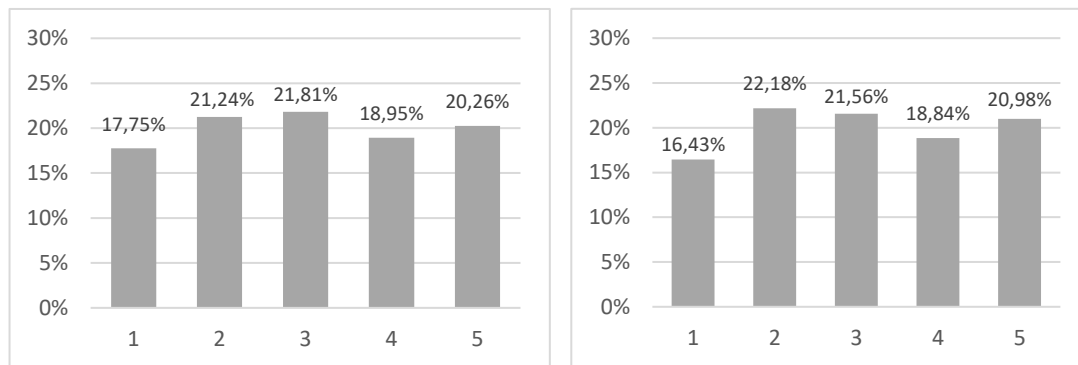


Abb. 4.6: l.: Mittelwert der Schadensverteilung nur Überbau; r.: tragkonstruktiv relevante Schäden

Diese optisch-statistische Analyse der realen Verteilung von Schäden an Brücken in Verbindung mit der computerunterstützten Spannungsanalyse nach normativen Vorgaben als auch realen Belastungsparametern zeigt, dass die Schäden in der Realität nicht zwangsläufig an den höchstbelastetsten Tragwerksstellen auftreten. Bei der Spannungsanalyse (siehe 3.1.1) sind bewegliche Bauteile wie Lager und Fahrbahnübergänge nicht beachtet. Doch diese stellen sich in der Praxis mit am häufigsten heraus, da es sich um Verschleißbauteile handelt. Das Tragwerk selbst, hier der Überbau bzw. der Plattenbereich, ist anhand der Spannungsanalyse dimensioniert, sodass entsprechend keine Schäden in der Praxis an den errechneten Spannungsspitzen auftreten sollten. Dies bestätigt die vorliegende Analyse. Es zeigt sich, dass Schäden am Überbau eher unvorhergesehen und unabhängig von der geplanten Belastung auftreten. Es wird deutlich, dass vor allem tragkonstruktiv relevante Schäden eher die Folge von Material- und Ausführungsfehlern sind und somit an oft unvorhergesehen Stellen auftreten. Kosmetische Schäden verhalten sich ähnlich. Bewuchs, Vogelkot oder Schmierereien wie Graffiti können nicht statistisch vorhergesehen werden, sondern verteilen sich gleichmäßig am Bauwerk (siehe Abb. 4.7, links). Das bedeutet für den zu erstellenden Schadenskatalog, dass sich dieser differenzierter aufstellen sollte als der Schadenskatalog der BAST [300], welcher alle hier betrachteten Schäden der Schadenskategorie „Überbau“ zuordnet. Das wäre an dieser Stelle zu allgemein gehalten. Trotz der sehr gleichmäßigen Schadensverteilung sollten die Erkenntnisse aus 3.1.1 ebenfalls Berücksichtigung finden und tragkonstruktiv kritischere Bauwerkstellen wie die Verbindungen zwischen Quer- und Hauptträger, Querträger und Längssteife sowie Längssteife und Fahrbahnplatte gesondert Beachtung und auch Gewichtung im neuen Schadenskatalog bzw. Bewertungssystem finden.

4.1.3 Vergleich bestehender Regularien der BAST und Deutschen Bahn

Um einen Schadenskatalog samt Bewertung zu erstellen, welcher auf Bildmaterial basiert und für die Anwendung von UAS- oder anderer Technologie unterstützen Bauwerksinspektionen gültig sein soll, ist es notwendig, die Essenz bereits vorhandener Regelwerke und Kataloge herauszufiltern. Die Bundesanstalt für Straßenwesen BAST hat mit der RI-EBW-PRÜF in Kombination mit DIN 1076 feste Regeln für die Durchführung und Bewertung von Inspektionen von Straßenbrücken [69][303]. Auch für Bahnbrücken, welche in den Verantwortungsbereich der Deutschen Bahn fallen, gibt es eine unternehmensinterne Richtlinie, die Richtlinie 804 [57][58]. Diese beinhaltet ebenfalls Regeln für die Inspektion wie Prüfumfänge und Definitionen. Brücken, welche sich am Kanalnetz befinden, gehören zur Unterhaltungslast der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Auch hier gibt es einen Schadenskatalog, welcher bei der Durchführung von Brückeninspektionen beachtet werden soll [39][40]. Die Grundlagen dieser drei vorhandenen Vorschriften sollten bestenfalls im neuen Schadenskatalog mit aufgenommen sein und die Essenzen dieser in sich vereinen und vertiefen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die oben genannten Regelwerke hinsichtlich der wichtigsten Kernaussagen und -fakten analysiert. Dabei wird außerdem überprüft, ob diese für UAS relevant sind und Teil des neuen Schadenskatalogs und Bewertungssystems werden sollen.

Für Straßenbrücken schreibt die DIN 1076 mit der aktuellen RI-EBW-PRÜF von 2017 Umfänge, Voraussetzung der personellen Qualifikation, ein Schadensbewertungsverfahren und zeitliche Abstände für Bauwerksprüfungen vor [69][303] (siehe Kapitel 2.1.1). Sie stützt sich zusätzlich auf das Straßen- und Wegegesetz NRW [356] sowie das Bundesfernstraßengesetz [131]). Diese finden Anwendung im Zuge von Straßen in staatlicher Verwaltung, das heißt konkret bei Brücken, Verkehrszeichenbrücken, Tunneln, Stützbauwerken o.ä. [69][303]. Auch die Deutsche Bahn (DB) hat im Jahr 2008 mit der Richtlinie 804 (Ril 804) „Inspektion von Ingenieurbauwerken“ einen Leitfaden erlassen, der allgemeine Grundsätze zur Vorgehensweise liefert [57]. Dazu gehören die Module 8001 sowie 8002 und einige weitere, welche die Bedingungen für Inspektionen der Bahnbrücken vorgeben (siehe Kapitel 2.1.2) [57][58]. Der Geltungsbereich der Ril 804 umfasst „Ingenieurbauwerke von Konzernunternehmen, die sich in Betrieb befinden, die von den Konzernunternehmen nicht genutzt werden, aber aufgrund der Verkehrssicherungspflicht weiterhin zu inspizieren sind, [...] von Konzernunternehmen und anderen Verkehrsträgern, die gemeinschaftlich von den Konzernunternehmen und anderen Verkehrsträgern genutzt werden [...], von Dritten, die von den Konzernunternehmen befahren werden [und; Anm. d. Verf.] Dritter, welche die Betriebsanlagen der Konzernunternehmen berühren.“ ([57], S.2). 2022 hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr die aktuellste Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2101 für Bauwerke im Wasserstraßennetz veröffentlicht, in der ebenfalls Prüfvorgaben und -umfänge sowie Begriffsdefinitionen festgelegt sind [40]. Da Kanalbrücken jedoch unter die Regelungen der RI-EBW-PRÜF fallen, soll die VV-WSV 2101 der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hier nur zusätzliche Anhaltspunkte geben, das Hauptaugenmerk jedoch bei den Richtlinien der Straßen- und Bahnbrücken liegen.

Für Straßenbrücken sind die Begriffe ‚Mangel‘ und ‚Schaden‘ exakt definiert [303]. Die Richtlinien für Bahnbrücken führt eine derart klare Definition nicht auf [57]. Für Kanalbrücken wird

ein ‚Schaden‘ ebenfalls klar beschrieben [40]. In Kapitel 2.1.1 wurde bereits die in dieser Arbeit einheitlich Verwendung des Begriffs ‚Schaden‘ festgelegt. Damit soll ein Überschreiten des Toleranzbereichs bzw. die Abweichung des Sollzustands gemeint sein. Für die Bewertung eines gefundenen Schadens geben die Richtlinien gewisse Kriterien an. So gilt für Straßenbrücken die Betrachtung der ‚Standicherheit‘, ‚Verkehrssicherheit‘ sowie der ‚Dauerhaftigkeit‘ [303]. Ein Schaden wird hinsichtlich der Definition dieser drei Kriterien bewertet. Für Bahnbrücken wird ein Abweichen des Solls ebenfalls nach drei Kriterien bewertet. Diese lauten hier ‚Stand sicherheitsrisiko‘, ‚Verkehrssicherheitsrisiko‘ sowie ‚Betriebssicherheitsrisiko‘ [57]. Auch hier ist eine deutliche Parallele zu erkennen. Die WSV-Richtlinie hat diese Dreiteilung nicht. Unter den Bewertungsgrundsätzen wird festgelegt, dass die Schäden „[...] im Hinblick auf die Tragfähigkeit und/oder die Gebrauchstauglichkeit bewertet werden.“ ([40], S.3). Damit liegt der Fokus auf der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, der Begriff ‚Dauerhaftigkeit‘ wird nicht explizit genannt. Allerdings wird zusätzlich hingewiesen, dass andere Begriffe wie beispielsweise ‚Funktionssicherheit‘ oder ‚Betriebsfähigkeit‘ mit den beiden zuvor genannten Definitionen mitberücksichtigt seien [40]. Insgesamt lässt sich konstatieren, dass der Sinn und Zweck übergeordnet sehr ähnlich ist und lediglich die Begriffsdefinitionen leicht voneinander abweichen. Dementsprechend sollte diese Dreiteilung (S - Standicherheit, V-Verkehrssicherheit, D-Dauerhaftigkeit), wie sie aus dem Schadenskatalog der BASt bekannt ist, auch im neuen Schadenskatalog Betrachtung finden.

Die RI-EBW-PRÜF [303] schreibt für jeden gefundenen Schaden eine getrennte Schadensbewertung für die drei zuvor genannten Kriterien ‚Standicherheit‘, ‚Verkehrssicherheit‘ und ‚Dauerhaftigkeit‘ in ansteigenden Bewertungsstufen von null bis vier vor. Stufe null hat im Allgemeinen keinen Einfluss auf S-V-D. In der ersten Stufe ist die Sicherheit zwar gegeben, doch wird sie in geringem Maße beeinträchtigt. Der Schaden hat in dieser Ebene nur einen geringen Einfluss auf die langfristige Dauerhaftigkeit. In Stufe zwei liegt nun eine geringe Beeinträchtigung von der S-V-D vor, die eine mittelfristige Maßnahme der Schadensbeseitigung erfordert. Schließlich werden in der dritten Stufe zulässige Toleranzen überschritten, sodass S-V-D beeinträchtigt sind und Maßnahmen kurzfristig notwendig werden, da die Sicherheit nicht mehr voll gegeben ist. In der letzten Stufe ist diese gänzlich nicht mehr gewährleistet, mit der Folge, dass sofortige Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen zur Schadensbeseitigung und eine Bauwerkssperrung nötig sind. Infolge einer möglichen Schadensausbreitung sind dann auch Folgeschädigungen möglich, welche die Dauerhaftigkeit stark beeinträchtigen ([303], S.11 f.). In Anhang 9.2.2 sind die einzelnen Definitionen der Schadensnoten null bis vier für die Bereiche S, V und D gebündelt dargestellt.

Die Richtlinie der Deutschen Bahn [57] unterteilt die Schadensbewertung ebenfalls in sogenannte Schadensstufen von 0 bis 4, wobei es sich bei 0 um einen sogenannten Merkschaden handelt. Die Schadensstufe 1 bildet geringfügige Schäden ab, während Schadensstufe 2 Schäden mittleren Umfangs erfasst. In der Schadensstufe 3 werden Schäden großen Umfangs eingestuft und Schadensstufe 4 umfasst die „völlige Verrottung [und; Anm. d. Verf.] Zerstörung“ ([57], S. 2). Zusätzlich zu den Schadensstufen klassifiziert Ril 804 vier Zustandskategorien für Bauwerksteile, welche Schäden aufweisen. Diese ordnen Zustandsänderungen ein, die die Verschlechterung des Bauteilzustandes während der Nutzung zur Folge haben und

Probleme der Standsicherheit nach sich ziehen. Ihnen wird gleichzeitig unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit die Möglichkeit der Instandsetzung zugeordnet. [57]

Zustandskategorie	Definition	Instandsetzung
Zustandskategorie 1	Punktuelle Schäden ohne Einfluss auf die Sicherheit	Bei langfristig zu erhaltenen Bauwerksteilen auf Wirtschaftlichkeit zu prüfen
Zustandskategorie 2	Größere Schäden ohne Einfluss auf die Sicherheit	Bei mittelfristig zu erhaltenen Bauwerksteilen auf Wirtschaftlichkeit zu prüfen
Zustandskategorie 3	Umfangreiche Schäden ohne Einfluss auf die Sicherheit	Instandsetzung noch möglich; Wirtschaftlichkeit prüfen
Zustandskategorie 4	Gravierende Schäden ohne Einfluss auf die Sicherheit	Wirtschaftliche Instandsetzung nicht mehr möglich

Tab. 4.3: Zustandskategorien gemäß Ril 804 [57]

VV-WSV 2101 [40] gibt ebenfalls Schadensklassen von 1 bis 4 vor. Daher fällt insgesamt eine vergleichbare Schadensbewertung in vier bzw. fünf Schadensklassen oder -noten auf. Die Note 0 ist in allen Fällen eine Art Merkschaden und hat in diesem Stadium keinen Einfluss auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit oder Dauerhaftigkeit. Aus diesem Grund kann eine grundlegende Notenspanne im neuen Schadenskatalog ebenfalls von 0 bis 4 gehen, um einen Einzelschaden zu bewerten. [40]

Die Richtlinie RI-EBW-PRÜF [303] stellt im nächsten Schritt einen umfangreichen Schadenskatalog, z.T. mit Schadensbildern, und der zugehörigen Bewertung zur Verfügung, der eine Orientierung bei der bauteilbezogenen Schadensbewertung liefert. Dort ist für jedes Bauteil in jedem Material ein Schaden in verschiedenen Schadensausprägungen sowie Vorgaben oder Vorschläge für die Bewertungen von S, V und D aufgelistet. Beispielhaft ist dies auf Abb. 4.7 zu sehen. Abschließend wird mit einer einheitlichen Software und einem dort hinterlegten Bewertungsalgorithmus das gesamte Bauwerk bewertet und erhält eine Gesamtnote zwischen 1,0 und 4,0, welche den Zustand des Gesamtbauwerks widerspiegelt (siehe 2.1.1 und Anhang Abb. 9.1). [69][300]

BSP_ID	Bauwerksart, Hauptbauteil / Konstruktionsteil / Bauteilergänzung oder Hauptbaustoff / Schaden	S	V	D
001-00	BRÜCKEN, ÜBERBAU / * / * / * (weitere BSP durch Angabe des Baustoffs, Schadens)	S	V	D
001-01	Graffiti an Sichtflächen	0	0	0
001-02	Optische Veränderung durch Bewitterung	0	0	0
001-04	Bauwerksuntersicht verrußt	0	0	1
001-05	Verschmutzung/Schalungsreste/ Packer/ Verdämmung o.ä	0	0	1
001-06	Vogelkot o.ä.	0	2	2

Abb. 4.7: Beispielauszug aus Schadenskatalog der BAST bzw. RI-EBW-PRÜF ([300], S.1)

Eine derartige weitere und detaillierte Bewertung gibt es bei der Ril 804 der Deutschen Bahn nicht. Nach der ersten oben beschriebenen Einstufung gibt es keine weiteren Anhaltspunkte, beispielsweise in Form eines Schadenskatalogs. Es wird nicht erkenntlich, wie eine Schadensbewertung zu erfolgen hat. Es gibt zudem keine Berechnung einer Gesamtnote für das Bauwerk. Der Prüfer hat selbst subjektiv Maßnahmen zur Instandsetzung vorzuschlagen, welche abschließend in einer sogenannten Entscheidungskonferenz besprochen werden. Dadurch entsteht keine objektive Vergleichbarkeit der einzelnen Bauwerke. [57]

Grundsätzlich besteht zwischen den beiden Richtlinien der BAST und der Deutschen Bahn die Gemeinsamkeit, dass zwischen einer Schadensbewertung und einer Zustandserfassung differenziert wird. Hinsichtlich der Schadensbewertung besteht der Bezug, dass in Stufen von null bis vier mit aufsteigender Bedeutsamkeit des Schadens aufgeschlüsselt wird. Während die Ril 804 die Bedeutsamkeit des Schadens in der jeweiligen Stufe kurz erläutert und einordnet, verknüpft die RI-EBW-PRÜF gleichzeitig dazu schon die zeitliche Dringlichkeit von Instandsetzungsmaßnahmen. Sie ist nicht nur aus diesem Grunde deutlich präziser als die Ril 804, sondern auch, weil sie zusätzlich zwischen der Schadensbewertung nach Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit unterscheidet. Infolgedessen kann sowohl eine lokale als auch globale Bauwerksbewertung weitaus detaillierter und begründeter vorgenommen werden. Die Zustandsbewertung unterscheidet sich insofern, als dass die Ril 804 vier Zustandskategorien einteilt, die allesamt keinen Einfluss auf die Standsicherheit haben. Dabei steht vor allem die Wirtschaftlichkeit der zugehörigen Instandsetzung im Vordergrund. Im Gegensatz dazu unterscheidet die RI-EBW-PRÜF intuitiver in Analogie zum Schulnotensystem zwischen den Bauwerkszuständen. Die Definition dieser ist detaillierter, da sie wieder zwischen den Auswirkungen auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit differenziert. Dazu wird die Zustandsnote sofort an das zeitliche Erfordernis und den Umfang von Maßnahmen gekoppelt. Durch den in der RI-EBW-PRÜF beigefügten beispielhaften Schadenskatalog können Nutzer der Richtlinie einsehen, welcher Schadensumfang einer Kategorie zugeordnet wird und somit objektiver bewerten. Zu beachten ist außerdem, dass sich die Zustandskategorien gemäß Ril 804 auf ‚Bauwerksteile‘ konzentrieren, während die Zustandsnoten gemäß RI-EBW-PRÜF für „Ingenieurbauwerke [...] und für Bauteilgruppen“ gelten und zunächst durch das Programmsystem SIB-Bauwerke kalkuliert werden [57][303]. Im Hinblick auf die weitergehende Schadensbewertung verweist Ril 804 auf die Durchführung einer Entscheidungskonferenz unter Federführung der anlagenverantwortlichen Stelle, in der eine Entscheidung über die Beseitigung der Schäden getroffen wird. An dieser Stelle fällt auf, dass Ril 804 unternehmensspezifischer ist und die Wirtschaftlichkeit in den Vordergrund rückt. Die RI-EBW-PRÜF verknüpft dies wieder mit dem Programmsystem SIB-Bauwerke [387], sodass eine Schadensbewertung weitaus automatisierter erfolgt. Auch bei den Prüfintervallen unterscheiden sich die Richtlinien nicht (siehe Tab. 4.4). [57][58][59][69][303][387]

Prüfungsart		Zyklus	Umfang
RI-EBW-PRÜF	Ril 804		
Laufende Beobachtung	-	2x pro Jahr	Visuell, ohne Hilfsmittel
Besichtigung	Überwachung	1x pro Jahr	ohne Hilfsmittel, von Verkehrsebene
Einfache Prüfung	Untersuchung	alle 3 Jahre	ohne Hilfsmittel, erweiterte Sichtprüfung
Hauptprüfung	Begutachtung	alle 6 Jahre	handnahe Prüfung, alle Bauteile
Sonderprüfung	Sonderinspektion	bei Bedarf	abhängig von Situation

Tab. 4.4: Prüfungsarten und -umfang gemäß RI-EBW-PRÜF [303] und Ril 804 [57]

Aus der oben erfolgten Analyse und Abb. 4.8 ergibt sich, dass die Betrachtung der drei Bereiche ‚Standsicherheit‘, ‚Verkehrssicherheit‘ und ‚Dauerhaftigkeit‘ für einen Schaden sinnvoll ist und Teil des neu zu erstellenden Katalogs werden sollte. Das gleiche gilt für die Schadensbewertung zwischen 0 und 4. Außerdem zeigt die Analyse, dass ein Schadenskatalog als Anhaltspunkt und für eine Objektivität in der Schadensbewertung durchaus sinnvoll ist. Außerdem scheint der vorhandene Schadenskatalog der BAST ausführlich und einzigartig in der deutschen Prüfpraxis zu sein, weswegen dieser durchaus als Grundlage für weitere Betrachtungen dienen sollte. Auch die Erzeugung einer Gesamtnote für das Bauwerk erweist sich als zielführend, um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Bauwerke untereinander herstellen und gewährleisten zu können. Aus diesem Grund werden die genannten Aspekte in den neuen Schadenskatalog eingearbeitet.

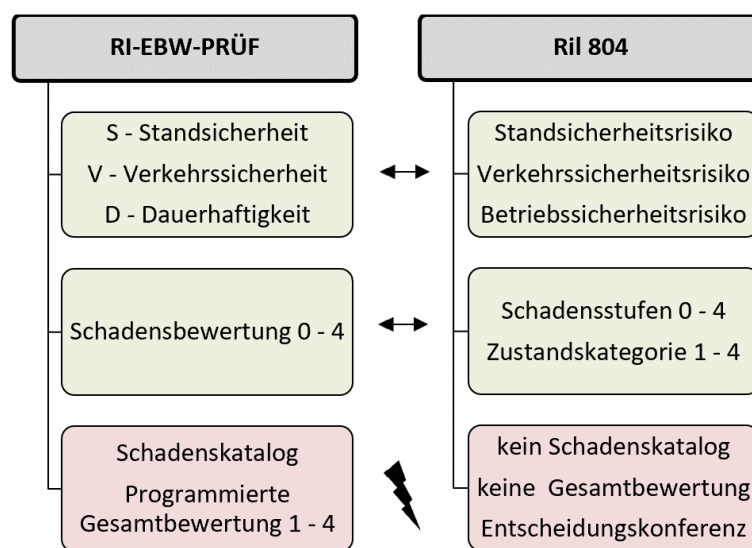


Abb. 4.8: Vergleich Hauptmerkmale von RI-EBW-PRÜF [303] und Ril 804 [57]

4.2 Neu entwickelter Schadenskatalog und Fazit

Das letzte Kapitel hat die Relevanz des BAST-Schadenskatalogs [300] für die Brückenprüfpraxis in Deutschland gezeigt. Der Katalog ist ausführlich, strukturiert und hilft dadurch eine Grundlage an Objektivität und somit eine Vergleichbarkeit in die Prüfung als auch die Ergebnisse zu bringen. Die Schadensbewertung von 0 bis 4 findet sich auch bei der Bahn oder der Wasserstraßen- und Schifffahrtverwaltung des Bundes in der Prüfpraxis wieder, genauso die Betrachtung von drei Bereichen, wenn auch jeweils leicht unterschiedlich bezeichnet, wie der Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) sowie Dauerhaftigkeit (D) [39][57][69][298]. Auch das Eisenbahnbundesamt (EBA) hat erste Bestrebungen unternommen, um ihre Prüfpraxis mit einem ähnlich gearteten Schadenskatalog zu ergänzen [364]. Aus diesen und in Kapitel 4.1.3 genannten Gründen soll auch der neu zu entwickelnde Schadenskatalog in Grundzügen auf dem Schadenskatalog der BAST aufbauen. Der hier zu entwickelnde Schadenskatalog soll präzise, klar und überschaubar sein. Dafür findet zunächst eine Datenaufbereitung sowie -analyse in Form von Vergleich, Gruppierung und Interpretation statt. Nach einer Analyse der

einzelnen Schadenskategorien sollen Visualisierungen den Erarbeitungsvorgang sowie den fertigen Katalog als Ergebnis darstellen. Dieser bezieht sich auf die in diesem Projekt definierten Brückenbereiche wie den stählernen Plattenbereich des Überbaus sowie die Betonplatte bei Stahlverbundbrücken. Verschleißteile wie Lager und Fahrbahnübergänge finden keine Priorität, da zunächst die Grundlagen für eine bildbasierte Brückenprüfung geschaffen und die Methodik allgemein entwickelt werden soll. Diese kann anschließend angepasst werden und eine Erweiterung des Katalogs ist möglich.

Zunächst wird noch einmal die Grundstruktur des originalen Katalogs betrachtet. Er besteht aus insgesamt 1.488 Schadensbeispielen, welche in die Kategorien Brücken (400), Tunnel (417), Lärmschutzbauwerke (142), Stützbauwerke (127), Lager (35), Fahrbahnübergänge (37), Beläge (52) und Sonstiges (278) unterteilt sind [300]. Für den neuen Schadenskatalog sind lediglich die Kategorien Brücke, Lager, Fahrbahnübergänge sowie Sonstiges relevant. Das heißt, in einem ersten Filterschritt werden diese Kategorien samt ihrer zugeordneten Schadensbeispiele, in Summe 788 Stück, ausgewählt.

Aufgrund der in 4.1.1 erarbeiteten Schadensanalyse und dem Ergebnis, welche die relevantesten und häufigsten auftretenden Schäden an Stahl- und Verbundbrücken sind, werden die 788 Schadensbeispiele den acht maßgeblichen Schadensklassen Korrosion (K), Beschichtung (B), Risse (R), Verbindungsmittel (V), Schweißnähte (S), Verschmutzungen (M) wie Moos, Dreck oder Kot, Verformungen (VF) und freiliegende Bewehrung (FB) zugeteilt. Dabei entfallen in diesem Schritt circa 400 Schadensbeispiele, da sie sich auf Stein, Holz, Vorspannung, Geländer, Entwässerung u.v.m. beziehen. Dies sind Bereiche oder Bauteile an Brücken, welche für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung sind. Somit besteht der neue bildbasierte Schadenskatalog nach dem zweiten Filterschritt aus 381 Schadensbeispielen. An dieser Stelle fällt die Dopplung von Schadensbeispielen im BAST-Katalog auf. Es gibt die gleiche Schadensbeschreibung für unterschiedliche Bauteile wie z.B.: „014-07: Brücke-Überbau: örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 1 bis Ri 2 (SK 1)“ und „031-07: Brücke-Unterbau: örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 1 bis Ri 2 (SK 1)“, welche sich einmal auf den Brückenüberbau und einmal auf den Unterbau bezieht. Die Bewertung für S, V und D unterscheiden sich dabei nicht. Das ergibt in dem originalen Katalog Sinn, da so gleichzeitig die grobe Verortung eines Schadens sichergestellt ist. Durch die UAS-Befliegung bzw. anderweitige Fotoaufnahme, welche das Bildmaterial mit GPS-Dateninformationen versieht, ist ein Wiederauffinden eines Schadens bzw. eine Verortung sichergestellt. Ein Katalog für jedes einzelne Bauteil ist daher nicht nötig. Auch fallen Unstimmigkeiten im BAST-Schadenskatalog hinsichtlich der Wortwahl auf. Eigentlich gleiche Schadensbeschreibungen (nur für unterschiedliche Bauteile) differenzieren sich beispielsweise nur in einem Wort. Solche Schadensbeispiele werden ebenfalls aussortiert bzw. anderen Schadensbeispielgruppen zugeordnet.

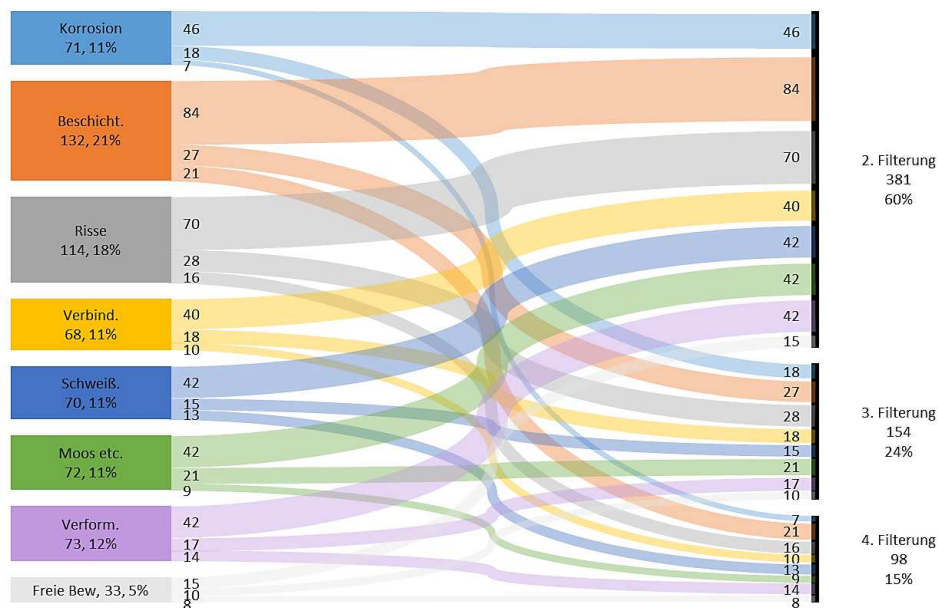


Abb. 4.9: Sankey-Diagramm der Filterstufen 2 bis 4

Die dritte Filterung besteht daher aus dem Sortieren bzw. Gruppieren der jeweils doppelten Schadensbeispiele, um den Katalog zu vereinfachen und für eine klare Übersichtlichkeit zu sorgen. Auch können einige Schadensbeispiele mehreren Schadenskategorien zugeordnet werden. Ein Beispiel hierfür ist „vereinzelte Risse in der Beschichtung nicht bis zum Stahl, kein Rostaustritt (SK 2)“. Dieses kann und wird anfänglich sowohl in die Kategorie ‚Beschichtung‘ als auch in der Kategorie ‚Risse‘ einsortiert werden. An dieser Stelle werden dieserart Doppelung jedoch ebenfalls eliminiert. Auch entfallen bei diesem Schritt weitere Schadensbeispiele, welche es an den hier definierten Brückenbauwerken nicht gibt (z.B. Stützen oder Schilder). Der Prüfsingenieur soll nicht mehr zahlreiche Seiten Schadensbeispiele durchgehen müssen, um eine passende Schadensbeschreibung zu finden. Der neue Schadenskatalog soll so präzise und übersichtlich wie möglich sein. Durch das Zusammenfassen und Eliminieren weiterer Schäden, besteht der Katalog in diesem Schritt aus 154 Schadensbeispielen. Die Reduzierung um ca. 230 einzelne Schadensbeispiele ist zu circa 85 % auf die Dopplung dieser zurückzuführen. Diese werden zu nur einem Schadenbeispiel komprimiert.

Im letzten Schritt wird innerhalb einer Gruppierung eines jedes Schadensbeispiels eliminiert, was sich wirklich nicht auf die hier definierten Bauteile bezieht. Es gibt in diesem Stadium Schadensbeschreibungen, welche sich beispielsweise auf Wellstahlprofile beziehen, die aufgrund besonderer oder passender Schadensbeschreibungen bis zu diesem Stand im neuen Schadenskatalog blieben. Sie werden in einem weiteren Schritt unter anderem genutzt, um die endgültige Schadensbeschreibung oder Definition von Standfestigkeit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D) zu unterstützen und zu verbessern. Der Wortlaut der originalen Schadensbeispiele der BAST wird bewusst nahezu unverändert, mit kleinen präzisen Verbesserungen, beibehalten. Die deutsche Prüfpraxis arbeitet seit Jahrzehnten mit dem bekannten BAST-Schadenskatalog, jeder Brückenprüfer ist mit der Anwendung der Schadensbeispiele vertraut [300]. Da das hier entwickelte Verfahren schnelle Umsetzung und Akzeptanz erfahren

soll, ist diese Anlehnung bewusst eingehalten. Abb. 4.10 zeigt mithilfe eines Sankey-Diagramms die Verteilung der einzelnen Schadenskategorien und wie sich diese auf die jeweiligen Stufen der Filterung verteilen. Weitere Sankey-Diagramme für jede Schadenskategorie einzeln sind in Anhang 9.2.6 zu finden. Der BAST-Schadenskatalog lässt viele freie Bewertungsfelder für S, V und D, welche der Prüfer subjektiv auszufüllen hat. Im bildbasierten Schadenskatalog soll es kein Schadensbeispiel ohne feste Bewertung für S, V und D geben. Der Prüfer soll zwar den Schaden bzw. das Schadensbeispiel auswählen, nicht aber die Bewertung. Die festen Bewertungen werden weiterhin Grundlage für den in Kapitel 5 beschriebenen Bewertungsalgorithmus sein. Diese nicht fest definierten Bewertungen werden in diesem Schritt durch Vergleiche mit anderen Schadensbeispielen, den Praxisbeispielen [290] und Erfahrung des Autors für den neuen Katalog definiert.

Der gesamte Filterungsvorgang ist beispielhaft für die Schadenskategorie ‚Korrosion‘ auf Abb. 4.10 visualisiert. Es zeigt, dass der UAS-Schadenskatalog für Korrosion aus den Schäden K1, K2, K3, K4, K5, K15 sowie K16 (K = Korrosion) besteht. Die Prozessschemata für alle weiteren Schadenskategorien sind in Anhang 9.2.5 zu finden. Der finale Schadenskatalog besteht aus 98 Schadensbeispielen, welche sich wie folgt auf die acht genannten Schadenskategorien verteilen: sieben Schäden in der Kategorie Korrosion, 21 Beschichtungsschäden, 16 Schäden in der Risskategorie, zehn Schäden zu Verbindungsmitteln, 13 Schweißnahtschäden, neun Schäden in der Kategorie Verschmutzungen (wie beispielsweise Moos und Vogelkot), 14 Verformungsschäden und acht Schäden gehören zur Kategorie der freiliegenden Bewehrung. Ein Ausschnitt des Katalogs ist Abb. 4.11 zu entnehmen (der Gesamtkatalog ist in Anhang 9.2.6, Tab. 9.8 zu finden). Dieser Katalog ist im Vergleich zum Schadenskatalog der BAST nicht bauteilbasiert, sondern schadensbasiert. Die Sortierung findet unabhängig vom Bauteil statt, da der Einfluss der Verortung im Bewertungsalgorithmus des folgenden Kapitels einfließen wird. Außerdem ist er deutlich weniger umfangreich, was die Gruppierung und das detaillierte Vergleichen der einzelnen Schadens-IDs zur Folge hat. Wie bereits in 4.1.1 erörtert, treten nur knapp 40 % der möglichen Schäden regelmäßig an Brückenbauwerken auf. Ein schlanker Katalog ist in der Prüfpraxis durch seine Einfachheit besser zu handhaben und beschleunigt den Bearbeitungsaufwand.

Ebenfalls unterscheidet sich der Schadenskatalog dahingehend, dass jeder Schaden bzw. jede Schadens-ID eine feste, eigenständige Bewertung für die Bereiche Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) sowie Dauerhaftigkeit (D) hat. Es gibt keinen Spielraum für subjektives Ermessen des Prüfers. Die relevantesten Schäden an Brücken, welche sich aus der Analyse von wahren Prüfberichten ergeben haben (siehe Kapitel 4.1.1), sind ebenfalls Teil des hier erarbeiteten Katalogs und umfassen daher die grundlegendsten Schäden aus der Prüfpraxis. Die durchschnittliche Einzelschadensnote liegt bei 2,06 mit einer Standardabweichung von 0,81. Das zeigt, der Katalog ist gut ausgeglichen und deckt alle Schadensstufen ab.

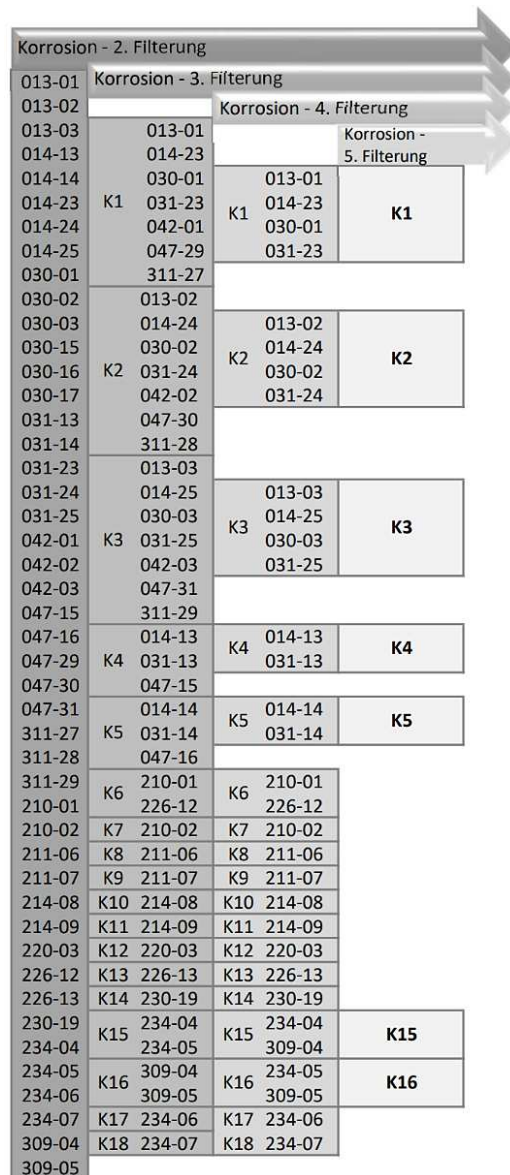


Abb. 4.10: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Korrosionsschäden

Zusammenfassend hat dieses Kapitel die Relevanz und die Daseinsberechtigung eines objektiven Schadenskatalogs für die Brückenprüfung in Deutschland aufgezeigt. Ein ausführlicher Katalog bietet eine Grundlage an Objektivität und erlaubt somit eine Vergleichbarkeit der Prüfungsergebnisse. Die Einzelschadensbewertung innerhalb des Katalogs von 0 bis 4 findet sich nicht nur im BAST-Schadenskatalog [300], sondern auch bei der Deutschen Bahn oder der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes in der Prüfpraxis wieder. Ebenso verhält es sich mit den zu bewertenden Teilbereichen „Standesicherheit“ (S), „Verkehrssicherheit“ (V) sowie „Dauerhaftigkeit“ (D) [39][57][69][298]. Der hier neu entwickelte Schadenskatalog hat sich auf Präzision, Klarheit und Überschaubarkeit fokussiert, um die Umsetzung in der Praxis zu erleichtern. Aus diesem Grund ist der Wortlaut der bekannten Schadensbeispiele durch Zusammenführen und Reduzieren bewusst ähnlich geblieben, damit die Umstellung vom derzeit vertrauten

Schadenskatalog

Schadenskatalog der BASt [300] so problemlos wie möglich ausfällt und die Akzeptanz für das neue Verfahren erreicht werden kann. Die Klarheit des neuen Katalogs wird durch nur noch 98 Schadensbeispiele erreicht, welche sich auf acht Schadenskategorien verteilen. Diese neue Schadensbasiertheit erlaubt die Reduzierung der Schadensanzahl, da die Bedeutung der Schadensverortung in dem hier erarbeiteten Verfahren durch den nachfolgenden Bewertungsalgorithmus sichergestellt wird.

Schadenskatalog					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Korrosion					
1	K1	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, beginnend, Schwächung < 10 % (SK4)	1	0	3
2	K2	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, fortgeschritten, Schwächung 10-30 % (SK5)	3	1	4
3	K3	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, stark, Kerbwirkung + Schwächung > 30 %, (SK5)	4	2	4
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Beschichtung					
1	B1	Glanzverlust und/oder Farbveränderung Kreidung, Ausbleichen der Beschichtung (SK 1)	0	0	1
2	B2	Mittelwert Schichtdicke zu gering, $\geq 90\%$ der Sollschichtdicke ($\geq 200 \mu\text{m}$, wenn Sollschichtdicke unbekannt - SK 1)	0	0	1
3	B3	Mittelwert Schichtdicke zu gering, 75 % bis 90 % der Sollschichtdicke ($\geq 160 \mu\text{m}$, wenn Sollschichtdicke unbekannt - SK 2)/Schichtdicke der Korrosionsschutzschicht deutlich zu gering	0	0	1
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Risse					
1	R1	oberflächennahe Risse	0	0	1
2	R2	Stahlbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten mit Rissweiten < 0,4 mm	0	0	2
3	R3	Stahlbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten mit Rissweiten $\geq 0,4$ mm	1	0	3
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Verbindungsmitel					
1	VB1	Lockere Schraub-, Nietverbindung bei Hauptbauteilen	3	0	3
2	VB2	örtlich Schraubverbindung locker	0	0	2
3	VB3	großflächig Schraubverbindungen locker	1	0	2
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Schweißnähte					
1	S1	Schweißnahttrisse an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, ca 10 % der Nahtlänge	1	0	2
2	S2	Schweißnahttrisse an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, ca 20 - 30 % der Nahtlänge	2	0	3
3	S3	Schweißnahttrisse an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, $\geq 40\%$ der Nahtlänge	3	0	4
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Verschmutzungen					
1	M1	Graffiti an Sichtflächen	0	0	1
2	M2	Optische Veränderung durch Bewitterung	0	0	1
3	M3	Bauwerksunterseite verrußt	0	0	1
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Verformungen					
1	VF2	Abweichung der Hauptbauteile von der vorgesehenen Gebrauchslage > 10 %/Bauteil verformt, verbogen, schadhaf	2	0	3
2	VF3	Verformungen/ Verschiebung/ Kippung	1	0	2
3	VF4	ausgebogenes Druckglied, Stich $f_{\text{max}} = 1/275$ des Knotenpunktsabstands ohne Materialschwächung	1	0	1
...					
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Freiliegende Bewehrung					
1	FB1	freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (keine nennenswerte Querschnittsminderung)	1	0	2
2	FB2	freiliegende korrodierte Bewehrung ,einsetzende Querschnittsminderung	1	0	3
3	FB3	freiliegende, korrodierte Tragbewehrung, einsetzende Querschnittsminderung	2	0	3
...					

Abb. 4.11: Ausschnitt des neu entwickelten Schadenskatalogs

5 Bewertungsalgorithmus

Ein essentieller Bestandteil eines wirksam funktionierenden Bauwerk-Management-Systems (siehe Kapitel 2.1.4) ist nicht nur die praktische Bauwerksprüfung, sondern die daraus resultierende Zustandsbewertung. In Deutschland bilden dafür derzeit die DIN 1076 [69] sowie die RI-EBW-PRÜF [303] die Grundlage. Um jedoch einen optimierten Weg der Bauwerksbewertung und somit der Erhaltungsplanung zu erarbeiten, werden im Folgenden nationale und internationale Zustandsbewertungssysteme analysiert und hinsichtlich ihrer Praktikabilität, Vor- und Nachteile sowie ihren essentiellen Funktionsprinzipien auf 20 vorliegende deutsche Brücken angewandt und ihre wichtigsten Kernaussagen erarbeitet. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für den hier neu erarbeiteten Algorithmus, welcher anhand von Bildaufnahmen der Brückenbauwerke und voxelisierten Bauwerksmodellen funktionieren soll. Es wird eine Methode entwickelt, welche die besten Eigenschaften von nationalen und internationalen Bewertungsverfahren und die Neuerung der voxelisierten Darstellungsmethode vereint. Dabei dienen Methodiken wie der Einflussbaum sowie das Logikdiagramm als Grundlage für die Erarbeitung eines neuen Bewertungsalgorithmus [13]. Abschließend wird dieser anhand von 180 zum Teil realen und teilweise fiktiven Brücken einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um seine Anwendbarkeit für die Prüfpraxis zu untersuchen.

5.1 Nationale Bewertungsverfahren

5.1.1 RI-EBW-PRÜF 1988

Mit der Entwicklung der RI-EBW-PRÜF 1988 [301] ist erstmals eine einheitliche Bewertung für Brückenbauwerke veröffentlicht worden. Es wird hier ebenfalls erstmals ein Schadenskatalog (siehe Anhang Abb. 9.18) für die Vergleichbarkeit von Schäden erschaffen. Die Grundlage des Verfahrens zur Zustandsbewertung bilden sogenannte diskrete Bewertungszahlen, welche durch Einordnung von Einzelschäden als auch dem gesamten Bauwerk in definierte Klassen erzeugt werden. Dafür erfolgt die Bewertung der einzelnen Schäden zunächst nach Schweregraden (siehe Anhang Tab. 9.9). Die Schweregrade unterscheiden die Art der Einzelschäden. Schäden, welche auf Dauer eine Instandsetzung benötigen, fallen unter Schweregrad 1. Schäden für eine sofortige Instandsetzung erhalten Schweregrad 4. Bei Schweregrad 0 liegt kein Schaden vor und Schweregrad 8 und 9 beschreiben Gewährleistungs- sowie Unterhaltungsmängel. [303]

Die Zustandsbeschreibung bzw. -bewertung sind vom Prüfer einzeln festzulegen und erfolgen in den Schweregraden 1 bis 4. Die Definition der Zustandsnote erfolgt anschließend nach RI-EBW-PRÜF [301], wobei die Note 1,0 für einen sehr guten sowie die Note 4,0 für einen ungenügenden Zustand stehen. Die Angabe der Dezimalstelle hilft bei einer möglichst detaillierten Zustandsnote (siehe Anhang Tab. 9.10). [156]

Insgesamt ist das Verfahren in zwei Rechenschritte aufgeteilt (siehe Abb. 5.1). Zunächst wird die Bewertung der Schweregrade der Einzelschäden vorgenommen und anschließend wird die Zustandsnote des Gesamtbauwerks analog ermittelt.



Abb. 5.1: Zustandsbewertung nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]

Für die Nachbildung dieses Verfahrens im Tabellenkalkulationsprogramm Excel ist es notwendig, die Schweregrade von 1988 den Zustandsnoten der Einzelschäden des heutigen Bewertungsverfahrens zuzuordnen. So erhalten Schäden mit einer Note zwischen 2,0 und 2,4 beispielsweise den Schweregrad 2, Noten zwischen 3,0 und 3,4 den Schweregrad 3 usw. Die genaue Verteilung, welche für die Nachbildung des Verfahrens verwendet wird, ist in Tab. 5.1 zusammengefasst. Diese Festlegung wird auf 20 vorhandene Brückenprüfberichte angewandt, um dieses zu bestätigen und die Kernaspekte des Verfahrens herausfiltern zu können.

Note Einzelschaden BAST heute	Schweregrad RI-EBW-PRÜF 1988	Zustandsnote Gesamtbauwerk (Z_{ges}) RI-EBW-PRÜF 1988
1,0 – 1,4	1	1,0 – 1,9
1,5 – 1,9	2	2,0 – 2,9
2,0 – 2,4	2	
2,5 – 2,9	3	3,0 – 3,9
3,0 – 3,4	3	
3,5 – 4,0	4	4,0

Tab. 5.1: Festlegungen für Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]

Die Nachbildung des Verfahrens zeigt, dass die getroffenen Annahmen aus Tab. 5.1 sinnvoll sind. Die Bewertung des Schweregrads entspricht den bekannten Zustandsnoten. Alle nachgebildeten Prüfberichte erhalten die gleiche Zustandsnote wie im heutigen Prüfbericht. Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Anhang 9.3.1, Tab. 9.11 zu finden. Es fällt der Unterschied auf, dass die Bewertung nach RI-EBW-PRÜF von 1988 aufgrund der größeren Notensprünge ungenauer ist als nach dem aktuellen Verfahren von 2017. Die Ausgabe einer Gesamtnote verringert den gesamten Informationsgehalt der Einzelschäden wie Ausmaß und Ausbreitung. Einzelne Maßnahmen können aus der Gesamtnote ebenfalls nicht abgeleitet werden. Zusätzlich findet die Beurteilung der Einzelschäden vom Prüfer subjektiv statt.

RI-EBW-PRÜF 1988	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ erstmals einheitliche Erfassungs- und Auswertepaxis ▪ einfache und einheitliche Protokollierung ▪ Schadenskatalog und Bewertungshilfen vorhanden zur Vergleichbarkeit mit anderen Bauwerken ▪ Verknüpfung mit Software möglich ▪ erste Angabe von Trendentwicklung durch Angabe einer Dezimalstelle in der Zustandszahl ▪ Vorschläge Schadensbewertungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ▪ keine Dringlichkeitsbewertung ableitbar ▪ keine Aussagen über Schadensentwicklungen/zukünftiges Verhalten bei globaler Zustandsnote ▪ zwei Bauwerke mit derselben Zustandsnote können unterschiedlichen Zustand aufweisen → keine direkte Ableitung von Maßnahmen möglich ▪ Zusammenfassung zu einer Gesamtzustandsnote → Informationsverlust ▪ globale Zustandsnote → keine direkte Ableitung von Maßnahmen für einzelne Bauteile ▪ globale Zustandsnote → relativer Zustand ▪ subjektive Bewertung

Tab. 5.2: Vor- und Nachteile Verfahren nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]

5.1.2 Verfahren von Kraft

Seit 1985 forschte der Lehrstuhl Baubetrieb der Technischen Hochschule Darmstadt (TH Darmstadt; heute Technische Universität Darmstadt) im Bereich der Brückenerhaltung [326]. Die Arbeit von 1995 gründet auf einer Umfrage der Straßenbau- und Autobahnämter des LVR (Landesverband Rheinland). Zu dieser Zeit fallen 5.418 Brücken mit einer Brückenfläche von rund 3,3 Mio. m² in den Verantwortungsbereich dieser Organisation. Fast die Hälfte dieser Brücken wurde in den 70er Jahren während des Baubooms errichtet. Aus diesem Grund war die Nachfrage nach einem einheitlichen BMS, welches die große Zahl aufkommender Schäden händelt, auf. Das Modell von Kraft arbeitet mit einer Prioritätszahl, um eine Dringlichkeitsreihung zu realisieren [177]. [325]

Bis dahin arbeitete der LVR mit einer sogenannten und selbst entwickelten Bedarfsleiste. Diese soll den Bedarf der Instandsetzung abschätzen. Prüfberichte nach DIN 1076 [69] werden vom LVR um die Bedarfsleiste erweitert, in welcher der erforderliche Erhaltungsbedarf jeder Erhaltungskategorie eingetragen ist. Dabei stehen folgende Abkürzungen für einzelne Bauteilkategorien:

- | | |
|---------------------------|------------------------------------|
| A1 – Belag und Abdichtung | F8 – Korrosionsschutz Stahlbrücken |
| B2 – Fahrbahnübergänge | G9.1 – Erneuerung Geländer |
| C3 – Lager | G9.2 – Korrosionsschutz Geländer |
| D4 – Kappen | H10 – Entwässerung und Abdeckung |
| D5 – Betoninstandsetzung | I12 – Ersatzbauwerke |

Bewertungsalgorithmus

Kategorie	A1	B2	C3	D4	D5	F8	G9.1	G9.2	H10	I12
E/I [%]										
D										

Abb. 5.2: Bedarfsleiste des LVR [177]

Die erste Zeile der Bedarfsleiste gibt den Erhaltungsbedarf an, welcher vom Entscheidungsträger abgeschätzt wird (siehe Abb. 5.2). Die zweite Zeile enthält die Dringlichkeit der Instandsetzungsmaßnahmen nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]. Durch Multiplikation der Brückenfläche mit dem entsprechenden prozentualen Wert des Erhaltungsbedarfs wird die sogenannte ‚reduzierte Brückenfläche‘ errechnet. Die Bedarfsleiste beruht grundlegend auf einem Soll-Ist-Vergleich der tatsächlich ausgeführten Erhaltungsmaßnahme sowie dem ermittelten Erhaltungsbedarf. [177]

Die Ausarbeitung von Kraft erweitert die Bedarfsleiste um die Schadenszone, welche die konstruktive Bedeutung eines Bauteils bezogen auf die Relevanz für die Gesamttragfähigkeit bewertet, um somit seinen Einfluss auf das Bauwerk kalkulieren zu können (siehe Anhang Tab. 9.12). Bauteile, welche zu Über- oder Unterbau gehören, werden einer höheren Schadenszone (Schadenszone 6) zugeordnet als beispielsweise Kappen oder Entwässerungsbauteile (Schadenszone 1). Die Bewertung des Einzelschadens findet weiterhin nach RI-EBW-PRÜF 1988 mittels Schweregrad statt (siehe 5.1.1 und Tab. 9.9), welcher in diesem Verfahren f_1 genannt wird. Die Ausbreitungstendenz wird ebenfalls berücksichtigt und heißt f_2 (siehe Anhang Tab. 9.13). Beeinflusst ein Schaden weitere Bauteile, wird dieser weiter herabgesetzt durch den Faktor f_3 (siehe Anhang Tab. 9.14). Die Verkehrsnutzung (Autobahn, Landstraße etc.) wird durch den Faktor f_4 berücksichtigt und bei der Straßenbauverwaltung nach der Richtlinie für die Anlagen von Straßen (RAS-N) [294] bestimmt (siehe Anhang Tab. 9.15). Die Faktoren f_1 bis f_4 können individuell gewichtet werden, um spezielle Randbedingungen in die Bewertung mit einbeziehen zu können. Die Grundgewichtung lautet jedoch 2:1:1:1. [177][379]

Mithilfe der oben beschriebenen Faktoren und Gewichtungen wird der sogenannte Schadensindex I nach (Gl. 41) errechnet:

$$I = \alpha \cdot f_1 + \beta \cdot f_2 + \gamma \cdot f_3 + \delta \cdot f_4 \quad [177] \quad (\text{Gl. 41})$$

Zusätzlich wird die Dringlichkeit D_n eines Schadens mithilfe der Schadenszone Z_n ermittelt:

$$D_n = I \cdot Z_n \quad [177] \quad (\text{Gl. 42})$$

Damit viele kleine Schäden nicht die gleiche Bedeutung erhalten wie ein großer Schaden, wird die kritische Dringlichkeit D_{krit} eingeführt, welche sich aus dem kritischen Schadensindex sowie der kritischen Schadenszone zusammensetzt:

$$D_{krit} = I_{krit} \cdot Z_{krit} \quad [177] \quad (\text{Gl. 43})$$

Daraus ergibt sich die Anzahl der Dringlichkeiten k_{krit} pro Prüfbericht, welche größer sind als D_{krit} . Dies führt zu einer guten Vergleichbarkeit aller Ergebnisse. D_{krit} wird dabei frei gewählt

bzw. festgelegt. Ein stets gleicher Grenzwert ist für eine objektive Vergleichbarkeit jedoch sinnvoll. [177][325]

$$k_{krit} = \text{Anzahl } D > D_{krit} \quad [177] \quad (\text{Gl. 44})$$

Abschließend wird mit allen zuvor ermittelten Werten eine Prioritätszahl P berechnet, um eine Prioritätsreihung zwischen den Bauwerken zu gewährleisten:

$$P = \frac{\sum D_n}{n} \cdot k_{krit} = \frac{\sum(I \cdot Z_n)}{n} \cdot k_{krit} \quad [177] \quad (\text{Gl. 45})$$

Insgesamt ist das Verfahren nach Kraft in vier Rechenschritte aufgeteilt. Als erstes wird der Schadensindex I in Abhängigkeit von Schweregrad (f_1), Ausbreitungstendenz (f_2), Auswirkung auf andere Bauteile (f_3) sowie Verkehrsnutzung (f_4) ermittelt. Durch weitere Multiplikation mit der Schadenszone (Z_n) wird die Dringlichkeit (D_n) berechnet. Damit kleine Schäden nicht bedeutungsvoller werden als große Schäden, wird die kritische Dringlichkeit (D_{krit}) erzeugt. Als letztes wird die Prioritätszahl P für eine Instandsetzungsreihenfolge ermittelt.



Abb. 5.3: Zustandsbewertung nach Kraft

Für die Nachbildung dieses Verfahrens im Tabellenkalkulationsprogramm Excel ist es notwendig, die heutigen Bauteilkategorien des BAST-Verfahrens den Kategorien sowie den Bauteilzonen 1 bis 6 nach Kraft zuzuordnen. Die genaue Verteilung, welche für die Nachbildung des Verfahrens verwendet wird, ist in Tab. 5.3 zusammengefasst. Die Bewertung des Schweregrads f_1 findet auch hier entsprechend Tab. 5.1 statt.

Bauteilkategorie BAST heute	Kategorie Kraft	Bauteilzone Kraft
Überbau	F8	2/3
Unterbau	D5	4
Vorspannung	F8	2
Gründung	D5	4
Erd- und Felsanker	D5	4
Brückenseile und -kabel	F8	2
Lager	C3	5
Übergangskonstruktionen	B2	2
Abdichtungen	H10	1
Beläge	A1	2
Kappen	D4	2
Schutzeinrichtungen	G9	1
Sonstiges	S/T	6

Tab. 5.3: Festlegungen für Schadensbewertung nach Kraft [177]

Der Faktor f_2 steht für die Ausbreitungstendenz. Diese wird mit dem heutigen Wert für die Dauerhaftigkeit D korreliert. Siehe dafür Tab. 5.4. Die Auswirkung auf andere Bauteile wird bei Kraft mit f_3 beschrieben. Dieser Faktor wird mit dem heutigen Faktor für den Schadensumfang in Verbindung gesetzt (siehe Tab. 5.5). Bei der Verkehrsbedeutung (f_4) handelt es sich bei den hier betrachteten Brücken um ebensolche außerhalb bebauter Gebiete (A III nach RAS-N [294]) sowie innerhalb bebauter Gebiete (B II und B III nach RAS-N [294]), sodass der Faktor f_4 immer gleich 2 ist. Mit diesen Definitionen wird das Verfahren nach Kraft auf die hier betrachteten Brückenprüfberichte angewandt.

Dauerhaftigkeit „D“ BASt heute	Ausbreitungstendenz f_2
0	0
1	0
2	1
3	1
4	2

Tab. 5.4: Festlegungen für Ausbreitungstendenz f_2 nach Kraft [177]

Schadensumfang U BASt heute	Auswirkungen auf andere Bauteile f_3
klein = - 0,1	0
mittel = 0	0
groß = 0,1	1

Tab. 5.5: Festlegungen für Auswirkungen auf andere Bauteile f_3 nach Kraft [177]

Die Ergebnisse mit dem Verfahren nach Kraft unterscheiden sich grundlegend von den bisher nach BASt bekannten Bauwerksnoten zwischen 1,0 und 4,0. Hier variieren die Ergebnisse zwischen 0 und ca. 300 für die Prioritätszahl P , was gleichzeitig eine Dringlichkeitsreihung ausdrücken soll. Es fällt auf, dass die Dringlichkeitsreihung nach Kraft mit den Bauwerksnoten des heutigen BASt-Verfahrens korrelieren. Eine heutige Note 3,5 entspricht bei Kraft einer Prioritätszahl von ca. 300. Die Note 2,0 entspricht einem Wert von ca. 50. Leichte Abweichungen stammen von den unterschiedlich genutzten Faktoren wie Ausbreitungstendenz, Auswirkungen auf andere Bauteile sowie Verkehrsnutzung beider Bewertungsverfahren, da sie an dieser Stelle nur entsprechend des Referenzprüfberichts abgeschätzt werden können (siehe Tab. 5.3, Tab. 5.4 und Tab. 5.5). Kraft unterscheidet zudem nicht getrennt nach Überbau und Unterbau, was beim heutigen Verfahren eine essentielle Betrachtung darstellt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist im Anhang, Tab. 9.16 dargestellt.

5.1.3 TH Darmstadt

Das in [177] entwickelte Verfahren wurde kurz darauf von der TH Darmstadt modifiziert. Der Einfluss der Ausbreitungstendenz sowie die Auswirkung eines Schadens auf andere Bauteile werden entfernt. Die Gewichtungen werden angepasst. Außerdem wird eine Normierung der Bauteile vorgenommen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Auch werden

Schadenszonen entsprechend der Neuauflage der RI-EBW-PRÜF von 1994 [302] angepasst und integriert (siehe Anhang Tab. 9.17). Es soll die Transparenz der Dringlichkeit durch Vernachlässigung der 1er-Schäden verbessert werden und Bauwerke mit hohem Handlungsbedarf klarer herausstechen. Außerdem gibt es in diesem Verfahren nicht mehr eine Prioritätszahl, sondern zwei. [325]

Prioritätsziffer P_1 soll den Bauwerkszustand sowie die Bauwerkssicherheit widerspiegeln. Jedem Bauteil, welches Schäden aufweist, wird eine Schadenskategorie sowie eine Bauteilzone zugeordnet, um anschließend die Normierung durchlaufen zu können. Zuvor ist auch hier der Schadensindex I nötig, welcher abhängig ist von der jeweiligen Bauteilkategorie und eines Normierungsfaktors, welcher ein Ergebnis $> 1,0$ erzeugt. Sogenannte Prioritätspunkte p_1 (siehe Anhang Tab. 9.19), welche von der Bauteilkategorie abhängig sind, werden in Abhängigkeit vom prozentualen Ergebnis des Schadensindex I verteilt. Dabei wird beispielsweise der Korrosionsschutz höher bewertet (25 %) als Fahrbahnübergänge oder Kappen (10%). Die Prioritätsziffer P_1 wird durch Summierung der Prioritätspunkte der einzelnen Bauteilkategorien ermittelt (siehe Anhang Tab. 9.17). [325][379]

$$I(\text{Kategorie}) = \sum(f_{1,i} \cdot Z_i) \cdot \frac{1000}{\text{Fläche [m}^2\text{]}} \quad \text{mit } f_{1,i} = 2; 3 \quad [325] \quad (\text{Gl. 46})$$

$$P_1 = \sum_{A_1}^{H_{10}} ((p_1(\text{Kategorie}) \cdot (\text{Gewicht Kategorie})) \quad [325] \quad (\text{Gl. 47})$$

Prioritätsziffer P_2 beschreibt die Verkehrsbedeutung des Bauwerks (siehe Anhang Tab. 9.20). Demnach erhalten Autobahnbrücken eine höhere Gewichtung als welche an Fuß- oder Radwegen. Durch Addition der beiden zuvor errechneten Prioritätsziffern wird die Prioritätszahl P ermittelt. [325]

$$P_2 = p_2 \cdot 25 \quad [325] \quad (\text{Gl. 48})$$

$$P = P_1 + P_2 \quad [325] \quad (\text{Gl. 49})$$

Das modifizierte Verfahren der TH Darmstadt kann ebenfalls in vier Rechenschritte gegliedert werden (siehe Abb. 5.4). Als erstes wird der Schadensindex I in Abhängigkeit der Bauteilkategorie ermittelt. Ein Unterschied zu Kraft ist, dass 1er-Schäden vernachlässigt werden, um große Schäden aufzuwerten. Im zweiten Schritt wird die Prioritätsziffer P_1 mithilfe von Prioritätspunkten und in Abhängigkeit des Schadensindex berechnet. Prioritätsziffer P_2 beschreibt die Verkehrsbedeutung der Brücke. Im letzten Schritt wird durch Addition der beiden zuvor genannten Ziffern die Prioritätszahl P , welche vergleichbar ist mit ebendieser von Kraft.



Abb. 5.4: Zustandsbewertung nach TH Darmstadt

Für die Nachbildung dieses Verfahrens im Tabellenkalkulationsprogramm Excel ist es notwendig, den Normierungsfaktor über die Brückenlänge und -breite festzulegen, was Tab. 9.18 im Anhang zu entnehmen ist. Anschließend können die soeben beschriebenen Rechenschritte ((Gl. 46) bis (Gl. 49)) durchgeführt werden. Tab. 9.21 in Anhang 9.3.3 zeigt eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der Nachbildung dieses Verfahrens. Sie zeigt erneut, dass die Dringlichkeitsreihung ungefähr der Benotung nach dem heutigen BAST-Verfahren entspricht. Eine heutige Note von 3,5 entspricht einer Prioritätszahl P von ca. 500. Die Note 2,0 entspricht ca. $P = 145$. Leichte Abweichungen stammen von den unterschiedlich genutzten Faktoren wie beispielsweise P_1 und P_2 beider Bewertungsverfahren, da diese nur entsprechend des Referenzprüfberichts abgeschätzt werden können. Durch die Vernachlässigung der 1er-Schäden, sind die Ergebnisse nach dem Verfahren der TH Darmstadt kritischer als nach Kraft. Die Normierung sorgt für eine Vergleichbarkeit der Bauwerke untereinander. Die Prioritätsbewertung ermöglicht im Allgemeinen eine bedarfsorientierte Instandhaltungsplanung. Jedoch müssen die Schadensdaten so objektiv wie möglich definiert sein, damit eine einheitliche Bewertung gewährleistet werden kann.

Das Verfahren nach Kraft hat die Problematik, dass große Bauwerke tendenziell mehr Schäden aufweisen, was aufgegriffen wird, indem die entsprechenden Schadensdaten mit einer kritischen Dringlichkeit multipliziert wird. Diese kann bei großen Bauwerken höher ausfallen. Die neu eingeführten Faktoren f_1 bis f_3 (Schadenszone, Ausbreitungstendenz, Auswirkung auf andere Bauteile) sollen grobe Aussagen über die zukünftige Bauwerksentwicklung gemacht werden. Durch Faktor f_4 erhalten Autobahnbrücken direkt eine höhere Priorität als Brücken mit weniger Verkehr.

Das Verfahren der TH Darmstadt eliminiert dagegen wieder die Faktoren f_2 bis f_4 , weil die Angabe der Schadenszone diese implizieren soll. Außerdem wird eine Normierung für eine sicherere Vergleichbarkeit eingeführt und eher unbedeutende 1er-Schäden ganz aus der Bewertung entfernt. Die Vor- und Nachteile der Verfahren der Bedarfsleiste selbst, von Kraft sowie der TH Darmstadt sind zusammenfassend in Tab. 5.6 dargestellt.

Bedarfsleiste / Kraft / TH Darmstadt	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prioritäts- bzw. Dringlichkeitsbewertung durch Vergleich mit anderen Bauwerken ▪ eindeutige Bewertung durch Punktevergabe ▪ Verknüpfung mit Software möglich ▪ Vorschläge Schadensbewertungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ subjektive Bewertung ▪ keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ▪ keine Vergabe einer Zustandsnote, d.h. keine Aussage über den relativen Zustand, nur Dringlichkeitsbewertung
Bedarfsleiste: <ul style="list-style-type: none"> ▪ einzelne Schäden (nicht 4er-Schäden), die die Zustandsbewertung beeinflussen, können bewertet/eingeschätzt werden ▪ Abschätzung Instandhaltungsbedarf 	Bedarfsleiste: <ul style="list-style-type: none"> ▪ subjektiver, grob abschätzbarer Bedarf ▪ Wirkliches Ausmaß wird oft erst bei der Instandsetzung erkannt
Kraft: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schadenszonen, Schweregrad, 	Kraft: <ul style="list-style-type: none"> ▪ subjektiver, grob abschätzbarer Bedarf

<p>Ausbreitungstendenz, Auswirkung auf andere Bauteile und Verkehr werden als Faktoren berücksichtigt</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewichtung der Faktoren möglich ▪ Trendprognose möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vergleichbarkeit schwierig ▪ viele einzelne Faktoren, aufwendige Handhabung und dadurch subjektive Ergebnisse
<p>TH Darmstadt:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung der Transparenz durch Vernachlässigung der 1er-Schäden, was kritischere Ergebnisse zufolge hat ▪ Vergleichbarkeit durch Normierung 	<p>TH Darmstadt:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Normierung ungenau, nicht bei allen Kategorien möglich ▪ keine Berücksichtigung des Schadensumfangs und Schadensmenge ▪ keine Gewichtung

Tab. 5.6: Vor- und Nachteile Verfahren nach Bedarfsleiste / Kraft / TH Darmstadt

5.1.4 BAST 1997 und 1999

Das Verfahren der RI-EBW-PRÜF von 1988 [301] dient einer einheitlichen Erfassung von Brückenbauwerken, bei dem Einzelschäden detailliert erfasst und zusammengetragen werden. Im Zuge eines Forschungsprojekts der BAST sollte dieses Verfahren erweitert und eine detaillierte Schadenserfassung sowie Zustandsbewertung erarbeitet werden. Dabei bleiben die Bauteilkategorien aus 5.1.3 bestehen. Diese einzelnen Kategorien sollen aus der Bewertung der Einzelschäden abgeleitet und anschließend zu Zustandsbewertung der gesamten Brücke führen (siehe Abb. 5.5). Da bereits zwei Jahre später dieses Verfahren vom heute bekannten BAST-Bewertungsalgorithmus abgelöst wird und es sich bei der Berechnung um zahlreiche komplexe Rechenschritte handelt, ist eine Kurzzusammenfassung sowie die Nachbildung im Tabellenkalkulationsprogramm Excel in Anhang 9.3.4 zu finden. [156]

Die Nachbildung dieses Verfahrens zeigt, dass durch die diversen Definitionen und Zwischenwerte eine differenzierte Bewertung möglich ist. Auch die Auswahl der eher allgemein gehaltenen Faktoren wie ‚Bedeutung des Bauteils‘ und ‚Bedeutung der Bauteilkategorie‘ erlauben eine Übertragung auf andere ingenieurtechnische Bauteile. Es zeigt sich außerdem, dass das Erzeugen einer Gesamtnote für das Bauwerk die Zwischenergebnisse der einzelnen Bauteilkategorien verloren gehen.

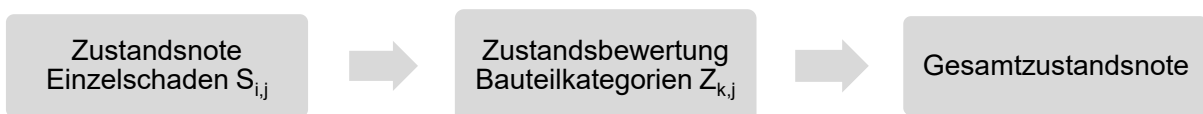


Abb. 5.5: Zustandsbewertung nach BAST 1997

Diese wären jedoch programmintern vorhanden. Die Faktoren f_1 bis f_3 , welche nicht verwechselt werden dürfen mit denen aus 5.1.3, variieren zwar die erste Dezimalstelle, jedoch wird dieser Zahlenbereich nicht vollständig ausgeschöpft, was an den vielen Abhängigkeiten der Faktoren untereinander liegt. Eine Dringlichkeitsreihung gibt es in diesem Verfahren nicht direkt. Jedoch können die Gesamtnoten bereits Aussage über das Bauwerk und gleichzeitig auf die Dringlichkeit einer Sanierung hinweisen.

Bewertungsalgorithmus

Die vergleichenden Berechnungen und Nachbildungen der zuletzt vier verschiedenen Verfahren zeigen, dass die Dringlichkeitsreihung in 98 % der Fälle mit der schlichten Endnotenverteilung korrelieren. Eine Aussage über die Schadensentwicklung oder die Entwicklung einzelner Bauteile kann hier nicht gemacht werden, da Zwischenergebnisse nur systemintern vorhanden sind und lediglich die Endnote offen erscheint.

BASt 1997	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ detaillierte Schadenserfassung und Zustandsbewertung▪ Kostenprognose möglich▪ Verknüpfung mit Software möglich▪ Berücksichtigung von Schadensumfang, Bedeutung der Bauteile und der Bauteilkategorien▪ auf alle Ingenieurbauwerke anwendbar▪ Bewertung der einzelnen Zustände der Bauteilkategorien und Bewertung des Gesamtzustandes▪ Automatisierung des Verfahrens▪ weniger Aufwand für Prüfer▪ umsetzbar, da es auf mathematischem Bewertungsschlüssel basiert	<ul style="list-style-type: none">▪ Einzelzustände und Zustände der Bauteilkategorien nur programmintern▪ durch Aggregieren zu einer Note können Zwischeninformationen verloren gehen▪ zum Teil subjektiv (z.B. Abschätzung des Schadensumfangs)▪ keine Einstufung der Dringlichkeit▪ Bereiche zwischen den ganzzahligen Noten werden nicht richtig ausgeschöpft

Tab. 5.7: Vor- und Nachteile Verfahren nach BASt 1997

Bereits zwei Jahren später wird im Jahr 1999 das auch heute noch in Deutschland verpflichtend angewandte Bewertungsverfahren ebenfalls durch die BASt entwickelt. Das Verfahren unterscheidet sich grundlegend in den mathematischen Grundlagen zu dem von 1997 und den zuvor hier dargestellten Verfahren (siehe Abb. 5.6). Die Komplexität von 1997 als auch der Verfahren der TH Darmstadt wird durch simple und nachvollziehbare Rechenwege und objektive Bewertungshilfen ersetzt. Eine grundlegende Neuerung ist jetzt der sehr ausführliche Schadenskatalog [300], in dem jegliche Schäden an Ingenieurbauten verzeichnet sind, welcher als Grundlage für die Prüferingenieure dienen soll. Dieser sorgt wiederum ebenfalls für die Vereinfachung der Berechnung der Bauwerksbewertung. Auch ein Bewertungsschlüssel sorgt für eine einheitliche Vergabe der Noten für jeden Einzelschaden (siehe Anhang Abb. 9.1). Entsprechend der RI-EBW-PRÜF [303] wird für jeden Schaden die Bedeutung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit für das Bauwerk bewertet. Der entwickelte Algorithmus ist die Grundlage für die verpflichtend anzuwendende Software SIB-Bauwerke [387] (siehe Abb. 5.6). Eine ausführliche Beschreibung des Bewertungsverfahrens von 1999, welches bis heute angewandt wird, ist bereits in Kapitel 2.1.1 erfolgt und wird hier nicht wiederholt. [154][379]



Abb. 5.6: Zustandsbewertung nach BASt 1999

Auf eine explizite Nachbildung des Verfahrens im Tabellenkalkulationsprogramm Excel wird verzichtet, da dies für die Kapitel 5.1.1 bis 5.1.3 durchgeführten vergleichenden Nachbildungen die Voraussetzung darstellt. In Kapitel 2.1.1 sind die einzelnen Rechenschritte dieses Bewertungsverfahrens beschrieben und werden hier nicht wiederholt. Bei diesem Verfahren ist besonders auffällig, dass nicht mehr nur für das Gesamtbauwerk eine Bewertung erstellt wird, sondern für jeden Einzelschaden wie auch für jede Bauteilgruppe. Auch fällt die aus den vorherigen Verfahren großen Subjektivität weg, da es ausführliche Vorgaben für jeden Einzelschaden durch den Schadenskatalog sowie den Bewertungsschlüssel existieren. Lediglich der Umfang eines Schadens sowie manche Bewertungen für S, V oder D werden subjektiv vom Prüfer festgelegt. Endnotenwerte sind nach RI-EBW-PRÜF [303] genau definiert (siehe Tab. 9.1) und können daher ebenso zu einer Dringlichkeitsbetrachtung für die Instandhaltungsplanung der Baulastträger herangezogen werden. Alle Vor- und Nachteile dieses Berechnungsverfahrens sind in Tab. 5.8 zusammengefasst.

BASt 1999 bzw. heute	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ detaillierte Einzelschadensbewertung (S, V, D) ▪ simple Notenberechnung ▪ Berücksichtigung der Bauteilkategorien ▪ Grobe Berücksichtigung Schadensumfang ▪ detaillierte Definitionen (Schaden, Note etc.) ▪ detaillierter Schadenskatalog ▪ Festlegung von Schwellwerten ▪ Bewertungsschlüssel ▪ Bewertung Einzelzustand, Bauteilkategorien, Gesamtzustand ▪ Erweiterung um weitere Faktoren denkbar/möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einzelzustände und Zustände der Bauteilkategorien nur programmintern ▪ zum Teil subjektiv (z.B. Abschätzung des Schadensumfangs) ▪ aufwendige Handhabung des langen Schadenskatalogs ▪ Endnote immer abhängig vom schlechtesten Schaden einer Kategorie

Tab. 5.8: Vor- und Nachteile Verfahren nach BASt 1999 bzw. heute

Das Eisenbahnbundesamt hat mit einer Forschungsarbeit ebenfalls versucht, das hier beschriebene Verfahren auf Bahnbrücken anzuwenden. Diese Modifikation ist durchaus möglich, da der Algorithmus sehr gut für Brücken ausgelegt ist. Lediglich einige Bauteile müssen anderen Bauteilkategorien zugeordnet werden. [364]

5.2 Internationale Bewertungsverfahren

5.2.1 United States of America

Die Richtlinie ‚National Bridge Inspection Standards‘ (NBIS) definiert und aktualisiert seit 1971 Anforderungen an die Häufigkeit von Brückeninspektionen, die eingesetzten Verfahren, die Personalqualifikation sowie die Form der Ergebnisberichte [247]. Auf NBIS bauen drei weitere Handbücher auf: Das ‚Ausbildungshandbuch 70‘ [29] bzw. das neuere ‚Bridge Inspector’s Training Manual‘ [30] der Federal Highway Administration (FHWA) für die Ausbildung von Brückeninspektoren und die Brückenbewertung, das ‚Handbuch der American Association of State Highway Officials‘ (AASHO/AASHTO) [346], das Zustandsbewertungsverfahren festlegt, sowie ein drittes Handbuch, welches alle Informationen zur einheitlichen Codierung und Bewertung von nationalen Brücken beinhaltet (‚Recording and Coding Guide‘) [295]. Das ‚Recording and Coding Guide‘ [295] gibt Informationen zur Bewertung der Bauwerke an. Die eingesetzten und mehrstelligen Codes haben je nach Parameter unterschiedliche Zifferanzahlen und jeder Staat kann sein Kodierungsschema für die Brückenbewertung selbst wählen, solange dieses dem Format des ‚Recording and Coding Guides‘ entspricht [295]. Die Zustandsbewertungen werden vor Ort vom Prüfpersonal beschrieben und codiert [295]. Das sogenannte BIRM (‚Bridge Inspector’s Reference Manual‘) ist seit 2000 für die Aktualisierung der genannten Handbücher verantwortlich, sodass alle Veränderungen über die Jahre nachvollziehbar sind. Obwohl technologische Fortschritte zu einer Verbesserung der Bausubstanz führen, ist es essentiell, den Brückenbestand einheitlich und ordnungsgemäß zu bewerten. Die einzelnen Staaten sammeln ihre Strukturinventar- und Bewertungsdaten im ‚National Bridge Inventory‘ (NBI) [246], damit die Anforderungen der NBIS an die Brückeninspektion erfüllt werden [247]. [9][23][379]

Das amerikanische Brückenmanagementsystem beruht auf den unterschiedlichen Bewertungsgegenständen, dem sogenannten Inventar. Das System soll die Brücken detailliert warten, klassifizieren und bewerten. Die Bewertung ist in Form eines zusammenfassenden Datenblatts (‚Datenblatt Strukturinventar‘ dargestellt (siehe Anhang Abb. 9.20), welches jede Komponente tabellarisch beinhaltet. Zu den Strukturdaten zählen u.a. der Identifikationscode, Materialien, Alter, geometrische Daten, Tragfähigkeiten sowie Inspektionsinformationen. Da Identifikations- und Klassifizierungsdaten nicht auf die Bauwerksbewertung in anderen Ländern übertragbar ist, werden im Folgenden lediglich die Zustandsbewertungen des Brückenbestandes berücksichtigt. [123][295]

Das amerikanische Verfahren unterscheidet sich deutlich zu dem heute in Deutschland angewandten Verfahren, da nicht jedes Bauteil einzeln betrachtet und bewertet wird, sondern die Bauteilkategorie bzw. -komponente eine vom Prüfer subjektiv bestimmte Note erhält. Die drei Hauptkomponenten Fahrbahn (Item Nr. 58), Überbau (Item Nr. 59) und Unterbau (Item Nr. 60) erhalten jeweils eine separate Bewertung, sogenannte ‚Condition Codes‘, durch den Prüfer. Der Einfluss eines Einzelschadens auf die Bewertung einer Hauptkomponente bzw. des Gesamtbauwerks variiert zwischen den unterschiedlichen Bundesstaaten. Entweder bestimmt der schlechteste Einzelschaden die gesamte Hauptkomponente wie in Deutschland nach dem

heutigen BAST-Algorithmus (siehe 2.1.1), oder es wird ein Durchschnitt aller subjektiv bewerteten Einzelschäden für die Bewertung der Hauptkomponenten erzeugt. [9][23][295]

Das Bewertungsverfahren aus dem ‚Recording and Coding Guide‘ basiert auf vier Faktoren, welche die Endbewertung S erzeugen ((Gl. 50) und Abb. 5.7). Üblicherweise findet diese Suffizienzberechnung programm-, bzw. softwareintern statt und erzeugt einen prozentualen Wert, welcher Aussagen über die Tragfähigkeit der Brücke macht. Ein Ergebnis von 100% entspricht dabei einem sehr guten Zustand. Weicht ein Ergebnis mehr als 20% von diesem Bestzustand ab, muss das Brückenbauwerk instandgesetzt werden. Ab einem Ergebnis von 50% müssen die entsprechenden Bauteile ausgetauscht und dürfen nicht mehr instandgesetzt werden. Einige Bundesstaaten nutzen dieses prozentuale Endergebnis für eine Prioritätenreihung von Instandsetzungsmaßnahmen. [295][379]

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \tag{Gl. 50}$$

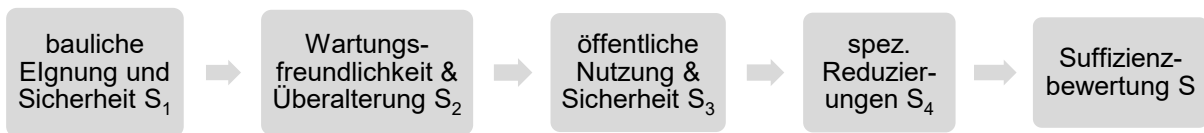


Abb. 5.7: Zustands- bzw. Suffizienzbewertung USA

Dabei entspricht der Faktor S_1 (Gl. 51) der baulichen Eignung und Sicherheit des Brückenbauwerks. Er darf 55 % nicht überschreiten und ist abhängig von den Faktoren $A(S_1)$ und $B(S_1)$ (Gl. 52). Für den Faktor $A(S_1)$ ist die niedrigste Bewertung aus Überbau (Item 59), Unterbau (Item 60) und den Abzugskanälen (Item 62) maßgebend (siehe Tab. 5.9). Diese können zwischen null und neun bewertet werden, wobei 0 einem schadensfreien Bauteil und 9 einem maximal geschädigten Bauteil entspricht (siehe Anhang Tab. 9.26). [295][310]

$$S_1 = 55 - (A(S_1) + B(S_1)) \quad \text{mit } 0 \% \leq S_1 \leq 55 \% \tag{Gl. 51}$$

Überbau (59) bzw. Unterbau (60)	$A(S_1)$	Abzugskanal (62)	$A(S_1)$
≤ 2	55 %	≤ 2	55 %
= 3	40 %	= 3	40 %
= 4	25 %	= 4	25 %
= 5	10 %	= 5	10 %

Tab. 5.9: Faktor $A(S_1)$ [295]

Die reduzierte Tragfähigkeit $B(S_1)$ kann entsprechend Abb. 9.21 im Anhang mit IR (= Bewertung des Bestands in Tonnen (Item 66)) in Prozent abgelesen oder nach folgender Gleichung (Gl. 52) errechnet werden. [295]

$$B(S_1) = (32,4 - IR)^{1,5} \cdot 0,3254 \tag{Gl. 52}$$

Bewertungsalgorithmus

S_2 (Gl. 53) steht für die Wartungsfreundlichkeit und funktionale Überalterung der betrachteten Brücke und ist abhängig von den Faktoren J (Reduzierung einzelner Komponenten), G und H (Einfluss der Breite der befahrenen Straße) sowie I (Einfluss des vertikalen Lichtraumprofils). [295]

$$S_2 = 30 - [J + (G + H) + I] \quad \text{mit } 0 \% \leq S_2 \leq 30 \% \quad (\text{Gl. 53})$$

mit

$$J = A(S_2) + B(S_2) + C(S_2) + D(S_2) + E(S_2) + F(S_2) \quad (\text{Gl. 54})$$

J (Gl. 54) ist dabei die Reduzierung der Bewertungen einzelner Komponenten. Hier werden die Komponenten Fahrbahnbeschaffenheit (Item 58), Struktur- oder Baubewertung (Item 67), Fahrbahngeometrie (Item 68), Lichtraumprofil (Item 69), Eignung einer Wasserstraße (Item 71) sowie der Zugang zur Straßenführung (Item 72) berücksichtigt (siehe Tab. 5.10). Die Beschreibung für die Fahrbahnbeschaffenheit ist in Anhang, Tab. 9.26 dargestellt. Die weiteren Parameter werden nach Tab. 9.27 im Anhang definiert. [295]

Fahrbahn (58)	$A(S_2)$	Strukturbewertung (67)	$B(S_2)$
≤ 3	5 %	≤ 2	4 %
= 4	3 %	= 3	2 %
= 5	1 %	= 4	1 %
Fahrbahngeometrie (68)	$C(S_2)$	Lichtraumprofil (69)	$D(S_2)$
≤ 3	4 %	≤ 2	4 %
= 4	2 %	= 3	2 %
= 5	1 %	= 4	1 %
Eignung Wasserweg (71)	$E(S_2)$	Zugang Straßenführung (72)	$F(S_2)$
≤ 3	4 %	≤ 2	4 %
= 4	2 %	= 3	2 %
= 5	1 %	= 4	1 %

Tab. 5.10: Faktoren $A(S_2)$, $B(S_2)$, $C(S_2)$, $D(S_2)$, $E(S_2)$, $F(S_2)$ [295]

Die Bestimmung von G und H ist wiederum abhängig von X (durchschnittlicher täglicher Verkehr pro Fahrspur) und Y (Breite pro Fahrspur), die von vielen weiteren Faktoren und Itemcodierungen beeinflusst sind, weswegen die zusammenfassende Ermittlung dieser Werte Anhang 9.3.5 zu entnehmen ist. Die Werte für H variieren dabei zwischen 0 und ca. 15 %, während G in den meisten Fällen gleich 5 % ist.

Der Einfluss des vertikalen Lichtraumprofils I ist abhängig von Item 100 (Straßenbezeichnung nach STRAHNET-Strategic Highway Network, siehe Tab. 5.11) und Item 53 (minimales Lichtraumprofil der Brücke, siehe Tab. 5.12) und lässt sich entsprechend der folgenden Bedingungen bestimmen:

- Nr. 100 > 0 und Nr. 53 ≥ 4,87* → $I(S_2) = 0 \%$
Nr. 100 > 0 und Nr. 53 < 4,87 → $I(S_2) = 2 \%$
Nr. 100 = 0 und Nr 53 ≥ 4,26 → $I(S_2) = 0 \%$
Nr. 100 = 0 und Nr 53 < 4,26 → $I(S_2) = 2 \%$

Code	Beschreibung Lichtraumprofil
0	keine S TRAHNET-Route
1	verläuft auf einer zwischenstaatlichen STRAHNET Route
2	verläuft auf einer nicht zwischenstaatlichen STRAHNET Route
3	befindet sich auf einer STRAHNET Verbindungsroute

Tab. 5.11: Beschreibung für Item 100 [295]

Code	Beschreibung Lichtraumprofil
9999	keine Einschränkungen
0525	5,25 m
2300	23,00 m

Tab. 5.12: Beispiele für Codierung von Item 53 (Addition der Breiten) [295]

Die Relevanz für die öffentliche (Verkehrs-) Sicherheit beschreibt Faktor S_3 (Gl. 55) und ist abhängig von Item 29 (durchschnittlicher täglicher Verkehr, siehe Tab. 5.13) und Item 19 (Länge Umleitung, siehe Tab. 9.28) sowie einem weiteren Faktor K (Gl. 57), welcher die Straßenbezeichnungen nach STRAHNET berücksichtigt.

Code	Täglicher Verkehr
000540	540
015600	15.600
024000	24.000

Tab. 5.13: Beispiele für Codierung von Item 29 [295]

$$S_3 = 15 - (A(S_3) + B(S_3)) \quad \text{mit } 0 \% \leq S_3 \leq 15 \% \quad (\text{Gl. 55})$$

mit

$$A(S_3) = 15 \cdot \left[\frac{\text{Item 29} \cdot \text{Item 19}}{320.000 \cdot K} \right] \quad \text{mit } 0 \% \leq K \leq 15 \% \quad (\text{Gl. 56})$$

$$K = \frac{S_1 + S_2}{85} \quad (\text{Gl. 57})$$

Bewertungsalgorithmus

$B(S_3)$ ist abhängig von Item 100 (siehe Tab. 5.11) und lässt sich entsprechend der folgenden Bedingungen bestimmen:

$$\text{Nr. 100} > 0 \quad \rightarrow B(S_3) = 2 \%$$

$$\text{Nr. 100} = 0 \quad \rightarrow B(S_3) = 0 \%$$

Der letzte Faktor S_4 soll spezielle Reduzierungen beschreiben und setzt sich erneut aus drei einzelnen Komponenten zusammen (Gl. 58), welche sich entsprechend nachfolgender Gleichung (Gl. 59) und Bedingungen bestimmen lassen. Dafür notwendig ist außerdem die Bestimmung von Item 36, was die Verkehrssicherheit von Sicherheitseinrichtungen wie Geländer oder Leitplanken beschreibt und in Tab. 5.14 definiert ist.

$$S_4 = A(S_4) + B(S_4) + C(S_4) \quad \text{mit } 0 \% \leq S_4 \leq 13 \% \quad (\text{Gl. 58})$$

mit

$$A(S_4) = \text{Item } 19^4 \cdot 7,9 \cdot 10^{-9} \quad (\text{Gl. 59})$$

$$\text{Ziffer 2 und 3 von Item 43} = 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17 \quad \rightarrow B(S_4) = 5 \%$$

$$\text{Ziffer 2 von Item 36} = 0 \quad \rightarrow C(S_4) = 1 \%$$

$$\text{Ziffer 3 von Item 36} = 0 \quad \rightarrow C(S_4) = 2 \%$$

$$\text{Ziffer 4 von Item 36} = 0 \quad \rightarrow C(S_4) = 3 \%$$

Code	Beschreibung
0	Die geprüfte Funktion entspricht nicht den derzeit akzeptablen Standards, oder es ist eine Sicherheitsfunktion erforderlich, und es wird keine bereitgestellt.
1	Die geprüfte Funktion entspricht den derzeit akzeptablen Standards.
N	Nicht zutreffend oder eine Sicherheitsfunktion ist nicht erforderlich.

Tab. 5.14: Beschreibung für Codierung von Item 36 [295]

Für die Nachbildung dieses Verfahrens im Tabellenkalkulationsprogramm Excel ist es notwendig, die Brückenelemente entsprechend des ‚Recording and Coding Guides‘ zu übertragen und zu codieren. Genauso verhält es sich mit allen weiteren Parametern wie täglicher Verkehr oder Zustand der Sicherungseinrichtungen. Die zuvor beschriebene Codierung variiert je Element zwischen einer und 26 Ziffern. Nicht alle Items können auf die hier untersuchten Brücken angewandt werden, da beispielsweise auch der Bundesstaat, in dem die Brücke steht, Teil der Codierung ist. Alle Codierungen von Items, welche hier nicht explizit beschrieben sind, können [295] entnommen werden. Um den Faktor S_1 auf die untersuchten Brücken anwenden zu können, werden die Schadensbewertungen aus den vorhandenen Prüfberichten von Überbau (= Item 59), Unterbau (=Item 60) und Fahrbahnplatte (= Item 58) in Anlehnung an Tab. 9.27 auf die amerikanische Codierung übertragen (siehe Tab. 5.15).

Z _i (BASt)	Code	Beschreibung
-	N	nicht zutreffend
1,0	9	hervorragender Zustand
1,1 – 1,5	8	sehr guter Zustand
1,6 – 2,0	7	guter Zustand
2,1 – 2,5	6	zufriedenstellender Zustand
2,6 – 3,0	5	annehmbarer Zustand
3,1 – 3,2	4	schlechter Zustand
3,3 – 3,4	3	ernster Zustand
3,5 – 3,6	2	kritischer Zustand
3,7 – 3,9	1	unmittelbar vor Ausfall
4,0	0	Ausfall

Tab. 5.15: Festlegungen für S₁ bzw. Item 58, 59 und 60 [295]

Für S₂, die Wartungsfreundlichkeit, wird ein täglicher Verkehr für die hier betrachteten Landkreis- und Kanalbrücken mittlerer Spannweite von 6.000 Fahrzeugen gewählt. Außerdem wird für die Items 1, 57, 68, 69, 70, und 72 (Fahrbahngegebenheiten, Strukturauswertung, Fahrbahngeometrie, Lichtraumprofil, Eignung einer Wasserstraße und Zugang zur Straßenführung) eine Analogie zu den BASt-Bewertungen definiert (siehe Tab. 5.16), welche sich erneut auf Tab. 9.27 im Anhang stützt.

Z _i (BASt)	Code	Beschreibung
-	N	nicht zutreffend
1,0	9	entspricht genau den wünschenswerten Kriterien
1,1 – 1,5	8	entspricht größtenteils den wünschenswerten Kriterien
1,6 – 2,0	7	besser als die derzeitigen Mindestkriterien
2,1 – 2,5	6	entspricht den vorliegenden Mindestkriterien
2,6 – 3,0	5	etwas besser als die tolerierbaren Mindestkriterien
3,1 – 3,2	4	tolerierbare Mindestkriterien werden gerade noch erfüllt
3,3 – 3,4	3	untragbar, Korrekturmaßnahmen erforderlich
3,5 – 3,6	2	untragbar, Austausch-/Neubaumaßnahmen erforderlich
3,7 – 3,9	1	dieser Wert wird nicht verwendet
4,0	0	Brücke geschlossen

Tab. 5.16: Festlegungen für S₂ bzw. Item 1, 57, 68, 69, 70, und 72 [295]

Bewertungsalgorithmus

Für S_3 wird eine notwendige Umleitungslänge (Item 19) von 18 km angenommen (siehe Tab. 9.28) und es wird festgelegt, dass sich die hier betrachteten Bauwerke stets auf einer zwischenstaatlichen STRANET-Route befinden (Item 100, siehe Tab. 5.11). In Tab. 9.33 im Anhang ist tabellarisch das Ergebnis der Nachrechnung der hier untersuchten Brücken im Vergleich zum BAST-Algorithmus dargestellt. Dort zeigt sich, dass die Prioritätenreihung aus Amerika zu den Zustandsnoten der BAST-Bewertungen passt. Ein tieferer Vergleich ist jedoch kaum möglich, da das amerikanische Verfahren von höchster Komplexität ist durch seine Vielzahl von Parametern bzw. Items, welche nicht auf das BAST-Verfahren übertragen werden können. Bei dem amerikanischen Verfahren werden zudem nicht nur der Bauwerkszustand in Form einer Gesamtnote bewertet, sondern viele Einflussfaktoren wie das Verkehrsaufkommen, die Straßenart, Umwelt- und Umgebungsfaktoren oder die Lage innerhalb der Staaten werden berücksichtigt.

Durch das sehr aufwendige und kleinmaschige Verfahren ist eine direkte Maßnahmenableitung für Instandsetzungen gut möglich. Da Faktoren wie das Verkehrsaufkommen berücksichtigt werden, schafft dieses Bewertungsverfahren, die wichtigen Bauwerke bei der Instandsetzung zu priorisieren. Dahingegen scheint der Einfluss von Einzelschäden sehr gering zu sein. Es wird sich auf eine so große Vielzahl von Faktoren konzentriert, dass die eigentlichen Bauwerksschäden nebensächlich erscheinen. Der Einfluss der Schäden geht als Mittelwert in die weitere Berechnung, was immer ein ‚Verschmieren‘ der einzelnen Problemstellen darstellt. Aus Deutschland bekannte Einflüsse wie der Schadensumfang oder die am meisten geschädigte Bauteilkategorie werden hier nicht berücksichtigt. Auch ist das Verfahren sehr aufwendig und kaum nachvollziehbar für den Prüfer. Dieser hat mit den komplizierten Codierungen der unzähligen Items einen sehr großen Eingabe- und Verwaltungsaufwand. Durch das Endergebnis in Prozent kann es durchaus vorkommen, dass Bauwerke mit der gleichen Bewertung absolut unterschiedliche Schadensbilder aufweisen. Das Verfahren legt eindeutig weniger Priorität auf eine reine Schadens- bzw. Bauwerksbewertung als viel mehr auf eine Dringlichkeitsbetrachtung für Instandsetzungsplanungen. Tab. 5.17 fasst noch einmal alle Vor- und Nachteile des amerikanischen Bewertungsverfahrens zusammen.

USA	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">▪ Prioritäts- bzw. Dringlichkeitsbewertung durch Vergleich mit anderen Bauwerken▪ eindeutige Bewertung durch Subtraktionsverfahren▪ Verknüpfung mit Software▪ direkte Maßnahmenableitung für Bauteilkategorien	<ul style="list-style-type: none">▪ sehr kompliziertes und aufwendiges Verfahren▪ subjektive Bewertung▪ keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung▪ Fokus auf Instandsetzungsmaßnahmen▪ ausschließlich Anwendung für Brücken▪ nur Angabe einer Prozentzahl, was keine weitere Aussage über die Schäden am Bauwerk aussagt▪ zwei Bauwerke mit dem gleichen Ergebnis können dennoch stark unterschiedlichen Zustand aufweisen

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Bewertung von Einzelschäden, nur Kategorien insgesamt ▪ keine Gesamtzustandsnote ▪ keine Berücksichtigung von Schadensumfang oder -menge
--	--

Tab. 5.17: Vor- und Nachteile Verfahren Amerika

5.2.2 Japan

Während des großen Wirtschaftswachstums in den 70er Jahren ist das japanische Straßennetz intensiv ausgebaut worden, sodass circa 700.000 Brückenbauwerke unter die Verantwortlichkeit des Ministeriums für Land, Infrastruktur und Tourismus (MLIT) fallen. Der Anteil der Brücken, welche älter sind als 50 Jahre, soll in den nächsten zehn Jahren knapp 50 % ausmachen. [171][337]

In Japan wurde 1988 vom ‚Public Works Research Institute‘ (PWRI) ein Modell für ein Managementsystem als auch ein Bewertungssystem für den Brückenerhalt entwickelt, welches auf einer rein visuellen und damit subjektiven Einschätzung des Prüfpersonals beruhte und anschließend vom MLIT weiterentwickelt wurde. Bei der Zustandsbewertung soll die Gebrauchstauglichkeit der Brücken untersucht werden, welche durch steigenden Verkehr und Alterungsprozessen der Konstruktion von essentieller Bedeutung ist. Dies wird im ‚Bridge Inspection Manual‘ aus dem Jahr 1988 (MOC88) und dem ‚Periodic Bridge Inspection Manual‘ (MLIT14) aus dem Jahr 2014, beide herausgegeben vom MLIT, geregelt. Außerdem sind seit 2013 alle Straßenverwaltungen zu einer Brückeninspektion verpflichtet, um die Gebrauchstauglichkeit zu erhalten. [158][239][254][337]

Die Datenerfassung für eine Brückeninspektion findet in der Software ‚Bridge Rating Expert System‘ (BREX) statt, welches die allgemeinen Brückendaten sowie die Inspektionsdaten archiviert. Bei der Inspektion wird jeder Einzelschaden d_i nach Art und dem Schweregrad seiner Verschlechterung bewertet. Dies Einzelschäden bestimmen anschließend die Bewertung einer Bauteilgruppe. Eine Übersicht, in welche Bauteilgruppen neben dem Über- und Unterbau die Brücke eingeteilt wird, ist im Anhang Tab. 9.34 zu finden. Die Bewertung des Gesamtzustands ermittelt sich anschließend durch Zusammenfassen der jeweils schwersten Schäden in den einzelnen Bauteilgruppen. Dies ähnelt dem deutschen Verfahren der BAST bzw. RI-EBW-PRÜF. Insgesamt gibt es fünf Schadensklassen für die Einzelschäden, wobei Schadensklasse I die schlechteste und Schadensklasse V die beste ohne Bauteilschäden ist, welche mit „OK“ bezeichnet wird (siehe Tab. 5.18). [278][379]

Schadens- klasse	Beschreibung	α
I	ernsthafter Schaden: Es besteht die Möglichkeit einer Beeinträchtigung und Gefährdung des Verkehrs	1
II	große Schäden: Untersuchungen/Brückenprüfungen erforderlich	0,5
III	Schaden. Nachuntersuchungen erforderlich	0,2
IV	leichter Schaden: Inspektionsdaten müssen aufgezeichnet werden.	0,05
OK	kein Schaden	0

Tab. 5.18: Schadensbewertung Verfahren Japan [278]

Der Prüfer hat, ausgehend vom schadensfreien Zustand, was Schadensklasse V bzw. „OK“ entspricht, subjektiv den Bauteilzustand festzulegen. Dabei wird mittels Multiplikation fester α -Werte der schadensfreie Zustand „OK“ ($d_I = 100\%$) abgemindert (siehe Tab. 5.18 und (Gl. 60) - (Gl. 64)).

$$D_I = d_I \cdot 1 \quad (\text{Gl. 60})$$

$$D_{II} = d_{II} \cdot \alpha \quad (\text{Gl. 61})$$

$$D_{III} = d_{III} \cdot \alpha \quad (\text{Gl. 62})$$

$$D_{IV} = d_{IV} \cdot \alpha \quad (\text{Gl. 63})$$

$$D_{OK} = 0 \quad (\text{Gl. 64})$$

Die Gesamtbewertung p wird durch die ‚Subtracting Point Method‘ bestimmt. Dabei ergibt sich durch Subtraktion der maximalen Schäden je Bauteilgruppe die Endnote (Beispiel siehe Anhang Tab. 9.35). Alle vorhandenen Schäden werden von der bestmöglichen Bewertung $d_I = 100\%$ abgezogen. Die Bedeutung des Endergebnisses für die Stand- und Gebrauchstauglichkeit der Brücke ist abschließend nach Tab. 5.19 definiert.

Endergebnis	Beschreibung
$0 \leq p < 12,5$	unsicher
$12,5 \leq p < 37,5$	schwerwiegend
$37,5 \leq p < 62,5$	mäßig
$62,5 \leq p < 87,5$	gering
$87,5 \leq p < 100$	sicher

Tab. 5.19: Bedeutung Ergebnis Verfahren Japan [278]

Eine Nachbildung dieses Verfahrens im Tabellenkalkulationsprogramm Excel ist aufgrund des rein visuellen und subjektiven Verfahrens nicht möglich. Es gibt an dieser Stelle keine Anhaltspunkte wie einen Schadenskatalog o.ä., um dieses auf vorliegende Brücken übertragen zu

können. Das Verfahren erlaubt dadurch nahezu keine Objektivität oder Vergleichbarkeit zwischen von verschiedenen Prüfern inspezierte Bauwerke. Weitere Faktoren, um einen Einzelschaden zu klassifizieren, wie beispielsweise der Schadensumfang, werden ebenfalls nur subjektiv in die Bewertung eines Einzelschadens einbezogen und ist anschließend nicht mehr objektiv nachvollziehbar oder ablesbar. Von Vorteil ist die Subtraktionsmethode, bei der der abgeschätzte Zustand der einzelnen Bauteilkategorien ersichtlich wird. Mit Hilfe des prozentualen Endergebnisses kann eine Art Prioritätenreihung für Instandsetzungsplanungen vorgenommen werden. Auch kann dieses Endergebnis wie eine grobe Prognose über die Restlebensdauer der Brücke gedeutet werden. Durch die Erzeugung der Endnote durch Aggregieren der jeweils schlechtesten Einzelschäden je Bauteilkategorie, liegt jeweils der Extremfall bei der bewerteten Endnote des Bauwerks vor. In Tab. 5.20 sind alle Vor- und Nachteile des Verfahrens aus Japan noch einmal zusammengestellt. [278][337]

Japan	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prioritäts- bzw. Dringlichkeitsbewertung durch Vergleich mit anderen Bauwerken ▪ eindeutige Bewertung durch Subtraktionsverfahren ▪ Verknüpfung mit Software ▪ Direkte Maßnahmenableitung für Bauteilkategorien ▪ auf der sicheren Seite liegende Endnote, da nur der schlechteste Einzelschaden in weitere Berechnung eingeht ▪ gewichtete Abzüge für Schäden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ subjektive Bewertung ▪ keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ▪ keine Prognose und Trendentwicklung ▪ ausschließlich Anwendung für Brücken ▪ nur Angabe einer Prozentzahl, was keine weitere Aussage über die Schäden am Bauwerk aussagt ▪ zwei Bauwerke mit dem gleichen Ergebnis können dennoch stark unterschiedlichen Zustand aufweisen ▪ keine Bewertung von Einzelschäden, nur Kategorien insgesamt ▪ keine Berücksichtigung von Schadensumfang oder -menge

Tab. 5.20: Vor- und Nachteile Verfahren Japan

5.2.3 Fazit der bestehenden Bewertungsverfahren

Zusammenfassend sollen die nationalen sowie internationalen Bewertungsverfahren für Brücken verglichen werden, um die essentiellen Punkte, welche für den hier zu erzeugenden Algorithmus von Bedeutung sind, herauszustellen.

Allen Verfahren geht das Wissen über die Wichtigkeit einer regelmäßigen und weitestgehend einheitlichen Bewertung voraus. Sie beruhen alle auf einem Endergebnis entweder in Form von diskreten Zahlenwerten bzw. Noten oder prozentualen Ergebniswerten. Alle fokussieren sich grundlegend auf einzelne am Bauwerk vorhandene Schäden, Bauteile oder Bauteilkategorien sowie das gesamte Bauwerk. Außerdem fällt der Grad der Subjektivität bei allen Verfahren auf. Die Bewertung der Schäden bzw. den Bauteilzustand können nur nach zunächst subjektiven Einschätzungen erfolgen. Das Prüfpersonal muss zum Teil eigenverantwortlich Bewertungen für Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit oder auch der zukünftigen Entwicklung einzelner Bauteile abschätzen. Abgesehen vom heutigen BAST-Verfahren mit

dem sehr ausführlichen Schadenskatalog [300] erhält der Prüfer dazu wenig bis keine objektive Entscheidungshilfe. Die Endergebnisse der diversen Bewertungsverfahren sollen vorrangig den Baulastträgern und Verantwortlichen als Entscheidungshilfe bzw. Prioritätenreihung für Sanierungsreihenfolgen dienen. Besonders in den USA wird die wirtschaftliche Bedeutung der Brückenprüfung klar.

Beim Vergleich der nationalen Bewertungsverfahren fällt auf, dass die Grundidee dieselbe ist, da alle Verfahren letztendlich aufeinander aufbauen. Mit der RI-EBW-PRÜF von 1988 [301] werden die Brücken nach Schweregrad der einzelnen Schäden eingeschätzt. Daraus folgt eine Gesamtnote zwischen 1,0 und 4,0. Dieses Grundgerüst wird bei Kraft um die Faktoren Schadenszone, Ausbreitungstendenz, Auswirkung des Schadens auf andere Bauteile sowie die Verkehrsnutzung erweitert. Die einzelnen Faktoren erhalten diverse Gewichtungen und es findet eine Einteilung in Bauteilkategorien statt. Insgesamt ist das Verfahren sehr kleinmaschig und kompliziert. Es enthält viele Rechenschritte, deren Einfluss auf das Endergebnis marginal ist, sodass die Bedeutung dieser in Frage gestellt werden kann. Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens bildet das Verfahren der TH Darmstadt. Es wird um einige zuvor aufgenommene Faktoren erleichtert und normiert die Bewertung der Bauteilkategorien für eine bessere Vergleichbarkeit. In beiden zuvor beschriebenen Verfahren ist das Ergebnis keine Endnote, welche eine Aussage über den Bauwerkszustand gibt, sondern eine Bewertung der Dringlichkeit für Instandsetzungsmaßnahmen. Durch ein Endergebnis in Form einer Punktzahl, sind Bauwerke untereinander gut vergleichbar. Die Zustandsnoten anderer Verfahren geben nur einen relativen Zustand untereinander wieder. Teilinformationen gehen dabei jedoch komplett verloren. Für das Ableiten des Handlungsbedarfs von den Verantwortlichen und Baulastträgern sind diese Verfahren geeignet. Jedoch unterscheiden sie sich maßgeblich vom Verfahren der RI-EBW-PRÜF von 1988, da sie sich nicht mehr nur rein auf den Bauwerkszustand beziehen, sondern zahlreiche weit gefasste Faktoren integrieren wollen. Dieses Vorhaben ist der Grund für die komplizierten Verfahren nach Kraft sowie der TH Darmstadt. Ein Nachvollziehen der einzelnen Rechenschritte vom Prüfpersonal ist kaum möglich. Dies zeigt sich jedoch im heutigen BAST-Verfahren. Es hat geschafft, die komplizierten Schritte der vorherigen Berechnungen in drei simple Rechenschritte zu vereinen. Außerdem ist die reine Subjektivität durch den sehr ausführlich und international einmaligen Schadenskatalog und den Bewertungsschlüssel (siehe Anhang Abb. 9.1) stark reduziert. Mit dem drei Kategorien S (Standicherheit), V (Verkehrssicherheit) und D (Dauerhaftigkeit) sind alle zuvor betrachteten Faktoren auf ein sinnvolles Maß und den Kern, welcher alle zusammenfasst, reduziert. Zwar erfolgt die Vergabe der Noten für die Einzelschäden, der Bauteilkategorien sowie der Endnote programmintern, dennoch bewegt sich der Prüfer durch die zum Teil vorgegebenen Bewertungen von S, V und D je Einzelschaden in nicht mehr komplett subjektiven Bereichen für eine Bewertung. Durch Noten- und Begriffsdefinitionen in der heutigen RI-EBW-PRÜF [303] ist das Verfahren schlicht gehalten und objektiv nachvollziehbar gestaltet (siehe Anhang Tab. 9.1). Außerdem helfen die genauen Bedeutungen von Noten und Zuständen dabei, eine Art Prioritätenreihung nur mithilfe der Zustandsnoten zu erreichen. Durch die Definition der einzelnen Notenbereiche, entspricht die Notenverteilung des heutigen BAST-Verfahrens einer Dringlichkeitsreihung. Brücken mit

schlechter Zustandsnote unterliegen eindeutig erhöhter Dringlichkeit für Instandsetzungsmaßnahmen als gut bewertete Brücken. Die ausführliche und komplexe Berechnung von Prioritätspunkten wie nach Kraft ist dafür nicht zwingend erforderlich. Tab. 5.21 enthält alle vergleichenden Aspekte zwischen den zuvor analysierten nationalen Verfahren.

		RI-EBW-PRÜF 1988	Kraft	TH Darmstadt	BASt 1997	BASt heute
Verfahren und Grundlage		Bewertung durch Zustandszahlen, RI-EBW-PRÜF, DIN 1076				
Einflussfaktoren innerhalb des Verfahrens	Schweregrad	•	•	•	•	
	Standicherheit					•
	Verkehrssicherheit					•
	Dauerhaftigkeit					•
	Schadenszone		•	•		
	Ausbreitungstendenz		•			
	Auswirkung auf andere Bauteile		•			
	Verkehrsnutzung		•	•		
	Wichtung Faktoren		•			•
	Bedeutung der Bauteile				•	•
	Einteilung in Bauteilkategorien		•	•	•	•
	Wichtung Bauteilkategorien		•		•	
	Normierung			•		
	Schadensumfang				•	•
Ergebnis	Dringlichkeit		•	•		
	Einzelzustandsnoten				•	•
	Gesamtzustandsnote	•			•	•

Tab. 5.21: Vergleich der deutschen Verfahren

Bei dem Bewertungsverfahren in Japan entscheidet der Prüfer subjektiv und rein optisch über den Umfang der Einzelschäden hinsichtlich des Kriteriums der Nutzungseinschränkung. Die jeweils maximalen Schäden je Bauteilkategorie bestimmen die Gesamtzustandsnote. Das Ziel ist, die Sanierungsmaßnahmen abzuleiten. In Amerika wird nicht jeder Einzelschaden betrachtet, sondern eine Bauteilkategorie wird in der Gesamtheit abgeschätzt. Die Schädigungen werden für zahlreiche Kategorien (Items) mithilfe von Tabellen abgeschätzt und in bis zu 26-stellige Codierungen übersetzt. Für das Endergebnis werden mittels Subtraktionsverfahren diese Codierungen vom Bestzustand (100 %) abgezogen. Durch das prozentuale Ergebnis soll so eine Prioritätenreihung vorgenommen werden. Dieses Verfahren ist überaus komplex und zeitaufwendig für das Prüfpersonal. Die extrem hohe Anzahl an zu bewertenden Items (> 100

Stück) ist ein einziges Endergebnis nicht mehr repräsentativ genug, um die vielen Einflussfaktoren angemessen widerspiegeln zu können. Das Endergebnis in Form einer einzigen Prozentzahl sagt nichts im Detail über die vielen bewerteten bzw. codierten Einflussfaktoren (Items) aus. Der Einfluss eines einzelnen Items ist zudem entsprechend so gering, dass die Daseinsberichtigung einer solch großen Anzahl dieser infrage gestellt werden kann. Da auch die Handhabbarkeit der Verfahren von Bedeutung für den neu zu erzeugenden Algorithmus ist, zeigt sich die große Schwäche dieses Verfahrens. Das Prüfpersonal soll entlastet werden. 100 zu bewertende Items und ein 26-stelliger Code scheint hier nicht zielführend. Lediglich bei den Prüfindervallen von fünf bzw. sechs Jahren gleichen sich nationale sowie internationale Regelungen. Ein tabellarischer Vergleich zwischen den nationalen und internationalen Verfahren ist Tab. 5.22 zu entnehmen. Letztendlich zeigt sich, dass der heutige BAST-Algorithmus sowohl den Bauwerkszustand relevant mittels Bewertungsnote wiedergibt als auch damit eine Art Prioritätenreihung schafft. Die detaillierten Notendefinitionen erlauben grobe Prognosen über das zukünftige Tragverhalten der Brücke.

	Deutschland BAST	Amerika	Japan
Grundlage	Bewertung durch Zustandszahlen		
	Bewertung physik. Zustand	Bewertung physik. Zustand	Bewertung anhand visueller Inspektionsdaten
	Mathematischer Algorithmus	Suffizienzbewertung	Subtracting Point Method
	RI-EBW-PRÜF DIN 1076	NBIS, NBI, Record and Coding Guide	MOC88 MLIT14
Umfang	Bewertung auf Netzebene	Bewertung auf Netzebene	Bewertung auf Objektebene
Anzahl Schadensklassen	5	11	5
Hauptkriterien	Standsicherheit Verkehrssicherheit Dauerhaftigkeit	Standsicherheit Verkehrssicherheit Gebrauchstauglichk.	Nutzungseinschränkung
Vorgehensweise	Max. Einzelschaden für Gesamtzustand	Codierung vieler Bauteile und Kategorien gesamtheitlich	Max. Einzelschaden für Gesamtzustand
Ergebnis	Gesamtzustandsnote	Dringlichkeitsreihung	Dringlichkeitsreihung
Bewertung	Kombination aus Schadens- und Zustandsbewertung	Zustandsbewertung in %	Zustandsbewertung in % und Maßnahmenplanung
Handhabbarkeit	+	-	o

Tab. 5.22: Vergleich nationaler und internationaler Bewertungsverfahren

Für den neu zu entwickelnden Algorithmus, welcher eine Vereinfachung für das deutsche Prüfpersonal darstellen und eine noch regelmäßigeren Bauwerksprüfung erlauben soll, bedeuten diese Erkenntnisse, dass ein simpel gehaltenes Verfahren ausreichend ist, um den Bauwerken eine Bewertung zuzuteilen, welche eine Aussage über den Bauwerkszustand macht. Das Verfahren von Kraft über das Verfahren der TH Darmstadt bis zum heutigen BAST-Verfahren

zeigen diese Tatsache deutlich. Außerdem wird klar, dass eine Endnote untereinander ebenso vergleichbar ist und daher eine Art von Dringlichkeitsreihung für etwaige Instandhaltungsplanungen darstellt. Die Nachbildung der Verfahren zeigte dies deutlich. Alle nachgebildeten nationalen als auch internationalen Ergebnisse, sortiert von bester zu schlechtester Bewertung, sortieren sich in der gleichen Reihenfolge wie die nach heutigem BAST-Verfahren bewerteten Prüfberichte. Somit ist eine zu erzeugende Endnote simpler und genauso aussagekräftig als die langen und sehr komplexen Verfahren, welche die Instandhaltung und eine Prioritätenreihung fokussieren (Kraft, TH Darmstadt, USA). Das Verfahren der TH Darmstadt zeigt außerdem, dass eine Vernachlässigung von 1er-Schäden keinen signifikanten Einfluss auf das Endergebnis hat. Diese beschönigen maximal das Endergebnis um bis zu 4 %. Genauso verhält es sich mit dem sehr aufwendigen Verfahren von Kraft oder der Codierung aus Amerika. Wenn eine so hohe Anzahl von Einflussparametern am Ende zu einem einzigen Endergebnis verarbeitet werden, ist deren einzelner Einfluss insgesamt quasi obsolet. Das Verfahren der BAST von 1988 legt zunächst die Stelle vor dem Komma und anschließend die Nachkommastelle durch gewisse Parameter fest. Es zeigt sich, dass dieses aufwendige Verfahren nicht präziser oder am Ende aussagekräftiger ist als das heutige BAST-Verfahren. Diese Erkenntnis bestätigt sich im BAST-Algorithmus als auch im japanischen Verfahren, welche lediglich die Bauteilkategorien als Grundlage der Ergebnisberechnung nutzen und keine weiteren Einflussparameter haben. Das heißt, von grundlegenden Parametern wie den wichtigsten (Baueil-) Kategorien auszugehen und diese als Grundlage für die Berechnung einer Endbewertung zu nutzen, scheint sinnvoll. Außerdem zeigt sich, dass alle Verfahren eine hohe Subjektivität aufweisen. Es gibt, außer in Deutschland und Amerika, keine objektiven Anhaltspunkte, an denen sich das Prüfpersonal orientieren kann. Das bedeutet, ein Schadenskatalog und/oder Definitionen von Bewertungen, Zuständen oder Ergebnissen sind durchaus sinnvoll, um den hohen Grad an Subjektivität, welcher letztendlich eine Vergleichbarkeit und damit Prioritätenreihung schwierig macht, zu reduzieren (siehe Abb. 5.8).

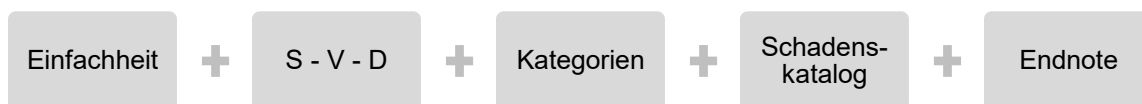


Abb. 5.8: Kernthemen nach Analyse der Bewertungsverfahren für neuen Algorithmus

[364] und [349] sind zwei Untersuchungen, welche den heute angewandte Bewertungsalgorithmus der BAST analysiert und (zum Teil auf andere Strukturen angewandt) variiert haben. Dabei werden vor allem die ΔZ_i -Werte tiefgründig untersucht/fokussiert [364]. [349] verdeutlicht, dass die Variation der Zu- und Abschlagwerte als auch die Werte als solche innerhalb des Algorithmus keinen signifikanten Einfluss auf die Endergebnisse haben. Auch kann gezeigt werden, dass das Eliminieren von 1er-Schäden auf das Endergebnis, wie es auch beim Verfahren der TH Darmstadt vorkommt, keinen Einfluss nimmt, da diese nicht weiter im Algorithmus aufgegriffen werden.

Schäden bzw. Bauteilkategorien hinsichtlich Kriterien wie der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit (Deutschland, BAST) bzw. Gebrauchstauglichkeit (USA) zu bewerten,

ist eine sinnvolle Grundlage für eine allgemeingültige und klare Einordnung und Bewertung von Bauteilschädigungen. Diese drei Kriterien sind essentiell, um ein Bauwerk zu beschreiben und werden in der Literatur ebenso zur Beschreibung genutzt, was durchaus Grundlage des neuen Algorithmus sein sollte (siehe Abb. 5.8). [39][364]

5.3 Erarbeitung eines neuen Bewertungsalgorithmus

Aus dem vorangegangenen Kapitel geht hervor, dass es fünf Punkte in nationalen und internationalen Bewertungsverfahren gibt, die der heutige BAST-Algorithmus zum Teil bereits innehält, welche sich als sinnvoll für eine nachvollziehbare und leicht anwendbare Bauwerksbewertung herausstellen (siehe Abb. 5.8). An diesen herausgefilterten Kernthemen soll sich der neue Algorithmus orientieren. Ein Grund dafür ist außerdem, dass die sehr routinierte Prüfpraxis in Deutschland nicht grundlegend verändert werden sollte. Durch die vorgegebenen Prüfintervalle aus DIN 1076 [69] befindet sich das Prüfpersonal in einer Prüfroutine und kennt daher das Bewertungsverfahren sowie den Schadenskatalog der BAST [300] sehr genau. Die Veränderung für das Prüfpersonal soll daher so gering wie möglich gehalten, das gesamtheitliche Verfahren aber durchaus verbessert und unterstützt werden. Die Einzelschadensbewertung anhand von Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) sowie Dauerhaftigkeit (D) bleibt, wie Kapitel 4.2 zeigt, der Grundsatz des hier neu entwickelten Schadenskatalogs. Die Verwendung eines Schadenskatalogs bleibt ebenfalls erhalten, weil sich beim internationalen Vergleich ein objektiver Anhaltspunkt als sehr sinnvolle Maßnahme für eine objektive Bewertung herausgestellt hat. Der Katalog ändert sich jedoch stark im Umfang, was durch das Kürzen zu einer Erleichterung führen soll, und in der Sortierung nach Schäden und nicht mehr nach Bauteilen, was eine hohe Dopplungsrate der Schäden nach sich zog. Die anschließende Notenberechnung mithilfe eines neuen Algorithmus bekommt der Prüfer sowohl im alten BAST-Verfahren als auch im neu entwickelten Verfahren nicht mit, da die Berechnung programmintern abläuft. Dennoch sollten die zuvor analysierten Punkte Eingang in das neue Bewertungsverfahren finden: keine übertrieben viele zu bewertende Aspekte bzw. Icons sowie ein Berechnungsverfahren, das aus einer Vielzahl von Parametern und Variablen besteht, um den Aufwand für das Prüfpersonal gering zu halten. Auch erhält jede Einzelschadensnote im derzeitigen BAST-Verfahren dieselbe Gewichtung. Es gibt keine weitere Differenzierung zwischen Schadensart oder -ort. Auch dieser Punkt soll im neuen Algorithmus Berücksichtigung finden.

Der größte Unterschied zum bisherigen BAST-Verfahren besteht in der Bauwerksinspektion selbst. Das heißt, hier wird das Bauwerk mithilfe von zuvor aufgenommenem Bildmaterial auf Schäden geprüft. Dafür wird das Bauwerk zuvor mittels UAS befliegen oder anderweitig fotografisch aufgenommen und anschließend wird ein grobes, der Orientierung dienendes, voxelisiertes Modell der Brücke erzeugt, wie bereits in Kapitel 2.5.3 erläutert. Die Schäden auf dem Bildmaterial können so den einzelnen Voxeln zugeordnet und fest verortet werden, was bei allen zuvor analysierten Verfahren nicht der Fall ist, da es sich um händische Prüfungen handelt [140][164]. Das bedeutet, die Bauwerksbewertung findet an dieser Stelle anhand von Voxeln (siehe Kapitel 2.5.3) statt, in die die Brücke eingeteilt wird. Der Prüfer sichtet das Bildmaterial pro Voxel, definiert die dort gefundenen Schäden mithilfe des neuen Schadenskatalogs

(siehe Tab. 9.8), gibt diese in SIB-Bauwerke [387] oder eine dafür neu zu entwickelnde Software ein, welche mithilfe des hier zu erarbeitenden Algorithmus ein Gesamtergebnis errechnet (siehe Abb. 5.9). Außerdem wird an dieser Stelle davon ausgegangen, unabhängig der optischen Bauwerksanalyse aus Kapitel 3, dass das verwendete Bildmaterial von der Brücke nutzbar ist und alle Bereiche, die für eine Prüfung notwendig sind bzw. die der Prüfer mit diesem Verfahren untersuchen möchte, in ausreichend hoher Qualität abgebildet sind. Ob das Bildmaterial von einem UAS oder einem anderen technischen Hilfsmittel oder sogar von einem Menschen aufgenommen wurde, ist hier ebenfalls unerheblich und für den Algorithmus unbedeutend.

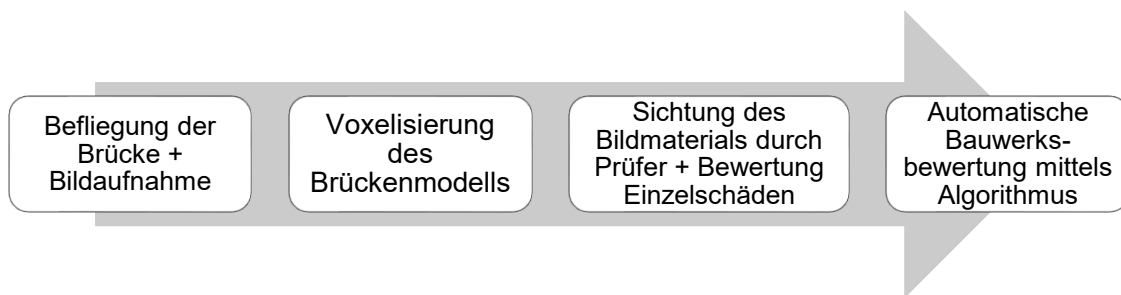


Abb. 5.9: Ablauf einer Brückenprüfung nach neuem System

Da die Voxel bzw. das voxelisierte Bauwerk die größte Neuerung darstellt, bilden diese entsprechend die Grundlage für das neue Bewertungsverfahren. Im ersten Schritt wird die Brücke in graue Voxel eingeteilt. Die graue Färbung zeigt, dass es sich hier um die reine Einteilung des Bauwerks handelt, ohne weitere Bedeutungen der Voxel selbst (siehe Abb. 5.10, links). Anschließend definiert der Prüfer statisch relevante Bereiche bzw. Voxel am Modell wie Auflagerbereiche, (Schweiß-/Schraub-) Verbindungen zwischen Trägern oder Bereiche mit der statisch höchsten Belastung bzw. Spannung (siehe Abb. 5.10, rechts). In diesem Schritt ändert sich die Grundfarbe der Voxel automatisch in blau. Durch einfaches Anklicken der blauen Voxel, welche anschließend eine orangene Färbung erhalten, werden die statisch relevanten Bauwerksbereiche bzw. Voxel definiert (Beispiel siehe Anhang Abb. 9.24). Untersuchungen mehrerer fiktiver Bauwerke haben gezeigt, dass ca. 25 % des Brückenbauwerks eine orangene Färbung erhalten bzw. dass 25 % eines Bauwerks als statisch kritisch zu betrachten sind [140][363]. Im Auflagerbereich handelt es sich um circa 5 % der Bauwerkslänge, welche als orange gefärbte Voxel gekennzeichnet werden, und in der Bauwerksmitte ungefähr 10 % der Bauwerkslänge. Kennt der Prüfer die Brücke bereits und weiß von gravierenden Schädigungen an einigen Stellen, können die entsprechenden Voxel ebenfalls orange gefärbt werden. Alle nicht ausgewählten Voxel bleiben blau (siehe Abb. 5.10, rechts).

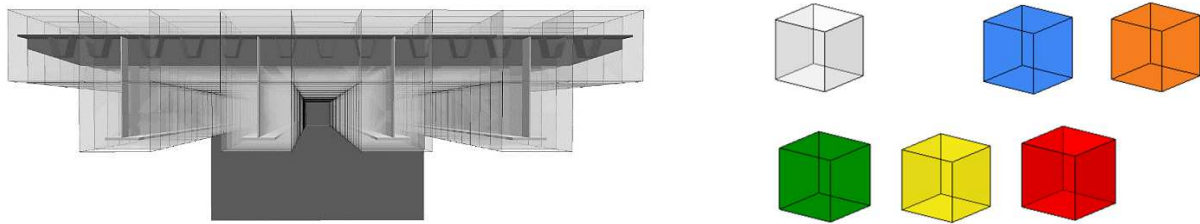


Abb. 5.10: 1.:Prinzipdarstellung voxelisierter Brückenquerschnitt; r.: verschieden farbige Voxel (grau = Einteilung des Bauwerks; blau = konstruktiv ohne Priorität; orange = konstruktiv mit Priorität; grün = Schadensnote 1,0-1,9; gelb = Schadensnote 2,0-2,9; rot = Schadensnote 3,0-4,0)

Nach der Festlegung der konstruktiv wichtigen Bauwerksbereiche findet die eigentliche Bauwerksprüfung statt, indem das Bildmaterial, das einem Voxel zugeordnet ist, inspiziert wird. Der Bauwerksprüfer sichtet das Bildmaterial und bewertet gefundene Schäden auf diesem mithilfe des in Kapitel 4.2 erzeugten Schadenskatalogs. Die dort vermerkten Noten der Einzelschäden bilden die Grundlage für den folgenden Bewertungsalgorithmus. Die Einzelschadensnoten werden in drei Gruppen unterteilt. Liegt die Einzelschadensnote zwischen 1,0 und 1,9, so gilt dieser Schaden als ‚grüner Schaden‘. Liegt die Note zwischen 2,0 und 2,9, wird dieser als mittelschwerer ‚gelber‘ Schaden und zwischen 3,0 und 4,0 als ‚roter Schaden‘ definiert (siehe Abb. 5.10, rechts). Insgesamt verteilen sich die drei Schadensklassen im neuen Schadenskatalog wie folgt: 54 % des Katalogs bestehen aus grünen Schäden, 30,6 % aus gelben und 15,4 % aus roten Schäden.

Der zu erzeugende Algorithmus muss die zuvor beschriebenen Parameter (blaue und orangene Voxel sowie grüne, gelbe und rote Schäden) als auch die Schadenskategorien aus dem Schadenskatalog in Abhängigkeit der Voxelbetrachtung in Zusammenhang bringen und eine einheitliche, objektiv vergleichbare Bauwerksbewertung erzeugen. Dafür werden zunächst die Schadenskategorien aus dem Schadenskatalog fokussiert. Diese werden in drei Stufen bzw. Oberkategorien hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für die Tragkonstruktion gegliedert. Dabei werden die Verteilungen der Einzelschadensnoten (grün, gelb, rot) sowie die allgemeine Bedeutung einer Schadenskategorie auf die Konstruktion bewertet. So ergibt sich sinnvoll, dass die Schadenskategorien ‚Verschmutzungen‘ und ‚freiliegende Bewehrung‘ der Oberkategorie ‚Kategorie 3‘ zugeordnet werden. Die Schadenskategorien ‚Korrosion‘, ‚Beschichtung‘ und ‚Verformungen‘ sind von höherer Wichtigkeit für das stählerne Tragverhalten und werden der ‚Kategorie 2‘ zugeordnet. ‚Verbindungen‘, ‚Risse‘ sowie ‚Schweißnähte‘ werden letztendlich zur ‚Kategorie 3‘ zusammengefasst. Diese drei neuen Stufen sollen eine eigene Gewichtung G_K (‚Gewichtung Kategorie‘) erhalten, um den Einfluss der verschiedenen Schadenskategorien auf das Gesamtergebnis vernünftig und der Realität entsprechend abzubilden. In Anlehnung an [140], [364] und [349] erhält Kategorie 3 (Verschmutzungen und freiliegende Bewehrung) den Gewichtungsfaktor $G_K = 0,3$, für Kategorie 2 (Korrosion, Beschichtung und Verformungen) gilt $G_K = 0,7$ und Kategorie 1 erhält aufgrund der Wichtigkeit dieser Schädigungen (Verbindungen, Risse und Schweißnähte) die Gewichtung $G_K = 1,0$. Mit dieser Verteilung zeigte sich in der Sensitivitätsanalyse der sinnvollste Einfluss auf das Gesamtergebnis (siehe Anhang Abb. 9.24).

Im Weiteren sind die blauen von den orangefarbenen Voxeln zu differenzieren und mit entsprechenden Gewichtungen zu unterscheiden. Blaue Voxel stellen keine konstruktive Besonderheit dar, während die orangefarbenen Voxel die vom Prüfer als konstruktiv essentiell oder kritisch definierten Bauwerksbereiche sind. Eine Analyse von 60 Wertekombinationen zwischen 0,0 und 1,0 in Verbindung mit den zuvor definierten drei Schadenskategorien untersucht den Einfluss dieser Voxel auf das Endergebnis (Beispiel siehe Anhang Abb. 9.24). Der Unterschied zwischen Schäden, welche an konstruktiv kritischen oder relevanten Bauteilbereichen liegen (orangegefärbte Voxel), soll im Vergleich zu Schäden an konstruktiv unbedenklichen Stellen (blaue Voxel) deutlich werden. So ergibt sich ein Gewichtungsparmeter G_L („Gewichtung Lokalisation“) für blaue Voxel von $G_L = 0,4$ und für orangene Voxel von $G_L = 0,9$. Durch diese Weise gehen konstruktiv elementare Bauwerksbereiche wie Verbindungen an hochbelasteten Stellen oder maximal belastete Querschnitte mehr als doppelt so stark in die Berechnung des Endergebnisses ein. In diesen Bereichen sollten bestenfalls gar keine Schädigungen auftreten, weswegen eine derart große Unterscheidung zwischen blauen und orangenen Voxeln nicht nur sinnvoll, sondern auch gewünscht ist. Da der Schadensort im Schadenskatalog aus Kapitel 4.2 die Schadenslokalisierung nicht mehr berücksichtigt, ist diesem Umstand an dieser Stelle Sorge getragen.

In einem letzten Schritt muss eine Bewertung der Gewichtung G_N („Gewichtung Note des Einzelschadens“) für die grün, gelb und rot definierten Einzelschadensnoten gefunden werden. Dafür wird erneut die im letzten Absatz beschriebene Analyse durchgeführt, um auch hier den Einfluss der verschiedenen Kategorien auf das Endergebnis in Kombination mit allen bisher ermittelten Gewichtungsfaktoren zu berechnen (ein beispielhafter Auszug ist im Anhang auf Abb. 9.24 dargestellt). Dabei ergibt sich ein Gewichtungsfaktor für die gut benoteten Schäden (grün) von $G_N = 0,2$. Für die gelb definierten Schäden (Note zwischen 2,0 und 2,9) ergibt sich ein Faktor von $G_N = 0,5$ und für Schäden mit einer Note zwischen 3,0 und 4,0 (rot) ergibt sich $G_N = 0,9$. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die grünen, gelben und roten Voxel keine direkte Bedeutung für die Bewertungsberechnung haben. Jeder Schaden erhält je nach seiner Farbkategorie die entsprechende Gewichtung G_N . Ein Voxel kann sich programmintern nach der Schadensanalyse durch den Prüfer entsprechend seines maximalen Schadens in dessen Farbe färben. So entsteht am Ende neben einer bezifferten Bauwerksbewertung auch ein optischer Eindruck vom Bauwerk und schwere Schäden können anhand der rot eingefärbten Voxel auch im Nachhinein direkt gefunden bzw. angezeigt werden. Die Verteilung der drei Gewichtungsfaktoren wird an 50 fiktiven Brückenbauwerken unterschiedlichsten Schadensaufkommens angewandt und verifiziert (siehe Anhang, Abb. 9.24). Die verschiedenen Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Bewertungsschritte und -gruppen sind auf Abb. 5.11 dargestellt.

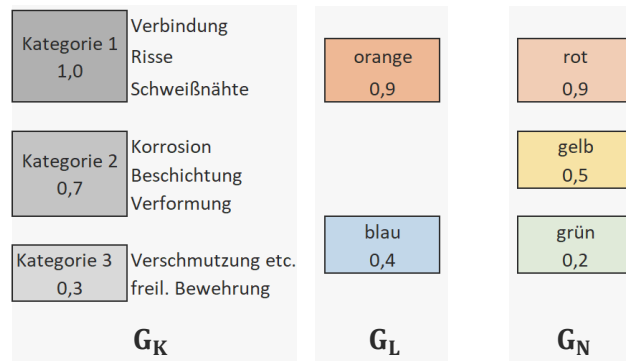


Abb. 5.11: Gewichtungen der diversen Voxel bzw. Voxel Farben

Als Grundlage für den zu ermittelnden Algorithmus dient der sogenannte Einflussbaum, eine Erweiterung des Fehlerbaumansatzes nach DIN 25424 Teil 1 und Teil 2 [27][73][74]. Dieser soll im ursprünglichen Sinne Schadensmechanismen prognostizieren und Schäden mit ihrer Ursache verknüpfen. Dies wird eigentlich mittels Systems Engineering programmiert und geschieht programmintern. Die hier vorliegende Algorithmusberechnung soll für den Prüfer jedoch nachvollziehbar bleiben, weswegen lediglich Grundzüge vom Prinzip des Einflussbaumes übernommen werden. Beim Einflussbaum gibt es verschiedene Ebenen des Bauwerks (Strukturebene, Schadensebene, Parameterebene), welche durch frei definierbare Logik-Elemente verknüpft werden, um deren Zusammenhänge darzustellen. Bei den sogenannten Logik-Elementen handelt es sich um Gleichungen oder Vorschriften, welche beliebig kombinierbar sind und beispielsweise probabilistischen Ansätzen oder empirischen Modellen folgen können. Hier bilden die blauen und orangenen Voxel die Strukturebene, die rot, gelb und grün definierten Einzelschadensdefinitionen die Schadensebene und die drei auf Abb. 5.11 grau dargestellten Schadenskategorien können der Parameterebene zugeordnet werden. Die Verknüpfung der Ebenen ist an die Produktregel eines mehrstufigen Zufallsversuchs angelehnt. [27]

Mit diesen ersten Definitionen erhält jeder Einzelschaden aus dem Schadenskatalog E_S in Abhängigkeit seiner Schadenskategorie (G_K) sowie seiner Verortung am Gesamtbauwerk (G_L) eine modifizierte Bewertung. Die Summe aller Schäden in einem Voxel erzeugen anschließend den sogenannten Voxelwert V_i (siehe (Gl. 65)).

$$V_i = \sum_{i=0}^{n_F} E_{S,i} \cdot G_{K,i} \cdot G_{L,i} \cdot G_{N,i} \quad (\text{Gl. 65})$$

mit V_i (Voxelwert), E_S (Einzelschadensnote aus Schadenskatalog), $G_{K,i}$ (Gewicht Schadenskategorie), $G_{L,i}$ (Gewicht Lokalisation), $G_{N,i}$ (Gewicht Note des Einzelschadens)

Für die Einzelschadensnote E_S wird bewusst nicht die Substanzkennzahl (siehe Kapitel 2.1.1) verwendet. Auch hier zeigen sich Unterschiede in den Einzelnoten von $\pm 0,2$. Diese Differenz hat am Ende auf den Voxelwert V_i keinen Einfluss mehr, weswegen die übliche Einzelschadensnote für die Berechnung grundlegend ist. Auch ist die Verwendung des Traglastindex

(siehe Kapitel 2.1.1) ist nicht möglich, da es sich um rein optische Bewertungen handelt. Durch die Berechnung des Voxelwertes V_i ergeben sich Zahlenwerte, die, je nach Schadensaufkommen, zwischen 0 und 120 liegen. Der Voxelwert allein ist daher wenig aussagekräftig, da die Größe des Bauwerks zusätzlich zu berücksichtigen ist. Dieser Aspekt wird bei der nachfolgenden Berechnung der Bauwerksbewertung B integriert (siehe (Gl. 66)). Dabei werden alle Voxelwerte summiert und anschließend mit dem Quotienten aus der Anzahl der Schäden n_o , welche in orangefarbenen Voxeln auftreten, und der Anzahl orangefarbener Voxeln N_o multipliziert. Durch die stetige Verteilung der orangegefärbten Voxeln im Verhältnis zum Gesamtbauwerk wird so zum einen der Einfluss der Bauwerksgröße ins Endergebnis aufgekommen als auch der Fokus auf die konstruktiv kritischen Bauwerksstellen fokussiert. Schäden an den restlichen, weniger konstruktiv essentiellen Bauwerksbereichen gehen durch den Voxelwert V_i in die Bauwerksbewertung B ein. Sollten in sehr unwahrscheinlichen Fällen keine Einzelschäden in orangenen Voxeln auftreten, werden 35 % der Anzahl der Schäden in blauen Voxeln für die Berechnung genutzt.

$$B = \sum_{i=0}^{n_F} V_i \cdot \frac{\sum n_o}{\sum N_o} \quad \text{für } n_o > 0, \quad \text{sonst } n_o = 0,35 \cdot n_b \quad (\text{Gl. 66})$$

mit B (Bauwerksbewertung), V_i (Voxelwert), n_o (Anzahl der Schäden in orangenen Voxeln), N_o (Anzahl orangefarbener Voxel), n_b (Anzahl der Schäden in blauen Voxeln)

Diese Art von Berechnungsverfahren wird auch Logikdiagramm nach VDI 4008 [27][87][368] genannt. Dabei geht eine Zustandsvariable in das horizontal zu lesende Diagramm ein (hier die Einzelschadensnoten $E_{S,i}$) und der Gesamtzustand kommt am Ende des Diagramms bzw. des Pfades heraus (siehe Abb. 5.12). [27]

Die Bauwerksbewertung B , als ganzzahliger Wert zwischen 0 und 50, kann für die Instandsetzungsreihenfolge bzw. Dringlichkeitsbewertung herangezogen werden, da sie auf der Art der Schäden beruht. Diese wird noch abschließend auf Notenwerte skaliert, um zum einen dem bekannten Verfahren zu ähneln und zum anderen eine direktere Vergleichbarkeit zwischen den geprüften Brücken sicherzustellen. Dafür wird eine logarithmische Skalierung verwendet, welche die Bauwerksbewertung B auf Notenwerte zwischen 1,0 und 5,0 skaliert. Die logarithmische Lösung wird gewählt, um die kleinen Werte zu dehnen und die großen Werte, also die schlecht bewerteten Brücken, zu komprimieren. Es werden am Ende einer Berechnung immer beide Ergebnisse angegeben: Die Bauwerksbewertung B sowie die daraus skalierte Note.

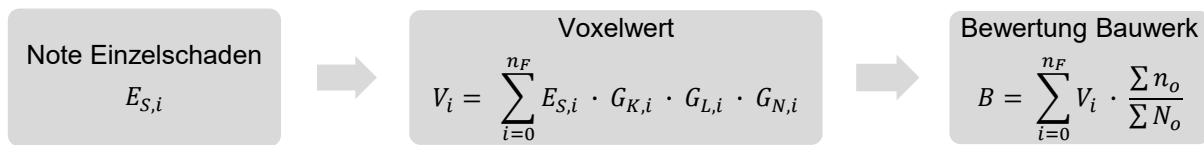


Abb. 5.12: Logikdiagramm von neu erzeugtem Algorithmus

Dadurch wird ein weiterer Schritt in das Bewertungsverfahren eingebaut, um die Bauwerksbewertung der schlechten Konstruktionen so realistisch wie möglich abzubilden und eine Verschleppung von Instandsetzungen durch ggf. zu gute Bewertungen zu vermeiden. Die Noten werden in Anlehnung an das japanische Auswertungssystem zwischen 1,0 und 5,0 verteilt, um diesen Effekt zu verstärken und den Bauwerkszustand detaillierter einschätzen zu können. Tab. 5.23 definiert die Notenbereiche mit der Beschreibung des Bauwerkszustands. Diese Tabelle ist an die Zustandsbeschreibungen der RI-EBW-PRÜF [303] angelehnt, wo diese auch entnommen werden können (siehe Anhang Tab. 9.1).

Notenbereich für B	Beschreibung
1,0 – 1,6	sehr gut
1,7 – 2,3	gut
2,4 – 3,0	befriedigend
3,1 – 3,7	ausreichend
3,8 – 4,4	mangelhaft
4,5 – 5,0	ungenügend

Tab. 5.23: Notenbereiche für die Zustandsbewertung

5.4 Sensitivitätsanalysen und Verifizierung des Bewertungsalgorithmus

Für eine Sensitivitätsanalyse wird der neue Algorithmus auf 180 (zum Teil fiktive) Brücken angewandt. Darunter sind auch die aus Kapitel 5.1 und 5.2 bekannten realen Brücken mit ihren Prüfberichten nach DIN 1076 [69]. Dafür werden die vorhandenen Prüfberichte in das neue System eingegeben. Da keine direkte Übertragbarkeit vom derzeitigen BAST-Verfahren auf das neu entwickelte Verfahren möglich ist, auch, wenn dieses in Grundzügen an das alte Verfahren angelehnt ist, findet die Eingabe nach Ermessen und Erfahrung des Autors statt. Das gleiche gilt für die weiteren 160 eingegebenen Bauwerke.

Die Ergebnisse zeigen, dass die relevantesten Parameter bei der Berechnung in übereinstimmendem Zusammenhang stehen. Bei den 180 betrachteten Brücken ergeben sich für die Bauwerksbewertungen B Werte zwischen 0 und 50. Rein rechnerisch sind Werte über 50 ebenfalls möglich, was jedoch keinem realistischen Bauwerk entspricht, sondern nur für Testzwecke in den Algorithmus eingegeben wird. Daraus ergeben sich skalierte Bauwerksnoten zwischen 1,0 und 5,0, da diese Skala rechnerisch der logarithmischen Skalierung vorgegeben wird. Von den

180 Brücken fallen 46,6 % in eine sehr gute bis gute Benotung (1,0 – 2,3). Dies bestätigt die provozierte Stauchung im unteren Notenbereich durch einen weiteren Notenschritt, also bei den Bauwerken mit Schäden, welche weder in konstruktiv kritischen Bereichen liegen noch anderweitig einen großen Einfluss auf die Standsicherheit oder Dauerhaftigkeit des Gebäudes haben. 38,1 % fallen in den Bereich des befriedigenden bis ausreichenden Zustands (2,4 – 3,7) und 15,3 % in einen nicht mehr ausreichenden Zustand (3,8 – 5,0). Die hohe Anzahl nicht ausreichender Bauwerkszustände liegt daran, dass für die Sensitivitätsanalyse besonders Grenzwerte getestet werden. Es wird deutlich, dass die Werte objektiv vergleichbar sind, da sie sowohl die Bauwerksgröße (durch die Anzahl orangefarbener Voxel) als auch die Schadensanzahl vereinen. Es zeigt sich deutlich der Einfluss der Schadensanzahl auf die Bauwerksbewertung B (siehe Abb. 5.13).

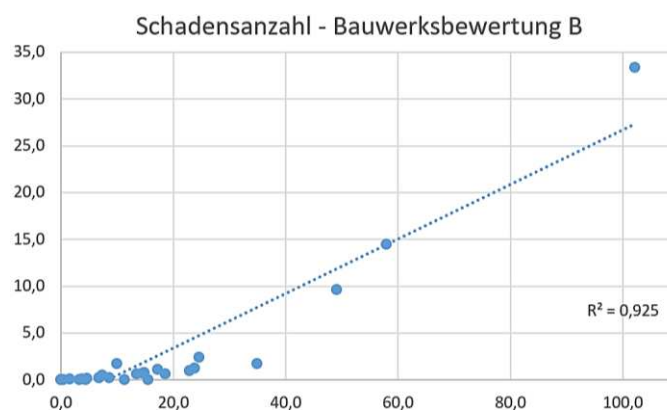


Abb. 5.13: Zusammenhang zwischen Schadensanzahl und Bauwerksbewertung B

Dieser Zusammenhang ist von besonderer Bedeutung, da er die Instandsetzungsreihenfolge bzw. Dringlichkeitsbewertung, welche in den anderen nationalen sowie internationalen Bewertungsverfahren fast durchweg Anwendung finden, auch für Deutschland erlaubt. Eine Instandsetzungsreihenfolge ist im derzeitigen Verfahren nicht beinhaltet und könnte so ergänzt werden. Durch die vergleichsweise große Spannweite von 0 bis 50 ist die Bauwerksbewertung B dafür besser geeignet als die skalierte Endnote, welche nur einen ersten Überblick bzw. Gesamteindruck über die Brücke liefert. Der Wert B macht eine deutliche Aussage über den Instandsetzungsaufwand, da viele Schäden zu einem höheren Ergebnis führen. Sind diese auch statisch relevant und in orangefarbenen Voxeln lokalisiert, spiegelt sich dieser Zustand auch in einer schlechten skalierten Endnote wider. Das fällt auf, weil die Endnote stark von Schäden in orangenen Voxeln abhängt, was aus (Gl. 66) hervorgeht. Die Fokussierung auf diese wichtigsten Schäden ist im Algorithmus gewollt und spiegelt sich entsprechend in den Ergebnissen wider (siehe Abb. 5.14).

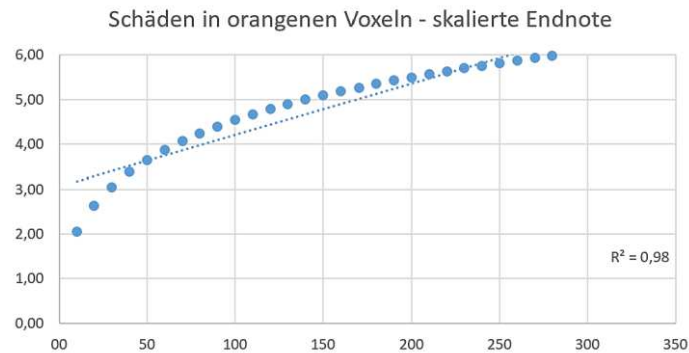


Abb. 5.14: Einfluss Schäden in orangefarbenen Voxeln auf skalierte Endnote

Abb. 5.15 zeigt den linearen Zusammenhang zwischen der Bauwerksbewertung B , welche gut zur Instandsetzungsreihenfolge herangezogen werden kann, und der logarithmisch skalierten Endnote. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch unabhängig von der Bauwerksgröße bzw. der Voxelanzahl und wird durch den Determinationskoeffizienten R^2 bestätigt. Dieser stellt das Maß dar, wie gut sich die Werte an die Regression anpassen.

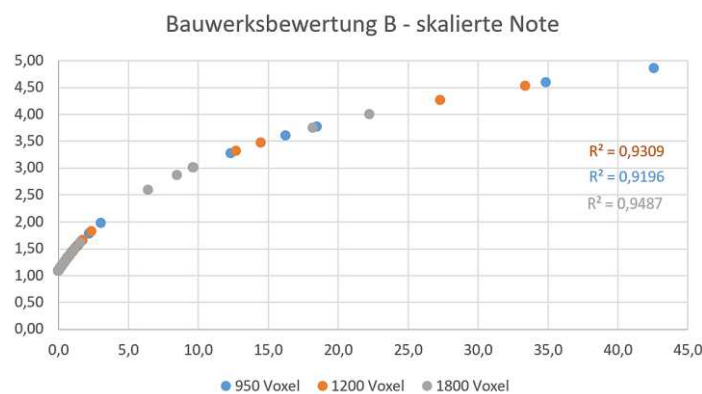


Abb. 5.15: Linearität zwischen Bauwerksbewertung B und skaliertes Endnote

Der Vergleich des neuen Algorithmus mit dem bestehenden Algorithmus der BAST (siehe Anhang Tab. 9.36) bestätigt ebenfalls die oben beschriebene Kohärenz. Hier wird erneut die Bedeutung der Bauwerksbewertung B deutlich. Dieser Wert ist nicht wie die gewohnte Endnote zu verstehen. Sie zeigt die Gewichtung der Schadensanzahl (besonders in orangenen Voxeln) und verdeutlicht damit den Schädigungsgrad einer Brücke in Anlehnung an die Schadensanzahl. Die Endnote kann durch die logarithmische Skalierung davon durchaus abweichen (siehe Anhang Tab. 9.36). Es ist möglich, dass der Wert für B erhöht ist, da es sich um eine Vielzahl von Schäden handelt, die Endnote jedoch durchaus im befriedigenden Bereich liegt, da es sich zwar um viele, aber scheinbar nicht um statisch gravierende Schäden handelt. Bei dieser Gegenüberstellung ist ergänzend zu berücksichtigen, dass ein direkter Vergleich der beiden Verfahren, das neue Verfahren mit dem bestehenden BAST-Algorithmus, kaum möglich ist, da die bestehenden Prüfberichte auf ein komplett anderes Verfahren übertragen und angewandt werden müssen. Ein großer Unterschied ist auch die Angabe der Schadensanzahl sowie des

Schadensortes. Der Ort wird in den bestehenden Berichten nicht deutlich. Hier muss bei der Übertragung immer eine Abschätzung (blau oder orange) stattfinden. Bei der Schadensanzahl geben die bestehenden Berichte Hinweise wie ‚mehrmals am Bauteil‘ oder ‚vielfach‘. Da die Schadensanzahl beim neuen Verfahren genau eingeht, können hier ebenfalls Unstimmigkeiten zwischen den jeweiligen Endnoten der beiden Verfahren entstehen. Insgesamt zeigt Tab. 9.36 im Anhang jedoch, dass der neue Algorithmus durchaus mit dem alten Verfahren vergleichbar ist. Eine Umgewöhnung muss dennoch stattfinden, weil die Aussagen der Endwerte hier andere sind. Insgesamt handelt es sich um Modellüberlegungen. Für andere Fälle bzw. Bauwerksarten muss der Algorithmus zunächst verifiziert bzw. angepasst werden.

Der neue Algorithmus kann sehr gut in BIM-Modelle bzw. die Bewertungssoftware SIB-Bauwerke [387] übertragen werden, da der aktuelle Standard bzw. Grundaufbau nach RI-EBW-PRÜF [303] beibehalten wird. Da SIB-Bauwerke bereits mit einem Bewertungsalgorithmus im Hintergrund funktioniert, wäre der neue ebenfalls aus wenigen Formeln bestehende Algorithmus leicht einzupflegen. Lediglich der vorgeschaltete Bewertungsschritt anhand des voxelisierten Bauwerksmodells stellt eine Besonderheit dar. Die Handhabbarkeit dieses Verfahrens für BIM-Softwares zeigte bereits [140] und stellt somit keine technische Herausforderung dar.

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer UAS-unterstützten Brückenprüfung

Abschließend soll die Wirtschaftlichkeit des neu erarbeiteten Brückenprüfverfahrens, bestehend aus der UAS-Befliegung (Kap. 3), der Voxelisierung der Brücke als Voraussetzung des neuen Bewertungsalgorithmus (Kap. 5) sowie der Fotodurchsicht durch den Prüfenieur mitsamt der Anwendung des neuen Schadenskatalogs (Kap. 4) untersucht werden. Dafür werden sowohl das aktuelle Verfahren nach DIN 1076 [69] als auch das hier erarbeitete Verfahren verglichen. Basierend auf [116] werden jeweils alle Arbeitsschritte aufgeschlüsselt und mithilfe von Literatur- und Erfahrungswerten aus der Praxis monetär und bzgl. des Zeitaufwands errechnet und bewertet. Außerdem wird ein Excel-Berechnungstool erarbeitet, in das eine zu prüfende Brücke eingegeben werden kann und der Zeitaufwand sowie die Kosten für jeweils beide Verfahren als vergleichender Anhaltspunkt für Baulastträger oder Prüfenieur ausgegeben werden. Für diese Berechnungen werden neue mathematische Gleichungen erarbeitet. Auf dieser Grundlage findet eine Sensitivitätsanalyse statt, bei der Brücken verschiedenster Spannweiten untersucht werden, um im Anschluss eine Wirtschaftlichkeitsanalyse unter den Aspekten Kosten, Zeitaufwand, Arbeitssicherheit und durch Stau erzeugte volkswirtschaftliche Schäden durchzuführen.

6.1 Darstellung der zu vergleichenden Inspektionsverfahren

6.1.1 Brückenprüfung mit konventionellem Prüfverfahren nach DIN 1076

An dieser Stelle wird das Vorgehen einer Hauptprüfung nach DIN 1076 [69] beschrieben, um die einzelnen Arbeitsschritte zu beleuchten und diese als Grundlage für die nachfolgende Besetzung mit Kostenfaktoren für die Wirtschaftlichkeitsanalyse zu nutzen. Nach der Anfahrt von Personal und ggf. nötigem Besichtigungsgerät zum zu prüfenden Bauwerk, findet das Einrichten der Arbeitsstelle und ggf. nötigen Verkehrssicherungsmaßnahmen statt. Auch die Zugänglichkeit sowie dafür notwendige Hilfsmittel wie beispielsweise Beleuchtung sind zu prüfen und der Arbeitsschutz sicherzustellen. Falls erforderlich, ist die persönliche Schutzausrüstung (PSA) anzulegen. Das geplante Vorgehen der Prüfung wird besprochen, wobei der alte Prüfbericht der letzten Hauptprüfung zu berücksichtigen ist. Zudem finden üblicherweise verpflichtende Einweisungen wie die Gefährdungsbeurteilung, der Sicherungsplan oder das Besichtigungsgerät statt, um die Verantwortlichen nach §§ 13, 14 ArbSchG [8] rechtlich abzusichern. Der Zeitaufwand und Umfang der genannten Punkte variieren je nach Größe der Brücke stark. Kleine Brücken werden lediglich von einem Prüfenieur kontrolliert, während Bauwerke wie Talbrücken oft von mehreren Prüfern gleichzeitig, auch über mehrere Tage, geprüft werden, um die Verkehrseinschränkungen zu minimieren. Insgesamt handelt es sich bei der Prüfung aufgrund der nicht ungefährlichen Situationen für das Personal um eine wetterabhängige Tätigkeit. [44][312]

Die Hauptprüfung nach DIN 1076 ist grundsätzlich als handnahe und zerstörungsfreie Prüfung zu verstehen, welche aus Sichtprüfung und das Abklopfen von verdächtigen Bauteilen besteht.

Der Korrosionsschutz ist vollständig auf Schadstellen zu kontrollieren. Ggf. kann eine Schichtdickenmessung erfolgen, um die Dicke der Beschichtung zu kontrollieren [237]. Verbindungsmittel wie Schrauben, Muttern oder Niete sind primär visuell auf festen Sitz zu überprüfen. Ein Abklopfen kann für Sicherheit bzgl. ihrer korrekten Funktionsweise sorgen. Große Aufmerksamkeit ist auf das optische Prüfen der Schweißnähte zu legen. Besonders solche, die hohen (Wechsel-) Beanspruchungen ausgesetzt sind oder durch die Herstellungen für gewöhnlich große Eigenspannungen aufweisen. Das Farbeindringverfahren oder die Magnetpulverprüfung können helfen, Risse in Schweißnähten eindeutig zu verifizieren [65]. Alle Schäden sind zu dokumentieren, um diese abschließend in SIB-Bauwerke [387] einpflegen zu können. Eine Fotografie dieser Stellen ist nicht verpflichtend. Alle Schäden aus der letzten Prüfung sind mithilfe des entsprechenden Prüfberichts wiederzufinden und zu verifizieren bzw. neu zu bewerten. [69][126][236]

Nach Beendigung der Prüfung, sind Besichtigungseinrichtungen und Verkehrssicherungen abzubauen und die Arbeitsstelle zu verlassen. Eingesetzte Maschinen zur Besichtigung und Maßnahmen zu Verkehrssicherung sind für die nächste Prüfung zu dokumentieren. Die gefunden und zuvor dokumentieren Schäden werden in die Software SIB-Bauwerke [387] übertragen, Fotoaufnahmen, wenn vorhanden, entsprechend zugeordnet. Die anschließende Bewertung findet programmintern nach DIN 1076 [69] statt (siehe Kapitel 2.1.1). [21][69][97][360]

6.1.2 Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung

Als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsanalyse werden folgend ebenfalls für die UAS-unterstützte Brückenprüfung alle Arbeitsschritte beleuchtet. Der wohl größte Unterschied bei dieser Prüfweise ist die (rechtliche) Vorbereitung an den Flug durch die vielen gesetzlichen Anforderungen an den UAS-Betrieb. Zunächst muss geprüft werden, in welcher Luftraumstruktur der Einsatzort liegt und ob eine Fluggenehmigung erforderlich ist (siehe Kapitel 2.4.3). Auch sind temporär eingerichtete Flugverbotszonen (NOTAM) zu überprüfen. Eigentümer bzw. Baulastträger oder Grundstückbesitzer müssen das Überfliegen ihres Grundstückes genehmigen. Ggf. müssen Anwohner im Vorhinein über den geplanten Flug informiert werden, um Missverständnisse oder Behinderungen durch Zivilpersonen zu verhindern. Der UAS-Flug ist maximal wetterabhängig bzw. vor allem windabhängig. Auch Regen oder starker Nebel sind Grund für ein Nichtstarten des UAS. Außerdem ist das Starten vom Kp-Index abhängig. Dieser gibt die geomagnetische Aktivität an, welche wiederum das GPS-Signal beeinträchtigen kann. Liegt der Index über 4, so sollte das UAS nicht starten [343]. Vor jedem Flug ist das technische Equipment zu überprüfen. Die Flugroute wird vorab geplant und mit dem Prüfpersonal besprochen. Bei der Routenplanung ist eine Bildüberlappung von 50-60 %, ein gleichmäßiger Abstand zu Bauwerk sowie bestenfalls konstante Lichtverhältnisse zu berücksichtigen [243]. Ein Start- und Zielpunkt wird definiert. Es hat auch hier eine Gefährdungsbeurteilung zu erfolgen und es muss für den Arbeitsschutz Sorge getragen werden. [66][230][319]

Nach der Anfahrt vom Personal zum zu prüfenden Bauwerk, findet das Einrichten der Arbeitsstelle und ggf. nötigen Verkehrssicherungsmaßnahmen statt. Der Start- und Landebereich des UAS ist gegenüber Dritten zu sichern und zu kennzeichnen. Der Pilot hat die zuvor eingeholten Genehmigungen und erarbeiteten Dokumente mitzuführen. Bei der Flugdurchführung sind alle

gesetzlichen Regularien einzuhalten. Es erfolgen regelmäßige Akkuwechsel, für die das UAS stets zurück zum Startpunkt muss. Diese Zeiten sind vorab bei der Flug(zeiten)planung einzukalkulieren. Der Flug ist nach Beendigung durch den Piloten im Logbuch zu dokumentieren und muss, falls erforderlich, entsprechend bei den Behörden als erledigt gemeldet werden. Abschließend sind, falls vorhanden, die Verkehrssicherungsmaßnahmen zu entfernen. [196][283][319]

Durch eine Nachbearbeitung wird mit der durch Flugdaten erzeugte Punktwolke ein grobes Modell der Brücke erstellt (Photogrammetrie). Die Punktwolke ist eine Ansammlung von aufgenommenen (GPS-)Punkten, die die Kontur von Objekten widerspiegeln. Dieses Punktwolkenmodell wird, wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben, voxelisiert, d.h. in gleich große Würfel aufgeteilt. Das Bildmaterial wird jedem Voxel zugeordnet. Der Prüflingenieur hat im nächsten Schritt die konstruktiv wichtigsten Punkte des Bauwerks zu definieren bzw. diese Voxelbereiche auszuwählen (= orangene Voxel, siehe Kapitel 5.3). Anschließend kann der Prüfer das Bildmaterial sichten und hinsichtlich Schäden analysieren. Dabei werden gefundene Schäden für jedes Bild verzeichnet und mithilfe des neuen Schadenskatalogs (siehe Kapitel 4.2) und Algorithmus (siehe Kapitel 5.3) bewertet.

6.2 Kostenermittlung

6.2.1 Brückenprüfung mit konventionellem Prüfverfahren nach DIN 1076

Vorbereitung der Prüfung

Die vorangegangenen Arbeitsschritte werden im Folgenden monetär verknüpft, um die Prüfarbeit hinsichtlich ihrer Kosten und Wirtschaftlichkeit vergleichen zu können. Bei den Kosten handelt es sich um ermittelte Durchschnittswerte aus Literatur und Praxis. Das Ziel soll ein Eingabetool sein, mit welchem die Kosten für die geplante Prüfung im Vorhinein errechnet werden können. Die Hauptprüfung nach DIN 1076 [69] wird größtenteils an externe Dienstleister vergeben, da vor allem Kreise und Städte nicht genügend Personal für diese aufwendigen Arbeiten zur Verfügung haben. Die einzelnen zu vergebenen Aufgaben sind im Anhang auf Abb. 9.26 dargestellt.

Ein zu beauftragender Prüflingenieur hat einen Stundensatz von 91 €/h, sein Assistent wird mit 67 €/h kalkuliert. Als Mittelwert ergibt sich daraus 79 €/h. Dabei handelt es sich um Nettopreise, sodass die gesetzliche Mehrwertsteuer von 19 % aufzuaddieren ist. Die Sätze entstammen dem Tarifvertrag für den öffentlichen Dienst der Länder (TV-L) und stimmen ebenfalls mit realen Stundensätzen von Prüfbüros überein. Die Allgemeinen Geschäftskosten (AGK) und Wagnis und Gewinn (WuG) des Unternehmens sind in dem genannten Stundenlohn enthalten. Ebenso verhalten sich Hilfsmittel wie Laptops, Kameras oder persönlicher Schutzausrüstungen. Nicht impliziert sind Kosten des Firmenfahrzeugs (8 €/h) oder der Auslöse (Verpflegungsmehraufwand = 3 €/h bei > 8h Arbeitszeit oder > 100 km vom Arbeitsort entfernt). Diese können aber auch auf den Mittellohn umgelegt werden. Ebenfalls nicht im Mittellohn enthalten sind die Kosten für Mehrarbeit und das Arbeiten außerdem der Regelarbeitszeit. Diese werden durch einen prozentualen Zuschlag berücksichtigt, welche durchaus zwischen öffentlichem

Dienst und der freien Wirtschaft variieren. An dieser Stelle wird ein Mittelwert gewählt (siehe Tab. 6.1). [188][192][280][381]

Zuschlag	% bzw. Faktor
Mehrarbeit (> 8h)	0 % bzw. 1,00
Nacht (23-6 Uhr)	25 % bzw. 1,25
Samstag	50 % bzw. 1,50
Sonntag	75 % bzw. 1,75
Feiertag	100 % bzw. 2,00

Tab. 6.1: Zuschläge für Stundenlohn bei Abweichung zur Regelarbeitszeit (in Anlehnung an [352][381])

Die Prüfungsvorbereitung variiert nach Bauwerksgröße und Begebenheiten. Für das Beschaffen der Dateien in SIB-Bauwerke [387] wird ein Zeitanatz von 0,10 h kalkuliert. Anschließend ist der bestehende Prüfbericht zu drucken und zu sichten (Zeitanatz 0,15 h). Je nach Komplexität des Bauwerks und Anzahl der Schäden, kann der kalkulierte Zeitanatz mit einem variablen Faktor (siehe Tab. 6.2) erhöht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Brücken derart komplexe und unikale Bauwerke sind, dass diese Faktoren bei besonders großen Brücken nicht mehr realistisch sind und der Erhöhungsfaktor in diesen Fällen händisch anzupassen ist. [192][220][312]

Brückenfläche	Vorhandene Zustandsnote		
	1,0 – 1,9	2,0 – 2,9	3,0 – 4,0
≤ 500 m ²	1,0	1,0	1,5 – 2,0
500 m ² – 2.000 m ²	1,0	1,5 – 2,0	2,0 / 3,0
> 2.000 m ²	1,5 – 2,0	2,0 – 3,0	2,5 – 4,0

Tab. 6.2: Zuschlagsfaktor für Vorbereitung von Brückenprüfungen (in Anlehnung an [381])

Eine optionale Vorarbeit zur Prüfung ist die Ortsbesichtigung. In den meisten Fällen wird aus Kosten- und Zeitgründen auf diese verzichtet. Sollte diese jedoch vonnöten sein, um erforderliche Verkehrssicherungsmaßnahmen oder Zugangstechnik einschätzen zu können, ist es ratsam, alle Beteiligten (Baulastträger, Behörde etc.) zu dieser einzuladen. Eine Vorortbesichtigung setzt sich kostenmäßig aus den An- und Abfahrtskosten sowie den Personalkosten vor Ort zusammen. Dabei dauert diese in der Regel unter vier Stunden (= 0,5 Arbeitstag AT Prüfingenieur) und die Anreise liegt dabei nur in Ausnahmen bei über 150 km. [352]

Des Weiteren sind alle einzuholenden Genehmigungen vom Prüfingenieur zu prüfen, vorzubereiten und zu beantragen. Teilweise können solche nur durch qualifiziertes Personal beantragt werden (z.B. Betra-Antragsteller für Gleissperrungen bei der Bahn). Die erforderliche Bearbeitungs- bzw. Wartezeit für die Genehmigungen sind zu berücksichtigen. Diese werden nicht gesondert verrechnet, da die Wartezeit mit anderen Arbeiten gefüllt werden kann. Für die Beantragung selbst fallen meist keine Kosten an, da beispielsweise die Deutsche Bahn bei

einer Betra-Beantragung gemäß EBKrG [101] zur unentgeltlichen Unterstützung verpflichtet ist. Abb. 9.26 im Anhang stellt alle weiteren Kosten und Zeitansätze als Durchschnittswert für diverse Genehmigungsverfahren dar. Wenn für den Zugang zur Brücke Geräte wie Brückenuntersichtgeräte, Hubsteiger oder Teleskopbühnen gebraucht werden, ist ein pauschaler Zeitaufwand von 0,25 h für die Anmietung und Abstimmung des Dienstleisters einzukalkulieren. Die Kosten für diese Position werden im weiteren Verlauf genauer erörtert. Der Zeitaufwand für interne Absprachen, das Einteilen von Personal oder das Erstellen einer Gefährdungsbeurteilung wird mit 0,25 h veranschlagt. [352][381]

Durchführung der Prüfung

Die Anfahrt zur Brücke ist der erste Schritt der Prüfungsdurchführung. Dabei ist von einer Durchschnittsgeschwindigkeit, welches das Firmenfahrzeug zum Einsatzort fährt, von 100 km/h auszugehen [161][352]. Die Fahrzeugkosten setzen sich zusätzlich aus den Sprit- sowie den laufenden Betriebskosten wie Wertverlust, Versicherung und Reparatur zusammen. Für die Berechnung wird ein VW Golf Variant gewählt, sodass sich ein Kostenansatz von 26,9 ct/km ergibt (entnommen aus [4] oder direkt berechnet mit [198]). Die Kosten für Diesel betragen dabei 1,70 €/l und der durchschnittliche Verbrauch 7 l/100 km. Die Gesamtkosten für die Anfahrt bzw. Abfahrt des Personals berechnet sich mithilfe von (Gl. 67).

$$\text{Gesamtkosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] = \frac{\text{Personen} \cdot \text{Stunden} \cdot \text{Stundenlohn}}{100 \text{ km}} + \frac{\text{Fahrzeugkosten}}{100} \quad (\text{Gl. 67})$$

Mietgeräte von externen Dienstleistern für den Zugang zur Brücke werden entweder pro Stunde oder pro Tag berechnet. Das Bedienpersonal, Kraftstoff sowie die An- und Abfahrtskosten, bei nicht eigener Abholung des Geräts, sind im Mietpreis enthalten. Tab. 9.37 im Anhang beinhaltet eine Übersicht zur Abschätzung über Anlieferungs- und Abholungskosten diverser Mietgeräte. In der Regel werden ab einem sechsständigen Einsatz Tagespauschalen abgerechnet. Bei Überschreitung der acht Stunden, wird jede weitere Stunde einzeln abgerechnet. Gegebenenfalls kommt einen Überstundenzuschlag von bis zu 25 % hinzu. Pro Einsatz kommt ein Versicherungsbetrag hinzu, welcher meist unter 50 € liegt. Zusätzlich ist der Betriebsstoff, meistens Diesel, zu berücksichtigen. Eine durchschnittliche Arbeitsbühne verbraucht circa zwei bis vier Liter Diesel pro Stunde, was zusätzliche Kosten pro Stunde von ca. 3,40 €–6,80 € verursacht. Eine exakte Berechnung ist aufgrund der Preisunterschiede zwischen den Unternehmen, Geräten sowie den meist nicht öffentlich zugänglichen Mietkosten nicht möglich. Eine grobe und gemittelte Übersicht der Preise ist im Anhang in Tab. 9.38 und Tab. 9.39 zu finden. Wird das Mietgerät selbst bedient bzw. gibt es ein installiertes Besichtigungsgerät, wird eine Einweisungszeit von 0,20 h kalkuliert. Die Kosten für ggf. notwendige Verkehrssicherungsmaßnahmen sind außerdem zu berücksichtigen. Ist diese nötig, sind in den Kosten meistens die Einrichtung, Inbetriebnahmen sowie Abbau inbegriffen. Die Maßnahmen sind immer sehr individuell, eine Übersicht von Durchschnittswerten kann jedoch Tab. 9.40 im Anhang entnommen werden. Die Sperrungen sind meistens längenbezogen. In Tab. 9.40 bildet eine Länge von 100 Metern die Grundlage. Die Maßnahmen sind täglich zu kon-

trollieren, was mit 0,25 h Zeiteinsatz für den Prüfenieur kalkuliert wird. Örtliche Einweisungen und Dispositionen zwischen mehreren Parteien vor Ort oder zwischen dem Prüfenieur und seinem Team sind mit 0,10 h kalkuliert. Bei großen Bauwerken ist der Wert entsprechend zu erhöhen. [189][352][390]

Die Kosten für die Brückenprüfung als solche ist abhängig von der Größe des zu prüfenden Bauwerks. Diese summieren sich aus den Lohnkosten des prüfenden Personals sowie den Mietkosten der Besichtigungsgeräte und ggf. den Vorhaltekosten für Verkehrssicherungsmaßnahmen. Ein grober Erfahrungswert für die handnahe Brückenprüfung ist, dass an einem Arbeitstag inkl. An- und Abfahrt circa 200-250 m² Brückenfläche geprüft werden kann [115][192]. Eine Formel (siehe (Gl. 68)) für die Abschätzung des zeitlichen Aufwands der Brückenprüfung für einen Prüfenieur samt Assistenten in der Zeiteinheit Stunden bietet der ‚Verein zur Förderung der Qualitätssicherung und Zertifizierung der Aus- und Fortbildung von Ingenieurinnen/Ingenieuren der Bauwerksprüfung‘ (VFIB). Diese berücksichtigt die Art der Konstruktion sowie weitere Rahmenbedingungen und ist durch reale Aufwandswerte ermittelt worden: [381]

$$t = [X + S \cdot (2,0833^{-12} \cdot A^3 - 3,1667^{-7} \cdot A^2 + 0,018167 \cdot A)] \cdot Y \cdot N \cdot B \quad (\text{Gl. 68})$$

mit t (Prüfzeit in h), A (Brückenfläche in m²), X (Grundaufwand der Prüfung, festgelegt auf $X = 10$ h), S (Schwierigkeitsfaktor zwischen 1,0-1,65 %), Y (Prüfungsart, hier $Y = 1,0$ [-]), N (Standort, hier $N = 1,1$ [-]), B (Faktor für aktuelle Zustandsnote, hier $B = 1,1$ [-]), Zahlenwerte [h/m²]

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die ermittelten Zeitaufwände in einer einfachen Formel vereint werden, welche den Zeitaufwand der Brückenprüfung errechnet. Dafür dient (Gl. 68) aus [381] als Grundlage. Besonders der kubische Term in runden Klammern soll dafür verarbeitet werden. Er bildet den Zeitaufwand für die Prüfung aller Brückenflächen ab und wird mit Hilfe von Excel linearisiert, da der Zeitaufwand gleichbleibt und nur von der Brückenfläche abhängt (siehe (Gl. 69)).

$$t = [X + S \cdot (0,0166 \cdot A + 1,3054)] \cdot Y \cdot N \cdot B \quad (\text{Gl. 69})$$

Der Term aus Prüfungsart (Y), Standort (N) und aktueller Zustandsnote (B) wird zu einem gleichbleibenden Faktor gekürzt. Die Prüfungsart ist bei der vorliegende Betrachtung stets die Hauptprüfung, was nach [381] $Y = 1,0$ bedeutet. N wird gleich 1,1 gesetzt, da die meisten Brücken im Bereich von Bundesfernstraßen liegen [36][381]. 70 % aller Brücken an Bundesfernstraßen werden mit 2,0 – 2,9 bewertet, während die durchschnittliche Benotung von Bahnbrücken bei 2,4 liegt, was nach [381] zum Faktor $B = 1,1$ führt [36][64]. Das Ergebnis von 1,21 wird im weiteren Verlauf als realistisch bestätigt. Zudem wird in (Gl. 69) der Grundaufwand der Prüfung X zu Null gesetzt, da alle anfallenden Zeitfaktoren separat ermittelt und in die Berechnung einzeln einfließen werden. Der Schwierigkeitsfaktor S wird im Folgenden durch einen Geometriefaktor F ersetzt, wovon die Erörterung folgt. (Gl. 70) zeigt die neue, gekürzte Formel zur Ermittlung der Prüfzeit in Stunden.

$$t = (0,0166 \cdot A + 1,3054) \cdot 1,21 = 0,0201 \cdot A + 1,58 \approx 0,0201 \cdot A + 1,75 \quad (\text{Gl. 70})$$

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Ermittlung der Prüfzeit ermittelt sich folglich aus einem von der Brückenfläche abhängigen Term sowie einem konstanten Grundaufwandswert von 1,58. Dieser erlaubt realistische Ergebnisse auch für kleine Brücken. Für eine bessere Handhabung in den weiteren Rechenschritten wird der konstante Anteil auf die nächste Viertelstunde, also auf 1,75, aufgerundet. Abb. 9.27 im Anhang sowie (Gl. 71) zeigen deutlich, dass dieser konstante Anteil bei großen Brückenflächen irrelevant wird.

$$f(A) = \frac{1,75}{0,0122 \cdot A} = \frac{143,44}{A} \quad \text{mit } \lim_{A \rightarrow \infty} f(A) = 0 \quad (\text{Gl. 71})$$

Ein neuer Faktor $U = 0,7$ soll den Zeitaufwand für den Assistenten aus der Zeitberechnung herausfiltern und nur die tatsächlichen Prüfstunden am Bauwerk ermitteln. Dieser setzt sich zusammen aus 0,5, der Hälfte der Zeit, und 0,2, der längeren Prüfzeit, die der Ingenieur ohne Assistenten braucht. Nach [291][381] betragen die Kosten am Ende einer Bauwerksprüfung ca. 70 – 80 % der zuvor kalkulierten Kosten. Dieser Fakt, übertragen auf die Zeit, wird mit einem weiteren neuen Faktor $R = 0,8$ berücksichtigt. Multipliziert mit (Gl. 70) ergibt sich mit den hinzugekommenen Faktoren:

$$t = 0,0201 \cdot A \cdot U \cdot R + 1,75 = 0,0113 [h/m^2] \cdot A + 1,75 \quad (\text{Gl. 72})$$

Die Prüfung der Brückenausstattung ist in (Gl. 68) ebenfalls impliziert und wird mit einem pauschalen Wert von 10 % gewertet [381]. Die Berechnung für die Prüfzeit $t_{\bar{u}}$ des Brückenüberbaus soll einzeln erfolgen, weswegen die Brückenausstattung durch eine Abminderung um 10 % des linearen Terms aus (Gl. 72) bzw. der Zeitermittlung herausgerechnet wird (siehe (Gl. 73)). Außerdem muss die Brückenfläche auf die Sichtfläche transponiert werden. Faktor $K = 1,20$ soll für den Überbau berücksichtigen, dass die Ansichtsfläche der Brückenunterseite um ca. 20 – 40 % größer ist als die bekannte Brückenfläche (siehe Kapitel 3.2 oder [140]). Der zuvor bereits genannte und erhöhende Geometriefaktor F , welcher den Schwierigkeitsfaktor S nach [381] ablöst, soll die Flächen der komplexen Tragstruktur besser erfassen und ist entsprechend Tab. 6.3 zu wählen (siehe (Gl. 73) für den Überbau).

$$t_{\bar{u}} = 0,0013 \cdot A \cdot 0,9 \cdot K \cdot F + 1,75 = 0,0122 [h/m^2] \cdot A \cdot F + 1,75 \quad (\text{Gl. 73})$$

Die mit Gleichung (Gl. 73) errechnete Prüfzeit für den Überbau deckt sich mit den zuvor genannten Aussagen aus der Literatur, dass ca. 250 m² Brückenfläche an einem Arbeitstag geprüft werden können. Zu dem hier ermittelten Wert muss noch der Unterbau sowie die Brückenausstattung, die An- und Abfahrt sowie die Koordination addiert werden, sodass die erzeugte Gleichung diesbezüglich verifiziert ist. Auch der Vergleich mit der großen Talbrücke Nuttlar, für die ein Zeitaufwand von 720 Stunden angegeben ist, bestätigt die erzeugte Gleichung für den Überbau. Mit (Gl. 73) ergibt sich ein Zeitaufwand von 330 h, was durchaus realistisch ist, da die Pfeiler, der Unterbau sowie die gesamte Ausstattung nicht im hier ermittelten Wert impliziert ist. Für die Berechnung der nötigen Arbeitstage können acht- bis zwölfstündige Arbeitstage kalkuliert werden, um so ggf. den Einsatz von gemieteten Zugangsgerä-

ten zu reduzieren. Nach § 15 Abs. 1b Arbeitsschutzgesetz (ArbSG) [8] ist eine tägliche Arbeitszeit auf Baustellen, worunter das Prüfen von Brücken fällt, bis 12 Stunden unter Wahrung der gesetzlichen Ruhezeiten erlaubt. [312][352][380]

Kriterium	F [-]
glatte Ansichtsflächen (Hohlkästen) oder zwei Hauptträger	1,0
orthotrope Fahrbahnplatten	1,3
Trägerroste	1,2

Tab. 6.3: Neuer Geometriefaktor F (in Anlehnung an [381])

Zu den oben definierten Lohnkosten von 91 €/h für einen Prüferingenieur wird ein Kleingeräteanteil von 1,65 €/h addiert [352]. Dieser beinhaltet die verwendeten Geräte wie Leitern, Abklopfhammer etc. Somit ergeben sich Lohnkosten von 92,65 €/h. Kommt ein Prüfteam mit einem Assistenten zum Einsatz, hat dieses einen durchschnittlichen Lohn von 79 €/h. Summiert mit dem Kleingeräteanteil und dividiert durch den Faktor $U = 0,70$, um lediglich die Arbeit eines Ingenieurs zu ermitteln, ergibt sich ein Stundenlohn von 115,21 €. Die Differenz von fast 25 % bestätigt, dass die Ansätze nach [381] sehr hoch sind und die realen Kosten meist nur ca. 80 % der Kalkulation betragen. Für die Kalkulation der Lohnkosten wird die ermittelte Prüfzeit t_{ij} nach (Gl. 73) auf eine Viertelstunde aufgerundet. Für das Sicherungspersonal sind beispielsweise für SiPos (Sicherungsstellen) 34 €/h und für Sicherheitsaufsichten (Sakra) 36 €/h einzukalkulieren [352]. Sollte ein Prüfeinsatz so weit entfernt sein, dass es zu Übernachtungen des Personals kommt, wird eine Zulage von 79 € pro Person pro Tag sowie eine Verpflegungspauschale von 28 € pro Tag fällig. Ob dies notwendig ist, ist einzeln zu prüfen und hängt von der Entfernung zum zu prüfenden Objekt sowie dessen Größe ab. [291][352][373]

Die Kosten für die Räumung sowie das Verlassen der Baustelle sind analog zu denen der Einrichtung bzw. Anfahrt und können übertragen werden.

Nachbereitung und Auswertung der Prüfung

Die Nachbereitung der Brückenprüfung findet im Büro statt und wird in den Kapiteln 6.1.1 und 2.1.1 gesondert beschrieben. Diese Arbeit ist stark abhängig von der Größe des Bauwerks und wird daher pauschal mit 0,75 h angenommen. Der Wert wird anschließend, abhängig von der Brückengröße, nach Tab. 6.2 angepasst. Der Abschluss bzw. die Übergabe des Berichts an den Baulastträger wird mit 0,10 h angenommen. [192]

Im Anhang sind in Tab. 9.41 alle Kosten und Positionen für die handnahe Brückenprüfung zusammengestellt.

6.2.2 Zeit- und Kostenberechnungstool für konventionelles Prüfverfahren nach DIN 1076

Da eine UAS-Unterstützung bei der Brückenprüfung derzeit nicht die Regel ist und entsprechende Dienstleister fehlen, sind die Kosten für diese bisher nicht sehr öffentlich bekannt und

zum anderen auch verhältnismäßig hoch. Um überprüfen zu können, ob eine UAS-Unterstützung bei einer vorhandenen zu prüfenden Brücke lohnenswert ist, sind nicht nur die diversen Arbeitsschritte der handnahen Prüfung im vorherigen Abschnitt monetär bewertet worden, sondern sind diese in einem Eingabetool zur Kostenberechnung des jeweiligen Prüfungstyps verarbeitet worden. So sollen die Kosten für beide Prüfungsformen einfach ermittelt werden können. Im Folgenden wird das Kostenprogramm für die handnahe Brückenprüfung erörtert. In Kapitel 6.2.4 folgt die Darstellung des Kostenberechnungstools für die UAS-unterstützte Brückenprüfung. Eine Anpassung der beiden Eingabeprogramme hinsichtlich aktueller Preisentwicklungen ist jederzeit möglich.

Wie im Berechnungstool in Kapitel 3.3.2 zur Auswertung der befliegbaren Bereiche einer Brücke, sind auch hier zunächst Grunddaten vom Benutzer händisch in entsprechend markierte Eingabefelder zu tätigen. Dies erfolgt durch Anklicken in Frage kommender Auswahlfelder (siehe Abb. 6.1). Dabei handelt es sich beispielsweise um die Konstruktionsart (Länge, Breite, Faktor F), Daten zum Stundenlohn (z.B. Zuschlag durch Mehrarbeit) und ob Genehmigungen einzuholen sind.

Geometriefaktoren <i>F</i> zur Berücksichtigung der Konstruktionsarten		
F	Kriterium	Faktor [-]
<input type="checkbox"/>	glatte Ansichtflächen (Hohlkasten) zwei Hauptträger	1,00
<input type="checkbox"/>	orthotrope Fahrbahnplatten	1,30
<input type="checkbox"/>	Trägerroste	1,20

Abb. 6.1: Eingabe und Auswahl des Geometriefaktors *F* für handnahe Prüfungen

Des Weiteren sind die Kilometeranzahl zum Bauwerk für die Berechnung der An- und Abfahrt sowie die Mengen für Fremdleistungen wie Mietgeräte oder Sicherungsmaßnahmen, welche ebenfalls durch Anklicken oder mithilfe von Dropdown-Listen funktionieren, einzutragen. Alle Arbeitsschritte und Zeitwerte aus Kapitel 6.2.1 sind so im Eingabetool hinterlegt. Ist eine Brücke besonders aufwendig in der Vorbereitung, kann der vorgegebene Zeitfaktor um flexibel auswählbare Faktoren erhöht werden (Beispiel siehe Abb. 6.2).

Nach allen Eingaben durch das zu prüfende Personal ergibt sich mithilfe des Eingabetools die benötigte Prüfzeit für den Brückenüberbau. Abschließend werden mit diesem Ergebnis die Gesamtkosten für die handnahe Prüfung errechnet und aufgeschlüsselt nach Anfahrts-, Prüf-, Miet- und Sicherungskosten ausgegeben.

Eingabefeld	
Brückenbreite B	... m
Brückenlänge L	... m
Prüfungsvorbereitung	
Anforderung der Daten/SIB-Bauwerke	0,10 h
Durchsicht alter Prüfbericht/Messprotokolle	0,15 h
Beauftragung Leistung Dritter	0,25 h
Sonstige organisatorische Aufgaben	0,25 h
Prüfungsnachbereitung	
Erstellung Prüfbericht	0,75 h
Übergabe und Abstimmung	0,10 h
	1,60 h
	1,5
	2
	2,5
Geräte	
Mietgeräte ohne Personal	nicht erforderlich
Sonstige Geräte	nicht erforderlich
Mietgeräte mit Personal	Teleskoparbeitsbühne bis 12 m
	Teleskoparbeitsbühne bis 20 m
	Teleskoparbeitsbühne bis 28 m
	Lkw-Arbeitsbühnen bis 30 m
	Lkw-Arbeitsbühnen bis 37 m

Kosten/Tag	
	0,00 €/d
	0,00 €/d
	0,00 €/d
	0,00 €/d

Abb. 6.2: Beispiel Eingabefelder für Bauwerksgeometrie, Prüfungsvorbereitungen und Mietgeräte

6.2.3 Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung

Vorbereitung der Prüfung

Die Befliegung der Brücke erfolgt durch einen externen und spezialisierten UAS-Dienstleister bzw. Piloten. Dabei soll das nötige Bildmaterial, nach kurzer Absprache über wichtige oder essentielle Bauwerksbereiche und die allgemeine Flugplanung, aufgenommen werden, um dieses anschließend im Büro durch den Prüfenieur auswerten zu können. Ein Drohnenpilot hat einen durchschnittlichen Stundenlohn von 72 € netto. Auch hier sind darin alle zusätzlichen Kosten wie z.B. AGK, Versicherungen etc. enthalten. Die Kosten des Prüfenieurs sind hier analog zu Kapitel 6.2.1 und können diesem entnommen werden. Bei Dienstleistern von UAS werden meistens Tagespauschalen (8 h) abgerechnet, welche zwischen 2.200 und 4.000 € liegen. Für die folgenden Betrachtungen von Kosten und Zeit wird ein mittlerer Tagessatz von 2.830 € angesetzt. Darin sind, abgesehen von den Anfahrtkosten, alle weiteren Kosten enthalten. Mit einem Stundenlohn von 72 € und meist zwei anreisenden Personen ergeben sich Personalkosten von ca. 1.200 €, der Rest entfällt auf das Equipment. [207][339]

Für die Flugplanung samt Absprache mit dem Auftraggeber wird ein pauschaler Zeitaufwand für den Piloten von 0,2 h angesetzt. Das Akkumanagement, d.h. das Einplanen des Akkutauschs, sowie die Flugdauerschätzung wird pauschal mit 0,1 h kalkuliert. Eine Ortsbesichtigung ist in der Regel nicht vonnöten, da die Vorbereitung durch digitale Hilfsmittel wie Bilder und Pläne in den meisten Fällen ausreichend ist. Sollte es doch dazu kommen, sind die Bedarfswerte aus Kapitel 6.2.1 zu entnehmen. Für die Gefährdungsbeurteilung sowie die Auswahl des passenden technischen Equipments wird ein Zeitanatz von 0,5 h gewählt. Auch das Prüfen der Wetterlage ist darin enthalten. Sollten der Einsatz von zwei UAS nötig werden, wird dafür ein weiterer Ansatz von 0,2 h festgesetzt. Notwendige Flug- bzw. Aufstiegs genehmigungen sind vom Piloten zu prüfen und ggf. zu beantragen. Eine Übersicht über die Kosten der einzelnen Genehmigungen ist im Anhang auf Abb. 9.28 zu finden. Im Weiteren wird jedoch

angenommen, dass für den Inspektionsflug im innerstädtischen Bereich eine Einzelfallerlaubnis ausreichend ist. Sollte sich der Einsatz jedoch bei Kreuzungsbereich mit Personengefährdung ereignen, ist die aufwendige Genehmigung nötig. Dafür wird hier eine einmalige Gebühr von 200 € kalkuliert. [20][199][208][351][352][361]

Straßen- und Verkehrssicherungsmaßnahmen sind aufgrund der fehlenden Besichtigungsgeräte wie Arbeitsbühnen sind durchaus seltener notwendig. Sollten diese jedoch unvermeidbar sein, gelten die in Kapitel 6.2.1 definierten Kosten- und Zeitansätze.

Durchführung der Prüfung

Die einzelnen Arbeitsschritte ähneln sich zur handnahen Brückenprüfung nach DIN 1076 [DIN 1076] entsprechend Kapitel 6.2.1. Bei der Anfahrt des Piloten wird von einem VW Crafter ausgegangen, welcher 36,1 ct/km Kosten verursacht und nach (Gl. 67) Gesamtkosten inkl. Stundenlohn des Piloten von 1,80 €/km erzeugt. [4][198]. Die Baustelleneinrichtung, was hier das Aufbauen des UAS am Start- und Zielpunkt sowie die Fluganmeldung ist, wird mit 0,30 h kalkuliert. [293]

Die Befliegung selbst kann nach zwei standardisierten Systemen erfolgen: dem Gitterflugplan (Grid Flight Plan) senkrechter (Nadir) oder schrägen (Oblique) Aufnahme und dem Umfliegsplan (siehe Abb. 6.3). [240][288]

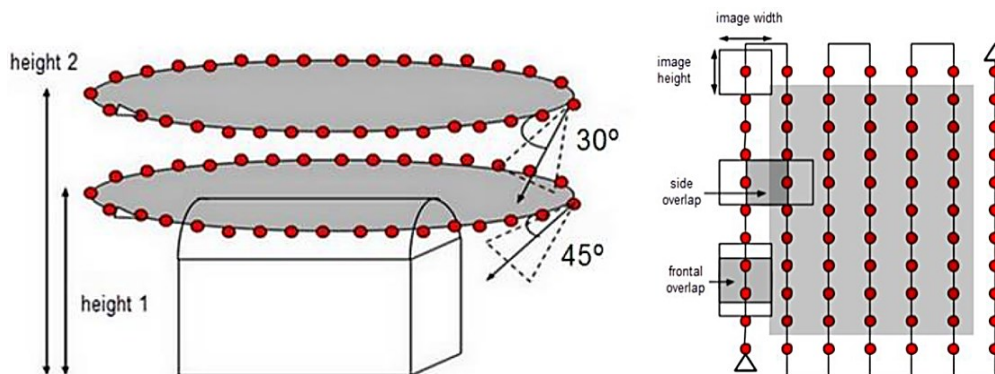


Abb. 6.3: l.: Grid Flight Plan; r.: Umfliegsplan ([240], S. 10)

Der Fokus bei der Befliegung liegt auf der Summe des aufgenommenen Bildmaterials, welches stark vom Sicherheitsabstand zum Bauwerk sowie der Bildüberlappung abhängig ist. Die beiden Aspekte werden vorher mit dem Prüfbüro bzw. Prüflingenieur abgestimmt. Dafür essentiell ist die in Kapitel 2.5.3 beschriebene ‚Ground Sample Distance‘ (GSD), die Bodenauflösung. Sie besagt, wie viele Zentimeter des aufzunehmenden Objekts pro Pixel dargestellt werden. [142][287][341][352]

Die Aufnahmefläche, welche aus den Ansichtsflächen der sichtbaren Bauteile des Überbaus besteht, ist die Grundlage für die Berechnung des Zeitaufwands für die Befliegung. Diese ist aufgrund der komplexen Struktur aus Haupt- und Querträgern sowie der orthotropen Fahrbahnplatte schwer ermittelbar, weswegen in Tab. 6.4 Werte für einen Geometriefaktor G angegeben sind, welche die Brückenfläche A entsprechend der Bauweise erhöhen sollen. Der

Grundwert der Brückenfläche wird dabei an sich bereits um 20 % erhöht. G setzt sich durch Summieren der vorhandenen Bauteile zusammen. Bei einer einfachen Balkenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte ergibt sich $G = 2,65$. Dabei wird G nur auf die Brückenbreite B , nicht die gesamte Brückenfläche A bezogen (siehe (Gl. 74)).

Kriterium	G [-]
glatte Ansichtsflächen / Hauptträgersystem	1,2
orthotrope Fahrbahnplatten	1,2
Trägerroste / Querträger	0,25

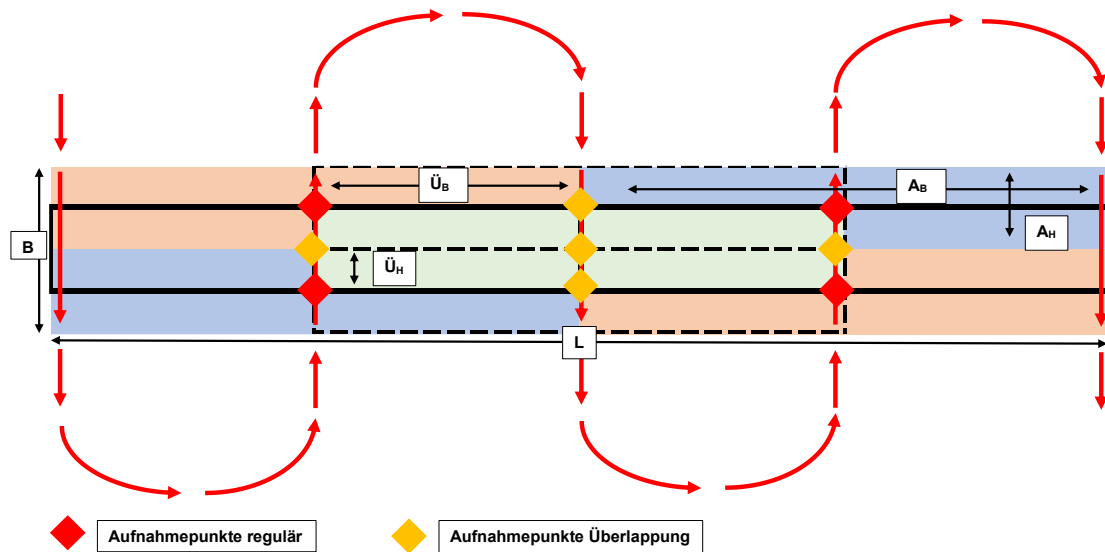
Tab. 6.4: Geometriefaktor G

Die Bilderanzahl n , welche benötigt würde, um die vorhandene Brücke fotografisch aufzunehmen, ergibt sich nach Gleichung (Gl. 74). Dabei werden Brückenlänge und Brückenbreite unterschieden, da auch das Bildformat rechteckig und somit in Länge und Breite unterschiedlich ist. Die sog. oberen großen Klammern sorgen für das Aufrunden auf ganze Zahlen, da es sich bei dem Ergebnis um Bildaufnahmen handelt. Für eine Photogrammetrie wird üblicherweise ein Überlappungsfaktor von mindestens 60 % längs und 40 % quer genutzt, um blinde Stellen zu vermeiden [167]. Da die hier vorliegende Auswertemethodik mit der voxelisierten Punktwolke technologisch an die Photogrammetrie angelehnt ist, wird auch hier mit entsprechenden Überlappungsquoten gerechnet. So ergibt sich eine Bilderanzahl n mit Überlappung nach (Gl. 74) und Abb. 6.4. Die Höhe des Überlappungsgrads hat neben der GSD einen erheblichen Einfluss auf die Anzahl der aufgenommenen Fotos. So ergeben sich 619 % mehr Fotos, wenn die Überlappungsrate auf 85/75 erhöht wird, weswegen hier die Überlappung auf maximal 75/65 festgelegt wird. Abb. 9.29 im Anhang verdeutlicht den Überlappungseinfluss auf die Bilderanzahl.

$$n = \left\lceil \frac{L - A_B \cdot \ddot{U}_B}{A_B - A_B \cdot \ddot{U}_B} \right\rceil \cdot \left\lceil \frac{B \cdot G - A_H \cdot \ddot{U}_H}{A_H - A_H \cdot \ddot{U}_H} \right\rceil \quad (\text{Gl. 74})$$

$$\text{mit} \quad \left\lceil \frac{L - A_B \cdot \ddot{U}_B}{A_B - A_B \cdot \ddot{U}_B} \right\rceil \geq 1,0 \quad \text{und} \quad \left\lceil \frac{B \cdot G - A_H \cdot \ddot{U}_H}{A_H - A_H \cdot \ddot{U}_H} \right\rceil \geq 1,0$$

Durch Multiplikation von n mit der Brückenfläche A ergibt sich die insgesamt aufgenommene Bildfläche A_B (Gl. 75) und aus dieser anschließend die benötigte Aufnahmezeit t (Gl. 76). Dafür ist ein Leistungsansatz FL_B nötig, welcher die Zeiten für den Akkuwechsel und die damit verbundenen Hin- und Rückflüge zum Startpunkt berücksichtigt. Die Zeit für den genannten Akkuwechsel wird mit 10 % der Gesamtflugdauer von 30 Minuten kalkuliert. Aus [135] wird $FL_B = 5.000 \text{ m}^2/\text{h}$ für die vorliegende Betrachtung festgesetzt, welcher jedoch durch die genannten 10 % auf $FL_B = 4.500 \text{ m}^2/\text{h}$ reduziert wird. Mit Verwendung von (Gl. 76) ergibt sich für die Aufnahme des Überbaus einer 100 m langen Brücke eine Aufnahmezeit $t = 3,45 \text{ h}$.



mit L (Brückenlänge [m]), B (Brückenbreite [m]), A_B (Breite der Aufnahme [m]), A_H (Höhe der Aufnahme [m]), \ddot{U}_B (Überlappungsfaktor für die Breite [%]), \ddot{U}_H (Überlappungsfaktor für die Höhe [%])

Abb. 6.4: I.: Flugroute zur Ermittlung der Bildanzahl ([116], S. 61)

$$A_B = n \cdot A \quad (\text{Gl. 75})$$

$$t = \frac{A_B [m]}{FL_B [m^2/h]} \quad [135] \quad (\text{Gl. 76})$$

Die Kosten für die Räumung sowie das Verlassen der Baustelle sind analog zu denen der Einrichtung bzw. Anfahrt und können übertragen werden.

Nachbereitung und Auswertung der Prüfung

Da es zur Zeit der Veröffentlichung dieser Arbeit keine Dienstleister gibt, welche Punktwolken voxelisieren und diesen die aufgenommenen Bilddateien zuordnen, wird für die Kostenermittlung das Verfahren der Photogrammetrie herangezogen, da es sich technisch ähnelt. Außerdem liegen die Kostenansätze auf der sicheren Seite, da die Photogrammetrie zum Teil sehr gute dreidimensionale, auf Bildern basierende Modelle erzeugt. Die zu voxelisierende Punktwolke ist nicht von dieser Qualität, da sie andere Anwendungsziele als die Photogrammetrie verfolgt.

Der UAS-Pilot hat die erzeugten Bildaufnahmen an eine entsprechende Softwaredienstleistung zu senden, bei der die Punktwolke erzeugt wird. Dafür wird ein Zeiteinsatz von 0,15 h angesetzt. Aus den Bildern bzw. den darin enthaltenen GPS-Daten wird eine Punktwolke erzeugt, an welcher die einzelnen Bilder verortet sind. Der Zeitaufwand dafür beträgt schätzungsweise einen Arbeitstag [60]. Für diesen Vorgang bei der vergleichbaren Photogrammetrie werden pro Gigapixel Datenmenge zehn bis zwölf Euro berechnet. So lassen sich die Kosten für die Modell-, bzw. Punktwolkenbearbeitung nach (Gl. 77) berechnen. [60][152]

$$Kosten [€] = \frac{Bildbreite [Pixel] \cdot Bildhöhe [Pixel]}{1.000.000.000} \cdot n \cdot 20 € \quad (\text{vgl. [60][152]}) \quad (\text{Gl. 77})$$

Anhand der voxelisierten Punktwolke findet abschließend die Sichtung des Bildmaterials durch den Prüferingenieur statt. Die Durchsicht des alten Prüfberichts wird erneut mit 0,2 h angesetzt. Anschließend sind in einem ersten Schritt die Bauwerksbereiche von konstruktiv hoher Bedeutung (Verbindungen, Knotenpunkte, hoch belastete Bereiche) händisch auszuwählen und die entsprechenden Voxel als orangene Voxel nach Kapitel 5.3 zu definieren. Dafür wird ein Zeiteinsatz von 0,5 h gewählt. Bei der anschließenden Sichtung der Bilder wird ein durchschnittlicher Zeitaufwand von drei Sekunden pro Fotoaufnahme kalkuliert. Für die Schadensbewertungen, welche länger dauern, wird ein Zeitaufschlag von 0,5 h kalkuliert. Die Zeit t_S , die der Prüfer für die Schadenserkenkung benötigt, lässt sich abschließend nach (Gl. 78) ermitteln. Die Übergabe des Berichts an den Baulastträger wird wie bei der händischen Prüfung mit 0,10 h angenommen [192].

$$t_S [h] = 0,5 + n \cdot \frac{3 [Sek.]}{60 \cdot 60} \quad (\text{Gl. 78})$$

Im Anhang sind in Tab. 9.42 alle Kosten und Positionen für die Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung zusammengestellt.

6.2.4 Zeit- und Kostenberechnungstool für UAS-unterstütztes Prüfverfahren

Das Berechnungstool für die UAS-unterstützte Brückenprüfung ist dem in Kapitel 6.2.2 beschrieben grundlegend ähnlich. Der prinzipielle Aufbau ist gleich. Basisdaten sind zunächst einzutragen. Hinterlegte Faktoren, wie hier Faktor G statt F, sind automatisch geändert. Eine der größten Unterscheidungen liegt in den Daten der Kamera- und Drohnentechnik, welche nach Bedarf anpassbar sind (Ausschnitt siehe Tab. 6.5).

Flächenleistung Drohne		
Netto FL _N [m²/h]	5000,00 m²/h	
Zeit für Akkuwechsel etc.	10,00%	
Faktor K	0,40	
Brutto FL [m²/h]	1800,00 m²/h	
Flugzeit pro Tag		
		6,75 h
Bildauflösung		
	imW	imH
42.177.408 Pixel	7952 Pixel	5304 Pixel

Tab. 6.5: Beispiel Grundwerte für Drohnen- und Kamertechnik zur Kostenermittlung

Die nötige Flug- und Auswertezeit für die Prüfung des Überbaus und damit die Gesamtkosten ermitteln sich aus der aufgenommenen Bildanzahl, welche unter Berücksichtigung der Bildüberlappung berechnet wird. Die Kosten werden auch hier aufgeschlüsselt in die einzelnen Positionen angegeben.

Tab. 6.6 zeigt den Vergleich zweier nicht realer, zu prüfende Brücken, einer Balken- sowie einer Bogenbrücke, mit orthotropen Fahrbahnplatten. Für beide wird entsprechendes Szenario

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

in den Kostenberechnungstools eingegeben. Tab. 6.6 zeigt die entsprechenden Endergebnisse. Es wird deutlich, dass die UAS-unterstützte Prüfung in regulären Fällen aktuell teurer ist als das konventionelle Verfahren. Sobald die händische Prüfung jedoch aufwendige Hilfsmittel wie ein Prüfschiff benötigt, kann die Unterstützung mittels UAS durchaus lohnenswert sein. Vor allem aber beim Zeiteinsatz und einer Ersparnis von ca. 50 % kann sie überzeugen.

	Balkenbrücke		Bogenbrücke	
	DIN 1076	UAS	DIN 1076	UAS
Länge [m]	45		57	
Breite [m]	18		18	
Fläche [m ²]	800		1.025	
Note letzte Prüfung	2,6		2,8	
Mietgerät	28 m Teleskop	-	Schiff	-
Verkehrssicherungen	-		halbseitige Sperrung m. Ampel	
Anfahrt [km]	70		50	
Prüfzeit [h]	14,25	7,15	19,75	9 h
Gesamtkosten [€]	2.692,54	7.228,56	15.478,38	13.167,13

Tab. 6.6: Wirtschaftlicher Vergleich zweier Brücken hinsichtlich unterschiedlichem Prüfverfahren

6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Das konventionelle, handnahe Prüfverfahren nach DIN 1076 [69] soll im Folgenden mit dem UAS-unterstützten Inspektionsverfahren mithilfe der Erkenntnisse aus Kapitel 6.2 einem Wirtschaftlichkeitsvergleich unterzogen werden. Dafür wird eine Parameterstudie durchgeführt, welche die Kosten für das Prüfen von Brücken, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, mit einer Grundfläche zwischen 50 und 20.000 m² untersucht. Die Geometriefaktoren werden mit $F = 1,3$ (Tab. 6.3) und $G = 1,2$ (Tab. 6.4) festgesetzt.

Die Kosten für die Prüfung sind maßgeblich von der erforderlichen Prüfzeit, der extern zugemieteten Höhenzugangstechnik sowie den Verkehrssicherungsmaßnahmen abhängig. Die besonders teuren Verkehrssicherungsmaßnahmen werden bei der Parameterstudie linear und für beide Verfahren einkalkuliert, was letztendlich zu einer ähnlichen Kostenentwicklung für beide Verfahren führt. Ein Grund dafür sind die teuren, zu mietenden Besichtigungsgeräte bei der händischen Prüfung, welche mit den derzeit noch hohen Pilot- und UAS-Preisen ausgeglichen werden (siehe Abb. 6.5). Die Zugangstechnik bei handnahen Prüfungen sowie Maßnahmen wie teilweise Straßen- oder Gleissperrungen sind sehr teuer und haben am Ende größeren Einfluss auf die Prüfungskosten als das Prüfpersonal. Vor allem bei der handnahen Prüfung sind die Mietgeräte (Arbeitsbühnen, Brückenuntersichtgerät, Besichtigungsschiff) nahezu immer von Nöten. Werden diese Kosten bei dem UAS-Verfahren nicht benötigt, können nach

derzeitigem Stand dadurch Kosten von circa 10 % eingespart werden. Bei Kreuzungsbauwerken ist dies jedoch nach aktuellem Regelwerk für UAS nicht der Fall. Insgesamt ist die UAS-Prüfung immer günstiger als die handnahe Prüfung, sobald für diese Verkehrssicherungen und Zugangsgeräte ab 2.400 € pro Tag zusätzlich anfallen. Außerdem kann es lohnenswert sein, eigenes Gerät anzuschaffen, was bei einigen Behörden der Fall ist. Beim UAS-unterstützten Verfahren hat letztendlich die Auswertzeit (Punktwolke und Schadensanalyse durch den Ingenieur) nach den Verkehrssicherungsmaßen den größten Einfluss auf die Gesamtkosten. Eine KI-unterstützte Auswertemethode könnte hier in Zukunft die Auswertzeit reduzieren [140]. Auch können die teuren Kosten für den Piloten gespart werden, indem eigenes Personal dahingehend ausgebildet wird. Letztendlich werden die erhöhten Kosten für UAS und Piloten auf der anderen Seite durch gemietete Zugangsgeräte ausgeglichen. Die kürzere Flugzeit vor Ort bedarf bei der späteren Auswertung am Computer mehr Zeit. Kleinere Beträge wie die An- und Abfahrtskosten zeigen ab einer Brückenfläche von 400 m² einen fast unerheblichen Anteil. Werden aber individuelle Prüfungsvorgänge betrachtet und verglichen, zeigt Tab. 6.6 deutliche Unterschiede zwischen den beiden Verfahren. Die Sprünge, welche auf Abb. 6.5 bis zu einer Brückengröße von 5.000 m² zu erkennen sind, liegen an den jeweiligen Tagessätzen für Mietgeräte sowie Piloten. Bei großen Brücken entfällt dieser Einfluss, da der Zeiteinsatz dabei nie unter einem Arbeitstag liegt.

Nicht monetär übersetzbar ist der Fakt von zu wenig vorhandenem Prüfpersonal. In Deutschland bieten ca. 200 Ingenieurbüros die handnahe Brückenprüfung nach DIN 1076 [69] an [372]. Durch die vorgegebenen Prüfintervalle, fallen stetig Brücken zur Prüfung an, die zum Teil nicht pünktlich untersucht werden können. Durch den Verzug der Prüfung können Schäden weiterwachsen und sich deren Folgen maximieren. Durch die Unterstützung der UAS entfällt die Prüfzeit vor Ort, sodass das Bildmaterial der Brücken rechtzeitig und vom Prüfer unabhängig erstellt werden und dieser die gesparte Zeit zur Auswertung nutzen kann. Auch wenn derzeit nicht genügend UAS-Dienstleister auf Bauwerksprüfungen spezialisiert sind, wird sich bei entsprechender Änderung der Regularien wie DIN 1076 [69] und RI-EBW-PRÜF [303] dieser Zustand verändern. [60][152][167][312]

Wird der Zeitaufwand verglichen, im Verhältnis zu den zuvor schwer vergleichbaren Gesamtkosten, zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Verfahren. Auf Abb. 6.6 sind sowohl die Gesamtzeitaufwände für das handnahe als auch das UAS-unterstützte Prüfverfahren sowie die einzelnen Zeiten rein für die Prüfung vor Ort dargestellt. Bei der handnahen Prüfung sinkt der Einfluss für die Vor- und Nachbereitung der Prüfung ab einer Brückengröße von 1.400 m² unter 8 %. Für UAS-unterstützte Prüfungen zeigt sich, dass ab einer Brückengröße von 600 m² die Auswertzeit kleiner ist als die Flugzeit vor Ort. Im Durchschnitt beträgt die Auswertzeit 57,1 % von der Aufnahmezeit. Der Zeitaufwand für die UAS-Prüfung ist durchschnittlich 35 % geringer als die handnahe Prüfung. Somit könnten die Prüfintervalle entsprechend reduziert werden.

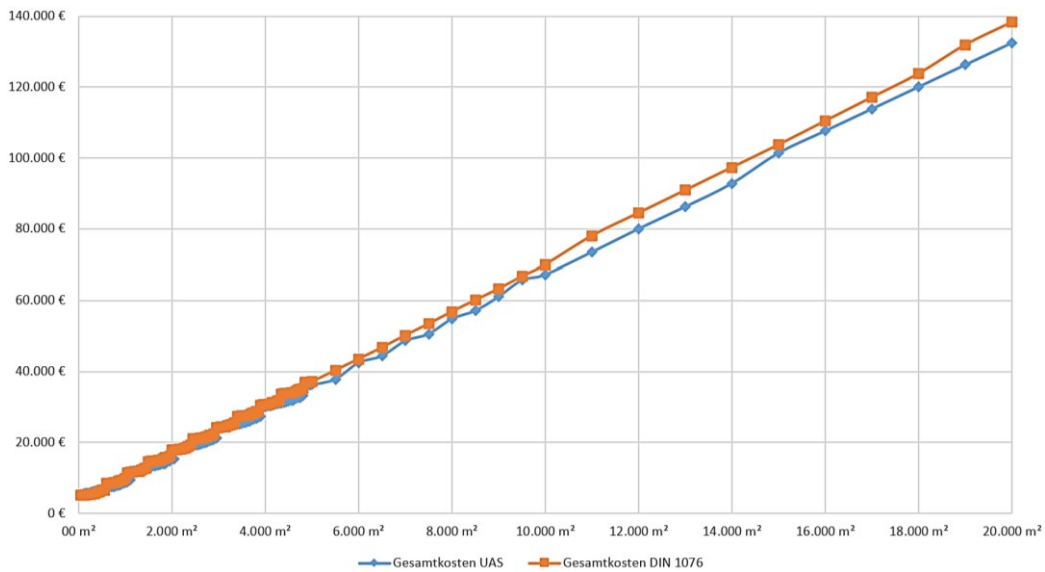


Abb. 6.5: Vergleich der Kosten für Verfahren handnah und UAS-unterstützt

Die Dauer einer Brückeninspektion ist maßgeblich für die Beeinflussung des Verkehrs verantwortlich. In der Regel müssen Straßen (einseitig) gesperrt, Verkehr umgeleitet oder per Ampelschaltung geregelt werden, was durch die folgende Stauentwicklung volkswirtschaftlich zu nicht benennbaren Kosten führt. Sinnvoll erscheint die Bauwerksprüfung daher in den Nachtstunden. Die Vergabe von öffentlichen Trägern richtet sich jedoch nach den reinen Prüfungskosten und das Haushaltsbudget, nicht nach den volkswirtschaftlichen Folgekosten. Diese sind beispielsweise Arbeitsausfall der Verkehrsteilnehmer, die Betriebs- und Verschleißkosten aller im Stau stehenden Fahrzeuge und Verkehrsmittel, der Mehrverbrauch von Kraftstoff sowie eventuelle Unfallfolgekosten. Nach [217] seien zehn Minuten Stau je Fahrzeug mit 3,20 € zu monetarisieren. Bei 15.000 Autos, die eine Stunde im Stau stehen, ergibt sich daraus ein Schaden von 288.000 €. Die Summe übersteigt die Kosten einer Brückeninspektion um ein Vielfaches. Mit (Gl. 79) können nach [231] ebenfalls Staukosten errechnet werden. [44][214][217][231][391]

$$Staukosten = \left(\frac{L [km]}{V_s \left[\frac{km}{h} \right]} - \frac{L [km]}{V_n \left[\frac{km}{h} \right]} \right) \cdot DTV \cdot Sperrzeit [h] \cdot \text{Personenkosten pro Std} [€] \quad (\text{Gl. 79})$$

mit L (Gesperre Länge [km]), V_s (Geschwindigkeit im Stau [km/h]), V_n (normale Fahrgeschwindigkeit [km/h]), DTV (durchschn. Tagesverkehr [-])

Da derzeit die Regularien für UAS-Flüge sehr streng sind und somit auch für diese an Brücken Verkehrssicherungsmaßnahmen getroffen werden müssen, fallen diese Stau- und Volkswirtschaftskoste bei beiden Verfahren gleichermaßen an. Allerdings spart die Befliegung ca. 35 % der handnahen Prüfzeit, was gleichzeitig zu Kosteneinsparung durch die Verkehrsbeeinflussung führt. Für jeden Tag, den zum Beispiel eine Autobahnbaustelle vor geplantem Fertigstellungstermin, früher beendet wird, erhält die Bauunternehmung je nach Verkehrsdichte 100.000

€ oder mehr [296]. Bei der Prüfung von Bahnbrücken wird versucht, zusätzliche Gleisperrungen zu umgehen und diese in den Nacht- oder Ruhestunden der Züge durchzuführen. [44][165][214][217][391]

In Bezug auf die Arbeitssicherheit birgt die UAS-Befliegung Vorteile. Das Prüfpersonal muss dabei nicht jeden Bereich der Brücke begehen bzw. erreichen. Dabei werden Leitern oder Besichtigungsgeräte wie Arbeitsbühnen benutzt. Böschungen oder Grünstreifen werden durchaus auch begangen, um die entsprechenden Brückenteile zu begutachten. Abstürze, Umknicken oder Unfälle durch ungeübtes Bedienen von Arbeitsbühnen sind dabei unvermeidbar. Installierte Funkmaste an Brücken bergen ebenfalls eine gesundheitliche Gefahr und müssen für die handnahe Prüfung abgeschaltet werden oder ein die Prüfung störender Sicherheitsabstand ist einzuhalten. Diese Gefahren entfallen bei der UAS-Unterstützung, da niemand mehr an schwer erreichbare Stellen der Brücke gelangen muss, sei es durch Klettern oder technische Hilfsmittel. Außerdem werden die Kosten vermieden, welche sich durch die Arbeitsunfälle ergeben. Diese sind jedoch nicht in dieser Untersuchung aufgenommen. [24][44][97][184][345]

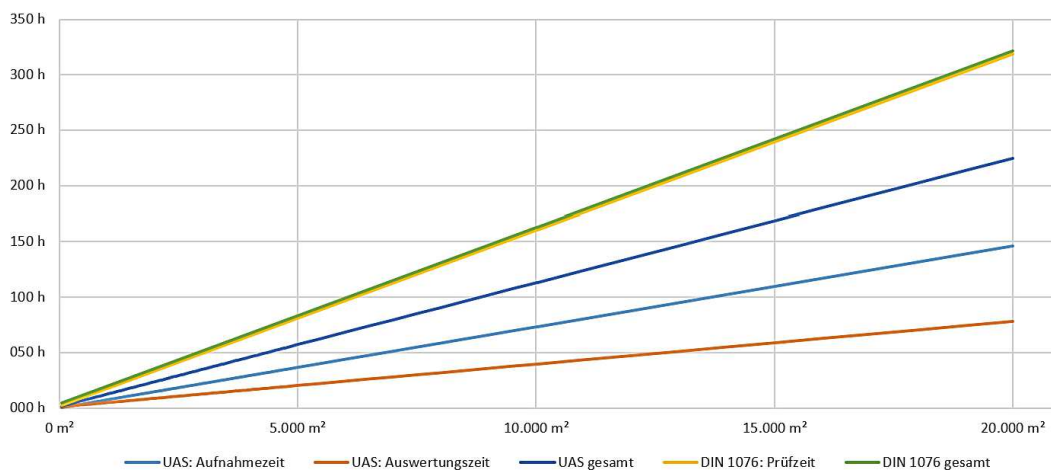


Abb. 6.6: Vergleich des Zeitaufwands für Verfahren handnah und UAS-unterstützt

Das unbeabsichtigte Nichterkennen von Schäden wird in beiden Verfahren gleich eingeschätzt. Bei der Prüfung vor Ort sind Wetter (Wind, Regen, Hitze), Dreck, Höhe und Lärmbelastung durch Verkehr Gründe für Ungenauigkeiten oder übersehene Schäden [44]. Bei der Bildauswertung der UAS-Prüfung entfallen diese unangenehmen Belastungen, jedoch wird eine hohe Konzentration vom Prüfer verlangt, da z.T. mehrere Hundert bis Tausend Bilder durchgesehen werden müssen. Auch können nicht optimale Lichtverhältnisse dafür sorgen, dass die Belichtung mancher Fotos nicht optimal ist. Die Brückenprüfung ist nach aktuellem Stand eine subjektive Tätigkeit, weswegen Fehler nie gänzlich vermieden werden können. Der Vorteil bei der händischen Prüfung ist jedoch, dass Schmutz wie Laub oder Dreckansammlungen vor Ort entfernt werden können, um die Konstruktion darunter zu begutachten. Diese Stellen sind mit dem UAS-Verfahren nicht prüfbar. [152][200][298][377]

Werden für die Tragfähigkeit essentielle Schäden am Bauwerk festgestellt, werden bei der Prüfung vor Ort Sofortmaßnahmen zur Sicherung von Leib und Leben wie schlimmstenfalls die Sperrung der Brücke vom Prüfer veranlasst [209]. Da die Auswertung der Bilddaten im Büro meist einige Tage nach der Befliegung mittels UAS stattfinden, würde eine Sperrung mit einer Verzögerung von einigen Tagen stattfinden. Aufgrund meist immer noch vorhandener Tragreserven und der Tatsache, dass die letzte Bauwerksprüfung circa drei Jahre zuvor stattgefunden hat, dürfte diese Verzögerung jedoch keinen wesentlichen Einfluss haben. [69]

6.4 Auswertung und Fazit

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich aus Kapitel 6.3 zeigt, dass zum aktuellen Stand das UAS-Verfahren nicht deutlich positiver hinsichtlich der Kriterien Kosten, Zeit, Sicherheit und Verkehrsbeeinträchtigung ist. Tab. 6.7 stellt noch einmal beide Verfahren zusammenfassend gegenüber.

Bei dem Kostenvergleich zeigt sich deutlich, dass das UAS-Verfahren durchaus positiv zu bewerten ist, sobald keine Verkehrssicherungsmaßnahmen zu installieren sind. Werden die reinen Prüfkosten betrachtet, ist die UAS-Unterstützung ebenfalls attraktiver als das handnahe Verfahren, da hier keine teuren Besichtigungsgeräte notwendig sind. Auf die Gesamtkosten gesehen, und vor allem da beide Verfahren derzeit Verkehrssicherungen benötigen, liegen die Kosten für die handnahe Prüfung lediglich nur ca. 10% über denen der UAS-Prüfung, weswegen dieser Punkt für Baulast- und Entscheidungsträger derzeit kein Argument für eine neue Prüfweise sein wird. Hinzu kommt, dass die UAS-Prüfung in DIN 1076 derzeit noch nicht als Verfahren für Hauptprüfungen zugelassen ist [69]. Als ergänzende Prüfungen oder jährliche Besichtigungen sind dieses jedoch durchaus geeignet und können diese qualitativ verbessern und vertiefen. Auch wenn bei Brücken existentielle Schäden bekannt sind und eine Beobachtung dieser sinnvoll erscheint, dies aber nicht Teil der aktuellen Prüfpraxis ist, kann die regelmäßige Befliegung dieser Stellen mit UAS die Arbeit eines Prüfsingenieurs durchaus vereinfachen und eine viel regelmäßiger Kontrolle als die derzeit nach Regelwerken vorgesehen ist, sicherstellen. Das Befliegen spart im Prüfalltag viel Zeit (siehe Kapitel 6.3), da auch keine Arbeitsbühne für die kurze Kontrolle beschafft werden muss. Die Zeit der Verkehrseinschränkungen sinkt damit ebenfalls immens. Die hohen volkswirtschaftlichen Kosten haben Kapitel 6.3 sowie [165] und [296] aufgezeigt. Eignet sich ein Prüfsingenieur die erforderlichen Flugkenntnisse selbst an, sinken die derzeit teuer einzukaufenden Dienstleistungen für UAS-Flüge. Die Betrachtung dieser neuen Kostensituation müsste noch explizit durchgeführt werden. Insgesamt ist die nicht monetär bewertbare Bedeutung, bekannte Schadstellen an Brücken regelmäßiger befliegen zu können und dafür nicht den Aufwand einer typischen Brückenprüfung samt Hubsteiger und Straßensperrung zu benötigen, für den Prüfalltag und somit den Brückenzustand von immenser Bedeutung. Alternativ kann die Befliegung für die schwer zu erreichenden Stellen genutzt werden, was ebenfalls den teuren Einsatz von schwerem Gerät ersetzt. Eine in Zukunft mögliche automatisierte Schadenserkenkung würde die Zeitersparnis beim neuen Prüfverfahren um ein Vielfaches erhöhen und dieses dadurch durchaus attraktiver machen.

Gesamtheitlich zeigt die UAS-Befliegung zukünftig Einsparpotentiale. Wenn sich Regelwerke verändern und eine Befliegung beispielsweise neben fließendem Verkehr zugelassen würde, wären die wirtschaftlichen Vorteile gegenüber einer zeitlichen längeren handnahen Prüfung mit Verkehrsbeeinträchtigung nicht mehr von der Hand zu weisen. Eine zukünftige Implementierung einer automatisierten Schadenserkenkung mittels Deep Learning runden die hier entwickelte Methodik ab und eliminieren die derzeit unattraktive Bilderdurchsicht für den Prüfer. Auch bietet das neue Verfahren gute Voraussetzungen für die Anbindung an das ‚Building Information Modelling‘ (BIM). Durch die vorhandene Punktwolke und den fix verorteten Schadensbildern ist die Verknüpfung zu BIM-Modellen der geprüften Brücken und die Übertragung der Schäden als sogenanntes IFC-Element lediglich eine technologischer Schnittstellenproblematik. Zusätzlich kann die hier verwendete Punktwolke als Grundlage für das Erzeugen zukünftiger BIM-Modelle dienen. In der Regel gibt es diese von Bestandsbrücken nicht. Das Modell kann händisch und mit Zuhilfenahme von Plänen und Fotos der Brücke modelliert werden. Eine automatische Modellierung ist derzeit noch nicht möglich, mit der raschen Entwicklung von Software und Künstlicher Intelligenz (KI) jedoch in Zukunft denkbar. [140][338][352]

	DIN 1076	UAS
Prüfdauer	-	+
Gesamtkosten	o	o
Prüfkosten	-	+
Personalressourcen	-	+
Arbeitssicherheit	-	+
Verkehrsbeeinträchtigung	-	+
Verkehrssicherung	o	o
Sofortmaßnahmen	+	o
Erlaubt nach aktuellem Regelwerk	+	-
Anwendbarkeit/Eignung für BIM	o	+
Sichere Verortung von Schäden	-	+
Häufigere Kontrollen möglich	-	+
Zukünftige KI-Integration	-	+

Tab. 6.7: Tabellarischer Vergleich der beiden Prüfverfahren (+ besser, o gleich, - schlechter)

Die Integration von Künstlicher Intelligenz kann die Wirtschaftlichkeit weiter erhöhen, indem sie zum einen die Befliegung mithilfe von automatisierten Flugrouten vereinfacht oder die Auswertung der Schadensbilder übernimmt und die Schäden automatisch identifiziert [140]. Für stählerne Bauwerke gibt es dazu grobe Ansätze, jedoch ist das automatische Erkennen von Stahlschäden wie Risse sehr komplex und derzeit noch nicht in die Praxis umgesetzt worden. Die Bewertung und der hier entwickelte Schadenskatalog (siehe 4.2) sind für automatische Auswertungen ausgelegt und ebenfalls in Zukunft durchaus von einer Künstlichen Intelligenz anwendbar bzw. darauf übertragbar. Der Zeitaufwand für den Prüfeningenieur würde sich auf

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

das Kontrollieren der Ergebnisse und die Fokussierung auf existentielle Schäden beschränken. Prüfungen könnten somit häufiger erfolgen und der Bestand der Brücken auf lange Sicht gesichert werden. Das automatische Erkennen von Schäden am Stahl durch eine KI würde das hier erarbeitete Inspektionskonzept massiv optimieren, woraufhin dann das UAS-basierte Verfahren einen erheblichen Vorteil gegenüber dem konventionellen Verfahren aufweisen und die Zukunft der Prüfpraxis bilden würde. [205]

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit

Der Begriff der Bauwerksprüfung erlangte besonders in den letzten Jahren durch einen Anstieg des Verkehres, steigender Lasten und hohem Bauwerksalter immer mehr an Bedeutung [156]. Die Hauptproblematik auf den Straßen ist nicht die Zunahme des Verkehrsaufkommens, sondern der steigende Anteil des Schwerlastverkehrs. Das zulässige Gesamtgewicht eines LKWs hat sich von 24 Tonnen im Jahr 1956 auf 44 Tonnen bis heute nahezu verdoppelt [347]. Es ist daher dringend eine Optimierung der Bauwerkserhaltung in Deutschland erforderlich, um die Brücken und damit die Infrastruktur möglichst wirtschaftlich und über einen langen Lebenszyklus erhalten zu können. Eine sichere Analyse des Bauwerkszustands bildet das Fundament eines optimierten Ressourceneinsatzes, wofür eine Bauzustandsbewertung nach einheitlichen Kriterien unverzichtbar ist [156]. In dieser Arbeit werden daher die Grundlagen für eine Bauwerksinspektion entwickelt, welche die Prüfung von stählernen Brücken mittlerer Spannweite mit orthotropen Fahrbahnplatten mithilfe von Bildmaterial unterstützen soll. Dafür wird untersucht, inwieweit sich das u.a. durch Drohnen (Unmanned Aerial Systems-UAS) aufgenommene Bildmaterial für eine nachträgliche Schadensanalyse durch das Prüfpersonal am Computer eignet und welche Bereiche der Brücke vom UAS befliegen bzw. aufgenommen werden können. Es wird ein Eingabetool entwickelt, das den prozentualen, vom UAS aufgenommenen Anteil der Brücke errechnet und für Prüfer und Baulastträger als Entscheidungshilfe genutzt werden kann. Anschließend wird ein Schadenskatalog erarbeitet, welcher auf Grundlage des Bildmaterials vom Bauwerk besteht und schadensbasiert sortiert ist. Dieser soll allgemeingültig gelten und ist unabhängig von dem technischen Hilfsmittel, welches das Bildmaterial ggf. in Zukunft aufnimmt. Durch die Entwicklung eines neuartigen Schadenskatalogs sollen in dieser Arbeit zudem die Grundlagen für einen Bewertungsalgorithmus erarbeitet werden. Dieser ist ebenfalls allgemeingültig gültig und unabhängig von der UAS-Bildaufnahme. Dafür ist eine voxelisierte Punktwolke von der Brücke notwendig, welche die Basis für das neue Bewertungsverfahren bildet. Eine abschließende Wirtschaftlichkeitsanalyse vergleicht die Arbeitsschritte und Kosten zwischen einer handnahen Prüfung nach DIN 1076 [69] sowie einer UAS-unterstützten Brückenprüfung und soll die Vor- aber auch Nachteile des hier entwickelten Systems aufzeigen.

Bei der grafischen Analyse der mittels UAS befliegbaren Brückenbereiche, ergibt sich, dass der Sicherheitsabstand des UAS bei einer Brennweite von 24 mm maximal 2 m, bei 35 mm 3 m, bei 50 mm 4 m sowie bei 70 mm Brennweite 5 m betragen sollte, um die so essentiellen, feinen Risse im Stahl auf dem Bildmaterial erkennen zu können. Die besten Ergebnisse werden zudem mit einer Brennweite von 24 mm erzeugt. Des Weiteren wird die UAS-Unterstützung von handnahe Brückenprüfungen für großflächige Betrachtungen stählerner Brücken mit Ergebnissen von > 80% Erkennbarkeit bewiesen. Schweißnahtschäden sind an orthotropen Platten regelmäßig auftretende Schäden und zum Teil gravierend für die Tragfähigkeit [126][362]. Die Bildaufnahmen der Schweißnähte für die nachträgliche Betrachtung am PC ist jedoch mit Ergebnissen knapp unter 30% nicht zufriedenstellend. Ein Grund dafür liegt an der

oft ungenügenden Sichtbarkeit der Plattenunterseite begründet durch die vielen Sichtschatten von Querträgern und Längssteifen. Da die Unterseite der Platte und damit die Schweißnähte zwischen Längssteifen und Plattenunterseite nicht vom UAS in ausreichender Qualität aufgenommen werden können, fehlt ein dominanter Teil bei der bildbasierten Prüfung. Objektive mit Festbrennweiten weisen jedoch häufig bessere Qualitäten aus als die hier genutzten Zoomobjektive. Das bedeutet, die Ergebnisse könnten mit festen Brennweiten wahrscheinlich verbessert werden. Auch kleinere Konfigurationen des Flugobjekts könnten durch einen reduzierten Sicherheitsabstand zur Brücke den aufnehmbaren Anteil erhöhen. Insgesamt können schadensintolerante Bauteile wie der Hauptträgeruntergut jedoch sehr gut und jederzeit aufgenommen werden, während die nicht immer vollständig mittels UAS aufnehmbaren Längssteifen um schadensintolerante Bauteile handelt. Gesamtheitlich stimmt die Befliegbarkeit somit mit der Priorität der Bauteile für die Standsicherheit des Bauwerks überein.

Für das bildbasierte Verfahren ist ein neuartiger Schadenskatalog notwendig, welcher zum einen auf die hier betrachteten stählernen orthotropen Platten spezialisiert ist und durch seinen Aufbau die Grundlage für den neuen Bewertungsalgorithmus bildet. Dafür werden über 6.000 Einzelschäden aus der Praxis analysiert, um die regelmäßigsten Schäden herauszufiltern. Die Analyse zeigt, dass nur ca. 40 % der Schäden bei Brückenprüfungen Einwirkungen auf die Statik bzw. Standsicherheit der Brücke haben. Ein Großteil der Schäden hat keine Folgen für die Tragfähigkeit, sondern ist kosmetischer Natur. Des Weiteren wird die Verteilung dieser Einzelschäden an den Bauwerken analysiert, um theoretische Statik und reale Auftrittsorte von Schäden abgleichen zu können. Diese Betrachtung zeigt, dass die Schäden in der Realität nicht zwangsläufig an den höchstbelastetsten Tragwerksstellen auftreten. Die Schäden sind gleichmäßig über die Brücke verteilt. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Auflager- und Mittelbereichen finden. Es wird deutlich, dass vor allem tragkonstruktiv relevante Schäden eher die Folge von Material- und Ausführungsfehlern sind und somit an oft unvorhergesehenen Stellen auftreten. Trotz der sehr gleichmäßigen Schadensverteilung sollen die tragkonstruktiv kritischere Bauwerkstellen oder die Verbindungen zwischen Quer- und Hauptträger, Querträger und Längssteife sowie Längssteife und Fahrbahnplatte gesondert Beachtung und auch Gewichtung im neuen Bewertungssystem finden. Der finale Schadenskatalog besteht schlussendlich aus 98 Schadensbeispielen, welche sich wie folgt auf die acht genannten Schadenskategorien verteilen: sieben Schäden in der Kategorie Korrosion, 21 Beschichtungsschäden, 16 Schäden in der Risskategorie, zehn Schäden zu Verbindungsmitteln, 13 Schweißnahtschäden, neun Schäden in der Kategorie Verschmutzungen (wie beispielsweise Moos und Vogelkot), 14 Verformungsschäden und acht Schäden gehören zur Kategorie der freiliegenden Bewehrung. Dieser Katalog ist schadensbasiert sortiert. Die Sortierung findet unabhängig vom Bauteil statt, da der Einfluss der Verortung im Bewertungsalgorithmus einfließen wird. Außerdem ist er weniger umfangreich, da keine Dopplungen mehr auftreten und die Schadensbeispiele jeweils auf den Kern heruntergebrochen sind. Ein schlanker Katalog ist in der Prüfpraxis durch seine Einfachheit besser zu handhaben und beschleunigt den Bearbeitungsaufwand.

Der neue Schadenskatalog bildet die Grundlage für den anschließenden Bewertungsalgorithmus. Dafür werden nationale und internationale Zustandsbewertungssysteme analysiert und

hinsichtlich ihrer Praktikabilität, Vor- und Nachteile sowie ihren essentiellen Funktionsprinzipien auf 20 vorliegende Brücken angewandt und ihre wichtigsten Kernaussagen erarbeitet. Diese Erkenntnisse sollten in den neuen Algorithmus einfließen, welcher anhand von Bildaufnahmen der Brückenbauwerke und voxelisierten Bauwerksmodellen funktionieren soll. Es kristallisieren sich fünf Kernaspekte heraus, welche im neuen Verfahren berücksichtigt werden sollten: die Einfachheit des Verfahrens, die Verwendung von Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D), die Gliederung in diverse Kategorien, ein Schadenskatalog sowie die Berechnung einer Endnote. Es zeigt sich außerdem, dass es keine große Anzahl von verpflichtenden Brückenprüfungen im internationalen Raum gibt. Damit beweist Deutschland seinen bereits vorhandenen hohen Standard. Außerdem befindet sich das Prüfpersonal in Deutschland durch die vorgegebenen Prüfintervalle aus DIN 1076 [69] in einer Prüfroutine und kennt das Bewertungsverfahren sowie den Schadenskatalog der BAST [300] sehr genau. Die Veränderung für das Prüfpersonal soll daher so gering wie möglich gehalten, das gesamtgesellschaftliche Verfahren aber durchaus verbessert und unterstützt werden. Es wird eine Methodik entwickelt, welche auf der Neuerung der voxelisierten Darstellungsmethode gründet. Dabei dienen Methodiken wie der Einflussbaum sowie das Logikdiagramm als Grundlage. Abschließend wird der neue Algorithmus anhand von 180 zum Teil realen und teilweise fiktiven Brücken einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um seine Anwendbarkeit für die Prüfpraxis zu untersuchen.

Das neue Bewertungssystem sieht vor, dass das Bauwerk mithilfe von zuvor aufgenommenem Bildmaterial auf Schäden geprüft wird. Dafür wird die Brücke mittels UAS befliegen oder anderweitig fotografisch aufgenommen und anschließend wird ein grobes, der Orientierung dienendes, voxelisiertes Modell der Brücke erzeugt. Die Schäden auf dem Bildmaterial können so den einzelnen Voxeln zugeordnet und fest verortet werden. Das bedeutet, die Bauwerksbewertung findet an dieser Stelle neuartig anhand von Voxeln statt, in die die Brücke eingeteilt wird. Der Prüfer sichtet das Bildmaterial pro Voxel, definiert die dort gefundenen Schäden mithilfe des neuen Schadenskatalogs, gibt diese in SIB-Bauwerke [387] oder eine dafür neu zu entwickelnde Software ein, welche mithilfe des hier zu erarbeitenden Algorithmus das Gesamtergebnis für die Bauwerksbewertung B errechnet. B kann als ganzzahliger Wert für eine Instandsetzungsreihenfolge verwendet werden. Abschließend wird dieser Wert mittels logarithmischer Skalierung in Notenwerte zwischen 1,0 und 5,0 umgewandelt, um zum einen dem bekannten Verfahren zu ähneln und zum anderen eine direktere Vergleichbarkeit zwischen den geprüften Brücken sicherzustellen. Die Ergebnisse zeigen eine vernünftige Verteilung der Bauwerksbewertungen und eine stärkere Fokussierung auf schlechte Bauwerkszustände.

Abschließend soll die Wirtschaftlichkeit des neu erarbeiteten Brückenprüfverfahrens, bestehend aus der UAS-Befliegung, der Voxelisierung der Brücke als Voraussetzung des neuen Bewertungsalgorithmus sowie der Fotodurchsicht durch den Prüfingenieur mitsamt der Anwendung des neuen Schadenskatalogs untersucht werden. Dafür werden jeweils alle Arbeitsschritte aufgeschlüsselt und mithilfe von Literatur- und Erfahrungswerten aus der Praxis monetär und bzgl. des Zeitaufwands bewertet. Des Weiteren wird ein Excel-Berechnungstool erarbeitet, in das eine zu prüfende Brücke eingegeben werden kann und der Zeitaufwand sowie die Kosten

für beide Verfahren ausgegeben werden. Der Wirtschaftlichkeitsvergleich zeigt, dass zum aktuellen Stand das UAS-Verfahren nicht deutlich überzeugender hinsichtlich der Kriterien Kosten, Zeitaufwand, Sicherheit und Verkehrsbeeinträchtigung ist. Bei dem Kostenvergleich zeigt sich jedoch, dass das UAS-Verfahren durchaus positiv zu bewerten ist, sobald keine Verkehrsicherungsmaßnahmen und somit keine Verkehrsbeeinträchtigungen zu installieren sind. Die volkswirtschaftlichen Kosten, welche durch Staubildung entstehen, sind immens und sollten mehr Betrachtung bei einer Brückenprüfung finden. Werden die reinen Prüfkosten betrachtet, ist die UAS-Unterstützung attraktiver als das handnahe Verfahren, da hier keine teuren Besichtigungsgeräte notwendig sind. Eine UAS-Prüfung ist nach DIN 1076 derzeit jedoch noch nicht als Verfahren für Hauptprüfungen zugelassen ist [69]. Als ergänzende Prüfungen oder jährliche Besichtigungen sind dieses jedoch durchaus geeignet, da es sich bei vorliegender Methodik zunächst um ein rein optisches Verfahren handelt. Auch bekannte und zu beobachtende Schäden könnten so schnell und regelmäßiger kontrolliert werden, da keine Arbeitsbühne etc. organisiert werden müssten. Die Zeit der Verkehrseinschränkungen sinkt damit ebenfalls immens. Ein Ergebnis von 100 % Sichtbarkeit in der für Stahlbrücken geforderten und mit der hier definierten Bildqualität kann derzeit mittels UAS noch nicht erreicht werden. Jedoch könnten lediglich die für das UAS nicht sichtbaren Bereiche handnah kontrolliert und somit sehr viel Prüfzeit vor Ort eingespart werden.

Insgesamt werden in dieser Arbeit die Grundlagen für eine neue, bildbasierte Prüfmethodik für stählerne orthotrope Platten von Brücken mittlerer Spannweite entwickelt, welche zum Teil von UAS unterstützt werden können, davon jedoch nicht abhängig und auch ohne diese Technologie anwendbar sind. Es handelt sich hier um einen objektspezifischen Ansatz, welcher durchaus auf andere Bauweisen übertragbar ist. Dies muss jedoch im Einzelfall weiter untersucht werden.

7.2 Ausblick

Die hier entwickelte Methodik birgt aufgrund der modernen Betrachtungsweise und der Integration neuester Technologien durchaus weiteres Entwicklungspotential. Bei der Brückenbefliegung mittels UAS können kleinere Konfigurationsgrößen des Flugobjekts für bessere Ergebnisse bei der prozentualen Aufnahmewerte sorgen, weil der Sicherheitsabstand dadurch reduziert werden kann. Auch würde eine veränderte Kameraposition, besonders auf dem UAS, sicher bessere Ergebnisse liefern können, da sich diese näher am Bauwerk befände. Sie könnte auch nach oben gerichtet sein, um die gesamte Plattenunterseite aufnehmen zu können und so eine Schwachstelle des aktuellen Systems zu eliminieren. Alternativ wäre es denkbar, Stellen, welche nicht gut per UAS befliegen werden können (enge, dunkle Stellen oder die Auflagerbereiche), mit Sensorik wie Dehnungsmessstreifen zu versehen, um die Prüfung auf diese Weise zu unterstützen. Wichtig sind auch in Zukunft die normativen Regelungen, welche die Wirtschaftlichkeit sowie Einsetzbarkeit von UAS bei der Bauwerksprüfung maßgeblich bestimmen. Wenn sich Regelwerke verändern und eine Befliegung beispielsweise neben fließendem Verkehr zugelassen würde, wären die wirtschaftlichen Vorteile und das Kosteneinsparpotential gegenüber einer zeitlich längeren handnahen Prüfung mit Verkehrsbeeinträchti-

gung enorm. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der UAS-Systeme sowie dem allgemeinen Umgang mit ihnen, könnte lediglich eine Art Hinweisschild während des Flugs nötig sein und dadurch der Fluss des Verkehrs insgesamt verbessert und nicht beeinträchtigt werden.

Obwohl die UAS-Befliegung nach jetzigem Stand nicht allen hier definierten Ansprüchen genüge trägt, sind der neue Schadenskatalog sowie der neue Bewertungsalgorithmus UAS-unabhängig aufgebaut und können in Zukunft bei bildbasierten Prüfungen angewandt werden. Durch die Parallelen zum heutigen Prüfverfahren sollte an dieser Stelle die normative Zustimmung bzw. Umsetzung kein Hindernis darstellen. Es gibt zudem alternative Bildaufnahmeverfahren, welche anstelle von UAS zum Einsatz kommen könnten und das nötigen Foto- bzw. Videomaterial sowie die Punktwolke der Brücke generieren. Als Beispiel sei hierfür das sogenannte NavVis-System genannt [245]. Ein Rucksacksystem, mit welchem die Brücke einer kurzen Begehung unterzogen wird und anschließend eine photogrammetrische Darstellung des Bauwerks darstellt. Ob dieses System die hier definierte Bildqualität liefert, muss geprüft werden.

Auch bietet das neue Verfahren gute Voraussetzungen für die Anbindung an das ‚Building Information Modelling‘ (BIM). Durch die vorhandene Punktwolke und die fix verorteten Schadensbildern ist die Verknüpfung zu BIM-Modellen der geprüften Brücken und die Übertragung der Schäden als sogenanntes IFC-Element einfach möglich. Außerdem ist eine automatische Modellierung von BIM-Modellen aus der Punktwolke mit der raschen Entwicklung von Software und Künstlicher Intelligenz (KI) in Zukunft denkbar.

Die wohl lohnenswerteste Weiterentwicklung dieses Verfahrens, wofür es bereits grundsätzlich ausgelegt ist, bildet der Einsatz von Künstlicher Intelligenz. Zum einen kann die Befliegung bzw. die Flugroute automatisiert stattfinden, sodass der Aufwand für den Piloten sinkt. Zum anderen könnte eine automatisierte Schadenserkenkung durch das Identifizieren und ggf. sogar Bewertung von Schäden auf dem Bildmaterial das Prüfverfahren deutlich vereinfachen. Auch könnten Empfehlungen zu Instandsetzungsmaßnahmen in den Schadenskatalog aufgenommen werden. Die automatische Schadenserkenkung könnte in einem ersten Schritt stattfinden und der Prüfer muss diese schlussendlich nur noch kontrollieren. Die Durchsicht der großen Bildanzahl und der damit einhergehende zeitliche Aufwand (siehe Kap. 6.2.2) würde dadurch fast komplett wegfallen. Für stählerne Bauwerke gibt es dazu bereits grobe Ansätze, jedoch ist das automatische Erkennen mittels KI von Stahlschäden wie Risse sehr komplex und derzeit noch nicht in die Praxis umsetzbar [140]. Sobald dieser Entwicklungsschritt jedoch vollzogen ist, würde sich dadurch der Zeitaufwand für den Prüferingenieur drastisch reduzieren und Brückenprüfungen könnten häufiger und somit in kleineren Zeitintervallen stattfinden. Dies würde für den Brückenbestand eine immense Verbesserung darstellen. Kleine oder anfängliche Schädigungen würden erkannt werden, bevor sich diese zu einem kostspieligen und ernsthaften Brückenschaden entwickeln (siehe Kap. 6.4). Da sich die Qualität von automatischer Bilderkennung bzw. Schadenserkenkung und entsprechend der neuronalen Netze stetig weiterentwickeln, ist es nur eine kurze Frage der Zeit bis diese Verbesserung in das hier entwickelte und dafür vorgesehene Verfahren implementiert werden kann und dieses schlussendlich vervollständigt. Mit der Verschmelzung der automatischen Schadenserkenkung stellt dieses neue

Fazit und Ausblick

Prüf- und Auswertungskonzept die moderne, flexible und vor allem zeitsparende Grundlage von Brückenprüfungen der Zukunft dar.

8 Quellenverzeichnis

- [1] A. C. Europa: Mobilität 4.0, Herausforderungen und Chancen, Berlin (https://www.ace.de/fileadmin/user_uploads/Der_Club/Dokumente/Verkehrspolitik/aktuell/mobilitaet-4.pdf) [Online, Zugriff 08.07.2023].
- [2] AEG: Allgemeines Eisenbahngesetz vom 27.12.1993, zuletzt geändert am 20.07.2017.
- [3] Albrecht G., Seemann E., Sedlacek G., Paschen M., Leendertz J.S., De Jong F.B.P., Bucak Ö., Friedrich H.: Expertengespräch - Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten, Fachveröffentlichung Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2005.
- [4] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC): Kostenrechner (<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/>) [Online, Zugriff 18.06.2023].
- [5] Allplan Nemetschek, CAD Programm, Version 2021.
- [6] American Institute of Steel Construction: Design Manual for Orthotropic Steel Plate Bridges, AISC, New York, 1963.
- [7] Arbeitsgruppe Schwerverkehr: Grundkonzeption für den Traglastindex, Bundesanstalt für Straßenwesen, 01.04.2020 (https://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/b4-traglastindex/Grundkonzeption-TLI.pdf?__blob=publicationFile&v=1) [Online, Zugriff 04.12.2023].
- [8] ArbStG: Arbeitsschutzgesetz vom 31. August 2015.
- [9] Arndt, R.W., Schumacher, T., Algeron, D. et al.: Strategien der Bauwerkserhaltung von Autobahnbrücken in den USA. In: Bautechnik 88, Heft 22, S. 793-804, 2011.
- [10] ASB-ING: Anweisung Straßeninformationsbank - Segment Bauwerksdaten, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 10/ 2013.
- [11] Avitas Systems: Autonomous aerial inspection system for vertical assets, Technology introduction and use in Avitas Systems November 2018 (<https://myavitassystems.com/wp-content/uploads/2018/11/MKTG-IS-VAs-setInsp-001EXL.pdf>) [Online, Zugriff 11.05.2024].

- [12] Banek, C., Banek, G.: Fotografieren lernen - Band 1: Die technischen Grundlagen - Kameras, Objektive und Zubehör, 1. Auflage, dpunkt.verlag GmbH, Heidelberg, 2010.
- [13] Barin, T.: Adaptiv geregelte Spannbetontragwerke mit externer Vorspannung unter Einsatz von Fuzzy Logic, Universität Duisburg-Essen, Fachbereich Bauwissenschaften, 2006, (https://www.researchgate.net/publication/29799748_Adaptiv_geregelte_Spannbetontragwerke_mit_externer_Vorspannung_unter_Einsatz_von_Fuzzy_Logic) [Online, Zugriff 09.12.2023].
- [14] Bartos, R.: Stahlfibel, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2015.
- [15] Bau, W., Stahl, C., Hegmans, A.: Nach Unglück in Italien – So sicher sind die Brücken in NRW, Westdeutsche Allgemeine Zeitung, 15.08.2018 (<https://www.waz.de/region/nach-unglueck-in-italien-so-sicher-sind-diebruecken-in-nrw-id215099687.html>) [Online, Zugriff 18.10.2023].
- [16] Baumgart, R.: Sicherheitskonzept (DIN EN 1990 bis 1998), Hochschule Darmstadt, 25.01.14 (<https://rudolfbaumgart.de/scripte/sicherheit.pdf>) [Online, Zugriff 04.08.2023].
- [17] Bayrische Ingenieurkammer-Bau: Laser ersetzt Hammer: neue Methode zur Integritätsprüfung von Bauwerken (https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2024-01-29_Laser-ersetzt-Hammer-neue-Methode-zur-Integritaetspruefung-von-Bauwerken.php) [Online, Zugriff 11.06.2024].
- [18] BDSG: Bundesdatenschutzgesetz vom 30. Juni 2017.
- [19] Beck, T., Fischer, M., Friedrich, H. et al.: Instandsetzungsstrategien als Basis für die ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. In: Stahlbau 82, Heft 1, S. 3-10, 2013.
- [20] Bezirksregierung Düsseldorf: <https://www.brd.nrw.de/themen/verkehr/luftverkehr/unbemannte-luftfahrzeugsysteme-drohnen> [Online, Zugriff 19.06.2023].
- [21] Biedermann, H.; Kinz, A.: Lean Smart Maintenance - Agiles, lern- und wertschöpfungsorientiertes Instandhaltungsmanagement, Springer Gabler, Wiesbaden, 2021.
- [22] Bimhub: <https://bimhub.hamburg/26-06-23-einsatz-von-roboter-hunden-und-mobile-mapping-als-grundlage-fuer-bim-modelle/> [Online, Zugriff 11.06.2024].

- [23] BIRM: Bridge Inspector's Reference Manual (Federal Highway Administration (FHWA)), 1. Ausgabe, o.O., 2002.
- [24] BITKOM e.V.: Mobilfunk und Sicherheit - Information für Handwerker und Hauseigentümer, BITKOM e.V., Berlin, o.J.
- [25] Blaschke, L.: Analyse der Sichtbereiche von UAS mit horizontal ausgerichteter Kamera bei Prüfung von Stahlbrücken, Masterarbeit, TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2021.
- [26] Bogdanoff, J.L.: A New Cumulative Damage Model, Journal of Applied Mechanics, Heft 45, S. 246-250, o.O., 1978.
- [27] Borrmann, A., Fischer, O., Dori, G., Wild, M.: Intelligente Brücke-Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bericht B104, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2014.
- [28] Breitenbücher, R., Youn, B.-Y.: Untersuchungen zu Betonabplatzungen an Brückenkappen infolge Frost-Taumittleinwirkungen. In: Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 6, S. 373-381, Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [29] Bridge Inspector's Training Manual 70 (Federal Highway Administration (FHWA)), 1. Auflage, o.O., 1970.
- [30] Bridge Inspector's Training Manual 90 (Federal Highway Administration (FHWA)), 2. Auflage, o.O., 1990.
- [31] Bühler, P., Schlaich, P., Sinner, D.: Digitale Fotografie, 1. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [32] Bundesanstalt für Straßenwesen: „www.intelligentebruecke.de“ (https://www.intelligentebruecke.de/ibruecke/DE/Konzeption/Gesamtkonzeption/gesamtkonzeption_node.html) [Online, Zugriff 13.12.2022].
- [33] Bundesanstalt für Straßenwesen: Brückenstatistik 2019, (https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.html) [Online, Zugriff am 06.07.2019].
- [34] Bundesanstalt für Straßenwesen: Brückenstatistik 2020, (https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.html) [Zugriff am 14.10.2020].

- [35] Bundesanstalt für Straßenwesen: Brückenstatistik 2020, (https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.html) [Online, Zugriff 01.12.2022].
- [36] Bundesanstalt für Straßenwesen: Brückenstatistik 2022, (https://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D7) [Online, Zugriff 28.06.2023].
- [37] Bundesanstalt für Straßenwesen: https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Ingenieurbau/Publikationen/Regelwerke/Regelwerke_node.html [Online, Zugriff 20.09.2023].
- [38] Bundesanstalt für Straßenwesen: Verbundprojekt OSIMAB (Online Sicherheits-Managementsystem für Brücken), (<https://www.bast.de/DE/Publikationen/Daten/Brueckenbau/Downloads/OSIMAB.html>) [Online, Zugriff 09.07.2023].
- [39] Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMerkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWMerkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien), 2018.
- [40] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Verwaltungsvorschrift der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Bauwerksinspektion VV-WSV 2101, 2022.
- [41] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Stand der Modernisierung von Brücken der Bundesfernstraßen, Bericht an den Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages, Berlin, 13.12.2018.
- [42] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Traglastindex, (<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/traglastindex.html>) [Online, Zugriff 21.11.2022].
- [43] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehrsprognose 2030-Verkehr wird deutlich zunehmen, Pressemitteilung, 11.06.2014, (<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2014/044-dobrindt-verkehrsprognose2030.html>) [Online, Zugriff 17.02.2023].
- [44] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bauwerksprüfung nach DIN 1076-Bedeutung, Organisation, Kosten-Dokumentation, Hausdruckerei, Berlin, 2013.

- [45] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie für die Überwachung der Verkehrssicherheit von baulichen Anlagen des Bundes, 07/2008.
- [46] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: ... mit Drohnen, Unbemanntes Fliegen im Dienst von Mensch und Natur, Broschüre, Druck- und Verlags-haus Zarbock, Frankfurt, 05/2019.
- [47] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Bestandsmodellierung von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken Mittels KI zur Generierung von Digital Twins (<https://bimkit.eu/demonstration/schadenserkennung>) [Online, Zugriff 12.04.2023].
- [48] Bundesverkehrswegeplan 2030, BMVI, Berlin, 2016, (<https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf>) [Online, Zugriff 22.10.2022].
- [49] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Autonome Offshore Drohne-AOD, 02/2021, (<https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/UAV-Projekte/aod.html>) [Online, Zugriff 25.08.2023].
- [50] Burger, M., Wujanz, D., Neitzel, F.: Synergetische Segmentierung und Registrierung von Punktwolken, Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 2018.
- [51] Butz, C.: Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Datenerfassungsstrategie und Datenanalyse für intelligente Kalottengleittlager, München, 2021.
- [52] Cao, Y.: Distributed Health Monitoring System for Zhanjiang Bay Bridge. In: Advances in Structural Engineering, Bd. 14, Nr. 1, 2011.
- [53] CiS GmbH: <https://www.cis-rostock.de/kopter/oktopus.html> [Online, Zugriff 24.11.2021].
- [54] Colditz, B.: Aktuelles zu Brückenbau und Brückenerhaltung im Bundesfernstraßennetz, Expertengespräch Stahlbrückenbau, Bergisch Gladbach, 27.09.2011.
- [55] Connor R., Fisher J., Gatti W., Gopalaratnam V., Kozy B., Leshko B., McQuaid D.L., Medlock R., Mertz D., Murphy T., Paterson D., Sorensen O., Yadlosky J.: Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges, US Department of Transportation-Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IF-12-027, 02/2012.

- [56] Crampen, D.: Automatisierte Schadstellenermittlung aus Bildaufnahmen von Bauwerken mit Hilfe von Deep Learning, Forum Bauinformatik, München, 2022.
- [57] DB Richtlinie 804, Modul 8001: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten-Inspektion von Ingenieurbauwerken-Begriffe, DB Netz AG, 02/2008.
- [58] DB Richtlinie 804, Modul 8002: Eisenbahnbrücken (und sonstige Ingenieurbauwerke) planen, bauen und instand halten-Inspektion von Ingenieurbauwerken-Eisenbahnüberführungen, DB Netz AG, 02/2008.
- [59] DB Richtlinie 821, Modul 2003: Oberbau inspizieren-Gleisbegehung durchführen, DB Netz AG, 10/1998.
- [60] Deichmann, H.: Videokonferenz (intern) am 27.03.2023, Strucinspect, 2023.
- [61] Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme, 2019.
- [62] Desjardins, L.: Real-Time Data Processing, Analysis and Visualization for Structural Monitoring of the Confederation Bridge. In: Advances in Structural Engineering, Bd. 9, Nr. 1, S. 141-157, 2006.
- [63] Deutsche Bahn: <https://bruecken.deutschebahn.com/br%C3%BCckenkarte> [Online, Zugriff 08.11.2022]
- [64] Deutscher Bundestag: Drucksache 18/5352, Zustandskategorien schadhafter Brücken, Buch- und Offsetdruckerei Heenemann, Berlin, 29.06.2015.
- [65] Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (Hrsg.): Prüfverfahren Zustandserfassung Bau-Modul „Zerstörungsfreie Prüfverfahren“, Bericht 8, Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, Dresden, 2021.
- [66] Digitale Plattform Unbemannte Luftfahrt: <https://maptool-dipul.dfs.de/?language=de> [Online, Zugriff 11.03.2023].
- [67] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung, 1959.

- [68] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1983.
- [69] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung, Deutsches Institut für Normung e.V., 11/1999.
- [70] DIN 1076: Richtlinien für die Überwachung und Prüfung eiserner Straßenbrücken, Deutscher Normenausschuss, 1930.
- [71] DIN 1077: Richtlinien für die Überwachung und Prüfung massiver Straßenbrücken, Deutscher Normenausschuss, 1933.
- [72] DIN 1910-100: Schweißen und verwandte Prozesse-Begriffe-Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005, Deutsches Institut für Normung e.V., 02/08.
- [73] DIN 25424: Fehlerbaumanalyse-Teil 1: Methode und Bildzeichen, Deutsches Institut für Normung e.V., 09/1981.
- [74] DIN 25424: Fehlerbaumanalyse-Teil 2: Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes, Deutsches Institut für Normung e.V., 04/1990.
- [75] DIN 5452-1: Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS), Teil 1: Begriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., 2021.
- [76] DIN 5452-2: Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS), Teil 2: Anforderungen an Fernpiloten, Deutsches Institut für Normung e.V., 2019.
- [77] DIN 5452-6: Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS), Teil 6: Geodatenmanagement für UTM-Systeme, Deutsches Institut für Normung e.V., 2021.
- [78] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nl/projekte/wdc-proj:din21:335728546> [Online, Zugriff 23.11.2022].
- [79] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nl/projekte/wdc-proj:din21:335728570> [Online, Zugriff 23.11.2022].
- [80] DIN EN 13018: Zerstörungsfreie Prüfung-Sichtprüfung-Allgemeine Grundlagen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 06/2016.
- [81] DIN EN 1990 (Eurocode 0): Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsches Institut für Normung e.V., 12/2010.

- [82] DIN EN 1991 (Eurocode 1): Einwirkungen auf Tragwerke, Deutsches Institut für Normung e.V., 12/2010.
- [83] DIN EN 1991-2 (Eurocode 1): Einwirkungen auf Tragwerke-Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsches Institut für Normung e.V., 12/2010.
- [84] DIN EN 1993 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Deutsches Institut für Normung e.V., 12/2010.
- [85] DIN EN 1993 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 9: Ermüdung, Deutsches Institut für Normung e.V., 12/2010.
- [86] DIN EN 1993 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken, Deutsches Institut für Normung e.V., 08/2012.
- [87] DIN EN 61078: Zuverlässigkeitsblockdiagramme, Deutsches Institut für Normung e.V., 03/2018.
- [88] DIN EN ISO 12944: Beschichtungsstoffe-Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme-Teil 5: Beschichtungssysteme, Deutsches Institut für Normung e.V., 03/2020.
- [89] DIN EN ISO 12944-1: Beschichtungsstoffe-Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme-Teil 1: Allgemeine Einleitung, Deutsches Institut für Normung e.V., 01/2019.
- [90] DIN EN ISO 2178: Verfahren für zerstörungsfreie Schichtdickenmessungen nichtmagnetischer Beschichtungen auf magnetischen Grundmetallen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 11/2016.
- [91] DIN EN ISO 4628: Beschichtungsstoffe-Beurteilung von Beschichtungsschäden-Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 07/2016.
- [92] DIN EN ISO 8044: Korrosion von Metallen und Legierungen-Grundbegriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., 12/2015.
- [93] DIN EN ISO 9223: Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung, Deutsches Institut für Normung e.V., 05/2015.
- [94] DIN SPEC 5452-5: Luft und Raumfahrt - Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS), Teil 5: Digitales Dachaufmaß per Drohne, Deutsches Institut für Normung e.V., 2021.

- [95] Dittmar, V.: Drohnen sollen Schäden an Brücken aufzeigen, Fürther Nachrichten, 09.02.2016.
- [96] DJI: <https://www.dji.com/de/matrice600-pro> [Online, Zugriff 15.12.2021].
- [97] Dorafshan, S.; Maguire, M.: Bridge Inspection: Human Performance, Unmanned Aerial Systems and Automation, Logan, Department of Civil & Environmental Engineering, 2018.
- [98] DSGVO: Datenschutz-Grundverordnung 2016/679 vom 27. April 2016.
- [99] Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge, 2019.
- [100] DVW e.V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017. In: DVW-Schriftenreihe, Band 86/2017, Wißner-Verlag, Augsburg, 2017.
- [101] EBKrG: Gesetz über Kreuzungen von Eisenbahnen und Straßen (Eisenbahnkreuzungsgesetz) vom 31.5.2021.
- [102] EBO: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 08.05.1967, zuletzt geändert am 26.07.2017.
- [103] Eckert, M.: Konzeption eines Managementsystems zur Bauwerkserhaltung, Diplomarbeit Hochschule Karlsruhe, 2005.
- [104] Eichinger-Vill, E.-M., Kollegger, J.: Überwachung, Prüfung, Bewertung und Beurteilung von Brücken-Einleitung. In: Mehlhorn, G. (Hrsg.): Handbuch Brücken-Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, 2. Auflage, S. 1009, Springer Vieweg Verlag, 2010.
- [105] Eichinger-Vill, E.-M., Kollegger, J.: Überwachung, Prüfung, Bewertung und Beurteilung von Brücken – Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken. In: Mehlhorn, G. (Hrsg.): Handbuch Brücken-Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, 2. Auflage, S. 1035-1054, Springer Vieweg Verlag, 2010.
- [106] Eichinger-Vill, E.-M., Kollegger, J.: Überwachung, Prüfung, Bewertung und Beurteilung von Brücken-Brückenmanagement. In: Mehlhorn, G. (Hrsg.): Handbuch Brücken-Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, 2. Auflage, S. 1059-1062, Springer Vieweg Verlag, 2010.

- [107] Empelmann, M., Busse, D.: Adaptive Tube-in-Tube-Brücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 102, Bergisch Gladbach, 2014.
- [108] Entwerfen und Konstruieren Stahlbau: OSIMAB Messkonzept Talbrücke Sachsengraben, 2020, (https://www.mcloud.de/downloads/mcloud/0489759B-1168-4EF5-A26D-488DE44816FE/Messkonzept_OSIMAB_Demonstrator.pdf) [Online, Zugriff 23.2.2023].
- [109] Eschbach, P.: <https://www.uavdach.org/din-norm-fuer-unbemannte-luftfahrt-definiert-die-begrifflichkeiten-in-der-neuen-din-5452-1/> [Online, Zugriff 21.11.2022].
- [110] Eschmann, C.: Mit Flugrobotern erkunden Materialforscher Bauschäden an Hochhäusern und Brücken. In: Dialog. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, S.70-71, 2014.
- [111] Eugster, S.: Was ist... Korrosionsarten-Teil1, Thyssen Krupp Materials, Schweiz, o.J. (<https://coek.info/compress-pdf.html>) [Online, Zugriff 04.02.204].
- [112] falconplus.de: <https://www.falconplus.de/produkt/falcon-8-inspection-payload-bundle/> [Online, Zugriff 06.11.2023].
- [113] Fiedler, E.: Die Entwicklung der orthotropen Fahrbahnplatte in Deutschland. In: Stahlbau 78, Heft 8, S. 562-576, Ernst & Sohn, Berlin, 2009.
- [114] Fischer, J., Straub, D. et al.: Intelligente Brücke - Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 99, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2014.
- [115] Flynex: <https://www.flynex.io/de/news/automatisierte-brueckenpruefung-per-drohne/> [Online, Zugriff 06.02.2023].
- [116] Förster, A.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von konventionellen Brückenprüfungen nach DIN 1076 und sensorunterstützten Brückenprüfungen, Masterarbeit, TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2023.
- [117] Fraunhofer IFF: <https://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/roboter-systeme/kanalinspektion-sek.html> [Online, Zugriff 15.02.2024].

- [118] Fraunhofer IFF: <https://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/roboter-systeme/kanalinspektion.html> [Online, Zugriff 15.02.2024].
- [119] Fraunhofer IFF: <https://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/roboter-systeme/kanalinspektion-svm.html> [Online, Zugriff 15.02.2024].
- [120] Freundt, U., Vogt, R., Böning, S. et al.: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 106, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2014.
- [121] Freundt, U.: Digitales Testfeld Autobahn-Intelligente Brücke, Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 177, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2020.
- [122] Freundt, U.: Erzeugung künstlicher Messdaten einer geschädigten Brücke, Fachveröffentlichung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2020.
- [123] Freundt, U.: Roadtraffic Management System (RTMS), Bauhaus-Universität Weimar, Verkehrsbaus, AVK infotec GmbH, 2014.
- [124] Friebel, W.-D.: Die Bauwerksprüfung im Wandel der Zeit. In: Fachtagung Bauwerksdiagnose 2016, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 2016.
- [125] Friedrich H.: Expertengespräch-Ertüchtigung im Stahlbrückenbau, Bundesanstalt für Straßenwesen, Fachveröffentlichung Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Bergisch Gladbach, 2011.
- [126] Friedrich, H., Quaas, B.: Stahlbrücken-Bestandsanalyse. Erhaltung und Erweiterung. Bundesanstalt für Straßenwesen, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 09/2017.
- [127] Friedrich, H.: Überblick: Schäden und Instandsetzungsvarianten, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2008.
- [128] Frühauf, T.: (1997). Voxelisierung — Überführung in ein reguläres Gitter. In: Graphisch-Interaktive Strömungsvisualisierung. Beiträge zur Graphischen Datenverarbeitung. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [129] Frýba L.: Dynamische Beanspruchungen von Eisenbahnbrücken und ihre Einflüsse auf die Ermüdung. In: Stahlbau 67, Heft 10, Ernst & Sohn, Berlin, 1998.

- [130] Frýba L.: Startische, dynamische und Ermüdungseigenschaften orthotroper Platten mit Flachrippen. In: Stahlbau 67, Heft 8, Ernst & Sohn, Berlin, 1998.
- [131] FStrG: Bundesfernstraßengesetz vom 28.06.2007, zuletzt geändert am 29.12.2023.
- [132] Furtner, P., Karlusch, A.: Pilotprojekt Falkensteinbrücke-Brückeninspektion 4.0. In: Brückenbau Symposium, S. 120-125, 2020.
- [133] Fuxjäger, G., Rašković, M., Ragossnig-Angst, M. u. a.: Brückeninspektion: Datenerfassung, -prozessierung und -analyse, ein moderner Ansatz. In: 21. Internationale Geodätische Woche, S. 24–30, 02/2021.
- [134] Gallia, W.: Construct voxel based visual hulls. (<http://wgallia.com/#!construct>), 2012 [Online, Zugriff 20.12.2021].
- [135] GeoSpector: Datenblatt Orthofoto (https://www.geospector.de/wp-content/uploads/Datenblatt_Orthofoto.pdf) [Online, Zugriff 30.03.2023].
- [136] Geßler, A., Hoffmeister, B., Geers, T., Honerboom, D., Rainer, J.: Brücken Asset Management - Bauwerkscluster: Herausforderungen, Ziele, Auswahl, Modellierung. In: 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur: Fachtagung über Planung, Bau, Betrieb von Brücken, Tunneln, Straßen digital, Tagungshandbuch 2021, Technische Akademie Esslingen, 2021.
- [137] Geßler, A.: Brücken Asset Management-Bauwerkscluster: Herausforderungen, Ziele, Auswahl, Modellierung. In: Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, 2021.
- [138] Ghali, A., El-Badry, M., Megally, S.: Two-year deflections of the Confederation Bridge. In: Canadian Journal of Civil Engineering, 27 (6), S. 1139-1149, 2000.
- [139] Gierschner, F., Amrobsat, T., Hundrup, A., Harweg, T. et al.: BIM-gestütztes Lebenszyklusmanagement von Brücken, Forschungsantrag, FOSTA P 1634, Düsseldorf, 2021.
- [140] Gierschner, F., Hundrup, A., Harweg, T., Ambrosat, T., Geist, M., Weichert, F., Ungermann, D., Flügge, W.: Schlussbericht FOSTA P1326: Inspektion, Überwachung und Dokumentation von stahlbaulichen Strukturen, Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. Köln, Forschungsvereinigung Stahlanwendung FOSTA e.V., Düsseldorf, 2021.

- [141] Gierschner, F.: Beitrag zur sensorgestützten Positionsbestimmung und Navigation autonomer Roboter, Dissertation, Universität Rostock, 2022.
- [142] Gilins, D.T. et al.: Cost-effective bridge safety inspections using unmanned aerial vehicles (UAVS), Final Project Report, Seattle, USDOT University Transportation Center for Federal Region 10 - University of Washington, 2016.
- [143] Gockel, T.: Kompendium digitale Fotografie, 1. Auflage, Springer-Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [144] González-deSantos, L. M., Frías Nores, E., Martínez-Sánchez, J. u. a.: Indoor Path-Planning Algorithm for UAV-Based Contact Inspection. In: Sensors, Basel, 02/2021.
- [145] González-deSantos, L. M., Frías Nores, E., Martínez-Sánchez, J. u. a.: Indoor Path-Planning Algorithm for UAV-Based Contact Inspection. In: Sensors, Basel, Switzerland, 21.2, 2021.
- [146] González-deSantos, L. M., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H. u. a.: Path Planning for Indoor Contact Inspection Tasks with UAVs. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B4-2020, S. 345-351, 2020.
- [147] González-deSantos, L. M., Martínez-Sánchez, J., González-Jorge, H. u. a.: Path Planning for Indoor Contact Inspection Tasks with UAVs. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B4-2020, S. 345–351, 2020.
- [148] Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.: Deep Learning, MIT Press, 2016 (<http://www.deeplearningbook.org>) [Online, Zugriff 15.02.2024].
- [149] Görler, Kühni, Bödefeld: WSVPruf-ein IT-System für die Bauwerksinspektion nach VV-WSV 2101. Bundesanstalt für Wasserbau, 2007, (<https://hdl.handle.net/20.500.11970/100498>) [Online, Zugriff 24.04.2023].
- [150] Graße W.: DIN-Fachbericht 103-Bemessung von Stahlbrücken, TU Dresden, 2001.
- [151] Graße, W.: Lasten und Einwirkungen auf Brücken einschließlich Kombinationsregeln (DIN-Fachbericht 101), Technische Universität Dresden (https://www.gmg-ing.de/wp-content/uploads/FB_101.pdf) [Online, Zugriff 04.11.2023].

- [152] Gülhan, S.: Videokonferenz (intern) am 17.11.2022, Lauda, Spectair, 2022.
- [153] Haardt, P., Gehrlicher, K., Prehn, W.: Bauwerks-Management-System (BMS)-Werkzeug zur Substanzerhaltung für Verkehrsbauwerke. In: Bautechnik 81, Heft 10, S. 794-798, Ernst & Sohn, Berlin, 2004.
- [154] Haardt, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken und Ingenieurbau, Heft B22, 1999.
- [155] Haardt, P.: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz - Stufen 1 und 2, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 43, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2003.
- [156] Haardt, P.: Erarbeitung von Kriterien zur Zustandserfassung und Schadensbeurteilung von Brücken und Ingenieurbauwerken-Schlussbericht zum Projekt 97243/B4, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1997.
- [157] Haardt, P.: Intelligente Brücke. In: Fachtagung Bauwerksdiagnose, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2018.
- [158] Haardt, P.: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken, Schlussbericht zum AP-Projekt 97244, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1998.
- [159] Haardt, P.: Straßenbrücken in Deutschland-Bestand, Erhaltung, Bauwerksprüfung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2001.
- [160] Haardt, P.: Vom schadensbasierten zum zuverlässigkeitsorientierten Erhaltungsmanagement für Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen. In: Peil, U. (Hg.): Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung. Abschluss-Symposium 2010 - Sonderforschungsbereich 477, S. 11–16, o.O., 2010.
- [161] Hafen Hamburg: <https://www.hafen-hamburg.de/de/schiffe/brueckenpruefer/> [Online, Zugriff 18.05.2023].
- [162] Hallermann, N., Helmrich, M., Morgenthal, G., Schitzler, E.: UAS-basierte Diagnostik von Infrastrukturbauwerken. In: Bautechnik 95, Heft 10, S. 720-726, Ernst & Sohn, Berlin, 2018.

- [163] Harding, J.E., Parke, G., Ryall, M.: Bridge Management-Inspection, Maintenance, Assessment and Repair, 3. Auflage, Guildford (UK), 1996.
- [164] Harweg, T., Peters, A., Bachmann, D., Weichert, F.: Cnn based deep architecture for health monitoring of civil and industrial structures using uavs, Proceedings, 42(1), 2020.
- [165] Haveresch, K.: Schnellbauweisen für Brücken mit modernen Betonfertigteilen-schneller, schlanker und nachhaltiger, Vortrag VDI Wissensforum 2023, Die Autobahn GmbH, 29.11.2023.
- [166] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J.: Deep residual learning for image recognition. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016.
- [167] Hechler, T.; Chalas, F.: Videokonferenz (intern) am 11.01.2023 und E-Mail-Verkehr, Lauda, Twinsity, 2023.
- [168] HEIGHT TECH: <https://heighttech.com/produkte/ht-8-c180/> [Online, Zugriff 19.10.2022].
- [169] Hemmert-Halswick A.: Erfahrungssammlungen: Schäden an Stahlbrückenwetterfeste Stähle-Seile, Bundesanstalt für Straßenwesen, Fachveröffentlichung Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau Heft B 45, Wirtschaftsverlag NW Verlag, Bergisch Gladbach, 2004.
- [170] Hennemann, M.: Digitale Fotografie-Das große Handbuch, 1. Auflage, Addison-Wesley Verlag, München, 2012.
- [171] Heungbae, G.: Renovation of Structural Health Monitoring System for Seohae Bridge, Seoul, South Korea. In: Journal of the Transportation Research Board, Nr. 2201, S. 131-138, 2010.
- [172] Hindersmann, I.: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken - Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen, 2021, (https://www.researchgate.net/publication/363859647_Daueruberwachung_von_Bestandsbrucken_-_Quantifizierung_von_Zuverlassigkeit_und_Nutzen) [Online, Zugriff 09.12.2023].
- [173] Hindersmann, I.: Intelligente Brücke-Umsetzung von Teilaspekten der "Intelligenten Brücke" bei Bestandsbauwerken, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2017.

- [174] Hoffmann et al.: RISKMON Anlageninspektion und RISK-MONitoring mit Hochleistungs-drohnen (UAS/UAV). Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien (Hrsg.), Wien, 2016.
- [175] Hofmann, L, Mohrmann, M., Huisinga, H.: Intelligente Bauwerke - Konzepte und Verfügbarmachung intelligenter Energieversorgung am Bauwerk die energieautarke Brücke, Abschlussbericht FE 15.0547/2011/LRB der Bundesanstalt für Straßenwesen, Hannover, 2014.
- [176] Holst et al.: Bauwerksprüfung unterstützt durch neuartige Besichtigungstechniken - Erste Erfahrungen. In: Bautechnik 93, Heft 10, S.742-746, Ernst & Sohn, Berlin, 2016.
- [177] Holst R.: Systematische Brückenerhaltung-eine fachübergreifende Herausforderung, In: Bautechnik 92, Heft 2, S. 111–115, Ernst & Sohn, Berlin, 2015.
- [178] Holst, A., Siegert, C., Empelmann, M., Budelmann, H.: Überwachungskonzept für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 118, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2015.
- [179] Holst, R., Holst, K. H.: Berechnungsgrundlagen für Brückenbauwerke, Ernst & Sohn, Berlin, 2014.
- [180] Holst, R., Holst, K. H.: Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton-Entwurf, Konstruktion und Berechnung, 6. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2014.
- [181] Holst, R.: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz - Stufe 3, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 50, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2006.
- [182] Holst, R.: Grundlagen-Einsatzgebiete-rechtliche Rahmenbedingungen für Drohnensysteme. In: Bautechnik 95, S. 1-6, Ernst & Sohn, Berlin, 2018.
- [183] Holst, R.: Zukunft der Bauwerksprüfung - Bedeutung, Herausforderung und neue Möglichkeiten. In: Erfahrungsaustausch des Brückenprüfpersonals-24. Zusammenkunft der Ingenieurinnen/Ingenieure der Bauwerksprüfung, S. 20-25, Verein zur Förderung der Qualitätssicherung und Zertifizierung der Aus- und Fortbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren der Bauwerksprüfung e.V., 2014.

- [184] Hubbard, B., Hubbard, S.: Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Bridge Inspection Safety, MDPI, 2020.
- [185] Huber: Brücken- und Ingenieurbau-Überwachung und Prüfung, Bundesministerium für Verkehr, Sachgebiet 05.7. In: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau, Heft 5, 1999.
- [186] Infrazytica.com: <https://infrazytica.com/dienstleistungen/> [Online, Zugriff 10.08.2023].
- [187] INFRALYTICA: Bildbasierte digitale Modellierung + Diagnostik von Infrastrukturbauwerken, Flyer, INFRALYTICA GmbH, Weimar, o.J.
- [188] Ingenieurkammer Bremen: Empfehlungen für Stundensätze-Herleitung, (https://www.ikhb.de/sites/default/files/2020-03/2020-03-04%20AK%20IK%20Stundensatz-Empfehlungen%202020%20Herleitung_0.pdf) [Online, Zugriff 15.05.2023].
- [189] Jumbo-Mietservice: <https://jumbo-mietservice.de/mietservice/13-lkw-arbeitsbuehnen/26-lkw-arbeitsbuehne-allgemeine-informationen.html> [Online, Zugriff 02.04.2023].
- [190] K. Simonyan, K., Zisserman, A.: Very deep convolutional networks for largescale image recognition. CoRR, 2015.
- [191] Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.
- [192] Kalameya, J.: Interview (intern) am 28.11.2022, PSP Ingenieure GmbH, Dortmund, 2022.
- [193] Käpplein, R., Wiegach-Frey, A.: Historische Eisen- und Stahlkonstruktionen, Engelhardt & Bauer, o.O., 2001.
- [194] Kaschner, R., Buschmeyer, W., Schnellenbach-Held, M. et al.: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Brücken- und Ingenieurbau Heft B 68, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2009.
- [195] Kellner, M., Stahl, B., Reiterer, A.: Reconstructing Geometrical Models of Indoor Environments Based on Point Clouds. In: Remote sensing, Vol. 15, Issue 18, Artikelnr. 4421, S. 21, 2023.
- [196] Kempkens, E.: Qualitätssicherungskonzept Intelligente Brücke - Betriebssicherheit des ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Bauwerksmonitorings,

Quellenverzeichnis

- Fachveröffentlichung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2021.
- [197] Kern F.: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2003.
- [198] Kiefer, T.: Spritkostenrechner (<https://www.spritkostenrechner.de/fahrtkostenrechner>) [Online, Zugriff 31.03.2023].
- [199] Kienzle, C.: E-Mail vom 20.02.2023, Lauda, Regierungspräsidium Stuttgart - Luftverkehr und Luftsicherheit, 2023.
- [200] Kim, I.-H. et al.: Comparative Study of Bridge Inspection and Condition Assessment between Manpower and a UAS, MDPI, 2022.
- [201] Kindmann, R.: Verbindungen im Stahlbau, 2. Auflage, Ernst & Sohn, o.O., 2009.
- [202] Kleinert, M., Sawo, F. et al.: Intelligente Bauwerke - Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 164, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2021.
- [203] klickrent GmbH: <https://www.klickrent.de/> [Online, Zugriff 04.03.2023].
- [204] Kloos, K.: Schraubenverbindungen, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [205] König, M.: BIM 1076 - Die digitale Bauwerksprüfung. In: <https://strucinspect.com/bim-1076-vortrag-download>, Vortragsfolien, Technische Hochschule Deggendorf, 2022. [Online, Zugriff 20.09.2022]
- [206] Kopterflug.de: <https://www.kopterflug.de/bruecken/> [Online, Zugriff 12.02.2023].
- [207] Kopterflug: <https://www.kopterflug.de/was-darf-ein-drohneneinsatz-kosten/> [Online, Zugriff 06.04.2023].
- [208] Kopter-Profi: <https://www.kopter-profi.de/drohnen-fuehrerschein/betriebsgenehmigung-spezielle-kategorie#:~:text=Basic,MwSt> [Online, Zugriff 14.08.2022].
- [209] Krebs, H.-A.; Hagenweiler, P.: Inspektion von Brücken und Ingenieurbauwerken mit unbemannten Luftfahrzeugsystemen, Konzeptstudie, kassel university press GmbH, 2019.

- [210] Kremling, S., Kühne, J.: Brücken Asset Management-Standardisierung als Treiber im Lebenszyklusmanagement. In: 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Tagungshandbuch, Krieger, J. (Hrsg.), expert verlag, Tübingen, 2021.
- [211] Krieger, J., Kaschner, R., Haardt, P.: Die objektbezogene Untersuchung und Bewertung von Brücken im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems. In: Bautechnik 77, Heft 7, S. 453-463, 2000.
- [212] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.: ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. In: Advances in Neural Information, Processing Systems, 25, p. 1097–1105, 2012.
- [213] Krzystek, P., Polewski, P.: Objektbasierte Segmentierung und Klassifikation von Li-DAR-Punktwolken. In: Heipke, C. (eds) Photogrammetrie und Fernerkundung. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [214] Kuhlmann, U. et al.: Ganzheitliche Bilanzierung von Stahlverbundbrücken. In: Stahlbau-Kalender 2016: Eurocode 3 - Grundnorm, Werkstoffe und Nachhaltigkeit, S. 740 - 793, Ernst & Sohn, Berlin, 2016.
- [215] Kuhlmann, U.; Hubmann, M.: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 127, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2016.
- [216] Kühne, J.: Brücken Asset Management - Angewandte Digitalisierung für die Mobilität von morgen. In: Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, 2021.
- [217] Länderübergreifende Arbeitsgruppe „Leistungsfähige Rheinquerung Karlsruhe/ Wörth“: 12. Umweltbelastungen aufgrund von Staus, Stuttgart, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, o.J.
- [218] Landrock, H.; Baumgärtel, A.: Die Industriedrohne-der fliegende Roboter, Springer Verlag, Wiesbaden, 2018.
- [219] Lauterbach, H. A., Nüchter, A.: Preliminary Results on Instantaneous UAV-Based 3D Mapping for Rescue Applications. In: 2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), Piscataway, NJ, IEEE, 2018.
- [220] Lehardt, A., Seiler, D., Gerdes, A. et al.: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur-Entwicklung eines verkehrsträgerübergrei-

- fenden, indikatorgestützten Systems, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 159, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2020.
- [221] Lener G., Weichert J.: Praktische Anwendungen der effektiven Kerbspannungen und der Bruchmechanik im Stahlbau. In: Stahlbau 76, Heft 10, Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- [222] Luftfahrt-Bundesamt: <https://lba-openuav.de/> [Online, Zugriff 18.09.2021].
- [223] Luftfahrt-Bundesamt: https://www.lba.de/DE/Drohnen/Betriebsgenehmigungen_LUC/Betriebsgenehmigungen_LUC_node.html [Online, Zugriff 12.08.2021].
- [224] Luftfahrt-Bundesamt: https://www.lba.de/DE/Drohnen/FAQ/01_FAQ_Allgemein/FAQ_node.html [Online, Zugriff 29.10.2021].
- [225] Luftfahrt-Bundesamt: https://www.lba.de/DE/Drohnen/UAS_Betreiberregistrierung/UAS_Betreiberregistrierung_node.html [Online, Zugriff 07.02.2022].
- [226] LuftVO: Luftverkehrs-Ordnung, 29.10.2015.
- [227] LuftVZO: Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 01.04.1979, zuletzt geändert am 07.12.2021.
- [228] M2ing: <https://m2ing.com/produkt/> [Online, Zugriff 11.03.2024].
- [229] Magoley, N.: Marode Brücken in ganz NRW, Westdeutscher Rundfunk, 17.05.2018 (<https://www1.wdr.de/nachrichten/marode-bruecken-nrw-102.html>) [Online, Zugriff 10.10.2022].
- [230] Map2Fly: <https://app.flynex.io/a/map/fn> [Online, Zugriff 13.02.2023].
- [231] Mashhadi, A. H., Azad, A. R. G., Tavakolan, M.: Life cycle cost comparison of strengthening a steel bridge using post-installed shear connectors with bridge reconstruction. In: International Journal of Construction Management, Taylor & Francis Group, 08/2021.
- [232] Matek, W.: Maschinenelemente, 11. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 1994.
- [233] Maurer Engineering GmbH: Maurer Bauwerkslager Spitzentechnologie für nachhaltige Lösungen, München (<https://www.maurer.eu/fileadmin/media->

- pool/01_products/Bauwerkslager/Broschueren_technInforma-
tion/MSO_Bro_Bauwerkslager_A4_D_Online.pdf) [Online, Zugriff
04.05.2023].
- [234] Mehlhorn, G., Curbach, M. (Hrsg.): Handbuch Brücken - Entwerden, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, 3. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [235] MEMO/14/259: Remotely Piloted Aviation Systems (RPAS)-Frequently Asked Questions, Europäische Kommission, 2014.
- [236] Mertens, M. et al.: Handbuch Bauwerksprüfung: Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit, 1. Auflage, Rudolf Müller, Köln, 2015.
- [237] Mertens, M., Gunkel, O.: Bauwerksprüfung nach DIN 1076, Archaisches Abklopfen oder moderne Technik?, Fachtagung Bauwerksdiagnose, Bochum, 2014.
- [238] Mischo, H. et al.: Monitoring für Ingenieurbauwerke-Ein Anwenderbericht aus der Sicht eines Ingenieurbüros. In: Bautechnik 99, Heft 7, S. 556-564, Ernst & Sohn, Berlin, 2022.
- [239] Miyamoto, A. Motoshita M.: Development and Practical Application of a Bridge Management System (J-BMS) in Japan, Civil Engineering Infrastructures Journal, Heft 48 (1), S. 189–216, University of Tehran Press, 2015.
- [240] More-Connect: BIM Modelling using photogrammetry data (https://www.more-connect.eu/wp-content/uploads/2017/05/3rd_training-module_short.pdf) [Online, Zugriff 19.03.2023].
- [241] Morgenthal et al.: Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken, Fraunhofer IRB Verlag, Weimar, 2015.
- [242] Morgenthal, G. et al.: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 - Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles - Unbemannte Fluggeräte), Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 171, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2021.
- [243] Morgenthal, G., Hallermann, N., Achtelik, M.: Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken, Abschlussbericht, Bd. 2971, Forschungsinitiative Zukunft Bau F. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [244] Morgenthal, G.; Hallermann, N.: Quality Assessment of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) Based Visual Inspection of Structures. In: Advances in Structural

Quellenverzeichnis

- Engineering, Volume 17 No.3, Multi-Science Publishing Co. LTD., Essex, 2014.
- [245] NavVis GmbH: <https://www.navvis.com/> [Online, Zugriff 05.02.2024].
- [246] NBI: National Bridge Inventory (Federal Highway Administration (FHWA);), 2004.
- [247] NBIS: National Bridge Inspection Standards (Federal Highway Administration (FHWA)), 2004.
- [248] o. V.: <http://slr-foto.de/bildwinkel.htm> [Online, Zugriff 24.08.2021].
- [249] o. V.: <https://kamera-objektive-test.de/brennweite/> [Online, Zugriff 09.01.2022].
- [250] o. V.: https://www.moog-online.de/__we_thumbs__/1422_6_mbu-1.jpg [Online, Zugriff 10.08.2022].
- [251] o. V.: <https://www.pixolum.com/blog/fotografie/was-ist-eine-systemkamera> [Online, Zugriff 23.11.2022].
- [252] o.V. :<https://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/> [Online, Zugriff 28.10.2023].
- [253] o.V.: Bauwerksprüfung nach DIN 1076. In: Bautechnik 84, Heft 7, S. 430-431, 2007.
- [254] o.V.: Bridge Inspection and Diagnosis Manual (Road Development Authority, Japan International Cooperation Agency), o.O., 2017.
- [255] o.V.: Brücken maroder als bekannt-Zunehmender Lkw-Verkehr in NRW beschleunigt den Verfall. In: Ruhrnachrichten vom 06. September 2018.
- [256] o.V.: Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten, Bauministerkonferenz-Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder, o.O., 09/2006.
- [257] o.V.: <http://saugbagger-betriebe.de/betrieb/brueckenpruefung/index.html> [Online, Zugriff 22.10.2023].
- [258] o.V.: <http://www.beschichtungsinspektor.eu/ursachen-von-beschichtungsschaeden/> [Online, Zugriff 26.07.2023].

- [259] o.V.: <https://bostondynamics.com/products/spot/> [Online, Zugriff 11.04.2024].
- [260] o.V.: <https://droniq.de/bauerwerksinspektion-im-wandel/> [Online, Zugriff 11.04.2024].
- [261] o.V.: https://hangar-11.de/uav-inspektion-mit-drohne?gclid=CjwKCAjwq_D7BRADEiwAVMDdHnh-eWa7x2UQOAUOBG-479MFjqGhrZhUZlaxgKSm9Ve4YqI_QjnPRoCo2cQAvD_BwE [Online, Zugriff 26.02.2022].
- [262] o.V.: <https://ki-echo.de/glossar/vertrauenswuerdige-voxelisierung/> [Online, Zugriff 11.05.2024].
- [263] o.V.: <https://korrosion-online.de/korrosionsformen/schweissnaht.html> [Online, Zugriff 19.05.2023].
- [264] o.V.: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-60766-0_4 [Online, Zugriff 19.03.2022].
- [265] o.V.: <https://strucinspect.com/de/digitale-inspektionen-mit-ai-durch-strucinspect/> [Online, Zugriff 11.06.2024].
- [266] o.V.: <https://vectorbirds.com/aircrafts/kite-75> [Online, Zugriff 19.08.2022].
- [267] o.V.: <https://via.bund.de/bast/br/map/> [Online, Zugriff 13.04.2023].
- [268] o.V.: <https://vizaar.de/bauwerksinspektion-mit-drohnen/> [Online, Zugriff 19.08.2023].
- [269] o.V.: <https://vizaar.de/bauwerksinspektion-mit-drohnen/> [Online, Zugriff 11.04.2024].
- [270] o.V.: <https://www.aerophoto.de/bauwerksinspektionen/> [Online, Zugriff 11.06.2024].
- [271] o.V.: https://www.baw.de/de/die_baw/die_baw.html;jsessionid=5BE26679B22652A7F1B22D530F165961.live11312 [Online, Zugriff 04.09.2023].
- [272] o.V.: https://www.coptertech.de/industrieinspektion?gclid=CjwKCAjwq_D7BRADEiwAVMD-dHvCmH1YBWLg1IFaAaWjr54yYBRzTUkUw9KKP_WCwWsLvvo95x_fjd-hoCpjpgQAvD_BwE [Online, Zugriff 02.05.2023].

- [273] o.V.: <https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/wasserstrassen/wasserstrassen-node.html> [Online, Zugriff 08.11.2023].
- [274] o.V.: <https://www.hausjournal.net/lochfrasskorrosion> [Online, Zugriff: 19.01.2022].
- [275] o.V.: <https://www.ikz.de/ikz-praxis-archiv/p0309/030903.php> [Online, Zugriff, 17.03.2022].
- [276] o.V.: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/bild--und-signalverarbeitung/3d-bildverarbeitung/segmentierungsverfahren.html> [Online, Zugriff 11.05.2024].
- [277] o.V.: <https://www.moz.de/lokales/bad-freienwalde/brueckenpruefung-zu-wasser-und-in-der-luft-49338858.html> [Online, Zugriff 21.08.2023].
- [278] o.V.: Synthesis of National and International Methodologies Used for Bridge Health Indices (Federal Highway Administration (FHWA)), o.O., 2016.
- [279] Oehme, P., Vogt, W.: Schäden an Tragwerken aus Stahl, Fraunhofer IRB Verlag, o.O., 2003.
- [280] Öffentlicher Dienst: <https://oeffentlicher-dienst.info/c/t/rechner/tv-l/west?id=tv-l-2023&matrix=1> [Online, Zugriff 17.03.2023].
- [281] OSA: Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 12/2007.
- [282] Osimab: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, (<https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/online-sicherheits-managementsystem-bruecken-osimab.html>) [Online, Zugriff 05.12.2022].
- [283] Otto, J.; Weller, C.: Einsatz unbemannter Flugsysteme im Brückenbau. In: Curbach M. (Hrsg.), 28. Dresdner Brückenbausymposium, Tagungsband, S. 87-97, Technische Universität Dresden, 2018.
- [284] Peeters, B., Couvreur, G., Razinkov, O. et al.: Continuous monitoring of the Øresund Bridge-System and data analysis. In: Structure and Infrastructure Engineering, S. 2159-2174, 2009.
- [285] Pelikan W., Esslinger M.: Die Stahlfahrbahn - Berechnung und Konstruktion. In: MAN-Forschungsheft Nr. 7, Augsburg, 1957.

- [286] Pfeifer, R. H., Mölter, T. M.: Handbuch Eisenbahnbrücken-Grundsätze für Planung und Konstruktion sowie Hinweise auf Bauverfahren, 1. Auflage, Eurailpress Verlag, o.O., 2008.
- [287] Pix4D GmbH: <https://www.pix4d.com/de/blog/genauigkeit-luftbildvermessungen/> [Online, Zugriff 07.03.2023].
- [288] Pix4D GmbH: <https://www.pix4d.com/de/produkt/pix4dcapture/> [Online, Zugriff 21.06.2023].
- [289] Poku-Agyemang, K., Kellner, M., Schmitt, A., Reiterer, A.: Creating 3D Models of Bridges Using Different Data Sources and Machine Learning Methods. In: 33rd European Safety and Reliability Conference, ESRE, Proceedings, 2023.
- [290] PSP - Prof. Sedlacek & Partner Planung und Entwicklung im Bauwesen GmbH, Brückenprüfberichte (intern).
- [291] Rahm, B.: Telefongespräch (intern) am 11.11.2022, Autobahn Südwest, 2022.
- [292] Ralbovsky, M., Prammer, D., Lachinger, S., Vorwagner, A.: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken, AIT Austrian Institute of Technology GmbH Wien, 2020.
- [293] Raml, C.: Videokonferenz (intern) am 12.12.2022, Aero Enterprise GmbH, 2022.
- [294] RAS-N: Richtlinien für die Anlage von Straßen-Netzgestaltung, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 1988.
- [295] Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges (Federal Highway Administration (FHWA)), Washington D.C., 1995.
- [296] Reddemann, T.: Innovative Lösungen für schnelles Bauen, Vortrag VDI Wissensforum 2023, Echterhoff GmbH, REKERS Betonwerk GmbH, 29.11.2023.
- [297] RE-ING: Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten-Teil 2: Brücken, Abschnitt 3: Bauliche Durchbildung und Ausstattung von Brücken zur Überwachung, Prüfung und Erhaltung (BDA-BRÜ), 2017.
- [298] Reinhardt, M.; Gebauer, D.; Marx, S.: Anforderungen und Konzept für eine automatisierte Zustandserfassung von Bauwerken mittels Bilderfassung und

- auswertung. In: Bautechnik 95, Heft 10, S. 705-711, Ernst & Sohn, Berlin, 2018.
- [299] Reply.com: <https://www.reply.com/de/data-world/beurteilung-von-kfz-schaden-mithilfe-von-bildererkennung> [Online, Zugriff 26.09.2023].
- [300] RI-EBW-PRÜF/Schadensbeispiele: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 02/2017.
- [301] RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 1988.
- [302] RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 1994.
- [303] RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 02/2017.
- [304] RI-ERH-ING - Leitfaden OSA, Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse bei Ingenieurbauwerken, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017.
- [305] Rill, D.: Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 168, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2021.
- [306] RI-WI-BRÜ: Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, 12/2007.
- [307] Roos, E., Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2015.
- [308] RWTH Aachen: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1688382/1688382.pdf> [Online, Zugriff 15.02.2024].
- [309] S. Müller, S.: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

- (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 111, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2014.
- [310] SAMCO: Europabrücke Austria, SAMCO Final Report, 2006 (<https://ishmii.org/wp-content/uploads/2010/07/EuropaBrucke1Information.pdf>) [Online, Zugriff 15.12.2022].
- [311] Sattar et al.: Fatigue Crack Detection Using Unmanned Aerial Systems in Fracture Critical Inspection of Steel Bridges, Utah State University, 2017.
- [312] Sauerlandkurier: <https://www.sauerlandkurier.de/hochsauerlandkreis/bestwig/geduldsprobe-in-schwindelerregender-hoehe-brueckenpruefung-an-talbruecke-im-sauerland-90901069.html> [Online, Zugriff 27.02.2023].
- [313] Sawo, F., Klumpp, V., Beutler, F.: Intelligente Bauwerke-Anforderungen an die Aufbereitung von Messgrößen und ihrer Darstellungsformen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 114, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2015.
- [314] Schenk, M. (Hrsg.): Leitfaden Laserscanning im Anlagenbau - Vorbereitung und Durchführung von Laserscanningprojekten für die Planung und Dokumentation von industriellen Anlagen, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg, 2018.
- [315] Schmid, A.: Ferngesteuerte Hafeninspektion. In: VDI Nachrichten Nr. 40, S.12-13, 2019.
- [316] Schmid, Manfred: Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken bei Kreis- und Gemeindestraßen. Bayerischer Kommunalen Prüfungsverband, Geschäftsbericht 2009.
- [317] Schmiedel, K.: Bauen und Gestalten mit Stahl, 3. Auflage, Expert-Verlag, o.O., 1974.
- [318] Schneider, R., Fischer, J., Straub, D., Thöns, S. et al.: Intelligente Bauwerke - Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 117, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2015.
- [319] Schneider, U.: Drohnen-legal und professionell, 2. überarbeitete Auflage (Erstauflage 2019), Bildner Verlag, Passau, 2022.

- [320] Schnellenbach-Held, M. et al.: Intelligente Brücken - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 105, Carl Schünemann Verlag, Bergisch Gladbach , 2014.
- [321] Schnellenbach-Held, M., Fakhouri, A., Steiner, D., Kühn, O.: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 101, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2014.
- [322] Schnellenbach-Held, M., Peeters, M., Miedzinski, G.: Intelligente Brücke - Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotentiale von Brückenbauwerken aus Beton, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 110, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2015.
- [323] Schnellenbach-Held, M.: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 116, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2015.
- [324] Schröder, M.: Quo vadis? Weiterentwicklung der Beschichtungsstoffe, Bundesanstalt für Straßenwesen, Fachgespräch "Stahlbrückenbau", Bergisch Gladbach, 27.09.2017.
- [325] Schubert R. E. Hitzel A.: Managementsystem Brückenerhaltung "3. Stufe", Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau. In: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 746, Typo-Druck & Verlagsgesellschaft, Bonn - Bad Godesberg, 1997.
- [326] Schubert R. E. Kraft H. Keßler E.: Entwicklung eines Managementsystems für die Brückenerhaltung unter Berücksichtigung einer objektbezogenen Bedarfsermittlung. In: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 681, Typo-Druck & Verlagsgesellschaft, Bonn - Bad Godesberg, 1994.
- [327] Schubert, M., Faber, M., Betz, W. et al.: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Monitoringmaßnahmen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 156, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2020.

- [328] Schubert, M.: Verkehrsverflechtungsprognose 2030-Netzumlegungen, Belastungskarten Straße, Schiene, Wasserstraße (Lose 4-6), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (https://bmdv.bund.de/Shared-Docs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-netzumlegungen.pdf?__blob=publicationFile) [Online, Zugriff 08.01.2024].
- [329] Schulitz, H.C., Sobek, W., Habermann, K.J. (Hrsg.): Stahlbau-Atlas, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, Müller, Köln, 1999.
- [330] Schweizer Radio und Fernsehen: <https://www.srf.ch/news/schweiz/automatische-gesichtserkennung-so-einfach-ist-es-eine-ueberwachungsmaschine-zu-bauen> [Online, Zugriff 15.02.2024].
- [331] Sedlacek G., Paschen M., Feldmann M.: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Teil B-Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 76, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 2011.
- [332] Sedlacek G., Paschen M.: Neue Wege bei der Verstärkung orthotroper Fahrbahnplatten, Fachveröffentlichung Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2008.
- [333] Sedlacek G., Paschen M.: Untersuchung zur nachhaltigen Instandsetzung von orthotropen Fahrbahnplatten, Fachveröffentlichung Reihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2005.
- [334] Sedlacek, G., Paschen, M.: Die Bedeutung einer qualifizierten Bauwerksprüfung. In: Stahlbau 78, Heft 8, S. 584-592, 2009.
- [335] Seening Eagle: Digital Periodic Structural Inspection (PSI) for Higher Efficiency (<https://www.screeningeagle.com/de/wiki-print/4378>) [Online, Zugriff 11.03.2024].
- [336] Shin et al.: Structural Displacement Measurement Using an Unmanned Aerial System. In: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 33, S.183-192, 2018.
- [337] Shirato M. Tamakoshi, T.: Bridge inspection standards in Japan and the US, o.O., o.J.
- [338] Singer, D.; Borrmann, A.: Machbarkeitsstudie BIM für Bestandsbrücken, Schlussbericht, Technische Universität München, 2016.

- [339] skyzr GmbH: [https://www.dein-drohnenpilot.de/was-verdient-ein-drohnenpilot/#:~:text=Die%20Mehrheit%20der%20teilgenommen%20Drohnenpiloten,5%25\)%20auf%20Platz%203](https://www.dein-drohnenpilot.de/was-verdient-ein-drohnenpilot/#:~:text=Die%20Mehrheit%20der%20teilgenommen%20Drohnenpiloten,5%25)%20auf%20Platz%203) [Online, Zugriff 28.03.2023].
- [340] Socher, A.: Entwicklung der Verkehrseinwirkungen auf Bundesautobahnen. In: 1. Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, Tagungshandbuch, Krieger, J. (Hrsg.), expert verlag, Tübingen, 2021.
- [341] Sony: <https://www.sony.de/electronics/wechselobjektivkameras/ilce-7rm2/specifications> [Online, Zugriff 04.06.2023].
- [342] Sousa, H.: Design and Implementation of a Monitoring System Applied to a Long-Span Prestressed Concrete Bridge. In: Structural Concrete, Bd. 12, Nr. 2, S. 82-93, 2011.
- [343] SpaceWeatherLive: <https://www.spaceweatherlive.com/de/hilfe/was-ist-der-kp-index.html> [Online, Zugriff 09.03.2022].
- [344] Spectair.com: <https://www.spectair.com/drohneninspektion/brueckeninspektion/> [Online, Zugriff 12.04.2023].
- [345] Sperber, M. et al.: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung-Pilotstudie, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 139, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2017.
- [346] Standard Specifications for Highway Bridges (AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials), 17. Ausgabe, American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington D.C., 2002.
- [347] Steffens, N., Degenhardt, K., Geißler, K.: Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring. In: 10. Symposium, Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen, Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau, Heft 48, Dresden, 2019.
- [348] Steffens, N.: Sicherheitsäquivalente Bewertung von Brücken durch Bauwerksmonitoring, Dissertation, TU Berlin, Shaker Verlag, Düren, 2019.
- [349] Stemmer, J.: Systematische Schadensanalyse bei Brückenprüfungen mittels UAV, Masterarbeit, TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2019.
- [350] steuernetz.de: StVZO, Achslast und Gesamtgewicht (<https://www.steuernetz.de/gesetze/stvzo-1/34>) [Online, Zugriff 20.11.2021].

- [351] Stosik, V.: E-Mail (intern) vom 10.02.2023, Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz - Fachgruppe Luftverkehr, 2023.
- [352] STRABAG: Informationsgespräch STRABAG (intern), STRABAG Rail, 12.04.2023.
- [353] Stranghöner N., Lorenz C., Raake V., Straube E., Knauff M.: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Teil B-Brücken- und Ingenieurbau Heft B 136, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2017.
- [354] Stranghöner, N., Lorenz, C., Friedrich, H.: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden. In: Stahlbau 86, Heft 7, S. 562-573, Ernst & Sohn, Berlin, 2017.
- [355] Straßen. NRW: Lüdenscheid: Verkehr infolge der A45-Sperrung (<https://www.strassen.nrw.de/de/luedenscheid-verkehr-infolge-a45-sper-rung.html>) [Online, Zugriff 24.08.2023].
- [356] StrWG NRW: Straßen- und Wegegesetz des Landes Nordrhein-Westfalen vom 23.09.1995, zuletzt geändert am 01.02.2022.
- [357] Tagesschau: <https://www.tagesschau.de/inland/bruecken-investition-101.html>, [Online, Zugriff 11.10.2022].
- [358] Tagesschau: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/autobahn-gesellschaft-bruecken-verkehr-bau-101.html> [Online, Zugriff 12.12.2022].
- [359] Terranets BW.de: <https://www.terranets-bw.de/fuer-kunden/dienstleistungen/drohnenbefliegung/inspektion-von-strommasten> [Online, Zugriff 25.08.2023].
- [360] Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr: Leistungsbild für Bauwerksprüfungen im Freistaat Thüringen im Zuständigkeitsbereich des TLBV, Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr, Erfurt, 2020.
- [361] UAV Dach e.V.: <https://www.uavdach.org/von-der-aufstiegserlaubnis-zur-allgemeinverfuegung-und-sora-ger/> [Online, Zugriff 12.04.2023].
- [362] Ungermann, D., Brune, B., Giese, P.: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 128, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2016.

- [363] Ungermann, D., Hundrup, A.: Inspektion, Überwachung und Dokumentation stahlbaulicher Strukturen. 23. DAST-Forschungskolloquium, Technische Universität Dortmund, Dortmund, 2022.
- [364] Ungermann, D., Kalameya, J., Peters, A., Kröger, L.: Kategorisierung und Bewertung von Schäden bei Stahlkonstruktionen-Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 11VB/018-0099#020, EBA Forschungsbericht, Bonn, 2019.
- [365] Universität Passau: <https://online-lehre.uni-passau.de/topic/bildwinkel-und-sensorgroesse/> [Online, Zugriff 18.11.2021].
- [366] Valenzuela, J.; Bail, H.: Unmanned Aircraft System Path Planning for Visually Inspecting Electric Transmission Towers. In: Journal of Intelligent & Robotic Systems, S.1097-1111, 2019.
- [367] VDI 2879: Inspektion von Anlagen und Gebäuden mit UAV (Flugdrohnen), Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Düsseldorf, 2018.
- [368] VDI 4008 Blatt 2: Boolesches Modell, Deutsches Institut für Normung e.V., 05/1998.
- [369] VDI 6200: Standsicherheit von Bauwerken, Regelmäßige Überprüfung, VDI-Verein Deutscher Ingenieure e.V., VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Düsseldorf, 02/2010.
- [370] Veit-Egerer, R., Wenzel, H.: Measurement Based Performance Prediction of the Europabrücke Against Traffic Loading, SAMCO Final Report, 2006 (https://www.researchgate.net/publication/226280643_Measurement_Based_Performance_Prediction_of_the_Europabrücke_Against_Traffic_Loading) [Online, Zugriff 15.12.2022].
- [371] Verein zur Förderung der Qualitätssicherung und Zertifizierung der Aus- und Fortbildung von Ingenieurinnen/Ingenieuren der Bauwerksprüfung e.V. (VFIB) (www.vfib-ev.de/vfib/aufgaben.php) [Online, Zugriff 16.04.2023].
- [372] VFIB: <https://vfib-ev.de/vfib/mitgliederliste.php?action=suchen> [Online, Zugriff 17.07.2023].
- [373] VFR Verlag für Rechtsjournalismus GmbH: <https://www.arbeitsrechte.de/spesen/> [Online, Zugriff 29.04.2023].

- [374] Vollrath, F., Tathoff, H.: Handbuch der Brückeninstandhaltung, 2. Auflage, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2002.
- [375] Wang, F., Cui, J.-Q., Chen, B.-M, Lee, T.H.: A Comprehensive UAV Indoor Navigation System Based on Vision Optical Flow and Laser FastSLAM. Acta Automatica Sinica, 39(11):1889–99, 2013.
- [376] WAZ: <https://www.waz.de/wirtschaft/wirtschaft-in-nrw/bauingenieure-verzweifelt-gesucht-id231965843.html> [Online, Zugriff 12.11.2022].
- [377] Weller, C.: Zustandsbeurteilung von Ingenieurbauwerken - Methodik zur Reduzierung subjektiver Bewertungseinflüsse, Dissertation, Technische Universität Dresden, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020.
- [378] Wendler-Kalsch, E.: Korrosionsschadenskunde, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- [379] Wiening, M.: Analyse von Bewertungssystemen zur Zustandserfassung verkehrstechnischer Bauwerke, Masterarbeit, TU Dortmund, Lehrstuhl Stahlbau, 2019.
- [380] Wikipedia: Talbrücke Nuttlar (https://de.wikipedia.org/wiki/Talbr%C3%BCcke_Nuttlar) [Online, Zugriff 19.04.2023].
- [381] Willberg, U. et al.: Empfehlung zur Leistungsbeschreibung, Aufwandsermittlung und Vergabe von Leistungen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076, 5. Auflage, VFIB e.V., Frankfurt, 2022.
- [382] Windmann, S.: Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Brücken- und Ingenieurbau Heft B 187, Fachverlag NW, Bergisch Gladbach, 2022.
- [383] Wink, R.: Daten aus der Luft gewinnen mit Drohnen. In: Messtechnik im Bauwesen, Ernst & Sohn Special, S. 9-11, 2018.
- [384] Wölbart, C.: Roboterhund: Wie die Polizei NRW Spot von Boston Dynamics einsetzt, Heise Online, März 2022. (<https://www.heise.de/hintergrund/Wie-die-Polizei-NRW-den-Roboterhund-Spot-einsetzt-6549476.html>) [Online, Zugriff 11.06.2024].
- [385] Wolchuk R.: Orthotrope Fahrbahnplatte-Entwicklungen und Möglichkeiten für die Zukunft. In: Stahlbau 76, Heft 7, Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- [386] Wölfel Engineering GmbH: Brücken Asset Management für Straßenbrücken-BrAssMan, 2020

- (<https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfundprojekte/brassman.html>) [Online, Zugriff 15.12.2022].
- [387] WPM Ingenieure, Ingenieurgesellschaft für Bauwesen und Datenverarbeitung mbH: Erstellung Software SIB Bauwerke, Neunkirchen-Heinitz, 2001.
- [388] WPM-Ingenieure Ingenieurgesellschaft für Bauwesen und Datenverarbeitung mbH: Anwenderhandbuch WSV-SIB-Bauwerke, Neunkirchen-Heinitz, 2008.
- [389] WPM-Ingenieure Ingenieurgesellschaft für Bauwesen und Datenverarbeitung mbH: Anwenderhandbuch SIB-Bauwerke V 1.9, Neunkirchen-Heinitz, 2014.
- [390] Zeppelin Rental GmbH: <https://www.zeppelin-rental.de/> [Online, Zugriff 02.03.2023].
- [391] Zinke, T.: Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken-Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016.
- [392] ZTV-ING-4.3: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 4: Stahlbau, Stahlverbundbau, Abschnitt 3: Korrosionsschutz von Stahlbauten, 12/2012.

9 Anhang

9.1 ANHANG A1-BAUWERKSPRÜFUNG NACH DIN 1076	208
9.1.1 BEWERTUNGSSCHLÜSSEL NACH HAARDT	208
9.1.2 GRAFISCHE DARSTELLUNG BEWERTUNGSLGORITHMUS DER RI-EBW-PRÜF	209
9.1.3 DEFINITION DER ZUSTANDSNOTE NACH RI-EBW-PRÜF	210
9.2 ANHANG A2 - SCHADENSKATALOG UND SCHADENSANALYSE	212
9.2.1 RANGFOLGE VON STÄHLERNEN BRÜCKENSCHÄDIGUNGEN	212
9.2.2 SCHADENSBEWERTUNG GEMÄß RI-EBW-PRÜF	215
9.2.3 TABELLARISCHER VERGLEICH RI-EBW-PRÜF MIT RIL 804	217
9.2.4 SCHADENSVERTEILUNG EINZELNER SCHADENSKATEGORIEN (4. FILTERUNG)	221
9.2.5 PROZESSSCHEMATA FILTERSTUFEN EINZELNER SCHADENSKATEGORIEN	225
9.2.6 SCHADENSBASIERTER SCHADENSKATALOG	233
9.3 ANHANG A3-BEWERTUNGSLGORITHMUS	235
9.3.1 RI-EBW-PRÜF 1988	235
9.3.2 KRAFT	239
9.3.3 TH DARMSTADT	241
9.3.4 BAST 1997	245
9.3.5 UNITED STATES OF AMERICA	249
9.3.6 JAPAN	256
9.3.7 ALGORITHMUS	257
9.4 ANHANG A4-WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	260
9.4.1 VERGABE VON INSPEKTIONSLEISTUNGEN	260
9.4.2 BRÜCKENPRÜFUNG NACH DIN 1076	261
9.4.3 BRÜCKENPRÜFUNG MIT UAS-UNTERSTÜTZUNG	267

9.1 Anhang A1 - Bauwerksprüfung nach DIN 1076

9.1.1 Bewertungsschlüssel nach Haardt

		V					
		D = 0	0	1	2	3	4
S	0	1,0	1,1	2,0	2,5	4,0	
	1	1,2	1,3	2,1	2,6	4,0	
	2	2,1	2,2	2,3	2,7	4,0	
	3	3,0	3,2	3,4	3,6	4,0	
	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	

		V					
		D = 1	0	1	2	3	4
S	0	1,1	1,3	2,1	2,6	4,0	
	1	1,5	1,7	2,2	2,7	4,0	
	2	2,2	2,3	2,4	2,8	4,0	
	3	3,1	3,3	3,5	3,7	4,0	
	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	

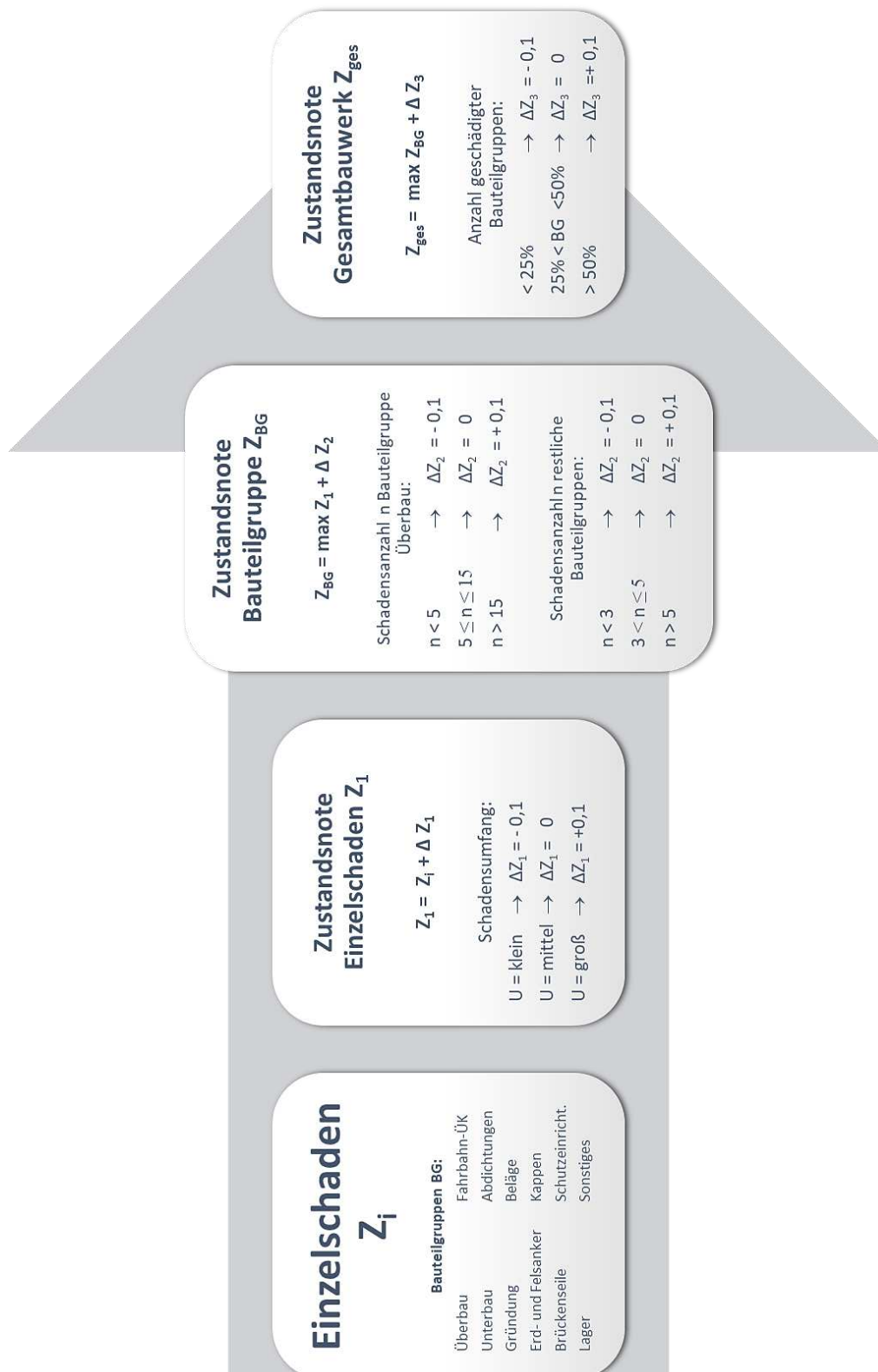
		V					
		D = 2	0	1	2	3	4
S	0	1,8	2,1	2,2	2,7	4,0	
	1	2,2	2,3	2,4	2,8	4,0	
	2	2,3	2,5	2,6	2,9	4,0	
	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	
	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	

		V					
		D = 3	0	1	2	3	4
S	0	2,5	2,6	2,7	2,8	4,0	
	1	2,7	2,8	2,9	3,0	4,0	
	2	2,8	3,0	3,1	3,2	4,0	
	3	3,3	3,5	3,7	3,9	4,0	
	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	

		V					
		D = 4	0	1	2	3	4
S	0	3,0	3,1	3,2	3,3	4,0	
	1	3,2	3,3	3,4	3,5	4,0	
	2	3,3	3,5	3,6	3,7	4,0	
	3	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	
	4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	

Abb. 9.1: Bewertungsschlüssel BAST-Algorithmus nach ([154], S.39)

9.1.2 Grafische Darstellung Bewertungsalgorithmus der RI-EBW-PRÜF



9.1.3 Definition der Zustandsnote nach RI-EBW-PRÜF

Notenbereich	Beschreibung
1,0-1,4	<p>sehr guter Zustand</p> <p>Die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks sind gegeben. Laufende Unterhaltung erforderlich.</p>
1,5-1,9	<p>guter Zustand</p> <p>Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerks sind gegeben. Die Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe kann beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann langfristig geringfügig beeinträchtigt werden. Laufende Unterhaltung erforderlich.</p>
2,0-2,4	<p>befriedigender Zustand</p> <p>Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerks sind gegeben. Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann langfristig beeinträchtigt werden. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerks, die langfristig zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist möglich. Laufende Unterhaltung erforderlich. Mittelfristig Instandsetzung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit können kurzfristig erforderlich werden.</p>
2,5 - 2,9	<p>ausreichender Zustand</p> <p>Die Standsicherheit des Bauwerks ist gegeben. Die Verkehrssicherheit des Bauwerks kann beeinträchtigt sein. Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann beeinträchtigt sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerks, die mittelfristig zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist dann zu erwarten. Laufende Unterhaltung erforderlich. Kurzfristig bis mittelfristig Instandsetzung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit können kurzfristig erforderlich sein.</p>
3,0-3,4	<p>nicht ausreichender Zustand</p> <p>Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind beeinträchtigt. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind. Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkungen sind umgehend erforderlich.</p>
3,5-4,0	<p>ungenügender Zustand</p> <p>Die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit des Bauwerks sind erheblich beeinträchtigt oder nicht mehr gegeben. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerks kann nicht mehr gegeben sein. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung kann kurzfristig dazu führen, dass die Standsicherheit und/oder Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben sind oder dass sich ein irreparabler Bauwerksverfall einstellt. Laufende Unterhaltung erforderlich. Umgehende Instandsetzung bzw. Erneuerung erforderlich. Maßnahmen zur Schadensbeseitigung oder Warnhinweise zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit oder Nutzungseinschränkungen sind sofort erforderlich.</p>

Tab. 9.1: Notenbereiche für die Zustandsbewertung nach BASt [303]

9.1.4 Traglastindex

Index	Beschreibung
I	Die aktuelle, klassifizierte Brückentragfähigkeit entspricht dem geforderten Ziellastniveau oder liegt darüber. Es ergeben sich keine Einschränkungen für die verkehrliche Nutzung.
II	Die aktuelle, klassifizierte Brückentragfähigkeit liegt in Abhängigkeit vom DTV-SV und der größten Stützweite bis zu einer Brückeneinstufungsklasse unterhalb des Ziellastniveaus. Für die verkehrliche Nutzung sind langfristig, sofern keine Nachrechnung vorliegt, ggf. weiterführende Untersuchungen durchzuführen.
III	Die aktuelle, klassifizierte Brückentragfähigkeit liegt in Abhängigkeit vom DTV-SV und der größten Stützweite bis zu zwei Brückeneinstufungsklassen unterhalb des Ziellastniveaus. Für die verkehrliche Nutzung sind langfristig (bis zum Jahr 2035), sofern keine Nachrechnung vorliegt, ggf. weiterführende Untersuchungen durchzuführen.
IV	Die aktuelle, klassifizierte Brückentragfähigkeit liegt in Abhängigkeit vom DTV-SV und der größten Stützweite bis zu drei Brückeneinstufungsklassen unterhalb des Ziellastniveaus. Für die verkehrliche Nutzung sind mittel- bis langfristig (bis zum Jahr 2030), sofern keine Nachrechnung vorliegt, ggf. weiterführende Untersuchungen durchzuführen.
V	Die aktuelle, klassifizierte Brückentragfähigkeit liegt in Abhängigkeit vom DTV-SV und der größten Stützweite in der Regel mehr als drei Brückenklassen unterhalb des Ziellastniveaus. Für die verkehrliche Nutzung sind, sofern keine Nachrechnung vorliegt, ggf. weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Darüber hinaus sind folgende bauart- und materialbedingte Konstruktionsdetails für Brücken mit Einzelstützweiten ab 20 m zu berücksichtigen, bei denen entweder die Bewertung nachfolgender Kriterien noch offen ist oder zu einem negativen Resultat führte und noch keine Gegenmaßnahmen ergriffen wurde: <ol style="list-style-type: none"> 1) Stahl- und Stahlverbundbrücken <ul style="list-style-type: none"> • Beulsicherheit der Tragelemente bei Bauwerken mit Baujahr bis einschließlich 1978 2) Spannbetonbrücken <ul style="list-style-type: none"> • Vorhandene Querkraftbewehrung im Vergleich zur Mindestbewehrung für Querkraft nach DIN-Fachbericht 102 bzw. DIN EN 1992-2 bei Bauwerken mit Baujahr bis einschl. 1966 • Ermüdungssicherheit der Koppelfugen bei Bauwerken mit Koppelfugen und Baujahr bis einschließlich 1980 • Nachweis eines ausreichenden rechnerischen Ankündigungsverhaltens bei Spanngliedausfall infolge Spannungsrisskorrosion (SpRK) bei Bauwerken, die mit gegenüber SpRK sensitiven Spannstählen gebaut wurden.

Tab. 9.2: Traglastindex der Arbeitsgruppe Schwerverkehr [7]

9.2 Anhang A2 - Schadenskatalog und Schadensanalyse

9.2.1 Rangfolge von stählernen Brückenschädigungen

Anzahl	Schadens-ID	Schadensbeschreibung laut BAST-Katalog	[%]
198	014-08	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 3 bis Ri 4 (< 15% der beschichteten Fläche) (SK 2)	8,226%
125	001-05	Verschmutzung/Schalungsreste/ Packer/ Verdämmung o.ä	5,193%
110	014-09	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 4 bis Ri 5, ohne Substanzverlust (SK 3)	4,570%
71	226-13	starke Korrosion	2,950%
67	226-12	einsetzende Korrosion	2,784%
67	234-04	Örtlich einsetzende Korrosion	2,784%
60	261-08	Rohrleitung hat geringe Korrosionsschäden	2,493%
59	014-14	Durchrostung an den Kanten (SK 3)	2,451%
54	002-02	Abplatzungen im oberflächennahen Bereich mit oder ohne freil. Bewehrung	2,243%
53	013-99	0	2,202%
53	014-23	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, beginnend, Schwächung [< 10 %] (SK4)	2,202%
47	226-01	verschmutzte Übergangskonstruktionen (Bewegung noch möglich)	1,953%
44	014-11	großflächige Durchrostung der Beschichtung bis zu Rostgrad Ri 3, örtlich Ri 4 bis Ri 5 (SK 3) (> 15% der beschichteten Fläche)	1,828%
42	020-01	Graffiti an Sichtflächen	1,745%
41	014-13	Rostaustritt aus den Spalten ohne sichtbaren Substanzverlust (Spaltkorrosion) (SK 3)	1,703%
36	013-09	Beule im gedrückten Blech, Beultiefe $f_{max} = 1/175$ der kleinsten Beulenausdehnung ohne Materialschwächung	1,496%
36	258-02	nicht ausreichend / ohne Verbund / rissig / abgeplatzt / unterläufig, vereinzelt	1,496%
33	014-20	großflächiges Auftreten von Abblätterungen und/oder Blasen der Beschichtung bis zum Stahl (SK 3)	1,371%
31	011-03	Schraube/Nietensicherung fehlt oder nicht fachgerecht, bei rohen Schraube/Nieten und Passschraube/Nieten	1,288%
31	252-07	Rohrleitung hat geringe Korrosionsschäden; falsches Material	1,288%
30	011-04	Angerostete Schraube/Niet an Hauptbauteilen	1,246%
29	261-04	Teile der Aufhängungen der Leitung fehlen, über Verkehrsflächen	1,205%
28	012-04	Schweißnahtrisse an Hauptbauteilen, quer zur Krafrichtung, ca 10 % der Nahtlänge	1,163%
25	014-05	Mittelwert Schichtdicke zu gering, 75 % - 90 % der Sollsichtdicke ($\geq 160 \mu\text{m}$, wenn Sollsichtdicke unbekannt - SK 2)	1,039%
25	020-04	Verschmutzung des Auflagerbereichs	1,039%
25	241-04	Risse , oberflächlich Belag ausgemagert / offenporig	1,039%
25	252-08	Rohrleitung hat erhebliche Korrosionsschäden	1,039%
24	001-01	Graffiti an Sichtflächen	0,997%
24	231-99	0	0,997%
22	226-18	schadhaft, klappert/schlägt	0,914%
22	250-08	Schild oder Schildbefestigung locker/ lose/ schadhaft/ unleserlich/ fehlt	0,914%
21	014-12	großflächige Durchrostung der Beschichtung mit Rostgrad Ri 4 bis Ri 5 ohne Substanzverlust (SK 4) (> 15% der beschichteten Fläche)	0,872%
21	234-05	großflächige Korrosion	0,872%
20	002-09	stellenweise Durchfeuchtung/Ausblühungen/Aussinterung	0,831%
20	013-14	Abweichung der Hauptbauteile von der vorgesehenen Gebrauchslage > 10 %	0,831%
20	241-09	Fugen, Raumfugen bewachsen,abgesackt,nicht oder unzureichend vergossen	0,831%
19	014-16	vereinzelte Risse in der Beschichtung nicht bis zum Stahl, kein Rostaustritt (SK 2)	0,789%
19	211-06	einsetzende / mittlere Korrosion	0,789%
19	214-04	Lagersockel, Unterstopfung schadhaft	0,789%
18	226-07	Dehnprofil undichte Stelle	0,748%

17	013-10	Beule im gedrückten Blech, Beultiefe $f_{max} = 1/175$ der kleinsten Beulausdehnung mit Abrostungen / Schweißnahtissen / Anrissen im Blech, S = 1-3, D = 1-3	0,706%
17	013-13	Kerbwirkung auf großflächigen Bauteilen (z.B. Transportklauen), ≥ 3 mm	0,706%
17	241-14	Verschmutzung	0,706%
17	231-15	Verankerung/Schraubverbindungen/Schweißnaht locker, lose, gerissen, fehlt, schadhaf, nicht fachgerecht	0,706%
17	258-03	nicht ausreichend / ohne Verbund / rissig / abgeplatzt / unterläufig, großflächig	0,706%
16	233-07	Bordstein/Vorbord, Abplatzung oder Anfahrtschaden	0,665%
16	234-09	Abblätterung/Blasen/Risse in der Beschichtung auf der Verzinkung	0,665%
16	254-04	Örtlich einsetzende Korrosion	0,665%
15	011-01	Lockere Schraub-, Nietverbindung bei Hauptbauteilen – in Abhängigkeit von der Anzahl	0,623%
14	013-15	Verwölbungen im Fahrblech	0,582%
14	013-16	Bauteil verformt, verbogen, schadhaf	0,582%
14	025-05	trockene Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten $\geq 0,4$ mm	0,582%
14	226-02	stark verschmutzte Übergangskonstruktionen (Bewegung eingeschränkt)	0,582%
14	226-11	Beschichtung abgeblättert / fehlt	0,582%
14	261-09	Rohrleitung hat erhebliche Korrosionsschäden	0,582%
13	014-03	Starke Vogelkotablagerung (SK 3)	0,540%
13	014-06	Mittelwert Schichtdicke zu gering, 50 % - 75 % der Sollschichtdicke (≥ 120 μ m, wenn Sollschichtdicke unbekannt - SK 3)	0,540%
13	014-24	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, fortgeschritten, Schwächung [10-30 %] (SK5)	0,540%
13	001-02	Optische Veränderung durch Bewitterung	0,540%
12	001-04	Bauwerksuntersicht verrußt	0,499%
11	014-21	vereinzelt Abblätterungen und/oder Blasen in der Beschichtung vom Stahl (SK 3)	0,457%
10	001-06	Vogelkot o.ä.	0,415%
10	002-12	Ausblühung eisenhaltiger Zuschlagstoffe / Rostfahne	0,415%
10	012-01	Schweißnahtisse an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, ca 10 % der Nahtlänge	0,415%
9	014-22	großflächiges Auftreten von Abblätterungen und/oder Blasen der Beschichtung vom Stahl (SK 4)	0,374%
9	020-99	0	0,374%
9	025-03	trockene Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten $0,2 - < 0,4$ mm	0,374%
9	231-04	einzelne Füllstäbe fehlen / verbogen, Handlaufendstück fehlt	0,374%
8	013-04	ausgebogenes Druckglied, Stich $f_{max} = 1/275$ des Knotenpunktabstands ohne Materialschwächung	0,332%
6	014-02	Starke Schmutz- bzw. Salzablagerung oder starke Bemoosung (SK 2)	0,249%
6	027-07	Durchfeuchtungen/Ausblühungen/Aussinterungen	0,249%
6	027-10	oberflächennahe Ausbrüche von Mörtelfugen im Mauerwerk	0,249%
6	230-01	Schmutzansammlung/ Bemoost/ Schalungsreste auf Kappen/Gesimsen	0,249%
6	234-01	Schichtdicke der Korrosionsschutzschicht deutlich zu gering	0,249%
5	006-01-	oberflächennahe Risse	0,208%
5	021-05	Durchfeuchtung/Ausblühungen/Aussinterungen von unbewehrten Massivbauteilen	0,208%
5	201-99	0	0,208%
5	230-11	freiliegende Bewehrung und Abplatzungen an Gesimsen (unten kein Verkehrsweg)	0,208%
5	231-22	Pfosten oder sonstige Geländerbauteile ausgebaucht/gerissen/ verformt	0,208%
4	020-06	Abwitterung an Beschichtungen	0,166%
4	020-07	Entwässerungsanschluss nicht ordnungsgemäß / ausgebrochen	0,166%

Anhang

4	021-12	freiliegende, teilweise zerstörte Bewehrung	0,166%
4	021-99	0	0,166%
4	025-10	wasserführende Risse mit Rissweiten $\geq 1,0$ mm bei unbewehrtem Beton	0,166%
4	031-11	großflächige Durchrostung der Beschichtung bis zu Rostgrad Ri 3, örtlich Ri 4 bis Ri 5 (SK 3)	0,166%
4	243-01	Blasen, Höhe ≤ 2 cm	0,166%
4	244-09	Risse , oberflächlich	0,166%
4	254-02	Örtlich abgeblätterte Beschichtung (betrifft nicht verzinkte Bauteilen)	0,166%
4	258-01	geringfügige Abwitterungen, Farbänderung	0,166%
4	261-07	Flüssigkeitsaustritt aus der Leitung (über Verkehrsflächen)	0,166%
4	309-04	Örtlich einsetzende Korrosion	0,166%
3	011-02	Schaftkorrosion Schraube/Nieten bei Hauptbauteilen – in Abhängigkeit von der Anzahl	0,125%
3	020-08	Abdeckung/ Abdeckplatten schadhaf	0,125%
3	028-04	Angerostete Schraube/Niet an Hauptbauteilen	0,125%
3	224-03	Lamellenkonstruktion, Gleitlager / Gleitfedern sitzen mehrfach nicht mehr unter/über den Traversen	0,125%
3	226-06	Abdeckblech im Gehwegbereich fehlt	0,125%
3	241-06	Längs,- und/oder Querfuge bewachsen	0,125%
3	201-22	Schäden an Schrumpfschläuchen, Abdeckhauben, Verbindungen usw	0,125%
3	231-10	abweichende Geländerhöhe (Abweichung 5 - 10 cm)	0,125%
3	233-08	Rostfahnen am Bordstein im Bereich der Stoßfugen	0,125%

Tab. 9.3: Rangfolge der ersten 100 stählernen Brückenschäden von 6.332 Einzelschäden

9.2.2 Schadensbewertung gemäß RI-EBW-PRÜF

Schadensbewertung „Standsicherheit“ (S)	
Bewertung	Beschreibung
0	Der Mangel/Schaden hat keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauteils/Bauwerks .
1	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils , hat jedoch keinen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks . Einzelne geringfügige Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen und geringfügige Abweichungen hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung liegen noch deutlich im Rahmen der zulässigen Toleranzen . Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung .
2	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils , hat jedoch nur geringen Einfluss auf die Standsicherheit des Bauwerks . Die Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung aus der Bauwerksnutzung haben die Toleranzgrenzen erreicht bzw. in Einzelfällen überschritten . Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich.
3	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Standsicherheit des Bauteils und des Bauwerks . Die Abweichungen in Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder hinsichtlich der planmäßigen Beanspruchung aus der Bauwerksnutzung übersteigen die zulässigen Toleranzen . Erforderliche Nutzungseinschränkungen sind nicht vorhanden oder unwirksam. Eine Nutzungseinschränkung ist gegebenenfalls umgehend vorzunehmen. Schadensbeseitigung kurzfristig erforderlich.
4	Die Standsicherheit des Bauteils und des Bauwerks ist nicht mehr gegeben . Erforderliche Nutzungseinschränkungen sind nicht vorhanden oder unwirksam. Sofortige Maßnahmen sind während der Bauwerksprüfung erforderlich. Eine Nutzungseinschränkung ist umgehend vorzunehmen. Die Instandsetzung oder Erneuerung ist inzuleiten .

Tab. 9.4: Schadensbewertung für „Standsicherheit“ gemäß RI-EBW-PRÜF ([303], S. 11)

Schadensbewertung „Verkehrssicherheit“ (V)	
Bewertung	Beschreibung
0	Der Mangel/Schaden hat keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit.
1	Der Mangel/Schaden hat kaum Einfluss auf die Verkehrssicherheit; die Verkehrssicherheit ist gegeben . Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung .
2	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt geringfügig die Verkehrssicherheit; die Verkehrssicherheit ist jedoch noch gegeben . Schadensbeseitigung oder Warnhinweis erforderlich.
3	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Verkehrssicherheit; die Verkehrssicherheit ist nicht mehr voll gegeben . Schadensbeseitigung oder Warnhinweis kurzfristig erforderlich.
4	Durch den Mangel/Schaden ist die Verkehrssicherheit nicht mehr gegeben . Sofortige Maßnahmen sind während der Bauwerksprüfung erforderlich. Eine Nutzungseinschränkung ist umgehend vorzunehmen. Die Instandsetzung oder Erneuerung ist inzuleiten .

Tab. 9.5: Schadensbewertung für „Verkehrssicherheit“ gemäß RI-EBW-PRÜF ([303], S. 12)

Schadensbewertung „Dauerhaftigkeit“ (D)	
Bewertung	Beschreibung
0	Der Mangel/Schaden hat keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Bauteils/Bauwerks .
1	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils , hat jedoch langfristig nur geringen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerks . Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile ist nicht zu erwarten. Schadensbeseitigung im Rahmen der Bauwerksunterhaltung .
2	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils und kann langfristig auch zur Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks führen. Die Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile kann nicht ausgeschlossen werden. Schadensbeseitigung mittelfristig erforderlich .
3	Der Mangel/Schaden beeinträchtigt die Dauerhaftigkeit des Bauteils und führt mittelfristig zur Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks . Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile ist zu erwarten. Schadensbeseitigung kurzfristig erforderlich .
4	Durch den Mangel/Schaden ist die Dauerhaftigkeit des Bauteils und des Bauwerks nicht mehr gegeben . Die Schadensausbreitung oder Folgeschädigung anderer Bauteile erfordert umgehend eine Nutzungseinschränkung, Instandsetzung oder Bauwerkserneuerung .

Tab. 9.6: Schadensbewertung für „Dauerhaftigkeit“ gemäß RI-EBW-PRÜF ([303], S. 12)

9.2.3 Tabellarischer Vergleich RI-EBW-PRÜF mit Ril 804

Ril 804	RI-EBW-PRÜF
	Verkehrssicherungspflicht nach § 836 Abs. 1 BGB
Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)	Straßen- u. Wegegesetz NRW (StrWG NRW)
Eisenbahn- Bau- u. Betriebsordnung (EBO)	Bundesfernstraßengesetz (FSTrG)
	DIN 1076 - Prüfung und Überwachung von Ingenieurbauwerken
EBA ist Bauaufsichtsbehörde	Träger der Straßenbaulast ist der Bund =
DB AG verantwortlich für betriebssichere Instandhaltung	Träger für Bundesfernstraßen kann Verantwortung an die Länder übertragen
"Sicherheit" = Betriebs-, Verkehrs- u. Standsicherheit	
Modul 8001: Allgemeine Grundsätze	DIN 1076
Modul 8002: Eisenbahnüberführungen	→ RI-ERH-ING
Modul 8003: Überbauungen von Betriebsanlagen	→ RI-ERH-ING
Modul 8004: Sonstige Ingenieurbauwerke	→ RI-EBW-PRÜF → ASB-ING, ZTV-ING
	Mangel: "Ein Mangel im Sinne der Bauwerksprüfung ist die Abweichung der Bauwerks- oder Bauteilausbildung vom planmäßigen Sollzustand oder von den zum Prüfzeitpunkt geltenden Regelwerken. Er kann eine Beeinträchtigung der Standsicherheit (S), der Verkehrssicherheit (V) und/oder der Dauerhaftigkeit (D) darstellen."
	Schaden: "Ein Schaden im Sinne der Bauwerksprüfung ist die Veränderung des Bauwerks- oder Bauteilzustandes und kann zu einer Beeinträchtigung der Standsicherheit (S), der Verkehrssicherheit (V) und/oder der Dauerhaftigkeit (D) führen."
Befunde ins Bauwerksbucha aufzunehmen	
Datenverarbeitungsprogramm bei Begutachtungen	SIB-Bauwerke (für E, H, S)

<p>-</p> <p>-</p> <p>Bauingenieure mit drei Jahren Berufserfahrung + Zusatzausbildung Prüfung der Voraussetzungen durch DB Netz AG</p> <p>-</p> <p>z.T. durch Vordrucke für Bauwerksbuch oder Inspektionslisten</p>	<p>Schadenskatalog mit Schadensbeispielen</p> <p>Zwingend Nennung des Schadensumfangs</p> <p>Prüfingenieure</p> <p>Verein zur Förderung der Qualitätssicherung und Zertifizierung der Aus- und Fortbildung von Ingenieurinnen/Ingenieuren der Bauwerksprüfung e.V. (VFIB)</p> <p>Einheitliche Bewertung der Prüfergebnisse (Algorithmus + Bewertungsschlüssel)</p> <p>Einheitliche Prüfberichte</p>
<p>Erste Inspektion bei Neubau vor Abnahme der Bauleistungen bzw. vor Inbetriebnahme + eine Inspektion/Hauptuntersuchung vor Ablauf der Gewährleistungsansprüche</p> <p>-</p> <p>Überwachung: - 1x im Jahr - ohne Hilfsmittel - rein visuell - von Verkehrsebene aus - fachlich qualifizierter Mitarbeiter</p> <p>Untersuchung: - alle 3-6 Jahre - ohne Hilfsmittel - zugängliche Bauwerksteile / mit Fernglas - fachlich befähigter Vertreter/Ingenieur der Fachrichtung - Vordrucke für die Ergebnisse</p> <p>Begutachtung: - alle 6 Jahre - Bauwerke mit Bauwerksbuch - auch schwer zugängliche Bauwerksteile - Fachingenieur - DV-Programm</p> <p>Sonderprüfung (S): - Unfälle, Umweltereignisse - qualifizierter Fachingenieur - Umfang wie Untersuchung oder Begutachtung</p> <p>Maßnahmen für die Mängelbeseitigung sind vorzuschlagen/ Empfehlungen</p> <p>Sicherheitsrisiko: "Schäden, die ein Risiko für die Sicherheit in sich bergen."</p>	<p>Laufende Beobachtung: - 2x pro Jahr - ohne Hilfsmittel - rein visuell - von Verkehrsebene/Geländeniveau aus - im Rahmen der allg. Überwachung des Verkehrsweges/Streckenkontrolle</p> <p>Besichtigung: - 1x pro Jahr - ohne Hilfsmittel - soweit zugänglich/ von Verkehrsebene - nur erhebliche Mängel zu protokollieren</p> <p>Einfache Prüfung (E): - alle 3 Jahre, im Wechsel mit Hauptprüfung - ohne Hilfsmittel - intensive, erweiterte Sichtprüfung - Prüfingenieur</p> <p>Hauptprüfung (H): - alle 6 Jahre, im Wechsel mit Einfacher Prüfung - alle Bauwerksteile mit Besichtigungseinrichtungen/Großgeräten(auch schwer Zugängliche) - handnahe Prüfung - Prüfingenieur</p> <p>Sonderprüfung (S): - Unwetter, Hochwasser, Unfälle, Sonstiges - Umfang ergibt sich aus dem Anlass</p> <p>Maßnahmen für die Mängelbeseitigung sind vorzuschlagen/ Empfehlungen oder OSA = objektbezogene Schadensanalyse, wenn Schadensursache unbekannt</p> <p>Standsicherheit: "Die Standsicherheit kennzeichnet die Eigenschaft eines Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile, die planmäßigen Beanspruchungen (bei Nutzungsbeschränkungen</p>

Standsicherheitsrisiko:

"Gefahr für den Bestand bzw. die Tragfähigkeit des Bauwerks oder eines wesentlichen tragenden Bauteils."

Betriebssicherheitsrisiko:

"Gefahr für die Abwicklung des Betriebes"

Verkehrssicherheitsrisiko:

"Gefahr für den Verkehr Dritter und/oder der Mitarbeiter der Deutschen Bahn."

Schadensstufe 0:

Merkschaden (sonst ohne Bedeutung)

Schadensstufe 1:

geringfügige Schäden und Mängel

Schadensstufe 2:

Schäden und Mängel mittleren Umfangs

Schadensstufe 3:

Schäden und Mängel großen Umfangs

Schadensstufe 4:

völlige Verrottung, Zerstörung

Zustandskategorie = (Ver-)Änderung des Zustands

Zustandskategorie 1:

Punktuelle Schäden ohne Sicherheitsbeeinflussung am Bauteil, vorbeugende Maßnahmen je nach Wirtschaftlichkeit

Zustandskategorie 2:

Größere Schäden ohne Sicherheitsbeeinflussung, vorbeugende Maßnahmen je nach Wirtschaftlichkeit

Zustandskategorie 3:

Umfangreiche Schäden ohne Sicherheitsbeeinflussung, eine Instandsetzung ist jedoch noch möglich, aber auf die Wirtschaftlichkeit hin zu untersuchen

Zustandskategorie 4:

Gravierende Schäden ohne Sicherheitsbeeinflussung, eine Instandsetzung ist nicht mehr wirtschaftlich möglich

Bauwerksteile, die planmäßigen Beanspruchungen (bei fest zugegebenen Umgebungen entsprechend reduziert) schadlos aufnehmen zu können."

"Die **Standsicherheit ist gegeben**, wenn Bauteilzustand, Baustoffqualität, Bauteilabmessungen und Bauwerksbeschilderung sowie die Beanspruchungen aus der planmäßigen Bauwerksnutzung, den Annahmen der Bemessung / Nachrechnung / Tragfähigkeitseinstufung und ggf. den Nutzungsbeschränkungen des Bauwerkes entsprechen."

"Die **Standsicherheit ist nicht gegeben**, wenn Bauteilzustand, Baustoffqualität oder Bauteilabmessungen oder die Beanspruchungen aus der planmäßigen Bauwerksnutzung nicht den Annahmen der Bemessung / Nachrechnung / Tragfähigkeitseinstufung des Bauwerkes entsprechen bzw. erforderliche Nutzungsbeschränkungen nicht vorhanden oder nicht wirksam sind."

Verkehrssicherheit:

"Die Verkehrssicherheit ist ein Maß für die Bauwerksausbildung nach anerkannten Regeln der Technik zum jeweiligen Prüfzeitpunkt, welche die Anforderungen an Sicherheit und Ordnung hinsichtlich der gefahrlosen und bestimmungsgemäßen Nutzung des Bauwerkes beinhaltet. Sie schließt damit sowohl die Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge als auch die Sicherheit für Personen und Sachen im Bauwerksumfeld ein.

Dabei wird eine verständige, unter Würdigung der äußeren Umstände gebotene Vorsicht und die im Verkehr übliche Sorgfalt der Verkehrsteilnehmer vorausgesetzt."

"Die **Verkehrssicherheit ist gegeben**, wenn das Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/Schäden aufweist, die keinen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben und im Rahmen der planmäßigen Bauwerksunterhaltung behoben werden können. Sie ist ebenfalls gegeben, wenn der Bauwerksnutzer die Gefährdung rechtzeitig erkennen kann oder wenn die Verkehrsteilnehmer in geeigneter Weise auf Gefährdungen besonders hingewiesen und damit zu erhöhter Vorsicht angehalten werden."

"Die **Verkehrssicherheit ist nicht gegeben**, wenn das Bauwerk Mängel/Schäden aufweist, von denen eine nicht erkennbare Gefahr bei der planmäßigen Bauwerksnutzung ausgeht."

Dauerhaftigkeit:

"Die Dauerhaftigkeit kennzeichnet die Widerstandsfähigkeit des Bauwerkes bzw. einzelner Bauwerksteile gegenüber Einwirkungen, um eine möglichst lange Nutzungsdauer unter Aufrechterhaltung der Standsicherheit und Verkehrssicherheit bei planmäßiger Nutzung und planmäßiger Bauwerksunterhaltung zu erreichen."

"Die **Dauerhaftigkeit ist gegeben**, wenn das Bauteil/Bauwerk keine oder lediglich geringfügige Mängel/ Schäden aufweist, die im Rahmen der Bauwerksunterhaltung oder im Zuge von geringfügigen Instandsetzungsmaßnahmen behoben werden können. Es ist zu erwarten, dass das Bauteil/Bauwerk ohne Nutzungseinschränkungen entsprechend der Verkehrsbedeutung der Straße seine Nutzungsdauer erreicht."

"Die **Dauerhaftigkeit ist nicht gegeben**, wenn das Bauteil/Bauwerk solche Mängel/Schäden aufweist, die nur durch umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen oder Erneuerung behoben werden können. Werden die erforderlichen Maßnahmen nicht durchgeführt, ist zu erwarten, dass das Bauwerk lediglich mit eingeschränkter Nutzung seine konzipierte Nutzungsdauer erreicht oder eine vorzeitige Erneuerung erforderlich wird."

Bewertung von 0 bis 4 jeweils getrennt für S, V und D

1,0-1,4	sehr guter Zustand Die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerkes sind gegeben. Laufende Unterhaltung erforderlich.
1,5-1,9	guter Zustand Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerkes sind gegeben. Die Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe kann beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes kann langfristig geringfügig beeinträchtigt werden. Laufende Unterhaltung erforderlich.
2,0-2,4	befriedigender Zustand Die Standsicherheit und Verkehrssicherheit des Bauwerkes sind gegeben. Die Standsicherheit und/oder Dauerhaftigkeit mindestens einer Bauteilgruppe können beeinträchtigt sein. Die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes kann langfristig beeinträchtigt werden. Eine Schadensausbreitung oder Folgeschädigung des Bauwerkes, die langfristig zu erheblichen Standsicherheits- und/oder Verkehrssicherheitsbeeinträchtigungen oder erhöhtem Verschleiß führt, ist möglich. Laufende Unterhaltung erforderlich. Mittelfristig Instandsetzung erforderlich.

9.2.4 Schadensverteilung einzelner Schadenskategorien (4. Filterung)



Abb. 9.2: Sankey-Diagramm, Korrosionsschäden, 4. Filterung

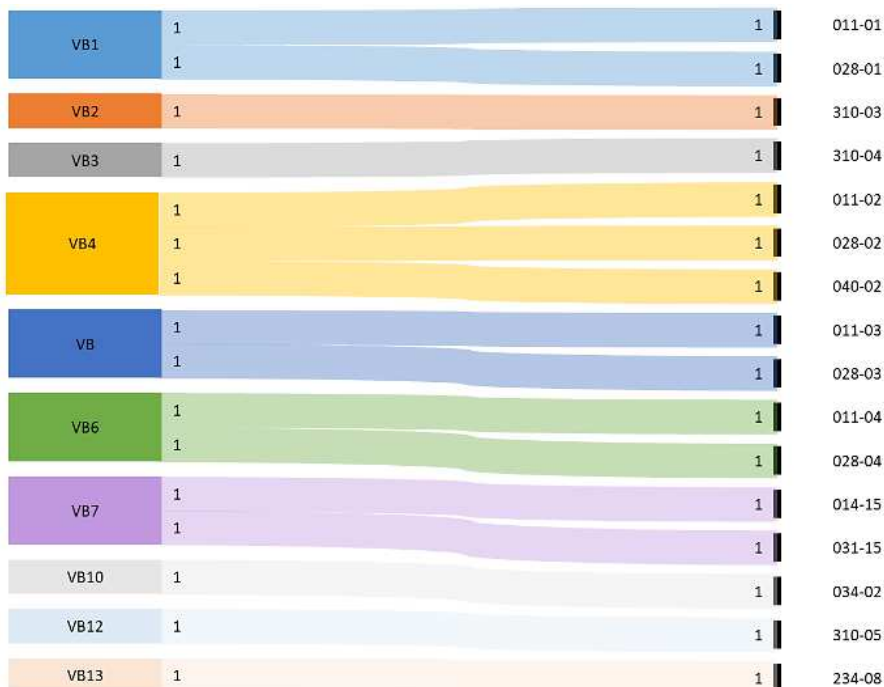


Abb. 9.3: Sankey-Diagramm, Verbindungsmittelschäden, 4. Filterung

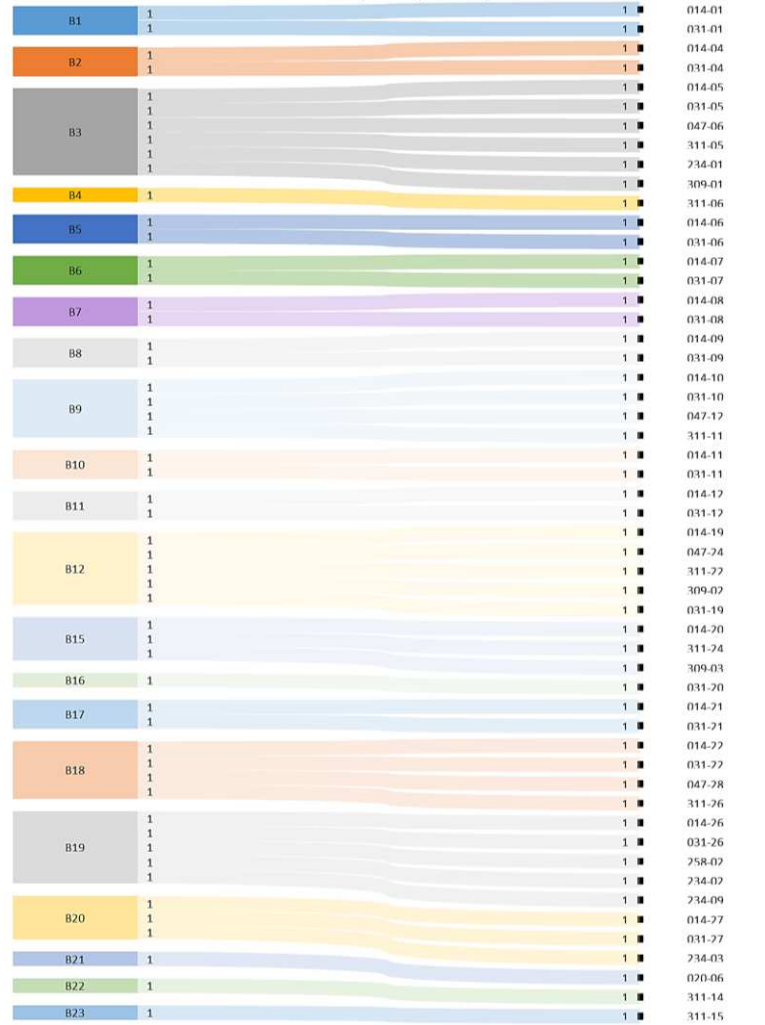


Abb. 9.4: Sankey-Diagramm, Beschichtungsschäden, 4. Filterung



Abb. 9.5: Sankey-Diagramm, Schäden freiliegender Bewehrung, 4. Filterung

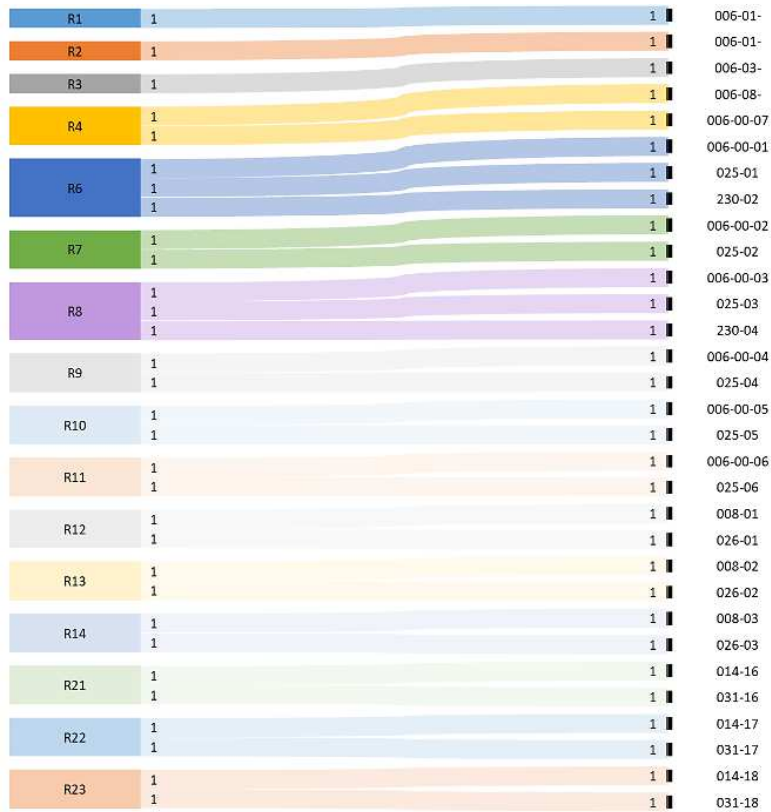


Abb. 9.6: Sankey-Diagramm, Risschäden, 4. Filterung



Abb. 9.7: Sankey-Diagramm, Schweißschäden, 4. Filterung

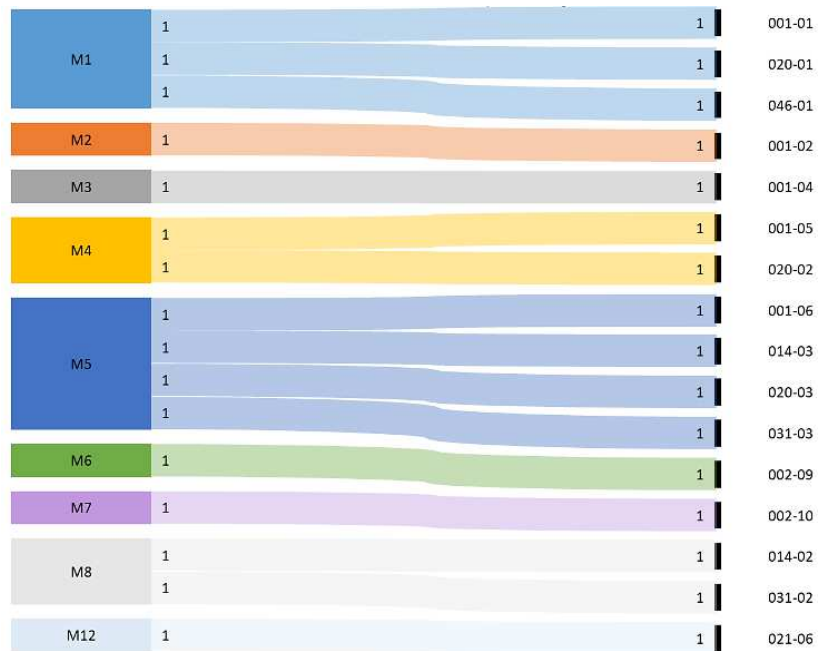


Abb. 9.8: Sankey-Diagramm, Verschmutzungsschäden, 4. Filterung



Abb. 9.9: Sankey-Diagramm, Verformungsschäden, 4. Filterung

9.2.5 Prozessschemata Filterstufen einzelner Schadenskategorien

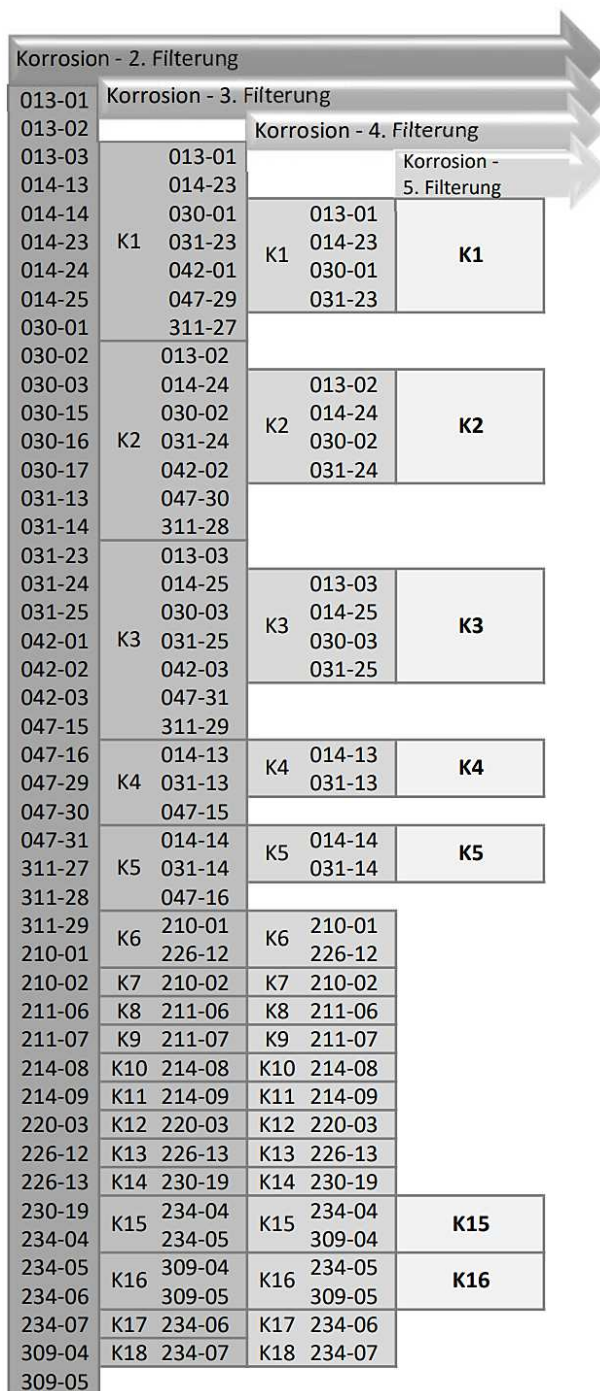


Abb. 9.10: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Korrosionsschäden

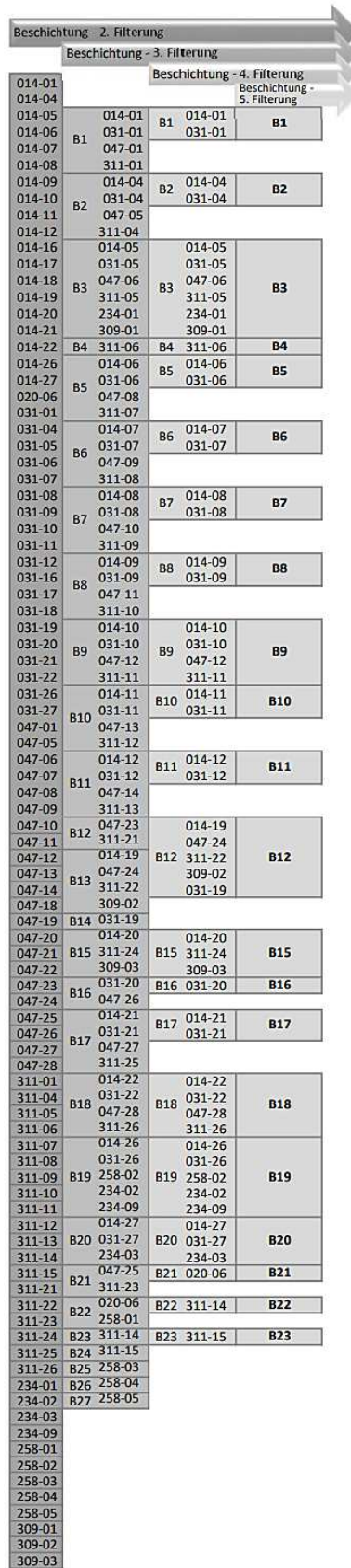


Abb. 9.11: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Beschichtungsschäden

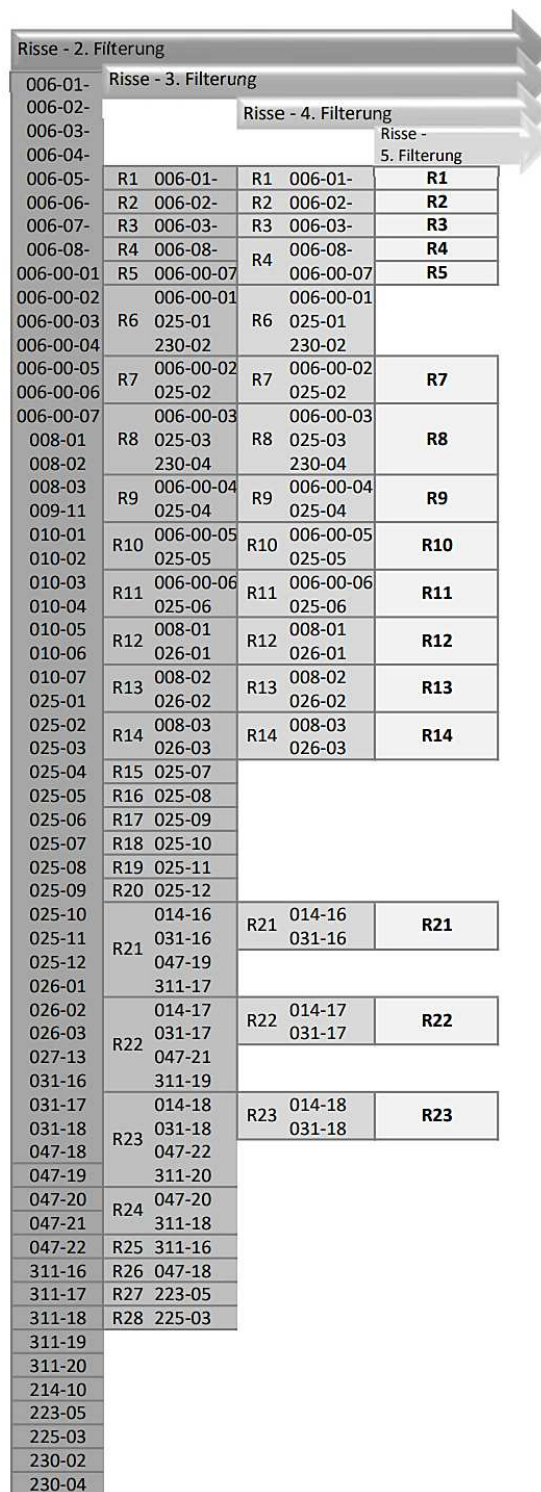


Abb. 9.12: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Risschäden

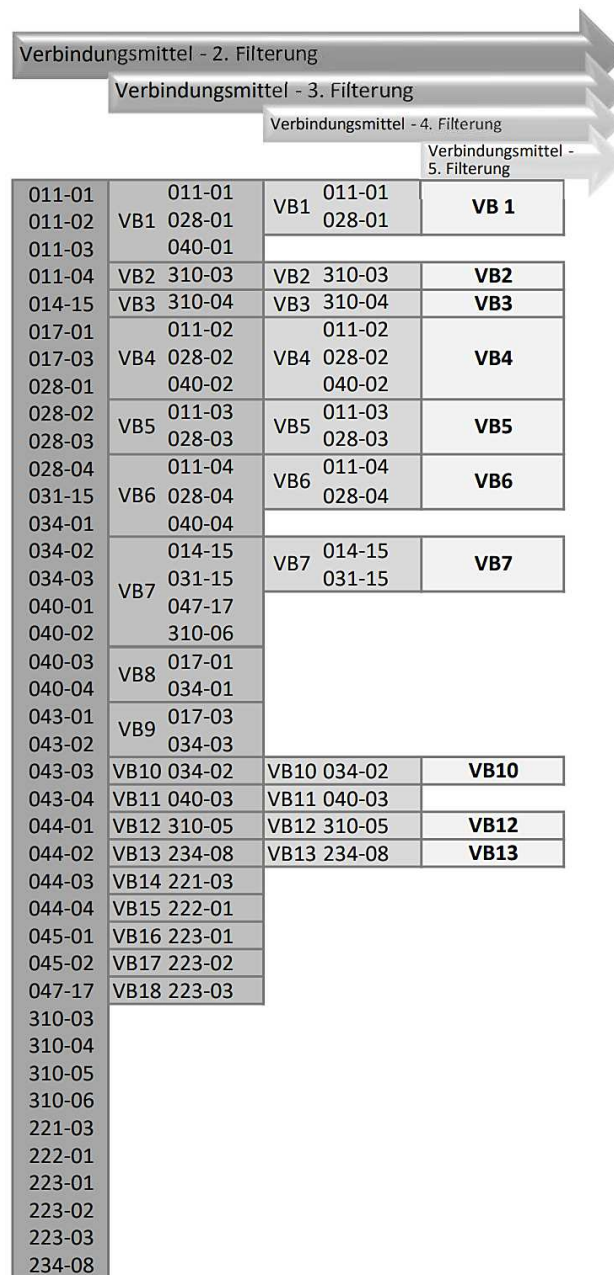


Abb. 9.13: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Verbindungsmittelschäden

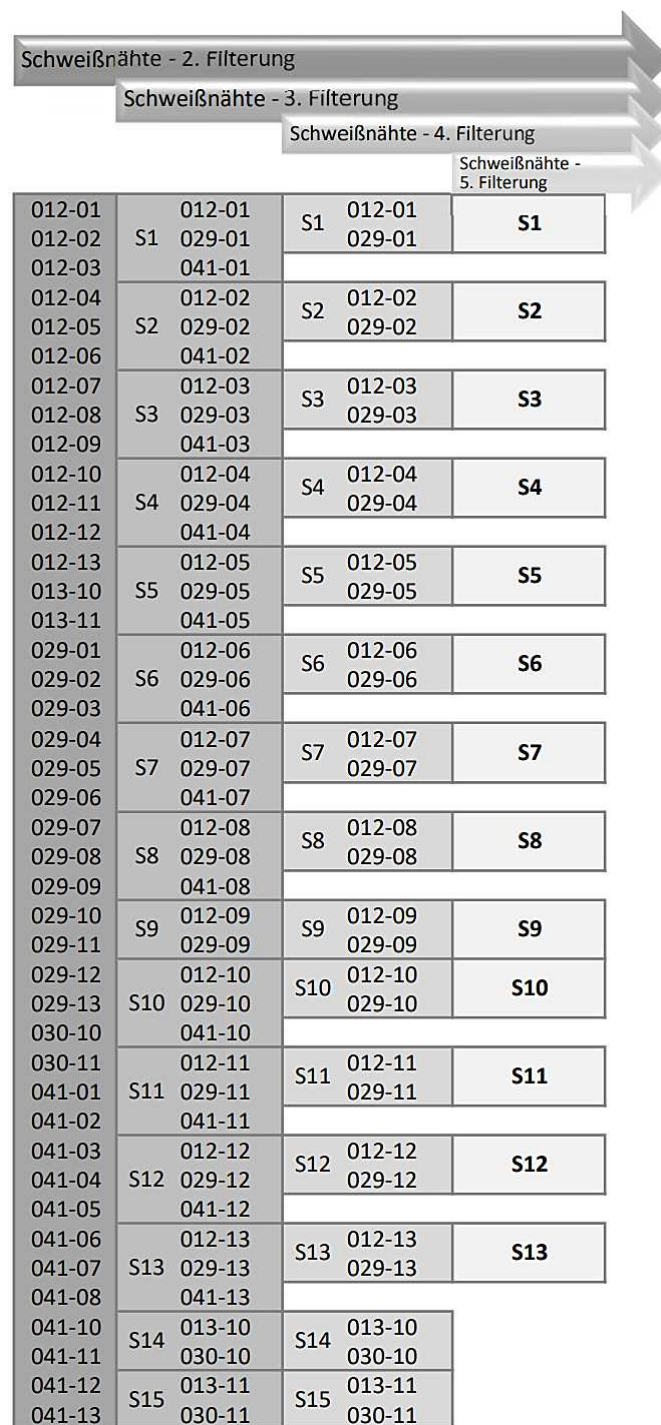


Abb. 9.14: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Schweißnahtschäden

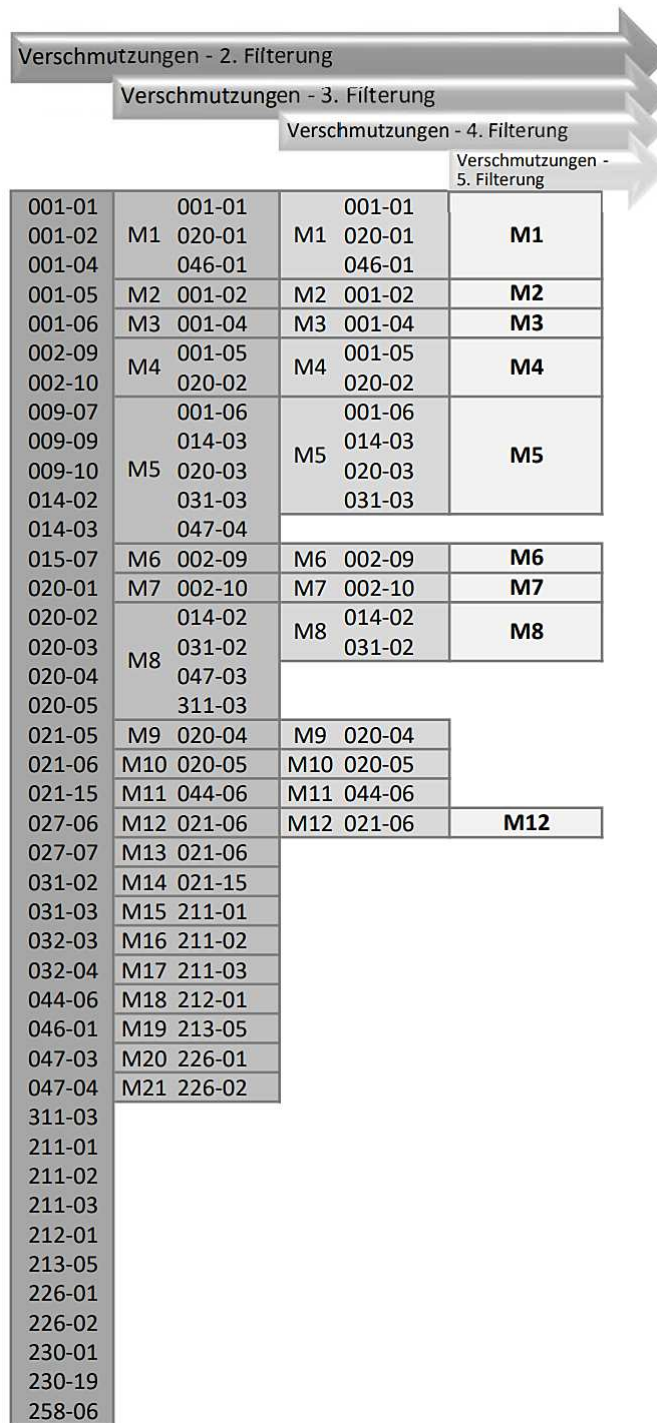


Abb. 9.15: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Verschmutzungsschäden

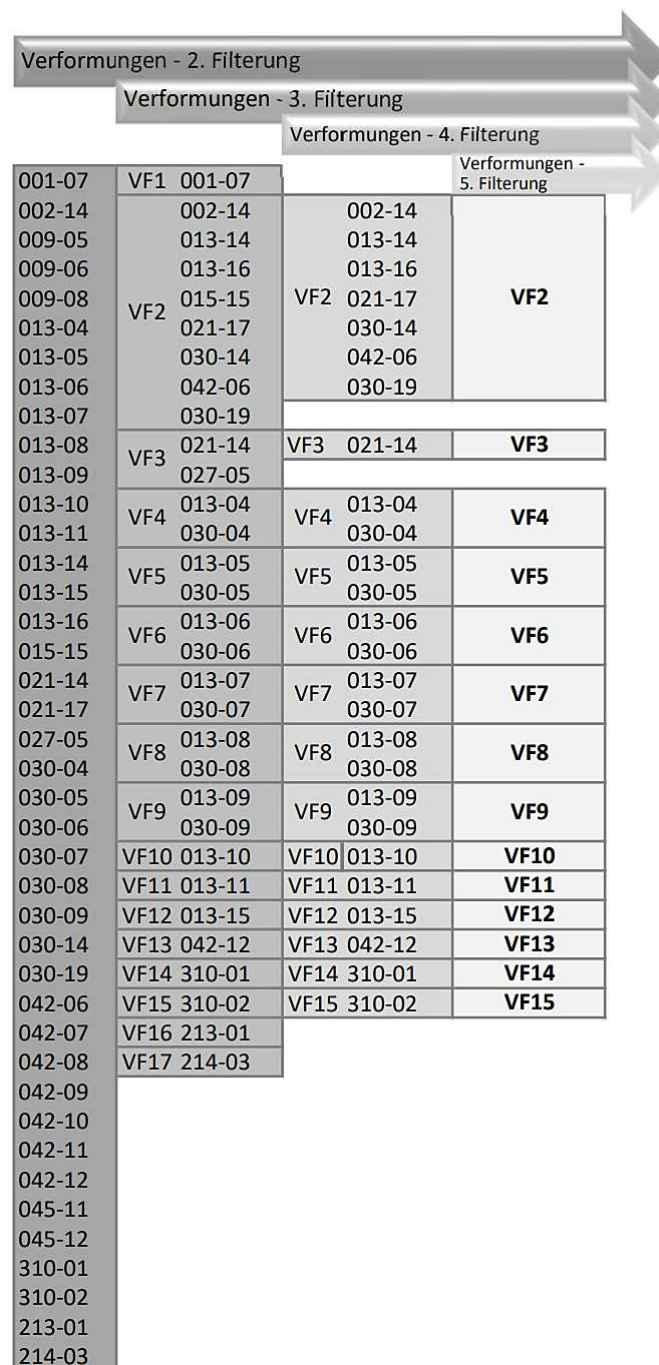


Abb. 9.16: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Verformungsschäden

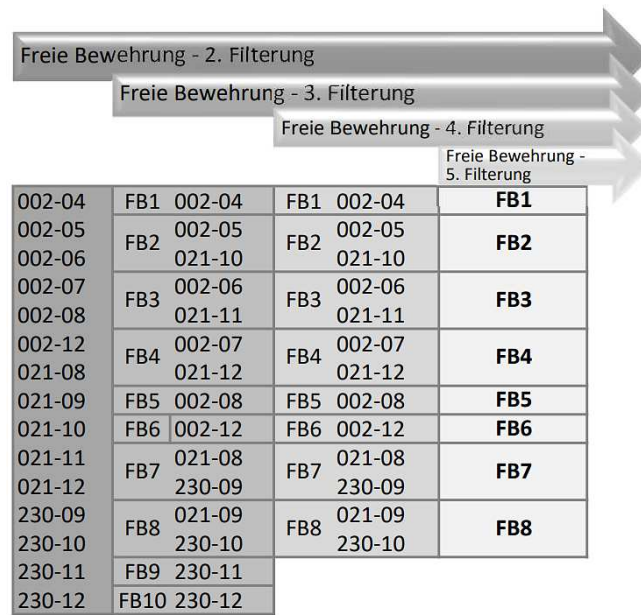


Abb. 9.17: Prozessschema der Filterstufen 2 bis 5 für Schäden freier Bewehrung

9.2.6 Schadensbasierter Schadenskatalog

Schadenskatalog						
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D	
Korrosion						
1	K1	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, beginnend, Schwächung < 10 % (SK4)	1	0	3	
2	K2	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, fortgeschritten, Schwächung 10-30 % (SK5)	3	1	4	
3	K3	Querschnittsminderung durch Korrosion an Hauptbauteilen, stark, Kerbwirkung + Schwächung > 30 %, (SK5)	4	2	4	
4	K4	Rostaustritt aus den Spalten ohne sichtbaren Substanzverlust (Spaltkorrosion) (SK 3)	0	0	2	
5	K5	Durchrostung an den Kanten (SK 3)	0	0	2	
6	K15	Örtlich einsetzende Korrosion	0	0	1	
7	K16	großflächige Korrosion	0	0	2	
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D	
Beschichtung						
1	B1	Glanzverlust und/oder Farbveränderung Kreidung, Ausbleichen der Beschichtung (SK 1)	0	0	1	
2	B2	Mittelwert Schichtdicke zu gering, >= 90 % der Sollschichtdicke (>=200 µm, wenn Sollschichtdicke unbekannt - SK 1)	0	0	1	
3	B3	Mittelwert Schichtdicke zu gering, 75 % bis 90 % der Sollschichtdicke (>=160 µm, wenn Sollschichtdicke unbekannt - SK 2)/Schichtdicke der Korrosionsschutzschicht deutlich zu gering	0	0	1	
4	B4	Schichtdicke der Korrosionsschutzschichten (Feuerverzinkung + Beschichtung) örtlich zu gering (100-160 µm - SK 2)	0	0	1	
5	B5	Mittelwert Schichtdicke zu gering, 50 % bis 75 % der Sollschichtdicke (>=120 µm, wenn Sollschichtdicke unbekannt - SK 3)	0	0	2	
6	B6	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 1 bis Ri 2 (SK 1)	0	0	2	
7	B7	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 3 bis Ri 4 (< 15% der beschichteten Fläche) (SK 2)	0	0	1	
8	B8	örtliche Durchrostung der Beschichtung, Rostgrad Ri 4 bis Ri 5, ohne Substanzverlust (SK 3)	0	0	2	
9	B9	großflächige Durchrostung der Beschichtung bis Rostgrad Ri 1 bis Ri 2, örtlich Ri 2 bis Ri 4 (SK 2) (> 15% der beschichteten Fläche)	0	0	1	
10	B10	großflächige Durchrostung der Beschichtung bis zu Rostgrad Ri 3, örtlich Ri 4 bis Ri 5 (SK 3) (> 15% der beschichteten Fläche)	0	0	2	
11	B11	großflächige Durchrostung der Beschichtung mit Rostgrad Ri 4 bis Ri 5 ohne Substanzverlust (SK 4) (> 15% der beschichteten Fläche)	0	0	3	
12	B12	vereinzelt/örtliche Ablätterungen und/oder Blasen in der Beschichtung bis zum Stahl (SK 2)	0	0	1	
13	B15	großflächiges Auftreten von Ablätterungen und/oder Blasen der Beschichtung bis zum Stahl (SK 3)	0	0	2	
14	B16	großflächiges Auftreten von Ablätterungen und/oder Blasen der Beschichtung nicht bis zum Stahl (SK 3)	0	0	2	
15	B17	vereinzelt Ablätterungen und/oder Blasen in der Beschichtung vom Stahl (SK 3)	0	0	2	
16	B18	großflächiges Auftreten von Ablätterungen und/oder Blasen der Beschichtung vom Stahl (SK 4)	0	0	3	
17	B19	vereinzelt Ablätterungen und/oder Blasen der Beschichtung bis zur Verzinkung	0	0	1	
18	B20	großflächiges Auftreten von Ablätterungen und/oder Blasen der Beschichtung bis zur Verzinkung	0	0	2	
19	B21	Abwitterung an Beschichtungen	0	0	1	
20	B22	Durchrostung der Beschichtung an den Kanten (SK 3)	0	0	2	
21	B23	Durchrostung der Beschichtung im Bereich der Schrauben (SK 3)	0	0	2	
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D	
Risse						
1	R1	oberflächennahe Risse	0	0	1	
2	R2	Stahlbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten mit Rissweiten < 0,4 mm	0	0	2	
3	R3	Stahlbeton, Trennrisse bei Stahlbetonüberbauten mit Rissweiten >= 0,4 mm	1	0	3	
4	R4	sich unter Verkehrslast bewegende Risse > 0,4 mm	4	0	4	
5	R6	Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten 0,1 bis < 0,2 mm,	0	0	1	
6	R7	Risse im Sprühnebelbereich mit Rissweiten 0,1 bis < 0,2 mm; je nach Ausprägung	0	0	2	
7	R8	Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten 0,2 bis < 0,4 mm; je nach Ausprägung	0	0	2	
8	R9	Risse im Sprühnebelbereich mit Rissweiten 0,2 bis < 0,4 mm; je nach Ausprägung	0	0	3	
9	R10	Risse außerhalb des Sprühnebelbereiches mit Rissweiten >= 0,4 mm; je nach Ausprägung	0	0	3	
10	R11	Risse im Sprühnebelbereich mit Rissweiten >= 0,4 mm	0	0	4	
11	R12	Rissbildung in Folge von Alkali-Kieselsäurereaktion ohne Gefügelockerung	0	0	2	
12	R13	Rissbildung in Folge von Alkali-Kieselsäurereaktion mit einsetzender Gefügelockerung	2	0	3	
13	R14	Rissbildung in Folge von Alkali-Kieselsäurereaktion mit fortgeschrittener Gefügelockerung	3	0	4	
14	R21	vereinzelt Risse in der Beschichtung nicht bis zum Stahl, kein Rostaustritt (SK 2)	0	0	1	
15	R22	großflächiges Auftreten von Rissen in der Beschichtung nicht bis zum Stahl, kein Rostaustritt (SK 3)	0	0	2	
16	R23	Risse in der Beschichtung bis zum Stahl mit Rostaustritt (SK 4)	0	0	3	
Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D	
Verbindungsmittel						
1	VB1	Lockere Schraub-, Nietverbindung bei Hauptbauteilen	3	0	3	
2	VB2	örtlich Schraubverbindung locker	0	0	2	
3	VB3	großflächig Schraubverbindungen locker	1	0	2	
4	VB4	Schaftkorrosion Schraube/Nieten bei Hauptbauteilen	2	0	2	
5	VB5	Schraube/Nietensicherung fehlt oder nicht fachgerecht, bei rohen Schraube/Nieten und Passschraube/Nieten	3	0	3	
6	VB6	Angerostete Schraube/Niet an Hauptbauteilen	0	0	1	
7	VB7	Durchrostung im Bereich der Nietköpfe/Schraube/Nieten (SK 3)	0	0	2	
8	VB10	Verbindungsmittel bei Hauptbauteilen gerissen, abgesichert, fehlt - in Abhängigkeit von der Anzahl	3	0	3	
9	VB12	Schrauben zu kurz	1	0	2	
10	VB13	Lochaufweitung durch Korrosion, bzw. starke Korrosion der Schraube/Nieten (betrifft die Plankensystem)	1	1	2	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Anhang

Nr.	Schadens-ID	Schadensbeschreibung	S	V	D
Schweißnähte					
1	S1	Schweißnaht an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, ca 10 % der Nahtlänge	1	0	2
2	S2	Schweißnaht an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, ca 20 - 30 % der Nahtlänge	2	0	3
3	S3	Schweißnaht an Hauptbauteilen, längs zur Krafrichtung, >= 40 % der Nahtlänge	3	0	4
4	S4	Schweißnaht an Hauptbauteilen, quer zur Krafrichtung, ca 10 % der Nahtlänge	2	0	2
5	S5	Schweißnaht an Hauptbauteilen, quer zur Krafrichtung, ca 20 - 30 % der Nahtlänge	3	0	3
6	S6	Schweißnaht an Hauptbauteilen, quer zur Krafrichtung, >= 40 % der Nahtlänge	4	0	4
7	S7	Schweißnähte an den Enden nicht voll aufgefüllt	0	0	1
8	S8	Schweißnähte an den Blechenden nicht umlaufend	0	0	2
9	S9	Schweißnaht: Drahtreste nicht entfernt	0	0	1
10	S10	Schweißnaht: Schlacke nicht entfernt	0	0	2
11	S11	Schweißnaht nicht fachgerecht ausgeführt	2	0	3
12	S12	Schweißnaht einsetzende/mittlere Korrosion	0	0	2
13	S13	Schweißnaht starke Korrosion	2	0	3
Verschmutzungen					
1	M1	Graffiti an Sichtflächen	0	0	1
2	M2	Optische Veränderung durch Bewitterung	0	0	1
3	M3	Bauwerksuntersicht verrußt	0	0	1
4	M4	Verschmutzung/Schalungsreste/ Packer/ Verdämmung o.ä	0	0	1
5	M5	Vogelkot o.ä.	0	2	2
6	M6	stellenweise Durchfeuchtung/Ausblühungen/Aussinterung	0	0	2
7	M7	großflächige Durchfeuchtung/Ausblühungen/Aussinterung	0	0	3
8	M8	Starke Schmutz- bzw. Salzablagerung oder starke Bemoosung (SK 2)	0	0	1
9	M12	Durchfeuchtung/Ausblühungen/Aussinterungen von bewehrten Massivbauteilen	0	0	2
Verformungen					
1	VF2	Abweichung der Hauptbauteile von der vorgesehenen Gebrauchslage > 10 %/Bauteil verformt, verbogen, schadhaf	2	0	3
2	VF3	Verformungen/ Verschiebung/ Kippung	1	0	2
3	VF4	ausgebogenes Druckglied, Stich $f_{max} = 1/275$ des Knotenpunktsabstands ohne Materialschwächung	1	0	1
4	VF5	ausgebogenes Druckglied Stich $f_{max} = 1/275$ des Knotenpunktsabstands mit Materialschwächung	1	0	2
5	VF6	ausgebogenes Druckglied Stich $f_{max} > 1/275$ des Knotenpunktsabstands mit oder ohne Materialschwächung	3	0	3
6	VF7	schrägstehendes oder gekrümmtes Druckglied, Winkelabweichung $\alpha_{max} = 1/100$ ohne Materialschwächung	1	0	1
7	VF8	schrägstehendes Druckglied Winkelabweichung $\alpha_{max} > 1/100$ mit oder ohne Materialschwächung	2	0	3
8	VF9	Beule im gedrückten Blech, Beultiefe $f_{max} = 1/175$ der kleinsten Beulausdehnung ohne Materialschwächung	1	0	1
9	VF10	Beule im gedrückten Blech, Beultiefe $f_{max} = 1/175$ der kleinsten Beulausdehnung mit Abrostungen / Schweißnahten / Anrissen im Blech, S = 1-3, D = 1-3	2	0	3
10	VF11	Beule im gedrückten Blech, Beultiefe $f_{max} > 1/175$ der kleinsten Beulausdehnung mit oder ohne Abrostungen / Schweißnahten / Anrissen im Blech	3	0	3
11	VF12	Verwölbungen im Fahrbahnblech	1	0	1
12	VF13	Anprallschaden	1	0	2
13	VF14	leichte Verformungen und/oder Ausbauchungen	0	0	1
14	VF15	starke Verformungen und/oder Ausbauchungen	1	0	2
Freiliegende Bewehrung					
1	FB1	freiliegende Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (keine nennenswerte Querschnittsminderung)	1	0	2
2	FB2	freiliegende korrodierte Bewehrung ,einsetzende Querschnittsminderung	1	0	3
3	FB3	freiliegende, korrodierte Tragbewehrung, einsetzende Querschnittsminderung	2	0	3
4	FB4	freiliegende, stark korrodierte Tragbewehrung (fortgeschrittene Querschnittsminderung)	3	0	3
5	FB5	stark korrodierte Tragbewehrung (teilweiser Ausfall von Tragbewehrung)	4	0	4
6	FB6	Ausblüfung eisenhaltiger Zuschlagstoffe / Rostfahne	0	0	1
7	FB7	Abplatzungen im oberflächennahen Bereich mit oder ohne freil. Bewehrung	0	0	1
8	FB8	Abplatzungen mit oder ohne freil. Bewehrung, im Verkehrsraumbereich	0	1	2

Tab. 9.8: Neu entwickelter Schadenskatalog

9.3 Anhang A3 - Bewertungsalgorithmus

9.3.1 RI-EBW-PRÜF 1988

LANDESAMT FÜR STRASSENWESEN BW Referat 53 Brückenprüfstelle			
77			
PRÜFUNGSANWEISUNG FÜR DIE BAUWERKSKONTROLLE Einheitliche Bewertung der verschiedenen Bauwerksschäden			
BAUTEIL	SCHADEN	BEWERTUNG	
Überbau:			
Betonüberbau:	Betonschäden (Hohlst., Abplatzg, Fe etc.)	1 - 2	
	Feuchte Hohlstellen, Abplatzungen, Fe	2 - 3	
	Risse < 0,5 mm bei Stahlbetonbauwerken	2	
	Risse > 0,5 mm bei Stahlbetonbauwerken	3	
	Risse < 0,2 mm bei Spannbetonbauwerken	1 - 2	
	Risse > 0,2 mm bei Spannbetonbauwerken	2 - 4 (je nach Situation)	
	freiliegende Spannglieder (verpresst)	3	
	freiliegende Spannglieder (nicht verpresst)	3 - 4 (Gutach. erf.)	
	Größere Durchbiegungen tragender Teile	2 - 3 (Gutach. erf.)	
	Lose Teile (je nach Verkehr unten)	2 - 4	
	Risse mit feuchten Aussinterungen an UK	3	
	Risse entlang Koppelfugen	3 - 4	
	Stahlüberbau:	Korrosion tragender Teile Ri 1 bis 3	1 - 2
		Querschnittsschwächungen und Ri 4 und 5	3 - 4 (Gutach. erf.)
Starker Blattrost und Durchrostungen		3 - 4 (Gutach. erf.)	
Risse in tragenden Stahlteilen		4 (Sperrung)	
Beulen, Knicke in tragenden Teilen		2 - 4 (Gutach. erf.)	
Risse in Schweißnähten (je nach Lage)		3 - 4 (Gutach. erf.)	
Unterbau:			
	Betonschäden (Risse, Ausbrüche etc.)	1 - 2	
	Wasserführende Risse, Frost-Tausalzschäden	3	
	Starke Setzungen / Neigungen	2 - 4 (Gutach. erf.)	
	Unterspülte Fundamente	3 - 4 (Gutach. erf.)	
	Auskolkungen	2 - 3	
Pfeiler:			
	Betonschäden (Risse, Ausbrüche etc.)	2 - 3	
	Wasserführende Risse, Frost-Tausalzschäden	3	
	Starke Setzungen / Neigungen	2 - 4 (Gutach. erf.)	
	Unterspülte Fundamente	3 - 4 (Gutach. erf.)	
	Auskolkungen	3 - 4	
Lager:			
	Angerostet, leicht schadhaft etc.	1 - 2	
	Lose Schrauben, Kissen leicht verrutscht	2 - 3	
	Rolle schadhaft, Weg erschöpft, Gleitspalt < 0,5mm	3 - 4 (Gutach. erf.)	
Übergangskonstruktion:			
	Angerostet, leicht schadhaft etc.	2 - 3	
	Lose oder fehlende Schrauben,	3 - 4 (Gutach. erf.)	
	Platten lose, Üko klappert / schlägt	3 - 4 (Gutach. erf.)	
	Traverse gerissen, Üko hochstehend	3 - 4 (Gutach. erf.)	

BAUTEIL	SCHADEN	BEWERTUNG
Abdichtung/Belag/Kappe:		
Abdichtung	unterläufig	3
	feuchte Dampfdruckentspannungsröhrchen	3 (Eiszapfen : 4)
Belag:	Tiefe Spurrinnen (Aquaplaning), Verdrückungen	3 - 4
	größere und tiefere Ausbrüche in Deckschicht	3 - 4 (Gefahr)
	Offene Fugen, offene Risse	3
	Belagsanschl. abgesackt, Setzungen, Blasen > 3cm	3
Kappe:	Ausbrüche auf Kappenober- und unterseite	1 - 2
	Lose Teile an UK Gesims (über Fahrbahn unten)	2 - 4 (je nach Verkehr)
	Risse, Hohlstellen, offene Querfugen (Feuchte?)	1 - 2
	Beschichtung auf Betonkappe abplatzend	1 - 2
	Hochbordbewehrung freiliegend (Verkehrgefährd)	3 - 4
Schutteinrichtung:	Rost bis Ri 3, Beschichtungsschäden	1 - 2
	fehlende, stark rostende Fußplattenschrauben	2 - 3
	Durchgerostet, Pfostenfüsse locker, Seil fehlt	3 - 4
	Funktion nicht vorhanden bzw. eingeschränkt	2 - 4
	Absturzsicherung/ Zaun fehlt	2 - 4
Gelände:	Pflaster abgesackt	1 - 2
	Treppe fehlt, abgesackt, bemoost, bewachsen	2
	Bewuchs zu dicht am Bauwerk	2 (9)
	Durchflußquerschnitt eingeengt	2 - 3
Beschilderung:	Verrutschte, fehlende Zahlen	9
	Fehlende, falsche Durchfahrts Höhenschilder	2 - 4 (Klassifiz. Strassen)
	Lastbeschränkende Beschilderung fehlt	4 (ohne Geh- u Radwege)
Entwässerungsleitungen: einschließlich Befestigungen	Angerostet, leicht beschädigt	1 - 2
	Starker Blattrost und Durchrostungen	3 - 4
	Lose oder durchgerostet über Fahrbahnen (Gefahr herunterfallender Teile - Eiszapfen)	4 (Gefahr)
	Verstopft (genaue Kontrolle - Deckel heben)	2 (9)
	Schächte in Böschungslagen nicht zu öffnen	1 - 2
	Tropfülle verstopft	2

Abb. 9.18: Vorschläge zur Schadensbewertung nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]

Schweregrad	Bezeichnung
0	Kein Schaden
1	Kleinerer Schaden
2	Langfristige Gefährdung
3	Absehbare Gefährdung
4	Verkehrgefährdung
8	Gewährleistungsmangel
9	Unterhaltungsmangel

Tab. 9.9: Schweregrade von Einzelschäden nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]

Bewertung	Beschreibung
1,0 – 1,9	Das Bauwerk weist keine oder nur geringfügige Schäden auf, die weder einzeln noch in ihrer Summe die Standsicherheit, Verkehrssicherheit oder Dauerhaftigkeit des Bauwerks einschränken. Laufende Unterhaltung ist erforderlich.
2,0 – 2,9	Das Bauwerk weist Schäden auf, die keine Beeinträchtigung der Standsicherheit oder akute Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit verursachen. Die Dauerhaftigkeit ist auf längere Sicht nicht gegeben . Unterhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen sind erforderlich.
3,0 – 3,9	Das Bauwerk weist Schäden auf, die in absehbarer Zeit einzeln oder in ihrer Summe die Standsicherheit beeinträchtigen können und/oder zu einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit führen können. Die Schadenseinflüsse führen zu einer erhöhten Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Eine Einschränkung der Nutzung zur Wiederherstellung der Verkehrssicherheit kann erforderlich sein. Umfangreiche Instandsetzungsarbeiten sind erforderlich.
4,0	Das Bauwerk weist Schäden auf die einzeln oder in ihrer Summe die Standsicherheit herabsetzen und/oder zu einer akuten Einschränkung der Verkehrssicherheit führen. Die Dauerhaftigkeit der Bauwerke ist nicht mehr gegeben . Eine sofortige Einschränkung und/oder eine umgehende Gefahrenbeseitigung zur Wiederherstellung der Verkehrssicherheit ist erforderlich. Umfangreiche Instandsetzungsarbeiten bzw. Erneuerungsarbeiten sind erforderlich.

Tab. 9.10: Noten des Gesamtbauwerks nach RI-EBW-PRÜF 1988 [301]

Bericht	max S	max V	max D	Schweregrad	Zustandsnote	BASt
1	2	3	4	3	3,0 - 3,9	3,50
2	3	2	4	3	3,0 - 3,9	3,50
3	0	0	1	2	2,0 - 2,9	1,80
4	2	2	3	3	3,0 - 3,9	3,30
5	1	2	3	3	3,0 - 3,9	3,00
6	1	2	2	2	2,0 - 2,9	2,50
7	1	2	3	3	3,0 - 3,9	2,60
8	1	2	3	3	3,0 - 3,9	2,80
9	2	2	3	3	3,0 - 3,9	3,00
10	2	2	3	3	3,0 - 3,9	2,90
11	1	2	3	3	3,0 - 3,9	2,90
12	1	1	2	2	2,0 - 2,9	2,40
13	1	2	3	3	3,0 - 3,9	3,00
14	1	2	3	3	3,0 - 3,9	2,90
15	1	2	2	2	2,0 - 2,9	2,00
16	1	1	3	3	3,0 - 3,9	2,70
17	1	2	2	2	2,0 - 2,9	2,30
18	1	2	2	2	3,0 - 3,9	2,40
19	1	2	2	2	3,0 - 3,9	2,30
20	1	1	3	3	2,0 - 2,9	2,80

Tab. 9.11: Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach RI-EBW-PRÜF 1988

9.3.2 Kraft

Schadenszone	Beschreibung geschädigte Bauteile
6	Baugrund, Verankerungselemente, Koppelfuge quer, Koppelfuge parallel, Tragseil, Hänger, Unterspannung
5	Verbindungsstruktur, Fahrbahnplatte, Arbeitsfuge quer, Arbeitsfuge parallel, Zwischenendverankerung, Lager, Gelenk, Verankerungselement
4	Tiefgründung, Fundament, Pfeiler, Widerlagerflügel, Auflagerbank, Querriegel, Widerlagerstirnwand, Feldmittelbereich, Stützbereich, Wechselbereich, Fugenbereich
3	Bodenverbesserung, Kammerwand, Ausschottung, Trennfuge quer, Trennfuge parallel, Endquerträger, Stützquerträger, Feldquerträger, Quergurtebene, Untergurtebene, Querverband
2	Korrosionsschutz, Hinterfüllung, Aufschüttung, Kappe, Beläge, Übergangskonstruktion, Grundwasserabsenkungsanlage
1	Entwässerung, Geländer, Leitungen, Anstrich, Verblendung, Oberflächenbefestigung, Beschilderung, Beleuchtung
0	Kein Schaden vorhanden

Tab. 9.12: Schadenszonen [177]

f ₂	Ausbreitungstendenz
0	Keine Ausbreitung des Schadens
1	Schaden breitet sich langsam aus
2	Schaden breitet sich schnell aus

Tab. 9.13: Faktor f₂ Ausbreitungstendenz [177]

f ₃	Schaden hat Auswirkung auf andere Bauteile
1	ja
0	nein

Tab. 9.14: Faktor f₃ Auswirkungen auf andere Bauteile [177]

f₄	Ausbreitungstendenz
3	A I, A II
2	A III, B II, B III
1	A IV, A V, A VI, B IV, C III, C IV
0	D IC, D V, E V, E VI

Tab. 9.15: Faktor f₄ Verkehrsnutzung nach RAS-N [177]

Prüfbericht	max S	max V	max D	P nach Kraft	BAS_t
1	2	3	4	296,11	3,50
2	3	2	4	285,77	3,50
5	1	2	3	200,34	3,00
13	1	2	3	206,01	3,00
4	2	2	3	254,90	3,30
14	1	2	3	173,24	2,90
9	2	2	3	202,06	3,00
10	2	2	3	201,92	2,90
11	1	2	3	200,17	2,90
8	1	2	3	160,05	2,80
20	1	1	3	114,54	2,80
6	1	2	2	144,28	2,50
16	1	1	3	126,47	2,70
7	1	2	3	105,57	2,60
18	1	2	2	66,96	2,40
19	1	2	2	89,91	2,30
17	1	2	2	78,44	2,30
12	1	1	2	98,91	2,40
15	1	2	2	50,94	2,00
3	0	0	1	0,00	1,80

Tab. 9.16: Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach Kraft

9.3.3 TH Darmstadt

```

-----
18.01.1996                                     Bauwerksprüfbericht nach DIN 1076
                                               D E C K B L A T T
-----

Bw.Nr.: ---> 4708 538 <---                   Ort:
-----

BwName: W'TAL EHRENHAINSTR                   Baujahr: 1965
                                             BrKl: 60
  Str.: A 46
  Oben: GEMEINDESTRASSE                      Länge: 37,40 m
  Unten: A 46                                 Breite: 9,00 m

Zustandsnote: 3,1                            Anzahl Überbauten:
                                             Felder: 2
-----

Bauwerksart.....: 1 Brücke ( Dauerbrücke )
Baulastträger für die Konst.: 1 Bundesstraßenverwaltung
Baustoff Überbau für Brücken: 4 Spannbeton
Baulastträger Verkehrsfläche: 4 Gemeinde
-----

Durchfahrts Höhen  1. Fahrbahn rechts : 4,74  2. Fahrbahn rechts : 4,74
                   links   : 4,74              links   : 4,74
-----

Durchfahrtsbreiten 1. Fahrbahn rechts : 10,00  2. Fahrbahn rechts : 10,00
                   links   : 10,00              links   : 10,00
-----

Dienststelle.: 3013                            Erster Prüftag: 16.01.1996
Prüfrichtung.: IN STAT.V.LI.N.RE.              Letzter Prüftag: 18.01.1996
Prüfjahr.....: 1996   Prüffart: H   Prüfer:
-----

Prioritätsziffer P1 Zustand/Sicherheit : 225
Prioritätsziffer P2 Verkehrsbedeutung : 50
-----
Prioritätsziffer P: 275           Erhaltungszustand: A
(-> Schlußblatt)
-----

Wesentliche Schäden / Mängel:
-----

Anzahl der Gewährleistungsmängel-----> 0
Anzahl der Unterhaltungsmängel-----> 3
Anzahl Schäden, die langfristig die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen----> 13
Anzahl Schäden, die absehbar die Sicherheit des BW beeinträchtigen----> 10
Anzahl Schäden, die eine erkennbare oder vermutete Gefahr darstellen--> 0

Erneuerungs- bzw. Instandsetzungsbedarf ( E / I )
K A T E G O R I E :                          Schadensanteil %   Dringend   P1
-----
A1 - Belag und Abdichtung                      100           3         75
B2 - Fahrbahnübergänge                          0             0          0
C3 - Lager                                       0             0          0
D4 - Kappen                                     100           2         40
D5 - Betoninstandsetzungen                      10            3        100
F8 - Korrosionsschutz an Stahlbrücken           0             0          0
G9.1 - Erneuerung von Geländern                  100           3          -
G9.2 - Korrosionsschutz von Geländern           0             0         10
H10 - Entwässerung und Abdeckung                0             0          0
I12 - Ersatzbauwerke                            0             0          -
S13-X31 - Kosten für sonstige Kleinmaßnahmen   3.000 DM      2          -
T14-Y32 - Kosten für besondere Maßnahmen        0 DM          0          -
-----
Summe S13/T14: 3.000 DM           P1: 225
-----

```

Abb. 9.19: Beispiel Bewertungsblatt TH Darmstadt [325]

Kategorie	Bauteil	Gewicht
A1	Belag und Abdichtung	25
B3	Fahrbahnübergänge	15
C3	Lager	15
D4	Kappen	10
E5	Betoninstandsetzung	25
F8	Korrosionsschutz an Stahlbrücken	25
G9	Geländer	5
H10	Entwässerung und Abdichtung	5
S/T	Sonstige Bauteile	-

Tab. 9.17: Bauteilkategorien mit Gewichtungen [325]

Kategorie	Bezugsgröße
A1	Brückenfläche [m ²]
B3	KEINE Normierung
C3	KEINE Normierung
D4	Brückenfläche [m ²]
E5	Brückenfläche [m ²]
F8	Brückenfläche [m ²]
G9	Geländer
H10	Entwässerung und Abdichtung
S/T	Sonstige Bauteile

Tab. 9.18: Normierung der Schäden [325]

p ₁	Schadensindex							
	A1	B2	C3	D4	E5	F8	G9	H10
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	> 0 <29	>0 <10	>0 <9	>0 <22	>0 <58	>0 <51	>0 <51	>0 <13
2	≥29 <44	≥10 <15	≥9 <14	≥22 <38	≥58 <94	≥51 <63	≥51 <87	≥13 <17
3	≥44 <75	≥15 <32	≥14 <24	≥38 <60	≥94 <156	≥63 <88	≥87 <152	≥17 <28
4	≥75 <115	≥32 <42	≥24 <32	≥60 <83	≥156 <250	≥88 <118	≥152 <240	≥28 <54
5	≥115	≥42	≥32	≥83	≥250	≥118	≥240	≥54

Tab. 9.19: Zuordnung Prioritätspunkte p₁ [325]

Kategorie	Verkehrsbedeutung	p ₂
A1	Bundesautobahn	5
B3	Bundesstraße	4
C3	Landstraße	3
D4	Kreisstraße	2
E5	Gemeindestraße	2
F8	Sonstige Straße	2
G9	Fuß- und/oder Radweg	1
H10	Sonstiger Sachverhalt	1
S/T	-	-

Tab. 9.20: Verkehrsbedeutung je Bauteilkategorie [325]

Prüfbericht	max S	max V	max D	TH Darmstadt			BAST
				P ₁	P ₂	P _{ges}	
1	2	3	4	435,00	50,00	485,00	3,50
2	3	2	4	385,00	50,00	435,00	3,50
5	1	2	3	290,00	50,00	340,00	3,00
13	1	2	3	275,00	50,00	325,00	3,00
4	2	2	3	260,00	50,00	310,00	3,30
14	1	2	3	235,00	50,00	285,00	2,90
9	2	2	3	220,00	50,00	270,00	3,00
10	2	2	3	220,00	50,00	270,00	2,90
11	1	2	3	215,00	50,00	265,00	2,90
8	1	2	3	205,00	50,00	255,00	2,80
20	1	1	3	200,00	50,00	250,00	2,80
6	1	2	2	195,00	50,00	245,00	2,50
16	1	1	3	195,00	50,00	245,00	2,70
7	1	2	3	195,00	50,00	245,00	2,60
18	1	2	2	180,00	50,00	230,00	2,40
19	1	2	2	120,00	50,00	170,00	2,30
17	1	2	2	105,00	50,00	155,00	2,30
12	1	1	2	100,00	50,00	150,00	2,40
15	1	2	2	95,00	50,00	145,00	2,00
3	0	0	1	0,00	50,00	50,00	1,80

Tab. 9.21: Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach TH Darmstadt

9.3.4 BAST 1997

Bedeutung der Bauteile in Abhängigkeit der Schadenszone

$$f_{1,i} = \frac{\sum(S_{i,j} \cdot B_{B,i,j})}{\max S_{i,j} \cdot n_j} \cdot \frac{U_{k,j}}{100} \quad \text{mit } 0 \leq f_{1,i} \leq 0,9$$

mit	$f_{1,i}$	Zahlenwert zwischen 0 und 0,9	
	$S_{i,j}$	Bewertung eines Einzelschadens	
	$B_{B,i,j}$	Bedeutung beschädigtes Bauteil (siehe Tab. 9.22)	
	$U_{k,j}$	Geschädigter Anteil der Kategorie in [%]	
	n_j	Anzahl Schäden einer Kategorie	[156]

mit	S^*	Grenzwert für Rechenwerte der Schadensbewertungen	
	$S_{i,j} \geq 1$ und $B_{B,i,j} \leq 0,30$ und $U_{k,j} \leq 10 \%$		$\rightarrow S^* = 1$
	$S_{i,j} \geq 2$ und $B_{B,i,j} \leq 0,30$ und $15 \% \leq U_{k,j} \leq 25 \%$		$\rightarrow S^* = 2$
	$S_{i,j} \geq 2$ und $B_{B,i,j} = 0,45$ und $U_{k,j} \leq 10 \%$		$\rightarrow S^* = 2$ [156]

Bewertung einer einzelnen Bauteilkategorie

$$Z_{k,j} = \max S_{i,j} + f_{1,i} (S_{i,j}; B_{B,i,j}; U_{k,j}) \quad \text{für } 1 \leq \max S_{i,j} \leq 3$$

$$Z_{k,j} = 1,0 \quad \text{für } \max S_{i,j} = 0$$

$$Z_{k,j} = 4,0 \quad \text{für } \max S_{i,j} = 4$$

mit	$Z_{k,j}$	Bewertung einzelner Bauteilkategorie	
	$S_{i,j}$	Bewertung eines Einzelschadens	
	$B_{B,i,j}$	Bedeutung beschädigtes Bauteil (siehe Tab. 9.22)	
	$U_{k,j}$	Geschädigter Anteil der Kategorie in [%]	
	$f_{1,i}$	Zahlenwert zwischen 0 und 0,9	[156]

mit	$Z_{k,j}^*$	Grenzwert für Rechenwerte der Gesamtbewertung	
	$Z_{k,j} \geq 2$ und $B_{k,i,j} < 1,0$ und $U_{k,j} \leq 10 \%$		$\rightarrow Z_{k,j}^* = (Z_{k,j} - 1)$

Anhang

Differenz der Einzelzustandsnoten zur maximalen Zustandsnote

$$\begin{aligned}\Delta Z &= 0 && \text{für } f_2 = 0 \\ \Delta Z &= \max && \text{für } f_2 = \max \\ \Delta Z &= \max Z_{k,j} - 1 && \text{für } f_2 = f_3 \cdot f_{1,\max Z} \quad [156]\end{aligned}$$

$$\text{mit } f_2 = \frac{(1-0,5 \cdot B_{k,\max Z}) \cdot f_{1,\max}}{\max Z_{k,j} - 1} \cdot \frac{\sum[(Z_{k,j} - \max Z_{k,j}) \cdot B_{k,j}]}{\sum(B_{k,j} - B_{k,\max Z})} \quad \text{mit } 0 \leq f_2 \leq 0,9$$

$$\Delta Z = \frac{\sum|(Z_{k,j} + \max Z_{k,j}) \cdot B_{k,j}|}{\sum B_{k,j} - B_{k,\max Z}}$$

$$f_3 = 1 - 0,5 \cdot B_{k,\max Z}$$

$B_{k,j}$ Bedeutung der Einzelkategorien (siehe Tab. 9.23)

Zustandsnote Gesamtbauwerk

$$Z_{ges} = \max Z_{k,j} - f_2 (\Delta Z_{k,j}; B_{k,j}) \quad \text{für } 1 \leq \max Z_{k,j} \leq 3$$

$$Z_{ges} = 1,0 \quad \text{für } \max Z_{k,j} = 1,0$$

$$Z_{ges} = 4,0 \quad \text{für } \max Z_{k,j} = 4$$

mit Z_{ges} Zustandsnote Gesamtbauwerk

$\max Z_{k,j}$ maximale Zustandsnote unter Berücksichtigung zusätzl. Randbedingungen

$\Delta Z_{k,j}$ mittlere Differenz der Einzelzustandsnoten der Kategorien

$B_{k,j}$ Bedeutung der Einzelkategorien [156]

Zone	B _B	Schaden an
6	0,9	Baugrund, Verankerungselemente, Koppelfuge, Tragseil, Hänger, Unter- spannung
5	0,75	Verbindungs konstruktion, Fahrbahnplatte, Arbeitsfuge, Zwischenendveranke- rung, Lager, Gelenk, Verankerungselement
4	0,60	Tiefgründung, Fundament, Pfeiler, Widerlager, Auflagerbank, Querriegel, Feldmittenbereich, Stützbereich, Wechselbereich, Fugenbereich
3	0,45	Bodenverbesserung, Kammerwand, Ausschüttung, Trennfuge, Endquerträ- ger, Stützquerträger, Feldquerträger, Quergurtebene, Untergurtebene, Quer- verband
2	0,30	Korrosionsschutz, Hinterfüllung, Aufschüttung, Kappe, Beläge, Übergangs- konstruktion, Grundwasserabsenkungsanlage
1	0,15	Entwässerung, Geländer, Leitungen, Anstrich, Verblendung, Oberflächenbe- festigung, Beschilderung, Beleuchtung

Tab. 9.22: Bedeutung der Bauteile B_B [156]

Zone	Gewichtung	B _K
A1	25	1,0
B2	15	0,6
C3	15	0,6
D4	10	0,4
E5	25	1,0
F8	25	1,0
G9	5	0,2
H10	5	0,2
S/T	-	0,2 bis 1,0

Tab. 9.23: Bedeutung der Bauteilkategorie B_K [156]

Bauteilkategorie	Kategorie	Bedeutung Kategorie		Bauteilzone	Bedeutung Bauteile
		Wichtung	BK		BB
Überbau	F8	25	1,0	2/3	0,3 / 0,45
Unterbau	D5	25	1,0	4	0,6
Vorspannung	F8	25	1,0	2	0,3
Gründung	D5	25	1,0	4	0,6
Erd- und Felsanker	D5	25	1,0	4	0,6
Brückenseile und -kabel	F8	25	1,0	2	0,3
Lager	C3	15	0,6	5	0,75
Übergangskonstruktion	B2	15	0,6	2	0,3
Abdichtungen	H10	5	0,2	1	0,15
Beläge	A1	25	1,0	2	0,3
Kappen	D4	10	0,4	2	0,3
Schutzeinrichtungen	G9	5	0,2	1	0,15
Sonstiges	S/T	-	0,2-1,0	6	0,9

Tab. 9.24: Festlegungen für Schadensbewertung nach BASt 1997

Prüfbericht	max S	max V	max D	max $f_{2,j}$	max $Z_{K,j}$	Z_{ges}	Differenz	BASt
1	2	3	4	0,08	3,47	3,54	-± (0,04)	3,50
2	3	2	4	0,08	3,38	3,46	± (0,04)	3,50
3	0	0	1	0,00	2,00	2,01	-± (0,21)	1,80
4	2	2	3	0,03	3,28	3,31	-± (0,01)	3,30
5	1	2	3	0,02	3,12	3,14	-± (0,14)	3,00
6	1	2	2	0,02	3,08	3,10	-± (0,60)	2,50
7	1	2	3	0,09	2,30	2,39	± (0,21)	2,60
8	1	2	3	0,16	2,60	2,76	± (0,04)	2,80
9	2	2	3	0,02	3,07	3,09	-± (0,09)	3,00
10	2	2	3	0,23	2,60	2,83	± (0,07)	2,90
11	1	2	3	0,05	2,30	2,35	± (0,55)	2,90
12	1	1	2	0,04	2,30	2,34	± (0,06)	2,40
13	1	2	3	0,02	3,08	3,10	-± (0,10)	3,00
14	1	2	3	0,09	2,45	2,54	± (0,36)	2,90
15	1	2	2	0,01	2,09	2,10	-± (0,10)	2,00
16	1	1	3	0,09	2,46	2,55	± (0,15)	2,70
17	1	2	2	0,02	2,23	2,25	± (0,05)	2,30
18	1	2	2	0,04	2,30	2,34	± (0,06)	2,40
19	1	2	2	0,04	2,18	2,22	± (0,08)	2,30
20	1	1	3	0,20	2,60	2,80	± (0,00)	2,80

Tab. 9.25: Nachbildung und Ergebnisse Verfahren nach BASt 1999

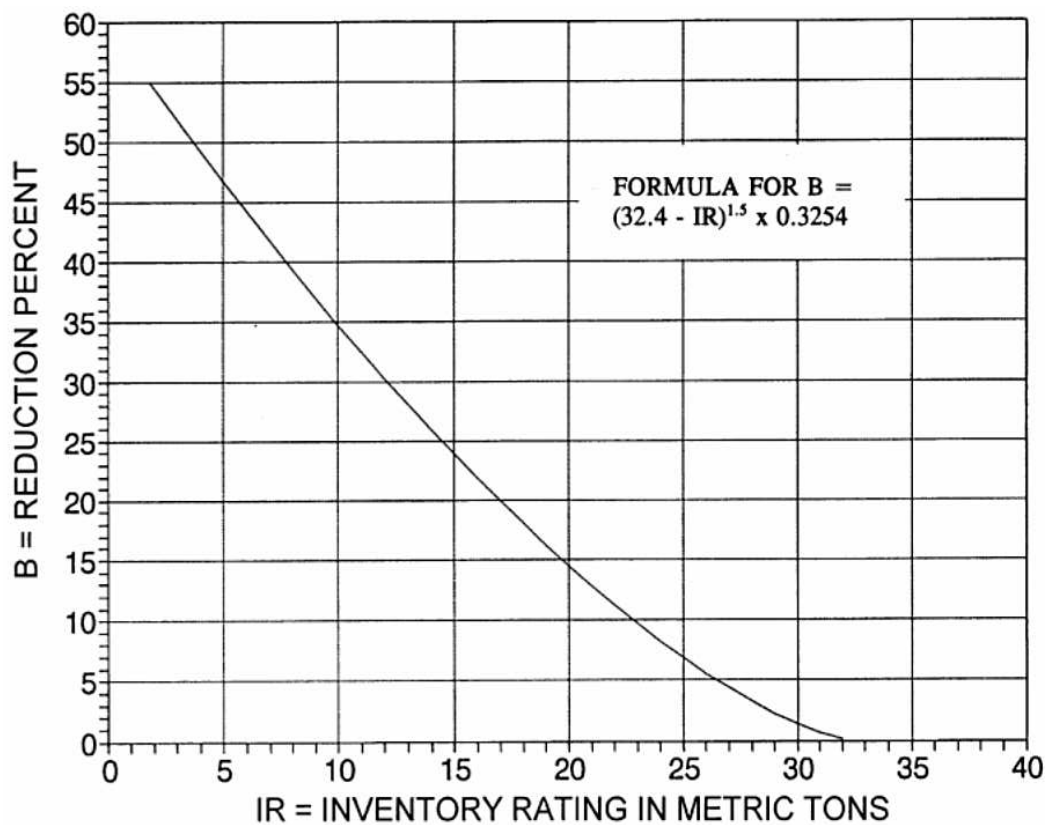
9.3.5 United States of America

EXAMPLE DATA		OMB No. 2125-0501 10/15/94	
NATIONAL BRIDGE INVENTORY - - - - -		STRUCTURE INVENTORY AND APPRAISAL	
***** IDENTIFICATION *****			
(1) STATE NAME - YOUR STATE NAME	CODE 999	SUFFICIENCY RATING = 37.4	
(8) STRUCTURE NUMBER		STATUS = STRUCTURALLY DEFICIENT	
(5) INVENTORY ROUTE (ON/UNDER) - ON	= 131000440	***** CLASSIFICATION *****	
(2) HIGHWAY AGENCY DISTRICT	03	(112) NBIS BRIDGE LENGTH -	YES
(3) COUNTY CODE 075	(4) PLACE CODE 59767	(104) HIGHWAY SYSTEM - ROUTE ON NHS	1
(6) FEATURES INTERSECTED - SR 772, ROARING LION R. *		(26) FUNCTIONAL CLASS - OTHER PRIN ART URSAM	14
(7) FACILITY CARRIED - STATE ROUTE 44		(100) DEFENSE HIGHWAY - NOT DEFENSE	0
(9) LOCATION - 9.7 KM SW. OF RICHMOND		(101) PARALLEL STRUCTURE - NONE EXISTS	N
(11) MILEPOINT/KILOMETERPOINT 0036.008		(102) DIRECTION OF TRAFFIC - 2 WAY	2
(12) BASE HIGHWAY NETWORK - PART OF NET CODE 1		(103) TEMPORARY STRUCTURE - NOT TEMPORARY	-
(13) LRS INVENTORY ROUTE & SUBROUTE #000000277503		(105) FEDERAL LANDS HIGHWAYS - NOT APPLICABLE	0
(16) LATITUDE 35 DEG 27 MIN 18.55 SEC		(110) DESIGNATED NATIONAL NETWORK - PART OF NET	1
(17) LONGITUDE 081 DEG 05 MIN 50.65 SEC		(20) TOLL - ON FREE ROAD	3
(98) BORDER BRIDGE STATE CODE 888 % SHARE 40 %		(21) MAINTAIN - STATE HIGHWAY AGENCY	01
(99) BORDER BRIDGE STRUCTURE NO. #ABC003790243009		(22) OWNER - STATE HIGHWAY AGENCY	01
***** STRUCTURE TYPE AND MATERIAL *****		(37) HISTORICAL SIGNIFICANCE - NOT ELIGIBLE	5
(43) STRUCTURE TYPE MAIN: MATERIAL - STEEL		***** CONDITION *****	
TYPE - DECK TRUSS	CODE 309	(58) DECK	4
(44) STRUCTURE TYPE APPR: MATERIAL - STEEL		(59) SUPERSTRUCTURE	5
TYPE - GIRDER & FLOORBEAM SYSTEM	CODE 303	(60) SUBSTRUCTURE	6
(45) NUMBER OF SPANS IN MAIN UNIT	002	(61) CHANNEL & CHANNEL PROTECTION	8
(46) NUMBER OF APPROACH SPANS	0004	(62) CULVERTS	N
(107) DECK STRUCTURE TYPE - CONCRETE C-1-P	CODE 1	***** LOAD RATING AND POSTING *****	
(108) WEARING SURFACE / PROTECTIVE SYSTEM:		(31) DESIGN LOAD - H-15 OR M-13.5	2
A) TYPE OF WEARING SURFACE - CONCRETE	CODE 1	(63) OPERATING RATING METHOD - LOAD FACTOR	1
B) TYPE OF MEMBRANE - NONE	CODE 0	(64) OPERATING RATING - MS-14	25.2
C) TYPE OF DECK PROTECTION - UNKNOWN	CODE 8	(65) INVENTORY RATING METHOD - LOAD FACTOR	1
***** AGE AND SERVICE *****		(66) INVENTORY RATING - MS-11	19.8
(27) YEAR BUILT	1948	(70) BRIDGE POSTING - POSTING REQUIRED	2
(106) YEAR RECONSTRUCTED	0000	(41) STRUCTURE OPEN, POSTED OR CLOSED -	P
(42) TYPE OF SERVICE: ON - HIGHWAY-PEDESTRIAN		DESCRIPTION - POSTED FOR LOAD	
UNDER - HIGHWAY-WATERWAY	CODE 56	***** APPRAISAL *****	
(28) LANES: ON STRUCTURE 02 UNDER STRUCTURE 02		(67) STRUCTURAL EVALUATION	5
(29) AVERAGE DAILY TRAFFIC	019500	(68) DECK GEOMETRY	3
(30) YEAR OF ADT 1993 (109) TRUCK ADT 05 %		(69) UNDERCLEARANCES, VERTICAL & HORIZONTAL	6
(19) BYPASS, DETOUR LENGTH	013 KM	(71) WATERWAY ADEQUACY	8
***** GEOMETRIC DATA *****		(72) APPROACH ROADWAY ALIGNMENT	8
(48) LENGTH OF MAXIMUM SPAN	0097.5 M	(36) TRAFFIC SAFETY FEATURES	1100
(49) STRUCTURE LENGTH	00312.0 M	(113) SCOUR CRITICAL BRIDGES	8
(50) CURB OR SIDEWALK: LEFT 00.0 M RIGHT 02.5 M		***** PROPOSED IMPROVEMENTS *****	
(51) BRIDGE ROADWAY WIDTH CURB TO CURB	007.9 M	(75) TYPE OF WORK - REPLACE FOR DEFICIENCY	CODE 311
(52) DECK WIDTH OUT TO OUT	011.8 M	(76) LENGTH OF STRUCTURE IMPROVEMENT	00317.0 M
(32) APPROACH ROADWAY WIDTH (W/SHOULDERS)	12.2 M	(94) BRIDGE IMPROVEMENT COST	\$ 4,200,000
(33) BRIDGE MEDIAN - NO MEDIAN	CODE 0	(95) ROADWAY IMPROVEMENT COST	\$ 300,000
(34) SKEW 00 DEG (35) STRUCTURE FLARED	NO	(96) TOTAL PROJECT COST	\$ 5,000,000
(10) INVENTORY ROUTE MIN VERT CLEAR	99.99 M	(97) YEAR OF IMPROVEMENT COST ESTIMATE	1995
(47) INVENTORY ROUTE TOTAL HORIZ CLEAR	07.9 M	(114) FUTURE ADT	025600
(53) MIN VERT CLEAR OVER BRIDGE RDWY	99.99 M	(115) YEAR OF FUTURE ADT	2014
(54) MIN VERT UNDERCLEAR REF - HIGHWAY	10.46 M	***** INSPECTIONS *****	
(55) MIN LAT UNDERCLEAR RT REF - HIGHWAY	06.2 M	(90) INSPECTION DATE 03/94	(91) FREQUENCY 12 MO
(56) MIN LAT UNDERCLEAR LT	00.0 M	(92) CRITICAL FEATURE INSPECTION:	(93) CFI DATE
***** NAVIGATION DATA *****		A) FRACTURE CRIT DETAIL - YES - 06 MO	A) 09/94
(38) NAVIGATION CONTROL - BR PERMIT REQ	CODE 1	B) UNDERWATER INSP - NO - MO	B) /
(111) PIER PROTECTION - FUNCTIONING	CODE 2	C) OTHER SPECIAL INSP - NO - MO	C) /
(39) NAVIGATION VERTICAL CLEARANCE	18.3 M		
(116) VERT-LIFT BRIDGE NAV MIN VERT CLEAR	M		
(40) NAVIGATION HORIZONTAL CLEARANCE	047.2 M		

Abb. 9.20: Datenblatt Strukturinventar USA [295]

Kategorie	Bezugsgröße
N	nicht anwendbar
9	EXZELLENTER ZUSTAND - Zustand besser als die wünschenswerten Anforderungen
8	SEHR GUTER ZUSTAND - keine Probleme festgestellt
7	GUTER ZUSTAND-fast keine Probleme festgestellt
6	ZUFRIEDENSTELLENDER ZUSTAND-kleinere Schäden an den Bauteilen
5	ANNEHMBARER ZUSTAND-alle wichtigen Bauteile sind in Ordnung, aber weisen geringfügigen Querschnittsverlust, Risse oder Ausspülung auf
4	SCHLECHTER ZUSTAND - fortgeschrittener Querschnittsverlust, Schäden oder Ausspülung
3	ERNSTER ZUSTAND - Querschnittsverlust, Schäden oder Ausspülung haben die wichtigen Bauteile stark beschädigt. Lokaler Ausfall von Teilen ist möglich. Es können Ermüdungsrisse in Stahl oder Schubrisse in Beton vorhanden sein
2	KRITISCHER ZUSTAND - fortgeschrittener Schadenszustand an wichtigen Bauteilen. Ermüdungsrisse in Stahl oder Schubrisse in Beton sind vorhanden bzw. durch Ausspülung fehlen tragende Teile des Unterbaus. Es kann die Schließung der Brücke erforderlich sein, bis Reparaturen durchgeführt sind, sofern nicht sorgfältige Überwachungsmaßnahmen angeordnet sind
1	UNMITTELBAR VOR AUSFALL - schwere Schäden oder Querschnittsverluste bei kritischen Bauteilen oder deutliche vertikale oder horizontale Bewegung, die die Stabilität der Brücke beeinträchtigt. Die Brücke wird für den Verkehr gesperrt, kann aber nach Reparaturen wieder für geringe Belastungen freigegeben werden
0	AUSFALL-außer Betrieb, keine Reparaturen mehr möglich

Tab. 9.26: Beschreibung für Item 58/59/60 [295]

Abb. 9.21: Reduzierung der Tragfähigkeit B(S₁) [295]

Kategorie	Bezugsgröße
N	nicht zutreffend
9	entspricht genau den wünschenswerten Kriterien
8	entspricht größtenteils den wünschenswerten Kriterien
7	besser als die derzeitigen Mindestkriterien
6	entspricht den vorliegenden Mindestkriterien
5	etwas besser als die tolerierbaren Mindestkriterien
4	tolerierbare Mindestkriterien werden gerade noch erfüllt
3	untragbar, Korrekturmaßnahmen erforderlich
2	untragbar, Austausch-/Neubaumaßnahmen erforderlich
1	dieser Wert wird nicht verwendet
0	Brücke geschlossen

Tab. 9.27: Beschreibung für Item 57/68/69/70/71/72 [295]

Ermittlung G und H

- a) gilt für alle Brücken
- b) gilt für einspurige Brücken
- c) gilt für zwei- oder mehrspurige Brücken
- d) gilt für alle außer einspurige Brücken

$$X = \frac{\text{Item 29 (durchschnittlicher täglicher Verkehr)}}{\text{die beiden ersten Ziffern aus Item 28 (Straßen unter/über der Brücke)}}$$

$$Y = \frac{\text{Item 51 (Fahrbahnbreite Brücke)}}{\text{die beiden ersten Ziffern aus Item 28 (Straßen unter/über der Brücke)}}$$

- a) Sind die letzten beiden Ziffern von Item 43 (Hauptstruktur) nach Tab. 9.30 ungleich zu Item Nr. 19 (Umleitung/Länge Umweg) nach Tab. 9.28, dann ist die Codierung für Fahrbahnbreite (Item 51) nach Tab. 9.29 und Brückenbreite (Item 32) nach Tab. 9.31 durchzuführen. [295]

$$\text{Item 51} < \text{Item 32} \rightarrow G(S_2) = 5 \%$$

Code	Beschreibung
000	Struktur umgehbar
018	Nicht überbrückbar; 18 km Umweg
121	Über Fluss; 121 km Umleitung
000	Über Autobahn, keine Abzweigung, umfahrbar
199	Sackgasse

Tab. 9.28: Beschreibung für Item 19 [295]

Code	Fahrbahnbreite
0160	16,00 m
0214	21,43 m
0331	33,07 m

Tab. 9.29: Beispiele für Codierung von Item 51 [295]

1. Ziffer		2. und 3. Ziffer	
Code	Beschreibung	Code	Beschreibung
1	Beton	01	Platte
2	Beton durchgehend	02	Längsbalken/Balken
3	Stahl	03	Träger- und Bodenbalkensystem
4	Stahl durchgehend	04	Abschlagbalken
5	Spannbeton	05	Kastenbalken oder Träger - Mehrfach
6	Spannbeton durchgehend	06	Kastenträger oder Träger - einzeln oder verteilt
7	Holz	07	Rahmen (außer Rahmendurchlässe)
8	Mauerwerk	08	Orthotrop
9	Aluminium, Gusseisen	09	Fachwerk - Deck
0	Sonstiges	10	Fachwerk - Durch
		11	Bogen-Deck
		12	Bogen-Durch
		13	Federung
		14	Stahlträger
		15	Hebebrücke
		16	Klappbrücke
		17	Schwenkbrücke
		18	Tunnel
		19	Durchlass
		20	Gemischte Typen
		21	Kastenträger
		22	Kanalträger
		00	Sonstiges

Tab. 9.30: Ziffer 1 und 2 + 3 für Codierung von Item 43 [295]

Code	Seitenstreifen links	Straße links	Trennstreifen	Straße rechts	Seitenstreifen rechts
0162	1,8 m	-	-	10,8 m	3,6 m
0288	3,0 m	7,2 m	4,8 m	10,8 m	3,0 m

Tab. 9.31: Beispiele für Codierung von Item 32 (Addition der Breiten) [295]

- b) H kann in Abhängigkeit von Y und der Codierung von Item 28 (nach Tab. 9.32) abgelesen werden:

$$\begin{aligned} \text{ersten beiden Ziffern von Item 28} = 01 \text{ und } Y < 4,3 & \rightarrow H(S_2) = 15 \% \\ & = 01 \text{ und } Y \leq 4,3 < 5,5 \rightarrow H(S_2) = \frac{15 \cdot (5,5 - Y)}{1,2} [\%] \\ & = 01 \text{ und } Y \geq 5,5 \rightarrow H(S_2) = 0 \% \end{aligned}$$

Code	Beschreibung
0101	1 Straße über, 1 Straße unter
0301	3 Straßen über, 1 Straße unter
0812	8 Straßen über (2 Richtungen), 12 Straßen unter
0502	5 Straßen auf doppelstöckiger Fahrbahn in jeder Richtung, 2 Straßen unter
0004	Fußgänger über, 4 Straßen unter

Tab. 9.32: Beispiele für Codierung von Item 28 [295]

- c) H kann in Abhängigkeit von Y und der Codierung von Item 28 (nach Tab. 9.32) abgelesen werden:

$$\begin{aligned} \text{ersten beiden Ziffern von Item 28} = 02 \text{ und } Y \geq 4,9 & \rightarrow H(S_2) = 0 \% \\ & = 03 \text{ und } Y \geq 4,6 \rightarrow H(S_2) = 0 \% \\ & = 04 \text{ und } Y \geq 4,3 \rightarrow H(S_2) = 0 \% \\ & \geq 05 \text{ und } Y \geq 3,7 \rightarrow H(S_2) = 0 \% \end{aligned}$$

- d) H kann in Abhängigkeit von X und Y errechnet werden:

$$Y < 2,7 \text{ und } X > 50 \rightarrow H(S_2) = 15 \%$$

$$Y < 2,7 \text{ und } X \leq 50 \rightarrow H(S_2) = 7,5 \%$$

$$Y \geq 2,7 \text{ und } X \leq 50 \rightarrow H(S_2) = 0 \%$$

$$50 < X \leq 125 \text{ und } Y < 3 \rightarrow H(S_2) = 15 \%$$

$$50 < X \leq 125 \text{ und } 3 \leq Y < 4 \rightarrow H(S_2) = 15 \cdot (4 - Y)$$

$$50 < X \leq 125 \text{ und } Y \geq 3 \rightarrow H(S_2) = 10 \%$$

$$125 < X \leq 375 \text{ und } Y < 3 \rightarrow H(S_2) = 15 \%$$

$$125 < X \leq 375 \text{ und } 3,4 \leq Y < 4,3 \rightarrow H(S_2) = 15 \cdot (4,3 - Y)$$

- $125 < X \leq 375$ und $Y \geq 4,3$ $\rightarrow H(S_2) = 0 \%$
 $375 < X \leq 1350$ un $Y < 3,7$ $\rightarrow H(S_2) = 15 \%$
 $375 < X \leq 1350$ und $3,7 \leq Y < 4,9$ $\rightarrow H(S_2) = \frac{15(4,9-Y)}{1,2}$
 $375 < X \leq 1350$ un $Y \geq 4,9$ $\rightarrow H(S_2) = 0 \%$
 $X > 1350$ und $Y < 4,6$ $\rightarrow H(S_2) = 15 \%$
 $X > 1350$ und $4,6 \leq Y < 4,9$ $\rightarrow H(S_2) = \frac{15(4,9-Y)}{1,2}$
 $X > 1350$ und $Y \geq 4,9$ $\rightarrow H(S_2) = 0 \%$

Prüfbericht	max S	max V	max D	Amerika					BAS _t
				S1	S2	S3	S4	S _{ges}	
3	1	2	3	48,45	30,00	0	6,69	71,76	1,80
12	1	2	2	31,38	20,00	0	6,69	58,08	2,40
17	1	2	2	30,79	20,00	0	6,69	57,48	2,30
19	1	2	2	30,79	20,00	0	6,69	57,48	2,30
6	1	2	3	30,79	20,00	0	6,69	57,48	2,50
7	2	2	3	30,79	20,00	0	6,69	57,48	2,50
18	1	1	2	30,79	20,00	0	6,69	57,48	2,40
16	1	2	2	30,79	19,00	0	6,69	49,79	2,70
20	0	0	1	30,79	17,00	0	6,69	47,79	2,80
8	2	2	3	30,79	17,00	0	6,69	47,79	2,80
5	2	2	3	21,38	20,00	0	6,69	41,38	3,00
11	1	1	3	21,38	20,00	0	6,69	41,38	2,90
4	1	2	3	15,79	21,00	0,72	6,69	37,52	3,30
10	1	2	3	15,79	20,00	1,06	6,69	36,85	2,90
14	1	2	3	15,79	20,00	1,06	6,69	36,85	2,90
9	1	2	3	15,79	20,00	1,06	6,69	36,85	3,00
13	1	1	3	15,79	17,00	2,06	6,69	34,85	3,00
1	2	3	4	0,79	20,00	6,06	6,69	26,85	3,50
2	3	2	4	0,79	19,00	6,40	6,69	26,19	3,50

Tab. 9.33: Nachbildung und Ergebnisse nach Verfahren Amerika

9.3.6 Japan

Brückenkomponente		Item / Element		
		Nr.	Schaden	
Bridge Surface / Oberfläche	Pavement / Pflasterung, Belag	1	Pathole / Schlagloch	
		2	Pavement Crack / Riss	
		3	Rutting	
		4	Waving / Unebenheiten	
	Expansion Joint / Dehnungsfuge	5	Damage on Expansion Joint / Dehnungsfuge	
		6	Difference in Level / Höhenunterschiede	
	Accessary / Zubehör	7	Damage on Drainage	
		8	Damage on Service Dust / Verunreinigung	
		9	Damage on Railing/Parpet / Geländer	
	Approach / Auffahrt	10	Settlement of Surface / Setzungen	
		11	Approach Bank River Bank / Zufahrt Ufer	
Superstructure (PSC-PRE, PSC-POS, RCS-RCB) / Überbau	Main Girder / Hauptträger	12	Spall/Dela/Ex-Rebar / Splitter	
		13	Crack / Riss	
		14	Damage of Anchorage / Verankerung	
	Cross Beam / Querträger	12	Spall/Dela/Ex-Rebar / Splitter	
13		Crack / Riss		
RC-S	Slab / Platte	12	Spall/Dela/Ex-Rebar / Splitter	
		13	Crack / Riss	
Superstructure (Steel) / Überbau Stahl)	Main Girder / Hauptträger	19	Paint Degradation / Farbabbau	
		20	Corrosion / Korrosion	
		21	Damage (Rivet/HSFG)	
		18	Mud Deposition/Vegetation / Schlammablagerungen	
	Deck Slab / Fahrbahnplatte	Concrete / Beton	22	Damage ob Deck Slab / Fahrbahnplatte
		Steel / Stahl	22	Damage ob Deck Slab / Fahrbahnplatte
	Cross Beam / Querträger	20	Corrosion / Korrosion	
21		Damage (Rivet/HSFG)		
Arch Bridge / Bogenbrücke	Arch Rib / Rippe	23	Arch Line (Displacement) / Bogenlinie	
		24	Deterioration (Loose) / Verschleiß	
		18	Mud Deposition/Vegetation / Schmutz	
		13	Crack / Riss	
	Spandrel / Zwickel	24	Deterioration (Loose) / Verschleiß	
		18	Mud Deposition/Vegetation / Schmutz	
		13	Crack / Riss	
Bridge Bearing / Brückenlager	Bridge Bearing / Lager	15	Water Leakage from Expansion / Leckwasser	
		16	Damage ob Bridge Bearing	
Box Bridge / Hohlkastenbrücke	Slab / Platte	12	Spall/Dela/Ex-Rebar / Splitter	
		13	Crack / Riss	
Subcture / Unterbau	Abutment and Pier / Widerlager und Pfeiler	17	Scour / Unterspülung	
		12	Spall/Dela/Ex-Rebar / Splitter	
		13	Crack / Riss	
		18	Mud Deposition/Vegetation / Schmutz	

Tab. 9.34: Bauteilkategorien Verfahren Japan [254]

Bauteil	Überbau				Unterbau			
	Hauptträger	Auflager	Fahrbahn	Querträger	Bodenplatte	Widerlager	Pfeiler	Gründung
Bewertung	50	15	0	0	0	0	3	0
Bewertung max.	100	30	50	50	70	60	60	90
Gewichtung	30	6	5	4	15	8	8	24
Summe Bewertungen	$\frac{50}{100} \cdot 30 + \frac{15}{30} \cdot 6 + \frac{0}{50} \cdot 5 + \frac{0}{50} \cdot 4 + \frac{0}{70} \cdot 15 + \frac{0}{60} \cdot 8 + \frac{3}{60} \cdot 8 + \frac{0}{90} \cdot 24$ $= 18,4 \%$							
Endbewertung	$100 \% - 18,4 \% = \mathbf{81,6 \%}$							

Tab. 9.35: Beispiel für Subtracting Point Methode nach Verfahren Japan [163][254]

9.3.7 Algorithmus

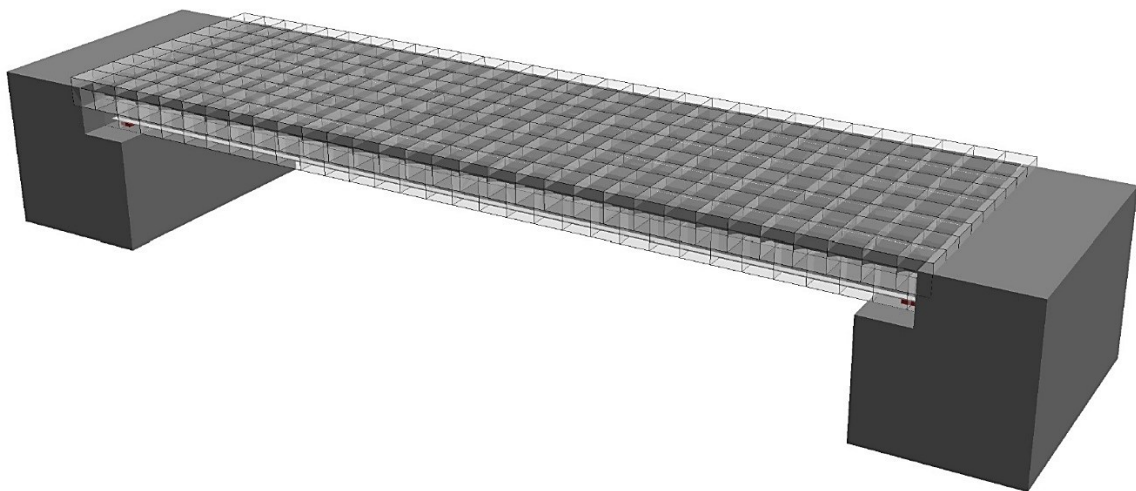


Abb. 9.22: Beispiel einer voxelisierten einfeldrigen Balkenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte

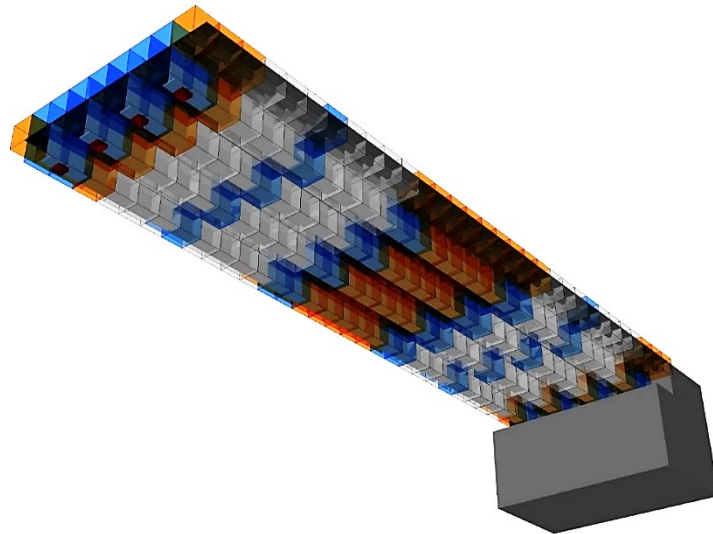


Abb. 9.23: Beispiel Verteilung orangener Voxel (= konstruktiv mit Priorität)

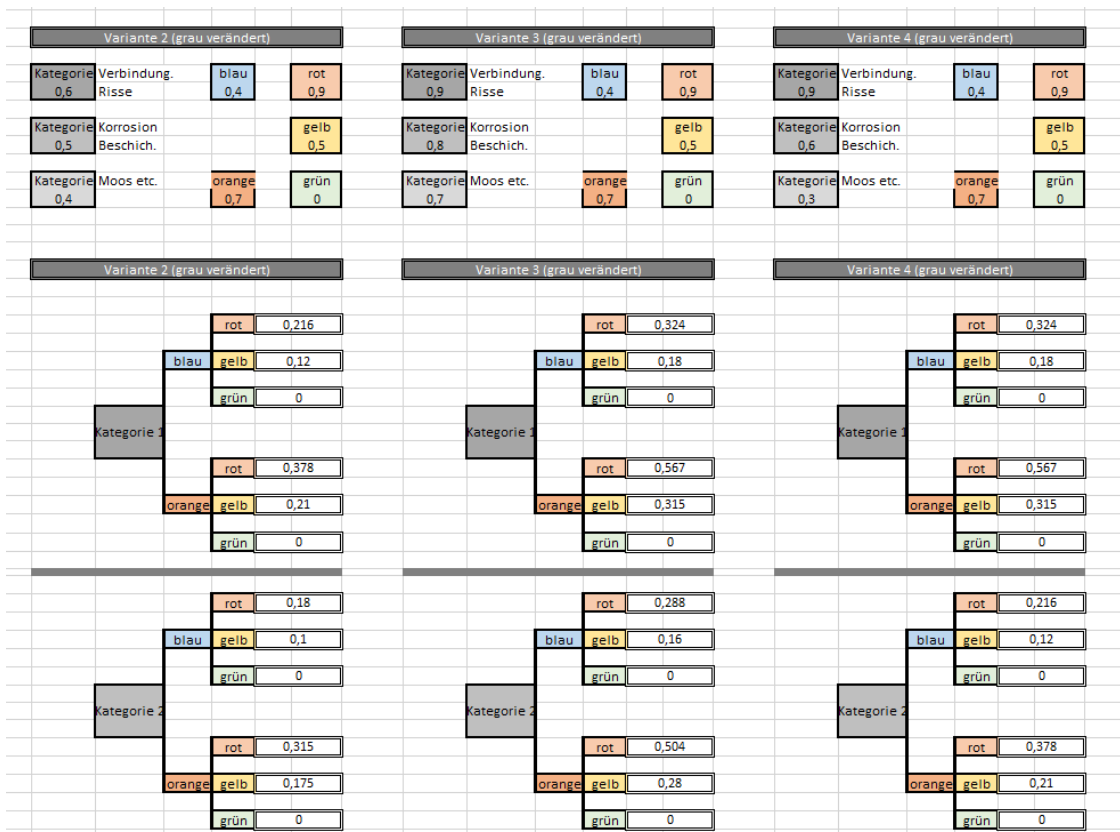


Abb. 9.24: Beispielhafter Auszug von Analyse der Gewichtungsfaktoren

Prüfbericht	max S	max V	max D	B	Endnote	BASt
3	0	0	1	3,3	1,0	1,8
15	1	2	2	4,9	1,1	2,0
17	1	2	2	5,3	1,2	2,3
19	1	2	2	6,1	1,5	2,3
12	1	1	2	7,1	1,7	2,4
18	1	2	2	7,4	1,8	2,4
6	1	2	2	8,0	2,0	2,5
7	1	2	3	8,3	2,2	2,6
16	1	1	3	8,4	2,2	2,7
8	1	2	3	11,0	2,2	2,8
20	1	1	3	13,5	2,4	2,8
10	2	2	3	14,2	2,6	2,9
11	1	2	3	14,1	2,6	2,9
14	1	2	3	13,9	2,5	2,9
5	1	2	3	16,5	2,7	3,0
9	2	2	3	16,9	2,7	3,0
13	1	2	3	18,1	3,1	3,0
4	2	2	3	20,6	3,3	3,3
1	2	3	4	34,9	4,5	3,5
2	3	2	4	23,6	3,6	3,5

Tab. 9.36: Vergleich BASt-Algorithmus mit neuem Algorithmus

9.4 Anhang A4 - Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

9.4.1 Vergabe von Inspektionsleistungen

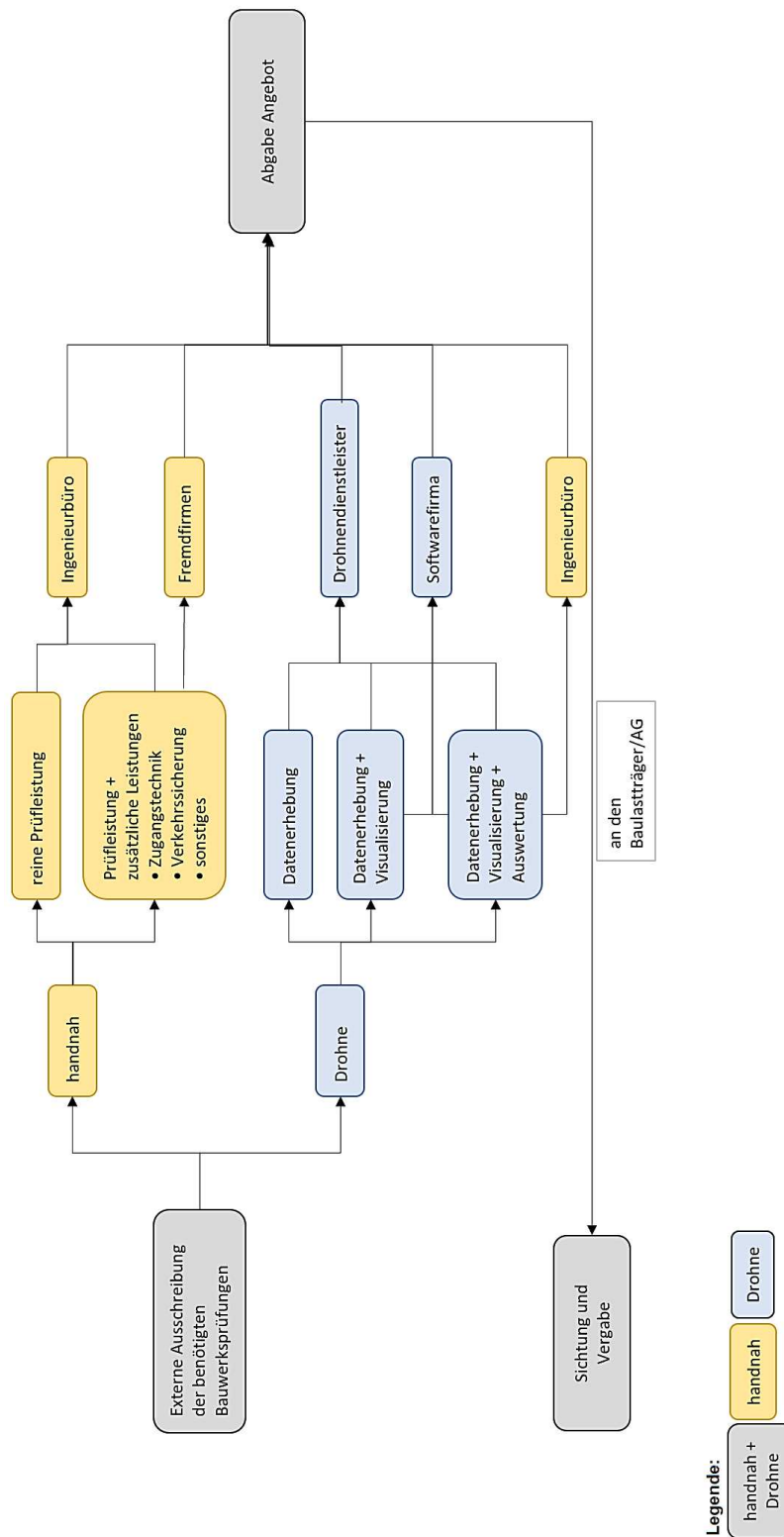


Abb. 9.25: Vergabeleistungen für handnahe oder UAS-unterstützte Brückenprüfung (nach [116], S. 36)

Selbstfahrende Geräte	Personal	€/h	h/km	€/km
Lkw-Arbeitsbühne	1	135,00 €/h	0,013 h/km	1,80 €/km
Brückenuntersichtgerät				
▪ 9 m	1	150,75 €/h	0,013 h/km	2,01 €/km
▪ 16 m	1	191,00 €/h	0,013 h/km	2,55 €/km
▪ 19 m	2	268,25 €/h	0,013 h/km	3,58 €/km
Zweiwege-technik	1	354,50 €/h	0,013 h/km	4,73 €/km
Brückenprüfschiff	2	275,00 €/h	0,091 h/km	25,00 €/km
Mit Anlieferung	Personal	€/h	h/km	€/km
Lkw mit Tieflader	1	112,00 €/h	0,013 h/km	1,49 €/km
Lkw mit Kran und Anhänger	1	106,00 €/h	0,013 h/km	1,41 €/km

Tab. 9.37: Anlieferungs- und Abholungskosten für Mietgeräte [203][352][390]

Mietgerät	Miete/Tag	Versicherung	Betriebskosten/Tag	€/Tag
Teleskoparbeitsbühnen				
▪ bis 12 m	74,00 €/d	7,00 €/d	25,50 €/d	106,50 €/d
▪ bis 20 m	113,00 €/d	11,00 €/d	25,50 €/d	149,50 €/d
▪ bis 28 m	147,00 €/d	14,00 €/d	25,50 €/d	186,50 €/d
Lkw-Arbeitsbühnen				
▪ bis 30 m	195,00 €/d	19,00 €/d	51,00 €/d	265,00 €/d
▪ bis 37 m	279,00 €/d	27,00 €/d	51,00 €/d	357,00 €/d
Stromaggregat 3 kVA	21,00 €/d	2,00 €/d	12,75 €/d	35,75 €/d
Rollgerüst	45,00 €/d	4,00 €/d	-	49,00 €/d

Tab. 9.38: Tagespauschalen für Mietgeräte ohne Bedienpersonal [203][352][390]

Mietgerät	Miete/Tag	Personalkosten/Tag	Gesamtkosten/Tag
Lkw-Arbeitsbühne	600,00 €/d	480,00 €/d	1.080,00 €/d
Brückenuntersichtgeräte			
9 m	726,00 €/d	480,00 €/d	1.206,00 €/d
16 m	1.048,00 €/d	480,00 €/d	1.528,00 €/d
19 m	1.186,00 €/d	960,00 €/d	2.146,00 €/d
Zweiwegetechnik	2.300,00 €/d	536,00 €/d	2.836,00 €/d
Brückenprüfschiff	1.550,00 €/d	1.200,00 €/d	2.750,00 €/d
Fahrsperrung	1.469,00 €/d	960,00 €/d	2.429,00 €/d

Tab. 9.39: Tagespauschalen für Mietgeräte mit Bedienpersonal [203][352][390]

Straße	Auf- und Abbau	Vorhaltung/Tag	Kontrolle/Tag	Kosten/Tag
halbseitige Sperrung	1.300,00 €	40,00 €/d	50,00 €/d	90,00 €/d
Vollsperrung	1.600,00 €	70,00 €/d	50,00 €/d	180,00 €/d
+ Umleitung	700,00 €	10,00 €/d	50,00 €/d	149,50 €/d
Lichtsignalanlage (LSA)	500,00 €	35,00 €/d	50,00 €/d	85,00 €/d
Transp. Schutzeinrichtung	400,00 €	25,00 €/d	32,00 €/d	57,00 €/d
Bahn	Auf- und Abbau	Vorhaltung/Tag	Kontrolle/Tag	Kosten/Tag
feste Absperrung	1.100,00 €	12,00 €/d	-	12,00 €/d
automatische Warnsysteme (ATWs)	2.000,00 €	26,00 €/d	-	26,00 €/d
Sh2-Scheiben	40,00 €	2,00 €/d	-	2,00 €/d
Erdungsbesteck	-	-	-	954,00 €

Tab. 9.40: Kosten für Sicherungsmaßnahmen bei Straßen und Gleisen (vgl. [352])

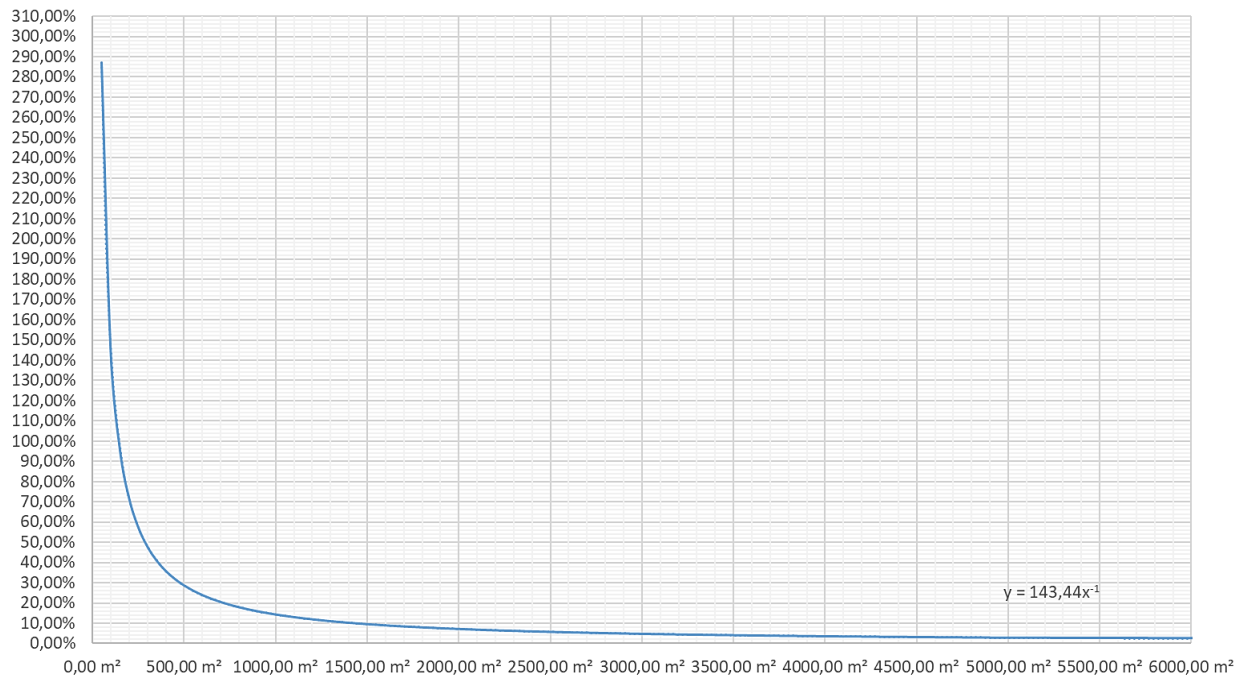


Abb. 9.27: Anteil des Grundaufwands aus (Gl. 70) an der gesamten Prüfzeit ([116], S. 45)

handnahe Prüfung DIN 1076				
Tätigkeit	Zuständigkeit	Zeitansätze	Kosten	
Organisation				
Feststellung der benötigten Bauwerksprüfungen		Baulastträger • Landesstraßenbehörden • Autobahn GmbH • WSV • DB		
Ausschreibung der Bauwerksprüfungen	• nur Prüfleistung • Prüfleistung + zusätzliche Leistungen (Verkehrssicherung, Zugangstechnik etc.)	Baulastträger		
Abgabe Angebot		• Ingenieurbüro • Ingenieurbüro + Fremdfirma		
Sichtung und Vergabe		Baulastträger		
Durchsicht Prüfbericht	• Vorabprüfung • Durchsprache Prüfergebnisse	Baulastträger		
Abrechnung	• Erstellung und Prüfung von Aufmaßen • Rechnungsstellung	Baulastträger + Ingenieurbüro		
Prüfungsvorbereitung				
Prüfungsvorbereitung	• Anforderung und Einlesen der Daten in SIB-Bauwerke • Durchsicht letzter Prüfbericht • Begutachtung der vorhandenen Schäden: Anzahl, Lage etc. • Erstellung Messprotokolle etc.	Prüfingenieur [91 €/h]	0,10 h	9,10 €
			0,15 h – 0,60 h	13,65 € – 54,60 €
Einholen der erforderlichen Genehmigungen	• Verkehrsrechtliche Anordnung • schiffahrtspolizeiliche Genehmigung • Betra + Seite 1 • Betretungserlaubnis	Prüfingenieur [91 €/h] bzw. Fachkraft	0,50 h	45,50 € + 100 €
			– 1,00 h	– 91,00 € + 120 €
			0,50 h	45,50 € + 350 €
			2,00 h + 0,50 h	227,50 €
			0,15 h	13,65 €
Beauftragung Leistung Dritter	• Verkehrssicherung • Sakra, Sipo etc. für DB • Wahrschauposten	Prüfingenieur [91 €/h]	0,25 h pro Sachverhalt	22,75 € pro Sachverhalt
Sonstige organisatorische Aufgaben	• Erstellung Gefährdungsbeurteilung • Einweisungsunterlagen	Prüfingenieur [91 €/h]	0,25 h	22,75 €
Prüfungsdurchführung				
Anfahrt zum Prüfobjekt	• Prüfingenieur/-team • Sicherungsunternehmen • Besichtigungsgerät	Prüfingenieur [91 €/h] Sicherungspersonal [37 €/h] Jeweiliges Unternehmen	0,01 h/km	1,18 €/km
			0,01 h/km	0,64 €/km
			0,013 h/km	1,49 €/km
			– 0,091 h/km	– 25,00 €/km

Fortsetzung auf nächster Seite

Anhang

Baustelleneinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> Besichtigungsgerät Zugänglichkeit herstellen 	Jeweiliges Unternehmen Prüfingenieur [91 €/h]	0,20 h 0,20 h	Tagespauschale 18,20 €
	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrssicherung 	Verkehrssicherungsunternehmen	Pauschale	400 € – 2000 €
Einweisung und Koordination	<ul style="list-style-type: none"> Besichtigungstechnik Prüfablauf UVV 	Prüfingenieur [91 €/h]	0,10 h 0,10 h	Tagespauschale 9,10 €
Durchführung der Bauwerksprüfung	<ul style="list-style-type: none"> Außen: Überbau, Brückenpfeiler, Widerlager Innen: Hohlkasten, Brückenpfeiler 	Prüfingenieur [91 €/h] Mietgeräte ohne Personal Mietgeräte mit Personal	Zeitansatz gem.äß Gl. 4.8 bzw. 4.12 24 h 7,50 h - 9,50 h pro Tag	Zeit * Stundenlohn 106,50 €/d – 357,00 €/d 1080 € bzw. 1159 €/d – 2836 € bzw. 2915 €/d
		Sicherungspersonal [37 €/h] Sicherungsmaßnahmen	min. 8 h 8 h - 24 h	Zeit * Stundenlohn 57 € – 2429 € bzw. 2587 €/d
Baustellenräumung/Abbau	<ul style="list-style-type: none"> Besichtigungsgerät Verkehrssicherung Verschluss der Zugänge 	Verkehrssicherungsunternehmen Jeweiliges Unternehmen Prüfingenieur [91 €/h]	Pauschale 0,20 h 0,20 h	400 € – 2000 € Tagespauschale 18,20 €
Abfahrt vom Prüfobjekt	<ul style="list-style-type: none"> Prüfingenieur/-team Sicherungsunternehmen Besichtigungsgerät 	Prüfingenieur [91 €/h] Sicherungspersonal [37 €/h] Jeweiliges Unternehmen	0,01 h/km 0,01 h/km 0,013 h/km – 0,091 h/km	1,18 €/km 0,64 €/km 1,49 €/km – 25,00 €/km
Prüfungsauswertung				
Eintragung in SIB-Bauwerke	<ul style="list-style-type: none"> Schäden und Umfang Schadensbewertung verwendete Besichtigungsgeräte und Verkehrssicherungsmaßnahmen ggf. Instandhaltungsmaßnahmen 	Prüfingenieur [91 €/h]	0,75 h – 1,875 h	68,25 € – 170,63 €
Erstellung Prüfbericht	<ul style="list-style-type: none"> Durchsprache Übergabe 	Prüfingenieur [91 €/h]	0,10 h	9,10 €

Tab. 9.41: Kostenmatrix für handnahe Brückenprüfung nach DIN 1076 (nach [116])

9.4.3 Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung

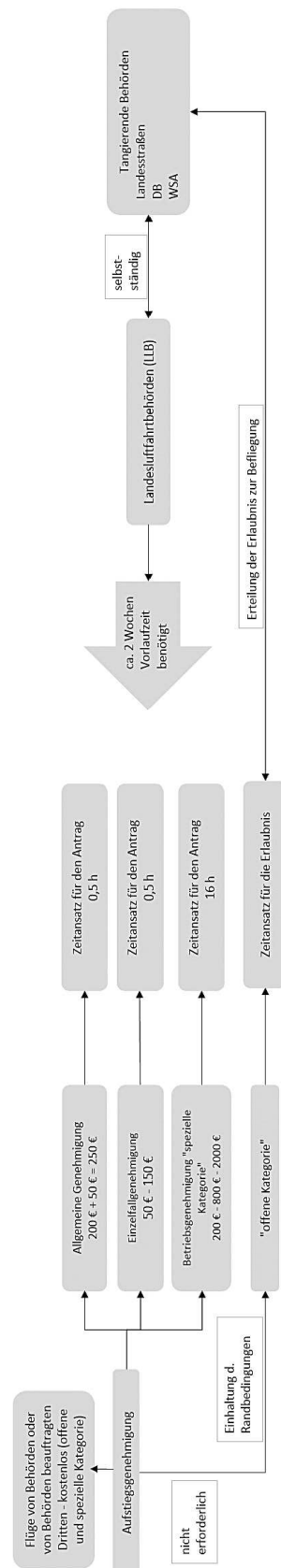
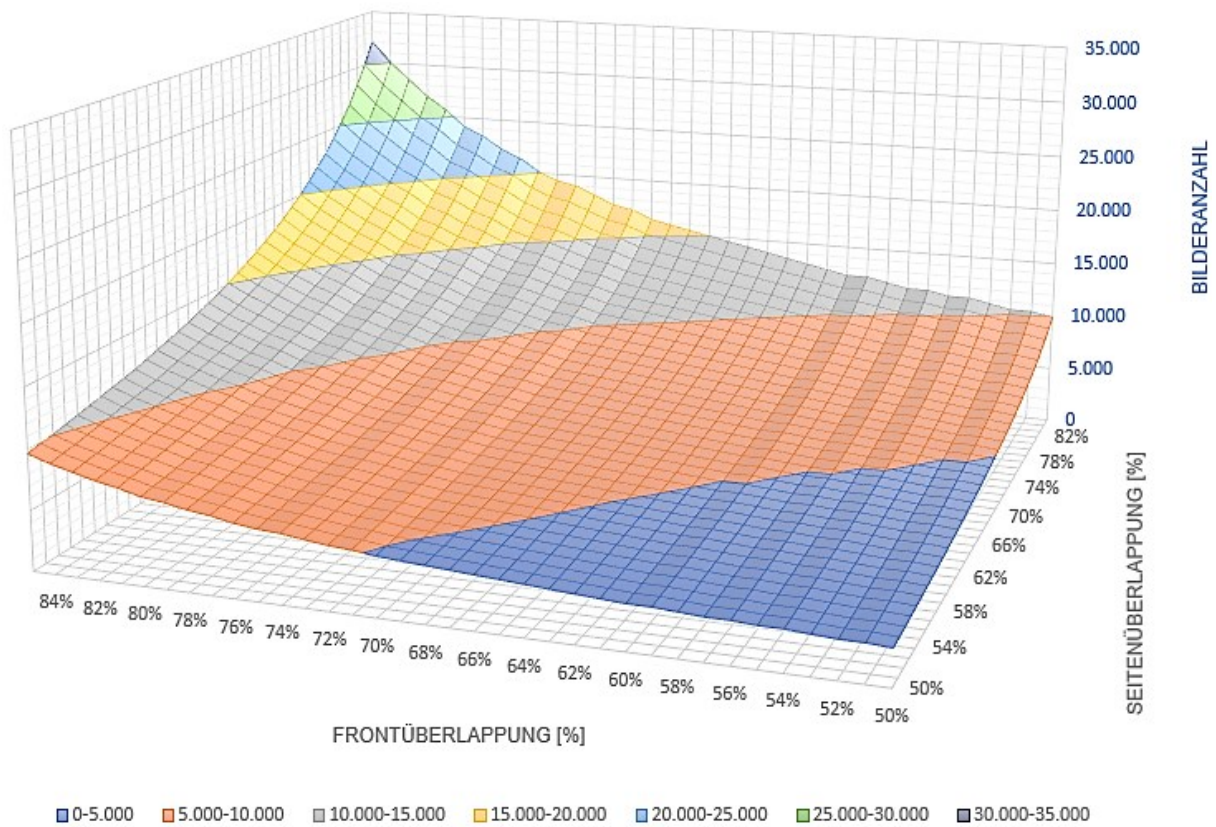


Abb. 9.28: Kosten und Zeitanätze für Fluggenehmigungen (nach [116])



mit $L = 120 \text{ m}$ (Brückenlänge), $B = 13 \text{ m}$ (Brückenbreite), $A_B = 2,0 \text{ m}$ (Breite der Aufnahme), $A_H = 1,0 \text{ m}$ (Höhe der Aufnahme)

Abb. 9.29: Bilderanzahl in Abhängigkeit der Überlappung ([116], S. 62)

UAS				
Tätigkeit	Zuständigkeit	Zeitansätze	Kosten	
Organisation				
Feststellung der benötigten Bauwerksprüfungen		Baulastträger • Landesstraßenbehörden • Autobahn GmbH • WSV • DB		
Ausschreibung der Bauwerksprüfungen	• Datenerhebung • Datenerhebung + visuelle Aufbereitung • Datenerhebung + visuelle Aufbereitung + Auswertung	Baulastträger		
Abgabe Angebot		• Drohnen dienstleister • Drohnen dienstleister + Softwareunternehmen • Drohnen dienstleister + Softwareunternehmen + Ingenieurbüro		
Sichtung und Vergabe		Baulastträger		
Durchsicht Prüfbericht	• Vorabprüfung • Durchsprache Prüfergebnisse	Baulastträger		
Abrechnung	• Erstellung und Prüfung von Aufmaßen • Rechnungsstellung	Baulastträger + Ingenieurbüro + Drohnen dienstleister		
Prüfungsvorbereitung				
Prüfungsvorbereitung	• Übersicht über Prüfobjekt • Anforderung von Unterlagen • Flugplanung & Akkumanagement	Drohnenpilot [72 €]	0,20 h +0,10 h	in Tagespauschale
Einholung erforderlicher Genehmigungen	• Verkehrsrechtliche Anordnung • schiffahrtspolizeiliche Genehmigung • Betra → Seite 1 • Betretungs-/Befliegungserlaubnis			optional → siehe handnahe Prüfung Drohnenpilot [72 €] bzw. Fachkraft
	• Aufstiegs genehmigung • Befliegungserlaubnis • Betriebs genehmigung	Drohnenpilot [72 €]	0,50 h 0,15 h 16,00 h	in Tagespauschale inklusive Gebühr ~ 200 € 800 €
Beauftragung Leistung Dritter (Sicherungsmaßnahmen)	• Verkehrssicherung • Sakra, Sipo etc. für DB • Wahrschau posten			optional → siehe handnahe Prüfung Drohnenpilot [72 €] bzw. Fachkraft
Sonstige organisatorische Aufgaben	• Erstellung Gefährdungsbeurteilung • Wetterauskunft • Technischer Check	Drohnenpilot [72 €]	0,25 h + 0,25 h	in Tagespauschale
Prüfungsdurchführung				
Anfahrt zum Prüfobjekt	• Drohnen dienstleister • ggf. Prüfingenieur/-team • ggf. Sicherungsunternehmen	Drohnen team [144 €/h] • Drohnenpilot [72 €/h] • Kameraoperator [72 €/h]	0,01 h/km	1,80 €/km

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Anhang

Baustelleneinrichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Drohne • Start- und Landeplatz • Vorflugkontrolle • Zugänglichkeit herstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Drohenteam [144 €/h] • Drohnenpilot [72 €/h] • Kameraoperator [72 €/h] 	0,30 h	Enthalten in der Tagespauschale eintägig 2.830 € mehrtägig 2.988 €/d
	• Verkehrssicherung	Verkehrssicherungsunternehmen	0,20 h siehe handnah	
Einweisung und Koordination	<ul style="list-style-type: none"> • UVV • Flugablauf • Anmeldung Flug bei der zuständigen Stelle 	in Baustelleneinrichtung enthalten		
Durchführung der Befliegung und Aufnahme der Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Außen: Überbau, Brückenpfeiler, Widerlager • Innen: Hohlkasten, Brückenpfeiler 	<ul style="list-style-type: none"> • Drohenteam [144 €/h] • Drohnenpilot [72 €/h] • Kameraoperator [72 €/h] 	Zeitansatz gemäß Gl. 4.21 6,75 h pro Tag	
		Sicherungspersonal [37 €/h] Sicherungsmaßnahmen	siehe handnah	
Baustellenräumung/Abbau	<ul style="list-style-type: none"> • Drohne • Start- und Landeplatz • Verschluss der Zugänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Drohenteam [144 €/h] • Drohnenpilot [72 €/h] • Kameraoperator [72 €/h] 	0,30 h 0,20 h	
Abfahrt vom Prüfobjekt	<ul style="list-style-type: none"> • Drohnen dienstleister • ggf. Prüfingenieur/-team 	<ul style="list-style-type: none"> • Drohenteam [144 €/h] • Drohnenpilot [72 €/h] • Kameraoperator [72 €/h] 	0,01 h/km	1,80 €/km
Prüfungsauswertung				
Übergabe der Bilddaten		Kameraoperator [72 €]	0,15 h	in Tagespauschale
Datenaufbereitung	• Photogrammetrie	Software / Firma	Auswertung in 3 – 7 d	200 € + 0,84 €/Bild
Bauwerksprüfung	• visuelle Inspektion	Prüfingenieur [91 €/h]	0,25 h + 1/1200 h/Bild	22,75 € + 0,0758 €/Bild
Prüfungsvorbereitung	<ul style="list-style-type: none"> • Anfordern der Daten • Einlesen der Daten in SIB-Bauwerke • Durchsicht alter Prüfbericht 	Prüfingenieur [91 €/h]	0,20 h	18,20 €
Eintragung in SIB-Bauwerke	<ul style="list-style-type: none"> • Schäden und Umfang • Schadensbewertung • verwendete Drohnen • ggf. Instandhaltungsmaßnahmen 	Prüfingenieur [91 €/h]	0,75 h – 1,875 h	68,25 € – 170,63 €
Erstellung Prüfbericht	<ul style="list-style-type: none"> • Durchsprache • Übergabe 	Prüfingenieur [91 €/h]	0,10 h	9,10 €

Tab. 9.42: Kostenmatrix für Brückenprüfung mit UAS-Unterstützung (nach [116])

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND
SCHRIFTENREIHE STAHLBAU

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. D. Ungermann

HEFT 13

2024