

Zustandsentwicklung und -prognose von Eisenbahnbrücken

Hubert Naraniecki¹, und Steffen Marx¹

¹*Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Der vorliegende Beitrag befasst sich im Rahmen des Forschungsprojekts DiMaRB (Digital Maintenance of Railway Bridges) mit der Auswertung einer Datenbank der DB AG, die zu den Eisenbahnbrücken vorliegt. Ziel ist es, Prognosen zu Zustandsentwicklungen unterschiedlicher Bauwerksarten von Eisenbahnbrücken zu erstellen und dafür die maßgebenden Einflussparameter (Merkmale) zu charakterisieren. Die hier dargestellten Untersuchungen beschränken sich größtenteils auf Daten von Stahlbeton-, Spannbeton- und Rahmenbrücken. Aus den Ergebnissen geht erwartungsgemäß hervor, dass das Bauwerkalter den ausschlaggebenden Einfluss auf den Zustand einer Brücke hat, die Entwicklung allerdings von weiteren Merkmalen wie dem statischen System und der Bauwerksart beeinflusst wird. Ein Zusammenhang zwischen dem Bauwerkszustand und Größendimensionen wie beispielsweise der Stützweite oder Brückenfläche wurde nicht festgestellt.

Keywords: Eisenbahnbrücken, Brückenzustand, Zustandsentwicklung, Zustandsprognose, prädiktives Instandhaltungsmanagement

ABSTRACT:

The present article deals as a part of the research project DiMaRB (Digital Maintenance of Railway Bridges) with the evaluation of data concerning railway bridges of the DB AG. The aim is to create predictions of condition development for different structure types of railway bridges and therefore to characterize the relevant influencing parameters (features). In this article a closer look is only taken on data of reinforced concrete bridges, prestressed concrete bridges and concrete frame bridges. Results of the investigation are presented in chapter 4 and show that the age of bridges has a decisive influence on the bridge condition, but the condition development is influenced by other features such as the static system and the structure type. On the other hand, the maximum span of the bridge and the bridge surface seem to rather not affect the condition development.

Keywords: railway bridges, bridge condition, condition development, condition prediction, predictive maintenance management

1 EINLEITUNG

Im betrachteten Datensatz der DB AG befinden sich etwa 25300 Brücken, welche sich hauptsächlich in vier Hauptbauwerksarten untergliedern. Massivbrücken stellen vor Stahl- und Gewölbebrücken sowie Walzträgern in Beton (WiB) den maßgebenden Brückentyp im Eisenbahnbrückenbau mit einem Gesamtanteil von ca. 29 % am Brückenbestand dar. Außer den genannten Hauptbauwerksarten gibt es im Bestand der DB ca. 1600 Signal- und Leitungsbrücken, die zwar den Brückenbauwerken zugeordnet sind aber keine Eisenbahnbrücken im herkömmlichen Sinne darstellen (hier nicht weiter betrachtet), sowie etwa 1200 Brücken, die keiner der vier Hauptbauwerksarten zugeordnet werden können. Bild 1 zeigt links die prozentuale Verteilung der Bauwerksarten aller Eisenbahnbrücken auf bundesweiter Ebene.

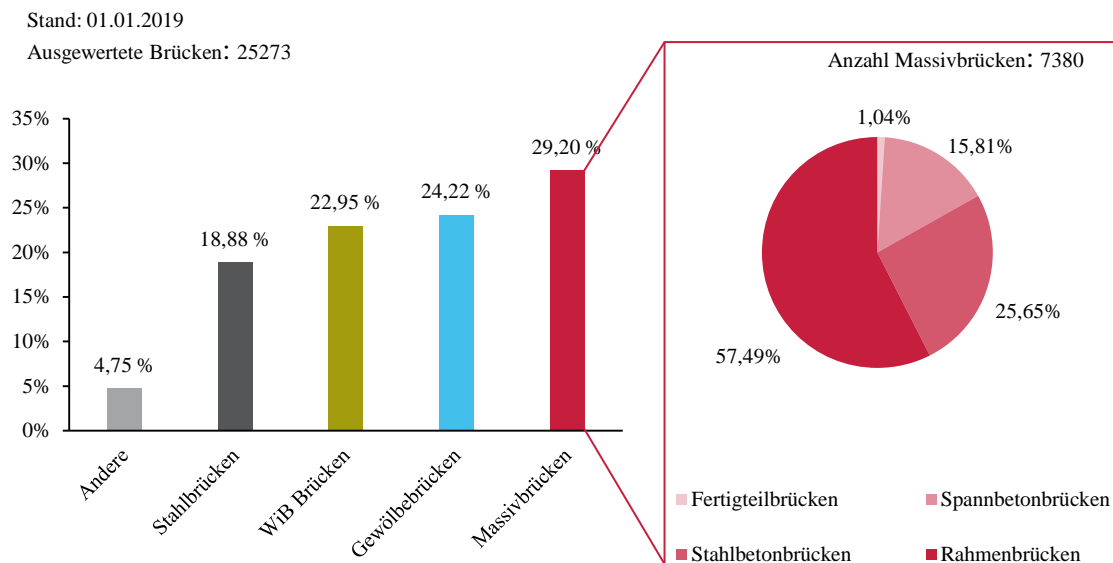


Bild 1: Verteilung der Eisenbahnbrücken nach Bauwerksart in Deutschland

Unter die Kategorie Massivbrücken fallen neben den Stahlbetonbrücken ebenfalls die Spannbeton-, Fertigteiltrücken sowie Rahmenbrücken. In Bild 1 ist rechts die Aufteilung der rd. 7380 Brückenbauwerke der Kategorie Massivbrücken nach der Bauwerksart dargestellt. Mit einem Anteil von fast 60 % aller Brücken sind Rahmenbrücken die am häufigsten vorkommende Bauwerksart, gefolgt von Stahlbeton- und Spannbetonbrücken, welche zusammen etwa die restlichen 40 % abbilden. Fertigteiltrücken haben einen Anteil von lediglich 1 % in der Kategorie Massivbrücken.

Bei der Betrachtung der Altersstruktur ist ein Abfall der Neubauten in den letzten 30 Jahren deutlich erkennbar. Die meisten Eisenbahnbrücken wurden im Zuge des Ausbaus des Nebenstreckennetzes zwischen 1900 bis 1920 gebaut (Rossberg 1999). Ein weiterer Schwerpunkt liegt zwischen 1980 und 2000, sodass das Durchschnittsalter des Brückenbestands aktuell rd. 72 Jahre beträgt. Die am häufigsten errichteten Brücken in den letzten 50 Jahren sind die Massivbrücken, explizit Rahmenbrücken, welche lediglich ein Durchschnittsalter von etwa 30 Jahren besitzen. Im Gegensatz dazu sind Stahl- und WiB Brücken mit etwa 80 Jahren und Gewölbebrücken mit 111 Jahren im Schnitt deutlich älter. Die älteste noch aktive Brücke im Bestand der DB AG ist eine Gewölbebrücke bei Mühlgraben in Sachsen mit einem Alter von 181 Jahren. Brücken, welche im Laufe ihrer Nutzungsdauer rekonstruiert worden sind, werden mit ihrem Rekonstruktionsjahr als Baujahr in Bild 2 abgebildet (ca. 4750 Bauwerke).

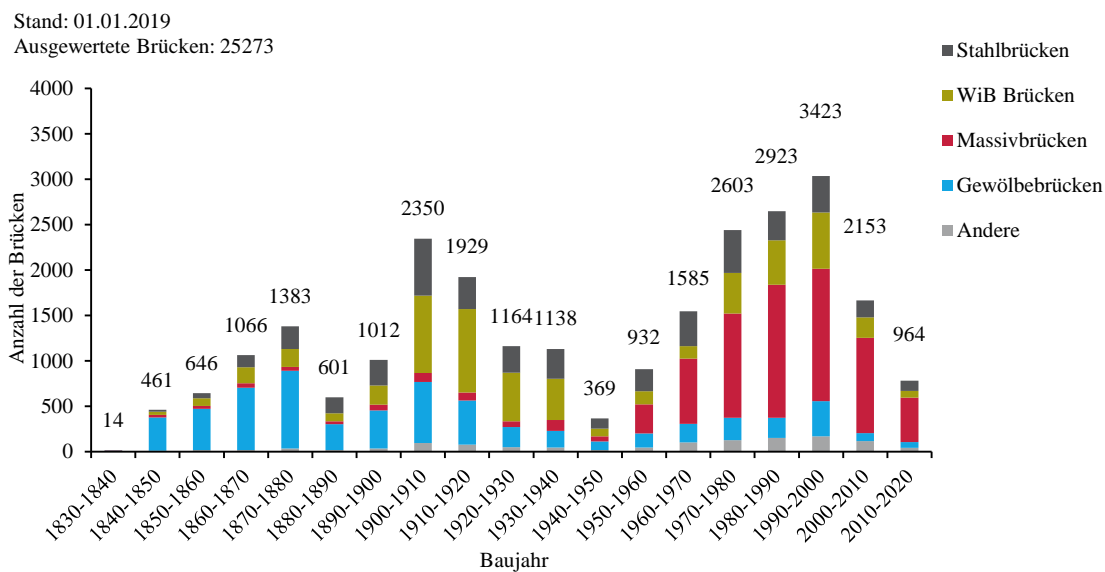


Bild 2: Verteilung der Bauwerksarten nach Baujahr

Das steigende Brückenalter führt zwangsläufig zu notwendigen Instandhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen, wodurch das Instandhaltungsmanagement des Brückenbestands mehr und mehr zu einer zentralen Aufgabe wird.

Momentan ist das Instandhaltungsmanagement von Eisenbahnbrücken problemorientiert, schadensbasiert und reaktiv. Bei einer periodisch durchgeführten Inspektion wird ein Schaden erkannt, wodurch erst anschließend eine Reaktion stattfinden kann. Der Umstand eines bereits entstandenen und ggf. fortgeschrittenen Schadens treibt die Kosten für die spät eingeleiteten Instandsetzungsmaßnahmen dann deutlich in die Höhe.

Die prädiktive Instandhaltungsstrategie, welche auf der Prognose von Schäden und Zustandsänderungen basiert, ist ein vielversprechender Ansatz. Sie wird in anderen Wirtschaftszweigen wie beispielsweise dem Maschinenbau bereits seit längerer Zeit erfolgreich angewandt. Eine wesentliche Grundlage dafür stellt eine möglichst genaue Vorhersage der Bauwerkszustände in Abhängigkeit von den gegebenen Randbedingungen dar. Folglich wären Inspektionen lediglich bei definierten Schwellwertüberschreitungen notwendig, wodurch eine Senkung der Instandhaltungskosten möglich wäre, da Schäden aber auch potenzielle Schäden frühzeitig erkannt und behoben werden könnten.

Da es sich bei vielen Brücken um einzigartige Bauwerke handelt, blieb die Frage bislang ungeklärt, inwiefern und mit welcher Genauigkeit es möglich und sinnvoll ist einen Zustand anhand von bauwerksbedingten Randbedingungen zu prognostizieren. Diese Fragestellung wird am Institut für Massivbau im Rahmen eines Teilarbeitspakets des Forschungsvorhabens DiMaRB (Digital Maintenance of Railway Bridges) mit Hilfe der Auswertungen von Bestandsdaten zu Eisenbahnbrücken der DB AG untersucht. In diesem Beitrag sollen die ersten Ergebnisse zur Untersuchung der Zustandsentwicklung infolge unterschiedlicher Brückeneigenschaften aufgezeigt und daraus Parameter identifiziert werden, die eine Zustandsprognose ermöglichen könnten. Der Fokus liegt hierbei auf der Bauwerkskategorie Massivbrücken aufgrund des maßgebenden Anteils am Gesamtbestand.

2 DATENGRUNDLAGE

Seit 1994 speichert die DB AG aus den Inspektionen gewonnene Informationen regionalbereichsbezogen unter Angabe von eindeutigen Brückenkennung in der Datenbank BauSysControl. Neben detektierten Schäden und Zustandsbewertungen aus den jeweiligen Inspektionen sind ebenfalls allgemeine Informationen zu den Brücken der DB AG abgelegt. Dazu gehören zum Beispiel die Anzahl und Art der Überbauten, Widerlager und Pfeiler, die Stützweite, das Baujahr des frühesten und spätesten Bauteils, mögliche Rekonstruktionsjahre, die Bauwerksart, das statische System und einige weitere Informationen, die die Brücke und deren Standort weiter charakterisieren. Diese Angaben eignen sich als Merkmale für die angestrebten und teilweise hier dargestellten Untersuchungen der Zustandsentwicklung in Abhängigkeit solcher Parameter.

Im Zuge einer (über alle Gewerke) einheitlichen Vorhaltung der technischen Daten der Infrastruktur wurden die Informationen aus BauSysControl in SAP R/3 Netz im Jahr 2008 übernommen. Die Zuordnung der einzelnen Brücken über „Equipmentnummern“ in BauSys wurde durch die neue Bezeichnung „Technischer Platz“ abgelöst und eine detaillierte einheitliche Codierung festgelegt. Mit der Einführung von SAP wurden zunächst nahezu alle bauwerksbezogenen Daten aus der Datenbank BauSysControl zusammengeführt und anschließend in das neue System SAP importiert. Die Daten der Brückenschäden als auch die letzten Begutachtungen wurden mittels PDF in SAP übernommen. In beiden Datenbanksystemen war/ist es nicht vorgesehen, an den Bauwerken durchgeführte Maßnahmen im Sinne einer Instandhaltung dauerhaft zu dokumentieren. In einer Untersuchung zur Entwicklung des Zustands über das Brückenalter kann daher der Einfluss von zustandsverbessernden Maßnahmen nicht effektiv ausgeschlossen werden.

Das BauSysControl (1994-2008) und SAP (2008-heute) stellen somit die Datengrundlage für die Auswertungen zur Zustandsentwicklung von Eisenbahnbrücken dar. Ein Zusammenführen beider Datenbanken ermöglicht es, den Zeitraum von 1994 bis heute mit Daten zu Brückenmerkmalen sowie Brückenzuständen zu füllen. Bezüglich der Schäden kann nur gesondert der Zeitraum von 1994 bis 2008 oder von 2008 bis 2019 betrachtet werden.

Für die nachfolgende Datenauswertung werden ausschließlich die noch aktiven und mit einer Zustandskategorie versehenen Brücken der oben genannten Kategorie Massivbrücken näher betrachtet und in einigen Aspekten mit der Kategorie Stahlbrücken verglichen. So kann der Effekt von einzelnen Parametern auf den Brückenzustand verdeutlicht werden. Gleichzeitig finden nur vollständige und hinsichtlich Richtigkeit plausibilisierte Brückendatensätze Eingang in die Auswertung, um den Einfluss fehlerbehafteter Daten in den Ergebnissen minimieren zu können. Dies bedeutet, dass nicht der gesamte Brückenbestand von rd. 25710 Brücken (Stand 2019) sondern lediglich 25273 Brücken in eine Auswertung eingehen. Der Betrachtungszeitpunkt der Daten bezieht sich auf den 01.01.2019, wodurch Abweichungen zu aktuellen Ständen erstehen können.

3 ZUSTANDBEWERTUNG VON EISENBAHNBRÜCKEN





Um die Betriebs-, Verkehrs- und Standsicherheit der Brücken im bundesweiten Eisenbahnnetz zu gewährleisten, kommt der Inspektion eine zentrale Bedeutung zu. Die Inspektion von Eisenbahnbrücken wird durch die Richtlinie 804.800x (DB 2011) der DB AG geregelt. Dabei unterscheidet die Richtlinie 804.8001 zwischen vier Inspektionsarten, der Überwachung, der Untersuchung, der Begutachtung sowie der Sonderbegutachtung, wobei die Begutachtung den Kern der Bauwerksinspektionen bildet. In einem Turnus von sechs Jahren werden bei einer Begutachtung alle Bauwerksteile auf Schäden und Mängel geprüft, welche die Brücke hinsichtlich Sicherheit,

Dauerhaftigkeit oder Tragfähigkeit beeinträchtigen könnten. Alle festgestellten Schäden werden dokumentiert und mit einer Schadensklasse (SK) versehen, die das Ausmaß der Schäden angibt. Die Definition der Schadensklassen erfolgt nach Richtlinie 804.8001.

- SK 1: geringfügige Schäden und Mängel
- SK 2: Schäden und Mängel mittleren Umfangs
- SK 3: Schäden und Mängel großen Umfangs
- SK 4: Völlige Verrottung, Zerstörung

Die Zuordnung eines Schadens zu einer SK oblag seit Beginn der Schadenserfassung bis Anfang 2017 der Einschätzung des Fachbeauftragten. Mit dem ab 2017 neu eingeführten Inspektionssystem „Brücken-App“ wurden Beispielbilder sowie ein Bewertungsalgorithmus zur Bewertung der SK eingeführt, wie in Tab. 1 dargestellt. Hiermit soll das Bewertungssystem der DB AG vereinheitlicht und von dem subjektiven Empfinden der Fachbeauftragten losgelöst werden.

Tabelle 1: Hilfsbilder zur Bewertung der SK am Beispiel von Betonabplatzungen (Brücken-App)

	Schadenskategorie	Schadenstext
SK 1		<ul style="list-style-type: none"> - Abplatzungen oberflächennah - Keine freiliegende tragende Bewehrung - Vereinzelte Stellen (< 5 % der Fläche) - Anfahrschaden
SK 2		<ul style="list-style-type: none"> - Abplatzungen mit freiliegender korrodierter Bewehrung - Mehrere Stellen (5-25 % der Fläche) - Querschnittsverlust der tragenden Bewehrung (< 15 % der Bewehrungsstäbe im tragenden Querschnitt)
SK 3		<ul style="list-style-type: none"> - Abplatzungen mit freiliegender korrodierter Bewehrung - Größere Flächen (25-50 % der Fläche) - Querschnittsverlust der tragenden Bewehrung (15-35 % der Bewehrungsstäbe im tragenden Querschnitt) - Übergreifungsstöße der Bewehrung nicht betroffen
SK 4		<ul style="list-style-type: none"> - Abplatzungen mit freiliegender korrodierter Bewehrung - Größere Flächen (> 50 % der Fläche) - Querschnittsverlust der tragenden Bewehrung (> 35 % der Bewehrungsstäbe im tragenden Querschnitt) - Übergreifungsstöße der Bewehrung liegen frei - Standsicherheit des Bauwerks beeinträchtigt

Zusätzlich zu den SK wird jeder Schaden hinsichtlich seiner Sicherheitsrelevanz nach Richtlinie 804.8001 beurteilt.

- Betriebssicherheit: Gefahr für die Abwicklung des Betriebs
- Verkehrssicherheit: Gefahr für den Verkehr Dritter und/oder die Mitarbeiter der DB
- Standsicherheit: Gefahr für den Bestand bzw. die Tragfähigkeit des Bauwerks oder eines wesentlichen tragenden Bauteils

Die drei verschiedenen Arten von Sicherheitsrelevanz werden für jeden dokumentierten Schaden mit „ja“ oder „nein“ bewertet, wobei ein Schaden auch mehrere Arten von Sicherheitsrisiken aufweisen kann.

Auf Grundlage der am Bauwerk erfassten Schadensanzahl und deren SK wird jedes Bauwerksteil (Überbauten, Widerlager und Pfeiler) einzeln hinsichtlich seines Zustands durch den Fachbeauftragten bewertet. Dafür werden die Zustandskategorien (ZK) 1 bis 4 nach Richtlinie 804.8001 eingeführt.

- ZK 1: Punktuelle Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei langfristig (länger als 30 Jahre) zu erhaltenden Bauwerksteilen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu prüfen.
- ZK 2: Größere Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Maßnahmen des vorbeugenden Unterhalts sind bei lang- und mittelfristig (länger als 18 Jahre) zu erhaltenden Bauwerksteilen auf ihre Wirtschaftlichkeit hin zu überprüfen.
- ZK 3: Umfangreiche Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit nicht beeinflussen. Eine Instandsetzung ist noch möglich, ihre Wirtschaftlichkeit ist zu prüfen.
- ZK 4: Gravierende Schäden am Bauwerksteil, welche die Sicherheit noch nicht beeinflussen. Eine wirtschaftliche Instandsetzung ist nicht mehr möglich.

Im Zuge der Inspektion wird ebenfalls für das gesamte Bauwerk eine ZK vergeben. Dabei ist das am schlechtesten bewertete Bauwerksteil maßgebend für den Gesamtzustand. Neben der Bewertung des aktuellen Zustands erfolgen außerdem Prognosen des Zustands in sechs und in 18 Jahren. Auch hier werden zunächst alle Bauwerksteile einzeln bewertet und das Gesamtbauwerk mit der schlechtesten ZK prognostiziert.

Wie bei der Schadensbewertung hatte auch die Zustandsbewertung vor der Einführung der „Brücken-App“ einen teilweise subjektiven Charakter, welcher durch die Qualifikation und Erfahrung der Fachbeauftragten geprägt war. Mit der Einführung des neuen Inspektionssystems „Brücken-App“ erfolgt die Bewertung der Bauwerksteile nicht mehr alleinig durch den Bearbeiter, sondern wird durch einen Algorithmus, der die maßgebenden konstruktiven Schäden berücksichtigt, berechnet und anschließend eine ZK vorgeschlagen. Es obliegt dennoch dem Fachbeauftragten, welche ZK vergeben wird, wobei eine hinreichende Begründung hinterlegt werden muss. Bezogen auf die zugrundeliegenden Daten, bedeutet dies, dass sowohl subjektiv vergebene Brückenzustände als auch durch den Algorithmus berechnete Zustände vorliegen.

Bild 3 zeigt links einen Einblick in die derzeitige Zustandssituation der Brückenbauwerke der DB AG. Etwa 68 % aller Bauwerke besitzen eine ZK von 2 oder besser und weisen somit keine umfangreichen oder gravierenden Schäden auf. Lediglich 4 % (rd. 1098 Brücken) der Eisenbahnbrücken in Deutschland besitzen die ZK 4 und können nach Richtlinie 804.8001 nicht mehr wirtschaftlich instandgesetzt werden, weshalb eine Erneuerung durchzuführen ist. Massivbrücken befinden sich ihrem

Durchschnittsalter entsprechend zu einem hohen Anteil in ZK 1. Gewölbebrücken als älteste Bauwerksart hingegen liegen entgegen der Erwartungen größtenteils in den ZK 2 und 3.

Stand: 01.01.2019
Ausgewertete Brücken: 25273

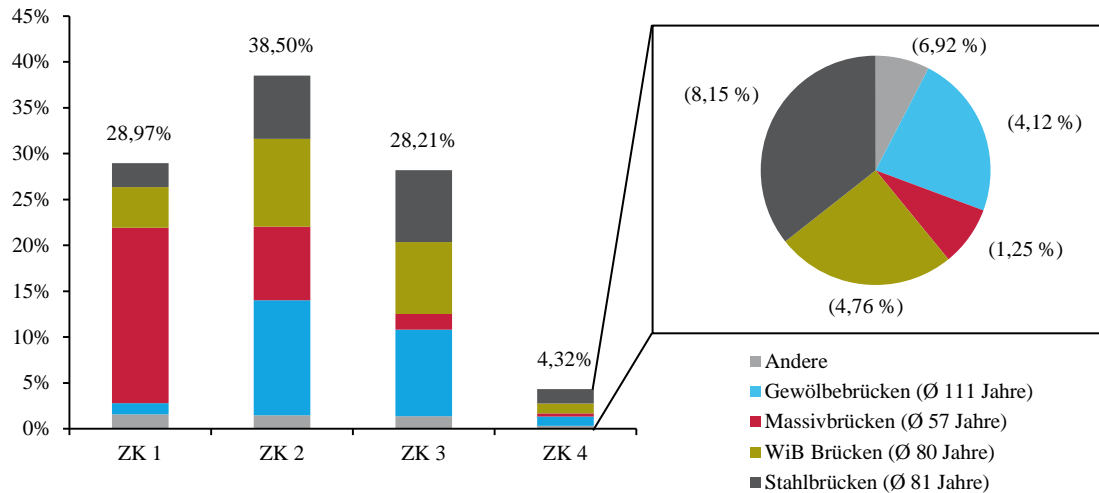


Bild 3: Zustand der Eisenbahnbrücken nach Bauwerksart im Jahr 2019 und prozentualer Anteil der jeweiligen Bauwerksart in ZK 4

Zusätzlich sind in Bild 3 rechts alle Eisenbahnbrücken der ZK 4, aufgeteilt nach Bauwerksart mit dem prozentualen Anteil der jeweiligen Bauwerksart dargestellt. Für Gewölbe-, Massiv- und WiB Brücken entsprechen die Anteile den zu erwartenden Werten bezüglich des Durchschnittsalters der Bauwerksart. Stahlbrücken bilden allerdings die Ausnahme und weisen einen doppelt so hohen Prozentsatz an Bauwerken in der schlechtesten ZK auf wie die ungefähr gleich alten WiB Brücken. Grund hierfür kann der beträchtliche Instandhaltungsbedarf für erforderliche Korrosionsschutz Erneuerungen sein, der nicht zwangsläufig durch die zur Verfügung stehenden Mittel für alle Brücken gedeckt werden kann und sich somit verzögert (Marx 2006).

4 ZUSTANDSENTWICKLUNG VON MASSIVBRÜCKEN

4.1 Allgemeines

Das übergeordnete Ziel der Datenauswertung ist das Bestimmen von funktionellen Zusammenhängen zwischen diversen Bauwerkseigenschaften und Zustandsbewertungen, um daraus resultierend Zustandsprognosen für Eisenbahnbrücken zu ermöglichen und damit das Instandhaltungsmanagement positiv zu beeinflussen. Im ersten Schritt erfolgt dafür die Betrachtung der Zustandsentwicklung unter verschiedenen Randbedingungen. Neben dem Bauwerksalter soll die maximale Stützweite, die Brückenfläche und das statische System von Eisenbahnbrücken der Kategorie Massivbrücken auf einen Einfluss bezüglich des Zustands überprüft und diskutiert werden.

Grundsätzlich werden alle der Kategorie Massivbrücken zugeordneten Brücken in die Auswertung einbezogen. Durch die fehlenden Informationen hinsichtlich durchgeführter und ggf. zustandsverbessernder Instandhaltungsmaßnahmen kann es jedoch vorkommen, dass Brücken entgegen ihres Alters einen vergleichsweise guten Zustand aufweisen. Hieraus folgt ein verfälschtes Bild der Zustandsentwicklung. Ohne die Informationen über durchgeführte Maßnahmen kann dieser Effekt nicht ausgeschlossen werden. Um diese Problematik zu umgehen, werden ausschließlich Brücken

betrachtet, welche seit dem Beginn der digitalen Zustandsaufzeichnung eine Zustandsverschlechterung bzw. ein zeitweises gleichbleiben der ZK aufweisen. Somit können zumindest Instandhaltungsprozesse, die zu einer Verbesserung der ZK geführt haben, ausgeschlossen werden. Insgesamt entfallen somit ca. 1050 Massivbrücken der Auswertung.

4.2 Zustandsentwicklung über das Bauwerksalter

Um eine Auswertung der Zustandsentwicklung über das Bauwerksalter vorzunehmen, muss zunächst für jedes Bauwerk das Alter zum Zeitpunkt der Inspektion bestimmt werden. Grundsätzlich erfolgt die Bestimmung anhand des Baujahrs des frühesten Bauteils. Einige Brücken sind im Laufe der Nutzungsdauer rekonstruiert worden, wodurch sich der Zustand i.d.R. verbessert hat. Das Alter dieser Brücken wird dann anhand des Rekonstruktionsjahrs ermittelt.

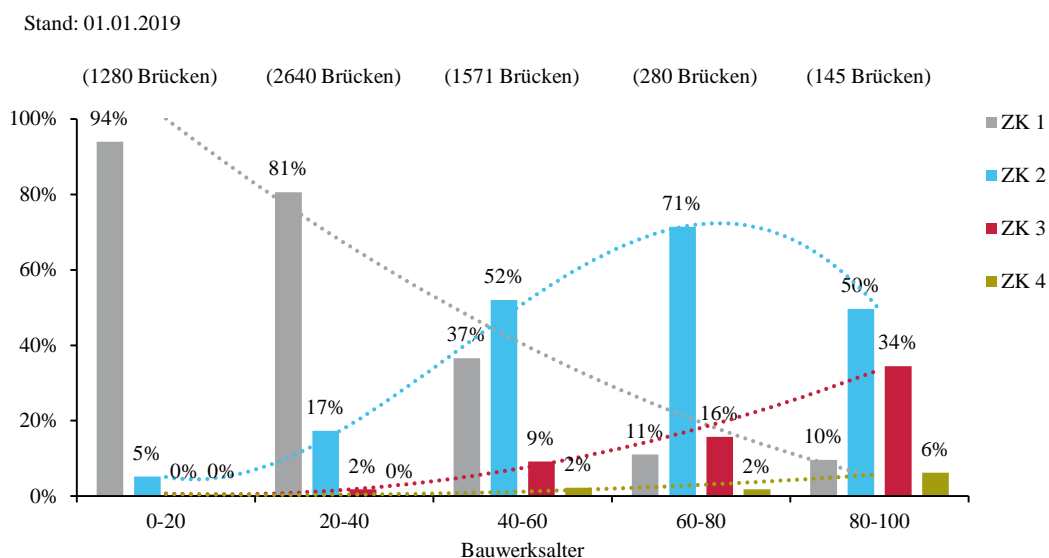


Bild 4: Prozentuale Aufteilung der Massivbrücken nach Zustandskategorie und Bauwerksalter

Bild 4 stellt die prozentuale Aufteilung der Massivbrücken in die einzelnen ZK in Bezug auf das Bauwerksalter in Schritten von 20 Jahren dar. Brücken mit einem Alter bis zu 20 Jahren sind mit nahezu dem gesamten Anteil der ZK 1 zugeordnet. In fast allen Fällen wird als Ergebnis der ersten und zweiten Begutachtung nach der Fertigstellung des Bauwerks die ZK 1 vergeben. Ebenfalls im nächsten dargestellten Zeitschritt befinden sich die Mehrheit aller Brücken in der ZK 1. Erst nach 40 Jahren kann ein deutlicher Abfall der Brücken in ZK 1 um knapp 45 % und ein Anstieg in ZK 2 um 35 % beobachtet werden. Generell ist ein Abfall der Anteile mit einer guten ZK und ein Anstieg der Anteile mit einer schlechten ZK mit dem Bauwerksalter deutlich erkennbar.

Ein Verlauf des Zustands über das Bauwerksalter für Massiv- und Stahlbrücken ist in Bild 5 dargestellt. Die durchgeführten Begutachtungen wurden auf das Alter der Brücke bezogen und die mittlere ZK in zehn Jahresschritten berechnet. Neben dem Verlauf der Durchschnittswerte ist zusätzlich noch die empirische Standardabweichung der Zustände aufgetragen und für eine Beurteilung von essenzieller Bedeutung.

Deutlich erkennbar ist der lange Verbleib von Massivbrücken in der ZK 1, bevor der Graph einen s-förmigen Verlauf annimmt und ein Abstieg in ZK 2 eintritt. Nach 110 Jahren erreichen Massivbrücken einen durchschnittlichen Zustand von 2,4. Hier ist allerdings zu beachten, dass nur Brücken in der

Statistik auftreten, die noch nicht zurückgebaut wurden. Bauwerke mit einer ZK 4 werden durch Ersatzneubauten ersetzt und gehen als junges Bauwerk mit einer besseren ZK wieder in die Auswertung mit ein. Unter den alten Bauwerken befinden sich dementsprechend lediglich langlebige Eisenbahnbrücken. Dadurch lässt sich der annähernd horizontale Verlauf mit zunehmenden Brückenalter erläutern. Weiterhin müssen Brücken mit einer schlechteren ZK häufiger Instandhaltungsmaßnahmen unterzogen werden, wodurch sich die ZK der Brücke i.d.R. nicht verschlechtert. Durch das Fehlen der Daten zu Instandhaltungsmaßnahmen kann dies als ein weiterer Grund für den horizontalen Verlauf angeführt werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die reale Zustandsentwicklung schlechter verhält, als sie in den Diagrammen dargestellt ist.

Die Streuung der Brückenzustände verhält sich erwartungsgemäß und steigt mit zunehmenden Alter bis zu einem Wert von 0,8 Zustandsnoten an.

Bei einem Vergleich mit den Stahlbrücken ist ein deutlich schnellerer Abfall in die ZK 2 ersichtlich. Bereits nach ca. 25 Jahren befinden sich die Stahlbrücken im Mittel in ZK 2. Allerdings beginnt der Graph für Stahlbrücken auch bei einem Durchschnittszustand von 1,4 im Gegensatz zu Massivbrücken mit einem Wert von 1,1. Dies bedeutet, dass in der ersten Begutachtung einer erbauten Stahlbrücke schon diverse Schäden aufgetreten sein könnten, sodass ein Großteil der Brücken einer schlechteren ZK zugeordnet wird. Die Streuung der ZK von Stahlbrücken bewegt sich nahezu durchgehend zwischen Werten von 0,6 und 0,7 Zustandsnoten. Bei beiden Streubändern fällt auf, dass auch ZK besser als 1 auftreten, obwohl dies theoretisch nicht möglich ist. Hintergrund hierfür ist die Annahme einer Normalverteilung und gleichen Standardabweichung um den Mittelwert herum in beide Richtungen. Eine Berechnung der Standardabweichung und der durchschnittlichen ZK erfolgte nur, wenn die Brückenanzahl für das entsprechende Bauwerksalter ausreichend groß war.

Stand: 01.01.2019

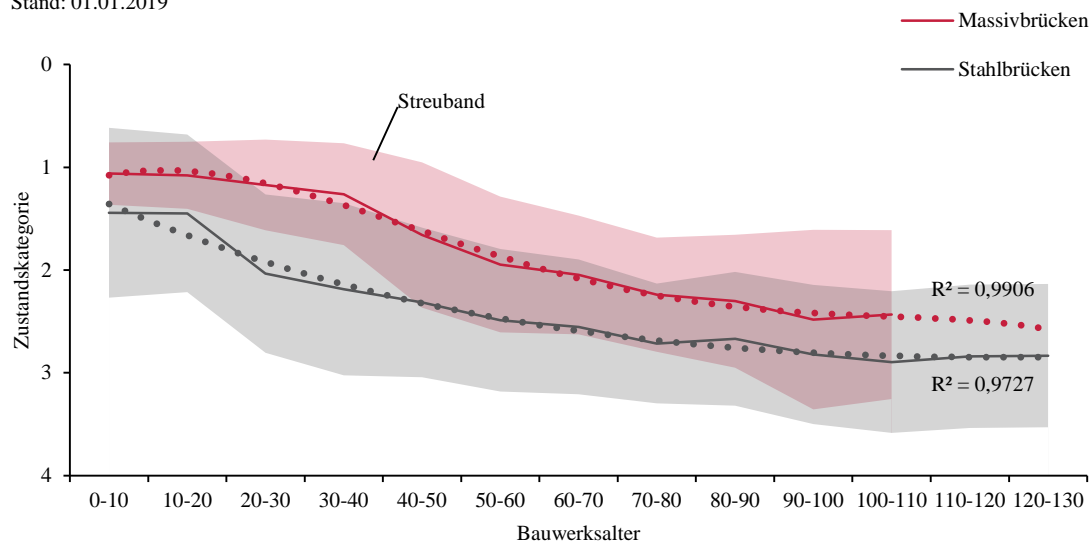


Bild 5: Zustandsentwicklung von Massiv- und Stahlbrücken über das Bauwerksalter

Das Anwenden einer linearen Regression zeigt, dass die Zustandsentwicklung von Massivbrücken mit einer Bestimmtheit von 0,95 einen deutlich ausgeprägteren linearen Zusammenhang aufweist als die Stahlbrücken mit einer Bestimmtheit von lediglich 0,53. In Bild 5 wurden zwei nichtlineare Regressionsfunktionen gewählt, die mit einer möglichst großen Bestimmtheit die Zustandsentwicklung abbilden. Es ist ersichtlich, dass die Zustandsentwicklung der Massivbrücken einer anderen Form folgt als die der Stahlbrücken. Beide Bauwerksarten scheinen allerdings ab einem Bauwerksalter von ca. 90

Jahren in ihrem Verlauf zu stagnieren. Dies kann an durchgeführten Maßnahmen liegen, die den Zustand zwar nicht verbessern, allerdings für ein Verbleiben des Bauwerks in der aktuellen ZK sorgen oder wie oben angeführt an der Erneuerung von Bauwerken mit der ZK 4 liegen.

Generell ist anhand der Zustandsentwicklungen beider Bauwerkskategorien ein Einfluss des Bauwerksalters auf den Zustand erkennbar und muss in möglichen Prognoseansätzen berücksichtigt werden.

In einer näheren Betrachtung sollen ebenfalls die einzelnen in der Kategorie Massivbrücken enthaltenen Bauwerksarten (Stahlbeton-, Spannbeton- und Rahmenbrücken) untersucht werden. Für zuverlässige Aussagen über Fertigteilbrücken ist die Anzahl der dafür zugrundeliegenden Daten (71 Brücken) zu gering.

Stahlbetonbrücken zeigen im Gegensatz zu den beiden anderen Bauwerksarten eine schlechtere Zustandsentwicklung. Als beste aber auch im Mittel jüngste Bauwerksart verhalten sich hinsichtlich des Zustands die Rahmenbrücken. Spannbetonbrücken verbleiben zwar ähnlich lange wie Rahmenbrücken in der ZK 1, verfallen aber schneller in schlechtere Zustände ab. Der leichte Anstieg für Spannbetonbrücken in den ersten 20 Jahren lässt sich mit der Brückenanzahl begründen, die für den ersten Zeitschritt nur ein Drittel der Anzahl des zweiten Zeitschritts beträgt.

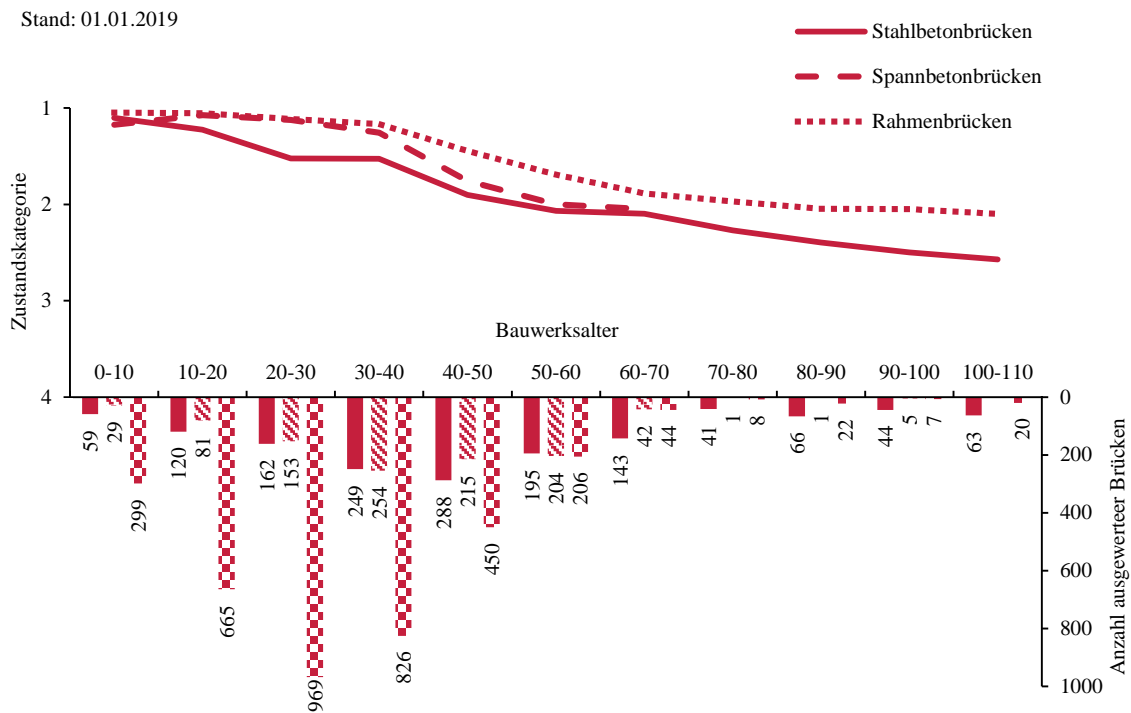


Bild 6: Zustandsentwicklung von Stahlbeton-, Spannbeton- und Rahmenbrücken

4.3 Zustandsentwicklung in Abhängigkeit der maximalen Stützweite und der Brückenfläche

Nach der festgestellten Abhängigkeit des Brückenzustands von dem Bauwerksalter soll der Einfluss der Stützweite geprüft werden. Im Allgemeinen ist der Brückenbestand der DB AG von Brücken mit geringer und mittelweiter Stützweite geprägt. Nahezu 90 % aller Eisenbahnbrücken in Deutschland besitzen eine maximale Stützweite von weniger als 20 m. Eine ähnliche prozentuelle Verteilung gilt für Massivbrücken. Für die Auswertung werden die Massivbrücken entsprechend ihrer maximalen Stützweite zunächst kategorisiert.

- $L \leq 10$ m (3781 Brücken – 63,30 %)
- $10 \text{ m} < L \leq 20$ m (1414 Brücken – 23,67 %)
- $20 \text{ m} < L \leq 30$ m (524 Brücken – 8,77 %)
- $L > 30$ m (254 Brücken – 4,25 %)

In Bild 7 ist der Zustand jeder Brücke der Kategorie Massivbrücken als Punkt mit seiner maximalen Stützweite aufgetragen. Es ist deutlich ersichtlich, dass keinerlei Korrelation zwischen der maximalen Stützweite und der Zustandskategorie besteht. Dies hängt vielmehr damit zusammen, dass hier der Einfluss des Bauwerksalters vollkommen vernachlässigt wird, und dieser einen maßgeblichen Effekt auf den Brückenzustand besitzt. Deshalb wird die maximale Stützweite zusätzlich in Kombination mit dem Bauwerksalter unter Berücksichtigung der Stützweitenklassen untersucht.

Stand: 01.01.2019

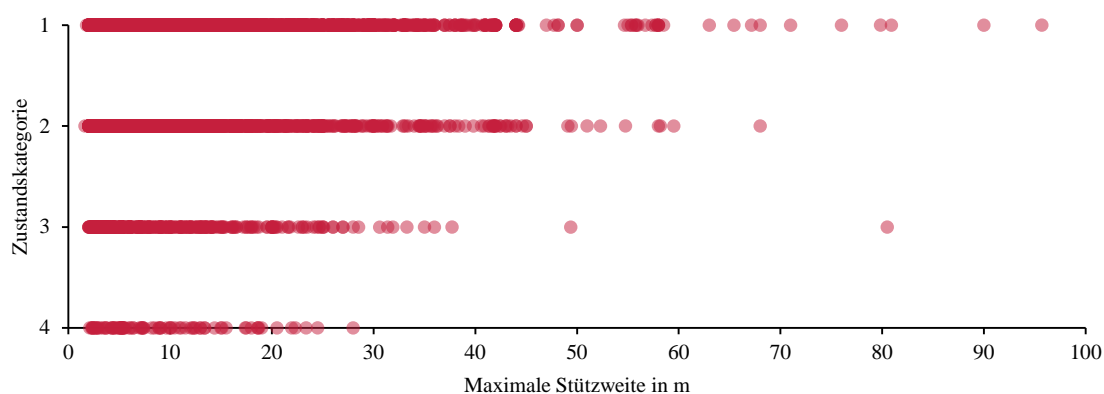


Bild 7: Korrelation zwischen Zustandskategorie und maximaler Stützweite von Massivbrücken

Bild 8 zeigt die Entwicklung des Zustands der oben kategorisierten Stützweiten. Bis zu einem Alter von ca. 45 Jahren ist ein ähnliches Verhalten aller Stützweitenklassen zu sehen. Die Zustandsentwicklung von Brücken mit Stützweiten von weniger als 10 m verläuft weiterhin nahezu linear, während die Zustandsverläufe der längeren Brücken einen parabelförmigen Abfall andeuten. Eine Begründung hierfür kann in der Brückenbewertung liegen. Das schlechteste Bauwerksteil definiert die ZK einer Brücke und mit steigender Stützweite kann auch die Anzahl der Bauwerksteile steigen, wodurch sich wiederum die Wahrscheinlichkeit erhöhen kann, dass ein Bauwerksteil eine schlechte ZK besitzt und sich somit auf das Gesamtbauwerk auswirkt. Die Zustandsentwicklung der Brücken mit Stützweiten zwischen 10 m und 20 m nähern sich ab einem Alter von 55 Jahren wieder deutlich mehr dem Zustandsverlauf der kurzen Brücken an. Um diese Tatsache für größere Stützweiten bestätigen zu können, fehlt die Datenmenge langer Brücken in einem fortgeschrittenen Alter. Insgesamt hat die Stützweite keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Zustandsentwicklung der Ingenieurbauwerke, bzw. kann für die fortgeschrittenen Brückenalter nicht abschließend bewertet werden.

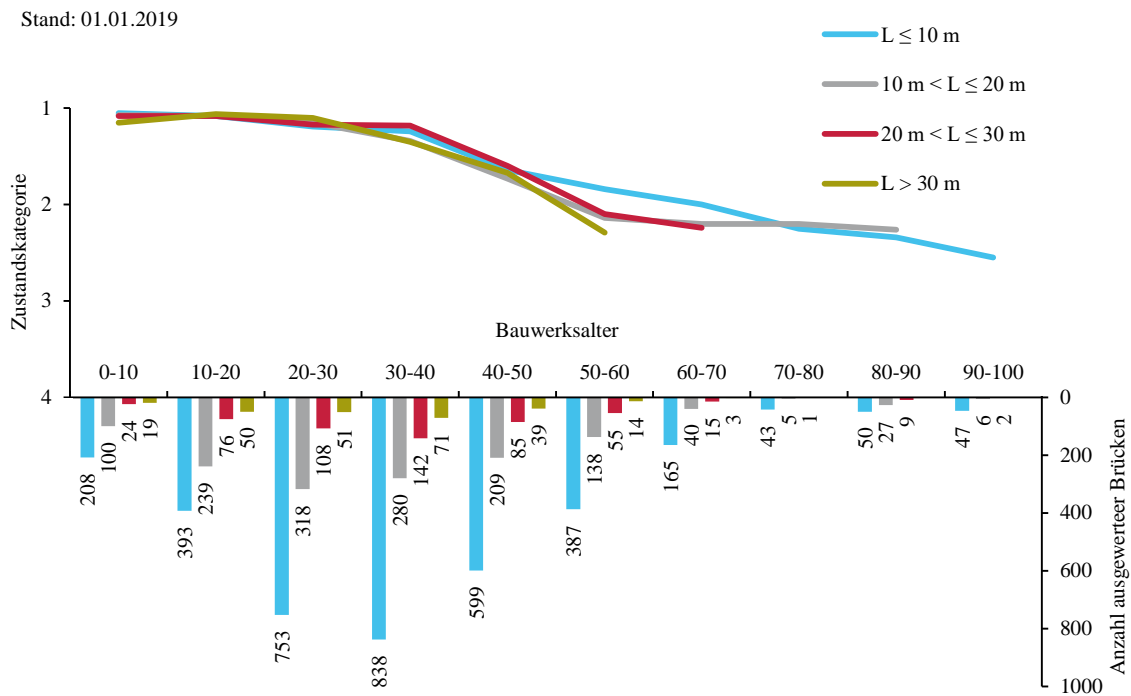


Bild 8: Zustandsentwicklung von Massivbrücken in Abhängigkeit der maximalen Stützweite

Da i.d.R mit einer zunehmenden maximalen Stützweite auch die Fläche einer Brücke zunimmt, soll als weitere Randbedingung der Einfluss der Brückenfläche auf den Zustand beurteilt werden. Der für die Untersuchung dieser Randbedingung zugrundeliegende Gedanke beruht auf der Annahme, dass sich mit größerer Oberfläche der Brücke potentiell auch die „Angriffsfläche“ für Schäden vergrößert und somit den Zustand der Brücke negativ beeinflussen können.

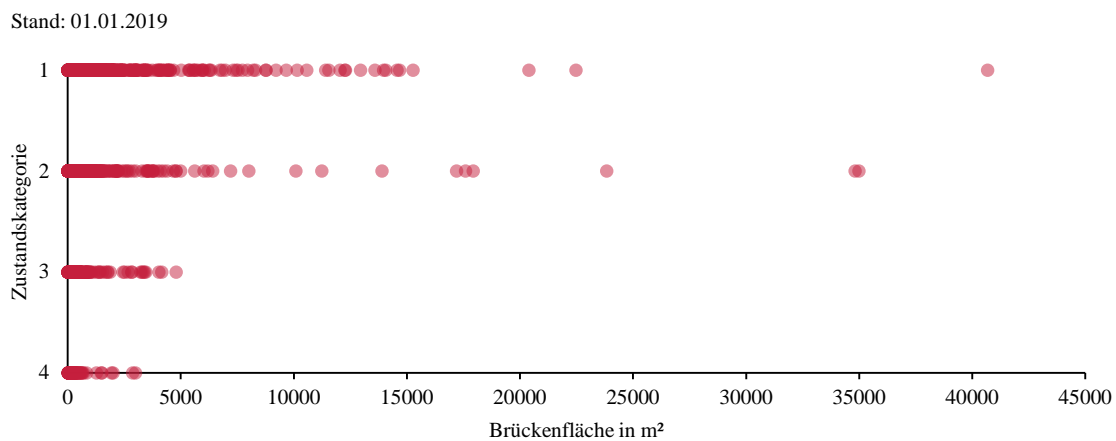


Bild 9: Korrelation zwischen Zustandskategorie und Brückenfläche für Massivbrücken

Allerdings wird bereits aus Bild 9 keine direkte Abhängigkeit zwischen Brückenfläche und Brückenzustand ersichtlich. Für die Darstellung der Zustandsentwicklung sind die Massivbrücken in vier Kategorien hinsichtlich der Brückenfläche eingeteilt worden. Auch bei der Zustandsentwicklung in Bild 10 lassen sich keine klaren Rückschlüsse auf die Abhängigkeit der Randbedingung ziehen.

Lediglich Massivbrücken mit einer Fläche von weniger als 100 m² zeigen eine leicht bessere Zustandsentwicklung.

Stand:01.01. 2019

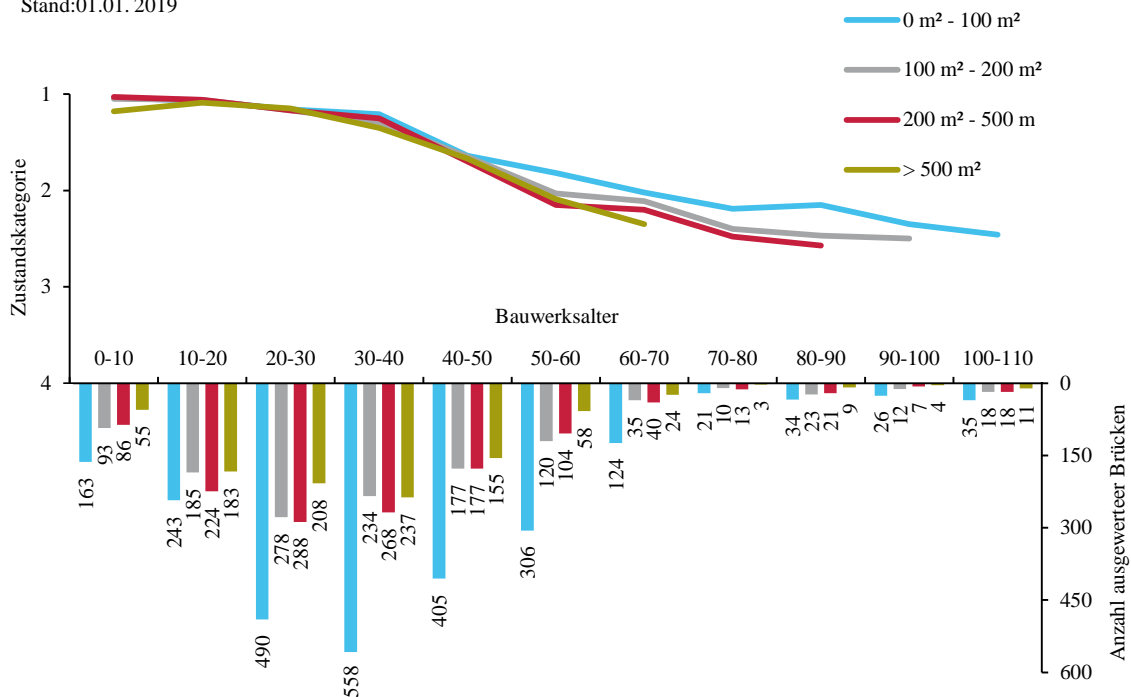


Bild 10: Zustandsentwicklung von Massivbrücken in Abhängigkeit der Brückenfläche

4.4 Zustandsentwicklung in Abhängigkeit vom statischen System

Als ein weiteres wichtiges Merkmal von Brücken ist das statische System anzusehen. Der Bestand an Massivbrücken kann zu ca. 90 % durch die drei statischen Systeme des Rahmens, des Einfeldträgers und des Durchlaufträgers abgebildet werden. Die zu untersuchende Abhängigkeit der Zustandsentwicklung von dem statischen System wird demnach nur an den maßgebenden drei durchgeführt. Hierbei wurde für Brücken mit mehreren Überbauten immer das überwiegend vorkommende statische System als Merkmal der Brücke verwendet.

Nachfolgend sind in Bild 11 die mittlere ZK der drei statischen Systeme als Kreuz und die dazugehörige empirische Standardabweichung aufgezeigt. Rahmen als statisches System zeigen deutlich die beste ZK sowie die geringste Standardabweichung im Gegensatz zu Durchlauf- und Einfeldträgern. Ob ein Einfluss auf die ZK besteht, kann allerdings nicht direkt aus diesen Werten abgeleitet werden, da Rahmen im Mittel deutlich jünger als Einfeldträger sind.

Stand: 01.01.2019

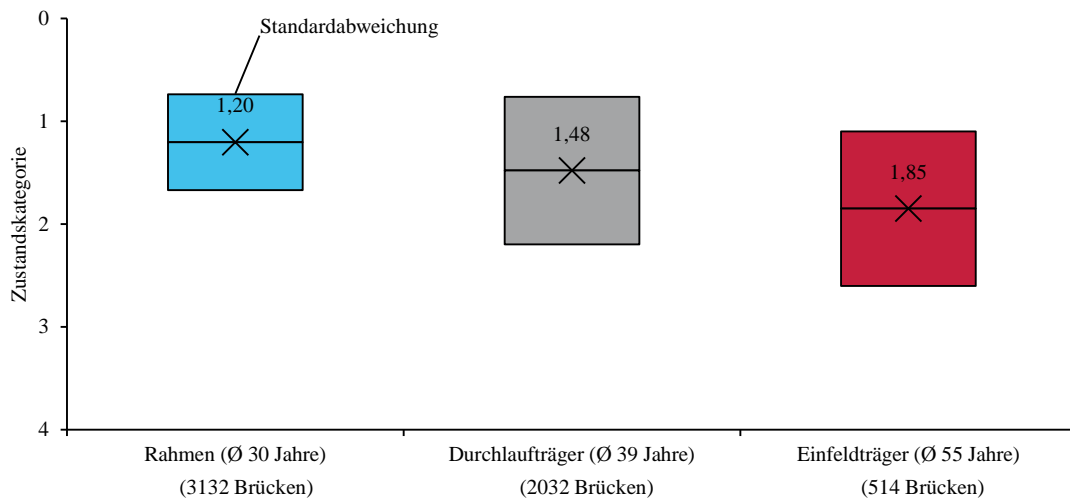


Bild 11: Durchschnittliche ZK und empirische Standardabweichung in Abhängigkeit des statischen Systems für Massivbrücken

Aus der Zustandsentwicklung in Bild 12 ist erkennbar, dass sowohl Rahmen als auch Durchlaufträger länger in einer besseren ZK verweilen als Einfeldträger. Der Zustand von Einfeldträgern verschlechtert sich schneller und zeigt insgesamt einen annähernd linearen Verlauf. Rahmen und Durchlaufträger verweilen ca. 35 Jahre in der ZK 1 bevor ein Abfall beginnt, wobei Durchlaufträger früher in ZK 2 wandern als Rahmen. Insgesamt können die Zustandsentwicklungen der Rahmen und Durchlaufträger mit nichtlinearen Funktionen beschrieben werden. Abschließend kann der Einfluss des statischen Systems auf die Zustandsentwicklung bestätigt werden und muss somit als ein Parameter in die Zustandsprognose einfließen.

Stand: 01.01.2019

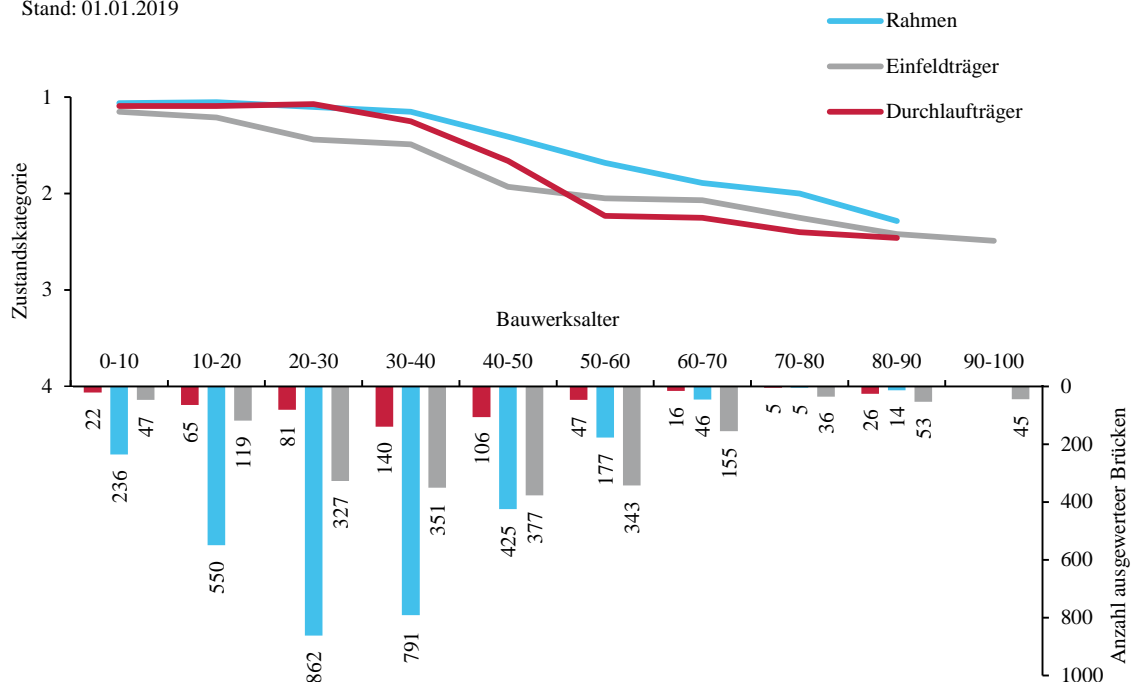


Bild 12: Zustandsentwicklung von Massivbrücken in Abhängigkeit des statischen Systems

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Grundsätzlich gilt es die Frage zu beantworten, ob aus den zugrundeliegenden Bestandsdaten ein funktioneller Zusammenhang hergestellt werden kann, der flächendeckend eine Vorhersage des Brückenzustands für eine Konstellation von Randbedingungen erlaubt.

Die Abhängigkeiten zwischen der Zustandsentwicklung und einigen Randbedingungen von Brücken sind in Kapitel 4 mithilfe von einfachen Methoden wie Korrelationsuntersuchungen oder Regression getrennt voneinander geprüft worden. Hinsichtlich einer Zustandsprognose haben sich bei diesen Untersuchungen nur wenige Parameter ergeben, die direkt als Indikator miteinbezogen werden können, wodurch sich nur bedingt eine Übertragbarkeit von Referenzbauwerken auf den Gesamtbestand von gleichen Bauwerksarten feststellen lassen konnte. Brücken mit den gleichen untersuchten Randbedingungen verhalten sich zum Teil sehr unterschiedlich, was die Individualität der Bauwerke unterstreicht. Resultierend daraus kann geschlossen werden, dass neben den Bauwerkeigenschaften weitere Daten wie zum Beispiel Schäden, Verkehrs-, Wetterdaten oder Normenstände mit berücksichtigt werden sollten. Um die zugrundeliegende Fragestellung beantworten zu können, ist es notwendig eine Vielzahl an Kombinationen von Bauwerksdaten zu untersuchen, was sich mit den in Kapitel 4 durchgeführten Methoden als schwer und mühselig gestaltet. Allgemein kann aus den dargestellten Auswertungen keine eindeutige Aussage abgeleitet werden, dass die Prognose von Brücken aus der Betrachtung von historischen Daten ohne weiteres möglich ist.

Die angewendeten Ansätze erscheinen als unpassend für das Aufstellen von Prognosemodellen, da die Zusammenhänge zwischen dem Zustand und den Randbedingungen der Brücke nichtlinear zu sein scheinen. Wie bei vielen Systemen bestehen die Daten aus einer Mischung von vorhersagbaren Komponenten und Zufallskomponenten. Für die Lösung von komplexen Prognoseproblemen mit vielen Variablen sind vor allem Methoden aus dem Bereich des Machine-Learnings geeignet, da sie die Fähigkeit besitzen nichtlineare Zusammenhänge zu erkennen. Weitere Untersuchungen mit diesen Methoden sind geplant. Ziel bei dieser Anwendung ist einerseits die Bestimmung der Wichtigkeit der Parameter (Merkmale) und darauf aufbauend das Erstellen einer zuverlässigen und bauwerksübergreifenden Prognose.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts DiMaRB sollen die Methoden auf den Datenbestand der DB AG angewandt werden. Dieses Vorgehen wird als datengestützte Zustandsprognose bezeichnet, ein datenfreier Ansatz wäre die Prognose von Brückenschäden über die Zeit anhand von physikalischen Modellen (Schneider et al. 2015). Hierfür sind vor allem im Bereich der Massivbrücken die Schädigungsmodelle sehr ausgereift und können durch ein Monitoring unterstützt werden, um die Prognosen zu verbessern (Schacht et al. 2019). Über die Definition von Grenzwerten können dann Brückenzustände automatisiert vergeben werden und somit Brückenbewertungen stattfinden. Auch dieser Ansatz wird im DiMaRB verfolgt. Eine Kombination beider Ansätze kann eine Verbesserung der Prognose bedeuten. Das neue prädiktive Instandhaltungskonzept verfolgt das Ziel, dass im besten Fall nur noch Brücken mit einer ZK 1 auftreten, wo prognostizierte Schäden sofort behoben werden. ZK 4 kann nach dem Konzept nur infolge externer Einwirkungen (z.B. Anprall) hervorgerufen werden.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch die Förderungsmaßnahme mFund des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur sowie bei der DB AG und dem Eisenbahn-Bundesamt für die Beteiligung an dem Projekt. Ein besonderer Dank gilt zusätzlich der DB AG für die Bereitstellung der Bestandsdaten zu den sich im Eisenbahnnetz befindenden Brücken.

LITERATUR

„Brücken-App“, DB Netze AG.

DB Netz AG, Richtlinie 804.800x - Inspektion von Ingenieurbauwerken, 2011.

Marx, S. (2006): Die Bestandsbrücken der Bahn – eine Jahrhundertaufgabe, In: Stritzke, J. (Hrsg.), 16. Dresdner Brückenbausymposium, Technische Universität Dresden, Dresden, S. 111-124.

Rossberg, R. R. (1999): Geschichte der Eisenbahn, Sigloch-Ed., Künzelsau.

Schacht, G., Käding, M., Bolle, G. & Marx, S. (2019): Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr, Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 2, S. 85-94.

Schneider, R., Fischer, J., Straub, D., Thöns, S., Bügler, M. & Borrmann, A. (2015): Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells, Carl Schünemann Verlag GmbH, Bergisch Gladbach.