

Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 170

bast

Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken

Praxisbericht zum Pilotprojekt

von

Frank Ansorge

Stefan Franz

Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin

Patrick Düren-Rost

Institut Feuerverzinken GmbH, Düsseldorf

Heinz Friedrich

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach

Mark Huckshold

Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V. (GAV), Düsseldorf

Peter Lebelt

Institut für Korrosionsschutz, Dresden

Dennis Rademacher

ArcelorMittal, Luxemburg

(ehemals Technische Universität Dortmund)

Dieter Ungermann

Lehrstuhl für Stahlbau, Technische Universität Dortmund

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 170

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 2215005
Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz
für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Referat
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-4-95606-598-9

Bergisch Gladbach, Juli 2021

Kurzfassung – Abstract

Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Im Sommer 2016 wurde Deutschlands erste Verbundbrücke mit feuerverzinkten Stahlträgern in der Baulast der Bundesfernstraßenverwaltung errichtet. Das Bauwerk befindet sich in Nordhessen und ist ein Überführungsbauwerk für einen Wirtschaftsweg im ländlichen Raum über den derzeit in Realisierung befindlichen Neubau der A 44 zwischen Kassel und Herleshausen (A 4).

Die Motivation für dieses Pilotprojekt rührt aus dem im letzten Jahrzehnt spürbar gewachsenen Antrieb, allorten nachhaltige und ressourcen- sowie umweltschonende Prozesse zu etablieren und diesen auf Grundlage von Lebenszyklusbetrachtungen den Vorzug vor auf kurze Sicht scheinbar kostengünstigeren Anschaffungen zu geben. Gerade bei besonders langlebigen Anschaffungen wie Bauwerken der Infrastruktur entfallen deutlich höhere Kosten auf den Betrieb und die Unterhaltung als auf die anfängliche Herstellung. Die größten Kosten resultieren dabei aus mittelbar nötigen Aufwendungen wie z. B. Verkehrsführungen während Bauwerkssanierungen und zwischenzeitlich erforderlichen Runderneuerungen der Bauwerkssubstanz oder exponierter Teile davon (Beläge, Kappen, Lager, Fahrbahnübergänge, Korrosionsschutz). Können diese Bauteile oder Bauelemente dauerhafter hergestellt werden oder gar ganz entfallen, sind langfristige Einsparungen zu erwarten, die sogar höhere Anschaffungskosten rechtfertigen.

In mehreren Forschungsvorhaben wurden die Eignung eines Korrosionsschutzes durch Feuerverzinken auch für tragende Bauteile von Brücken, dessen Dauerhaftigkeit auch für Zeiträume in der Größenordnung der Lebensdauer des Bauwerks selbst und dessen Wirtschaftlichkeit nachgewiesen. Auf dieser Grundlage wurde frühzeitig die Entwurfsplanung dreier nahezu baugleicher und benachbart gelegener Bauwerke auf die Realisierung eines Pilotprojektes an einem der Bauwerke ausgerichtet, während die beiden anderen als Referenzbauwerke konventionell hergestellt und beschichtet wurden.

Das Pilotprojekt zielt darauf ab, an einem realen Bauwerk einerseits Erfahrungen bei der konkreten Umsetzung zu sammeln, die Besonderheiten im

Herstellprozess herauszuarbeiten und zu bewerten, um sie ggf. in künftigen Regelwerken zu verarbeiten, und andererseits im direkten Vergleich mit den Nachbarbauwerken Erfahrungen im weiteren Betrieb sammeln zu können.

Der hier vorliegende Bericht möge dem interessierten Leser einen tiefen Einblick in die vielfältigen Aspekte geben, denen bei der Realisierung einer feuerverzinkten Konstruktion Beachtung zu schenken ist. Er soll sowohl Bauherren als auch Planern und Ausführenden einen im Wesentlichen an der Chronologie der Maßnahme orientierten roten Faden bieten. Die aufgeführten Gesichtspunkte treten mitunter im Kontext mehrerer Themenkreise auf, daher sind einzelne Wiederholungen bewusst nicht vermieden.

Die wesentlichen Aspekte werden abschließend noch einmal zusammengestellt. Diese und die vielen kleinen Gesichtspunkte sollten bei künftigen Projekten in einer frühen Phase und in dem konkreten Projektkontext bewertet werden und zu projektspezifischen Entscheidungen führen.

Aufgrund des großen Potenzials sind die Forschungen fortgesetzt und z. B. auf andere Fügetechniken ausgedehnt worden. Die Ergebnisse werden erwartungsgemäß das Einsatzgebiet der Feuerverzinkung als kostengünstigen, langlebigen und recyclebaren Korrosionsschutz im Verbundbrückenbau erweitern.

Hot-dip galvanizing as long-lasting corrosion protection for steel composite bridges - practical report on the pilot project

In summer 2016, Germany's first composite bridge with hot-dip galvanized steel girders was built under the authority of the Federal Highway Administration. The structure is located in northern Hessen leading an agricultural road across the new A44 motorway between Kassel and Herleshausen (A4), which is currently being built.

The motivation for this pilot project comes from the noticeably growing demand, to establish sustainable and resource- and environmentally-friendly processes and to give them preference over initially more cost-effective purchases on the basis of life cycle considerations. Especially in the case of

particularly long-lasting acquisitions such as infrastructure buildings, the costs of operation and maintenance are significantly higher than the production costs. The highest costs result from indirectly necessary expenditures, such as traffic routing during rehabilitation and renewal of structures or exposed parts of it (pavements, caps, bearings, transitions, corrosion protection) that may be required in the meantime. If these components or structural elements can be built more durably or even eliminated altogether, long-term savings can be expected that even justify higher acquisition costs.

In several research projects, the suitability of corrosion protection by hot-dip galvanizing were demonstrated: also, for load-bearing components of bridges, its durability for periods in the magnitude of the service life of the structure itself, and its cost-effectiveness. On this basis, the design of three almost identical and adjacent structures was focused at an early stage on the realization of a pilot project on one of the structures, while the other two were built and coated conventionally as reference structures.

The pilot project aims both a) to gain experience in the actual implementation of a real structure, to work out and evaluate the specific characteristic of the manufacturing and construction process for incorporation in future regulations if necessary, and b) to gain experience during operation by direct comparison with the neighboring structures.

This report is intended to give the interested reader an in-depth insight into the many aspects that need to be considered when realizing a hot-dip galvanized structure. It is intended to provide clients, planners and contractors with a guide that is generally following the chronology of the project. The aspects listed sometimes occur in the context of several topics, so individual repetitions are deliberately not avoided.

Finally, the most important aspects are summarized. These and the many smaller aspects should be evaluated in future projects at an early stage and in the particular project context, and should lead to project-specific decisions.

Due to the great potential, the research has been continued and e.g. extended to other joining techniques. The results are expected to expand the field of application of hot-dip galvanizing as a cost-effective, durable and recyclable corrosion protection in composite bridge construction.

1 Inhalt

1	Einleitung	7	4.5.2	Bemessungsrelevante Besonderheiten bei der Feuerverzinkung	15
1.1	Allgemein	7	4.6	Randbedingungen der Örtlichkeit	16
1.2	Forschungsprojekt Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau (FOSTA P835)	7	4.7	Montagekonzept	16
1.3	BAST Projekt B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken	8	5	Zustimmung im Einzelfall	17
1.4	Forschungsprojekt Herstellen von reparaturfähigen Feuerzinküberzügen (EURONORM MF130088)	9	6	Ausschreibung und Vergabe	18
1.5	Pilotprojekt	9	6.1	Allgemein	18
1.6	Vergleichsbauwerk	10	6.2	Ausführende Unternehmen	18
2	Ziel und Aufgabenstellung	10	6.3	Auswahl der Feuerverzinkerei	18
3	Relevante Informationen zum Feuerverzinkungsprozess	11	7	Konstruktion und Ausführungsplanung	18
3.1	Verfahren	11	7.1	Planung, Konstruktion, Fertigung.....	18
3.1.1	Allgemein	11	7.2	Profile der Hauptträger.....	18
3.1.2	Zinkannahme	11	7.3	Materialwahl.....	18
3.1.3	Temperaturmanagement und Verweildauer im Zinkbad	12	7.4	Einstufung nach DAST-Richtlinie 022	19
3.2	Verformungen	12	7.5	Oberflächenvorbereitung	19
3.2.1	Temperaturverteilung beim Tauchen	12	7.6	Schweißtechnische Verarbeitung.....	19
3.2.2	Abbau von Eigenspannungen	12	7.7	Freischnitte / Durchflussöffnungen	20
3.2.3	Temperaturverteilung beim Abkühlen.....	12	7.8	Anschlagpunkte	20
3.2.4	Richten nach dem Feuerverzinken	13	8	Arbeitsproben	21
3.3	Größen der Zinkbäder / Hebezeuge	13	8.1	Allgemein	21
4	Entwurfsplanung des Pilotbauwerks	13	8.2	Abdecklack im Bereich der Baustellenschweißstöße	21
4.1	Allgemein	13	8.3	Schichtdicke der Feuerverzinkung	22
4.2	Profile und Stahlwerkstoffe der Hauptträger . 14		8.4	Einfluss des Brennschnitts.....	23
4.3	Bauteilabmessungen und Einzelgewichte 14		8.5	Thermisches Spritzen mit Zink.....	24
4.4	Lage der Stöße	15	8.6	Porenschließende Versiegelung	25
4.5	Bemessungskonzept.....	15	9	Ausführung / Dokumentation	25
4.5.1	Normative Regelungen	15	9.1	Baustelle	25
			9.2	Ergebnisdokumentation	26
			9.2.1	Stahlwerkstoff.....	26
			9.2.2	Feuerverzinkung	26
			9.2.3	Rissprüfung	27

9.2.4	Verformungen / Richten	27
9.2.5	Schichtdickenmessungen	28
9.2.6	Thermisch gespritzte Flächen	29
9.2.7	Langzeitüberwachung	29
9.3	Kosten / Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	29
10	Empfehlungen für zukünftige Anwendungen	30
11	Zusammenfassung	33
12	Ausblick	34
	Literatur	35
	Bilder	36

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Trotz ihrer gegenüber dem Gesamtbestand vergleichsweise geringen Anzahl sind Stahl- und Stahlverbundbrücken wichtige Komponenten der Verkehrsinfrastruktur (Bild 1). Die Vorteile des Werkstoffs Stahl kommen im Brückenbau bislang vor allem dann zur Geltung, wenn besondere Herausforderungen zu meistern sind, wie große Spannweiten, geringe Bauhöhen oder kurze Bauzeiten. Aber auch stützenfreie Überführungsbauwerke über zweibahnigen Verkehrswegen sind aus betrieblicher Sicht interessant und besonders schlank und elegant als Stahlverbundkonstruktion zu realisieren.

Neuere Forschungsergebnisse zeigen, dass sich mit dem Baustoff Stahl auch bei kleinen und mittleren Spannweiten nachhaltige und – über den Lebenszyklus betrachtet – kostengünstige Bauwerkslösungen realisieren lassen. Allerdings müssen Stahlbauteile vor Korrosion geschützt werden, um eine ausreichende Nutzungsdauer zu gewährleisten. Hierfür haben sich vor allem organische Beschichtungen und die Feuerverzinkung als geeignete Maßnahmen bewährt.

Bei Brücken- und Ingenieurbauten im Zuge von Bundesfernstraßen beschränkte sich der Einsatz von feuerverzinkten Bauteilen bislang auf Verkehrszeichenbrücken, passive Schutzeinrichtungen und Komponenten der Brückenausstattung, wie z. B. Fahrbahnübergänge und Geländer. Im Sommer 2016 wurde Deutschlands erste Verbundbrücke als Wirtschaftsweg-Überführungsbauwerk über die A 44 (Bild 2) mit feuerverzinkten Stahlträgern errich-

tet. Die dabei gesammelten Erfahrungen sind Gegenstand dieses Berichts.

1.2 Forschungsprojekt Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau (FOSTA P835)

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung und Bereitstellung der grundlegenden wissenschaftlich und technisch erforderlichen Erkenntnisse zur grundsätzlichen Anwendung der Feuerverzinkung im Stahl- und Verbundbrückenbau.

Die Basis hierfür waren Versuche zur Ermüdungsfestigkeit an für den Brückenbau typischen Kerbdetails im feuerverzinkten Zustand, teilweise ergänzt durch Vergleichsproben im unverzinkten Ausgangszustand. Des Weiteren war es erforderlich, den Korrosionsschutznachweis für die Feuerverzinkung und deren Reparaturtechnologie durch thermisch gespritzten Zinküberzug an Transport- und Montage Schäden für die angestrebte Nutzungsdauer des Bauwerks von 100 Jahren zu erbringen. Basis hierfür waren sowohl eine Literaturlauswertung als auch diverse Versuche zu Schutzdauer, Vorbehandlungsmethoden und Ausführungsvarianten.

Die vorgenannten Arbeiten unter dem Titel: „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau“ [1] wurden durch das IGF-Vorhaben 351/ZBG der Forschungsvereinigungen FOSTA (Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.), GAV (Gemeinschaftsausschuss Verzinken e. V.) und DASt (Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt e. V.) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen

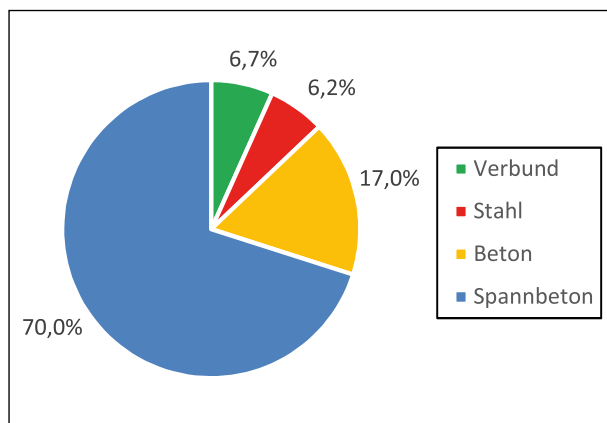


Bild 1: Brücken an Bundesfernstraßen, Brückenflächen nach Bauweisen, (2020) (BASt)



Bild 2: Feuerverzinkte Stahlverbundbrücke über die A 44 bei Bischhausen (IFG)

des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und 2014 abgeschlossen.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Feuerverzinkung einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, der auch teilweise zu einer Abminderung der Detail-Kategorien für den Nachweis gegen Werkstoffermüdung führt. Die Ursachen dafür konnten in der Ausbildung des Zinküberzugs identifiziert werden (s. Kapitel 4.5.2). Vergleichsberechnungen für Brücken kleinerer und mittlerer Spannweiten zeigen jedoch keine oder nur eine geringe Veränderung der Konstruktionsgewichte. Der Nachweis für eine Korrosionsschutzdauer von 100 Jahren - das entspricht der Nutzungsdauer der Brücke - konnte für die feuerverzinkten (stückverzinkten) Bauteile (in der Korrosivitätskategorie C4) erbracht werden. Die theoretische Korrosionsschutzdauer von bis zu 100 Jahren ist mit gewissen Einschränkungen auch für die spritzverzinkten Ausbesserungsstellen an Montageschweißstößen realistisch. Die ganzheitliche Betrachtung der Bau- und Instandhaltungskosten zeigt letztlich die entscheidenden Vorteile der Feuerverzinkung im Lebenszyklus von Brückentragwerken [1 - 4].

1.3 BASt Projekt B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Wenn bei einer verzinkten Brücke die Korrosionsschutzdauer in der gleichen Größenordnung liegt, wie die Nutzungsdauer des Bauwerks, wird während des Betriebs planmäßig keine Erneuerung des Korrosionsschutzes erforderlich. Alle damit im Zusammenhang stehenden Kosten und Verkehrseinschränkungen entfallen. Um den Nutzen gegenüber den Kosten für einen so hochwertigen Korrosionsschutz quantifizieren zu können, wurde das BASt-Projekt „Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken“ initiiert und durchgeführt [8]. Im Folgenden ist die Kurzfassung des Schlussberichts aus dem Jahre 2015 mit den wichtigsten Ergebnissen dargestellt:

Am Beispiel einer real ausgeführten Verbundbrücke als Referenzbauwerk wurden im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse drei Varianten des Korrosionsschutzes untersucht. Über den gesamten Lebenszyklus dieser integralen Autobahnüberführung wurde eine Ökobilanz erstellt, die Lebenszyklus-

kosten sowie die externen Effekte (Umweltwirkungen aus Fahrzeugbetrieb, Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten) ermittelt und für die drei Varianten verglichen. Dabei wurde eine herkömmliche organische Beschichtung (Variante A), die während des Lebenszyklus zweimal erneuert wird, mit einer Feuerverzinkung (Variante B) verglichen. Betrachtet wurde als weitere Variante in den Analysen eine Feuerverzinkung, bei der nach 66 Jahren das Aufbringen einer zusätzlichen organischen Beschichtung erfolgt (Variante C).

Im Rahmen der Ökobilanz wurden sechs Wirkungskategorien ausgewiesen. Bei Ausführung der Feuerverzinkung ergaben sich Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus im Vergleich zur organischen Beschichtung. Die Umweltwirkungen aus dem Herstellungsprozess der Feuerverzinkung sind in der Ökobilanz deutlich sichtbar und demnach nicht zu vernachlässigen. Allerdings können diese erhöhten Auswirkungen in der Herstellung durch Einsparungen während der Nutzungsphase mehr als kompensiert werden.

Die Berechnungen der Lebenszykluskosten zeigten, dass sich bereits für die Herstellungskosten eine Reduzierung durch den Einsatz einer Feuerverzinkung ergibt. Darüber hinaus sind bei der Variante der Feuerverzinkung weniger eingreifende Instandhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsphase notwendig, so dass in Bezug auf die Lebenszykluskosten die Feuerverzinkung (Variante B) die absolut geringsten Kosten aufweist (Bild 3).

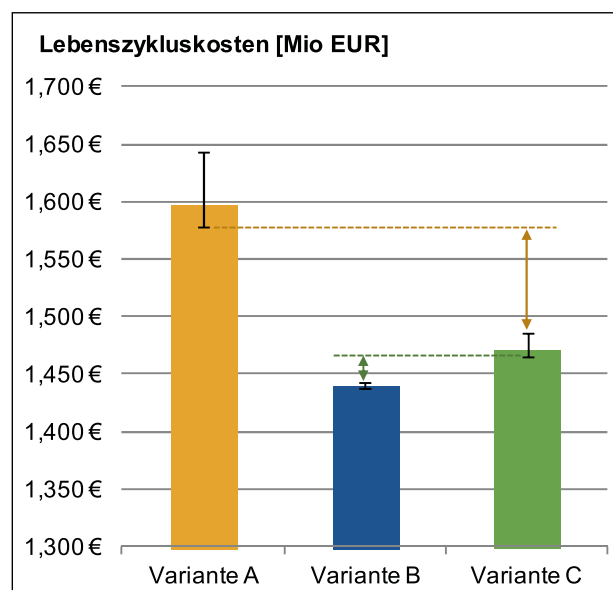


Bild 3: Summierte Lebenszykluskosten für die drei verschiedenen Korrosionsschutzvarianten (BASt [8])

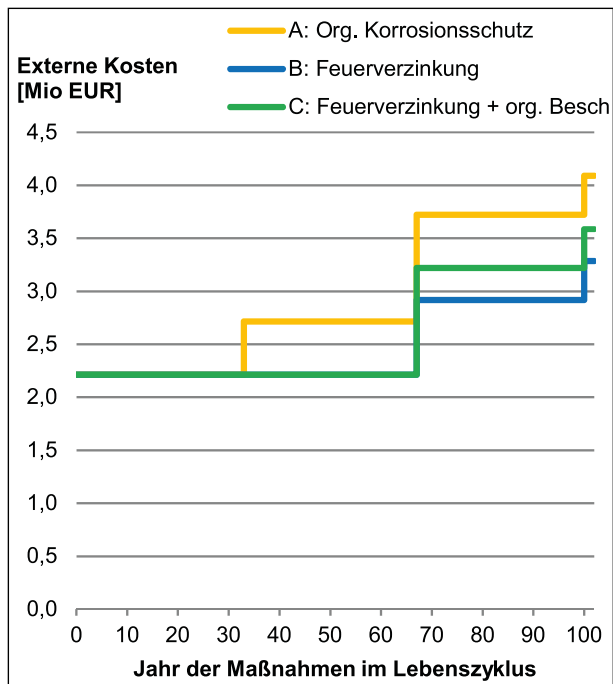


Bild 4: Externe Kosten über den gesamten Lebenszyklus für die drei Korrosionsschutzvarianten (BAST [8])

Die externen Effekte können einerseits in die Ökobilanz integriert und andererseits über einen Monetarisierungsansatz als externe Kosten ausgewiesen werden. Die durch Baumaßnahmen verursachten Eingriffe in den Verkehr (geänderte Geschwindigkeiten) lassen gegenüber der Normalstrecke veränderte Schadstoffausstöße und Treibstoffverbräuche entstehen. Diese Emissionen verursachen für die hier untersuchten Varianten Umweltwirkungen, die in der Größenordnung der Emissionen des Brückenbauwerks beziehungsweise auch darüber liegen. Bei der Berechnung von Fahrzeugbetriebskosten und Verspätungskosten übersteigen auch diese die Lebenszykluskosten des Brückenbauwerks in allen Varianten. Im Vergleich mit einer organischen Beschichtung (Variante A) ergaben sich für die untersuchte Referenzbrücke über den Lebenszyklus reduzierte externe Effekte und Kosten für die Feuerverzinkung (Variante B), gefolgt durch das Duplex-System (Variante C) (Bild 4).

Zusammenfassend ergab sich für die hier untersuchte Referenzbrücke die Variante der Feuerverzinkung als die Lösung, die den größten Beitrag für eine nachhaltige Entwicklung leistet. Da es sich um eine Referenzbrücke mit klar definierten Randbedingungen handelt, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Brückenbauwerke nicht ohne Weiteres gegeben. So kann bei einer Veränderung des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV) die Bedeutung der externen Effekte steigen oder

zurückgehen. Die Ergebnisse sind damit als einzel-fallbezogen einzustufen.

1.4 Forschungsprojekt Herstellen von reparaturfähigen Feuerzinküberzügen (EURONORM MF130088)

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, durch innovative Prozess- und Technologieentwicklung den Korrosionsschutz von Stahlbauteilen durch Feuerverzinkung gemäß DIN EN ISO 1461 [5] so zu verbessern, dass es möglich wird, verzinkte Baustähle mit Siliziumgehalten im Niedrigsilizium-Bereich, mittleren Sebsty-Bereich und Hochsilizium-Bereich durch Spritzmetallüberzüge gemäß DIN EN ISO 2063 [6] an die Feuerverzinkung grenzend und überlappend mit ausreichender Haftfestigkeit aufzutragen, ohne den angrenzenden Zinküberzug durch das Sweep-Strahlen in seinem Haftverbund zu lockern und die Langzeitwirkung des Korrosionsschutzsystems zu gefährden.

Die Arbeiten unter dem Titel: „Herstellen von reparaturfähigen Feuerzinküberzügen“ wurden über die EuroNorm GmbH im Förderprogramm INNO-KOM-Ost mit der Projektnummer MF130088 aus Haushaltsmitteln des BMWi gefördert und 2017 abgeschlossen.

Die Forschungsergebnisse belegen, dass Montageschweißstöße und Fehlstellen durch thermisch gespritzte Zinküberzüge gemäß DIN EN ISO 2063 [6] mit ausreichender Haftfestigkeit auf gestrahlter Stahl- und gesweepter feuerverzinkter Oberfläche von Baustählen im Niedrigsilizium-, mittleren Sebsty- und Hochsilizium-Bereich mit der entwickelten Verfahrensanweisung praxisgerecht ausgebessert und qualitätsgerechte Korrosionsschutzsysteme hergestellt werden können [7].

1.5 Pilotprojekt

Bereits während der vorgenannten Forschungstätigkeiten haben die Autoren das Ziel verfolgt, im Rahmen eines Pilotprojektes die wegweisenden Vorteile an einem realen Bauwerk unter Beweis zu stellen. Am 19.05.2011 hatte DEGES erstmals Gelegenheit Einblick in das Forschungsprojekt FOSTA P835 an der Universität Dortmund zu nehmen. Angesichts des Potentials der ersten Forschungsergebnisse wurde dort die Idee geboren.

Konkret ging es in diesem Pilotprojekt natürlich weniger darum, die erhofften Vorteile abzuschöpfen, sondern vielmehr darum, praktische Erfahrungen beim Einsatz der Feuerverzinkung im Brückenbau zu gewinnen. Im Vergleich mit den Standardprozessen in einem Feuerverzinkungsbetrieb sind sehr große und schwere Bauteile zu verarbeiten und wesentlich größere Zinkschichtdicken gefordert. Es war also davon auszugehen, dass die ein oder andere Überraschung und Herausforderung in diesem Pilotprojekt zu meistern sein würde, die als lehrreiche Erfahrung im Rahmen dieses Berichtes mitgeteilt werden soll.

In Abstimmung mit dem Land Hessen wurde mit dem BMVI vereinbart, im Zuge des Neubaus der A 44 bei einem der Überführungsbauwerke bei Bischhausen die Stahlteile der Verbund-Überbauten feuerverzinkt herzustellen. Die Auswahl dieses Bauwerks erfolgte aus mehreren Gesichtspunkten und günstigen Umständen:

- Für den Abschnitt, in dem das Bauwerk liegt, stand der Planfeststellungsbeschluss noch in Aussicht, wurde im Oktober 2011 gefasst, war aber noch bis 2013 beklagt.
- Das Bauwerk repräsentiert einen typischen Anwendungsfall, da ein hochfrequentierter Verkehrsweg beeinträchtigt wird, wenn der Korrosionsschutz mehrfach erneuert werden muss.
- Das Bauwerk ist eines von drei baugleichen Überführungsbauwerken in unmittelbarer Nähe und nahezu gleicher Ausrichtung, so dass sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der künftigen Entwicklung ein direkter Vergleich möglich ist.
- Angesichts des einzigen planmäßigen Aspektes einer möglichen geringeren Ermüdungssicherheit durch die Feuerverzinkung birgt ein gering frequentiertes Überführungsbauwerk, das einen Wirtschaftsweg überführt und damit lediglich landwirtschaftliche Flächen zugänglich macht, ein denkbar geringes Projektrisiko.

Für dieses Pilotprojekt wurde mit dem Einverständnis und Wohlwollen des BMVI vom Land Hessen eine Zustimmung im Einzelfall erteilt.

Dieses Pilotprojekt wurde intensiv durch einen Facharbeitskreis mit dem Institut Feuerverzinken GmbH (IFG), dem Institut für Korrosionsschutz Dresden GmbH (IKS) und der Technischen Universität Dortmund (TUD) betreut.



Bild 5: Vergleichsbauwerk BW 08, konventionell organisch beschichtet (DEGES)

Beim Pilotprojekt mit den feuerverzinkten Überbauträgern handelt es sich um das Überführungsbauwerk mit der Bezeichnung BW C21/07Ü. Die Kurzbezeichnung lautet BW 07.

1.6 Vergleichsbauwerk

Zeitgleich und in unmittelbarer Nähe des Pilotprojektes (nur wenige hundert Meter entfernt) wurden weitere Überführungsbauwerke über die A 44 mit konventionell beschichteten Stahlverbund-Überbauten hergestellt.

Bei einem dieser Vergleichsbauwerke mit den konventionell beschichteten Überbauträgern handelt es sich um das Bauwerk mit der Bezeichnung BW C21/08Ü (Bild 5). Die Kurzbezeichnung lautet BW 08.

Beim Pilotprojekt und beim Vergleichsbauwerk sind die Stahlüberbauten

- in der Form (offener Doppel-T-Querschnitt),
- in der Abmessung und
- in der Beschichtungsfläche.

weitestgehend identisch, so dass die Bauwerke bzw. die verschiedenen Korrosionsschutzvarianten in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (s. Kapitel 9.3) gegenübergestellt werden können.

2 Ziel und Aufgabenstellung

Mit der vorliegenden Dokumentation werden die Erfahrungen aus diesem Pilotprojekt zusammenfassend dargestellt. Die hier enthaltenen Hinweise und Empfehlungen dienen als Grundlage und Hilfestel-

lung für die Realisierung weiterer Brücken / Bauwerke in feuerverzinkter Stahlverbundbauweise.

Der Fokus richtet sich auf die für die Feuerverzinkung relevanten Rahmenbedingungen und Prozesse. Erläuterungen zur Baumaßnahme selbst beschränken sich auf ein Minimum und betreffen lediglich die für das Gesamtverständnis wesentlichen Aspekte. Bezüglich einer ausführlichen Beschreibung zum Bau von feuerverzinkten Brücken sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen [2, 4, 23, 24].

In Kapitel 3 dieses Berichtes werden zunächst die relevanten Informationen zum Feuerverzinkungsprozess aufgezeigt, die maßgeblich für die Entwurfsplanung sind. Die weitere Struktur des Berichts orientiert sich an der chronologischen Reihenfolge der erforderlichen Arbeitsschritte:

- Entwurfsplanung,
- Zustimmung im Einzelfall,
- Ausschreibung und Vergabe,
- Konstruktion und Ausführungsplanung,
- Arbeitsproben,
- Ausführung und Dokumentation.

3 Relevante Informationen zum Feuerverzinkungsprozess

3.1 Verfahren

3.1.1 Allgemein

Beim Feuerverzinken (Stückverzinken) gemäß DIN EN ISO 1461 [5] werden vorgefertigte Stahlteile in eine flüssige Zinkschmelze getaucht. Der Zinkgehalt der Schmelze liegt gemäß DIN EN ISO 1461 bei mindestens 98 %.

Der Verfahrensprozess beim Feuerverzinken ist vereinfacht im Nachfolgenden beschrieben (Bild 6).

Nach einer Eingangsprüfung werden die Bauteile an Traversen angeschlagen. Im Rahmen der Vorbehandlung wird das Verzinkungsgut zunächst in ein Entfettungsbad getaucht. Nach einer Spülung in einem Wasserbad folgen Beizbäder, die Rost und Zunder von der Oberfläche lösen. Nach einem wei-

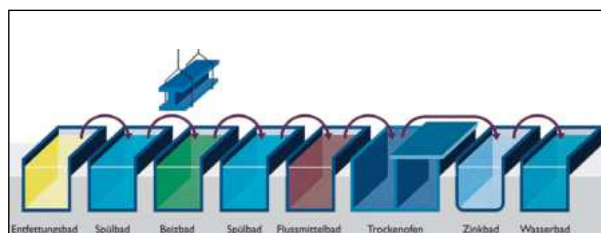


Bild 6: Verfahrensablauf beim Feuerverzinken (IFG)

teren Spülbad schließt sich ein Flussmittelbad an, welches eine letzte, intensive Feinreinigung der Stahloberfläche vornimmt und die Benetzungsfähigkeit zwischen der Stahloberfläche und dem schmelzflüssigen Zink erhöht. In den meisten Fällen folgt nach dem Fluxen eine Trocknung, die den Flussmittelfilm durch Wärmeeinwirkung auf trocknet.

Nach dem Trocknen wird das Verzinkungsgut in die flüssige Zinkschmelze getaucht. Zink hat eine Schmelztemperatur von 419 °C. Die Betriebstemperatur eines Verzinkungsbades liegt in den meisten Betrieben zwischen 440 °C bis 460 °C. Während des Verzinkungsvorganges bildet sich als Folge einer wechselseitigen Diffusion des flüssigen Zinks mit der Stahloberfläche auf dem Stahlteil ein festhaftender Überzug verschiedenartig zusammengesetzter Eisen-Zink-Legierungsschichten.

3.1.2 Zinkannahme

Feuerverzinken ist eine Reaktion der Stahloberfläche mit der Zinkschmelze. Das Ergebnis dieser Reaktion, der Zinküberzug bzw. die Eisen-Zinklegierung, ist in entscheidendem Maße abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Stähle, von der Dicke und von der Oberflächenbeschaffenheit der jeweiligen Bauteile. Stahlwerkstoffe mit bestimmten Gehalten an Silizium und Phosphor beschleunigen oder hemmen deutlich die Reaktion (vgl. Kapitel 7.3 und 8). Hinweise zur Schichtbildung in Abhängigkeit der Silizium- und Phosphorgehalte sind in DIN EN ISO 14713-2, Tabelle 1 enthalten [10].

Abweichend von der DIN EN ISO 1461 [5] wurde bei diesem Pilotprojekt auf allen wesentlichen Flächen der Stahlbauteile, zur Erreichung von 100 Jahren Korrosionsschutzdauer, eine Mindestzinkschichtdicke von $\geq 200 \mu\text{m}$ gefordert.

Bei der Bemessung der Stahlträger durch den Ingenieur kann die Gewichtszunahme durch die Feuerverzinkung in der Planungsphase bereits berück-

sichtigt werden. Diese ist jedoch abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Stahlwerkstoffes, der Materialdicke und Stahloberfläche. Als Annahme zur Festlegung / Ermittlung der Eigenlasten der Stahlträger kann für die Bemessung ca. 3 % bis ca. 6,5 % (konservativer Wert) Gewichtszuschlag durch die Feuerverzinkung in Ansatz gebracht werden.

3.1.3 Temperaturmanagement und Verweildauer im Zinkbad

Die Feuerverzinkungsunternehmen halten die Verweilzeit der Bauteile so lange wie nötig, aber grundsätzlich so kurz wie möglich. Die Temperaturen der Zinkschmelze werden in den Feuerverzinkungsunternehmen exakt gesteuert und genau dokumentiert.

Die Stahlbauteile erwärmen sich durch den Tauchprozess und nehmen die Temperatur der Zinkschmelze (ca. 450 °C) an. Die Verweildauer der Bauteile in der Zinkschmelze ist abhängig von der Materialdicke der Bauteile. Je dicker das Material, desto länger die Tauchdauer in der Zinkschmelze.

Bei Erzeugnisdicken > 30 mm und längeren Tauchzeiten als 27 Minuten sind Verfahrensprüfungen nach DAST-Richtlinie 022 [9] durchzuführen.

3.2 Verformungen

3.2.1 Temperaturverteilung beim Tauchen

Die Eintauchgeschwindigkeit hat erheblichen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Stahlwerkstoff beim Feuerverzinken. Als Mindestabsenkgeschwindigkeit wird im standardisierten Verfahren nach DAST-Richtlinie 022 [9] mindestens 0,8 m/min angenommen. In der Praxis ist die Eintauchgeschwindigkeit in der Regel deutlich höher. Ein rasches Eintauchen in einem möglichst steilen Winkel empfiehlt sich, um Eigenspannungen über die Querschnittshöhe der Bauteile, resultierend aus Temperaturunterschieden, klein zu halten.

3.2.2 Abbau von Eigenspannungen

Die Minimierung von Eigenspannungen in der Stahlkonstruktion ist die Aufgabe aus Planung, Konstruktion und Fertigung.

„Eigenspannungen sind in jeder Stahlkonstruktion mehr oder weniger ausgeprägt vorhanden und im Regelfall beim Feuerverzinken völlig unproblematisch. Eigenspannungen, die zum Beispiel in Form von Walz-, Verformungs- oder Schweißspannungen in einer Konstruktion vorhanden sein können, stehen innerhalb des Querschnitts eines Bauteils im Gleichgewicht und geben zu einer Verformung zunächst keinen Anlass. Durch das Einbringen der Wärme beim Feuerverzinken kann dieser Zustand jedoch gestört werden.

Verantwortlich für einen unter Umständen auftretenden Verzug beim Feuerverzinken ist der Abbau von Eigenspannungen als Folge der Erwärmung der Stahlteile im Zinkbad, das eine Temperatur von ca. 450 °C hat. Bei dieser verringert sich die Streckgrenze des Stahls gegenüber den Werten bei Raumtemperatur – je nach Stahlsorte – auf etwa 60 %.

Bei sehr hohen Eigenspannungen in einer Stahlkonstruktion (z. B. durch starkes Kaltumformen vor dem Feuerverzinken) kann es unter Umständen dazu kommen, dass sich vorhandene Spannungsspitzen durch plastische Formänderung abbauen. Liegen die Eigenspannungen einer Konstruktion erheblich oberhalb der während des Feuerverzinkens vorübergehend verringerten Streckgrenze des Stahls, so kann der Stahl diese Eigenspannungen nicht mehr aufnehmen. Die Spannungen werden als plastische Formänderung abgebaut – es entsteht Verzug“ nach [24].

Durch sorgfältige Planung, Konstruktion und Fertigung lassen sich die Eigenspannungen in Stahlkonstruktionen minimieren.

3.2.3 Temperaturverteilung beim Abkühlen

„Neben dem Freiwerden von fertigungsbedingten Eigenspannungen liegt im unterschiedlichen Abkühlverhalten einzelner Komponenten stückverzinkter Schweißkonstruktionen eine weitere maßgebliche Ursache für eventuell auftretende Verzugerscheinungen. Hierbei tritt der Effekt auf, dass die schneller abkühlenden, schlanken Komponenten oder allgemein Bauteile mit einem großen Oberflächen-Volumen-Verhältnis, früher ihre ursprüngliche, temperaturabhängige Festigkeit wiedererlangen und durch die verzögert abkühlenden, massigeren Bauteilbereiche unter Spannung geraten“ [24].

- Breite zwischen den Geländern:
5,00 m,
- Brückenfläche:
200,00 m².

4.2 Profile und Stahlwerkstoffe der Hauptträger

Die Art und Ausbildung der Hauptträger sollte bereits in der Entwurfsplanung festgelegt werden. In der Regel werden für die Hauptträger gewalzte oder geschweißte I-Profile eingesetzt. Bei starker Torsionsbeanspruchung der Längsträger können Hohlkastenquerschnitte mitunter eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Kleinere Hohlkastenquerschnitte kommen in der Praxis (z. B. bei Verkehrszeichenbrücken für Autobahnen) in feuerverzinkter Ausführung seit langem erfolgreich zur Anwendung.

Offene Profile sind für den Feuerverzinkungsprozess, die Konstruktion, die Fertigung und die Umsetzung in der Regel jedoch einfacher und daher für Brückenbauwerke kleinerer und mittlerer Spannweite zu bevorzugen. Offene Profile können zudem für die Fertigungsqualität und aus korrosionsschutztechnischer Sicht durchaus vorteilhaft sein.

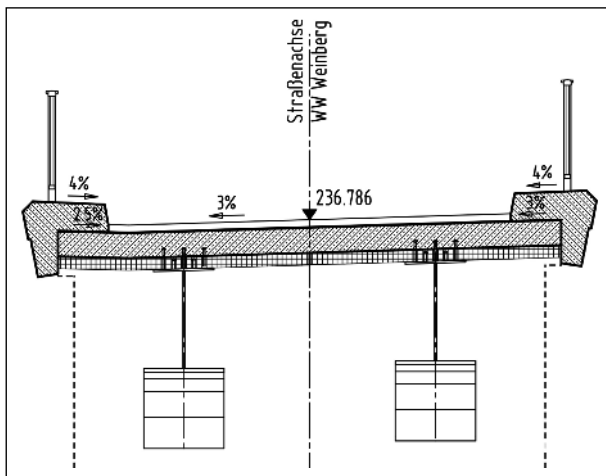


Bild 9: Regelquerschnitt, Zeichnung (DEGES)

Zur Anpassung an das Längsprofil der Straße und zum Ausgleich der Durchbiegung unter ständiger Last sollten die Träger über die starke Achse, zur Anpassung an die Trasse über die schwache Achse, überhöht hergestellt werden. Für Walzträger wird die Überhöhung in der Regel im Walzwerk durch Kaltverformen auf einer Presse realisiert (vgl. Kapitel 3.2.2). Für geschweißte Träger wird diese bereits beim Zusammensetzen der Querschnitte berücksichtigt.

Standardmäßig finden Stähle mit einer Streckgrenze von 355 N/mm² (S355) Anwendung. Im Verbundbrückenbau kommen jedoch auch vermehrt Stähle mit einer Streckgrenze von 460 N/mm² (S460) zum Einsatz. Hierbei bringt der Einsatz des höherfesten Stahls S460 anstelle des traditionellen S355 eine deutliche Minderung des Konstruktionsgewichtes infolge dünner Bleche und eine entsprechende Senkung der Materialkosten. Die Konstruktionshöhe ist in der Regel aus Steifigkeitsgründen nicht beeinflusst. Die Verarbeitungskosten sinken ebenfalls: Beispielsweise fällt bei einem Vollstoß das Schweißvolumen der Stumpfnah auf Grund geringerer Blechdicken wesentlich geringer aus. Bei dünnen Blechen können allerdings auch Aussteifungen gegen Beuleffekte notwendig werden, was zu einer Minderung oder Umkehr der oben genannten Effekte führen kann.

Für das Pilotprojekt und deren Hauptträger wurden offene Profile gewählt. Als Profil für die beiden Hauptträger (Bild 9) wurden geschweißte Stahlträger als Doppel-T-Profile (I-Profile) mit einer Streckgrenze von 355 N/mm² (S355) vorgesehen.

4.3 Bauteilabmessungen und Einzelgewichte

„Bezüglich der realisierbaren Abmessungen und Gewichte unterliegt die Konstruktion den anlagentechnischen Beschränkungen des Verzinkungsbe-

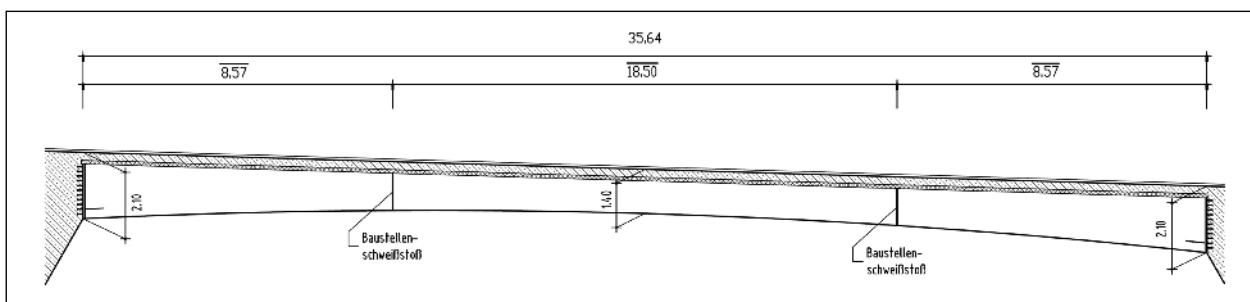


Bild 10: Ansicht Stahlverbundträger, Baustellenschweißstöße, Auszug Korrosionsschutzplan (DEGES)

triebes [s. Kapitel 3.3 Größen der Zinkbäder / Hebezeuge]. Für größere Brückentragwerke wird aus diesem Grund eine Segmentierung der Gesamtkonstruktion erforderlich, so dass in Abhängigkeit von der Spannweite planmäßig Montagestöße vorzusehen sind“ [24].

Die Bauteilabmessungen der einzelnen Segmente und deren max. Gewichte wurden bei der Entwurfsplanung hinsichtlich der anlagentechnischen Möglichkeiten der Feuerverzinkungsbetriebe berücksichtigt. Über die Planung / Festlegung der Montagestöße konnten Bauteilabmessungen und Gewichte (s. Kapitel 4.4) entsprechend angepasst werden.

4.4 Lage der Stöße

Die Länge der Doppel-T-Stahlprofile beträgt insgesamt 35,64 m. Die Anordnung der Bauteilstöße für die Doppel-T-Profile wurde insbesondere unter den Aspekten

- der zur Verfügung stehenden Zinkbadgröße,
- den örtlichen Gegebenheiten der Antransportmöglichkeiten zur Baustelle und
- der optimalen Lage im Straßenquerschnitt der neuen A 44

festgelegt. Aus diesen Kriterien ergaben sich die Einzelbauteillängen (Bild 10) je Doppel-T-Profil zu 2 x 8,57 m und 1 x 18,50 m = 35,64 m Gesamtlänge.

Mit diesen Parametern ergaben sich Bauteilgewichte von je 5,45 to für die zwei Randelemente bzw. von 9,66 to für das Mittelelement je Träger, die mit den Randbedingungen für das Handling insbesondere in der Verzinkerei korrespondierten.

Informationen zur Ausbildung des Korrosionsschutzes der Baustellenschweißstöße sind Kapitel 8.5 und Kapitel 9.2.6 zu entnehmen.

4.5 Bemessungskonzept

4.5.1 Normative Regelungen

Als normative Grundlagen gelten die europäischen Regelwerke für den Stahl- und Verbundbrückenbau. Die relevanten Normen für die Bemessung und Feuerverzinkung der Brückenelemente sind:

DIN EN 1993-1-9 [11]

DIN EN 1993-2 [12]

DIN EN 1994-2 [13]

DIN EN 10025, Teil 2-4 [14]

DIN EN ISO 1461 [5]

DIN EN ISO 12944-3 [15]

DIN EN ISO 14713-1 [16]

DIN EN ISO 14713-2 [10]

Ergänzend gilt auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland für tragende Bauteile und somit auch für die Ausführung des Brückenbauwerks die DAST-Richtlinie 022 [9].

Für Verkehrsbauten unter der Hoheit des Bundes und der Länder in Deutschland sind zusätzlich die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für Ingenieurbauwerke – ZTV-ING [17] zu beachten (beachte hierzu auch Kapitel 5). Diese können auch für andere Bauwerke vereinbart werden.

Sonstige länderspezifische Vorgaben und Regelungen außerhalb der Bundesrepublik Deutschland sind vom Planer rechtzeitig zu prüfen und zu berücksichtigen.

4.5.2 Bemessungsrelevante Besonderheiten bei der Feuerverzinkung

„Die Ausbildung einer Zinkschicht erfolgt durch die metallurgische Verbindung zwischen Zink und Stahl (Bildung einer Zink-Eisen-Legierungsschicht). Hierbei hat die Charakteristik der entstandenen Zinkschicht Einfluss auf

1. das Ermüdungsverhalten des Bauteils und der konstruktiven Details sowie
2. das Verschraubungsverhalten stückverzinkter Komponenten.

Bezüglich des Ermüdungsverhaltens können sich Schwindungsrisse, die beim Abkühlen der Bauteile nach dem Feuerverzinken innerhalb der Zinkschicht entstehen können und ihre Ursache im unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Zink und Stahl haben, negativ auswirken. Die Ergebnisse aus [1] lassen jedoch den Schluss zu, dass dieser Effekt mit zunehmender

Schärfe der konstruktiven Kerbe hinter dieser zurücktritt. Zur allgemeinen Berücksichtigung im Zuge der Bemessung kann für einige konstruktive Ausbildungen (tendenziell bei günstigen Kerbfällen) eine Abminderung um bis zu einem Kerbfall erforderlich sein“ nach [24].

Auf der sicheren Seite liegend wurde bei dem vorliegenden Bauwerk die Ermüdungsfestigkeit für alle Kerbfälle um eine Kategorie abgemindert, auch wenn experimentelle und numerische Versuchsergebnisse nicht für alle Kerbfälle eine Abminderung erforderlich gemacht hätten [1, 4].

4.6 Randbedingungen der Örtlichkeit

Das Bauwerk befindet sich nördlich der Ortschaft Bischhausen und überführt einen zur Ortschaft zugehörigen Wirtschaftsweg über die A 44. Der Wirtschaftsweg schließt unmittelbar vor dem Bauwerk an die Straße „Am Weinberg“ an.

Die Zufahrt zum Baufeld zur Herstellung des Bauwerkes erfolgte über das öffentliche Straßennetz und weiter von der Ortschaft Bischhausen aus über die Straße „Am Weinberg“. Die Zufahrt über die Straße „Am Weinberg“ verfügte über sehr begrenzt dimensionierte Einmündungsbereiche. Das Lichtraumprofil war aufgrund des Baumbestandes sowie aufgrund bestehender Wohnhäuser und Anlagen an der Straße eingeschränkt. Für die Transporte der Überbauträger wurden Lichtraumprofilschnitte an Bäumen durchgeführt. Weiterhin wurde eine Straßenlaterne für die Dauer der Transporte und Reste einer alten Schrankenanlage abgebaut.

Die vorhandenen Einschränkungen bei der Zuwegung zum Baufeld waren ein Aspekt, die Überbauträger geteilt zur Baustelle zu verbringen.

Ein weiterer Aspekt waren die bereits parallel zum Bau des Bauwerkes laufenden Streckenbautätigkeiten der A 44, die das Baufeld des Auftragnehmers zur Herstellung des Bauwerkes einschränkten.

Die zukünftige Trasse der A 44 musste vom Auftragnehmer für die Durchfahrt des Streckenbaus in jedem Fall freigehalten werden.

4.7 Montagekonzept

Die feuerverzinkten Segmente für die Stahlträger wurden auf die Baustelle angeliefert. In einer Feld-



Bild 11: Feldfabrik vor Ort (IFG)



Bild 12: Einrichtung der Feldfabrik (IFG)



Bild 13: Thermisch gespritzter Baustellenschweißstoß mit Markierungspunkten für die Langzeitmessung (IFG)



Bild 14: Vorbereitung der Schalung für das Halbfertigteil (IFG)



Bilder 15.1 und 15.2: Einheben der Brücke (DEGES)

fabrik wurden die Segmente vor Ort verschweißt und die Stahlbeton-Gurtplatten zu einem Halbfertigteil aufbetoniert (Bilder 11, 12, 14).

Die Bauteilstöße wurden nach ihrer spezifizierten Vorbereitung mit einer thermischen Spritzmetallisierung versehen (siehe auch Kapitel 8.5) (Bild 13).

Die Montage der so vor Ort vorbereiteten Verbundfertigteilträger auf den vorbereiteten Widerlagerbänken erfolgte mit Hilfe von 2 Autokranen (Bilder 15.1, 15.2).

Anschließend erfolgte das Einschalen, Bewehren und Betonieren der Ortbetonfahrbahnplatte und der Restwiderlager.



Bild 16: Elster-Brücke in Halle - Deutschlands erste feuerverzinkte Stahlverbundbrücke in Verbunddübel-Bauweise (IFG)

5 Zustimmung im Einzelfall

Im konkreten Anwendungsfall sah die Zustimmung im Einzelfall durch das Land Hessen u. a. folgende wesentliche Parameter vor:

- Erarbeitung eines Qualitätssicherungsprogramms für die Herstellung der Feuerverzinkung im Werk und der Spritzverzinkung z. B. der Baustellenstöße vor Ort.
- Zinkschichtdicken sind derart auszulegen, dass die Dauer des Korrosionsschutzes bei der Korrosivitätskategorie C4 mindestens 100 Jahre beträgt.
- Trägerstöße sollen im Bereich des Seitenstreifens angeordnet werden.
- Verzinkte Probeplatten am Bauwerk anordnen, um ggf. Zinkabtrag während der Nutzungsdauer des Bauwerks zu messen / zu dokumentieren.
- Nachweis der Ermüdungsfestigkeit auf Grundlage EC 3.

Vor dem Hintergrund der zum Ausführungszeitpunkt gültigen Regelungen in der ZTV-ING [17] (Stand August 2015), die eine Feuerverzinkung für den Fall zyklischer und dynamischer Belastungen von tragenden Komponenten im Brückenbau derzeit nicht vorsieht, ist vor der Ausführung einer feuerverzinkten Brücke eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bei den zuständigen Behörden einzuholen.

Im Rahmen ihres Zuständigkeitsbereichs können auch kommunale Behörden auf Grundlage der aktuellen Forschungs- und Praxisergebnisse eine Zustimmung für eine Feuerverzinkung im Brückenbau erteilen (z. B. Deutschlands erste Verbundbrücke mit feuerverzinkten Verbunddübelleisten-Trägern über die Weiße Elster in Halle/Saale [27], Bilder 16, 46).

6 Ausschreibung und Vergabe

6.1 Allgemein

Der Neubau des Überführungsbauwerks BW C21/07Ü wurde nach den geltenden Regularien des Vergaberechtes öffentlich ausgeschrieben und vergeben. In der Baubeschreibung wurde auf den besonderen Pilotcharakter des Bauwerks verwiesen. Der Feuerverzinkungsbetrieb wurde nach einem Vorauswahlverfahren im Rahmen dieses Pilotprojektes festgelegt.

6.2 Ausführende Unternehmen

Das ausführende Unternehmen für die Herstellung der Brücke war die Firma Laudemann GmbH Bauunternehmen Sontra in 36205 Sontra. Damit konnte ein mittelständisches Unternehmen aus der Region den bundesweiten Wettbewerb für sich entscheiden.

Das als Nachunternehmer beauftragte, ausführende Unternehmen für die Herstellung des Stahlbaus war die Firma Rädlinger Maschinen- und Anlagenbau GmbH in 93413 Cham.

Das als Nachunternehmer beauftragte, ausführende Unternehmen für die Erstellung der Feuerverzinkung war die Firma Coatinc Siegen GmbH in 57223 Kreuztal.

6.3 Auswahl der Feuerverzinkerei

Unter Berücksichtigung der max. möglichen Gewichte und Abmessungen (s. Kapitel 3.3, 4.3 und 4.4) wurde bei der Auswahl der Feuerverzinkungsunternehmen darauf geachtet, dass die Betriebe über einen hinreichend großen Zinkkessel verfügen, der ein unproblematisches Tauchen der Bauteile zulässt. Die Bauteile sollten hier in einem Tauchgang in die Zinkschmelze passen. Während ein Mehrfachtauchen von gewalzten Profilen meist unproblematisch ist, sollte ein Mehrfachtauchen bei Schweißprofilen möglichst vermieden werden. Ferner musste die Krananlage der Feuerverzinkerei in der Lage sein, die Bauteile mit ihren max. Einzelgewichten zu heben. Des Weiteren durften nur Feuerverzinkereien ausgewählt werden, die über ein gültiges Ü-Zeichen nach DAST-Richtlinie 022 [9] verfügen. Bei der Ausschreibung und Vergabe wurden diese Kriterien klar benannt und als Eignungsnachweis abgefragt.

7 Konstruktion und Ausführungsplanung

7.1 Planung, Konstruktion, Fertigung

Neben den bereits aufgeführten Regelwerken aus Kapitel 4.5.1 sind die Ausführungsregeln zur Herstellung wie z. B. EN 1090-2 [18] zu berücksichtigen.

Vor dem Hintergrund der Feuerverzinkung wurden hier die Vorgaben der DAST-Richtlinie 022 [9] und der DIN EN ISO 14713-2 [10] bei den Aufgabenfeldern Planung, Konstruktion, Stahlbaufertigung und Feuerverzinken (in der zum Ausführungszeitpunkt gültigen Ausgabe) vereinbart und berücksichtigt.

7.2 Profile der Hauptträger

Der Überbau ist eine Stahlverbundkonstruktion mit zwei nebeneinanderliegenden, baugleichen Stahlträgern. Die beiden Hauptträger für das Pilotprojekt wurden als offene Profile geplant und ausgeführt. Diese wurden als einfach symmetrische, geschweißte Doppel-T-Profile hergestellt. Die für das Projekt vorgesehene Geometrie der Träger wurde beim Zusammensetzen der Schweißprofile hergestellt. Die Träger verlaufen im Grundriss geradlinig und sind jeweils ca. in den Drittelpunkten mit Montagestößen versehen.

Die Trägerhöhe ist variabel, in Feldmitte am kleinsten (1.030 mm) und an den Rahmenecken am größten (1.730 mm), zzgl. der Kopfbolzen auf dem Obergurt mit einer maximalen Länge von 280 mm. Die Gesamtlänge eines Trägers beträgt ohne Kopfbolzen 35.640 mm (mit Kopfbolzen 36.340 mm). Die Breite des Obergurtes beträgt 600 mm und die des Untergurtes 800 mm. Der Steg und der Obergurt besitzen eine Blechstärke von $t = 20$ mm und der Untergurt eine Blechstärke von $t = 40$ mm. Das rechnerische Gesamtgewicht eines zusammengesetzten Hauptträgers ohne Feuerverzinkung beträgt ca. 20,6 Tonnen.

7.3 Materialwahl

„Bei der Stahlgütewahl ist zunächst die Bestellspezifikation (Bestelloption) gemäß DIN EN 10025 [14] „Schmelztauchverzinken“ mit einer geforderten chemischen Stahlzusammensetzung für das Feuerverzinken zu berücksichtigen“ nach [24].

„Vor dem Hintergrund des in Kapitel 8 dargestellten Zusammenhangs zwischen der chemischen Zusammensetzung des Stahls und der resultierenden Zinkschichtdicke sowie im Hinblick auf die Erreichbarkeit einer notwendigen Mindestzinkschichtdicke ist eine Konkretisierung der Silizium- und Phosphorgehalte zu empfehlen (s. DIN EN 14713-2, Tabelle 1 [10]).

Für eine angestrebte Zinkschichtdicke von mindestens 200 µm ist ein Stahl mit einem Siliziumgehalt im Bereich von $0,14 \leq \text{Si} \leq 0,35 \%$ sowie einem Phosphorgehalt $\text{P} \leq 0,035 \%$ zu verwenden. Zur Prüfung der praktischen Realisierbarkeit der angestrebten Zinkschichtdicke ist die Durchführung von Arbeitsproben vorab empfehlenswert. Zur Vermeidung von ungleichmäßigem Aussehen sollten die Silizium- und Phosphorgehalte bei allen verwendeten Blechen und Profilen innerhalb der o. g. Grenzen ähnlich zueinander sein“ nach [24].

Als Stahlwerkstoff wurde ein S355J2 + N mit einer Mindeststreckgrenze von 355 N/mm² verwendet. Die festgelegten Vorgaben an den Stahlwerkstoff wurden im Pilotprojekt umgesetzt (s. Kapitel 9.2.1).

7.4 Einstufung nach DAST-Richtlinie 022

Die Überbaukonstruktion bestand aus sechs Stahlbauteilen (vier Endstücke und zwei Mittelstücke). Gemäß DAST-Richtlinie 022 [9] sind die Stahlbauteile einzustufen bzw. entsprechende Nachweise zu führen:

- Die vier Endstücke entsprechen der Detailklasse B, der Konstruktionsklasse III und somit der Vertrauenszone 2 nach DAST-Richtlinie 022.
- Die zwei Mittelstücke entsprechen der Detailklasse A, der Konstruktionsklasse III und somit der Vertrauenszone 1 nach DAST-Richtlinie 022.

Sichtkontrollen der Bauteile und stichprobenhafte Magnetpulverprüfungen im Rahmen der Vertrauenszone 2 nach DAST-Richtlinie 022 [9] wurden vorgesehen und durchgeführt (s. Kapitel 9.2.3)

7.5 Oberflächenvorbereitung

Die Oberflächengüte der verwendeten Bleche muss DIN EN 10163-2 [19], Klasse B, Untergruppe 3 bzw. die der verwendeten Profile muss DIN EN 10163-3

[20], Klasse C, Untergruppe 3 entsprechen. Normalerweise bestehen bei einer Feuerverzinkung keine Anforderungen an die P-Vorbereitungsgrade. Vor dem Hintergrund des Pilotprojektes wurde hier die Konstruktion vor dem Feuerverzinken nach P-Vorbereitungsgrad P3 (sehr gründliche Vorbereitung) gemäß DIN EN ISO 8501-3 [21] vorbereitet. Dabei sind bspw. unbehandelte thermisch geschnittene Kanten unzulässig und alle Kanten müssen mit einem Mindestradius von 2 mm gerundet sein. Auf die Rundung von gewalzten Kanten an Profilen und Blechen kann verzichtet werden. Hierfür ist der P-Vorbereitungsgrad P2 (gründliche Vorbereitung) ausreichend.

Stahlbauteile mit stark verzunderten Oberflächen oder starkem Rostansatz sollten vor dem Feuerverzinken gestrahlt werden, um kurze Beizzeiten im Feuerverzinkungsbetrieb zu ermöglichen.

7.6 Schweißtechnische Verarbeitung

Die Stahlbaufertigung ist entsprechend den Anforderungen der EXC3 nach DIN EN 1090-2 und der ZTV-ING Teil 4 ausgeführt. Die Schweißnähte sind endlos bzw. umlaufend geschweißt. Sie entsprechen der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817. Die zerstörungsfreie Prüfung (UT, MT) ist im Umfang der ZTV-ING Teil 4 und DIN EN 1090-2 erfolgreich durchgeführt worden.

Die Stahlbauteile sind feuerverzinkungsgerecht geplant und konstruiert. Die Konstruktionswerkstoffe sind soweit möglich symmetrisch angeordnet und die Blechstärken aufeinander abgestimmt. Eine feuerverzinkungsgerechte Konstruktion der Stahlbauteile bildet die Grundlage für eine gute Abwicklung der späteren schweißtechnischen Verarbeitung. Die Stahlbaufertigung wurde eingehend sensibilisiert, keine Schweißsprays zu verwenden.

Die Schweißnähte im Werk und auf der Baustelle wurden unter Schutzgas mit aktiv wirkendem Gas (MAG) geschweißt.

Im Werk wurden die Stahlträger mit dem Schweißprozess 135 (MAG mit Massivdrahtelektrode) teilweise ergänzt mit dem Prozess 136 (MAG mit Fülldrahtelektrode) und die Kopfbolzen mit dem Schweißprozess 783 (Hubzündungsbolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas) geschweißt. Der Anschluss des Stegblechs an den Ober- und Untergurt sowie an die Kopfbleche der Trägerenden

sind mit Doppelkehlnähten ($a = 12 \text{ mm}$) in sechs Lagen ausgeführt. Die horizontalen Steifen an den Trägerenden sind mit Doppelkehlnähten ($a = 10 \text{ mm}$) am Steg und an der Kopfplatte angeschlossen. Alle anderen Schweißnähte sind als Vollanschluss entweder mit V-, HV-, DV- oder DHV-Nähten geschweißt.

Auf der Baustelle sind die Schweißnähte an den Montagestößen im Vollanschluss mit DV-Nähten am Steg und V-Nähten an den Gurten hergestellt worden. Es wurde nur der Schweißprozess 135 eingesetzt. Die Kantenvorbereitung an den Stößen erfolgte bereits im Werk. Die Oberflächen der Kanten sowie die Bereiche der Wärmeeinflusszone wurden mittels maschinellen Schleifens vorbereitet und gereinigt.

Durch die schweißtechnische Verarbeitung werden unvermeidbar Eigenspannungen in die Stahlbauteile eingepreßt, die infolge der hohen Temperaturen im Zinkbad teilweise abgebaut werden und zu Verformungen führen können (s. Kapitel 3.2.2). Die Auswirkungen ungewollter Verformungen können durch eine angepasste Schweißfolgeplanung beeinflusst und reduziert werden. Schwerpunkte hierbei sind eine spannungsarme Schweißfolge, unter der sich die erzeugten Eigenspannungen möglichst symmetrisch zu den Schweißnaht- und Trägerachsen verteilen. Die Schweißparameter sollten möglichst so gewählt werden, dass wenig Wärmeenergie in die Bauteile eingetragen wird.

Symmetrische (idealerweise doppelsymmetrische) Profilquerschnitte, symmetrische Anordnung und Herstellfolge der Schweißnähte, keine Überdimensionierung der Schweißnähte und die Auswahl eines Schweißverfahrens mit geringer Streckenenergie sind die wesentlichen Maßnahmen zur Reduzierung des Verzugsrisikos.

In der Schweißfolgeplanung für die Stahlträger durch den Hersteller ist das auch berücksichtigt worden. Die Schweißfolge war mit Blick auf die spätere Montage bei beiden Trägern identisch.

7.7 Freischnitte / Durchflussöffnungen

„Die flüssigen Prozessmedien (Vorbehandlungsflüssigkeiten, Zinkschmelze), in die die Konstruktion eingetaucht wird, müssen die gesamte Oberfläche des Bauteils jeweils vollständig benetzen, beim Ausziehen aus dem jeweiligen Prozessbad jedoch

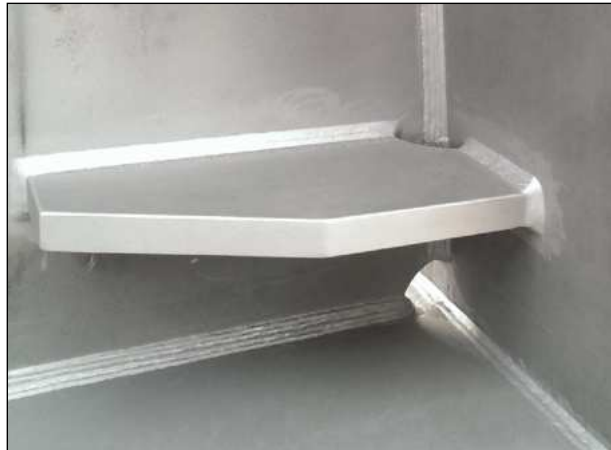


Bild 17: Freischnitte in der Konstruktion (IKS)

auch wieder vollständig abfließen können. Entsprechend sind Ein-, Durch- und Auslauföffnungen für die Flüssigkeiten als auch Entlüftungsöffnungen zur Vermeidung von Lufteinschlüssen vorzusehen“ [24].

„Diese Freischnitte und Durchflussöffnungen sind ferner hinreichend groß vorzusehen und auch an erforderlichen Aussteifungsblechen in Form von Kreisschnitten auszuführen. Die Durchflussöffnungen an den Endfeldern sind im Steg ebenfalls als Kreisschnitt mit mind. 50 mm Radius herzustellen“ nach [24].

Im Pilotprojekt wurden für die Endstücke der Träger entsprechende Kreisschnitte mit 70 mm Radius geplant und ausgeführt (Bild 17).

Mit diesen Freischnitten werden gleich mehrere Aspekte günstig beeinflusst: es werden sich kreuzende Schweißnähte vermieden und damit eine ermüdungssichere Konstruktion sichergestellt. Die etwas größeren Freischnittradien begünstigen nicht nur den Flüssigkeitsstrom, sondern auch die Qualität der Schweißnähte beim Umschweißen der Blechkanten.

7.8 Anschlagpunkte

Für das Feuerverzinken und aus Qualitätsgründen sind gesonderte Anschlagpunkte oder Hebeösen notwendig. Hierfür wurden vor dem Feuerverzinken auf den Obergurten der Träger (zwischen den Kopfbolzen) Laschen angeschweißt (Bilder 18, 19, 43). Die Lage der Anschlagpunkte und die Größe der Öffnungen für die Anschlagmittel müssen in enger Abstimmung mit der Feuerverzinkerei erfolgen und sind im Vorfeld statisch zu bemessen. Dabei ist der Temperatureinfluss von ca. 450 °C während des



Bild 18: Angeschlagenes feuerverzinktes Brückenteil (IFG)



Bild 19: Auf dem Obergurt der feuerverzinkten Bauteile verbliebene Anschlagpunkte (IFG)

Feuerverzinkens wegen des hieraus resultierenden Festigkeitsabfalls zu berücksichtigen (Ausheben aus dem Zinkbad). Die Anschlagpunkte können in der Regel am Bauteil verbleiben und werden einbetoniert.

Diese Anschlagpunkte sind ebenfalls für den Transport zu verwenden um evtl. Abplatzungen des Zinküberzuges am Bauteil zu vermeiden. Für das Einheben am Bauwerk sind wegen der höheren Gewichte ggf. gesonderte Anschlagpunkte vorzubereiten. Diese sollten gekennzeichnet sein und müssen für den üblichen Kraneinsatz in der Regel für Schrägzug bemessen und konstruiert sein (Anordnung entsprechend Gewichtsverteilung, ausgerundet für eine freie Ausrichtung der Anschlagmittel).

8 Arbeitsproben

8.1 Allgemein

Zur Sicherstellung der geforderten Mindestzinkschichtdicke ($> 200 \mu\text{m}$) und zur Prüfung der Ausführung der thermisch gespritzten und versiegelten Schichten aus ZnAl15 wurden vor der Fertigung der Brückenbauteile aus den für das Projekt vorgesehenen Stahlwerkstoffen gesonderte Arbeitsproben für die Montageschweißstöße (Bilder 20 bis 26) hergestellt. Die Blechdicke am Steg und Flansch entsprach den tatsächlichen, größten Bauteildicken



Bild 20: Fertiggestellte Arbeitsproben der Montageschweißstöße mit thermisch gespritztem und versiegeltem Überzug im Bereich der Schweißnaht (IKS)

(Flansch und Steg) am Bauwerk. Die Arbeitsproben wurden mit drei unterschiedlichen Tauchzeiten ca. 15 min / 20 min / 25 min verzinkt.

Anhand dieser Arbeitsproben wurde ebenfalls eine mögliche Ausbesserung von Fehlstellen und die Ausbesserung von evtl. Transportschäden und Montageschweißstößen erprobt. Im Rahmen der gefertigten Probekörper wurden verschiedene Farbtöne für die Deckversiegelung untersucht: DB 704, RAL 9006 und transparent. Der Auftraggeber entschied sich für eine farblich pigmentierte Versiegelung in RAL 9006.

8.2 Abdecklack im Bereich der Baustellenschweißstöße

Der Abdecklack im Bereich der Wärmeeinflusszone der späteren (Baustellen-)Schweißstöße verhindert die Zinkannahme beim Feuerverzinken und vermeidet eine aufwändige Vorbereitung im Schweißstoßbereich zur Entfernung des Zinküberzuges. Eine klare Abgrenzung (Abkleben) zum restlichen Bauteil ist vor Applikation des Abdecklackes erforderlich.

Die Bauteile wurden mit Nahtvorbereitung für Stumpfstoß gemäß Schweißanweisung versehen. Zur gezielten Vermeidung einer Zinkannahme an den Montagestößen wurden diese Stellen allseitig (inklusive Stirnflächen) mit einer Breite von 110 mm (Fläche A, Bild 29) mit dem Beschichtungsstoff "Wabiedur" der Firma Adolf Wagner GmbH beschichtet. Die Verarbeitungsvorschriften des Beschichtungsstoffherstellers sollten hierbei eingehalten werden. Wichtig ist eine Applikation des Beschichtungstoffes auf einer ordnungsgemäß vorbereiteten (z. B. gestrahlten) Fläche und eine ausreichende Deckung des Abdecklackes in allen Bereichen. Im Bereich des zu applizierenden Abdecklackes wurde empfohlen, vorher den Zunder restlos zu entfernen.



Bild 21: Arbeitsprobe für den Montageschweißstoß, Abdecklack zur gezielten Vermeidung der Zinkaufnahme im Bereich der Schweißnaht (IFG)



Bild 22: Feuerverzinken der Arbeitsproben (IFG)



Bild 23: Arbeitsproben nach dem Feuerverzinken, Entfernen von anhaftenden Zinkrückständen im Bereich des Montageschweißstoßes (IFG)

Ferner wurde empfohlen, den Abdecklack zweimal zu applizieren und sorgfältig zu maskieren, um eine klare Abgrenzung zu erhalten, damit an den späteren Brückenbauteilen die Maskierungen exakt an der gleichen Stelle (in einer Linie) an den Flanschen und an den Trägern verlaufen (ohne Versatz).



Bild 24: Arbeitsproben - Herstellung des Montageschweißstoßes (IFG)



Bild 25: Maskierte (abgeklebte) Arbeitsproben im Bereich des Montageschweißstoßes (IKS)

8.3 Schichtdicke der Feuerverzinkung

Die aus den für das Projekt vorgesehenen Stahlwerkstoffen gesondert hergestellten Arbeitsproben wurden mit den Vorgaben 15, 20 und 25 Minuten Tauchdauer getaucht. Die Bleche waren vor dem Feuerverzinken nicht gestrahlt.

Tendenziell bewirken längere Tauchzeiten eine größere Zinkschichtdicke. Dies betraf insbesondere die 20 mm Bleche. Bei den 40 mm Blechen konnte bei verlängerter Tauchdauer jedoch nur ein geringfügiger Schichtdickenzuwachs festgestellt werden. Bei den ersten Proben wurden bei den 40 mm Blechen Zinkschichtdicken zwischen 170 und 340 μm festgestellt. Bei den 20 mm Blechen wurden sogar Zinkschichtdicken zwischen 500 und 850 μm festgestellt.

Aufgrund der insgesamt sehr hohen zu erwartenden Zinkschichtdicke (deutlich $> 200 \mu\text{m}$) wurde festgelegt, die Tauchdauer so kurz wie möglich, aber so lang wie nötig zu halten und eine Tauchzeit von ca. 15 Minuten anzustreben.



Bild 26: Arbeitsproben – Minderschichtdicken des Zinküberzuges im Bereich der Brennschnittfläche (IFG)



Bild 27: Ergänzende Arbeitsproben / Blechproben (vor dem Feuerverzinken) mit verschiedenen Oberflächenbearbeitungen der Brennschnittflächen (Fa. Rädlinger)



Bild 28: Ergänzende Arbeitsproben / Blechproben nach dem Feuerverzinken, hergestellt mit verschiedenen Tauchzeiten (IFG)

8.4 Einfluss des Brennschnitts

Thermische Trennprozesse wie z. B. Laser-, Plasma- oder Brennschneiden führen zu einer wesentlichen Oberflächenveränderung auf der Schnittflä-

che. Es kann zur Änderung der chemischen Zusammensetzung in der Randschicht, zur Gefügewandlung und zu Aufhärtungen an der Oberfläche kommen. Dies kann nachteilige Folgen im Zusammenhang mit dem Feuerverzinken in Form von verminderter Haftfestigkeit des Zinküberzuges und Minderschichtdicken mit sich bringen. Aus diesem Grund sind derartige Schnittflächen nach DIN EN ISO 14713-2 [10] nachzuarbeiten mit der Zielstellung, die veränderte Oberflächenschicht abzutragen. Dies kann durch partielles Schleifen oder auch durch abrasives Strahlen erfolgen.

Die Zinkschichtdicken im Bereich der Brennschnittflächen lagen bei den ersten Proben deutlich unter 200 µm. Einzelwerte im Bereich der Schnittflächen lagen hier zum Teil nur bei 80 µm.

Es wurde empfohlen, die Schnittflächen der 20 mm und der 40 mm Bleche vor dem Feuerverzinken sorgfältig zu überarbeiten bzw. abzutragen (ggf. strahlen und beschleifen), um die geforderte Mindestzinkschichtdicke > 200 µm auch im Schnittflächenbereich zu gewährleisten. Aufgrund dieser Minderschichtdicken im Bereich der Brennschnittkanten wurden im Nachgang in einer 2. und 3. Lieferung weitere kleinere Blechproben 4 Stk. à 20 x 200 x 200 mm und 4 Stk. à 40 x 200 x 300 mm hergestellt, mit unterschiedlichen Tauchzeiten verzinkt und bewertet (Bilder 27, 28).

Zur weiteren Vorgehensweise / Untersuchung wurden Brennschnittflächen mit verschiedenen Oberflächenbearbeitungen hergestellt:

- Vorbereitungsgrad P3 (siehe Abschnitt 7.5).
- 0,2 und 0,5 mm per Hand (mit Winkelschleifer) abgetragen.
- 0,5 und 1,0 mm maschinell (automatisch mit Fräsmaschine) abgetragen.

Zusätzlich wurden die Oberflächen der großen Blechseiten der 40 mm Bleche beidseitig gestrahlt.

Die Bearbeitung mit dem Winkelschleifer (0,2 mm) war als ausreichend und geeignet zu bewerten. Im überwiegenden Bereich konnten hier Zinkschichtdicken zwischen 250 und 370 µm festgestellt werden. Es wurde empfohlen, die Schnittflächen der 40 mm Blechdicken mindestens 0,2 mm per Hand mittels Winkelschleifer (alternativ 0,5 mm durch maschinelles Fräsen) abzutragen und anschließend die Brennschnittfläche grob zu strahlen. Dabei ist zu beachten, dass glatte Flächen im Bereich der

Brennschnitte nach dem Strahlen nicht mehr vorhanden sein dürfen.

Darüber hinaus wurde bei diesem Projekt empfohlen, alle geschnittenen Kanten umlaufend mit einem Radius von 2 mm abzurunden.

8.5 Thermisches Spritzen mit Zink

Zur Komplettierung des Korrosionsschutzes der Feuerverzinkung wurde für die geschweißten Montagestöße in Anlehnung an „ZTV-ING Teil 4, Abschnitt 3, Pkt. 5.5: Baustellenschweißstöße“ [17] die in Bild 29 schematisch dargestellte Verfahrensanweisung zur Oberflächenvorbereitung im Rahmen der unter 1.2 und 1.4 genannten Forschungsvorhaben erarbeitet. Zur Komplettierung des Korrosionsschutzsystems Feuerverzinkung ist im Bereich der Montagestöße das thermische Spritzen gemäß DIN EN ISO 2063 [6] mit anschließender porenschließender Beschichtung auszuführen.

Die in den einzelnen Flächen im Schweißnahtbereich auszuführenden Arbeiten wurden wie folgt festgelegt:

- Fläche D:
Unbearbeitete und intakte Feuerverzinkung bei Arbeiten im Schweißnahtbereich durch geeignete Arbeitsmittel abdecken bzw. schützen.
- Fläche C:
Sweepen der intakten Feuerverzinkung mittlere Rautiefe mind. $R_z = 40 \mu\text{m}$ (G), Beschichtung mit Porenfüller.
- Fläche B:
Sweepen der intakten Feuerverzinkung mittlere Rautiefe mind. $R_z = 40 \mu\text{m}$ (G), thermisch Spritzen mit Zn oder $\text{Zn/Al} > 200 \mu\text{m}$ Schichtdicke und Beschichtung mit Porenfüller.
- Fläche A:
Strahlen des Stahls bis zum Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 3, Rauheitsgrad grob (G), mittlere Rautiefe mind. $R_z = 85 \mu\text{m}$, thermisch Spritzen mit Zn oder $\text{Zn/Al} > 200 \mu\text{m}$ Schichtdicke und Beschichtung mit Porenfüller.

Der verfahrenstechnische Ablauf sieht zuerst das Abdecken oder Maskieren des Flächenbereiches D vor. Danach folgt das maschinelle Überschleifen zwischen Fläche A und B zum Einebnen des mög-

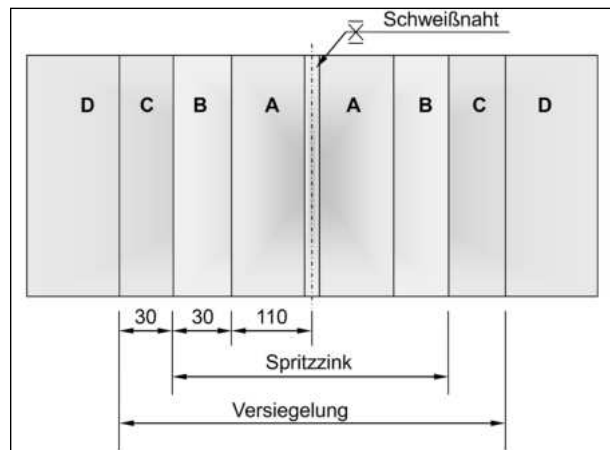


Bild 29: Schematische Darstellung des Ausbesserungsbereichs (Modifizierte Grafik aus dem FOSTA Forschungsbericht P835 [1])

lichen Absatzes der Feuerverzinkung zum blanken Stahl.

Vor dem Druckluftstrahlen der Stahloberfläche A müssen die Flächen B und C abgedeckt oder maskiert werden. Die Oberflächenvorbereitung der Stahloberfläche erfolgt durch Druckluftstrahlen mit einem gemäß DIN EN ISO 2063 [6] definierten Strahlmittel. Danach folgt nach dem Entfernen der Abdeckung der Flächenbereiche B und C das Sweepen der Feuerverzinkung. Für Zinküberzüge und insbesondere für Zinküberzüge auf Stählen mit mittleren Siliziumgehalten ist im Bereich der zu bearbeitenden Flächen B und C Sweep-Strahlen (ein deutlich vorsichtigeres Strahlen) mit kantigem, feinem Strahlmittel (0,25 bis 0,5 mm Durchmesser) bei gemindertem Strahldruck von 2 bis 4 bar und flacherem Strahlwinkel von 30 - 40° notwendig. Werden diese Strahlparameter nicht eingehalten, kommt es immer wieder zu Schäden in Form von Abplatzung der Feuerverzinkung [22]. Das Überschreiten der für die Fläche B und C definierten Rauheit von $R_z = 40 \mu\text{m}$ ist für den feuerverzinkten Überzug prinzipiell sinnvoll und möglich. Zinkoberflächen größerer Rauheit bieten einen besseren Haftgrund für das thermisch gespritzte Metall. Allerdings nimmt das Risiko der mechanischen Schädigung des Überzugs mit größerer Rauheit zu.

Vor dem thermischen Spritzen wird die Fläche C erneut abgedeckt oder maskiert, um dort die Zinkaufnahme beim thermischen Spritzen der Flächen A und B zu vermeiden. Nach der Demaskierung der Fläche C wird in den Flächenbereichen A, B und C abschließend die Versiegelung (Porenfüller) appliziert. Die überlappende Ausbesserung des Korrosionsschutzsystems ist mit dieser Vorgehensweise

sichergestellt. Nach dem Entfernen der übrigen Abdeckung im Flächenbereich D sind die Arbeiten zur Ausbesserung des Schweißnahtbereiches abgeschlossen.

Die Umgebungsbedingungen beim thermischen Spritzen von Zink und Zink-Aluminium werden in mehreren Regelwerken und Richtlinien immer wieder in gleicher Art und Weise beschrieben. Für die Ausführung des thermischen Spritzens und Versiegeln an den Probekörpern und dem Brückenbauwerk wurden folgende Rahmenbedingungen gemäß den Regelwerken definiert:

- Arbeiten bei mindestens 3 K über dem Taupunkt, einer relativen Luftfeuchte $< 80\%$ und einer Lufttemperatur $> 5\text{ °C}$,
- maximal 4h Wartezeit zwischen der Oberflächenvorbereitung und dem thermischen Spritzen,
- Applikation der porenschließenden Beschichtung (Versiegler) unmittelbar nach Fertigstellung des thermisch gespritzten Überzugs gemäß Beschichtungsstoffdatenblatt.

Das bedeutet für die Ausführung der Arbeiten, dass die Schaffung der notwendigen Umweltbedingungen durch Einhausung und Klimageräte notwendig werden kann.

8.6 Porenschließende Versiegelung

Für die porenschließende Versiegelung wurde als Farbton RAL 9006 anhand des visuellen Erscheinungsbildes der Feuerverzinkung der hergestellten Arbeitsproben ausgewählt und am Brückenbauwerk ausgeführt. Ziel war eine visuelle Annäherung zwischen Feuerverzinkung und thermisch gespritztem Überzug im Baustellenschweißnahtbereich. Nach Abschluss der Ausbesserungsarbeiten lag ein visuell ähnliches Erscheinungsbild vor.

Das visuelle Erscheinungsbild des Brückenbauwerkes verändert sich jedoch im Laufe der Bewitterungszeit und ist von vielen Einflussfaktoren (z. B. Lichteinfall, Bewitterungszustand, Korrosionsfortschritt, Verschmutzung etc.) abhängig. Außerdem wird das visuelle Erscheinungsbild durch die Betrachter (Farbempfinden, technisches Hintergrundwissen, persönliche Befindlichkeiten) unterschiedlich wahrgenommen. Visuell erkennbare farbliche Unterschiede zwischen dem Korrosionsschutzsys-

tem Feuerverzinkung des Stahlbaus und dem thermisch gespritzten Zinküberzug in ausgebesserten Flächenbereichen der Schweißstöße beeinflussen die Korrosionsschutzwirkung des Korrosionsschutzsystems des Brückenbauwerkes jedoch nicht.

Die porenschließende Versiegelung kann in allen verfügbaren Farbtönen geplant (s. Beispiele gemäß Bild 20) und gemäß dem jeweiligen technischen Datenblatt ausgeführt werden.

9 Ausführung / Dokumentation

9.1 Baustelle

Wie schon in den vorangegangenen Punkten des Berichtes dargelegt, waren die Schwerpunkte:

- Begrenzte Zuwegungsmöglichkeiten zum Bau- feld sowie die begrenzte Nutzung des Bau-feldes mit Sicherstellung der Durchfahrtsmöglichkeiten durch den Streckenbau.
- Aufgrund dieser Randbedingungen hat sich der AN im Bereich der zukünftigen Trasse der A 44 unmittelbar neben den Unterbauten für die Er- richtung einer Feldfabrik entschieden.
- Die Träger wurden dreigeteilt auf die Baustelle, im Speziellen zur Feldfabrik transportiert.
- Die Lagerung der Trägereile erfolgte auf Ab- setzböcken (5 Punkt gelagert) gemäß span- nungsloser Werkstattform. Die Bereiche der Baustellenschweißstöße wurden zur Erreichung optimaler Umgebungsbedingungen für das Ver- schweißen und das thermische Spritzmetallisie- ren eingehaust.



Bild 30: Abdichtung der Fuge zwischen Beton Schalung und Stahlträger mit einem für Zinküberzüge geeigneten Silikon (IFG)

- Nach Verschweißung und Herstellung der thermischen Spritzmetallisierung erfolgte das Einschalen, Bewehren und Betonieren der Verbundplatte (Teil 1).
- Schadensbehebung von Transportschäden erfolgte durch Spritzverzinkung bereits im Zuge der Spritzverzinkung der Baustellenschweißstöße. Somit waren im weiteren Bauablauf (Herstellung der Verbundbetonplatten auf der Baustelle mit nachfolgenden Einhub) keine Schäden im Zinküberzug zu verzeichnen.
- Die Abdichtung der Stoßbereiche Schalung / Stahlträger erfolgte durch Einlegen von Quellband in den Stoß und zusätzliches Abdichten mit für Zinküberzüge geeignetem (säurefreiem) Silikon (Bild 30). Damit konnte das Abfließen von Zementschlamm im Zuge des Betonierens der Platte vermieden werden.

9.2 Ergebnisdokumentation

9.2.1 Stahlwerkstoff

Die Grundwerkstoffe für die Schweißträger des Pilotprojektes bestehen alle aus dem Material S355J2+N.

Die Grenzwerte der prozessbeeinflussenden Legierungselemente Phosphor und Silizium waren vorgegeben. Es war ein Silizium- und Phosphorgehalt von $0,14 \leq \text{Si} \leq 0,35$ und $\text{P} \leq 0,035$ Gewichtsprozenten einzuhalten.

Die für die Stahlträger verwendeten Stahlwerkstoffe weisen laut Lieferzeugnis einen Siliziumgehalt von $0,17 \leq \text{Si} \leq 0,28$ und einen Phosphorgehalt von $0,010 \leq \text{P} \leq 0,017$ Gewichtsprozenten auf. Der Grundwerkstoff mit der erzeugten Schichtbildung infolge der Feuerverzinkung ist dem Sebisty-Bereich zuzuordnen.

9.2.2 Feuerverzinkung

Die Feuerverzinkung der Bauteile und die Ausführungsqualität (Bild 31) der feuerverzinkten Oberfläche entspricht der DIN EN ISO 1461 [5] und der DAST-Richtlinie 022 [9].

Abweichend von der DIN EN ISO 1461 [5] wurde auf allen wesentlichen Flächen der Stahlbauteile eine Mindestzinkschichtdicke von $\geq 200 \mu\text{m}$ gefordert.



Bild 31: Qualitätskontrolle der fertigen feuerverzinkten Brückensegmente (IFG)



Bild 32: Äußeres Brückensegment während des Feuerverzinkungsprozesses (IFG)



Bild 33: Äußeres Brückensegment nach dem Feuerverzinkungsprozess (IFG)



Bild 34: Mittleres Brückensegment nach dem Feuerverzinkungsprozess (IFG)



Bild 35: Krantransport des mittleren Brückensegmentes nach dem Feuerverzinkungsprozess (IFG)

Die Zusammensetzung der Zinkschmelze in der Coatinc Siegen GmbH entsprach den Anforderungen an die Zinkbadklasse 1 der DAST-Richtlinie 022 [9]. Die durchschnittliche Beizzeit der Bauteile betrug 25 Minuten. Alle Bauteile (Bilder 31 bis 35) sind jeweils in einem Tauchgang verzinkt worden. Ein Mehrfachtauchen der Bauteile wurde im Vorfeld ausgeschlossen.

Die Tauchzeit der Bauteile in der Zinkschmelze (Bild 32) wurde so kurz wie möglich gehalten. Angestrebt wurde ursprünglich eine Tauchzeit von ca. 15 Minuten. Beim Tauchgang des ersten langen Trägers wurde aufgrund der hohen "Massigkeit" der Bauteile jedoch festgestellt, dass die geplante Tauchzeit zu kurz war, da Teilbereiche vom anhaftenden Zink noch nicht aufgeschmolzen waren. Die ursprünglich geplante Verweildauer von 15 min wurde daher um bis zu 10 min verlängert. Bauteilbedingt betrug die Tauchdauer aller Bauteile zwischen 15 und 25 Minuten.

Die Temperatur der Zinkschmelze betrug durchschnittlich 450 °C.

Die Gewichtszunahme der Stahlträger durch die Feuerverzinkung betrug 6,4 %. Mit dieser Gewichtszunahme bewegt man sich im oberen Bereich. Bei geringeren Zinkschichtdicken ist jedoch von einer geringeren Gewichtszunahme auszugehen.

9.2.3 Rissprüfung

Die Sichtkontrolle der Bauteile gemäß DAST-Richtlinie 022, Kapitel 4.7 [9] ergab keine Risse.

Eine Überprüfung mit dem MT-Verfahren gemäß Anlage 3 der DAST-Richtlinie 022 [9] war ebenfalls vorgegeben und unabhängig von der tatsächlichen Vertrauenszone anzuwenden. Hierzu wurden an



Bild 36: Vorbereitete Absetzböcke zum Ablegen der noch heißen feuerverzinkten Bauteile (IKS)



Bild 37: Auf den mittig positionierten Absetzböcken abgelegtes Bauteil (IFG)

den Bauteilen an vorgegebenen Messpunkten MT-Prüfungen durchgeführt. Rissanzeigen wurden keine festgestellt.

9.2.4 Verformungen / Richten

Im beschriebenen Pilotprojekt hat der Obergurt des Stahlträgers eine Materialdicke von 20 mm und der Untergurt eine Materialdicke von 40 mm. Diese unterschiedlichen Blechdicken der Gurte führten (nach dem Feuerverzinken) beim Abkühlen der Bauteile an der Luft temporär zu Verformungen infolge einer zeitweiligen Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Untergurt, die sich am Ende nach Erreichen der Raumtemperatur vollständig zurückgebildet haben.

Für die Träger wurden in der Feuerverzinkerei Absetzböcke (Bilder 36, 37) entsprechend der geplanten Überhöhung zum Ablegen vorbereitet, um die vorgegebene Geometrie der Stahlträger im Abkühlungsprozess kontrollieren und sicherstellen zu können. Die Endpunkte wurden im Abkühlungsprozess zum Teil unterstützend mit Gewichten beaufschlagt. Hierzu wurden Geometrievermessungen

- vor dem Feuerverzinken,
 - unmittelbar (provisorisch) nach dem Feuerverzinkungsprozess und
 - nach dem Feuerverzinken (nach Abkühlung)
- durchgeführt.

Eine plastische Verformung ist nicht eingetreten. Im Zuge der Abkühlung sind die Träger wieder in ihren Ursprungszustand gekommen, so dass die Maßhaltigkeit gegeben war. Ein Richten der Bauteile nach dem Feuerverzinkungsprozess war nicht erforderlich.

9.2.5 Schichtdickenmessungen

Seitens des Institutes Feuerverzinken wurden die die beiden feuerverzinkten Träger in Augenschein genommen und die Schichtdicken dokumentiert. Die Prüfung der Schichtdicke und deren Messung erfolgte nach DIN EN ISO 1461 [5]. Seitens des Auftraggebers wurde eine von der DIN EN ISO 1461 [5] abweichende Zinkschichtdicke von $> 200 \mu\text{m}$ gefordert. Die Zinkschichtdicke eines jeden Trägers wurde separat ermittelt. Am oberen Flansch und am Steg wurden jeweils 12 Messpunkte (Referenzflächen) und am unteren Flansch 30 Messpunkte zur Ermittlung der örtlichen Schichtdicke festgelegt. Die örtliche Schichtdicke an einem Messpunkt ergibt sich als Mittelwert aus 5 Einzelmessungen. Aus den Werten aller örtlichen Schichtdicken wird die durchschnittliche Schichtdicke ermittelt. Die Ergebnisse der örtlichen und durchschnittlichen Zinkschichtdicken lassen sich wie in Bild 38 beschrieben zusammenfassen.

Die oberen Flansche und die Stege mit 20 mm Materialdicke wiesen durchschnittliche Zinkschichtdi-

cken zwischen $644 \mu\text{m}$ und $702 \mu\text{m}$ auf. Die unteren Flansche wiesen eine durchschnittliche Zinkschichtdicken von $399 \mu\text{m}$ und $435 \mu\text{m}$ auf.

Abweichend von den normativen Regelungen der DIN EN ISO 1461 [5] wurde vereinbart, zusätzliche Schichtdickenmessungen vorzunehmen. Im Bereich der Brennschnittkanten gibt es Bereiche (ausschließlich an den 40 mm Brennschnittflächen des unteren Flansches), an denen Zinkschichtdicken von $< 200 \mu\text{m}$ gemessen wurden. Die hier ermittelten örtlichen Schichtdicken liegen zwischen 106 und $160 \mu\text{m}$. Diese geringeren Schichtdicken sind zum Teil punktuell oder als Längsstreifen vorhanden. Es wird geschätzt, dass ca. 10 % von den Brennschnittflächen des unteren Flansches eine Minderschichtdicke von unterhalb $200 \mu\text{m}$ aufweisen. Alle gemessenen Werte liegen jedoch deutlich oberhalb der nach DIN EN ISO 1461 [5] geforderten Mindestzinkschichtdicken von $> 85 \mu\text{m}$ und es konnte kein Einzelwert unter $100 \mu\text{m}$ festgestellt werden. Die Grenzwerte der DIN EN ISO 1461 [5] bleiben eingehalten. Die Ursache für die geringeren Schichtdicken ist in Kapitel 8.4 beschrieben. Der deutlich überwiegende Bereich der 40 mm Brennschnittflächen hatte Zinkschichtdicken von deutlich $> 200 \mu\text{m}$. Die betreffenden Bereiche werden begleitend beobachtet.

Träger OST	Örtliche Schichtdicke. Gemessener unterster Wert	Örtliche Schichtdicke. Gemessener oberster Wert	Durchschnittliche Zinkschichtdicke
Oberer Flansch (12 Messpunkte)	602 μm	806 μm	667 μm
Steg (12 Messpunkte)	602 μm	880 μm	686 μm
Unterer Flansch (30 Messpunkte)	301 μm	510 μm	399 μm
Träger WEST	Örtliche Schichtdicke. Gemessener unterster Wert	Örtliche Schichtdicke. Gemessener oberster Wert	Durchschnittliche Zinkschichtdicke
Oberer Flansch (12 Messpunkte)	552 μm	753 μm	644 μm
Steg (12 Messpunkte)	629 μm	763 μm	702 μm
Unterer Flansch (30 Messpunkte)	324 μm	639 μm	435 μm

Bild 38: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse für die vor Ort ermittelten örtlichen und durchschnittlichen Zinkschichtdicken an den Trägern Ost und West (IFG)



Bild 39: Thermisch gespritzter Baustellenschweißstoß mit Versiegelung in RAL 9006 (IKS)

9.2.6 Thermisch gespritzte Flächen

Für das thermische Spritzen wurde der Drahtwerkstoff ZnAl 85/15 verwendet. Der Korrosionsschutz der Baustellenmontagestöße wurde gemäß Kapitel 8.5 hergestellt. Die Bereiche A und B (Bild 29) wurden nach der Oberflächenvorbereitung mit einer thermischen Spritzmetallisierung versehen. Anschließend wurden die Bereiche A, B und C mit dem Sealer ALEXIT Strukturlack 426 der Fa. Mankiewicz Gebr. & Co. GmbH & Co. KG im Farbton RAL 9006 versiegelt.

Im Bereich der thermisch gespritzten und zusätzlich versiegelten Schweißstöße (an den Achsen A und D) des untersuchten Trägers betrug die ermittelten örtlichen Schichtdicken zwischen 412 μm und 656 μm (Bild 39).

9.2.7 Langzeitüberwachung

Zusätzlich wurden in Absprache mit der DEGES an einem der beiden Träger insgesamt 36 Stück Referenzpunkte für eine Langzeitmessung festgelegt. Hierzu wurden am Träger vier Achsen A-D (Bild 40) bestimmt. Die Referenzpunkte umfassen den gesamten Querschnitt der Träger (Bilder 41, 42) einschließlich der Bereiche der unteren Brennschnittflächen und der nachträglich thermisch gespritzten Schweißstöße. Die erste Schichtdikenermittlung für die Langzeitmessung erfolgte am 18.05.2016.

Im Bereich der Achsen B und C betrugen die ermittelten örtlichen Zinkschichtdicken der Feuerverzinkung Werte zwischen 343 μm und 773 μm . Am Messpunkt Nr. 13 (Brennschnittfläche) betrug die örtliche Zinkschichtdicke 127 μm und am Messpunkt Nr. 22 (Brennschnittfläche) betrug die örtliche Zinkschichtdicke 160 μm .

Im Zuge von wiederkehrenden Brückenprüfungen ist eine erneute Messung der Zinkschichtdicken an den festgelegten Punkten für die Langzeitmessung vorgesehen.

9.3 Kosten / Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Beim feuerverzinkten Pilotprojekt und beim Vergleichsbauwerk in konventionell beschichteter Ausführung (s. Kapitel 1.6) sind die Stahlüberbauten

- in der Form (offener Doppel-T-Querschnitt),

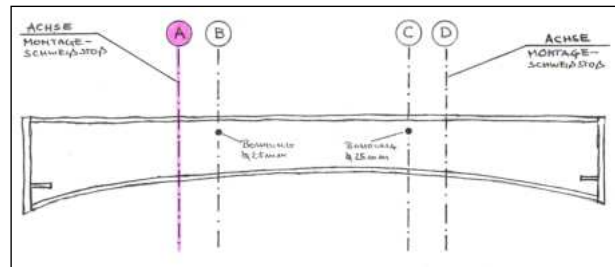


Bild 40: Achsen (A-D) zur Festlegung der Punkte für die Langzeitmessung (IFG)

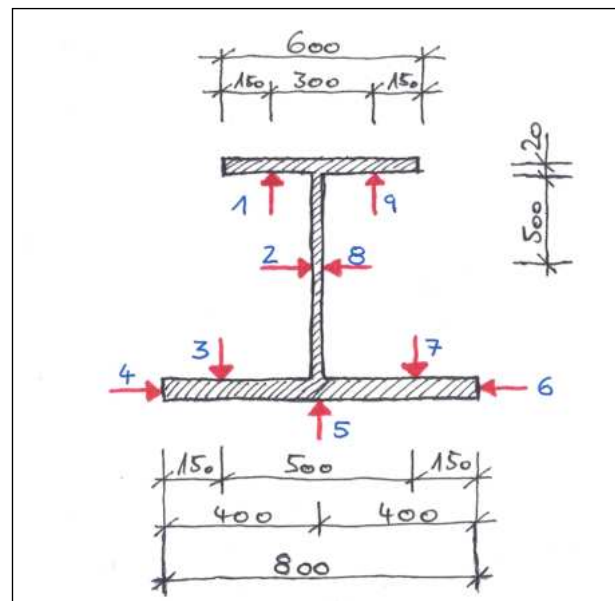


Bild 41: Querschnitt des Trägers an Achse A mit festgelegten Punkten (9 Stk.) zur Langzeitmessung (IFG)



Bild 42: Thermisch gespritzter Baustellen-schweißstoß (Achse A) mit markierten Punkten für die Langzeitmessung (IFG)

- in der Abmessung und
- in der Beschichtungsfläche

weitestgehend identisch. Seitens der DEGES wurde nach Fertigstellung der beiden Wirtschaftsüberführungsbauwerke ein Kostenvergleich und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zwischen feuerver-

zinkter und konventionell beschichteter Brücke vorgenommen.

Die Herstellungskosten für die reine Feuerverzinkung (ohne thermisches Spritzen der Montageschweißstöße) liegen ca. in der gleichen Größenordnung wie die Herstellungskosten der organischen Beschichtung.

Die Gesamtkosten für den Korrosionsschutz der Überbauträger am feuerverzinkten Pilotprojekt (Feuerverzinken und thermisches Spritzen der Montageschweißstöße auf der Baustelle) liegen - bedingt durch den Pilotcharakter des Projektes - ca. 50 Prozent über den Herstellungskosten der konventionell organischen Beschichtung der Überbauträger des Vergleichsbauwerks mit weitestgehend identischen Bauwerksparemtern. Die höheren Kosten beim feuerverzinkten Pilotprojekt entstehen demnach durch das thermische Spritzen der Baustellenmontageschweißstöße.

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird von einer hundertjährigen Nutzungsdauer der Bauwerke ausgegangen. Der deutliche wirtschaftliche Vorteil einer feuerverzinkten Konstruktion gegenüber einer konventionellen organischen Beschichtung ergibt sich im Zuge der Nutzungsdauer eines Bauwerks aufgrund der

- zu erwartenden grundhaften Erneuerungsarbeiten (mindestens zweimal in der Nutzungsdauer),
- zu erwartenden punktuellen Instandsetzungen im Ergebnis der einzelnen Hauptprüfungen,
- zu erwartenden Kosten für verkehrssichernde / verkehrsführende Maßnahmen der Verwaltungsbehörde im Zuge von Instandsetzungsarbeiten und den dadurch bedingten
- Wirtschaftlichkeitsverlusten für die Verkehrswegenutzer.

Bezogen auf die Lebensdauerkosten der Konstruktion können sich die Kostenvorteile der Feuerverzinkung (inkl. der Kosten für die thermisch gespritzten Montageschweißstöße) auf ca. 65 % gegenüber der konventionellen Beschichtung belaufen. Bezogen auf das Pilotprojekt entspricht dies einem Kostenvorteil in der Größenordnung von ca. 100.000,- EUR.

Aus dieser Einschätzung kann erwartet werden, dass eine feuerverzinkte dauerhafte Konstruktion deutliche Kostenvorteile in der Gesamtheit der Her-

stellungs- und Lebensdauerkosten gegenüber einer konventionell beschichteten Konstruktion hat.

10 Empfehlungen für zukünftige Anwendungen

Als Ergebnis des Pilotprojektes kann festgehalten werden, dass bereits in der Entwurfsplanung eine Auseinandersetzung mit der Thematik Feuerverzinken hilfreich ist.

Zusätzlich zu den ohnehin allgemein gültigen anzuwendenden Regeln im Straßenbrückenbau und Stahlbau sind seitens der Planer und Fertigungsbetriebe, die Anforderungen an Planung, Konstruktion und Fertigung aus der DAST Richtlinie 022 [9], der DIN EN ISO 14713-2 [10] und der DIN EN ISO 1461 [5] in der jeweils aktuell gültigen Fassung zu berücksichtigen. Eine enge und frühzeitige Abstimmung zwischen Ingenieurbüro, Stahlbauer und Feuerverzinkungsunternehmen ist erforderlich.

Wesentliche Erfahrungen aus dem Pilotprojekt sowie ergänzende Empfehlungen zu den Regelungen und den vorhandenen Planungshilfen im Brückenbau [23, 24] sind für zukünftige Anwendungen in den nachfolgenden Punkten zusammengefasst:

Bauteilabmessungen und Bauteilgewichte

Die Abmessungen und Gewichte der Bauteile sind den Möglichkeiten der Feuerverzinkungsunternehmen anzupassen und frühzeitig abzustimmen. Die Abmessungen der Tauchbäder und max. Lasten der Hebezeuge in den Feuerverzinkungsunternehmen sind begrenzt. Dieses kann Einfluss auf die Bauteilabmessungen und evtl. notwendige Montageschweißstöße haben. Mehr Informationen s. Kapitel 3.3, 4.3. und 4.4.

Es wird empfohlen, Bauteile jeweils nur in einem Tauchgang zu verzinken. Ein Mehrfachtauchen von übergroßen Brückenbauteilen sollte vermieden werden bzw. nur in besonderen Ausnahmefällen und nach vorheriger Abstimmung der Beteiligten zur Anwendung kommen.

Werkstoffermüdung

Beim Nachweis gegen Werkstoffermüdung ist zu berücksichtigen, dass die Feuerverzinkung mitunter einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben kann. Für einige konstruktive Details (tendenziell bei günstigen Kerbfällen) kann unter Umständen

eine Abminderung des Kerbfalles erforderlich sein (s. Kapitel 4.5.2). Es ist jedoch anzumerken, dass eine Herabstufung der Ermüdungsfestigkeit für die Wirtschaftlichkeit der Bemessung oftmals ohne Relevanz ist und bei Brücken kleinerer und mittlerer Spannweite in der Regel auch zu keinen größeren Querschnitts- und Bauteilabmessungen führt. Für Planer stehen hierzu weitere Informationen (Kerbfalltabelle für feuerverzinkte Details) zur Verfügung [2, 4, 23, 24].

Profilauswahl

In der Regel werden für die Hauptträger gewalzte oder geschweißte I-Profile (offene Profile) eingesetzt.

Hohlkastenquerschnitte könnten bei starker Torsionsbeanspruchung mitunter eine Alternative darstellen und kommen in der Praxis (z. B. bei Schillerbrücken) in feuerverzinkter Ausführung vielfach zur Anwendung. Hohlkastenquerschnitte haben allerdings besondere Anforderungen an Konstruktion und Fertigung, welche in diesem Bericht nicht weiter ausgeführt werden.

Offene Profile sind für den Feuerverzinkungsprozess, die Konstruktion, die Fertigung und die Umsetzung in der Regel einfacher und daher für Brückenbauwerke kleinerer und mittlerer Spannweite zu bevorzugen. Offene Profile können aus korrosionsschutztechnischer Sicht vorteilhaft sein.

Während der Entwurfs- und Planungsphase für die Stahlträger können durchaus auch Walzprofile als mögliche Alternative zu Schweißträgern in Betracht gezogen werden. Die Verwendung von Walzprofilen ist in der Regel, neben den meist geringeren Beschaffungskosten für die Stahlträger, vorteilhaft hinsichtlich der resultierenden Kosten für die Fertigung.

Zur Anpassung an das Längsprofil der Straße und zum Ausgleich der Durchbiegung unter ständiger Last sollten die Träger über die starke Achse, zur Anpassung an die Trasse über die schwache Achse, überhöht hergestellt werden. Für Walzträger wird die Überhöhung in der Regel im Walzwerk durch Kaltverformen auf einer Presse realisiert. Für geschweißte Träger ist dies bereits beim Zusammensetzen der Querschnitte zu berücksichtigen.

Stahlwerkstoff

Standardmäßig finden Stähle mit einer Streckgrenze von 355 N/mm² (S355) Anwendung. Im Verbund-

brückenbau kommen jedoch auch vermehrt Stähle mit einer Streckgrenze von 460 N/mm² (S460) zum Einsatz. Hierbei bringt der Einsatz des härtesten Stahls S460 anstelle des traditionellen S355 eine deutliche Minderung des Konstruktionsgewichtes und eine entsprechende Senkung der Materialkosten. Die Verarbeitungskosten sinken ebenfalls. Beispielsweise fällt bei einem Vollstoß das Schweißvolumen der Stumpfnaht wesentlich geringer aus.

An die verwendeten Stahlwerkstoffe werden für den Feuerverzinkungsprozess enge Grenzen hinsichtlich der prozessbeeinflussenden Legierungselemente Silizium und Phosphor innerhalb der aktuell gültigen DIN EN 10025 [14] gesetzt. Hierbei ist der Silizium- und der Phosphorgehalt im Stahlwerkstoff wie folgt zu begrenzen:

- Silizium (Si): $\geq 0,14 \text{ \%}$ bis $\leq 0,35 \text{ \%}$
- Phosphor (P): $\leq 0,035 \text{ \%}$

Zur Vermeidung von ungleichmäßigem Aussehen und starken Schwankungen bei den Zinkschichtdicken sollten die Silizium- und Phosphorgehalte bei allen verwendeten Blechen und Profilen innerhalb der o. g. Grenzen ähnlich sein, wenig voneinander abweichen und sich möglichst nicht an den äußeren Grenzen des o. g. Bereiches bewegen. Evtl. Lieferzeiten für die entsprechenden Stahlwerkstoffe sind frühzeitig vom AN zu berücksichtigen.

Oberflächenvorbereitung

Normalerweise bestehen bei einer Feuerverzinkung keine Anforderungen an die P-Vorbereitungsgrade.

Die für den Brückenbau üblichen geltenden Anforderungen an die Fertigung und an die Oberflächenbeschaffenheit der Stähle sind seitens des Stahlbaubetriebes umzusetzen. Sichtbare vorhandene Oberflächenunregelmäßigkeiten bzw. evtl. Oberflächenfehler auf den Stahlbauteilen sind durch den Stahlbaubetrieb vor Durchführung der Feuerverzinkung zu beseitigen.

Stahlbauteile mit stark verzunderten Oberflächen oder starkem Rostansatz sollten vor dem Feuerverzinken gestrahlt werden, um kurze Beizezeiten im Feuerverzinkungsbetrieb zu ermöglichen.

Brennschnittflächen und Schnittkanten

Brenngeschnittene Flächen sind durch den Stahlbaubetrieb vor dem Feuerverzinken sorgfältig mechanisch zu überarbeiten, um Minderzinkschichtdi-

cken ($< 200 \mu\text{m}$) zu minimieren bzw. zu vermeiden. Hierbei sind mindestens 0,2 mm mechanischer Abtrag der Brennschnittflächen mit dem Winkelschleifer (oder auch gleichwertige Alternativen) vorzusehen. Ein anschließendes grobes Strahlen der Brennschnittfläche ist vorteilhaft. Dabei ist zu beachten, dass glatte Flächen nach dem Strahlen nicht mehr vorhanden sein dürfen. Eine denkbare Alternative zum Brennschneiden könnte das Wasserstrahlschneiden darstellen. Dies wurde in dem Projekt jedoch nicht untersucht.

Alle Schnittkanten sind seitens des Stahlbaubetriebes vor dem Feuerverzinken umlaufend mit einem Radius von 2 mm herzustellen. Alternativ ist ein dreifaches Brechen der Schnittkante gemäß ZTV-ING Teil 4, Abschnitt 3, Anhang A, Bild A 4.3.8 [17] möglich.

Auf die Rundung von gewalzten Kanten an Profilen und Blechen kann verzichtet werden.

Freischnitte / Durchflussöffnungen

Für das Feuerverzinken sind die Stahlbauteile mit hinreichend großen Freischnitten und Durchflussöffnungen zu versehen. An evtl. Rippen sind diese in Form von Kreisschnitten auszuführen. Die Durchflussöffnungen an den Endfeldern sind im Steg ebenfalls als Kreisschnitt mit mind. 50 mm Radius herzustellen. Die Festlegung der Größe und der Lage der Freischnitte ist stark von der Konstruktion abhängig und sollte daher in enger Abstimmung mit dem Feuerverzinkungsunternehmen erfolgen. Größere Freischnitttradien sind aus fertigungstechnischer Sicht ebenfalls vorteilhaft. Kreuzende Schweißnähte werden vermieden und die Qualität der Schweißnähte beim Umschweißen der Blechkanten wird begünstigt.



Bild 43: Zu klein dimensionierte Öffnung in der aufgeschweißten Lasche (IFG)

Anschlagpunkte / Hebeösen

Für das Feuerverzinken sind Anschlagpunkte (aufgeschweißte Laschen, s. Kapitel 7.8) oder Hebeösen notwendig. Diese sind vorab in der Stahlbauplanung für die Temperaturbelastung von ca. 450°C während des Feuerverzinkens zu bemessen. Die Lage der Anschlagpunkte und die Größe der Öffnungen in den Laschen für die Anschlagmittel muss in enger Abstimmung mit der Feuerverzinkerei erfolgen (Bild 43). Bei entsprechender Planung können die Laschen für den Transport und die Montage verwendet werden, verbleiben am Bauteil und werden mit einbetoniert.

Geometrievermessung und Absetzböcke

Für das ausführende Feuerverzinkungsunternehmen sind seitens des Stahlbaubetriebes entsprechende Absetzböcke (s. Kapitel 9.2.4) zum Ablegen der noch heißen Stahlträger unmittelbar nach der Feuerverzinkung vorzubereiten. Es empfehlen sich Geometrievermessungen

- vor dem Feuerverzinken,
 - unmittelbar (provisorisch) nach dem Feuerverzinkungsprozess und
 - nach dem Feuerverzinken / Abkühlen
- durchzuführen.

Arbeitsproben

Die Herstellung von Arbeitsproben ist nicht zwingend erforderlich. Bestehen jedoch evtl. Unklarheiten oder wenig Erfahrung bei den ausführenden Betrieben (z. B. bei den chemischen Zusammensetzungen der Stahlwerkstoffe oder bei der Bearbeitung der Brennschnittflächen), empfiehlt es sich vor der Fertigung der Brückenbauteile kleine Arbeitsproben (z. B. $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times$ Blechdicke, s. Kapitel 8.4) aus dem für das Projekt vorgesehenen Stahlwerkstoff herzustellen. Hierbei sollten die tatsächlich eingesetzten Materialdicken, Stahloberflächen und "voraussichtliche" Tauchzeiten verwendet werden. Die Arbeitsproben dienen zur Qualifizierung der erforderlichen Zinkschichtdicke ($> 200 \mu\text{m}$) auf der Stahloberfläche und evtl. am Brennschnitt in Hinblick auf eine prognostizierte Korrosionsschutzdauer von 100 Jahren.

Für den Fall, dass Arbeitsproben angefertigt werden sollen ist der Umfang aller notwendigen Arbeitsproben vorab zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abzustimmen.

MT-Prüfungen

Die Bauteile unterliegen den Anforderungen der aktuell gültigen DAST-Richtlinie 022 [9]. Sofern aufgrund dieser Richtlinie MT-Prüfungen an den feuerverzinkten Stahlbauteilen durchzuführen sind, ist zu beachten, dass MT-Prüfungen bis ca. 350 µm Zinkschichtdicke durchgeführt werden können. Danach fällt die Prüfempfindlichkeit ab. Bei sehr hohen Zinkschichtdicken ist eine MT-Prüfung nicht ohne weiteres möglich. Sind höhere Zinkschichtdicken als 350 µm vorhanden, müssen diese in diesen Prüfbereichen für eine MT-Prüfung entweder bis auf < 350 µm (aber nicht weniger als 200 µm) herunterschleift werden oder andere Untersuchungsmethoden durchgeführt werden. Sofern MT-Prüfungen nach DAST-Richtlinie 022 [9] überhaupt notwendig sind, sollten diese frühzeitig zwischen den Beteiligten koordiniert werden. Durch eine geschickte Konstruktions- und Detailplanung kann unter Umständen gänzlich auf die MT-Prüfung verzichtet werden (z. B. Vertrauenszone 1 nach DAST-Richtlinie 022).

Montageschweißstöße

Die Ausbildung von evtl. Montageschweißstößen ist von der Gesamtlänge des Bauwerks, den max. Bauteilabmessungen und Bauteilgewichten (gemäß den Möglichkeiten der Feuerverzinkungsbetriebe) und von den örtlichen Gegebenheiten des geplanten Bauwerks abhängig. Über die Lage bzw. Planung und Festlegung der Montagestöße können Bauteilabmessungen und Gewichte (s. Kapitel 4.4, 4.3 und 3.3) entsprechend angepasst werden.

Sollten nach der Feuerverzinkung Schweißstöße zur Anwendung kommen, die thermisch gespritzt werden, ist das ausführende Unternehmen für das thermische Spritzen frühzeitig hinzuzuziehen. Die

Schweißstöße sind vor dem Feuerverzinken seitens des Stahlbauers vorzubereiten und mit einem Abdecklack (s. Kapitel 8. 2) zu versehen. Arbeitsproben für das thermische Spritzen sind nicht zwingend erforderlich, sie könnten jedoch zur fachgerechten Herstellung des Montageschweißstoßes, zur Ausbesserung von evtl. Montageschäden und zur Festlegung der farblichen Gestaltung der Versiegelung dienen.

Gewichtszunahme durch die Feuerverzinkung

Bei der Bemessung der Stahlträger durch den Ingenieur kann die Gewichtszunahme durch die Feuerverzinkung in der Planungsphase bereits berücksichtigt werden. Als Annahme zur Festlegung / Ermittlung der Eigenlasten der Stahlträger kann für die Bemessung ca. 3 % bis ca. 6,5 % (konservativer Wert) Gewichtszuschlag durch die Feuerverzinkung in Ansatz gebracht werden.

Anmerkung: Gemessen an den baupraktischen Gewichtszunahmen im Massivbrückenbau ist die Gewichtszunahme im Zuge der Feuerverzinkung vernachlässigbar.

11 Zusammenfassung

Der Korrosionsschutz der Stahlbauteile der Stahlverbundkonstruktion dieses Pilotprojektes (Bild 45) wurde als Feuerverzinkung in Kombination mit thermisch gespritzten Baustellenmontagestößen ausgeführt.

Die hauptsächlich werksseitigen Korrosionsschutzmaßnahmen vereinfachen den Arbeitsaufwand auf der Baustelle. Der Prozess des thermischen Spritzens auf der Baustelle war unproblematisch. Die



Bild 44: Zur Fertigstellung Ortstermin mit dem BMVI an der A 44 an Deutschlands erster feuerverzinkten Stahl-Verbundbrücke (IFG)



Bild 45: Gesamtansicht der fertiggestellten Brücke (DEGES/ Frank Zerbst)

Feuerverzinkung hat sich, wie erwartet, als ausreichend robust erwiesen, den wesentlichen Beanspruchungen aus der Baustellenmontage zu widerstehen. Kleinere Beschädigungen an der Feuerverzinkung, verursacht durch Transport und Montage, wurden durch Strahlen / Sweepen und anschließend thermischen Spritzen beseitigt.

Besonderheiten wie bspw. die konstruktiven Vorgaben der DIN EN ISO 14713-2 [10] oder der DAST-Richtlinie 022 [9] sind in der jeweils aktuell gültigen Fassung auch bei der Planung künftiger Bauwerke zu berücksichtigen. Auch in der Stahlbaufertigung sind die Anforderungen, die aus einer feuerverzinkten Konstruktion entstehen, zu beachten.

Durch die Feuerverzinkung hat man mit einer weiteren Fertigungsstätte (Feuerverzinkungsunternehmen) zu tun, die in der Regel nicht an dem Ort der Stahlbaufertigung liegt. Ein geringfügig höherer Aufwand, der sich bspw. über zusätzliche Transportwege oder auch durch besondere Vorgaben an Konstruktion und Fertigung ergibt, ist gegenüber den langfristigen Vorteilen vernachlässigbar.

Das Pilotprojekt zeigt, dass für Brückenbauwerke kurzer und mittlerer Spannweiten (z. B. 40 Meter analog zum Pilotprojekt) eine gut vorbereitete und fachgerecht durchgeführte Feuerverzinkung in Kombination mit den thermisch gespritzten Baustellenmontagestößen eine praxistaugliche, dauerhafte, kostengünstige und robuste Korrosionsschutzlösung darstellt.

Auch die spezifischen Besonderheiten der Feuerverzinkung haben bei der Realisierung dieses viel beachteten Pilotprojektes keine wesentlichen Abweichungen zu einer konventionellen Bauwerksherstellung bedeutet, so dass von grundsätzlich positiven Erfahrungen (Bild 44) berichtet werden kann.

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und dem Kostenvergleich zwischen feuerverzinkter und konventionell beschichteter Brücke zeigt sich, dass eine dauerhafte, feuerverzinkte Konstruktion deutliche Kostenvorteile in der Gesamtheit der Herstellungs- und Lebensdauerkosten gegenüber einer konventionell organisch beschichteten Konstruktion haben kann.

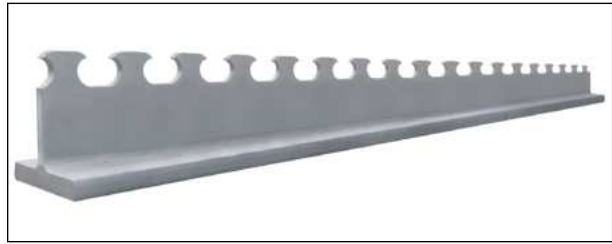


Bild 46: Feuerverzinkte Verbunddübelleiste (IFG)

12 Ausblick

Derzeit befinden sich weitere Forschungsprojekte zum Feuerverzinken im Brückenbau in der Bearbeitung, um zukünftig auch geschraubte feuerverzinkte Laschenstöße oder Vergussknoten als Alternativen zum geschweißten Montagestoß ausführen zu können.

Im Jahr 2019 wurde zudem ein Forschungsprojekt mit feuerverzinkten Verbunddübelleisten [25] erfolgreich zum Abschluss gebracht. Verbunddübelleisten sind für den Brückenbau eine relativ junge Konstruktionsweise und die Anwendung ist über eine allgemeine Bauartgenehmigung aBG [26] geregelt. In dem Forschungsprojekt wurde der Einfluss der Feuerverzinkung auf das Ermüdungsverhalten und die Zuordnung zu einer Detailkategorie nach DAST-Richtlinie 022 [9] hin untersucht. Die Ergebnisse für die Feuerverzinkung sind äußerst positiv.

Mit den Forschungsergebnissen ist der Weg frei für die weitere Anwendung. Mit der Elster-Brücke (Bilder 16, 46) in Halle wurde in Deutschland bereits die erste feuerverzinkte Stahlverbundbrücke in Verbunddübel-Bauweise realisiert [27] und weitere Projekte mit feuerverzinkten Verbunddübelleisten befinden sich derzeit in der Planung.

Feuerverzinken eröffnet neue Möglichkeiten, spart Kosten und bietet einen dauerhaften, wartungsfreien und nachhaltigen Korrosionsschutz im Straßenbrückenbau. Im Ausland kommt die Feuerverzinkung für tragende Stahlbauteile im Brückenbau bereits seit vielen Jahrzehnten erfolgreich zur Anwendung. In Deutschland sind in den letzten Jahren aufgrund der positiven Forschungsergebnisse und der erbrachten Nachweise bereits mehrere Brücken mit feuerverzinktem Stahl erfolgreich realisiert oder ertüchtigt worden [27, 28]. Es ist zu erwarten, dass insbesondere im Bereich der kurzen und mittleren Spannweiten die Feuerverzinkung verstärkt zur Anwendung kommen wird.

Die Autoren bedanken sich bei allen Beteiligten, die zum erfolgreichen Abschluss dieses Projektes beigetragen haben.

Literatur

- [1] UNGERMANN, D. ; RADEMACHER, D. ; OECHSNER, M.; LANDGREBE, R.; ADELMANN, J.; SIMONSEN, F.; FRIEDRICH, S.; LEBELT, P.: „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau“, IGF-Projekt Nr.: 351/ ZBG, FOSTA Forschungsbericht P835, Düsseldorf, 2014.
- [2] UNGERMANN, D.; RADEMACHER, D.; OECHSNER, M. et al.: „Feuerverzinken im Brückenbau“, Fachzeitschrift: Stahlbau 84 (2015), Heft 1, S. 2-9.
- [3] UNGERMANN, D.; RADEMACHER, D.; OECHSNER, M. et al.: „Feuerverzinken im Brückenbau“, Fachzeitschrift: Stahlbau 84 (2015), Heft 2, S. 119-123.
- [4] RADEMACHER, D.: „Zur sicheren Anwendung feuerverzinkter Bauteile im Stahl- und Verbundbrückenbau“, Dissertation, Lehrstuhl Stahlbau, TU Dortmund, 2017.
- [5] DIN EN ISO 1461: Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgetragene Zinküberzüge (Stückverzinken) - Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe 2009-10, Beuth Verlag, Berlin.
- [6] DIN EN ISO 2063: Thermisches Spritzen - Zink, Aluminium und ihre Legierungen, Akt. Ausgaben Teil-1: 2019-07, Teil-2: 2018-02 (Vorgängerdokument Ausgabe 2005-05), Beuth Verlag, Berlin.
- [7] LEBELT, P.; GEHRKE, J.: Korrosionsschutztechnologie für Montageschweißstöße einer feuerverzinkten Stahlbrücke. Fachzeitschrift: Stahlbau 86 (2017), Heft 2, S. 191-196.
- [8] KUHLMANN, U.; MAIER, P.; UMMENHOFER, T.; ZINKE, T.; FISCHER, M.; SCHNEIDER, S. et al: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken - Bericht zum Forschungsprojekt FE 089.0291/2013. BAST - Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 112, Fachverl. NW, Bergisch Gladbach, 2015.
- [9] DAST-Richtlinie 022: Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen, Akt. Ausgabe 2016-06 (Vorgängerdokument Ausgabe 2009-08), DAST - Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf.
- [10] DIN EN ISO 14713-2: Zinküberzüge - Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion - Teil 2: Feuerverzinken, Akt. Ausgabe 2020-05 (Vorgängerdokument Ausgabe 2010-05), Beuth Verlag, Berlin.
- [11] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung, Akt. Ausgabe 2010-12, Beuth Verlag, Berlin.
- [12] DIN EN 1993-2: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken, Akt. Ausgabe 2010-12, Beuth Verlag, Berlin.
- [13] DIN EN 1994-2: Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton - Teil 2: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken, Akt. Ausgabe 2010-12, Beuth Verlag, Berlin.
- [14] DIN EN 10025 Teil 2 - 4: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen, Akt. Ausgabe 2019-10 (Vorgängerdokumente Ausgabe 2005-02 / 2005-04), Beuth Verlag, Berlin.
- [15] DIN EN ISO 12944-3: Beschichtungssysteme - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 3: Grundregeln zur Gestaltung, Akt. Ausgabe 2018-04 (Vorgängerdokument Ausgabe 1998-07), Beuth Verlag, Berlin.
- [16] DIN EN ISO 14713-1: Zinküberzüge - Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion - Teil 1: Allgemeine Konstruktionsgrundsätze und Korrosionsbeständigkeit, Akt. Ausgabe 2017-08 (Vorgängerdokument Ausgabe 2010-05), Beuth Verlag, Berlin.
- [17] ZTV-ING - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau, Abschnitt 3, Korrosionsschutz von Stahlbau-

- ten, Akt. Ausgabe 2013-12, BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- [18] DIN EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Akt. Ausgabe 2018-09 (Vorgängerdokument Ausgabe 2011-10), Beuth Verlag, Berlin.
- [19] DIN EN 10163-2: Lieferbedingungen für die Oberflächenbeschaffenheit von warmgewalzten Stahlerzeugnissen (Blech, Breitflachstahl und Profile) - Teil 2: Blech und Breitflachstahl; Akt. Ausgabe 2005-03, Beuth Verlag, Berlin.
- [20] DIN EN 10163-3: Lieferbedingungen für die Oberflächenbeschaffenheit von warmgewalzten Stahlerzeugnissen (Blech, Breitflachstahl und Profile) - Teil 3: Profile; Akt. Ausgabe 2005-03, Beuth Verlag, Berlin.
- [21] DIN EN ISO 8501-3: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen - Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit - Teil 3: Vorbereitungsgrade von Schweißnähten, Kanten und anderen Flächen mit Oberflächenunregelmäßigkeiten; Akt. Ausgabe 2007-10, Beuth Verlag, Berlin.
- [22] SCHULZ, W.-D.; SCHUBERT, P.; KATZUNG, W. et al.: Lokale Abplatzungen auf feuerverzinktem Stahl – Richtiges Sweepen von Feuerzink-überzügen nach DIN EN ISO 1461. Fachzeitschrift: Der Maler und Lackierermeister (1999), Heft 7, S. 479-484.
- [23] Informationsschrift Institut Feuerverzinken GmbH: „Feuerverzinkte Stahl- und Verbundbrücken mit Arbeitshilfe zur Planung und Ausführung von feuerverzinkten Stahlkonstruktionen im Straßenbrückenbau“, Akt. Ausgabe 2017 (Vorgängerdokument Ausgabe 2015), Düsseldorf.
- [24] UNGERMANN, D.; RADEMACHER, D.; PINGER, TH.; HECHLER, O.: „Entwurfshilfe zum Einsatz von feuerverzinkten Bauteilen im Stahl- und Verbundbrückenbau“, Heft B 505, Akt. Ausgabe 2016, bauforumstahl e. V., Düsseldorf.
- [25] FELDMANN, M.; KÜHNE, R.; UNGERMANN, D.; HOLTKAMP, S., IGF-Projekt Nr.: 18624 N: „Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Verbunddübelleisten im Verbundbrückenbau“, FOSTA Forschungsbericht P1042, Düsseldorf, 2020.
- [26] DIBt, Allgemeine Bauartgenehmigung Z-26.4-56 Stahlverbundträger mit Verbunddübelleisten in Klothoiden- und Puzzleform, Akt. Ausgabe 2018-05 (Vorgängerdokument Ausgabe 2013-05), Berlin
- [27] Internationale Fachzeitschrift „Feuerverzinken“, Special-Ausgabe: „Innovativer Brückenbau“, Ausgabe 2018, Institut Feuerverzinken GmbH, Düsseldorf.
- [28] Website der Institut Feuerverzinken GmbH: <https://www.feuerzinken.com/anwendungen/bauen/strassenbruecken>

Bilder

- Bild 1: Brücken an Bundesfernstraßen, Brückenflächen nach Bauweisen (BAST, 2020)
- Bild 2: Feuerverzinkte Stahlverbundbrücke über die A 44 bei Bischhausen (IFG)
- Bild 3: Summierte Lebenszykluskosten für die drei verschiedenen Korrosionsschutzvarianten (BAST [8])
- Bild 4: Externe Kosten über den gesamten Lebenszyklus für die drei Korrosionsschutzvarianten (BAST [8])
- Bild 5: Vergleichsbauwerk BW 08, konventionell organisch beschichtet (DEGES)
- Bild 6: Verfahrensablauf beim Feuerverzinken (IFG)
- Bild 7: Visualisierung / Entwurfsplanung (DEGES)
- Bild 8: Ansicht West, Zeichnung (DEGES)
- Bild 9: Regelquerschnitt, Zeichnung (DEGES)
- Bild 10: Ansicht Stahlverbundträger, Baustellenschweißstöße, Auszug Korrosionsschutzplan (DEGES)
- Bild 11: Feldfabrik vor Ort (IFG)
- Bild 12: Einrichtung der Feldfabrik (IFG)

- Bild 13: Thermisch gespritzter Baustellen-schweißstoß mit Markierungspunkten für die Langzeitmessung (IFG)
- Bild 14: Vorbereitung der Schalung für das Halbfertigteil (IFG)
- Bild 15.1 und 15.2: Einheben der Brücke (DEGES)
- Bild 16: Elster-Brücke in Halle - Deutschlands erste feuerverzinkte Stahlverbundbrücke in Verbunddübel-Bauweise (IFG)
- Bild 17: Freischnitte in der Konstruktion (IKS)
- Bild 18: Angeschlagenes feuerverzinktes Brückenteil (IFG)
- Bild 19: Auf dem Obergurt der feuerverzinkten Bauteile verbliebene Anschlagpunkte (IFG)
- Bild 20: Fertiggestellte Arbeitsproben der Montage-schweißstöße mit thermisch gespritztem und versiegeltem Überzug im Bereich der Schweißnaht (IKS)
- Bild 21: Arbeitsprobe für den Montage-schweißstoß, Abdecklack zur gezielten Vermeidung der Zinkannahme im Bereich der Schweißnaht (IFG)
- Bild 22: Feuerverzinken der Arbeitsproben (IFG)
- Bild 23: Arbeitsproben nach dem Feuerverzinken, Entfernen von anhaftenden Zinkrückständen im Bereich des Montage-schweißstoßes (IFG)
- Bild 24: Arbeitsproben - Herstellung des Montage-schweißstoßes (IFG)
- Bild 25: Maskierte (abgeklebte) Arbeitsproben im Bereich des Montageschweißstoßes (IKS)
- Bild 26: Arbeitsproben – Minderschichtdicken des Zinküberzuges im Bereich der Brennschnittfläche (IFG)
- Bild 27: Ergänzende Arbeitsproben / Blechproben (vor dem Feuerverzinken) mit verschiedenen Oberflächenbearbeitungen der Brennschnittflächen (Fa. Rädlinger)
- Bild 28: Ergänzende Arbeitsproben / Blechproben nach dem Feuerverzinken, hergestellt mit verschiedenen Tauchzeiten (IFG)
- Bild 29: Schematische Darstellung des Ausbesserungsbereichs (Modifizierte Grafik aus dem FOSTA Forschungsbericht P835 [1])
- Bild 30: Abdichtung der Fuge zwischen Beton-schalung und Stahlträger mit einem für Zinküberzüge geeigneten Silikon (IFG)
- Bild 31: Qualitätskontrolle der fertigen feuerverzinkten Brückensegmente (IFG)
- Bild 32: Äußeres Brückensegment während des Feuerverzinkungsprozesses (IFG)
- Bild 33: Äußeres Brückensegment nach dem Feuerverzinkungsprozess (IFG)
- Bild 34: Mittleres Brückensegment nach dem Feuerverzinkungsprozess (IFG)
- Bild 35: Krantransport des mittleren Brückensegmentes nach dem Feuerverzinkungsprozess (IFG)
- Bild 36: Vorbereitete Absetzböcke zum Ablegen der noch heißen feuerverzinkten Bauteile (IKS)
- Bild 37: Auf den mittig positionierten Absetzböcken abgelegtes Bauteil (IFG)
- Bild 38: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse für die vor Ort ermittelten örtlichen und durchschnittlichen Zinkschichtdicken an den Trägern Ost und West (IFG)
- Bild 39: Thermisch gespritzter Baustellen-schweißstoß mit Versiegelung in RAL 9006 (IKS)
- Bild 40: Achsen (A-D) zur Festlegung der Punkte für die Langzeitmessung (IFG)
- Bild 41: Querschnitt des Trägers an Achse A mit festgelegten Punkten (9 Stk.) zur Langzeitmessung (IFG)
- Bild 42: Thermisch gespritzter Baustellen-schweißstoß (Achse A) mit markierten Punkten für die Langzeitmessung (IFG)
- Bild 43: Zu klein dimensionierte Öffnung in der aufgeschweißten Lasche (IFG)
- Bild 44: Zur Fertigstellung Ortstermin mit dem BMVI an der A 44 an Deutschlands erster feuerverzinkten Stahl-Verbundbrücke (IFG)
- Bild 45: Gesamtansicht der fertiggestellten Brücke (DEGES / Frank Zerbst)
- Bild 46: Feuerverzinkte Verbunddübelleiste (IFG)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

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

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

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

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pouroustad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

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

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennerberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

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

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

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

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

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

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

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

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

Keßler, Gehlen € 16,00

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

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

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

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

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

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

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

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

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

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

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

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

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

Lebhardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

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

Butz

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

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

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

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

Müller

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

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

Hindersmann

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

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

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

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

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

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

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

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

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

B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

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

B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

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

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

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

www.schuenemann-verlag.de

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