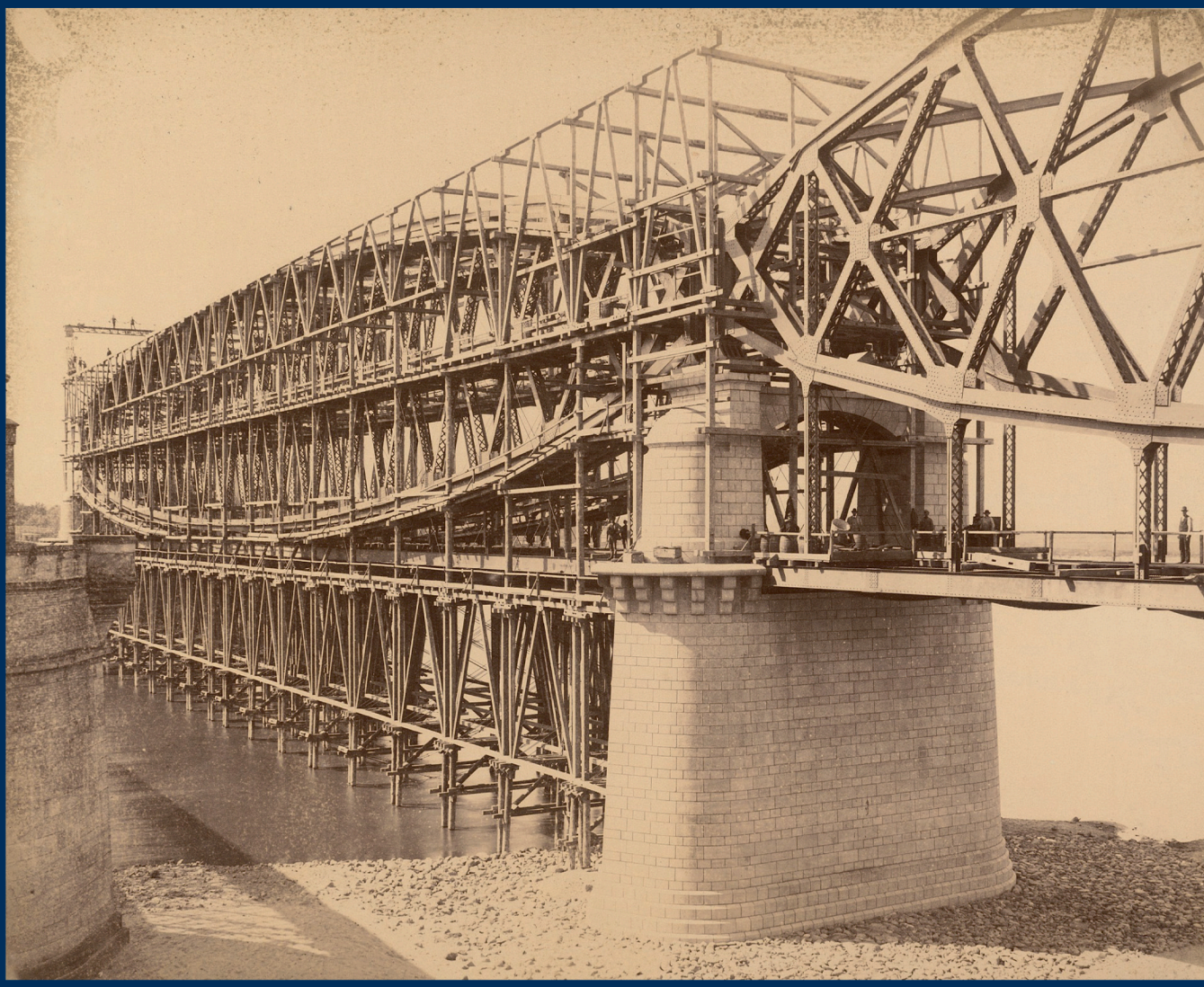
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.dbbs.tu-dresden.de



27. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

13./14. MÄRZ 2017

© 2017 Technische Universität Dresden
Alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Technische Universität Dresden Institut für Massivbau 01062 Dresden
Redaktion:	Silke Scheerer, Angela Heller
Layout:	Ulrich van Stipriaan
Anzeigen:	Harald Michler
Titelbild:	Neue Weichselbrücke, Dirschau – Ansicht vor Fertigstellung 1891 Foto: Ferdinand Schwarz, Architekturmuseum der TU Berlin, Inv. Nr. BZ-F 14,025
Druck:	addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-510-0

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Institut für Massivbau http://massivbau.tu-dresden.de

Tagungsband
27. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau
Freunde des Bauingenieurwesens e.V.
TUDIAS GmbH

13. und 14. März 2017

Inhalt

Herzlich willkommen zum 27. Dresdner Brückenbausymposium 9
Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen

Verleihung der Wackerbarth-Medaille 11
Prof. Dr.-Ing. Hubertus Milke
Laudatio 12
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Zu aktuellen Entwicklungen im Stahl- und Stahlverbundbrückenbau
– Fokus: Korrosionsschutz 15
TRDir Dr.-Ing. Gero Marzahn

Brücken in Lateinamerika – Technik und Geschichte..... 25
Dr. Dirk Bühler

Das alte und das neue Ottendorfer Viadukt 43
Prof. Dr.-Ing. Thomas Bösche, Dipl.-Ing. Elke Hering, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Jens Otto
Dr.-Ing. Stephan Teich

Neubau einer „atmenden" Stadtbahnbrücke in Düsseldorf 57
Dipl.-Ing. Sonja Rode, Dipl.-Ing. Tobias Riebesehl, Dipl.-Ing. Thomas Neysters,
Dipl.-Ing. Guido Herbrand

Sanierung der historischen Betonbogenbrücke in Naila 71
Dipl.-Ing. Ammar Al-Jamous, Dipl.-Ing. Karsten Uhlig

Georg Christoph Mehrtens (1843–1917): Protagonist
des Stahlbrückenbaus im wilhelminischen Deutschland 81
Dr.-Ing. Karl-Eugen Kurrer

Lebenslanger Korrosionsschutz – Pilotprojekt Stahlverbundbrücke 103
Dr.-Ing. Stefan Franz

Interaktion zwischen Praxis und Forschung
– Systematische Nachrechnung des Brückenbestands in Mecklenburg-Vorpommern 117
Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Hon.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Mertzsch, Dr.-Ing. Torsten Hampel
Dipl.-Ing. Nico Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Chemnitztalviadukt – Neubau versus Bestandserhaltung 131
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann, Dipl.-Ing. (FH) Lutz Buchmann, Dipl.-Ing. Toralf Zeißler
Dipl.-Ing. Steffen Oertel

Verstärkung von Stahlbrücken in den Niederlanden
– Einsatz von hochfestem Beton und zielgerichtete Tragwerksverstärkung 151
M.Sc. Dimitri Tuinstra, Dr.-Ing. Markus Gabler

Neue Queensferry-Brücke in Schottland
Herausforderungen bei der Planung und Montage 161
Dipl.-Ing. Martin Romberg

Brückenbauexkursion 2016 – Hup Holland Hup 177
Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Jakob Bochmann

Chronik des Brückenbaus 187
Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner

Inserentenverzeichnis 208

Lebenslanger Korrosionsschutz – Pilotprojekt Stahlverbundbrücke

Dr.-Ing. Stefan Franz
DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin

1 Einführung

In den vergangenen Jahren haben der Begriff und das Verständnis vom nachhaltigen Bauen mehr und mehr Einzug in alle Belange des Baugeschehens erhalten. Der Leitgedanke eines ressourcenschonenden Bauens durch besonders langlebige und umweltschonende Bauprodukte fasste zunächst im Hochbau Fuß. Mittlerweile hat die überzeugende Betrachtung der Lebenszykluskosten (*life cycle costs*) auch die Domäne des Ingenieurbaus erreicht. Das gilt zumindest für die Beachtung in der Planungsphase; in der Vergabepraxis ist dieser Aspekt bisher kaum umgesetzt worden.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit nimmt hierbei durchaus eine Vorreiterrolle ein. Bereits im April 2002 wurde von der Bundesregierung die nationale Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland" verabschiedet, aktuell „Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie – Neuauflage 2016" [1]. Seither engagieren sich die zuständigen Ressorts für die Entwicklung von Leitfäden (z. B. Leitfaden für Nachhaltiges Bauen, aktuell Stand Februar 2016 [2]), hierauf ausgerichtete Forschungsförderung und konkrete Projekte (z. B. Null-Energie- oder Plus-Energie-Häuser). Daraufhin befassten sich auch diverse Forschungsarbeiten mit der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf den Ingenieurbau.

Im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse im Brückenbau spielen neben der Recyclingfähigkeit der verwendeten Baustoffe und einer CO_2-minimierten Herstellung auch Sekundäreffekte, wie eine Minimierung der Verkehrseinschränkungen bei der Herstellung und während der Nutzung, eine entscheidende Rolle. Der Geldwert eines Mehrverbrauchs an fossilen Brennstoffen für den Antrieb von Fahrzeugen infolge Stausituationen oder Umleitungsstrecken sowie der volkswirtschaftliche Schaden aus den entstehenden Verzögerungen summieren sich schnell zu einer beachtlichen Größe, die bei hochfrequentierten Verkehrswegen die Herstellungskosten deutlich übersteigen können.

Bei Brückenbauwerken ist während des langen Lebenszyklus eine Vielzahl von kleineren und größeren Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich, die für eine ganzheitliche Betrachtung nicht zu vernachlässigen sind. Insbesondere für Stahl- und Stahlverbundbrücken stellen der Korrosionsschutz und dessen Erhaltung wichtige Aspekte dar.

Der hohe Stahlanteil bei Stahl- bzw. Stahlverbundbrücken führt hinsichtlich der Nachhaltigkeit grundsätzlich zu einer guten Bewertung, da der Stahl nahezu vollständig recycelt werden kann. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit der Stahlkonstruktion ist allerdings die Applikation eines Korrosionsschutzes erforderlich. Heute wird der Korrosionsschutz zwar nicht mehr auf Basis von Schwermetallen (wie z. B. Bleioxid/Mennige) ausgeführt, sondern in der Regel mittels mehrlagiger organischer Beschichtungen (gespritzt oder mit Pinsel aufgetragen). Dennoch ist die Haltbarkeit selbst hochwertiger Beschichtungssysteme unter heutigen Umweltbedingungen auf 25 bis 30 Jahre begrenzt. Damit ist eine vollständige Erneuerung mindestens zweimal während der Lebensdauer eines Bauwerks erforderlich. Das hierbei anfallende Strahlgut muss umweltgerecht und somit kostenintensiv entsorgt werden.

Gerade die Erneuerung des Korrosionsschutzes kann aber die oben genannten Sekundäreffekte nach sich ziehen. Ein Beispiel hierfür sind Stahlverbundkonstruktionen für Wirtschaftswegeüberführungen, die zwar in ihrer Erscheinung attraktiv sind, deren Instandsetzung aber den untenliegenden Verkehr des Hauptverkehrsweges beeinträchtigen kann. Ferner genannt seien Straßenbrücken über Bahnanlagen, die unter Umständen schon wegen der geringen zur Verfügung stehenden Konstruktionshöhe oder aus Montagegründen als Stahl- oder Stahlverbundkonstruktionen ausgebildet wurden. Hier ist bei einer Erneuerung des Korrosionsschutzes unmittelbar mit längerfristigen Auswirkungen auf den Gleisbetrieb zu rechnen.

Offensichtlich gibt es also aus volkswirtschaftlichen und umweltfachlichen Gesichtspunkten ein großes Interesse an einem langlebigen und recyclingfähigen Korrosionsschutz für Brückenbauwerke. Vor dem Hintergrund der langjährigen und ausgezeichneten Erfahrungen im Hochbau entstand die Idee, die Methode des Feuerverzinkens auch im Brückenbau zum Einsatz zu bringen.

Bild 1 Tauchbecken zur Vorbehandlung in einer Verzinkerei Foto: © DEGES

Bislang lagen jedoch keine ausreichenden, wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse dazu vor, ob sich eine Feuerverzinkung nachteilig auf den Ermüdungswiderstand von Stahlkonstruktionen auswirkt. Daher kam das Feuerverzinken für Verkehrswegebrücken in Stahl- und Verbundbauweise bislang innerhalb Deutschlands nicht zum Einsatz.

In dem Forschungsvorhaben P 853 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) „Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau" wurde unter der Federführung der TU Dortmund in Zusammenarbeit mit der MPA Darmstadt und dem IKS Dresden untersucht, ob und wie sich die Feuerverzinkung auf den Ermüdungswiderstand geschweißter Stahlkonstruktionen auswirkt [3].

Nach dem Vorliegen erster Forschungsergebnisse setzte sich DEGES gemeinsam mit dem Forschungsträger dafür ein, die Feuerverzinkung einer Stahlverbundbrücke in einem Pilotprojekt erstmalig in Deutschland im Zuständigkeitsbereich der Straßenbauverwaltung zu realisieren. Hierüber soll im Folgenden berichtet werden.

2 Feuerverzinken – Grundlagen

Zum besseren Verständnis sollen zunächst einige verfahrenstechnische Grundlagen des Feuerverzinkens zusammengetragen werden. Dies erfolgt im Sinne einer Einführung in die Materie und erhebt selbstverständlich nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Beim Feuerverzinken oder auch Stückverzinken nach DIN EN ISO 1461 [4] werden vorgefertigte und vorbehandelte Bauteile in eine flüssige Zinkschmelze (ca. 450 °C) eingetaucht. Im Kontakt mit dem Stahl bilden sich eine dünne Legierungsschicht und darauf eine kristalline Zinkdeckschicht aus. Die erreichbare Gesamtdicke der Zinkschicht hängt im Wesentlichen von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes (Stahl) und dessen Materialstärke ab, weniger von der Verweildauer im Zinkbad, da sich ein ausgeprägter Sättigungseffekt einstellt.

Für den Tauchvorgang müssen ausreichend große Becken zur Verfügung stehen. Umgekehrt begrenzen die verfügbaren Beckengrößen die möglichen Bauteilabmessungen, die in einem Stück verzinkt werden können. Derzeit gibt es nur wenige Verzinkereien, die Becken mit mehr als 19 m Länge besitzen. Hieraus folgt, dass größere Bauteile nach dem Verzinken gestoßen werden müssen.

In dem Pilotprojekt wurden Schweißstöße ausgebildet, da diese durch die Ergebnisse des oben genannten Forschungsvorhabens abgedeckt waren. Andere Stoßausbildungen sind grundsätzlich möglich, aber derzeit noch Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten. Im Bereich der Schweißstöße muss nachverzinkt werden. Hierfür kommt das thermische Spritzverzinken nach DIN EN 2063 [5] zum Einsatz, bei dem auf die vorbehandelte (und normaltemperierte) Stahloberfläche das in einem Lichtbogen oder einer Flamme verflüssigte Zink aufgespritzt wird. Die Schweißnahtbereiche werden vorher

im Zinkbad durch geeignete Abklebungen gegen Zinkanlagerung geschützt.

Die Verfahrensschritte bei der Feuerverzinkung gliedern sich in drei wesentliche Phasen:

- ❑ Vorbehandeln,
- ❑ Tauchen,
- ❑ Nachbehandeln.

Die Vorbehandlung ähnelt der vor dem Aufbringen einer konventionellen organischen Beschichtung. Zunächst werden die Bauteile entzundert und gestrahlt. Letzte Oberflächenverunreinigungen werden nach dem Entfetten in einer Lauge und dem Spülen dann in einem Säurebad (verdünnte Salzsäure) bei ca. 40 °C entfernt. Um die blasenfreie Ausbreitung des Zinks auf der Stahloberfläche günstig zu beeinflussen, wird der warme Stahl in ein Bad mit Fließmittel getaucht („Fluxen") und anschließend getrocknet.

Der Transport der Bauteile innerhalb der Werkhalle einer Verzinkerei erfolgt üblicherweise über Kranbahnen mittels Traversen, an denen die Bauteile befestigt sind (mit Rödeldraht oder Ketten, je nach Gewicht). Die Bauteile werden zuvor nach Materialart und -stärke im Hinblick auf die Verarbeitungszeiten (z. B. Durchwärmen) und die angestrebte Zinkschichtdicke sortiert und so von Becken zu Becken verfahren.

Das Tauchen erfolgt nach einer zuvor festgelegten Prozedur (z. B. hinsichtlich Eintauchgeschwindigkeit, Verweildauer). Ein schnelleres Eintauchen reduziert das Risiko des Verzugs infolge Eigenspannungen des Werksstücks, erfordert aber ggf. größere Öffnungen, damit das Zink schnell alle Bauteiloberflächen erreichen kann. Die Einhaltung einer Mindestverweildauer stellt das Erreichen der planmäßigen Zinkschichtdicke sicher.

Da die spezifischen Dichten von Eisen (7,87 g/cm³) und Zink (7,19 g/cm³) ziemlich nah beieinander liegen, schwimmen die Bauteile quasi in der Zinkschmelze. Darauf ist bei der Befestigung der Bauteile und bei einem Schwenken im Bad unbedingt zu achten. Weitere Hinweise können der DASt-Richtlinie 022 „Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen" [6] entnommen werden, die nach dem Auftreten von Schäden u. a. an Mautbrücken eingeführt wurde.

Zur Nachbehandlung gehört in erster Linie das Entgraten nach dem Herausheben aus dem Zinkbad. Je nach Anforderung können aber auch noch weitere Beschichtungen aufgebracht werden. Häufig wird eine Passivierung vorgenommen, um die Reaktionsbereitschaft des reinen Zinks an der Oberfläche zu reduzieren. Eine Passivierung tritt aber auch von alleine durch die Ausbildung einer Patina (Zinkcarbonate) ein, die die Reaktionsgeschwindigkeit innerhalb kurzer Zeit deutlich absinken lässt.

Nach dem Abkühlen können aber auch zusätzliche organische Farbbeschichtungen aufgebracht werden. Solche Duplexsysteme erhöhen die Korrosionsschutzwirkung nochmals erheblich, da sich hier eine unabhängige Schutzwirkung überlagert. Erst wenn die organische Beschichtung versagt, beginnt überhaupt der Zinkabtrag. Zu einer Korrosion des Stahls kommt es erst, wenn auch die Zinkschicht aufgezehrt ist. Da dies in der Regel nicht flächig der Fall ist, können mit örtlichen Ausbesserungen sehr lange Schutzdauern erreicht werden.

Während des gesamten Verzinkungsprozesses sind umfangreiche Arbeitsschutzbestimmungen zu beachten, zu deren Einhaltung das Personal regelmäßig geschult wird. Der Umgang mit Säuren und Laugen, aber auch die großen Temperaturunterschiede beim Tauchen und der Umgang mit den erhitzten Bauteilen und nicht zuletzt die Steuerung des Prozesses und die geeignete Gruppierung von Bauteile stellen hohe Anforderungen an die Qualifikation des eingesetzten Personals.

Aus umweltfachlicher Sicht ist bemerkenswert, dass alle im Prozess verwendeten Substanzen aufbereitet und dem Werkstoffkreislauf wieder zugeführt werden. Je nach Ausstattung des Betriebes findet dies zum Teil sogar betriebsintern statt.

Die Dauerhaftigkeit einer Zinkbeschichtung und damit deren Wirksamkeit als Korrosionsschutz für ein Stahlbauteil sind in erster Linie von der Dicke der Zinkschicht und der Aggressivität der Umweltbedingungen abhängig. Demnach wächst die Schutzdauer mit größeren Zinkschichtdicken und sinkt bei größerer Umweltaggressivität. Um eine bestimmte

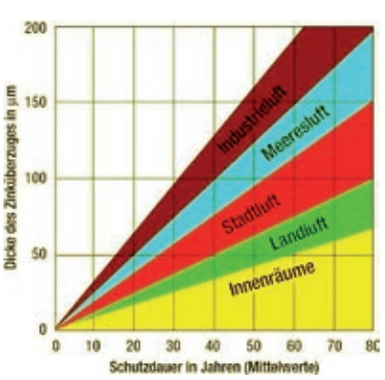


Bild 2 Schutzdauer von Zinküberzügen
aus: © Handbuch Feuerverzinken [8]

Schutzdauer erreichen zu können, bedarf es also einer Mindestschichtdicke der Zinkschutzschicht. Für die Zukunft wird sich günstig auswirken, dass seit geraumer Zeit – und hoffentlich weiterhin – die Luftverschmutzung mit chemisch aggressiven Schadstoffen allgemein rückläufig ist [7].

3 Stand der Forschung

Für den Korrosionsschutz von atmosphärisch beanspruchten Stahlbauteilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung hat sich das Feuerverzinken bewährt, ein wirksamer Korrosionsschutz über viele Jahrzehnte ohne Wartungs- und Instandhaltungszwang ist die Regel.

Brücken für Schienenwege und Straßen unterliegen nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen. Für diese Bauwerke sind daher Ermüdungsnachweise zu führen und eine Reihe von baustoffspezifischen Konstruktionsregeln zu beachten. Bislang lagen jedoch keine ausreichenden, wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse dazu vor, ob sich eine Feuerverzinkung nachteilig auf den Ermüdungswiderstand von Stahlkonstruktionen auswirkt. Daher konnte das Feuerverzinken für Verkehrswegebrücken in Stahl- und Verbundbauweise bislang innerhalb Deutschlands nicht zum Einsatz kommen.

Für den Nachweis einer Stahlkonstruktion gegen Ermüdung wird der negative Einfluss von lokalen Spannungsspitzen infolge von mehr oder weniger starken Steifigkeitssprüngen bzw. herstellungsbedingten Eigenspannungen durch die Einstufung regelmäßig wiederkehrender Konstruktionsdetails in Kerbfallklassen erfasst. Entsprechend der Zuordnung wird das zulässige Spannungsspiel infolge der veränderlichen Lastanteile ggf. abhängig von der zu erwartenden Lastspielzahl reduziert. Ausgehend von vorhandenen oder auch erst entstehenden Mikrorissen entwickelt sich infolge der lokalen Spannungsspitzen im Risstiefsten und infolge inelastischer Verfestigungseffekte ein Makroriss, der im Weiteren progressiv wächst und zu einem unterkritischen Versagen führt, d. h. bevor die rechnerische Bruttoquerschnittsfläche Spannungen auch nur annähernd in der Nähe der Streckgrenze ausgesetzt ist.

Solche anfänglichen Mikrorisse sind auch nach dem Feuerverzinken von Stahlbauteilen festgestellt worden, z. B. [3]. Allerdings liegen diese Risse bei ordnungsgemäßen Herstellungsbedingungen nicht im Grundmaterial des Stahls, sondern innerhalb der hauchdünnen innersten Legierungsschicht, der sogenannten δ_1-Phase. Aber auch von dort aus kann bei nicht vorwiegend ruhender Belastung ein Risswachstum einsetzen und letztlich zum Versagen führen.

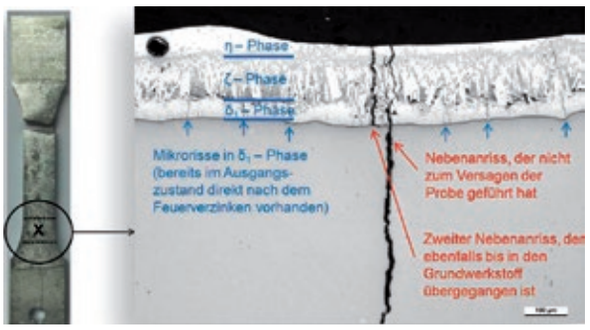


Bild 3 Rissentwicklung an einer verzinkten Stahlprobe
aus: FOSTA-Forschungsbericht P 853 [3]

Es hat sich gezeigt, dass im Vergleich zu einer unverzinkten Stahlprobe das Versagen des feuerverzinkten Probekörpers früher auftritt. Im Umkehrschluss darf man bei feuerverzinktem Stahl und sonst gleichem Konstruktionsdetail nur ein geringeres Spannungsspiel zulassen. Dieser Effekt ist bei günstigen Kerbfallklassen stärker ausgeprägt als bei schlechteren und macht maximal eine Stufe (Kerbfallklasse) aus. Dies hat zu der vorläufigen Einschätzung geführt, dass einheitlich eine Herabstufung um eine Kerbfallstufe ausreichend ist, falls die Konstruktion feuerverzinkt werden soll. Diese konservative Festlegung ist zutreffend für ermüdungsarme Konstruktionsdetails und bietet zusätzliche Sicherheit für ermüdungsempfindliche.

Zusammenfassend ließen sich für die Anwendung bei dem geplanten Pilotprojekt folgende Schlussfolgerungen ziehen [9]:

a. Aufgrund der Größe der verfügbaren Verzinkungsbecken waren Bauteilgrößen möglichst nur bis maximal 16 m Länge und ca. 10 t Einzelgewicht zu planen.

b. Stöße waren als Schweißstöße auszubilden und im Stoßbereich nachträglich mit einer thermischen Spritzverzinkung zu versehen.

c. Hinsichtlich der Stahlzusammensetzung waren zum Erreichen einer Mindestzinkschichtdicke von 200 µm Grenzwerte für den Silizium- und den Phosphorgehalt einzuhalten.

d. Es waren Arbeitsproben als Nachweis für das Erreichen der Schichtdicken und die Qualität der Stoßausbildung (einschließlich Spritzverzinkung) zu erstellen.

e. Für die Nachweise gegen Ermüdung war jeweils eine Einstufung in die nächstschlechtere Kerbfallstufe vorzunehmen.

f. Im Rahmen des Pilotprojektes wurde ein ge-

sondertes Überwachungs- und Monitoringprogramm vorgesehen.

Darüber hinaus war eine Reihe konstruktiver Regeln zu beachten:

g. Es war feuerverzinkungsgerecht zu konstruieren. Auf DIN EN ISO 14713-2 [10], Anhang A, und DASt-Richtlinie 022 [6] wird verwiesen.

h. Bei thermisch geschnittenen Blechen sollten die Kanten mit mindestens 2 mm ausgerundet werden. Die Verwendung von kaltverformten und kaltumgeformten Blechen war unzulässig.

i. Für den Verzinkungsvorgang waren ausreichend viele Durchflussöffnungen (Freischnitte mit 50 mm Durchmesser) bei eventuellen Aussteifungsrippen und am Ende des Steges vorzusehen.

j. Es waren geeignete Anschlagpunkte für den Verzinkungsprozess und den Transport zu planen.

k. Beim Zusammenbau war besonderes Augenmerk auf eine Schweißfolgeplanung zur spannungsarmen Fertigung zu legen. Vorteilhaft sind symmetrische Profilquerschnitte, eine symmetrische Anordnung der Schweißnähte, keine überdimensionierten Schweißnähte und der Eintrag geringer Streckenergie beim Schweißen.

4 Auswahl eines Pilotprojektes

Ein Pilotprojekt bewegt sich immer in dem Spannungsspiel zwischen verantwortungsvollem Umgang mit Steuermitteln und der damit verbundenen Zurückhaltung gegenüber ungeregelten und vermeintlich riskanten, in Zukunft möglichweise kostenträchtigen Bauweisen und demgegenüber der Aussicht, gerade durch innovative Bauweisen und Technologien künftig erhebliche Aufwendungen im Unterhalt und Betrieb der Bauwerke einsparen zu können. Im vorliegenden Fall war der Anreiz, die Unterhaltskosten für solche Bauwerke einschließlich der Kosten für die eingangs genannten Sekundäreffekte einsparen oder zumindest reduzieren zu können, besonders groß.

Die Auswahl des Pilotprojektes bzw. des Pilotbauwerks erfolgte anhand mehrerer Gesichtspunkte. Es sollte sich bei dem Bauwerk um einen Neubau handeln, damit alle Aspekte der Planung und Herstellung abgebildet werden können. Im Hinblick auf die im Rahmen des Forschungsprojektes [3] bestätigten erhöhten Anforderungen an die Ermüdungssicherheit drängte sich auf, grundsätzlich einen Bauwerkstyp auszuwählen, der nur ein geringes Verkehrsaufkommen zu ertragen hat, so dass möglicherweise der Ermüdungsnachweis gar nicht bemessungsrelevant wird. Idealerweise sollte schließlich in unmittelbarer Nachbarschaft ein Vergleichsbauwerk existieren, das unter gleichen Herstellungsbedingungen mit einem konventionellen Korrosionsschutz ausgestattet wird. Damit wäre auch in Zukunft ein direkter Vergleich der Korrosionsschutzkonzepte möglich.

Nach diesen Gesichtspunkten konnte tatsächlich ein Überführungsbauwerk für einen Wirtschaftsweg über die neu herzustellende BAB 44 als besonders geeignet identifiziert werden. Eine Wirtschaftswegüberführung zeichnet sich bekanntlich durch ein sehr geringes Verkehrsaufkommen mit vergleichsweise kleinen Verkehrslasten in Bezug auf die Bemessungslasten nach Eurocode aus. In 660 m Entfernung befindet sich zudem ein nahezu baugleiches Referenzbauwerk für einen weiteren Wirtschaftsweg ebenfalls in Nord-Süd-Ausrichtung.

Mit der Planung der beiden Bauwerke wurde noch während des laufenden Forschungsvorhabens begonnen. Die Versuchsreihen waren allerdings bereits abgeschlossen, so dass die Ergebnisse verwertet werden konnten.

5 Der Bauwerksentwurf

5.1 Allgemeines

Im Zuge des Neubaus der BAB 44 von Kassel nach Herleshausen werden von DEGES im Auftrag des Landes Hessen die östlichen ca. 30 km baulich realisiert. Das Bauwerk befindet sich innerhalb der westlichsten von vier Verkehrseinheiten bei Bischhausen. Es dient der Überführung eines vorhandenen Wirtschaftsweges über die spätere BAB 44.

Im Bauwerksbereich ist die unterführte BAB 44 in einer Klothoide A = 900,000 trassiert, während der überführte Wirtschaftsweg im Brückenbereich in einer Geraden trassiert ist. Der Kreuzungswinkel zwischen der BAB 44 und dem Wirtschaftsweg beträgt 96,089 gon. Die Gradiente des überführten Wirtschaftsweges verläuft im Bauwerksbereich in einer Geraden mit einem von Norden nach Süden gerichteten Gefälle von 3,0 %.

Die lichte Weite der Brücke beträgt am Fußpunkt der Widerlager 38,60 m, während sich infolge der im oberen Bereich zur Luftseite hin schrägen Widerlagerwände die lichte Weite am Widerla-

gerkopf zu 35,64 m ergibt. Für die Brücke ist eine Breite zwischen den Geländern von 5,00 m vorgesehen, wobei die Fahrbahnbreite 4,00 m und die beidseitige Kappenbreite jeweils 0,825 m beträgt. Die kleinste lichte Höhe zwischen Unterkante Überbau und Oberkante der unterführten Autobahn beträgt am südlichen Rand der BAB 44 5,262 m.

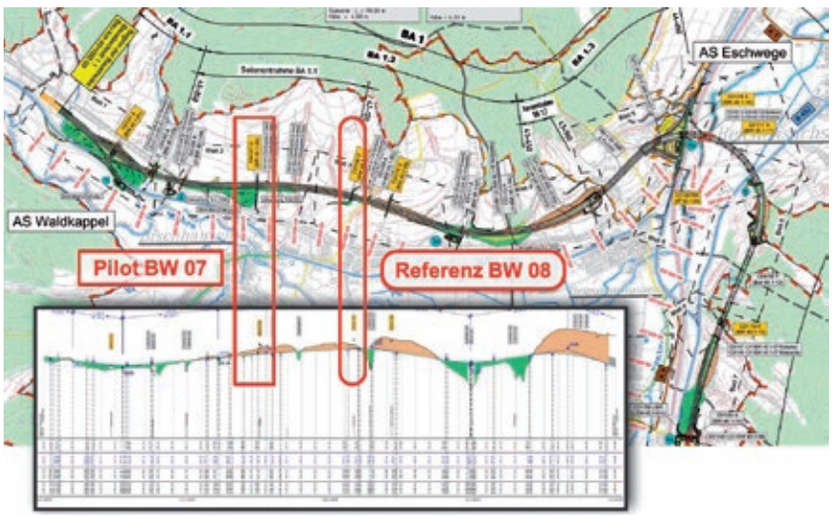


Bild 4 Lage des Pilotbauwerks und des Referenzbauwerks © DEGES

Das Bauwerk wurde für zivile Verkehrslasten nach Eurocode 1 [11] bemessen. Für Ermüdungsnachweise wurde die Verkehrskategorie 4 (örtliche Straßen mit geringem LKW-Anteil) nach EC 1 sowie die Verkehrsklasse Kurzstreckenverkehr nach EC 2 [12] berücksichtigt. Die zulässige Militärlastenklasse nach STANAG 2021 [13] wurde anhand einer Einstufungsberechnung festgelegt.

5.2 Baugrund

Gemäß Baugrunderkundung sind die ab Oberkante Gelände anstehenden Schichten (Oberboden/Hanglehm/Lößlehm) bis zu einer Tiefe von ca. 4 bis 5 m u. GOK nicht ausreichend tragfähig. Der ab dieser Tiefe anstehende Boden ist als stark setzungswillig zu beurteilen.

Aufgrund der Lage der Bauwerksachse in Hangrichtung und der damit verbundenen unterschiedlichen Gründungshorizonte bezüglich des in etwa hangparallelen Schichtgrenzenverlaufs wurde zur Minimierung von möglichen Setzungsdifferenzen eine Tiefgründung auf Großbohrpfählen ausgeführt. Die Bohrpfähle waren mindestens 3 m in den Felshorizont einzubinden. Grundwasser im Sinne eines geschlossenen Grundwasserstockwerks steht nicht an.

5.3 Bauwerkskonstruktion

Die Brücke wurde als integrales Einfeldbauwerk mit einer Stützweite von 40,00 m ausgeführt. Der Überbau ist als Stahlverbundtragwerk mit einer parabolisch veränderlichen Konstruktionshöhe ausgebildet, die in Feldmitte 1,40 m und am Anschnitt zu den Widerlagern 2,10 m beträgt. Um für den Überbau einen gestalterisch ansprechenden Übergang zu den Widerlagern zu erhalten, wurden die Widerlagervorderseiten zur Luftseite hin mit einer Neigung von etwa 30° gegen die Vertikale abgeschrägt.

Die beiden Hauptträger des zweistegigen Plattenbalkenquerschnittes wurden als geschweißte

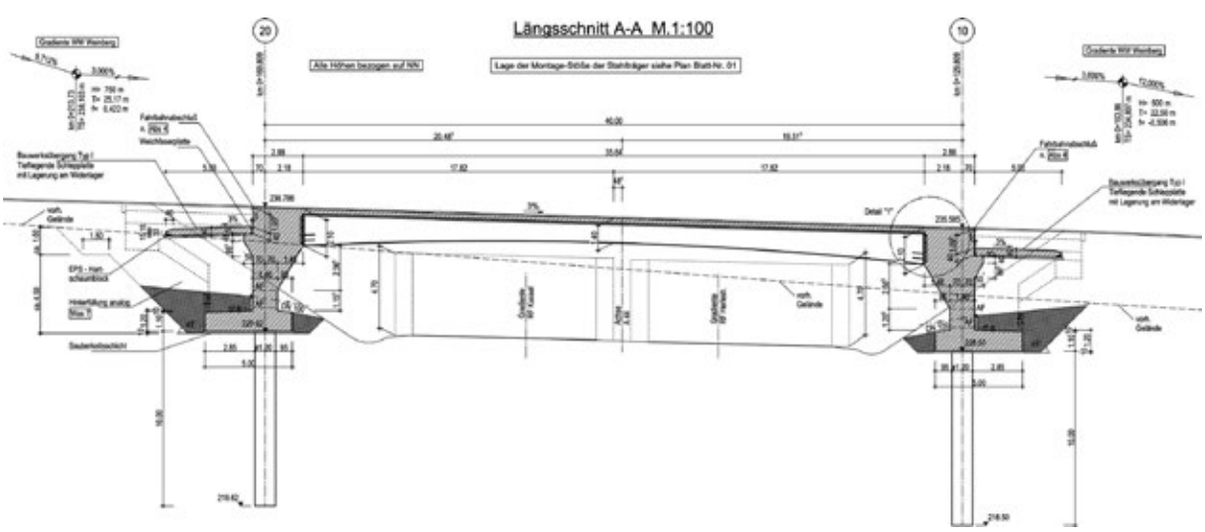


Bild 5 Bauwerksplan – Längsschnitt © DEGES

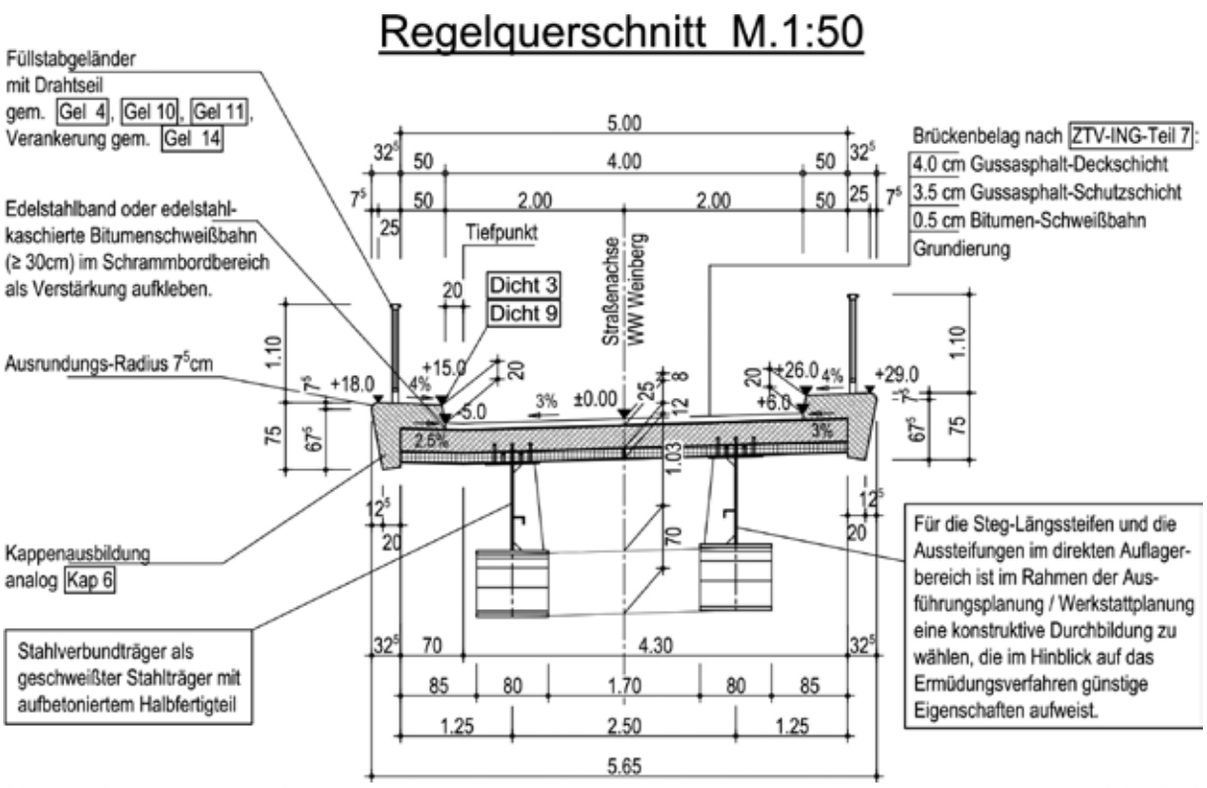


Bild 6 Bauwerksplan – Querschnitt © DEGES

Stahlträger mit aufbetoniertem Halbfertigteil ausgebildet. Die Stahlträger sind hierbei jeweils I-Träger aus Stahl der Festigkeitsklasse S 355, während die Stahlbetonbauteile des Überbaues in Beton der Festigkeitsklasse C 35/45 mit Betonstahl der Sorte B 500 B hergestellt wurden. Die Fahrbahnplatte erhält auf gesamter Überbaulänge eine Gesamtdicke von 37 cm, wobei 12 cm auf die aufbetonierten Halbfertigteile und 25 cm auf die Ortbetonergänzung entfallen. Die Stahlbetonbauteile des Überbaues sind in Längs- und Querrichtung schlaff bewehrt, Vorspannung wurde nicht vorgesehen.

Die Herstellung der Feuerverzinkung im Werk ist für einen 35,64 m langen Stahlträger aufgrund der begrenzten Längenkapazität der zur Verfügung stehenden Zinkbäder nicht möglich. Um die Stöße im Hinblick auf eine leichtere Begutachtung bzw. eventuell erforderliche Nachbesserungen leicht zugänglich zu machen, wurde eine Einteilung in drei Teilstücke gewählt. Damit liegt der Stoßbereich über dem Standstreifen der BAB. Der Zusammenbau erfolgte auf der Baustelle vor dem Einheben.

Der Überbau besitzt einen Brückenbelag gemäß ZTV-ING, Teil 7 [14], Abschnitt 1 aus 4,0 cm Gussasphaltdeckschicht, 3,5 cm Gussasphaltschutzschicht und 0,5 cm Bitumenschweißbahn auf einer Versiegelung.

Die Kappen besitzen gemäß dem Gestaltungskonzept eine zur Brücke hin geneigte Ansichtsfläche. Die Kappenansichtsflächen wurden mit einer gehobelten Brettschalung mit in Längsrichtung verlaufenden Brettern hergestellt, um die Dynamik des Überbaues weiter zu betonen. Die oberen Kanten der Kappen wurden mit einem Radius von 7,5 cm etwas abgerundet, wodurch optisch die Gesimshöhe verringert wird.

Die Geländer wurden als Füllstabgeländer mit dem Farbton rubinrot ausgeführt und sind an den Flügelenden parallel zu den Widerlagervorderkanten abgeschrägt. Es entsteht somit eine gut strukturierte Geländeransicht, die sich gestalterisch vorteilhaft in das Gesamtbild des Brückenbauwerkes einfügt.

Das Bauwerk wurde infolge der errechneten Gesamtverschiebungen an den Überbauenden von jeweils 20 mm mit Fahrbahnabschlüssen nach ABS 4 in Verbindung mit Schleppplatten ausgestattet. Die Widerlager und Flügel sitzen auf einer 1,10 m bis 1,20 m dicken Pfahlkopfplatte. Die Gründung erfolgte für beide Widerlager auf einer einreihigen Bohrpfahlgründung aus jeweils drei 10,00 m langen Pfählen mit einem Durchmesser von 1,20 m. Dadurch werden die Zwangsbeanspruchungen des integralen Bauwerks auf eine verträgliche Größenordnung beschränkt. Die Widerlagerwände besitzen aus gestalterischen Gründen eine luftseitige Abschrägung, so dass eine veränderliche Wanddicke entsteht, die am Fuß der Widerlagerwände 1,40 m und am Kopf 2,88 m beträgt.

Bild 7 Tauchvorgang in der 450 °C heißen Zinkschmelze © DEGES

Die Pfähle, Pfahlkopfplatten, Widerlagerwände und Flügelwände wurden aus Stahlbeton der Festigkeitsklasse C 30/37 mit Bewehrung der Sorte B 500 B hergestellt. Die Rahmeneckbereiche zwischen Widerlager und Überbau wurden aufgrund der hohen Biegedruckbeanspruchung in Stahlbeton der Festigkeitsklasse C 35/45 mit Bewehrung der Sorte B 500 B hergestellt.

5.4 Herstellung

Die Herstellung des Brückenbauwerkes erfolgte in folgenden Schritten:

a. Bauvorbereitende Maßnahmen,

b. Herstellen der Gründungen, Pfahlkopfplatten, Flügel und des unteren Bereiches der Widerlager,

c. Herstellung von Hilfsfundamenten und Hilfsunterstützungen vor den Widerlagern,

d. Herstellung von 2 × 3 Stahlträgerteilstücken für den Überbau in der Stahlbauwerkstatt; die Längen der Stahlträgerteilstücke betrugen hierbei 8,57 m – 18,50 m – 8,57 m,

e. Transport der 2 × 3 Stahlträgerteilstücke zu einer Feuerverzinkerei; Herstellung der kompletten Feuerverzinkung der Stahlträgerteilstücke in einem Verzinkungsbad,

f. Transport der feuerverzinkten Stahlträgerteilstücke auf die Baustelle; Schweißnahtverbindung der 3 Stahlträgerteilstücke zu einem 35,64 m langen Hauptträger auf der Baustelle; Aufbringen des nachträglichen Korrosionsschutzes im Bereich der Schweißnahtverbindungen durch thermisches Spritzverzinken in einem Schutzzelt,

g. Einschalen, Bewehren und Betonieren der Obergurte für den Montagezustand,

h. Einheben der Träger (Halbfertigteile) mit 2 Autokränen und Absetzen auf die Hilfsunterstützungen; Justierung der Träger und Einbau von Montageverbänden,

i. Einschalen, Bewehren und Betonieren der Ortbetonfahrbahnplatte und der Restwiderlager (Rahmenecken);

j. Rückbau der Hilfsunterstützungen und Hilfsfundamente sowie der Montageverbände; Ausbessern des Korrosionsschutzes für die Stahlträger im Bereich von Auflagerungen, Montageverbänden und Beschädigungen durch thermische Spritzverzinkung,

k. Restarbeiten/Ausstattungsarbeiten zur Herstellung des Brückenbauwerkes.

5.5 Kosten

Die Kosten für die Herstellung der Feuerverzinkung liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie die für eine konventionelle organische

Bild 8 Vormontage auf der Baustelle © DEGES

Beschichtung, jedenfalls nur geringfügig darüber. Selbst unter Berücksichtigung des erhöhten Aufwands für Transporte und die Stoßausbildung auf der Baustelle in einem Schutzzelt liegen die Mehrkosten in einer vernachlässigbaren Größenordnung in Bezug auf die Gesamtkosten.

In Anbetracht der erheblichen höheren Kosten allein für die Verkehrssicherung zur Einrichtung einer mehrmonatigen halbseitigen Verkehrsführung der unterführten BAB 44 bei der ersten Grundinstandsetzung einer alternativen organischen Beschichtung ist die Nachhaltigkeit der Ausführung mit einer Feuerverzinkung schon heute belegt.

6 Erkenntnisse und Hinweise

In diesem Abschnitt werden zum einen die bereits weiter oben benannten Aspekte ergänzt, die in der Planung und Bauvorbereitung direkt Berücksichtigung fanden. Ferner werden auch die Erkenntnisse aufgeführt, die erst in Zusammenhang mit der Ausführung anhand der Probekörper gewonnen werden konnten. Ein ausführlicher Bericht wird nach vollständiger Auswertung aller Aspekte voraussichtlich über die Internetseiten der BASt [15] verfügbar sein.

6.1 Hinweise

Die nach dem Säurebad und dem Fluxen etwa 20 °C bis 40 °C warmen Stahlbauteile werden beim Tauchvorgang innerhalb weniger Sekunden auf die Temperatur des Zinkbades (450 °C) aufgeheizt. Hierbei wird eine Temperaturdehnung von ca. 5 ‰ (also immerhin 5 mm auf 1 m Bauteillänge) eingeprägt. Es liegt auf der Hand, dass ein ungleichmäßiges oder zu langsames Eintauchen bzw. Erwärmen erhebliche Spannungen im Bauteil und unter Umständen bleibende Verformungen auslösen kann, denn bereits bei einer Dehnungsbehinderung von 1,1 ‰ erreicht normaler Konstruktionsstahl bei Raumtemperatur seine Streckgrenze, die bei 450 °C sogar fast auf die Hälfte absinkt. Sollten also bereits vor dem Tauchen nennenswerte Eigenspannungen im Bauteil vorliegen, werden diese im Zinkbad ggf. durch plastische Verformungen abgebaut, so dass auch ein optimaler Tauchvorgang zu bleibenden Verformungen am Bauteil führen kann[1]. Es ist daher beim Zusammenbau auf eine besonders sorgfältige Schweißabfolge zu achten, um den Einfluss des Schweißverzugs so gering wie möglich zu halten. Ein mechanisches Richten des Bauteils vor dem Tauchen ist nicht zulässig, da die scheinbare Formhaltigkeit von einem asymmetrischen Eigenspannungszustand begleitet wird, der sich im Zinkbad teilweise umlagern kann. Das verzinkte Bauteil wäre dann wieder verformt. Ein nachträgliches Richten scheidet im Hinblick auf mögliche mechanische Beschädigungen des Korrosionsschutzes ebenfalls aus.

1 Dies dürfte auch die Ursache dafür sein, dass ungünstige Kerbfalldetails nicht zu einer weiteren Verschlechterung der Einstufung führen, da die herstellungsbedingten und ermüdungsrelevanten Eigenspannungsspitzen im Zinkbad sogar abgebaut werden.

Bild 9 Fertiggestelltes Bauwerk © DEGES

Aufgrund dieser großen Temperaturunterschiede sind auch bei einfach symmetrischen Profilen erhebliche elastische Verformungen zu beachten, die während des Abkühlprozesses auftreten können. Im vorliegenden Fall besitzt der Untergurt aus statischen Gründen eine Blechdicke von 40 mm, während der Obergurt nur 20 mm stark und gerade nur so breit ist, dass die erforderlichen Kopfbolzendübel Platz finden. Aufgrund der geringeren Abkühlgeschwindigkeit des massiveren Untergurts stellte sich eine über Stunden näherungsweise konstante Temperaturdifferenz zwischen Obergurt und Untergurt ein. Folglich stellt sich eine elastische Verkrümmung ein, die einen zusätzlichen Stich von über 200 mm bewirkte (bei 18,5 m Trägerlänge). Damit passten die vorbereiteten Auflagerpunkte nicht. Durch einen rechnerischen Überschlag konnte aber die Sorge um ein verzogenes Bauteil schnell ausgeräumt werden.

6.2 Erkenntnisse

Bei der Herstellung der Probestücke wurden eine Reihe weiterer Aspekte diskutiert und offenbar. Aufgrund der unterschiedlichen Blechdicken hat der Auftragnehmer Stahl aus verschiedenen Chargen bzw. sogar Herstellwerken bestellt, obwohl hiervon gemäß Ausschreibung ausdrücklich abgeraten wurde. Nun ergab sich also die Möglichkeit, die Konsequenzen genauer zu untersuchen. Erwartet wurde eine unterschiedliche Neigung zur Zinkanlagerung mit Auswirkungen auf eine unterschiedliche Schichtdicke nach gleicher Tauchzeit. Dem überlagert sich aber auch der Effekt, dass unterschiedliche Blechdicken bedingt durch die Gefügeänderungen im Walzprozess ebenfalls Auswirkungen auf die Zinkschichtdicke haben. In der Tat stellten sich deutliche Unterschiede zwischen den Blechen ein (Zinkschichtdicke im Mittel 300 bzw. 500 µm), die jedoch jeweils sicher oberhalb der geforderten Mindestschichtdicke lagen.

Zur Vermeidung von Unsicherheiten ist daher zu empfehlen, bei der konstruktiven Ausbildung nur geringe Blechdickendifferenzen und Stahl einer Sorte, am besten aus einer Charge zu verwenden.

Die größte Überraschung stellte jedoch der signifikante Abfall der Zinkschichtdicke im Bereich der Brennschnitte des 40-mm-Bleches auf unter 100 µm dar. Die Ursachenanalyse ergab, dass im unmittelbaren Nahbereich der Brennkante (ca. 0,2 mm) bei der größeren Blechdicke infolge des höheren Wärmeenergieeintrags Gefügeänderungen auftraten, die zu einer Verminderung der Zinkanlagerung führten. Dieser Effekt war bei den 20-mm-Blechen nicht nachweisbar. Nach einem Abschleifen der Brennkanten bei ergänzenden Probekörpern trat der Effekt nicht mehr auf.

Daher sollten bei Blechen mit mehr als 20 mm Stärke Brennkanten durch Abschleifen mechanisch nachbearbeitet werden (Abtrag 0,2 mm), um eine gleichmäßige Zinkschichtdicke sicherzustellen. Alternativ kann der Blechzuschnitt z. B. mit Wasserstrahl erfolgen, da hier nicht mit Gefügeänderungen zu rechnen ist.

Selbst für eine große Verzinkerei waren die massigen Bauteile (Brückenhauptträger) eine echte Herausforderung. Die vergleichsweise großen Blechdicken und vor allem die Gesamttonnage

der Mittelstücke (über 10 t) stellten für Hebezeuge, Anschlagmittel und letztlich das Zinkbad eine eher seltene Bewährungsprobe dar. 10 t Stahl innerhalb kürzester Zeit von ca. 40 °C auf 450 °C zu erwärmen entzieht im Nahbereich des Trägers dem Zinkbad in erster Linie viel Wärme. Trotz hervorragender Wärmeleitfähigkeit im Zink und im Stahl kann dabei die Zinktemperatur auch unter den Schmelzpunkt sinken, so dass Zink erstarrt und sich mechanisch am Stahl anlagert. Dies führt aber zu einer Blockierung des Legierungsprozesses in diesem Bereich und kann zu Fehlstellen führen.

Mit zwei Methoden kann man diesem Phänomen wirksam entgegenwirken: zum einen empfiehlt es sich, das Zinkbad vorher etwas höher anzuheizen. Das Maß lässt leicht aus den Massenverhältnissen Zink/Stahl und den Wärmekapazitäten ermitteln und führt auf nur ca. 10 bis 20 K empfohlene Temperaturerhöhung. Zum zweiten sollte das Bauteil unmittelbar nach dem Eintauchen kontinuierlich vorzugsweise in Trägerlängsrichtung leicht bewegt werden, damit ständig frisches, warmes Zink am Stahl anliegt und ein „Festfrieren" des Zinks nicht erfolgen kann. Durch die große Wärmekapazität des Zinkbades ist dies nur in den ersten Minuten erforderlich, danach ist alles gleichmäßig durchgewärmt.

Die Schweißstöße wurden nach den Vorgaben des Gutachtens zur Erteilung der Zustimmung im Einzelfall [9] ausgebildet. Um eine möglichst geringe farbliche und strukturelle Abweichung der dann thermisch spritzverzinkten Bereiche von den stückverzinkten Bauteilen zu erreichen, wurde mit verschiedenen Abdecklacken experimentiert. Die Oberflächenansicht der stückverzinkten Bauteile ist letztlich abhängig von der Stahlzusammensetzung und der davon abhängigen Zinkschichtdicke. Dünne Zinkschichten bilden die aus dem Hochbau bekannten Musterungen und „Blüten" aus. Bei den hier geforderten Schichtdicken bilden sich sehr homogene und feinkristalline Erscheinungsformen aus.

Die Abdecklacke für die Spritzverzinkung können Farbpigmente enthalten und dienen der Passivierung der in diesen Bereichen etwas raueren, fast granularen Oberfläche. Es hat sich gezeigt, dass farblose Versiegelungen das beste Ergebnis bringen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Realisierung dieses Pilotprojektes wird dem Bestreben der Straßenbauverwaltung, Brückenbauwerke in Zukunft innovativ, nachhaltig und wirtschaftlich zu bauen, Rechnung getragen. Für die dauerhafte Aufrechterhaltung des Korrosionsschutzes ist die Feuerverzinkung der Stahlkonstruktion für Brückenbauwerke ein vielversprechender Lösungsansatz im Vergleich zu organischen Beschichtungen.

Da bei ausreichender Schichtdicke der Verzinkung eine Schutzdauer in der Größenordnung der Lebensdauer der Brückentragwerke zu erreichen ist, kann auf mehrfache aufwendige Instandhaltungsmaßnahmen während der Nutzungsphase verzichtet werden. Verkehrseinschränkungen und die damit direkt oder indirekt verbundenen Kosten können somit erheblich reduziert werden.

Sowohl im Herstellungsprozess als auch bei einem späteren Rückbau ist der Rohstoff Zink nahezu vollständig wiederverwertbar. Im Fertigungsprozess existieren seit Jahren geschlossene Rohstoffkreisläufe mit hochwertigen Aufbereitungsverfahren. Auch nach einem Rückbau des Bauwerks lässt sich der Zinkanteil problemlos vom Stahl separieren und dem Werkstoffkreislauf wieder zuführen. Im Vergleich hierzu muss das Strahlgut beim Abtrag einer organischen Beschichtung als Sonderabfall entsorgt werden.

Unter Berücksichtigung aller relevanten Einflüsse auf die Umweltverträglichkeit und die Lebenszykluskosten stellt sich schon heute die Feuerverzinkung als eine kostengünstige Variante im Vergleich zu herkömmlichen Beschichtungssystemen dar.

Die für die Herstellung des Überbaus erforderliche Segmentierung der Stahlteile im Hinblick auf begrenzte Zinkbadgrößen muss sich sowohl für den Transport der Segmente als auch für die Baudurchführung nicht immer als Nachteil auswirken. Die geringeren Abmessungen, die reduzierte Tonnage der Einzelelemente sowie die mögliche Aktivierung des Eigengewichtverbunds (im Rahmen von Synergieeffekten bei der Montage) können den Nachteil eines erhöhten Montageaufwandes vor Ort aufwiegen.

Mit einer erfolgreichen Anwendung der Feuerverzinkung im Rahmen dieses und ggf. weiterer Pilotprojekte steht mittelfristig die Berücksichtigung in künftigen Regelwerken in Aussicht. Die vorgesehene Dokumentation des Projektes einschließlich eines Abschluss- bzw. Erfahrungsberichts wird auf diesem Weg für eine weitere Anwendung auch durch andere Vorhabenträger eine wertvolle Unterstützung sein. Hessen Mobil und DEGES festigen mit diesem Pilotprojekt ihre besondere Stellung bei der Förderung und Begleitung von innovativen Ideen im konstruktiven Ingenieurbau.

Literatur

[1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie – Neuauflage 2016, Broschüre, 258 Seiten, www.bundesregierung.de (geprüft am 14.2.2017)

[2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Leitfaden Nachhaltiges Bauen, aktuell Ausgabe Februar 2016, 176 Seiten zzgl. Anlagen, www.nachhaltigesbauen.de (geprüft am 14.2.2017)

[3] Ungermann, D.; Rademacher, D.; Oechsner, M.; Landgrebe, R.; Adelmann, J.; Simonsen, F.; Friedrich, S.; Lebelt, P.; Nüsse, G.: Forschungsvorhaben P 835 / IGF-Nr. 351 ZBG – Feuerverzinken im Stahl- und Verbundbrückenbau. Bericht zum Forschungsvorhaben, Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft, FOSTA, Forschung für die Praxis P835, 2014, 289 S.

[4] DIN EN ISO 1461:2009-10: Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebrachte Zinküberzüge (Stückverzinken) – Anforderungen und Prüfungen (ISO 1461:2009); Deutsche Fassung EN ISO 1461:2009

[5] DIN EN 2063:1995-10: Luft- und Raumfahrt – Flugwerklager – Technische Lieferbedingungen; Nicht für Neukonstruktionen; Deutsche Fassung EN 2063:1992

[6] Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DASt, Hrsg.): DASt-Richtlinie 022 – Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen. 2009, überarbeitet 6/2016

[7] Umweltbundesamt: Entwicklung der Luftqualität in Deutschland, Luftqualität 2016, Broschüre, 22 Seiten, www.umweltbundesamt.de

[8] Maaß, P.; Peißker, P.: Handbuch Feuerverzinken. 3. vollst. überarbeitete Aufl., Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2008

[9] Ungermann, D.: Gutachten zur Antragsstellung auf ZiE. 2013

[10] DIN EN ISO 14713-2: 2010-05: Zinküberzüge – Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion – Teil 2: Feuerverzinken (ISO 14713-2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 14713-2:2009

[11] DIN EN 1991-1-1:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009

[12] DIN EN 1992-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008

[13] STANAG 2021: Klassifizierung von Brücken, Fähren, Flößen und Fahrzeugen. 6. Aufl. 2006

[14] ZTV-ING, Teil 7: Brückenbeläge, Bundesanstalt für Straßenwesen BASt, Ausgabe 2014

[15] Homepage der BASt: http://www.bast.de (geprüft am 2.2.2017)

Projektbeteiligte:

Bauherr:	Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Land Hessen, endvertreten durch die DEGES Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin
Entwurf:	Hensel Ingenieur GmbH Ingenieurbüro für Bauwesen, Kassel
Gutachter ZiE:	Prof. Dr.-Ing. Dieter Ungermann, Dortmund
Prüfingenieur:	Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Stuttgart
Bauausführung:	Laudemann GmbH Bauunternehmen, Sontra
Nachunternehmer Stahlbau:	Rädlinger Maschinen- und Anlagenbau GmbH, Cham
Fertigstellung:	2016