

Korrosionsschutz für stählerne Brücken und Hochbauten in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Corrosion Protection for Steel Bridges and Buildings Operated by the Federal Waterways and Shipping Administration (WSV)

Dr. rer. nat. Günter Binder, Bundesanstalt für Wasserbau

Der Korrosionsschutz an Stahlbrücken der Bundesverwaltungen (Straße und Wasser) einschließlich der Deutschen Bahn AG wird seit Jahrzehnten überwiegend entsprechend dem Blatt 87 der ZTV-ING, Teil 4, Abschnitt 3 (2012) bzw. der TL/TP-KOR-Stahlbauten (2007), früher gemäß TL 918300 der Deutschen Bundesbahn) ausgeführt. Aufgrund des Ausführungsablaufes der Beschichtungsarbeiten einerseits, Applikation der Grund- und Zwischenbeschichtungen im Werk und andererseits Applikation der farbgebenden Deckbeschichtung (DB) nach der Errichtung der Brücke, kommt es häufig zu Schäden in Form von Enthaftungserscheinungen der Deckbeschichtung. Als Ursache wurde ursprünglich eine Salzbelastung während der Nutzungsphase vor dem Aufbringen der DB mit nachfolgender Osmose diagnostiziert. Gleichzeitig wurde aber bereits in den 1980er-Jahren darauf verwiesen, dass der Abbau des Epoxidharzes der vorliegenden Zwischenschicht durch eine (Zwischen-) Bewitterung während der Nutzungsphase vor dem Aufbringen der farbgebenden Deckbeschichtung aus 2K-PUR, die Schadensursache sein könnte. Auch hierbei laufen osmotische Vorgänge ab, wobei Abbauprodukte des Epoxidharzes den Part von Salzen übernehmen. Der eindeutige Nachweis, im Unterschied zur Osmose durch verunreinigende Salze, ist nicht ohne weiteres zu leisten. Durch Nachstellen der Verhältnisse in verschiedensten Versuchsanordnungen konnten die Haftprobleme der PUR-DB auf der bewitterten Epoxid-Zwischenschicht belegt werden. Dabei sind nicht nur die dem Sonnenlicht ausgesetzten Flächen betroffen, sondern auch die dem Licht abgewandten Seiten. Als Schutzmaßnahme vor dieser Schwächung mit möglicher Enthaftung der farbgebenden DB wurde ein Austausch der Zwischenbeschichtung, 2K-PUR statt Epoxidharz, prognostiziert und nachgewiesen. Sogenanntes aliphatisches PUR ist dabei weniger witterungsempfindlich, speziell hinsichtlich ei-

ner ubiquitären UV-Belastung, als ein Epoxidharz. Der in dieser Arbeit herausgearbeitete Systemänderungsvorschlag fand letztlich auch Eingang in der Neuformulierung des Blattes 87 in den ZTV-ING, Teil 4, Abschnitt 3 (2012). Bei einigen Bauwerken der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) wurde diese Systemänderung bereits erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse bei der Bundesanstalt für Wasserbau, z. B. nach Salzsprühnebelbelastung, zeigen zudem, dass diese Umstellung auch ohne Einbußen im Korrosionsschutzverhalten des Gesamtsystems erfolgen kann.

For several decades corrosion protection measures at steel bridges operated by the federal authorities (roads and waterways) including Deutsche Bahn AG have been executed primarily according to Sheet 87 of ZTV-ING (Additional Technical Terms of Contract and Guidelines for Civil Engineering Structures), part 4, section 3 (2012) and/or the German TL/TP-KOR steel construction standard (2007), formerly according to TL 918300 of Deutsche Bundesbahn. Delamination damage at the top coat (German: "Deckbeschichtung", DB), for example, often occurs, resulting from the application process, where the priming and intermediate coats are applied within the factory, where the application of the coloured top coat is carried out after erection of the bridge. At first, exposure to salt during the stage of utilization prior to the application of the top coat, followed by osmosis was often determined as the main cause. However, it was discussed already in the 1980s that the damage might be caused by degradation of the epoxy resin contained in the existing intermediate coat due to (intermediate) weathering during utilization before the application of the coloured 2K-PUR top coat. This degradation also involves osmotic processes where the epoxy resin degradation products are assumed playing the role of the salts. In contrast to osmosis which is

caused by impurities (i.e. salts), verification of the origin like intermediate weathering is more difficult to prove. By simulating conditions in various test series it was possible to provide evidence of problems regarding the bonding between the PUR top coat and the weather-affected intermediate epoxy resin coat. This does not only affect the surfaces exposed to sunlight, but also other surfaces not directly exposed to the sunlight. The replacement of epoxy resin by 2K-PUR at the intermediate coat was proposed and verified as a suitable protective measure against weakening by epoxy resin degradation which can lead to delamination of the coloured top coat. So-called aliphatic PUR is more resistant to weathering than epoxy resin, especially with regard to ubiquitous UV exposure. The proposal of a system change elaborated in this paper has ultimately been incorporated in the rewording of Sheet 87 of ZTV-ING, part 4, section 3 (2012). This system change has already been successfully carried out for several structures of German waterways authorities. The results obtained at the BAW, e.g. after exposure to salt spray, also show that the substitution recommended has no disadvantageous effects on the corrosion protection behaviour of the system as a whole.

1 Einleitung – Schutzsysteme und aktuelle Fragestellungen

Introduction Protection systems and current issues

Im Stahlhoch- und Ingenieurbau werden überwiegend Korrosionsschutzbeschichtungen nach dem so genannten Blatt 87 gemäß ZTV-ING, Teil 4, Abschnitt 3 (2012; ZTV-ING 4/3) eingesetzt. Dieses System kann flexibel aufgebaut werden: Sowohl die Art der Grundbeschichtung (GB), wie die Anzahl der Zwischenbeschichtungen (ZB) und damit die Gesamtschichtdicke, kann, entsprechend der korrosiven Anforderung des Bauwerks, variiert werden. Für höchste Belastungen im Stahlhochbau (C5-M; Meeresatmosphäre nach DIN EN ISO 12944, Teil 2 (1998)) wird dabei gewöhnlich eine Grundbeschichtung aus Epoxidharz (EP) mit Zinkstaubfüllung (magnet-induktiv gemessene Trockenschichtdicke (DFT = dry film thickness) mit 70 µm) eingesetzt. Daran schließen sich dann zwei Zwischenbeschichtungen aus Epoxidharz (jeweils 80 µm DFT) an, bevor die farbgebende Deckbeschichtung (DB; DFT = 80 µm) aus zweikomponentigem Polyurethan (2K-PUR) appliziert wird; siehe Bild 1. Dabei wird die Beschichtung werkseitig meist

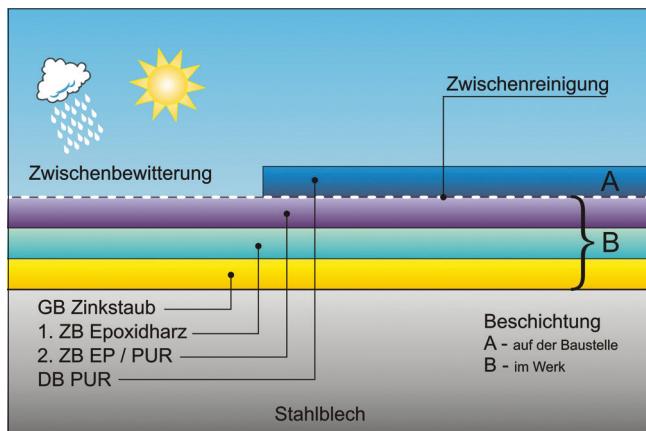


Bild 1: Aufbau von Blatt 87 nach TL/TP-KOR bzw. Variante in der 2. ZB

Figure 1: Structure used in Sheet 87 according to TL/TP-KOR and alternative for the second intermediate coat

bis zur zweiten Zwischenbeschichtung (ZB) aufgebracht. Es folgen übliche Zwischenstandzeiten mit sogenannter (natürlicher) Zwischenbewitterung von drei bis zwölf Monaten unter den Nutzungsbedingungen des Verkehrs (Belastungen: UV-Strahlung und Feuchte bzw. Regen sowie Tausalz). Beim anschließenden Aufbringen der Deckbeschichtung (DB) hat die ZB aus Epoxidharz diese Bewitterungsphase erlitten, wobei dieser Umstand aufgrund äußerer Einflüsse zum Bindemittelabbau und zu Problemen im Haftverbund der Folgeschicht führen kann.

Derartige Beobachtungen konnten an Straßenbrücken der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) in der Vergangenheit vermehrt in Form von Enthaftungen der farbgebenden PUR-Deckbeschichtung festgestellt werden; siehe Bild 2. Die eindeutige Zuordnung der Schädigung bereitet allerdings Probleme, da Erscheinungsbild und Ablauf einer herkömmlichen Osmose auf Grund von Salzbelastungen sehr ähnlich sind und somit auch auf Ausführungsfehler zurückgeführt werden könnten.

Die WSV besitzt weit über tausend Brücken, die meist mit dem o. g. Schutzsystem vor Korrosion geschützt sind. Für diese Bauwerke ist grundsätzlich ein „langer Korrosionsschutz“ (25 Jahre nach ZTV-ING 4/3 (2012) bzw. „größer lang“ (d. h. > 15 Jahre) in Anlehnung an DIN EN ISO 12944, Teil 5 (1998) vorgesehen. Die Stoffe bzw. Systeme sind dementsprechend einer längeren Prüfdauer unterzogen worden. Schwächungen des Haftverbundes, welche gewöhnlich nicht sofort bei der Bauwerksübergabe oder Gewährleistungfrist er-



Bild 2: Typisches Schadensbild bei der Enthaftung der DB beim Blatt 87-System

Figure 2: Typical delamination damage to top coat when Sheet 87 system is used

kennbar sind, erniedrigen die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes und stören vor allem auch das optische Erscheinungsbild des Bauwerks. Darüber hinaus wurden ausführende Firmen häufig in die Pflicht genommen, die Schäden innerhalb der Gewährleistung zu beheben. Dieser Umstand hat dazu geführt, dass die oben beschriebenen Haftverbundstörungen mit der Folge von Entschichtungen als systemimmanente Fehler bezeichnet wurden und infolge dessen in Anwenderkreisen Widerspruch bei der Anwendung von Blatt 87 formuliert worden ist.

Ziel dieses Forschungsvorhabens (BAW, 2014) ist es, mögliche Haftverbundprobleme zu analysieren, zuzuordnen und letztlich zu umgehen, damit sich aufwändige und kostspielige Ausbesserungsarbeiten vermeiden lassen, zumal hierbei die Schuld- und damit die Kostenfrage sowohl fachlich wie auch juristisch häufig nicht (eindeutig) zu klären ist.

2 Stand der Forschung

Current state of research

Verschiedene aktuelle Beobachtungen an Bauwerken (Binder, 2007; Gelhaar und Schneider, 2007), wie auch die Auswertung von Forschungsvorhaben (Öchsner und Schmidt, 2007; Binder, 1996; Binder, 2016), weisen auf Haftverbundprobleme der Deckbeschichtung (DB) aus 2K-PUR auf der Zwischenschicht aus EP nach kürzerer wie auch nach längerer Zwischenbewitterungsdauer hin.

Aufgrund der Erkenntnisse aus Öchsner und Schmidt (2007) wird in Motzke und Konermann (2007) geschlussfolgert, dass ein systemimmanenter Mangel im Beschichtungssystem vorliegt. Dem Planer wird empfohlen, anzugeben, wie die Risiken zu vermeiden sind. Andernfalls wird den Ausführenden geraten, bereits im Vorfeld „Bedenken anzumelden“, falls die Ausschreibung das Risiko der Entschichtung bei Zwischenbewitterung unerwähnt lässt.

Die vorletzte Änderung der ZTV-ING 4/3 (2012) mit dem Hinweis in Kapitel 2, Ziffer (7) „alle Schichten, einschließlich der Deckbeschichtung im Werk aufzubringen“ deutete ebenfalls bereits auf mögliche Probleme hin, erwies sich jedoch in der Praxis als meist nicht realisierbar, da aus verschiedenen Gründen (z. B. optisch einheitliches Erscheinungsbild ohne Ausbesserungsstellen an den Stößen, etc.) die fargebende DB immer wieder erst nach der Errichtung der Brücke und somit auch erst nach den sofort einsetzenden Nutzungsbelastungen (u. a. Zwischenbewitterung) appliziert wird. Um mögliche Schäden pauschal zu vermeiden, hat z. B. die österreichische Straßenverwaltung das oben beschriebene Vorgehen mit der Zwischenbewitterung insofern eingeschränkt, als alle beschichteten Bauteile die Werkshalle nur mit einer oben liegenden Beschichtung (ZB oder DB) aus zweikomponentigem PUR ausgeliefert werden dürfen.

3 Untersuchungsziel und Untersuchungsmethoden

Targets and methods of research

Unter der Voraussetzung der bisherigen Umstände, dass eine Komplettbeschichtung im Werk nicht möglich ist, müssen Wege gefunden werden, das Enthaftungsproblem zu umgehen. Hierzu sollen Variationen zum bisherigen Applikationsablauf, unter Einsatz neuer Stoffe, sowie alternative Reinigungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung im Rahmen dieses BAW-Forschungsvorhabens geprüft werden (Zwischenergebnisse wurden bereits publiziert bzw. vorgetragen (Binder und Baier, 2011; Binder und Baier, 2012a; Binder und Baier, 2012b), um die Regelwerksänderung zu unterstützen). Die Untersuchungen dieser Arbeit stützten sich auf vier grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensweisen:

- An alten Versuchsplatten (Untersuchungen der Versuchsserie 1986 bis 1996 nach Naturbewitterung; in Binder, 1996) wurde mit einer verbesserten, weil angepassten Untersuchungsmethode zur Prüfung des Haftverbundes, die Abreißfestigkeit (Haftfestigkeit) nochmals bestimmt (s. Abschnitt 4.1).
- Für weitere, vertiefende Untersuchungen wurden eigens *Laborprüfplatten* mit unterschiedlichen Beschichtungssystemen hergestellt (Serie 2010 bis 2011), die vor dem Aufbringen der letzten DB in Karlsruhe (Standort BAW) zeitlich abgestuft in der Naturzwischenbewitterung worden sind (u. a. UV-Strahlung, Regen und Temperaturschwankungen) (s. Abschnitt 4.2).
- In einem *Praxisversuch* wurde an einem realen Objekt (Haus-Kannener Brücke/Rhein-Herne-Kanal) das übliche Schema des Ablaufes der Beschichtung an einer Prüftafelserie durchgeführt (s. Abschnitt 4.3).
- Im Vorgriff zu den zu erwartenden Versuchsergebnissen wurden an verschiedenen Brücken der WSV bereits die vorgeschlagene Variante des Beschichtungsaufbaus durchgeführt (u. a. Brücke Haldensleben/Mittelrandkanal) und der Zustand überprüft (s. Abschnitt 4.4).

Für alle Vorgehensweisen wurden die Nutzungsbelastungen entsprechend der Zwischenbewitterung in den verschiedenen Naturauslagerungen bzw. Labortestverfahren („Belastung“) simuliert. Unter anderem wurden nach dem Aufbringen der DB die Naturbelastungen fortgesetzt bzw. mit zusätzlichen Laborbelastungen verstärkt. Üblicherweise wurden dabei genormte Verfahren zur Bestimmung des Haftverbundes von Beschichtungssystemen angewandt. Diese liefern grundsätzlich zwei Parameter: Den absoluten Abreißwert in MPa und das Bruchbild mit näheren Angaben zur relativen Verteilung der Bruchanteile in den verschiedenen Schichten. Aus korrosionsschutztechnischen Gründen wird dabei der Bruch im Übergangsbereich zwischen zwei Schichten (Adhäsionsbruch) ungünstiger beurteilt als der Bruch innerhalb einer Schicht (Kohäsionsbruch).

4 Ergebnisse der Untersuchungen

Results of the research

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens der BAW stützen sich auf verschiedene Ansätze, die Labortestverfahren, aber auch Überprüfungen im Rahmen von Korrosionsschutzmaßnahmen auf der Baustelle (wie unter Abschnitt 3 erwähnt) mit einbeziehen.

4.1 Erweiterte Betrachtungen der Versuchsserie 1986 bis 1996

Enhanced considerations of the 1986 to 1996 test series

Die verfügbaren Versuchsplatten der früheren Untersuchungen (Binder, 1996) wurden nochmals verwendet und erneut Haftabzugsbestimmungen durchgeführt. Von den vier Schutzsystemen wurden dabei zwei, Blatt 77 (System 1; PVC) und Blatt 87 (System 3; EP/PUR), für die Betrachtungen und die erneuten Versuche ausgewählt (s. Tabelle 1).

Schichten/ System	Blatt 77 (System 1)		Blatt 87 (System 3)	
GB	70 µm	PVC/Zn- Phosphat	70 µm	EP/Zn- Phosphat
ZB	70 µm	PVC-EG	80 µm	EP-EG
DB	70 µm	PVC-EG	80 µm	PUR-EG
Gesamt	210 µm		230 µm	

System 1 (Blatt 77): Nr. 1 – 11 und System 3 (Blatt 87): Nr. 23 – 33

Tabelle 1: Schichtaufbau der Versuchsreihe 1986 bis 1996
(Details in Binder, 1996)

Table 1: Layer built-up of the 1986 to 1996 test series (for details see Binder, 1996)

Für die ursprünglichen Untersuchungen wurde nach Prüfplan für jede Zwischenbewitterungsdauer (ein Tag, 30, 60 und 360 Tage) Prüftafeln angefertigt und erst nach dieser vorgesehenen Belastungsdauer mit der jeweils vorgesehenen DB versehen. Dabei wurde eine Doppelserie angefertigt: einerseits für Zwischenbeschichtungen, die direkt nach der Zwischenbewitterungszeit überbeschichtet worden sind und andererseits Prüfplatten, bei denen die vorliegende Zwischenbeschichtungen vor der Applikation der DB noch gereinigt worden sind. Diese Zwischenreinigung bestand aus dem Abwaschen der ZB mit warmen, klaren Wasser (60°C) mit Hilfe einer Nylonbürste.

4.1.1 Belastung durch Naturauslagerung

Loads by field exposure

Die Untersuchungen der Versuchsserie 1986 bis 1996 (Auslagerung bei BAW in Karlsruhe) wurden durch Messungen im Jahre 2009 erweitert. Die vorliegenden Prüf-

platten der Schutzsysteme 1 und 3 (s. Tabelle 1) haben demnach eine gezielte Naturbewitterung von 10 Jahren (1986–1996; Zwischenbewitterung) sowie eine zusätzliche Alterung von 13 Jahren (1996–2009) mit gewöhnlicher Lagerung hinter sich.

Hinsichtlich der Ermittlung der Haftfestigkeiten wurde ein neueres Verfahren eingesetzt, welches die Durchbiegung der (dünnen) Prüfplatten vermeidet bzw. kompensiert und damit Werte bestimmen ließ, die differenziertere Auskunft über das Haftverhalten geben können. Hierzu dient in der Stempelmitte ein Dorn als Widerlager (Gerät: elcometer automatic adhesion tester), welcher ein Durchbiegen der Prüfplatte verhindert. Einen typischen Eindruck mit Widerlagerpunkt des Dorns in der Abreißzylindermitte zeigen die Bilder 3a und 3b: Sind die Farbschichten auf Stempel und Prüfplatte unterschiedlich (hier: grün/grau), so liegt Adhäsionsbruch bzw. C/D-Bruch vor (Anm.: Nach DIN EN ISO 12276 (2007) stellen die Buchstaben A das Stahlsubstrat, B die erste Schicht, C die zweite Schicht, etc. dar). Sind die Farbschichten auf Stempel und Prüfplatte identisch (hier: grau/grau), so erfolgte der Bruch innerhalb einer Schicht und wird daher als Kohäsionsbruch (hier in C, also zweite Schicht) bewertet. Darüber hinaus wurden Probekörper aus den Versuchskörpern der Jahre 1986 bis 1996 gewonnen und dem in Tabelle 2 aufgelisteten Prüfprogramm unterzogen. Dabei wurde neben dem Blatt 87-System auch das Blatt 77-System zum Vergleich ausgewählt.

In Bild 4 ist ein typischer Verlauf der Haftfestigkeiten bei unterschiedlich langer Zwischenbewitterungsdauer am Beispiel des Auslagerungsortes Karlsruhe (BAW) dargestellt: Ohne Zwischenreinigung erleidet das Blatt 87-System Haftfestigkeitseinbrüche nach 60 und 240 Tagen Bewitterungsdauer – nicht jedoch nach 120 Tagen. Bei einer vorangegangen Zwischenreinigung treten diese Haftfestigkeitsverluste kaum noch in Erscheinung.

Mit den markanten Haftfestigkeitsreduzierungen zeigen sich zugleich auch erhöhte Anteile an Adhäsionsbrüchen, welche korrosionsschutztechnisch als ungünstig gelten (vergleiche Bilder 3a und 3b). Bei der Auslagerung des (damals noch üblichen) Blatt 77-Systems (PVC) ist ein derartiger Einbruch der Haftfestigkeit ohne Zwischenreinigung nicht erkennbar und der Zwischenreinigungseffekt damit vernachlässigbar.

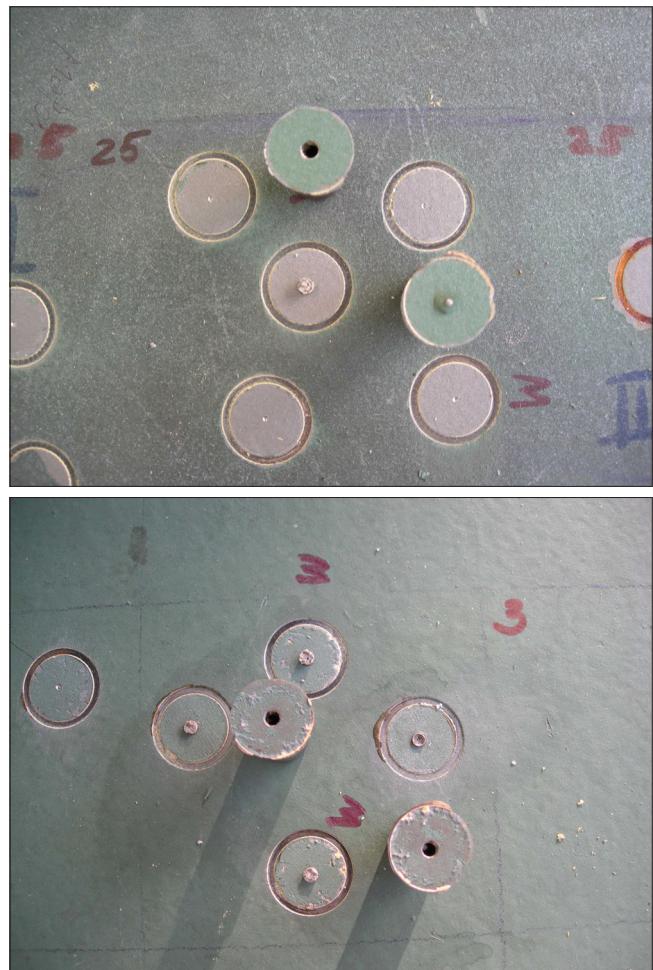


Bild 3: a) Adhäsionsbrüche bei Blatt 87; b) Kohäsionsbrüche bei Blatt 77

Figure 3: a) Adhesive failure, Sheet 87; B) Cohesive failure, Sheet 77

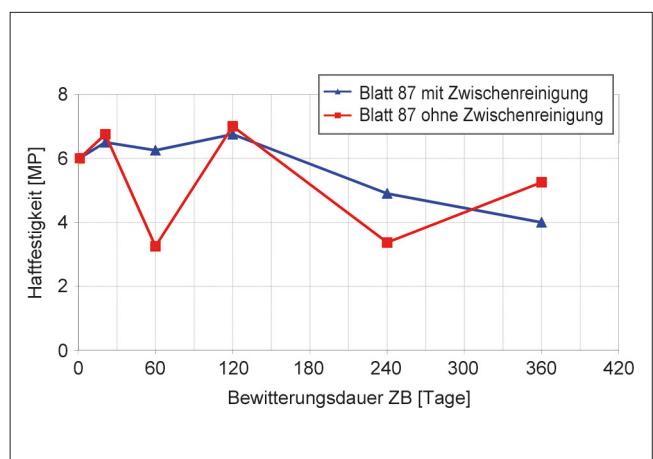


Bild 4: Haftfestigkeitsverlauf der Versuchsserie 1986 bis 1996 (Auslagerung bei BAW) nach erneuter Prüfung 2009

Figure 4: Distribution of adhesive values of the 1986 to 1996 test series (field exposure on BAW's premises) after new test in 2009

4.1.2 Zusätzliche Laborbelastungen

Additional laboratory tests

Die Prüfplatten der Versuchsserie 1986 bis 1996 wurden noch einer kontinuierlichen Kondensation (DIN EN ISO 6270-1, 2002) unterzogen und anschließend sofort die Haftfestigkeit untersucht. Dabei fiel der Verlust der Haftfestigkeit des Blatt 87-Systems gegenüber dem Blatt 77-System wiederum deutlicher aus. Die Haftfestigkeitsverluste traten bei beiden Systemen, ähnlich wie in Bild 4, nicht durchgängig, über das Jahr betrachtet, sondern an den zeitlichen Schwächungspunkten nach 60 Tagen auf. Beim Blatt 87-System waren gleichzeitig unerwünschte C/D-(Adhäsions-)Brüche festzustellen (vergleiche Bilder 3a und 3b). Die Zwischenreinigung wirkte sich vor allem bei Blatt 87 positiv auf die Abreißfestigkeiten aus. Die Laborbelastung nach DIN EN ISO 6270-2 (2005) bzw. Kondensation mit Unterbrechung zeigte ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der Haftabzugsentwicklung wie jene nach DIN EN ISO 6270-1 (2002).

Anstelle der Belastungen nach DIN EN ISO 6270-1 (2002) wurden die ausgewählte Prüfplatten (Systeme nach Blatt 77 und Blatt 87; Versuchsserie 1986 bis 1996) auch mit einem sogenannten Nasspolster über 100 Stunden belastet. Diese Methode wird häufig auch an Objekten wie z. B. Brücken eingesetzt, da hier eine labormäßige Bewitterung wie nach DIN EN ISO 6270-1 (2002) nicht möglich ist (siehe Abschnitt 4.3 und 4.4).

Der Vergleich der zwischenbewitterten Platten zeigt, dass die Nasspolster auch dann eine Schwächung des Haftverbundes provozieren, wenn ursprünglich keine Haftverbundstörung erkennbar war. Sowohl der Haftverbund aus PVC-Lagen (Blatt 77) wie auch die Epoxidharz-Zwischenbeschichtung (Blatt 87) leiden unter dieser Einwirkung. Insgesamt betrachtet ist die Schwächung im Blatt 77-System allerdings geringer als im Blatt 87. Kennzeichnend sind hierbei zudem Adhäsionsbrüche (C/D-Bruch) im Unterschied zu Kohäsionsbrüchen (in C) bei Blatt 77. Zudem traten bei Blatt 87 durchwegs stärkere Abrisswertminderungen nach der Zwischenreinigung als beim Blatt 77 auf.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Nasspolsterbelastung den Beschichtungsverbund deutlich schwächt und somit eine praktikable Methode darstellt, Schwächen des Verbundes aufzuzeigen bzw. sogar zu verstärken.

4.2 Ergebnisse der Zwischenbewitterungsreihe 2010 bis 2011

Results of the intermediate weathering series of 2010 to 2011

Zur Prüfung der Zwischenhaftungsproblematik an moderneren Korrosionsschutzsystemen gemäß TL/TP-KOR (2007) wurden von einem namhaften Lackhersteller (u.a. mit Zulassungen nach Blatt 87 und 97; www.bast.de (2016)) im Mai 2010 Prüfplatten im Technikumsraum des Unternehmens unter Überwachung der BAW hergestellt; siehe Tabelle 2. Die Stoffauswahl erfolgte auf Basis zugelassener Beschichtungssysteme nach Blatt 87 und 97 (schnell härtende Variante von Blatt 87, mit identischem Schichtaufbau) und mit einer weiteren Systemvariante zum Vergleich. Hier sind die „Blätter 88/98“ (Arbeitstitel) hervorzuheben, welche mit einer Zwischenbeschichtung auf 2K-Polyurethan-Basis anstelle des bisher üblichen Epoxidharzes aufgebaut sind.

Schichten/System	Blatt 87	„Blatt 88“	Blatt 97	„Blatt 98“
GB	70 µm Zn-Ep	70 µm Zn-Ep	70 µm Zn-Ep	70 µm Zn-Ep
ZB	80 µm EP-EG	80 µm PUR	80 µm EP-EG	80 µm PUR
DB	80 µm PUR	80 µm PUR	80 µm PUR	80 µm PUR
Gesamt	230 µm	230 µm	230 µm	230 µm

Flächenvorbereitung und Verarbeitung: Sa 2 ½, airless Spritzen

Tabelle 2: Schichtaufbau der Zwischenbewitterungsreihe 2010 bis 2011

Table 2: Layer structure of the intermediate weathering test series of 2010 to 2011

4.2.1 Einfluss der Zwischenbewitterung auf den Haftverbund

Influence of intermediate weathering on adhesive bond

Zur Simulation des möglichen Zwischenbewitterungseffekts wurden die Prüfplatten nach unterschiedlich langen natürlichen Bewitterungen (60 bzw. 120 Tage) einer Zwischenreinigung (Hochdruckreinigen (HDW bei 110 bar) und Waschen bei 60°C mit Schwamm) unterzogen, bevor die jeweilige DB appliziert worden ist. Die mit der jeweiligen Zwischenschicht versehenen Prüfplatten wurden auf dem Gelände der BAW in Karlsruhe ausge-

setzt. Es wurden dabei jeweils drei Beschichtungslagen in nachstehender Abfolge aufgebracht; vergleiche Bild 1:

- Grundbeschichtung (GB): 70 µm EP-Zink,
- Zwischenbeschichtung (ZB): 80 µm 2K-PUR bzw. EP,
- Zwischenbewitterung und Reinigung in zeitlichen Abständen,
- Deckbeschichtung (DB): 80 µm 2K-PUR.

Vor der Prüfung der Haftfestigkeit (Abreißgerät Positest, Defelsko) wurden dann bei allen Prüfserien zusätzliche Laborbelastungen in Form einer kontinuierliche Konensation gemäß DIN EN ISO 6270-1 (2002; 720 h) durchgeführt. Es wurden jeweils mehrere Serien von Prüfplatten angefertigt, sodass neben den geplanten Zwischenbewitterungsseries auch weitere Labortestverfahren durchgeführt werden konnten.

Die Ergebnisse der Haftfestigkeit sind zunächst auschnittsweise für Blatt 87 und „Blatt 88“ in Bild 5 dargestellt: Während bei „Blatt 88“ keinerlei Haftverlust festzustellen ist, verliert die DB von Blatt 87 deutlich an Haftung zur Zwischenbeschichtung, trotz des guten Ausgangswert in der Situation ohne Zwischenbewitterung (0 Tage). Die Reinigung der EP-Zwischenschicht mit Hochdruckwasserwaschen (HDW) nach der jeweiligen Zwischenbewitterung konnte den Verlust der Haftfestigkeit nicht kompensieren (Bild 5). Dieser Haftverlust ist an den „Rückseiten“ der Prüfplatten (RS = sonnenabgewandte Rückseite) in unerwarteter Weise teilweise sogar ein wenig ausgeprägter als an den sonnenzugewandten Vorderseiten (VS).

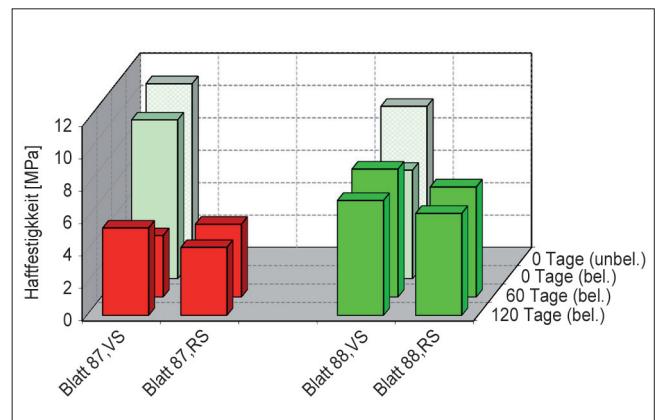


Bild 6: Haftfestigkeiten für Blatt 87 und „Blatt 88“ nach der Zwischenbewitterung

Figure 6: Adhesive strength values for Sheet 87 and “Sheet 88” after intermediate weathering

In Bild 6 sind die Versuchsergebnisse mit ihren Haftfestigkeiten und Bruchbildern nochmals zusammenfassend im Säulendiagramm dargestellt. Es ist jeweils auch hier ein deutlicher Haftfestigkeitsverlust nach der Zwischenbewitterung der ZB aus Epoxidharz zu erkennen. Zudem sind bei Blatt 87 auch jeweils überwiegen de Anteile an negativ zu bewertenden Adhäsionsbrüchen (C/D-Bruch; rote Säulen) festzustellen. Hingegen ergeben sich stabile Verhältnisse, wenn die Zwischenbeschichtung aus 2K-PUR entsprechen „Blatt 88“ hergestellt worden ist. Es ist anzumerken, dass die Kontrollplatten, welche beim Lackhersteller geprüft worden sind, mehr oder weniger gleichlautende Ergebnisse erbrachten. Die Systemvarianten von Blatt 97 und „Blatt 98“ verhalten sich kongruent zu den Systemen Blatt 87 und „Blatt 88“:

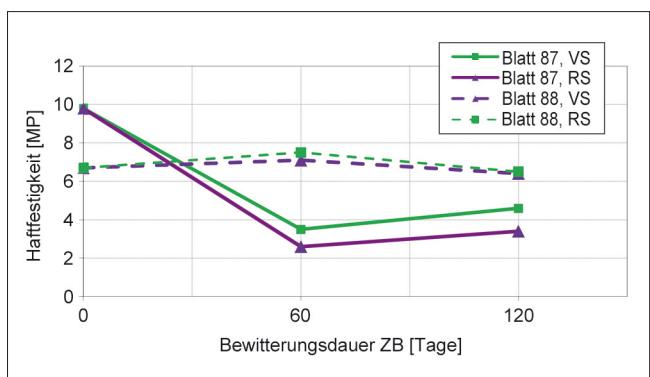


Bild 5: Haftfestigkeitsentwicklung zur Zwischenbewitterungsdauer und Laborbelastung nach DIN EN ISO 6270-1 (2005) – Vergleich von „Blatt 88“ und Blatt 87 (BAW)

Figure 5: Development of adhesive strength values for intermediate weathering duration and laboratory test according to DIN EN ISO 6270-1 (2005) comparison of “Sheet 88” with Sheet 87 (BAW)

4.2.2 Labortestverfahren zum Korrosionsschutznachweis

Laboratory test method for corrosion protection verification

Neben den Untersuchungen der Haftfestigkeiten wurden die Laborprüfplatten noch einem neutralen Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227 (2006)) unterzogen. Dabei wurde eine über die Norm hinausgehenden Prüfdauer von 2.160 h (statt 1.440 h) gewählt. Zudem wurde der in TL/TP-KOR (2007) empfohlene Schichtaufbau (vier Schichten und 290 µm DFT) hier mit nur drei Schichten und insgesamt damit lediglich 210 µm DFT unterschritten. Die Unterrostungswerte an der künstlichen Verletzung des „Blatt 88“ lagen dabei trotz-

dem mit 0,6 mm deutlich unterhalb des Grenzwertes (1,0 mm, einseitig) nach DIN EN ISO 12944, Teil 6 (1998). Der Unterschied der Unterrostungen zwischen den beiden Schichtaufbauvarianten Blatt 87 und „Blatt 88“ war gering und variierte innerhalb des üblichen Fehlerbereichs. Ferner schnitten alle vier geprüften Systeme auch nach anderen Prüfkriterien (Blasenbildung, Rostgrad, Rissgrad, Abblättern nach DIN EN ISO 4628, Teile 1 bis 5 (2004) sowie in der Haftzugprüfung), erfolgreich ab. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass entsprechend der Laborversuchsergebnisse (hier: Salzsprühnebeltest) die Systemvariante nach „Blatt 88“ (mit PUR-ZB) keine Probleme hinsichtlich der Unterrostung zeigt und somit neben der guten „Zwischenbewitterungshaftung“ insgesamt auch einen sehr guten Korrosionsschutz bietet.

4.3 Versuchsflächen am Bauwerk – Haus Kannener Brücke (Dortmund-Ems-Kanal) *Test areas on the structure Haus Kannener Bridge at Dortmund-Ems-Canal*

Bei Brückenneubauten der WSV wurden bereits Beschichtungsvariation nach „Blatt 88“ realisiert. Am Projekt Haus-Kannener Brücke (Brücke Nr. 59 DEK) bot sich die Gelegenheit, zeitgleich zur Erstellung des Korrosionsschutzes an den Brückenbauteilen auch Versuchskörper (Probebleche) mit verschiedenen Variationen zu beschichten, welche später als Stilelement am Brückengeländer dienen sollten (Bild 7). Der Korrosionsschutz dieser Brücke weist zudem eine grundsätzliche Abweichung zu allen anderen WSV-Brücken auf, indem die Deckbeschichtung aus Polysiloxan hergestellt worden ist. Dieses Material sollte nach den Vorprüfungen eine verbesserte Lichtbeständigkeit und damit ein geringeres Zwischenhaftungsproblem aufweisen. Im Rahmen des Brückenneubaus wurde eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt.

Der Beschichtungsablauf der Probebleche entsprach dabei einerseits völlig dem der eigentlichen Brückenbauteile (Tabelle 3; Testflächen Nr. 4 und 14). Andererseits wurden aber auch Varianten mit Blatt 87 (Testflächen 2 und 12), „Blatt 88“ (Testflächen 5 und 15) und einer Polysiloxanbeschichtung auf Epoxidharz (Testflächen 8 und 18) hergestellt. Die Zwischenbewitterungsdauer der beschichteten Probebleche lag bei ca. sechs Monate, wie auch bei der Brücke selbst. Zunächst war das Versuchsprogramm so ausgerichtet, dass lediglich die Haftfestig-



Bild 7: Haus-Kannener Brücke (Nr. 59) nach der Fertigstellung

Figure 7: *Haus-Kannener Bridge (no. 59) after completion*

keiten auf den Probebleche bestimmt werden sollten. Bild 8 zeigt eine Zusammenstellung der Haftabzugswerte in Relation zu den Schichtaufbauvarianten; siehe Tabelle 3. Es zeigt sich deutlich, dass Systeme, deren Epoxid-Zwischenbeschichtung bewittert worden ist, sehr ausgeprägte (unerwünschte) Adhäsionsbrüche (C/D-Bruch) aufweisen (Testflächen Nr. 2 und 12, 7 und 17 wie auch Nr. 8 und 18). Eine gewisse Kompensation der Haftverbundschwäche wird erzielt, wenn die zwischenbewitterte Epoxidharzschicht mit einer weiteren Epoxidschicht auf der Baustelle überbeschichtet wird (Testflächen 9 und 19). Hingegen zeigt Blatt 87 (mit EP-Zwischenbeschichtung, Testflächen 3 und 13) keinen Haftverlust und auch keine Tendenzen zum Adhäsionsbruch, wenn es komplett im Werk beschichtet worden ist. Systeme mit Zwischenschichten aus 2K-PUR (Testflächen 5 und 15 sowie 6 und 16) haften, trotz der Zwischenbewitterung, ebenfalls sehr gut und die Prüfung der Haftzugfestigkeit ergab zudem (erwünschte) Kohäsionsrissbilder.

Bemerkenswert ist, dass auch bei dieser Versuchsreihe die Rückseiten (= sonnenabgewandt) stärkere Haftfestigkeitseinbußen hatten als die unmittelbar UV-Licht beeinflussten Flächen. Für die Zwischenreinigung wurden zwei Verfahren ausgewählt: Die Reinigung mit Wasserwaschen (sog. wash primer; Testflächen-Nr. 12 bis 19) und die Reinigung durch Hochdruckwasserwaschen (HDW bei 90 bar; Testflächen-Nr. 2 bis 9). Probebleche, deren Zwischenbeschichtungen mit wash primer vorbereitet worden sind, zeigen geringfügig bessere Resultate als die mit Hochdruckwasserwaschen präparierten Zwischenschichten.

Testfläche		2	12	3	13	4	14	5	15	6	16	7	17	8	18	9	19
System/ Aufbau		Blatt 87 TL/TP		Blatt 87 ZTV-ING	wie Brücke		Variante „Blatt 88“		„Blatt 88“		ZTV-KOR (Blatt 97)	Brücke		„Blatt 87“			
GB (70 µm)	Werk	EP-Zn		EP-Zn	EP-Zn		EP-Zn		EP-Zn		EP-Zn	EP-Zn		EP-Zn	EP-Zn		
ZB 1 (80 µm)	Werk	EP-EG		EP-EG					EP-EG						EP-EG		
ZB 1 (180 µm)	Werk				EP-EG		EP-EG				EP-EG		EP-EG				
ZB 2 (80 µm)	Werk	EP-EG		EP-EG						2K-PUR							
DB 1 (80 µm)	Werk		2K-PUR														
DB 1 (40 µm)	Werk				Polysiloxan		2K-PUR										
Zwischen- reinigung		HD	WW			HD	WW	HD	WW	HD	WW	HD	WW	HD	WW	HD	WW
ZB 2	Bau- stelle															EP-EG	
DB 2 (80 µm)	Bau- stelle	2K-PUR							2K-PUR		2K-PUR		Polysiloxan		2K-PUR		
DB 2 (40 µm)	Bau- stelle				Polysiloxan		2K-PUR										

HD = Hochdruckwasserwaschen; WW = alkalischer Ablauger

GB = Grundbeschichtung; ZB = Zwischenbeschichtung; DB = Deckbeschichtung; Zwischenreinigung:
Serie a) Testflächen 2 – 9 mit Hochdruck-Wasserwaschen (HD) und Serie b) Testflächen 12 – 19 mit alkalischem Ablauger (WW)

Tabelle 3: Testflächen an der Haus-Kannener Brücke (Nr. 59)

Table 3: *Test areas on Haus-Kannener Bridge (no. 59)*

Die spiegelbildlichen Testflächen (Nr. 12 bis 19) wurden an Stelle der oben beschriebenen Reinigung mit einem alkalischen Ablauger vorbehandelt. Dadurch veränderte sich für die Testfläche Nr. 2 (bzw. Nr. 12) und Testfläche Nr. 7 (bzw. Nr. 17) die Situation insofern, als die Haftung der DB aus PUR auf der zwischenbewitterten Epoxidharzfläche sich deutlich verbesserte.

4.4 Versuchsflächen am Bauwerk – Brücke Haldensleben (Mittellandkanal) *Test areas on the structure – Haldensleben Bridge at Midland Canal*

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der vorgeschlagenen Systemänderung im Blatt 87 mit PUR-Zwischenbeschichtung („Blatt 88“) wurden unterschiedliche Objekte, welche mit einer Zustimmung im Einzelfall durchgeführt worden sind, beobachtet und ausgewertet.

Die Brücke Haldensleben (Nr. 474) wurde im Jahre 2008 ebenfalls mit dem System „Blatt 88“ im Werk bis zur Zwischenbeschichtung (2K-PUR) beschichtet; siehe Bild 9. Die Deckbeschichtung wurde im Sommer 2009, nach knapp einem Jahr Zwischenbewitterung, aufgebracht. Eine Überprüfung im Sommer 2011 zeigte einen einwandfreien Zustand. Die Haftfestigkeitswerte lagen bei 7,5 MPa mit günstigem Kohäsionsbruch in der Zwischenbeschichtung.

Dieser Befund wurde auch im Jahre 2014, also nach sechs Jahren Standzeit, bestätigt; siehe Tabelle 4. Niedrigere Abreißwerte sind auf erhöhte Kleberissanteile zurückzuführen und sind somit kein Beleg für Haftungsprobleme. Eine Bestätigung hierfür sind

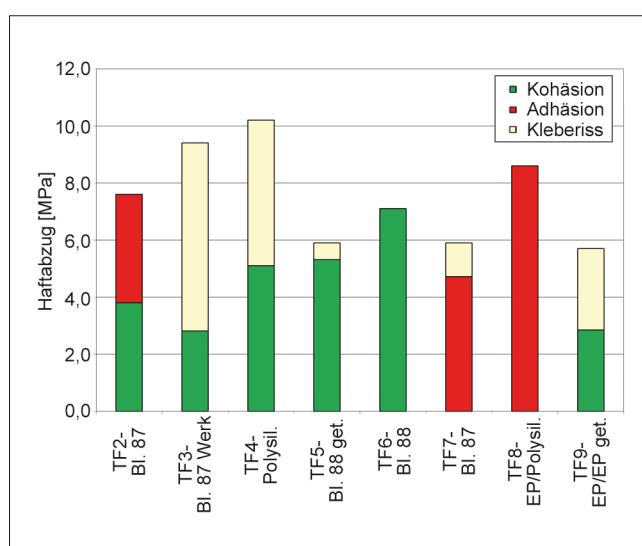


Bild 8: Testflächen (TF) an der Haus-Kannener Brücke – Haftzugfestigkeitswerte und Bruchanteile

Figure 8: *Test areas (TF) on Haus-Kannener Bridge – adhesives strength values and failure distribution*

die Kreuzschnittprüfungen nach DIN EN ISO 16276-2 (2007), wobei die Werte von 0 bis 1 eine gute Haftung des Schichtverbundes zeigen.



Bild 9: Brücke Haldensleben (Nr. 474) nach der Fertigstellung

Figure 9: *Haldensleben Bridge (no. 474) after completion*

Prüfverfahren	Messwerte	Anmerkungen
Abrisswert [MPa]	2,4 bis 10,3	
Kleberriss	65 bis 100 %	
Grenzflächenriss (Adhäsion)	0 %	(1 x 25 %)
Schichtflächenriss (Kohäsion)	0 – 40 %	in DB
Kreuzschnitt	0 – 1	

Tabelle 4: Messwerte auf dem Brückenbogen Haldensleben (Zustand 2014)

Table 4: *Measured values for the arch of the Haldensleben bridge (situation in 2014)*

4.5 Chemisch-analytischer Nachweis der Abbauprodukte

Verification by chemical analysis of degradation products

Bei den in den vergangenen Jahren an einigen Brücken der WSV festgestellten Enthaftungserscheinungen wurden bei den BAW-Untersuchungen häufig Salze in der Grenzfläche zwischen der bewitterten Zwischenbeschichtung und der Deckbeschichtung nachgewiesen, welche eine (herkömmliche) Osmose belegen könnten.

Gleichzeitig wurde mittels analytischen Laborverfahren bestätigt, dass diese Salze bzw. deren Komponenten (Carbonsäuren, Ammonium, Chloride, etc.) auch den Abbauprodukten von Epoxiden entsprechen. Es kann also durchaus angenommen werden, dass die Enthaftung, welche häufig mit Blasenbildung einhergeht, ursächlich auf das Schutzsystem mit Zwischenbewitterung zurückzuführen ist. Bei allen geschädigten Schutzsystemen war eine Zwischenbewitterung nachzuvollziehen. Häufig lagen die schadhaften Flächen in Bereichen von Untersichten, also mit geringer unmittelbarer Sonnenlicht-Belastung.

Im Labor wurden daher Untersuchungen diesbezüglich angestrebt, mit dem Ziel, einen praktikablen Nachweis für die Situation vor Ort zu kreieren. Bild 10 zeigt eine bewitterte Epoxid-Fläche mit sechsmonatiger Sonnenlichtbestrahlung und Feuchteinwirkung. Hier erkennt man bereits die typische Erscheinung von Auslaugungen mit einer gewissen Netzstruktur. In den Waschwässern der bewitterten und vergilbten EP-Zwischenbeschichtungen konnten die klassischen Abbauprodukte von m-xylyldiamingehärteten Epoxidharzen wie Isophthalsäure und p-Hydroxybenzoësäure isoliert und durch ihr FTIR-Spektrum bzw. Derivatisierung bestimmt und nachgewiesen werden; siehe Bild 11. Die ebenfalls detektierten Carbonsäuren können nachweislich nur durch den photolytischen Abbau des Epoxidharzes durch die UV-Strahlung des Sonnenlichtes entstanden sein. Colorimetrische Verfahren (z.B. Methylblau-Reduktion durch Titan(III)-chlorid) zum raschen Nachweis dieser Abbauprodukte auf der bewitterten Korrosionsschutzbeschichtung vor Ort haben sich leider, im Unterschied zum Infrarotspektroskopie-Verfahren, als nicht immer sicher erwiesen.



Bild 10: Abbauprodukte einer bewitterten EP-Zwischenbeschichtung des Blatts 87

Figure 10: *Degradation products of a weather-affected EP intermediate layer according to Sheet 87*

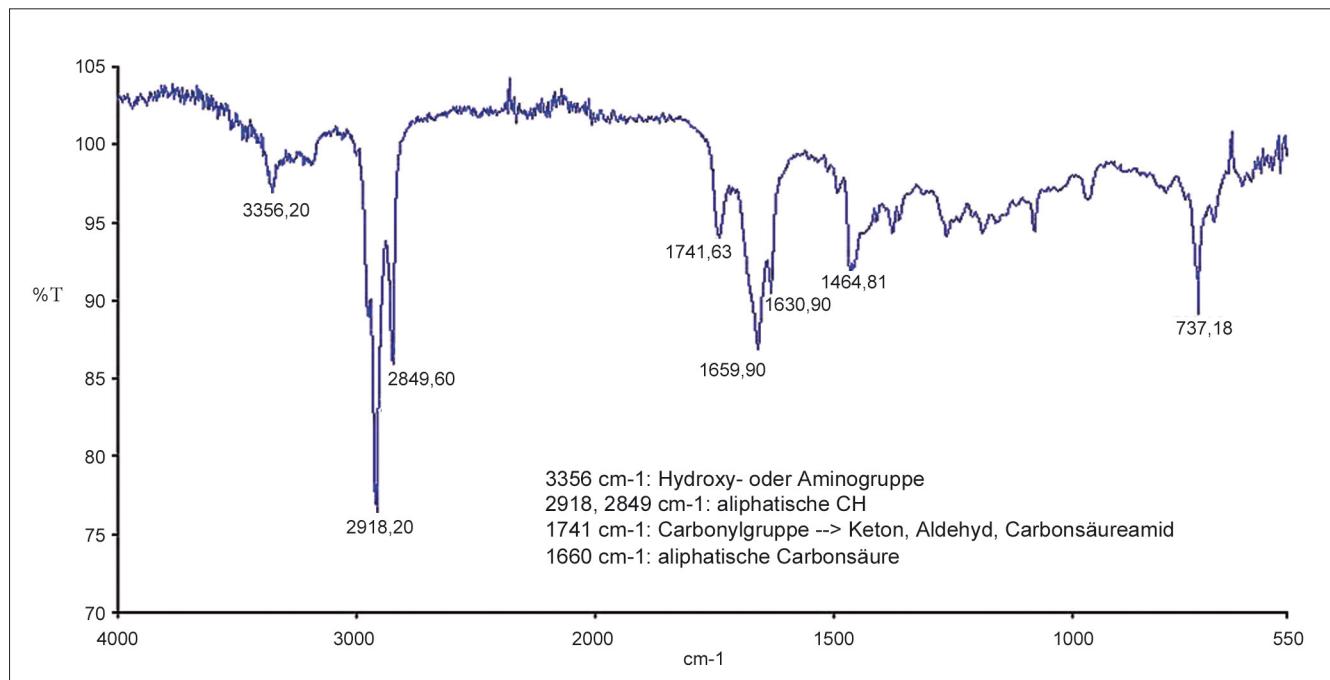


Bild 11: IR-Spektrum von Abbauprodukten eines ausgehärteten Epoxidharzes

Figure 11: IR spectrum of the degradation products of a cured epoxy resin

5 Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Discussion of results and conclusions

Die Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens waren derart ausgerichtet, dass mögliche Prozesse des Stoffabbaus an Epoxid-Schichten nachvollziehbar gestaltet werden konnten. Die Resultate der vorliegenden Untersuchungen sollten es schließlich erlauben, mögliche notwendige Schritte zur Sicherung der Korrosionsschutzausführungen an Stahlbrücken einzuleiten.

5.1 Beurteilung der erzielten Resultate im Rahmen einer Zulassungsprüfung

Assessment of the results obtained in the scope of an approval test

Die (natürliche) Zwischenbewitterung an Beschichtungen mit Epoxidharz führt nach vorliegenden Ergebnissen zu diskontinuierlichen bzw. unsteten Einbrüchen in der Haftfestigkeitsentwicklung an Beschichtungssystemen, bei denen die Zwischenbeschichtung aus Epoxidharz durch UV-Strahlung und Feuchte angegriffen wird. Die beschichteten Bauteile sind einer realen und gleichzeitig nicht nachstellbaren und daher auch zu-

gleich willkürlichen (Natur-) Bewitterung mit unbekanntem Ausgang ausgesetzt. Das heißt, dass die natürliche Zwischenbewitterung sich einerseits äußerst ungünstig wie aber auch manchmal neutral gegenüber der Haftfestigkeit einer PUR-Deckbeschichtung auf einer Epoxid-Zwischenbeschichtung, entsprechend Blatt 87, auswirken kann. Von maßgeblichem Einfluss ist dabei die UV-Einwirkung des Sonnenlichts. Die Berechnung wird insgesamt uneinheitlich bewertet. Auffällig dazu ist z. B. die Beobachtung, dass auch die bei der Zwischenbewitterung der Sonne abgewandten Flächen hohe Empfindlichkeit zur Schwächung des Haftverbundes zeigen. Eine Begründung könnte im Rayleigh'schen Gesetz liegen, wonach die Energie des Streulichts E_{Str} mit der Abnahme der Wellenlänge λ zunimmt: $E_{\text{Str}} \sim 1/\lambda^4$. Das heißt, dass UV-Licht nach der Streuung, z. B. am Boden oder Wasserspiegel, noch mit relativ hoher Intensität am beschichteten Bauteil ankommt. Es ist daher auch schwierig, diese komplexen Abläufe (z. B. UV-Belastungsrhythmus und Regenzyklen) der Natur im Labor zu simulieren. Gleichbleibende Laborzyklen zur Nachstellung der Naturbelastungen bzw. jener des Verkehrs können also nur begrenzt die Unvorhersehbarekeiten der Natur antizipieren. Das heißt wiederum, dass die Zeitpunkte der maximalen Schwächung des Haftverbundes nicht vollends erfasst werden können.

Eine gute Haftung nach Laborzwischenbewitterung lässt sich daher auch nicht unmittelbar auf die Lagerungs- und Nutzungsbedingungen des Baubetriebs umsetzen. Greift man auf die natürliche Zwischenbewitterung zur Prüfung des Haftverbundes zurück, so reicht möglicherweise sogar ein ganzer Jahreszyklus wiederum nicht aus, da sich gerade mit der Klimaveränderung eine ziemliche Schwankung jahreszeitlicher Zyklen eingestellt hat. Die Konsequenz wäre, diesbezüglich über mehrere Jahre zu prüfen und auszuwerten. Derzeit werden Laborprüfungen untersucht, die eine maximale UV-Belastung ohne Berechnung beinhalten. Es wird angenommen, dass dabei der „worst case“ gefunden werden kann, da ohne Berechnung keine Reinigung von den entstehenden Abbauprodukten stattfindet. Eine endgültige Sicherheit auf der Baustelle ist jedoch auch hier wiederum nur begrenzt erreichbar.

Zukünftig soll ein „Blatt 100“ entsprechend der TL/TP-KOR (2007 bzw. zukünftig) entwickelt und eingesetzt werden. Hierbei ist eine höhere Gesamtschichtdicke mit weniger Beschichtungsschichten vorgesehen, welche wiederum mit höherer Schichtdicke der Zwischenbeschichtung (290 statt 80 µm DFT) erreicht wird. Dazu sind Epoxidharze mit geringeren Lösemittelgehalten dieser relativ dicken Schicht vorgesehen, wodurch, zum Erreichen der Viskosität, wiederum besonders kleinmolekulare Epoxide eingesetzt werden müssen. Dies hat zur Folge, dass die Gefahr des Stoffabbaus bei Zwischenbewitterung sich nochmals erhöht und auch hier eine Vorsorge unbedingt nötig sein wird.

5.2 Weitere Schritte für den Korrosionsschutz von Stahlhochbauten

Further steps to ensure corrosion protection of steel structures

Die Resultate der vorliegenden Untersuchungen erlauben es, dringend nötige Schritte zur Sicherung der Korrosionsschutzausführungen an Stahlbrücken einzuleiten. Noch vor der Beendigung dieses Forschungsvorhabens konnten die Resultate kommuniziert werden, um die als erforderlich angesehenen Veränderungen der Vorgehensweise des Beschichtungsablaufes von Stahlhoch- bzw. Ingenieurbauten umzusetzen. Daneben ist noch die Sicherstellung der Qualität der einzusetzenden Stoffe und damit das Procedere des Zulassungsverfahrens durch Korrosions-

schutzprüfungen, vornehmlich im Labor, wichtig bzw. noch zu klären.

Die Problemlage der Haftfestigkeit von Beschichtungen nach Zwischenbewitterung ist in der Fachwelt bekannt, jedoch nach Ansicht des Verfassers in Regelwerken und Vorschriften noch zu wenig berücksichtigt – zumindest zum Zeitpunkt des Beginns dieses Forschungsvorhabens. In auffälliger Weise zeigt sich, dass das Blatt 87 in der Art seiner Anwendung bzw. Ausführung der letzten Jahrzehnte mit Risiken in der Bewerkstelligung des erforderlichen Haftverbundes einhergeht. In der Praxis haben sich bereits wiederholt Enthaftungsschäden der Deckbeschichtung bei Anwendung von Systemen nach Blatt 87 gezeigt. Neben möglichen mangelhaften sogenannten Zwischenreinigungen vor der Applikation der fargebenden Deckbeschichtung aus 2K-PUR (Folge: herkömmliche Osmose durch Salzablagerungen) werden Abbauprodukte der Zwischenbeschichtung aus Epoxidharz bei der Zwischenbewitterung für die Schwächung des Haftverbundes verantwortlich gemacht. Die Schäden können dabei oftmals nicht in Ausführungsmängel oder stoffimmanente Ursachen unterschieden werden. Das Risiko, wie auch die Reparaturkosten, insbesondere für den Ausführenden von Beschichtungsarbeiten, ist damit sehr hoch. Die im Laborverfahren nachweisbaren Abbauprodukte reagieren osmotisch unter Blasenbildung bzw. letztlich unter Enthaftung der Deckbeschichtung. Lösungsvorschläge, wie z. B. das vollkommene Beschichten der Bauteile im Werk bzw. die Zwischenreinigung mittels chemischem Ablauger, sind offensichtlich nicht konsequent durchzuführen bzw. noch ohne praktischen Wert.

In dieser Arbeit wurden diese Gesichtspunkte in den Versuchsansätzen berücksichtigt und ergeben das abgerundete Bild einer gewissen Instabilität der Epoxidharzes bei der Bewitterung (Anfälligkeit gegenüber photolytischem Abbau durch UV-Strahlung) mit nachvollziehbaren Haftschwächen in Labor- und Technikumsversuchen, wie auch bei der Überprüfung realer Bauwerke.

Als wesentliche Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind festzuhalten, dass

- bereits eine Verbesserung der Haftfestigkeit bei Blatt 87 eintritt, wenn die Zwischenbeschichtung (ZB) aus Epoxid erst auf der Baustelle (Epoxid auf

Epoxid) erfolgt. Baupraktisch ist diese Ausführung allerdings ungünstig, weil damit zwei Beschichtungen (ZB aus EP und DB aus 2K-PUR) vor Ort ausgeführt werden müssten,

- die Zwischenreinigung auf der Baustelle für Blatt 87 keine automatische Garantie eines ordentlichen Haftverbundes mit sich bringt. Der Erfolg von chemischen Ablaugern ist darüber hinaus nicht gesichert, wobei zudem die Praktikabilität auf Baustellen äußerst zweifelhaft ist,
- sich Blatt 97 hinsichtlich seiner Schwächen nahezu identisch wie Blatt 87 verhält,
- die Anwendung von Blatt 87 mit Komplettbeschichtung im Werk zu guten Ergebnissen führt und somit eine sicherere Lösung sein wird. Allerdings sind dann notwendige Überarbeitungen auf der Baustelle (Stöße, Schweißnähte, Ausbesserungen) mit Einschränkungen im optischen Erscheinungsbild in Kauf zu nehmen,
- das „Blatt 88“ (System Nr. 5 und 15 in Tabelle 5) wie üblich bis zur Zwischenbeschichtung (2K-PUR) im Werk und die Deckbeschichtung auf der Baustelle (2K-PUR nach Zwischenbewitterung) mit guten Haftverbundeigenschaften applizierbar ist,
- der Korrosionsschutz bei „Blatt 88“ nach den ersten, in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen (Kontinuierliche Kondensation nach DIN EN ISO 6720-1 (2002) bzw. DIN EN ISO 6720-2 (2005) und Salzsprühnebeltest nach DIN EN ISO 9227 (2006)) jeweils gute Ergebnisse zeigte. Dabei war z. B. die Unterrostung nach dem Salzsprühnebeltest (Dauer: 2.160 h) mit 0,6 mm relativ gering und somit im günstigen Bereich liegend,
- verschiedene Langzeiterfahrungen an existierenden Brücken in der WSV und außerhalb mit guten Ergebnissen vorliegen und die Praktikabilität des Einsatzes von „Blatt 88“ belegen,
- bei Einsatz von „Blatt 88“ (mit ZB aus 2K-PUR) die Zulassungsprüfungen hinsichtlich der „Zwischenhaftung“ nach der alten Methode der „Freibewitterung“ in der Natur (TL/TP-KOR-Stahlbauten, Ausgabe 2002), also ohne großen Aufwand, durchgeführt werden könnten. Gegebenenfalls sind auch Zwischenbewitterungen im Labor, falls diese für die zukünftige TL/TP-KOR-Stahlbauten entwickelt werden sollten, zu akzeptieren. Bei Einsatz einer Zwischenbeschichtung auf Epoxidharzbasis bleibt ein gewisses Restrisiko der Enthaftung der Deckbeschichtung, auch bei zukünftig geprüften Systemen,
- eine Prüfung des Haftverbundes am Bauwerk durchaus nach Nasspolsterbelastung erfolgen kann, um Schwächen im Haftverbund zu erkennen,
- eine Reinigung der bewitterten Epoxidharz-Zwischenbeschichtung dem Haftungsverlust nur bedingt entgegenwirkt. Zudem müssten Chemikalien (z. B. „Ablauger“) eingesetzt werden, die weitere Probleme nach sich ziehen,
- Sweepen als wirkungsvolle Zwischenreinigungs methode verbesserte Haftung bringt, jedoch der abrasive Stoffabbau Gefahren mit sich bringt,
- zu empfehlen ist, bei Anwendung von „Blatt 88“ (ohne explizite Zulassung nach TL/TP-KOR-Stahlbauten), auf (zugelassene) Stoffe nach Blatt 87 zurückzugreifen ist. Die Zwischenbeschichtung sollte dabei ein mit Eisenglimmer gefülltes aliphatisches Polyurethan sein,
- das „Blatt 88“ umstandslos in das System von Blatt 87 integriert werden kann, wenn für die Zwischenbeschichtung zusätzlich zum Epoxidharz eine Beschichtung mit 2K-PUR aufgenommen wird,
- bei der Korrosionsschutzprüfung (hier verlängerter Salzsprühnebeltest mit 2.160 h) geringe Unterrostungen von 0,6 mm an der künstlichen Verletzung auftreten. Dies zeigt, dass der momentan festgelegte Grenzwert der Unterrostung ($\leq 3,0$ mm einseitig) selbst für die verlängerte Prüfzeit (2.160 h statt 1.440 h) viel zu hoch angesetzt worden ist und sich hierbei ein Grenzwert von $< 1,5$ mm empfiehlt.

6 Literatur References

BAW (2014): Korrosionsschutz mit Blatt 87 – Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen. FuE-Abschlussbericht A39510210209).

Binder, G. (1996): Zwischenreinigung von bewitterten Teilbeschichtungen für den Korrosionsschutz an Brückenbauwerken (Zusammenfassung der Untersuchungen DB, BASt und BAW). BAW-Brief Nr. 3, 1996, S. 2–3.

Binder, G. (2007): Korrosionsschutz für den Stahlhochbau. BAW-Brief, 2007, Nr. 1, S. 1–7.

Binder, G. (2016): Empfehlungen zum Korrosionsschutz von Brücken- und Ingenieurbauten. BAWBrief, 01/2016, S. 1–5.

Binder, G. und Baier, R. (2011): Untersuchungen zu Zwischenhaftungsproblemen bei Korrosionsschutzbeschichtungen. Vortrag IKS-Korrosionsschutzseminar am 7. Dezember 2011, Dresden.

Binder, G. und Baier, R. (2012a): Aktuelle Untersuchungsergebnisse zur Zwischenhaftungsproblematik und Folgerungen für Blatt 87 der TL/TP-KOR Stahlbauten. Vortrag BVK-Fachtagung am 7./8. März 2012, Köln.

Binder, G. und Baier, R. (2012b): Untersuchungen zu Zwischenhaftungsproblemen bei Korrosionsschutzbeschichtungen für den Stahlhochbau, BAW-Brief Nr. 3, 612-B, April 2012, S. 1–9.

DIN EN ISO 4628: Beurteilung von Beschichtungsschäden – Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen:

Teil 1: Allgemeine Einführung und Bewertungssystem (2004).

Teil 2: Bewertung des Blasengrades (2004).

Teil 3: Bewertung des Rostgrades (2004).

Teil 4: Bewertung des Rissgrades (2004).

Teil 5: Bewertung des Abblätterungsgrades (2004).

DIN EN ISO 6270: Beschichtungsstoffe – Bestimmung der Beständigkeit gegen Feuchtigkeit:

Teil 1: Kontinuierliche Kondensation (2002).

Teil 2: Verfahren zur Beanspruchung von Proben in Kondenswasserklimaten (2005).

DIN EN ISO 9227: Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen (2006).

DIN EN ISO 12944: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme:

Teil 1: Allgemeine Einleitung (1998).

Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen (1998).

Teil 3: Grundregeln zur Gestaltung.

Teil 4: Arten von Oberflächen und Oberflächenvorbereitung.

Teil 5: Beschichtungssysteme (1998).

Teil 6: Laborprüfungen zur Leistungsbewertung und Bewertungskriterien (1998).

Teil 7: Ausführung und Überwachung der Beschichtungsarbeiten .

Teil 8: Erarbeiten von Spezifikationen für Erstschatz und Instandsetzung.

DIN EN ISO 16276: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungsstoffe – Beurteilung der Adhäsion/Kohäsion (Haftfestigkeit) einer Beschichtung:
Teil 1: Abreißversuch (2007).
Teil 2: Gitter- und Kreuzschnittprüfung (2007).

Gelhaar, A. und Schneider, A. (2007): Zur Problematik der Zwischenbewitterung von Epoxidharz-Teilbeschichtungen an Brückenbauten. Stahlbau 76, 2007, Heft 2, S. 131–142.

Motzke, G. und Konermann, R. (2007): Haftung von PUR-Deckbeschichtungen – Haftungsfragen für Unternehmer und Hersteller. Stahlbau 76, 2007, Heft 10, S. 771–777.

Öchsner, P. und Schmidt, R. (2007): Auf der Suche nach optimaler Zwischenhaftung; Farbe und Lack, 5, 2007, 113, 146–155.

TL/TP-KOR-Stahlbauten: Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Beschichtungsstoffe für den Korrosionsschutz von Stahlbauten. Verkehrsblatt – Dokument Nr. B 5259 (2002).

TL/TP-KOR-Stahlbauten: Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Beschichtungsstoffe für den Korrosionsschutz von Stahlbauten (2007).

ZTV-ING, Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau, Abschnitt 3 Korrosionsschutz von Stahlbauten (2012): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Korrosionsschutz von Ingenieurbauten, Ausgabe 2012.

ZTV-KOR-Stahlbauten (2002): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Korrosionsschutz von Stahlbauten, Ausgabe 2002.

www.bast.de/Qualitaetsbewertung/Listen/bruecken-ingenieurbau/doku-brue-ingb (2016).