

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Baier, Roland; Hörnig, Mario

Aktuelles zur Ertüchtigung von Korrosionsschutzbeschichtungen im Stahlwasserbau durch Smart Repair

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102442>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Baier, Roland; Hörnig, Mario (2017): Aktuelles zur Ertüchtigung von Korrosionsschutzbeschichtungen im Stahlwasserbau durch Smart Repair. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Korrosionsschutz und Tragfähigkeit bestehender Stahlwasserbauverschlüsse. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 35-44.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Aktuelles zur Ertüchtigung von Korrosionsschutzbeschichtungen im Stahlwasserbau durch Smart Repair

Dipl.-Ing. (FH) Roland Baier (BAW), Dipl.-Biol. Mario Hörnig (BAW)

Notwendige und gängige Korrosionsschutzmaßnahmen

Auf Grund der Korrosionsanfälligkeit von Baustahlkonstruktionen im Stahlwasserbau müssen unterschiedliche Korrosionsschutzverfahren angewendet werden, um deren längerfristige Anwendbarkeit und Funktionalität für diesen Bereich des Ingenieurwesens sicherzustellen.

Die Rostbildung von Baustahl bei dessen Anwendung in Gewässern ist zum einen auf sein relativ unedles elektrochemisches Potenzial und zum anderen auf seine dünne, löchrige, und schlecht anhaftende Oxidschicht zurückzuführen. Hierbei können die Abrostungsraten des ungeschützten Baustahls, je nach Gewässertyp bzw. -zone bei fortgeschrittener Korrosion, stark variieren (Süßwasser: 20-80 $\mu\text{m/a}$, Meerwasser: 140-340 $\mu\text{m/a}$).

Auf Grund der deutlichen Korrosionsanfälligkeit von Baustahl müssen daher effektive Schutzverfahren angewendet werden, um dessen längerfristige Betriebsfestigkeit zu gewährleisten. Als solches Korrosionsschutzverfahren steht uns zunächst die Beschichtung des Stahlbauteils mit einem metallischen Überzug (Feuerverzinkung, Spritzverzinkung) oder mit einem mehrschichtigen Polymerbeschichtungssystem zur Verfügung. Da Feuerverzinkungen wegen ihrer mäßigen Halbwertszeit und ihren schlechten Substrateigenschaften im Stahlwasserbau nicht großflächig eingesetzt werden, finden für diesen Zweck nur Polymersysteme, wie durch Polyaddition vernetzende Polyurethane oder Epoxidharze, ihren Einsatz. Ungesättigte Polyesterharze welche mit Styrol durch Polymerisation ausgehärtet werden, spielen heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Oft werden Grundierungen mit funktionalen Füllstoffen wie Zinkstaub, Zinkphosphat, Aluminiumbronze, Glashohlkugeln oder Eisenglimmer angewendet.

Das Aufbringen von organischen Korrosionsschutzbeschichtungen wird unter dem Schlagwort „passiver Korrosionsschutz“ zusammengefasst. Dem gegenüber steht, als rein elektrochemisches Korrosionsschutzverfahren, der „aktive Korrosionsschutz“, welcher durch das Anbringen einer Gleichrichter-Fremdstromanlage bzw. von lokalen galvanischen Anoden (früher Opferanoden genannt) den Baustahl gegen den Korrosionsangriff passiviert. Auch drastische Fälle von Bimetall-Korrosion („Kontaktkorrosion“), welche durch den verstärkten Einsatz von Edelstahlkonstruktionen im Stahlwasserbau (Bild 1) entstehen, können durch die Verfahren des aktiven Korrosionsschutzes kompensiert werden.

Als aktive Sofortmaßnahme kann bei kleinen Edelstahlflächen das Anbringen von galvanischen Anoden im direkten Kontaktbereich von Edel- und Baustahl erfolgen. Werden größere Edelstahlflächen vorgefunden, wie in Bild 1, können hier nur eine gleichrichtergestützte Fremdstromanlage Abhilfe schaffen.



Bild 1: Großzügige Edelstahlschleiffläche der Seitendichtung an einem Wehr

Schon bei der Planung und Konstruktion können Fehler auftreten, die später Einfluss auf die Funktionalität des Stahlbauteils nehmen. Vor allem bei Altstahlkonstruktionen mit schlechteren Stahlqualitäten (erhöhter Gehalt an „Stahlschädlingen“, Schlackeneinschlüssen, Seigerungen), welche u. a. zur Materialermüdung und Reckalterung neigen, können sich negativ auf die Einsatzbereitschaft auswirken. Durch eine gezielte Erfassung der chemischen Zusammensetzung (Gehalte an Schwefel, Phosphor und Stickstoff) und der mechanischen Werkstoffkennwerte durch Zug-, Scher- und Kerbschlagbiegeversuch, können Aussagen über die aktuelle Gebrauchstauglichkeit des eingesetzten Baustahls erzielt werden. Hierbei muss die Probenahme an besonders neuralgischen Stellen mit erheblicher Beanspruchung erfolgen. Nach neueren Erkenntnissen scheint jedoch dieses Vorgehen nur näherungsweise den Ist-Zustand des Stahlbauteils abzubilden und sollte daher durch eine komplexere Herangehensweise, unter Berücksichtigung dynamischer Werkstoffbeanspruchungen bei gleichzeitiger korrosiver Belastung, ergänzt werden. Auch kann eine metallographische Untersuchung des lokal vorhandenen Stahlgefüges (vorhandene Kristallite, Korngröße, Textur), Rückschlüsse über Verarbeitungsfehler und Verformungszustände erlauben. Generell sollten zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren wie Ultraschallprüfung und Rissdetektion mit dem Farbeindring-Verfahren (Met-L-Check) bei der Bauteiluntersuchung bevorzugt werden, wobei sich dies in der Praxis leider nur in geringerem Maße realisieren lässt.

Neben den physikalisch-chemischen Ausgangsbedingungen des eingesetzten Stahlwerkstoffes sind weitere Rahmenbedingungen, wie korrosionsschutzgerechtes Konstruieren und die vorgesehene Korrosionsschutzstrategie von Bedeutung. Da die Funktionalität (Tragsicherheit) eines Stahlbauteiles nur als gegeben angesehen werden kann, wenn an ihm kein korrosiver Angriff erfolgt, kommen der Erhaltung der Schutzwirkung von applizierten Korrosionsschutzkonzepten eine ent-

scheidende Bedeutung für die Lebensdauer von Stahlbauteilen zu (DIN EN 1993-1). Tritt während des Einsatzes des aktiv oder passiv geschützten Stahlbauteiles ein Ausfall des Schutzprinzips auf, so wird innerhalb kurzer Zeit aus dem Korrosionsschutzschaden ein Korrosionsschaden am Tragwerk, welcher die Tauglichkeit und Betriebsfestigkeit rasch reduziert bzw. einschränkt.

Schäden an polymeren Korrosionsschutzbeschichtungen des Stahlwasserbaues

Lokale Schäden, die an Korrosionsschutzbeschichtungen auftreten, sind vielfach auf Verarbeitungsfehler bei der Applikation (Pinseln, Rollen, Airless-Spritzen oder auf mangelhafte Vorbereitung der Stahloberfläche) zurückzuführen. So können Rückstände von Zunder, Rost, Öl, Schmierfette, Silikon, Stäuben, Strahlgut, Offspray und hygroskopischen Salzen zu massiven Haftungsproblemen der applizierten Polymerbeschichtung am Stahlsubstrat führen. Die negativen Auswirkungen auf die resultierende Korrosionsschutzbeschichtung, z. B. in Form von Abplatzungen, lokale Delamination, Blasenbildung und Aushärtstörungen, treten meist innerhalb von kurzen Zeiträumen (0,5 – 2,5 Jahre) nach Wassereinwirkung auf. Bei gravierenden Verarbeitungsfehlern sind die sich einstellenden negativen Erscheinungen meist schon in laufenden Betrieb feststellbar (mangelnde Aushärtung, Schleierbildung und Rötung (Blushing) durch Carbamatisierung). Spätestens jedoch bei der zyklischen Bauwerksinspektion sind Korrosionsbeschichtungsschäden wie Porenbildung, Lochfraß oder Entschichtung mit oder ohne Rostbildung wahrnehmbar.

Nachdem sich der Korrosionsschutzschaden am Stahlwasserbauwerk eingestellt hat, kann durch verschiedene Analyseverfahren die Schadensursache eingegrenzt bzw. analysiert werden. Darüber hinausgehend kann neben der Schadensursache meist auch ein Sanierungskonzept erarbeitet bzw. vorgeschlagen werden. Da die in der WSV eingesetzten Korrosionsschutzsysteme in der Regel durch die BAW auf ihre Korrosionsschutzwirkung hin untersucht und zugelassen wurden, können meist nur durch Verarbeitungsfehler, Fehlplanung, fehlerhaften Einsatz oder außergewöhnliche Umgebungsbedingungen (z. B. hohe Geschiefbefracht, Havarien oder Mikrobiell Induzierte Korrosion „MIC“) drastische Korrosionsschäden auftreten. Bild 2 zeigt eine lokale MIC-Lochfraßstelle an einem epoxidharzbeschichteten Wehrkörper nach 16 monatigen Einsatz in der Werra.

Auch der Einsatz nicht erlaubter Universal- und Nitroverdünnungen bei der Applikation von Stahlwasserbaubeschichtungen kann zu einer nachhaltigen Störung derselbigen führen. Sowohl die lösemittelfreien Epoxidharzsysteme (Restlösemittelgehalt <1 M-%) als auch die feuchtigkeitshärtenden 1K-PUR-Systeme bzw. normalhärtenden 2K-PUR-Systeme sind für den Einsatz von Universalverdünnern und die daraus resultierenden Aushärtfehler besonders sensibel.

Dabei kann es zum Schadensbild der Lösemittelretention kommen, welches meist mit der Ausbildung wassergefüllter Blasen und der Delamination (Ablösung) der Deckschicht vom Stahlsubstrat oder von der Zinkstaubgrundierung verbunden ist.



Bild 2: Lokaler MIC-Schaden mit sehr hohen Abtragsraten (etwa $1750 \mu\text{m/a}$) nach dem Öffnen der gebildeten Rostblase (Tuberkel)

Bild 3 gibt das Schadensbild einer solchen Lösemittelretention am Beispiel einer „verdünnergeschädigten“ Epoxidharzbeschichtung an dem Drehsegmenttor der Hauptschiffahrtsöffnung eines Sperrwerkes wieder. Mit Hilfe der Gaschromatographie konnte bei diesem Schadensfall noch nach 6 Jahren im Blasenwasser befindliche, polare Lösemittel wie Isobutanol, 1-Butanol, 2-Methoxypropanol und Methylisobutylketon festgestellt werden.

In Bild 4 wird die Erhöhung der zeitlichen Wasseraufnahme einer Epoxidharzbeschichtung mit unterschiedlichen Gehalten an Universalverdünnung, Härterkomponente und Benzylalkohol bzw. einer alkoholgeschädigten Polyurethanbeschichtung in Karlsruher Leitungswasser nach einer Kurzzeitmessung graphisch darstellt. Hierbei bewirken der, durch Universalverdünnerzugabe erhöhte Restlösemittelgehalt, der hygroskopische Aminhärter und der wasserlösliche Benzylalkohol, eine gesteigerte Wasserdiffusion und fungieren als sogenannte „Wasserbrücke“ zum Baustahl hin.

Darüber hinaus wirken viele schwerflüchtige Verdünnerkomponenten und vorhandener Benzylalkohol als Quasi-Weichmacher und bleiben über lange Zeiträume im Beschichtungssystem. Das Schadensbild der Lösemittelretention mit Blasenbildung (ggf. mit Delamination) tritt vor allem bei übermäßiger Verdünnerzugabe, zu hohem Härtereinsatz, großen Überschichtdicken, zu kurzen Überarbeitungszeiträumen und zu rascher anschließender Wasserbeanspruchung auf.



Bild 3: Ausbildung wassergefüllter Blasen auf einer lösemittelgeschädigten Epoxidharz-Stahlwasserbaubeschichtung durch Lösemittelretention

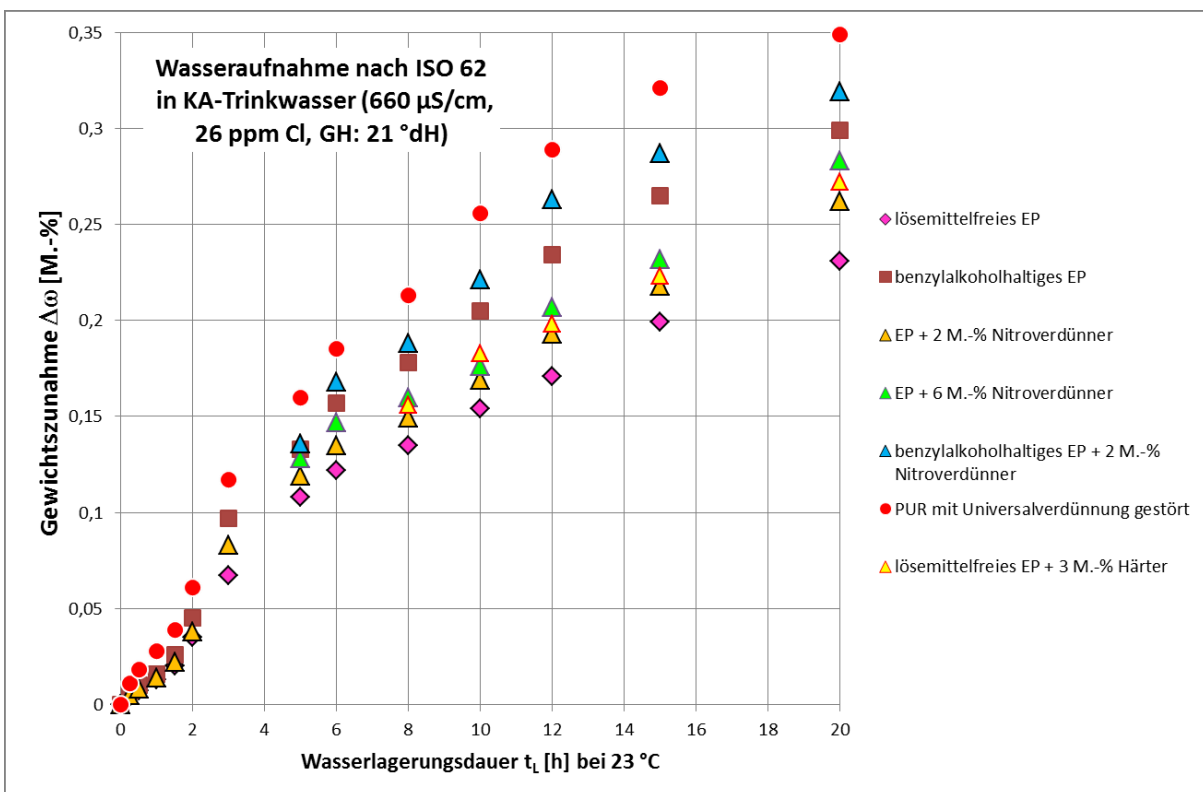


Bild 4: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme gestörter Beschichtungsstoffe in Karlsruher Trinkwasser bei 23 °C

Aktueller Stand der Untersuchungen möglicher Smart-Repair-Beschichtungssysteme

Bei der Auslegung des Stahlbauteiles bleibt normalerweise die Korrosion unberücksichtigt und sollte eigentlich nicht auftreten. Tritt Korrosion an Stahlsubstrat einhergehend mit Querschnittsverminderung, Oberflächenaufrauung, Verschärfung des Kerbfalles, ggf. mit Mikrorissbildung und einer Versprödung des Werkstoffes auf, so stellt diese eine Reduzierung der Standsicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit dar. Diese Reduzierung der Lebensdauer kann durch die Bestimmung entsprechender Wöhler-Kurven nachgewiesen werden. Deshalb sollten Korrosionserscheinungen (Bimetallkorrosion, Rotrostbildung, abgängige Beschichtung u. a.) protokolliert und so schnell als möglich im Rahmen einer Smart-Repair-Maßnahme oder durch eine Vollerneuerung in Stand gesetzt werden. Solche Smart-Repair-Maßnahmen wie das Anbringen einer gewässerspezifischen galvanischen Anode oder das lokale Ausbessern (Versiegeln) von schadhafte Beschichtungsstellen durch geeignete Beschichtungssysteme bei meist minimaler Oberflächenvorbereitung sind dazu geeignet, vorhandene Korrosionssituationen schnell und kostengünstig zu entschärfen. Wobei diese temporäre Ertüchtigung nur für einen gewissen Zeitraum schützend wirkt.

Nach den ersten Vorversuchen bei der BAW vor drei Jahren konnten an MIC-geschädigten Langzeitauslagerungsplatten mit korrodierter Fräsnut festgestellt werden, dass feuchtigkeitshärtende, einkomponentige Polyurethanbeschichtungssysteme beim Einsatz als Smart-Repair-Material besser abschneiden als ebenfalls geeignete, höherviskose, zweikomponentige Epoxidharzbeschichtungen aus Bisphenol A/F-Harzbasis. Dies kann auf ihre unproblematischere Anwendbarkeit (keine Mischungsfehler), die leichte Streichbarkeit, die gute Oberflächentoleranz und die erhöhte Eindringung bzw. Verzahnung in das korrodierte Substrat zurückgeführt werden.

Beim Anlegen von Probeflächen am Untertor (Oktober 2015) und am Obertor (Oktober 2016) der Neckarschleuse Marbach konnten unterschiedliche Reparatursysteme (auch aus dem Offshore-Windanlagen-Bereich) für den Smart-Repair-Einsatz geprüft werden. Zur Oberflächenvorbereitung wurden die Probeflächen reichlich mit Wasser gewaschen, ggf. mit Brennspritus „entwässert“, zwischengetrocknet und mit bis zu drei Arbeitsgängen Beschichtungsmaterial im Abstand von 8 - 14 Stunden ausgebessert bzw. überbeschichtet.

Bild 5 zeigt die Applikation von Epoxidharzmaterial aus einer Doppelkartusche bei sehr feuchtem Klima (Regen).

Bild 6 und Tabelle 1 geben die Lage der neuen Probeflächen am Obertor und die jeweils applizierten Smart-Repair-Ausbesserungssysteme wieder.



Bild 5: Verstreichen einer Epoxidharzbeschichtung aus einer Doppelkartusche mit einem Pinsel (Bartlänge mit einer Schere auf 2 cm gekürzt)

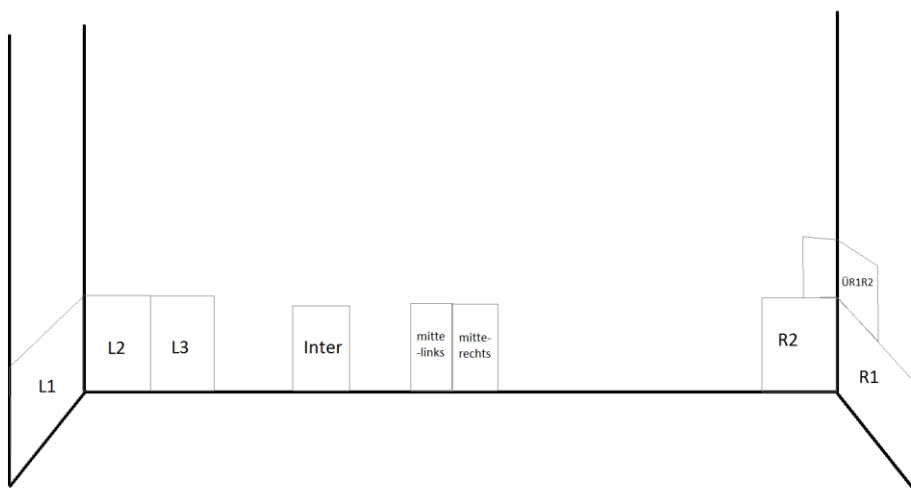


Bild 6: Skizzierte Anordnung der einzelnen Probeflächen (jeweils 0,75 – 1,0 m²) am Obertor der Schleuse Marbach im Unterwasserbereich

Ebene Fläche	Fläche mit Verschraubungen bzw. Nieten	1. Schicht	2. Schicht	3. Schicht
L1	obere 3-4	Carapax Zink M (grau)	Carapax Non-Abrasiv (hellgrau)	Carapax Non-Abrasiv (hellgrau)
L2	untere 3	Stelpant Zinc PUR (grau)	Stelpant PU Combination 300 (rotbraun)	Stelpant PU Combination 300 (schwarz)
L3	---	Stelpant PU Combination 300 (rotbraun)	Stelpant PU Combination 300 (schwarz)	---
Inter	---	International InterZone 954 Spray (schwarz)	---	---
ML (mitte-links)	---	Alkylelastomer-beschichtung (schwarz)	Alkylelastomer-beschichtung (schwarz)	Alkylelastomer-beschichtung (schwarz)
MR (mitte-rechts)	---	International Interzone 954 Spray (schwarz)	---	---
R2	untere 3	Kleiberit (blaßgrün) Dickschicht	---	---
R1	obere 3	SikaCor PUR Zink (grau)	SikaCor PUR SW (schwarz)	SikaCor PUR SW (schwarz)
ÜR1R2	4	Alkylelastomer-beschichtung (schwarz)	Alkylelastomer-beschichtung (schwarz)	Alkylelastomer-beschichtung (schwarz)
Innen L Im Obertor (vom Oberwasser aus gesehen links zur linken Schleusenwand hin + im rechten Obertor eine kleine Stelle)		SikaCor SW-1000 Repacor (gelb), Dickschicht	---	---
Innen R Im Obertor (vom Oberwasser aus gesehen rechts zur Mitte hin)		AB-COR 950 SW Repair (grau), Dickschicht	---	---

Tabelle 1: Übersicht der angewandten Beschichtungssysteme und die Schichtaufbauten auf den verschiedenen Probestellen

Bei der händischen Verarbeitung in den Vor-Ort-Versuchen haben sich die guten Laborerfahrungen bei den 1K-Polyurethanen bestätigt. Eine Verdünnung-Zugabe musste jedoch auch bei den viskosereren Epoxidharzbeschichtungen während der Verarbeitung nicht erfolgen.

Die Applikation des Beschichtungsmittels aus einer Spraydose gestaltet sich sehr einfach, jedoch konnte hierbei nur geringere Einzelschichtdicken (<100 µm) erzielt werden. Die gut streichbare Spezialbeschichtung auf Basis eines Alkylelastomers zeigt aufgrund der niedrigen Glasübergangstemperatur und der sehr hohen Bruchdehnung (250 - 300 %) sehr gute rissüberbrückende Eigenschaften. Bei einer farblosen Variante dieser Beschichtung (d. h. ohne Füllung mit Graphit oder Ruß) wäre prinzipiell ein optisches Monitoring vorhandener Risse im Stahlbauteil denkbar.

Tabelle 2 gibt wichtige mechanische und physikochemische Eigenschaften von Beschichtungen für die Instandsetzung von Korrosionsschäden und den Smart-Repair-Einsatz vergleichend wieder.

Bindemittel (Anwendung)	E-Modul E [MPa]	Zugfestigkeit (Maximalkraft) R _m [MPa]	Bruch- dehnung A [%]	Shore-Härte A bzw. D (Abriebwert a _w [μm/10 ⁴ U])	Wasser- aufnahme ω _{H2O} [M.-%]
Epoxidharz EP (zweikomponentig)	2.000- 4.000	40-60	10-15	D: 70-85 (50-30)	0,4-1,0
Polyurethan PUR (einkomponentig)	500- 1.000	30-45	50-65	A: 60-75 (55-20)	1,0-3,0
Ungesättigtes Polyesterharz UP (zweikomponentig)	5.000- 7.000	10-20	5-10	D: (55-30)	0,5-1,5
Alkylelastomer BR (einkomponentig)	2-25	15-25	300-600	A: 40-50 (?, eher hoch, >60)	0,1-0,5

Tabelle 2: Mechanische und physikochemische Materialeigenschaften der Bindemittel in den Smart-Repair-Beschichtungen

Auch bieten sich Beschichtungen aus der Unterwasseranwendung für den Einsatz in dauerfeuchten Bereichen oder bei permanenter Beregnung an, wobei die Verarbeitung dieser zweikomponentigen Systeme mit einem Knollenpinsel ohne größere Probleme erfolgen kann. Auf die Anwendung einer Zinkstaubgrundierung, welche ihre besonderen korrosionsschutztechnischen Stärken nach Schuster (1959) und Lindquist (1980) vor allem bei Brack- und Meerwasseranwendungen zeigen, wurde teilweise verzichtet. Auch bei Lochfraßstellen im gereinigten Stahlsubstrat kann zunächst eine dünne Schicht der Stahlwasserbaubeschichtung an den auffälligen Stellen aufgezogen werden. Abschließend wird dann nach dem „Auffüllen“ der Vertiefungen und einer ausreichenden Zwischentrocknung, der weitere Systemaufbau abschließend aufgebracht. Hierbei kann auf eine Grundierung vor allem bei kleineren Schadflächen verzichtet werden.

Bei den ersten Zwischenauswertungen der Probeflächen (geplant Juli 2017) werden messbare Tendenzen bezüglich der Haftfestigkeit der angewandten Smart-Repair-Systeme auf dem minimal vorbereiteten und teilweise korrodierten Stahloberflächen erwartet.

Die chemische Untersuchung einer geläufigen Ausbesserungsbeschichtung konnte einen neuen Aushärtemechanismus für ein 1K-Polyurethan (oder besser 1K-Polyharnstoff) unter Abspaltung von Benzaldehyd (Marzipangeruch) zu Tage fördern. Bild 7 gibt diese Vernetzungsreaktion als chemische Reaktionsgleichung wieder.

Auch konnte bei den BAW-Laborversuchen festgestellt werden, dass die Zugabe von Hedion, Estragol und Anethol (Bestandteile von ätherischen Pflanzenölen) im Bereich von 0,5 bis 1,0 M.-% zu

einer 1K-Polyurethanbeschichtung, die korrosive Wirkung von sulfatreduzierenden MIC-Bakterien an den künstlich verletzten Versuchsplatten um 57, 62 bzw. 83 % reduziert.

Reaktion IV:

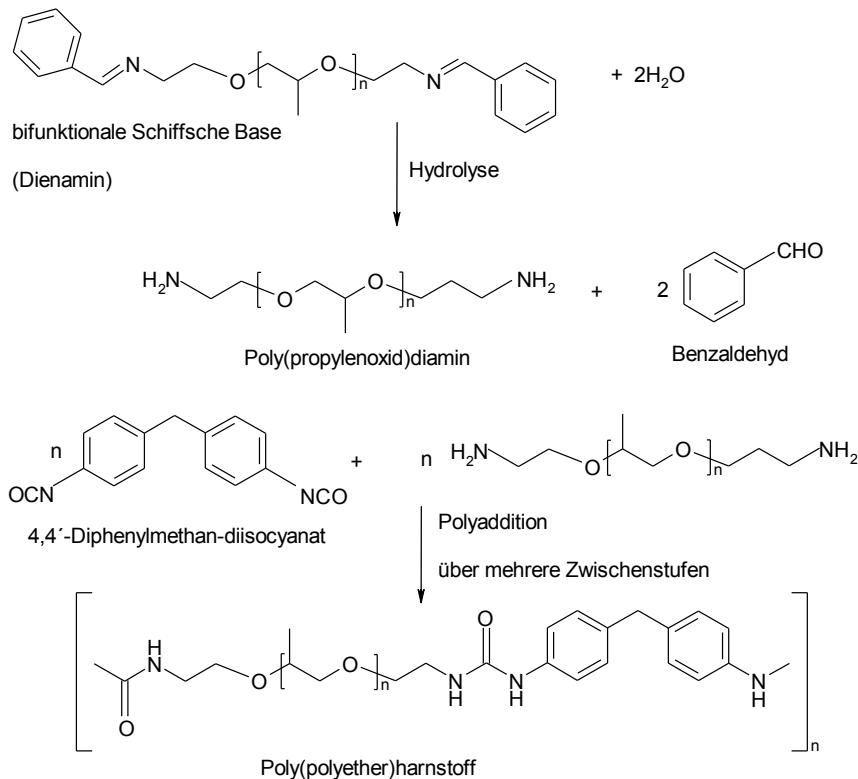


Bild 7: Aushärtereaktion der feuchtigkeitshärtenden 1K-Polyurethanbeschichtung SikaCor PUR SW

Literatur

DIN EN 1993-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005/A1:2014

Schuster, H. J. (1959): Über die Wirkungsweise des metallischen Zinks in Anstrichen. In: Materials and Corrosion. 10(8), S. 490-494.

Lindquist, St.-A. (1980): Aspects of galvanic action of zinc rich paints. In: Materials and Corrosion, 31(7), S. 524-527.