

Gallus Rehm und Ulf Nürnberger, Stuttgart

Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Spannstählen

Mitteilung des Lehrstuhls für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart

Bericht Nr. 1943 des Werkstoffausschusses des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute*) und Bericht Nr. 76 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.**)

Erörterung der Anwendung verzinkter Spannstähle. Untersuchungen über die Dicke, Gleichmäßigkeit und Haftung der Zinkauflage bei feuerverzinkten Spannstählen.

Properties of hot-dip galvanized coatings on cold-deformed prestressed steels

Discussion of the application of galvanized prestressed steels. Investigations on thickness, uniformity, and adhesion of the zinc coating on hot-dip galvanized prestressed steels.

Propriétés de revêtements galvanisés par trempé sur des aciers précontraints déformés à froid

Discussion de l'application d'aciers précontraints galvanisés. Etudes sur l'épaisseur, uniformité et adhérence du revêtement de zinc sur des aciers précontraints galvanisés par trempé.

Die Bewehrung von Spannbetonkonstruktionen ist bei ausreichender Betondeckung im allgemeinen gut gegenüber Korrosion geschützt. Die Korrosionsbeständigkeit

der Stahlbewehrung im Beton ist darauf zurückzuführen, daß der Porenelektrolyt alkalisch ist. In Sonderfällen ist dieser Schutz nicht genügend sichergestellt, zum Beispiel nach schnellerer Neutralisierung des Calciumhydroxids (Carbonatisierung) bei der Verwendung von Sonderbetonen mit porigen Gefügen (Gas- und Schaumbeton, Leichtbeton), bei geringer Betonüberdeckung und bei Ribbildung im Beton. Die im allgemeinen gute Korrosionsbeständigkeit, die der Beton der einge-

*) Vorgetragen in einer Sitzung von Fachleuten des Werkstoffausschusses am 23. September 1977 in Düsseldorf.

***) Träger des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.: Deutsche Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung und Oberflächenbehandlung e. V. (DFBO), Düsseldorf; Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Düsseldorf; Bundesverband Draht e. V., Düsseldorf; Verband Deutscher Feuerverzinkereien, Hagen; Preußag AG Metall, Goslar; Metallgesellschaft AG, Frankfurt; Technische Vereinigung für Schraubverbindungen und Gewinderohre e. V., Düsseldorf.

betteten Bewehrung verleiht, kann auch versagen, wenn korrosionsfördernde Stoffe wie Chloride (Meerwasser, Streusalz, aerosolische Salze) oder schwefeloxid- und stickstoffoxidhaltige Verbindungen (Industriegas) auf den Beton einwirken. Die Gefahr des Rostens ist für Spannstähle naturgemäß auch gegeben, wenn sie auf der Baustelle für längere Zeit atmosphärischen Einflüssen ausgesetzt sind (Stahllagerung, Spannglieder bei Spannbeton mit nachträglichem Verbund).

Die genannten Beispiele zeigen, daß die Spannbewehrung in manchen Anwendungsfällen zusätzlich vor Rostbildung geschützt werden muß. Der Gedanke, diesen Schutz durch Verzinken zu erbringen, ist nicht neu. Feuerverzinkte Betonstähle werden bereits, vor allem im Ausland¹⁾ bis¹¹⁾, angewendet. Sie finden besonders in maritimer Umgebung Verwendung, wobei ein erhöhter Korrosionswiderstand der verzinkten Bewehrung gegenüber unverzinkter Bewehrung in chloridhaltiger Umgebung angenommen wird. Jedoch liegen auch Versuchsergebnisse¹²⁾ bis¹³⁾ vor, nach denen die Schutzwirkung von Zinkdeckschichten gegenüber chloridhaltigen Betonen nicht zu hoch angesetzt werden darf.

Das Verzinken hochfester Spannstähle bringt eine Reihe von Problemen mit sich, deren Kenntnis bei einer sachgemäßen Anwendung vorausgesetzt werden muß. Unbestritten ist die hohe Schutzwirkung gegenüber abtragender Korrosion.

In Korrosionsversuchen und im Anwendungsfall verhielt sich der verzinkte Stahl im Beton stets besser als der unverzinkte⁹⁾ bis²⁰⁾; diese Aussage gilt auch für den carbonatisierten Beton²⁰⁾.

Bei der Einwirkung des Calciumhydroxids des Betons auf Zinkmetall und verzinkte Stähle wird Calciumhydrozinkat gebildet. Mit dieser Zinkatbildung ist offenbar eine passivierende Wirkung verbunden, die die Geschwindigkeit der Zinkauflösung herabsetzt. Es wird vielfach angenommen, daß bei feuerverzinkten Drähten im Beton eine Selbsthemmung der Korrosion eintritt, wenn die Legierungsschichten erreicht werden, da diese Schichten ein eisenähnliches Verhalten zeigen. Auch unter Bedingungen, die bei unverzinkten Spannstählen Spannungskorrosion hervorrufen, führt eine ausreichend dichte Verzinkung zu einer Behinderung der Reaktion¹⁵⁾.

Für die Anwendung ist von Bedeutung¹³⁾ bis²¹⁾, daß Zinkmetall mit Calciumhydroxid kurzfristig unter Wasserstoffentwicklung reagiert, wobei das dabei entstehende Calciumhydrozinkat die Betonverfestigung verzögert. Eine Bildung von Calciumhydrozinkat kann jedoch durch Chromatzusätze behindert werden, wodurch das Verbundverhalten verbessert wird. Eine Verzögerung der Zementverfestigung ist unter Umständen bei der Anwendung verzinkter Bewehrung zu berücksichtigen, wenn die Bauweise auf sofortigem Verbund beruht. Eine Beanspruchung des Verbundes sollte bei verzinkter Bewehrung daher erst nach rd. zwei Wochen geschehen. Nach beendeter Hydratation verbessert sich das Verbundverhalten glatter, verzinkter Bewehrung im Beton merklich⁵⁾ bis⁹⁾ bis¹⁶⁾ bis²¹⁾ bis²³⁾. Bei chromatreichen Zementen können die Verbundwerte verzinkter Stähle auf ein Mehrfaches der Werte von unverzinktem Stahl zunehmen²¹⁾.

Eine entscheidende Gefahr ergibt sich aus der Tatsache, daß die Calciumzinkatbildung unter Wasserstoffentwicklung abläuft¹³⁾. Damit ist unter Bedingungen, die

sich beim und nach dem Betonieren einstellen, bei verzinkten Spannstählen die Gefahr einer Wasserstoffversprödung gegeben²⁴⁾ bis²⁷⁾. Zwar ist Zink nahezu undurchlässig für Wasserstoff, jedoch ist bei verzinkten Drähten das stellenweise Auftreten zinkfreier Stahloberflächen nicht völlig auszuschließen. Bei verzinkten, patentiert gezogenen Drähten ist die Gefahr von wasserstoffinduzierten Brüchen offenbar nur gering, da diese Stähle von Natur aus weniger empfindlich gegenüber Wasserstoffversprödung sind¹⁵⁾ bis²⁶⁾ bis²⁷⁾. Dagegen ist Vorsicht geboten bei der Verzinkung vergüteter Spanndrähte, insbesondere wenn ein „empfindlicher“ Spannstahl verwendet wird²⁶⁾. Soweit die Reaktion zwischen Zink und frischem Beton bei Verwendung verzinkter Spannstähle zu Störungen Anlaß geben kann, ist diese Reaktion nach bisherigen Kenntnissen am wirksamsten durch erhöhte Chromatgehalte im Beton zu verhindern¹³⁾ bis²⁵⁾.

Die Dicke des Zinküberzuges ist in zweifacher Hinsicht von Bedeutung. Einerseits wird für eine hohe Korrosionsbeständigkeit des verzinkten Drahtes eine möglichst dicke Schicht gewünscht, andererseits zeigen gerade hohe Zinkauflagen eine weniger gute Haftung bei mechanischer Beanspruchung²⁸⁾ bis³¹⁾; diese Feststellung gilt auch für verzinkte Spannstähle¹⁵⁾. Abgeplatzte Zinkschichten bieten naturgemäß keinen Schutz gegenüber anodisch abtragender Korrosion. Inwieweit die bei einer Verformung der Zinkauflage stets entstehenden Zinkrisse und örtlichen Abplatzungen zu einer Verminderung der Korrosionsschutzwirkung verzinkter Bewehrungsstähle in carbonatisiertem Beton führen können, ist noch ungeklärt¹⁵⁾. Bei atmosphärischer Korrosion konnte in mehrjährigen Auslagerungsversuchen in Stadtluft auch für kleinere Fehlstellen der Zinkauflage (Löcher von wenigen µm Ausdehnung) eine ausreichende Flächenwirkung des Zinks nicht in jedem Fall festgestellt werden.

Bei Spannungskorrosionsversuchen an verzinkten, hochfesten Drähten in H₂S-Lösungen waren Risse in der Zinkauflage bevorzugte Ausgangsstellen von Rissen im Stahl. Insgesamt gilt jedoch festzustellen, daß Zinküberzüge auf hochfesten, kaltumgeformten Drähten – auch bei Vorhandensein örtlicher Fehlstellen in der Zinkauflage – die Empfindlichkeit gegenüber Spannungskorrosion (bei Prüfung in den üblichen Laborprüflösungen) erheblich herabsetzen¹⁵⁾ bis²⁷⁾.

Für die korrosionsschützende Wirkung des Zinküberzuges auf hochfesten Bewehrungsstählen ist somit die Gleichmäßigkeit und Dichte der Zinkauflage entscheidend. Zudem sollte in stark korrosiver Umgebung ein Mindestwert der Schichtdicke nicht unterschritten werden. Bei Feuerverzinkungen bestimmt auch der Aufbau des Zinküberzuges seine Abtragungsgeschwindigkeit. So nimmt mit zunehmendem Eisengehalt der Legierungsphasen die Korrosionsgeschwindigkeit ab. Vom Aufbau des Zinküberzuges hängt außerdem weitgehend dessen Haftung ab²⁸⁾ bis³¹⁾. Aus den hier aufgeführten Problemen ergibt sich die folgende Aufgabenstellung zu dieser Arbeit.

Bei feuerverzinkten, patentiert gezogenen Spannstählen sollen die Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage ermittelt und mit statistischen Verfahren ausgewertet werden. Weiterhin sind die Umformbarkeit des Verbundwerkstoffes Zink-Stahl und vor allem die Haftung der Zinkschicht auf dem Stahl festzustellen. Durch Ver-

gleichsbetrachtungen gilt zu ermitteln, ob ein Zusammenhang zwischen dem Aufbau der Zinküberzüge und der Rauheit des Haftgrundes einerseits und den gemessenen Haftwerten andererseits besteht. Schließlich sollen die Ergebnisse der Verzinkungsausführung unter anwendungsnahen Gesichtspunkten im Hinblick auf eine Verwendung der verzinkten Spannstähle im Bauwesen erörtert werden.

Versuchswerkstoffe

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an unverzinkten und verzinkten Spannstählen durchgeführt. Es wurden glatte Drähte mit Durchmessern von 6 und 12 mm sowie Litzen mit einem Durchmesser von rd. 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") verwendet. Die Herstellungsbedingungen der Spanndrähte und -litzen sind *Tafel 1* zu entnehmen.

Tafel 1. Arten der Spanndrähte und -litzen
Table 1. Types of prestressed wires and strands

Werkstoff	Behandlung
1 und 3	patentiert, gezogen 6 und 12 mm Durchmesser, rollengerichtet, angelassen 30 s bei 340 °C im Bleibad, abgeschreckt auf rd. 100 °C, auf Ringe mit einem Durchmesser von 2000 mm aufgewickelt
2 und 4	wie Werkstoffe 1 und 3, abstreifverzinkt (<i>Tafel 3</i>)
5	patentiert, gezogen 3,05 und 3,2 mm Dmr., verlitzt zu rd. 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") Dmr., bei 380 °C unter Zugspannung von 0,33 R_m (Nennzugfestigkeit) angelassen (stabilisiert), auf Ringe von 900 mm aufgewickelt
6	patentiert, gezogen 3,05 und 3,2 mm Dmr., abstreifverzinkt (<i>Tafel 3</i>), verlitzt zu rd. 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") Dmr., bei 380 °C unter Zugspannung von 0,33 R_m (Nennzugfestigkeit) angelassen (stabilisiert), auf Ringe mit einem Durchmesser von 775 mm aufgewickelt

Tafel 2. Chemische Zusammensetzung der untersuchten Spannstähle
Table 2. Chemical composition of the prestressed steels studied

Werkstoff	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% N	% Al
1 und 2	0,79	0,21	0,80	0,029	0,014	0,005	0,023
3 und 4	0,76	0,19	0,74	0,032	0,026	0,005	0,016
5 und 6	0,74	0,21	0,92	0,038	0,017	0,006	0,014

Wie *Tafel 2* zeigt, entspricht die chemische Zusammensetzung der Stähle handelsüblichen Spannstahlsorten. Die Spannstähle wurden kontinuierlich verzinkt (Durchlaufverzinkung); die Reinzinkauflage wurde mit Asbestpackung abgestreift.

Tafel 3. Verzinkungsbedingungen (Beizen, Fluxen, Verzinken) für die Spannstähle
Table 3. Galvanizing conditions (pickling, fluxing, galvanizing) for the prestressed steels

Werkstoff	Nenndurchmesser mm	Beizen		Temperatur °C	Dauer s	Fluxen ¹⁾		Verzinken		Ausziehgeschwindigkeit ⁴⁾ m/min
		Massengehalt HCl in %	g Fe/l			Tauchdauer s	Temperatur °C	Tauchdauer s		
2 ¹⁾	6	18	20	40	45	4	460	22	8	
4 ¹⁾	12	18	20	40	90	8	460	44	4	
6 ²⁾	rd. 9,5 ($\frac{3}{8}$ ")	15	40	45	20	1,7	460	17	17	

¹⁾ Behandelt im Bleibad (430 °C, 44 s). – ²⁾ Behandelt im Bleibad (400 °C, 20 s). – ³⁾ Ammoniumchloridlösung (Dichte 1,02 g/cm³, Temperatur 80 °C). – ⁴⁾ Abstreifen mit Asbestpackung.

Tafel 3 enthält die wesentlichen Angaben zum Beizen, Fluxen und Verzinken. Als Beizlösung wurde Salzsäure verwendet. Durch das Anlassen im Bleibad konnte die Beizdauer verkürzt werden.

Flußmittel war Ammoniumchlorid. Bei Werkstoff 4 war die Tauchdauer im Zinkbad mit 44 s doppelt so groß wie bei den Werkstoffen 2 und 6. Die Durchlaufgeschwindigkeit war bei den Litzendrähten wesentlich größer als bei den Drähten.

Versuchsergebnisse

Dicke, Aufbau und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage

Zur qualitativen Beschreibung der Verzinkungsausführung kann festgestellt werden, daß die Drähte und Litzen eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Rilligkeit der Oberfläche in Richtung der Drahtachse zeigen (*Bild 1*). Die Riefen sind die übliche Folge des Abstreifens. In wenigen Einzelfällen zeigen die Zinkoberflächen auch noch Reste von Reinzink, die die Schichtdicke örtlich verstärken.

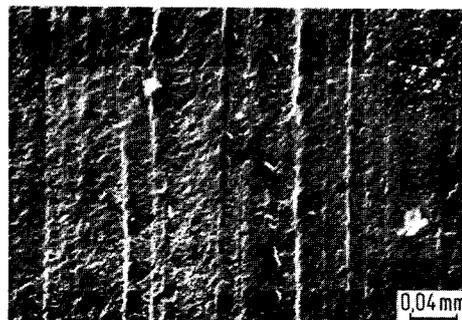


Bild 1. Ausbildung der Oberfläche verzinkter Spannstähle; ausgewählte Stelle mit Längsriefen

Figure 1. Condition of the surface of galvanized prestressed steels; selected spot with longitudinal scores

Die *Bilder 2a und b* zeigen den kennzeichnenden Aufbau der Zinkauflagen. Bei allen drei Spannstahlsorten ist einer verhältnismäßig dünnen δ_1 -Palisadenschicht eine im Verhältnis zur Gesamtauflage dicke ζ -Schicht überlagert. Die Γ -Phase ist nicht deutlich ausgebildet, was im wesentlichen damit zusammenhängt, daß Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt nur eisenarme Phasen ausbilden³²⁾. Durch das Abstreifen ist eine Reinzinkschicht nicht mehr vorhanden, wenn man von den etwa 1 bis 3 μ m dicken Bedeckungen der Hartzinkschicht absieht, die aus einem Gemisch von Reinzink und Hartzinkkristallen bestehen. Vor allem bei den Spannstählen 2 und 4 ist die Reinzinkauflage in einzelnen, durch

geringeres Abstreifen entstandenen Bereichen stärker ausgebildet (*Bild 2c*), was verfahrensbedingt ist.

Besondere Aufmerksamkeit wurde der Ausbildung der Grenzfläche Stahl/Zink gewidmet, nachdem bei vorangegangenen Untersuchungen bei verzinkten, hochfesten Drähten örtliche Zinkeinwanderungen im Stahl festgestellt wurden, die wie Oberflächenkerben wirken¹⁵⁾. Im vorliegenden Fall waren derartige Unregelmäßigkeiten nicht vorhanden.



Bild 2. Kennzeichnender Aufbau von Zinküberzügen; a) und b) abgestreifter Bereich, c) mit Reinzinkverdickung

Figure 2. Characteristic structure of zinc coatings; a) and b) wiped range, c) with pure zinc thickening

Bisher wurde zur Bestimmung der Gesamtzinkauflage das Flächengewicht durch chemisches Ablösen des Überzuges ermittelt. Hier unterscheidet man zwei Verfahren. Beim gravimetrischen Verfahren nach DIN 50 952 – Bestimmung des Flächengewichtes von Zinküberzügen auf Stahl durch chemisches Ablösen des Überzuges – wird der Gewichtsverlust, der durch das Ablösen entsteht, durch Wiegen der Proben vor und nach dem Ablösen der Zinkauflage ermittelt. Beim volumetrischen Verfahren nach DIN 51 213 – Prüfung metallischer Überzüge auf Drähten – wird der beim chemischen Ablösen frei werdende Wasserstoff bestimmt, woraus die Menge des abgelösten Zinks errechnet wird. Der Nachteil dieser Verfahren liegt darin, daß nur ein Mittelwert ermittelt wird, dünnere Bereiche und Verdickungen jedoch nicht angezeigt werden.

Im vorliegenden Fall wurde zur Bearbeitung der Verzinkungsausführung mit statistischen Verfahren die Dicke der überwiegend aus Hartzink bestehenden Gesamtzinkauflage unter dem Rasterelektronenmikroskop ausgemessen und ausgewertet. Wie an anderer Stelle¹³⁾ gezeigt wurde, können so Ergebnisse erzielt werden, die eine verbesserte Beurteilung der Zinkauflage hinsichtlich Korrosionsschutz und Haftung zulassen. Bei jedem Werkstoff wurden 800 Meßstellen berücksichtigt.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich im wesentlichen auf Kenngrößen, die eine möglichst große Aussagefähigkeit im Hinblick auf eine Beurteilung der Zinkauflage ermöglichen. Es sind dies:

- \bar{x} : Statistischer Mittelwert; er gibt an, ober- oder unterhalb welchen Wertes der Schichtdicke je 50% aller Werte liegen.
- x_{ar} : Arithmetischer Mittelwert; er liefert bei den hier vorhandenen Verteilungen stets Werte oberhalb des statistischen Mittelwertes, da sich bei x_{ar} auch wenige Einzelwerte mit großen Ziffern stark auswirken. Der arithmetische Mittelwert ermöglicht eine Umrechnung der Schichtdicke in das Flächengewicht.
- d_{z-90} : Der hierdurch gekennzeichnete Streubereich der Schichtdicke erfaßt 90% der Drahtoberfläche. Der Wert beurteilt nicht nur die Streuung an sich, sondern ist im Vergleich mit dem statistischen Mittelwert zugleich auch ein Maß für die „Schiefe“ (bei einer Normalverteilung ist – vom statistischen Mittelwert aus gesehen – die Streuung nach oben und unten gleich groß).

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in *Tafel 4* zusammengefaßt.

Tafel 4. Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (statistische Auswertung)

Table 4. Thickness and uniformity of the zinc coating (statistical evaluation)

Werkstoff	Durchmesser mm	\bar{x} μm	x_{ar} μm	d_{z-90} μm	Flächengewicht g/m^2
2	6	13,5	17	6,5 bis 25	121
4	12	37,5	39	30 bis 44	279
6	$\left\{ \begin{array}{l} 3,05 \\ 3,20 \end{array} \right.$	12,0	15	8,0 bis 18	107

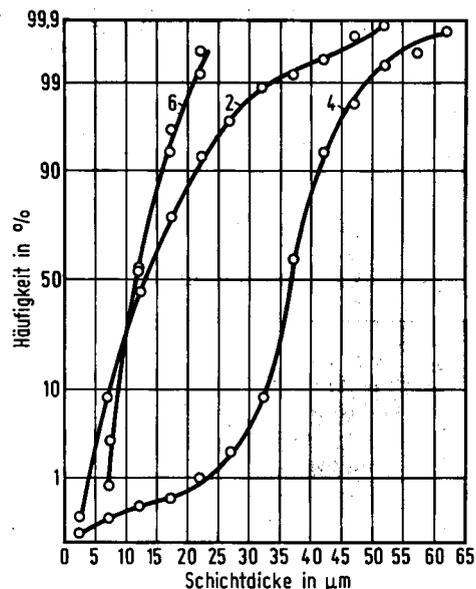


Bild 3. Häufigkeitsverteilung für die Dicke der Zinkauflage von feuerverzinkten Spannstählen; 2, 4, 6: Werkstoff nach *Tafeln 1 bis 4*

Figure 3. Frequency distribution for the thickness of the zinc coating of hot-dip galvanized prestressed steels; 2, 4, 6: steel according to *tables 1 to 4*

Bei gleichzeitiger Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen im Wahrscheinlichkeitsnetz (*Bild 3*) können folgende Aussagen gemacht werden:

Die Abweichung der Gesamtverteilung von einer Normalverteilung ist nur gering und kann für eine überschlägige Beurteilung vernachlässigt werden. Die „positive Schiefe“, die auf zusätzliche, über eine Normalverteilung hinausgehende Verdickungen schließen läßt, ist die Folge des Abstreifens (*Bild 2c*). Die Verdickungen sind mindestens 1% der Gesamtoberfläche. Bei Werkstoff 4 tritt zusätzlich eine „negative Schiefe“ auf, die auf örtliche Minderungen der Zinkauflage durch ungleichmäßiges Abstreifen schließen läßt.

aufgehalten. Bei rd. 3% Dehnung werden erste Risse auf der Oberfläche der Zinkauflage sichtbar.

Die Bilder 4 c bis f zeigen Rißbilder für den Werkstoff 4 (linker Bildteil) und die Werkstoffe 2 und 6 (rechter Bildteil) für Dehnungen der Zinkauflage von 3 und 30%. Man sieht, daß Werkstoff 4 mit einer mittleren Zinkauflage von rd. 39 µm bei vergleichbaren Dehnungen breitere Risse aufweist als die Werkstoffe 2 und 6, die mittlere Zinkauflagen von 17 und 15 µm besitzen. Die Abstände der Risse zueinander sind bei Werkstoff 4 mit rd. 100 bis 150 µm bedeutend größer als bei den Werkstoffen 2 und 6 mit 30 bis 50 µm. Im Rißverhalten ist zwischen Werkstoff 2 und 6 kein Unterschied festzustellen. Ein wesentlicher Einfluß der Rauheit des Stahluntergrundes auf das Rißverhalten ist somit bei der Abstreifverzinkung von Spannstählen offenbar nicht gegeben.

Bei allen Spannstählen treten bei Dehnungen bis zu rd. 40% keine Abblätterungen der Zinkauflage vom Stahluntergrund auf. Dies wurde auch durch metallographische Schlitze belegt.

Im Bereich von Zinkverdickungen treten erst bei wesentlich höheren Dehnungen bis zur Oberfläche durchgehende Risse auf. Bild 5 a zeigt eine Zinkaufquetschung nach einer Dehnung des Stahluntergrundes von 23%; die Verdickung ist rißfrei. Bild 5 b veranschaulicht das Rißverhalten einer (linienförmigen) Verdickung bei 40 bis 45% Dehnung; hier löst sich die Zinkauflage vom Untergrund ab.

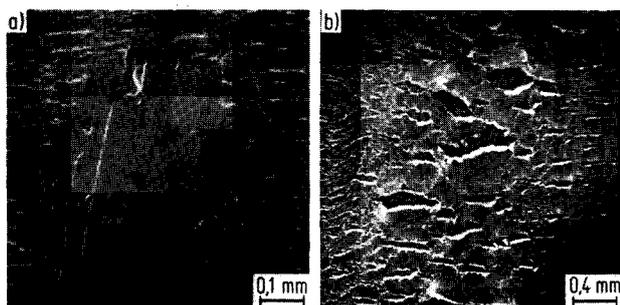


Bild 5. Rißverhalten der Zinkauflage an Reinzinkverdickungen von Werkstoff 2 (nach Tafeln 1 bis 4) bei einer Dehnung von 23 (a) und 40 bis 45% (b)

Figure 5. Cracking behaviour of the zinc coating at pure zinc thickenings of steel 2 (according to tables 1 to 4) with strain of 23 (a) and 40 to 45% (b)



Bild 6. Rißverhalten der Zinkauflage feuerverzinkter Spannstähle bei Stauchung; Stauchgrad rd. 10%

Figure 6. Crack behaviour of the zinc coating of hot-dip galvanized prestressed steels in case of upsetting; upsetting degree about 10%

Die bisherigen Ergebnisse zeigten, daß bei plastischen Dehnungen Risse in der spröden Eisen-Zink-Legierungsschicht entstehen. Sie verlaufen senkrecht zur Stahloberfläche. Ein Abblättern der Zinkauflage kann bei anwendungsgerechter Handhabung bei den verzinkten Spannstählen nicht auftreten. Wenn jedoch die Zinkauflage gestaucht wird, so heben sich die nur wenig verformbaren Eisen-Zink-Legierungsschichten vom Stahluntergrund ab oder reißen in Stablängsrichtung entlang den Phasengrenzen auf. Für die Spannstähle wurde nachgewiesen, daß dieses Verhalten erst ab Umformgraden von etwa 10% auftritt (Bild 6).

Der Einfluß der Zinkrisse, die sich schon bei einer geringen plastischen Verformung bilden, auf Sonderformen der Korrosion (Spaltkorrosion, Spannungskorrosion) sollte in Versuchen noch geklärt werden.

* * *

Diese Arbeit wurde mit Unterstützung des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V. sowie mit Mitteln der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen durchgeführt, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

Zusammenfassung

An abstreifverzinkten, patentiert gezogenen Spanndrähten mit Durchmessern von 6 und 12 mm und Litzen mit einem Durchmesser von rd. 9,5 mm ($\frac{3}{8}$ ") wurden die Gleichmäßigkeit und Dicke der Zinkauflagen, die Rauheit des Stahluntergrundes und das Rißverhalten sowie die Haftung der Zinkauflagen auf dem Stahluntergrund ermittelt. Die Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflagen wurden mit statistischen Methoden beurteilt. Bei den Spannstählen liegen die mittleren Schichtdicken je nach Drahtdurchmesser um 15 und nahe 40 µm, was Auflagen von rd. 100 und 300 g/m² entspricht. Die dickere Auflage ist die Folge einer größeren Tauchdauer im Zinkbad. Die Zinkauflagen sind verhältnismäßig gleichmäßig ausgebildet; insgesamt gesehen, sind diese Auflagen bei den dünneren Drähten, besonders bei Berücksichtigung der Streuungen, für einen dauernden Korrosionsschutz jedoch als zu gering anzusehen.

Allen Spannstahlarten ist gemeinsam, daß die spröden, eisenreichen Phasen nur schwach ausgebildet sind. Durch das Abstreifen sind die verbliebenen Reinzinkauflagen äußerst dünn (etwa 1 bis 3 µm). Nur in Einzelfällen konnten Reinzinkverdickungen festgestellt werden, die auf das Abstreifen zurückzuführen sind.

Das Rißverhalten der Zinküberzüge auf den abstreifverzinkten Spannstählen wird in erster Linie durch die Dicke der Hartzinkauflage bestimmt. Ein unmittelbarer Einfluß der Stahlrauheit konnte nicht festgestellt werden. Unabhängig von der Hartzinkschichtdicke und vom Vorhandensein einer örtlich stärkeren Reinzinkauflage (Verdickung), kommt es bei rd. 2% Dehnung zu zahlreichen Rissen in der eisenreichen δ_1 -Phase der Legierungsschicht. Bei nur geringfügig erhöhter Dehnung durchschlagen diese Risse auch die ζ -Phase. Der Abstand und die Breite derartiger Hartzinkrisse nehmen mit der Dicke der Legierungsschicht zu. Bei einer Erhöhung der Dehnung auf 2 bis 5% treten zahlreiche sehr feine Risse (Rißabstand bis 0,15 mm, Rißbreite unter

10 µm) bis zur Zinkoberfläche durch, ohne daß ein Haftungsverlust in Form von Ablösungen der Zinkauflage vom Stahluntergrund auftritt. Selbst bei Dehnungen bis zu 40% wurde keine Veränderung dieses Verhaltens festgestellt. Die Risse wurden lediglich breiter, neue Risse traten nahezu nicht auf. Die Zinkauflagen lösten sich nicht ab.

Für eine mögliche stärkere Korrosionsbeanspruchung können die Zinkauflagen abstreifverzinkter Spannstähle bei entsprechenden Verzinkungsbedingungen somit auf 40 µm eingestellt werden, ohne daß mit Abblätterungen bei der Anwendung zu rechnen ist.

Örtliche Reinzinkauflagen können Hartzinkrisse vorübergehend aufhalten. Dickere Reinzinkschichten können Dehnungsunterschiede von mehr als 20% ohne nennenswerte Rißausbreitung überbrücken.

Bei Druckumformungen ist das Verhalten der Zinkauflagen günstiger zu beurteilen als bei Zugumformungen. Ein Abblättern der Zinkauflage im Stauchbereich tritt in der Regel nicht auf.

Summary

On wiped galvanized, patented drawn 6 and 12 mm dia prestressed wires and about 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ " dia strands, uniformity and thickness of zinc coatings, roughness of the steel base, cracking behaviour, and also adhesion of the zinc coatings on the steel have been determined. Thickness and uniformity of the zinc coatings were assessed using statistical methods. The average coating thickness of the prestressed steels are about 15 and near 40 µm depending on the wire diameter, this corresponding to coatings of about 100 resp. 300 g/m². The thicker coating is due to a longer immersion time in the zinc bath. The zinc coatings are relatively uniform. In general, however, they are to be considered for the thinner wires, especially when the scatters are taken into account, to be too thin for ensuring permanent protection against corrosion.

All prestressed wire grades exhibit poorly developed brittle iron-rich phases. Because of wiping, the remaining pure zinc coatings are extremely thin (about 1 to 3 µm). Only in few isolated cases, pure zinc thickening was found which is due to wiping.

The cracking behaviour of the zinc coatings on the wiped galvanized prestressed steels is mainly governed by the thickness of the hard zinc coating. A direct influence of the roughness of the steel was not found. Independent of hard zinc coating thickness and presence of a locally thicker pure zinc coating (thickening), numerous cracks occur with about 2% elongation in the iron-rich δ phase of the alloy layer. With only slightly increased strain, these cracks break also through the ζ phase. Spacing and width of such hard zinc cracks increase with the thickness of the alloy layer. When strain increases to 2–5%, numerous very fine cracks (crack spacing to 0.15 mm, crack width below 10 µm) break through to the zinc surface without impairing adhesion by spalling of the zinc coating from the steel. Even in case of strains to 40%, no change of this behaviour was observed. The cracks widened only, whereas new cracks were almost not encountered. The zinc coatings did not spall.

For possible higher corroding load, the zinc coatings of wiped galvanized prestressed steels can be hence adjusted at adequate galvanizing conditions to 40 µm without risk of spalling during application.

Local pure zinc coatings can temporarily arrest hard zinc cracks. Thicker pure zinc coatings can bridge over strain differences of more than 20% without remarkable crack propagation.

Zinc coatings exhibit a more favourable behaviour in case of compression stresses than of tension stresses. Normally the zinc coating does not spall in the upsetting range.

Schrifttum

- 1) Eijnsbergen, J. F. H. van: Dt. Bauztg. 69 (1964) S. 748/50.
- 2) Cornet, J., u. B. Bresler: Mater. Protection 5 (1966) Nr. 4, S. 69/72.
- 3) Nutt, J. G.: Galvanized reinforcement in concrete. Paper presented at a symposium held by the Australian Zinc Development Association on zinc watings for the protection of steel. Melbourne, May 1968.
- 4) Frazier, K. S.: Draht-Welt 56 (1970) S. 214/18.
- 5) Cornet, J. u. B. Bresler: Einige neuere Entwicklungstendenzen bei der Anwendung feuerverzinkter Stahlbewehrung für Beton. In: 9. Internationale Verzinkertagung, Düsseldorf, 7. – 12. Juni 1970. [Hrsg.: Zinc Development Association.] o. O. 1970. 22 S.
- 6) Sehlmeier, E. A.: MM-Industriej. 77 (1971) S. 2217/19.
- 7) Eijnsbergen, J. F. H. van: Verzinken 4 (1975) Nr. 2, S. 26/29 u. 32.
- 8) Eijnsbergen, J. F. H. van: Metall 19 (1965) S. 1263/67.
- 9) Bresler, B., u. J. Cornet: Galvanized reinforcement in concrete. In: 7. Tagung der Internationalen Gesellschaft für Brücken- und Straßenbau, Rio de Janeiro, 1966, S. 449/57.
- 10) Bird, C. E., u. F. J. Strauss: Mater. Protection 6 (1967), Nr. 7, S. 48/52.
- 11) Cornet, J., T. Ishikawa u. B. Bresler: Mater. Protection 7 (1968) Nr. 3, S. 44/46.
- 12) Griffin, D. F.: Naval Civil Engineering Laboratory, Technical Note N-1032. July 1969.
- 13) Rehm, G., u. A. Lämmke: In: Verhalten von verzinkten Spannstählen und Bewehrungsstählen. Berlin/München/Düsseldorf 1974. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. H. 242) S. 46/60.
- 14) Kaesche, H.: Werkst. u. Korrosion 20 (1969) S. 119/24.
- 15) Rehm, G., U. Nürnberger u. G. Rieche: Wie unter¹³⁾. S. 7/44.
- 16) Bresler, B., u. J. Cornet: Dt. Bauztg. 70 (1965) S. 762/66.
- 17) Everett, L. H., u. K. W. J. Treadaway: Die Verwendung von feuerverzinktem Armierungsstahl im Bauwesen. In: 8. International conference on hot dip galvanizing. (Hrsg.: European General Galvanizers Association. London 1967. 15 S.
- 18) Rauen, A.: Untersuchungen zum Korrosionsverhalten verzinkter Bewehrung im Beton. Wie unter³⁾. S. 1/13.
- 19) Böttcher, H. J.: Masch.-Markt 76 (1970) S. 837/39.
- 20) Martin, H., u. A. Rauen: Wie unter¹³⁾. S. 62/77.
- 21) Burggrabe, A. H.: Bauing. 46 (1971) S. 366/69.
- 22) Brodbeck, M. Schweiz. Bauztg. 72 (1954) S. 256/57.
- 23) Cornet, J., u. B. Bresler: Mater. Protection 4 (1965) Nr. 11, S. 35/37.
- 24) Cahill, T., u. K. Sachs: Neue Hütte 16 (1971) S. 548/54.
- 25) Brachet, H., u. A. Raharinaivo: Zinc coating and prestressed concrete. Annual Report 1974. Laboratoire central des ponts et chaussées, Department of Bétons et Métaux, Paris.
- 26) Heiligenstaedt, P., u. K. Bohnenkamp: Arch. Eisenhüttenwes. 47 (1976) S. 107/12.
- 27) Rehm, G., U. Nürnberger u. G. Rieche: Die Eigenschaften feuerverzinkter, patentiert gezogener Drähte im Hinblick auf deren Verwendung im Spannbeton und als frei gespannte Seile. Vortrag Unterausschuß Korrosion im Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, am 4. Mai 1976.
- 28) Krautmacher, H., u. P. Funke jr.: Stahl u. Eisen 85 (1965) S. 1713/22.
- 29) Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 88 (1968) S. 499/507.
- 30) Horstmann, D.: Stahl u. Eisen 87 (1967) S. 331/36.
- 31) Funke, P., u. C. Pavlidis: Stahl u. Eisen 92 (1972) S. 867/73.
- 32) Funke, P., H. Ahlborn u. C. Pavlidis: Mitt.-Bl. Techn. Univ. Clausthal 28 (1972) S. 2/8.
- 33) Bleilöb, F., H. Schücker u. G. Vettermann: Stahl u. Eisen 88 (1968) S. 1037/42.