

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

Eigenschaften von feuerverzinkten
Überzügen auf kaltumgeformten
Betonrippenstählen und
Betonstahlmatten aus kaltgewalztem
Betonrippenstahl

Technologische Eigenschaften
von kaltumgeformten
Betonrippenstählen und
Betonstahlmatten aus kaltgewalztem
Betonrippenstahl nach einer
Feuerverzinkung

von

Ulf Nürnberger

Berlin 1981

VERTRIEB DURCH VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN
BERLIN - MÜNCHEN

ISSN 0171-7197
ISBN 3-433-00898-1 (Bestell-Nr.)

Der Deutsche Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb) beansprucht alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des DAfStb ist es nicht gestattet, diese Veröffentlichung oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege oder auf andere Art zu vervielfältigen.

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON · DAfStb
Fachbereich VII des NABau im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
BUNDESALLEE 216/218 · D-1000 BERLIN 15

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

Eigenschaften von feuerverzinkten
Überzügen auf kaltumgeformten
Betonrippenstählen und
Betonstahlmatten aus kaltgewalztem
Betonrippenstahl

Technologische Eigenschaften
von kaltumgeformten
Betonrippenstählen und
Betonstahlmatten aus kaltgewalztem
Betonrippenstahl nach einer
Feuerverzinkung

von

Dr.-Ing. Ulf Nürnberger

Forschungs- und Materialprüfungsanstalt
Baden-Württemberg
Otto-Graf-Institut

Berlin 1981

VERTRIEB DURCH VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN
BERLIN - MÜNCHEN

Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl

S. 3

Zusammenfassung

Erörterung der Anwendung verzinkter Betonstähle. Untersuchungen über die Dicke, Gleichmäßigkeit und Haftung der Zinkauflage bei feuerverzinkten Betonrippenstählen aus BSt 420/500 RK und 500/550 RK sowie Betonstahlmatten. Untersuchungen über optimale Verzinkungsbedingungen bei gerippten Betonstählen.

Properties of Hot-dip Galvanized Coatings on Cold-deformed Ribbed Reinforcing Steels and Welded Wire Fabric

P. 3

Summary

Discussion of the application of galvanized reinforcing steels. Investigations on thickness, uniformity and adhesion of the zinc coating on hot-dip galvanized ribbed reinforcing steels BSt 420/500 RK and 500/550 RK and welded wire fabric. Investigations of the most favorable galvanizing conditions for ribbed reinforcing steels.

Propriétés de revêtements galvanisés par trempé sur des aciers à haute adhérence écrouis à froid et sur des treillis soudés de barres laminés à froid

P. 3

Résumé

Discussion de l'application d'aciers d'armatures galvanisés. Etudes sur l'épaisseur, l'uniformité et l'adhérence du revêtement de zinc sur des aciers nervurés et puis galvanisés d'armatures de BSt 420/500 RK et de BSt 500/550 RK et aussi d'acier d'armature en qualité de grillage soudé. Investigation des conditions les plus favorables pour la galvanisation d'aciers.

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. Die Arbeit trägt gleichzeitig die Berichts-Nr. 82 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.

Technologische Eigenschaften von kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl nach einer Feuerverzinkung

S. 31

Zusammenfassung

Zug-, Biege-, Rückbiege- und Dauerschwingversuche im gekrümmten einbetonierten Zustand an feuerverzinkten, kaltumgeformten Betonrippenstählen aus BSt 420/500 RK und 500/550 RK. Zug-, Scher-, Falt- und Dauerschwingversuche an feuerverzinkten Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl. Vergleichende Untersuchungen am unverzinkten Ausgangswerkstoff.

Technological Properties of Cold-deformed Ribbed Reinforcing Steels and Welded Wire Fabric after Hot-dip Galvanizing

P. 31

Summary

Tension tests, bend tests, re-bend tests, and fatigue tests on bent concrete encased hot-dip galvanized, deformed, ribbed reinforcing steels BSt 420/500 RK and 500/550 RK. Tension tests, shearing tests, folding tests, and fatigue tests on hot-dip galvanized welded wire fabric. Comparable investigations on black steel.

Propriétés technologiques d'aciers à haute adhérence écrouis à froid et de treillis soudés des barres laminés à froid après une galvanisation par trempé

P. 31

Résumé

Essais de traction, de flexion alternée et non alternée, essais de fatigue sous condition courbée et enrobée en béton sur des aciers galvanisés, déformés à froid à béton à nervures de la nuance BSt 420/500 RK et 500/550 RK. Essais de traction, de flexion et essais de fatigue sur des aciers galvanisés d'armature comme grillage soudé d'acier laminé à froid. Etudes comparatives sur les acciers initiaux non galvanisés.

Diese Arbeit wurde mit Unterstützung des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V. sowie mit Mitteln der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen durchgeführt, wofür an dieser Stelle gedankt sei. Die Arbeit trägt gleichzeitig die Berichts-Nr. 83 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.

Eigenschaften von feuerverzinkten
Überzügen auf kaltumgeformten
Betonrippenstählen und
Betonstahlmatten aus kaltgewalztem
Betonrippenstahl

von

Dr.-Ing. Ulf Nürnberger

Forschungs- und Materialprüfungsanstalt
Baden-Württemberg
Otto-Graf-Institut

Gleichzeitig Bericht Nr. 82
des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.

Inhalt

Zusammenfassung, Summary, Résumé	
1. Einführung	
2. Versuchswerkstoffe, Verzinkungsverfahren	
3. Versuchsergebnisse	
3.1 Dicke, Aufbau und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage	8
3.2 Beanspruchbarkeit der Zinküberzüge	13
4. Beurteilung der Ergebnisse	15
5. Zusammenfassung	16
Literatur	17
Anhang: Tafeln, Bilder	19–30

1. Einführung

Durch eine Feuerverzinkung von Betonstählen soll deren Korrosion im Beton in jenen Fällen verhindert werden, wo sich der normalerweise durch die Betonumhüllung gegebene Schutz als unzureichend erweist:

- Bei geringer Betonüberdeckung, wenn aus architektonischen oder konstruktiven Gründen die erforderliche Mindestdeckung (bei einem gut verdichteten Beton mit Zementgehalten um 300 kg/m^3 liegt diese bei ca. 2 cm) nicht eingehalten werden kann oder wenn bei Fertigteilen das Transportgewicht eine Rolle spielt;
- Im Bereich von Rissen im Beton. Stahlbeton wird immer als gerissen bezeichnet. Entlang der Rißufer karbonatisiert der Beton verhältnismäßig schnell. Mit Korrosion an der Bewehrung muß umso eher gerechnet werden, je geringer die Betondeckung und je breiter die Risse. Für Stahlbeton wird bei einer Betonüberdeckung von 2 cm, eine kritische Rißbreite von 0,2 mm angenommen. Im Zusammenwirken mit anderen Einflüssen (z.B. nichtruhende Beanspruchung) sind die Anforderungen sicherlich heraufzusetzen.
- Bei Verwendung von Leichtbetonen. Z.B. Gas- und Schaumbetone haben eine poröse Struktur. Sie können deshalb die eingebettete Bewehrung nicht mit der erforderlichen dichten Umhüllung versehen und gewähren auf Dauer auch nicht die erforderliche passivierende Schutzschicht aus Zementleim. Dies gilt auch für die sog. Betone mit Haufwerksporosität.
- Im Fall von korrosionsfördernden Zusätzen im Beton. In Deutschland besteht allerdings seitens der Bauausführenden keine Neigung nach der endgültigen Abschaffung chloridhaltiger Betonzusatzmittel und Festlegung von Anforderungen über höchstzulässige Chloridgehalte in DIN 1164 - Ausgabe Juni 1970 (Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement), durch Verzinken der Bewehrung wiederum die Verwendung von Chloriden zu fördern.
- Bei Vorliegen aggressiver Umweltbedingungen wie Industriege (z.B. schwefeloxid- und stickstoffoxidhaltige Verbindungen), Meeresatmosphäre, Seewasser und Verwendung chloridhaltiger Streusalze auf Straßenbrücken und in Parkhäusern.

Eine generelle Verzinkung der Bewehrungsstähle für Stahlbeton bringt nach dem derzeitigen Kenntnisstand keinen Vorteil und wäre somit unwirtschaftlich. Unter nicht oder nur wenig aggressiven Bedingungen hat die Verzinkung keinen Einfluß, da bei ausreichender Überdeckung der Stähle und guter Betonqualität auch ohne Verzin-

kung keine Korrosion eintritt. Für eine problemlose Anwendung verzinkter Betonstähle in den genannten kritischen Sonderfällen ist allerdings die Klärung folgender Punkte von Bedeutung:

1. Korrosionsverhalten feuerverzinkter Bewehrungsstähle in nichtkarbonatisiertem und karbonatisiertem Beton und im Bereich von Rissen im Beton, auch in Gegenwart von Schadstoffen wie z.B. Chloriden;
2. Haftung feuerverzinkter Betonstähle in Beton;
3. Reaktion Zink/Beton, deren Beeinflussung und Zusammenwirken mit dem Korrosionsverhalten und der Haftung;
4. Einfluß der Feuerverzinkung auf das mechanisch-technologische und Dauerschwingverhalten der Betonrippenstähle;
5. Güte und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (Erreichen einwandfreier Verzinkungen, insbesondere bei dünnen, gerippten Stählen) und Verhalten der Zinkauflage beim Biegen auf der Baustelle;
6. Schutzwirkung des Zinks im Falle einer nicht geschlossenen Zinkauflage, z.B. bei biegebedingten Rissen und örtlichen Abplatzungen und mechanischen Beschädigung bei praxisgerechter Handhabung.

Ungeachtet der Tatsache, daß eine Reihe der genannten Fragen noch weitgehend ungeklärt sind, werden feuerverzinkte Betonstähle im Ausland bereits angewendet /1 bis 7/. Besonders in den USA, Australien, England, Holland und Italien hat sich ein Verzinken durchgesetzt, wo zahlreiche Gebäude und andere Konstruktionen unter Verwendung feuerverzinkten Bewehrungsstahls errichtet wurden /8/. Die gemachten Erfahrungen werden als überwiegend positiv dargestellt. Neben der praktischen Erprobung verzinkter Betonstähle wurden auch umfangreiche Forschungsarbeiten zur Klärung von Teilproblemen durchgeführt. Im Hinblick auf die Anwendung feuerverzinkter Spannstähle in Betonkonstruktionen sind die wesentlichsten Erkenntnisse in /9/ zusammengefaßt. In mancherlei Hinsicht sind die anwendungstechnischen Probleme bei feuerverzinkten Betonstählen und Spannstählen vergleichbar.

Analog den vorgenannten Fragestellungen ergeben sich für Stahlbeton folgende Gesichtspunkte:

Bei der Einwirkung des Calciumhydroxids des Betons auf verzinkten Stahl wird Calciumhydroxozinkat gebildet /10, 11/. Ein Zinkabtrag findet überwiegend in den ersten Tagen nach dem Betonieren statt, verlangsamt sich und überschreitet selbst bei ungünstigen Korrosionsbedingungen

nach 2 Jahren nicht 10 μm /12/. Nach Abschluß der ersten Reaktionen mit der Alkalität des Betons scheint mit der Zinkatbildung eine Art passivierende Wirkung verbunden zu sein. Sowohl in Korrosionsversuchen als auch im Anwendungsfall verhielt sich der verzinkte Stahl im Beton stets besser als der unverzinkte /7, 10, 12 bis 17/.

Für die Anwendung ist von Bedeutung, daß die Zinkatbildung, welche unter Wasserstoffentwicklung abläuft, im frühen Stadium den Verbund nachteilig beeinflusst /10, 18/. Die mit Zinkatbildung verbundene Korrosion des Zinks verlängert die Abbindezeit und die Frühfestigkeit des Betons um die Bewehrungsstäbe, was z.B. die für den Baufortschritt vielfach maßgebenden Ausschaltungsfristen um Tage verlängern kann.

Bei den weiteren Reaktionen wird das Zinkat offenbar in die Hydratationsprodukte eingebaut. Durch die Umsetzung des Calciumhydroxozinkats wird die Struktur der Hydratationsprodukte insoweit verändert, als sich diese bevorzugt faserig ausbilden. Dadurch wird eine gute Verzahnung der Zinkauflage mit dem umgebenden Beton erreicht und die Verbundwerte der verzinkten Bewehrung im Beton werden merklich verbessert. /5, 7, 14, 18 bis 21/.

Die Bildung von Calciumhydroxozinkat der verzinkten Stähle kann durch Chromatzusätze behindert werden /10, 18, 22/. Hierdurch erhält der Chromatgehalt des Zements einen Einfluß auf das Verbundverhalten verzinkter Bewehrung in Beton. Bei chromatreichen Zementen können die Verbundwerte verzinkter Stähle auf ein Mehrfaches der Werte von unverzinktem Stahl zunehmen /18/. In der Baupraxis wird i.a. ein niedriger Chromatgehalt der Zemente angestrebt; durch das Chrom können z.B. Allergien bei empfindlichen Personen verursacht werden. Deshalb und weil bei den einzelnen Zementen die löslichen Chromatgehalte sehr unterschiedlich sind, werden feuerverzinkte Bewehrungsstäbe im Ausland durch Eintauchen in Chromatlösungen und Chromatisierung "passiviert". Hierdurch können die Reaktionen des Zinks mit dem Beton und auch die Wasserstoffbildung behindert und das Verbundverhalten verbessert werden /23, 24/.

Das Verhalten verzinkter Bewehrung in karbonatisiertem Beton wurde noch nicht ausreichend untersucht. Aufgrund von Laboruntersuchungen an Zinküberzügen in Beton /25/ sollte das Zink im pH-Bereich 7 - 12,5 aufgrund entstehender Schutzschichten als praktisch beständig gelten. Dieser pH-Bereich stimmt auch überein mit den pH-Werten des karbonatisierten Betons. Vergleichsversuche mit unverzinktem und verzinktem Betonstahl /12/ in karbonatisiertem Beton über wenige Jahre ergaben, daß sich auch unter ungünstigen Korro-

sionsbedingungen durch ein Verzinken das Auftreten von Rost verhindern läßt. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine gute Haftung der Zinkschicht auf der Stahloberfläche.

Bisher werden feuerverzinkte Betonstähle insbesondere in maritimer Umgebung eingesetzt, wobei ein erhöhter Korrosionswiderstand der verzinkten Bewehrung gegenüber unverzinkter angenommen wird. Zahlreiche Laboruntersuchungen /11, 13 bis 15, 26, 27/ verweisen darauf, daß erst sehr hohe Chloridgehalte an der verzinkten Stahloberfläche zu einem Zusammenbruch der Passivschicht führen, während bei Konzentrationen, wo blanker Betonstahl auch in alkalischem Beton bereits eine merkliche Korrosion erfahren kann, beim verzinkten Stahl noch ein ausreichender Schutz besteht.

Inwieweit die Verzinkung im Bereich von Betonrissen, welche stets entlang der Rißufer verhältnismäßig rasch karbonatisieren, einen immerwährenden oder nur temporären Schutz darstellt ist bisher nicht ausreichend sicher geklärt. In /28/ wird aus Untersuchungen geschlossen, daß durch den Einsatz feuerverzinkter Bewehrungsstäbe die höchstzulässige Rißbreite von 0,2 mm (bei Verwendung unverzinkter Bewehrung) u.U. auf 0,3 mm heraufgesetzt werden kann. In einer anderen Arbeit /27/ wurde festgestellt, daß sich in gerissem Beton (Rißbreite 0,2 und 0,5 mm) gelagerte verzinkte Betonstähle während eines Salzsprühtests nur temporär günstiger verhielten als unverzinkte. Nach etwa 2 Monaten korrodierten unverzinkte und verzinkte Stähle im Rißbereich gleichermaßen stark. Für eine endgültige Beurteilung dieser Problematik sollten in Versuchen mehr die Verhältnisse unter ungünstigen Umweltbedingungen berücksichtigt werden, für welche die hohen Aufwendungen einer Verzinkung erst zu rechtfertigen wären. Für z.B. maritime Verhältnisse wird angenommen, daß sich in den Betonrissen gewisse Aufkonzentrierungen an Chloriden ergeben können, so daß auch die für Verzinkungen kritische Schwelle an diesen Schadstoffen überschritten werden könnte.

Auf die Güte einer für Betonstähle, insbesondere aber Betonrippenstähle erforderlichen Verzinkung wird in keiner der bekannten Veröffentlichungen näher eingegangen. Insbesondere auch die Vorstellungen darüber, welche technischen Möglichkeiten zur einwandfreien Verzinkung von Rippenstählen bestehen und wie einem Aufreißen und örtlichem Abplatzen der Verzinkung beim häufig erforderlichen Biegen der Stähle verzinkungstechnisch zu begegnen ist, sind unklar. Z.B. die ASTM-Vorschriften für feuerverzinkte Stabstähle aus Betonrippenstahl spezifizieren die Anforderungen an die Zinkauflagen nach Klassen: Für extreme Korrosionsbedingungen (Klasse 1) wird eine Auflage von 1000 g/m² und für normale (Klasse 2) eine

solche von ca. 600 g/m² verlangt. In den USA durchgeführte Langzeitversuche an einbetonierten verzinkten Stählen /29/ führten zu dem Ergebnis, daß für den Einsatz verzinkter Bewehrung in stark korrosionsgefährdeten Bauteilen eine Auflage von 500 g/m² gefordert werden sollte. Aufgrund deutscher Untersuchungen /12, 17/ könnte die erforderliche Zinkauflage auch niedriger angesetzt werden.

Die Dicke des Zinküberzuges ist in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung. Einerseits wird für eine hohe Korrosionsbeständigkeit der Betonstähle eine möglichst dicke Schicht gefordert, andererseits zeigen gerade hohe Zinkauflagen eine weniger gute Haftung bei mechanischer Beanspruchung /30 bis 32/. Insbesondere an den Abbiegestellen der Betonstähle lassen sich Beschädigungen der Verzinkung nicht vermeiden. Dabei gilt zu berücksichtigen, daß gerade die nahe der Betonoberfläche liegenden Abbiegestellen von Bügeln häufig der stärksten Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt sind. Für Betonrippenstähle kommt ein besonderer Umstand hinzu. Hier lassen sich gewisse Zinkverdickungen an den Rippenübergängen /33/ offenbar nicht vermeiden. Beim Biegen konzentriert sich die Verformung aber gerade auf die Rippenübergänge, wodurch die (stärkere) Verzinkung hier besonders beansprucht wird. Auch bei der betrieblichen Beanspruchung stellen die Rippenübergänge die kritischsten Bereiche dar.

Bisher ist die Frage, inwieweit die beim Biegen auftretenden Risse und Abplatzungen zu einer Verminderung der Korrosionsschutzwirkung verzinkter Bewehrungsstähle führen können nicht geklärt. Für den alkalischen Beton wird allgemein angenommen, daß hierbei keinerlei Schäden des Betonstahls zu befürchten sind, da Zink den freiliegenden Stahl kathodisch schützt. Ob dies auch für den karbonatisierten Beton gilt ist unbewiesen. Bei sich abhebenden Zinkauflagen sind auch Spaltkorrosionsvorgänge denkbar.

Schließlich ist auch der Einfluß einer Feuerverzinkung auf das mechanisch technologische Verhalten wichtig. Bei warmgewalztem Betonstahl kann davon ausgegangen werden, daß eine Feuerverzinkung das Festigkeits-Verformungsverhalten nur unwesentlich verändert /2, 5, 12, 33/. Bei kaltverformten Betonstählen sind als Folge der Wärme- einwirkung im Zinkbad je nach Dauer dieser Anlaß- behandlung und Zinkbadtemperatur Änderungen der Festigkeits- und Verformungskennwerte zu erwarten. Von kaltverformten Baustählen her ist bekannt /34/, daß durch die Wirkung des Zinkbades eine Alterung vorweggenommen wird, die sich bei entsprechend langer Gebrauchsdauer auf natürlichem Weg ohnehin einstellen würde.

Über Dauerschwingversuche an warmgewalzten und feuerverzinkten Betonrippenstählen wird in /27, 33/ berichtet. Feuerverzinkte Betonstähle verhielten sich hier stets ungünstiger als unverzinkte. In /27/ wurde nach der Feuerverzinkung gegenüber dem Ausgangsmaterial eine Abnahme der Dauerschwingfestigkeit bis zu 23 % festgestellt

Diese Erkenntnisse stehen im Widerspruch zu solchen an feuerverzinkten Baustählen /34, 35/ und Drähten mit Zugfestigkeiten < 1000 N/mm² /36/, wo sich feuerverzinkte Ausführungen nicht ungünstiger verhielten als unverzinkte.

Für geschweißte Stähle scheint bedeutsam, daß durch die thermische Wirkung des Zinkbades nachteilige Zugeigenspannungen herabgesetzt werden /37, 38/, was sich vorteilhaft z.B. auf das Dauerschwingverhalten geschweißter und feuerverzinkter Stähle auswirken kann /34, 38/.

Für die korrosionsschützende Wirkung des Zinküberzuges auf Betonstählen ist somit die Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage von Bedeutung. Bei zu erwartenden extremen Korrosionsbeanspruchungen sollte ein Mindestwert der Schichtdicke nicht unterschritten werden. Andererseits sollte ein örtliches Anwachsen der Zinkauflagen vermieden werden, um einem örtlichen Aufreißen und Abplatzen der Verzinkung bei praxisgerechter Handhabung der feuerverzinkten Betonrippenstähle vorzubeugen. Hieraus ergibt sich folgende Aufgabenstellung zu dieser Arbeit:

- Erprobung der technischen Möglichkeiten zur einwandfreien Feuerverzinkung von kaltumgeformten Betonrippenstählen und geschweißten Betonstahlmatten aus kaltumgeformten gerippten Stäben,
- Definition der tatsächlichen Verhältnisse bezüglich Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage mittels statistischer Verfahren,
- Feststellung der Umformbarkeit des Verbundwerkstoffes Stahl/Zink und Haftung der Zinkschicht auf dem Stahl,
- Erörterung der erzielbaren Verzinkung im Hinblick auf eine Anwendung feuerverzinkter Betonstähle aus gerippten Stäben.

In die Untersuchungen sollen auch siliciumhaltige Betonstähle einbezogen werden. Nach Angaben der Literatur /39 bis 41/ können Siliciumgehalte im Stahl zwischen etwa 0,03 und 0,12 % sowie oberhalb 0,25 bis 0,30 % beim Feuerverzinken zu übermäßig dicken Zinküberzügen führen, was eine verminderte Haftung der Verzinkung zur Folge hat

Bei kaltumgeformten Betonrippenstählen können die Siliciumgehalte bis ca. 0,5 % betragen. In

der Regel betragen die Gehalte bei der Güte BSt 420/500 RK und bei Betonstahlmatten weniger als 0,25 %, häufig weniger als 0,1 %. Si-Gehalte größer 0,25 % werden den Betonrippenstählen der Güte BSt 500/550 RK zugelegt.

2. Versuchswerkstoffe, Verzinkungsverfahren

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an feuerverzinkten Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl der Güte BSt 500/550 RK und feuerverzinkten kaltumgeformten Betonrippenstählen der Güte 420/500 RK und BSt 500/550 RK durchgeführt. Tafel 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Stähle und deren chemische Zusammensetzung. Bei den Betonstahlmatten (Werkstoffe 1 bis 3) zeigen die unter "Sorte" angegebenen Zahlenwerte die Abstände der Längs- und Querstäbe in cm an. Bei den Matten wurden die Durchmesser der Stäbe variiert: Die Durchmesser der Quer- bzw. Längsstäbe betragen 5 mm/5 mm, 6,0/8,5 mm und 7,5/8,5 mm. Bei Werkstoff 3 sind die Längsstäbe als Doppelstäbe angeordnet. Bei den Betonrippenstählen der Güte BSt 420/500 RK (Werkstoffe 4 bis 6) wurden Stäbe mit Durchmessern von 8, 16 und 28 mm und bei den Stählen der Güte BSt 500/550 RK (Werkstoff 7) solche mit einem Durchmesser von 16 mm verwendet. Wie Tafel 1 zeigt, entspricht die chemische Zusammensetzung der Stähle handelsüblichen Betonstahlsorten. Der im Hinblick auf die Dicke der Zinkauflage u.a. wichtige Siliciumgehalt der Stähle wurde nicht gezielt eingestellt. Bei dem Betonrippenstahl BSt 500/550 RK liegt dieser jedoch an der für diese Güte üblichen oberen Grenze.

Die ca. 2 m x 5 m großen Betonstahlmatten wurden für die Verzinkungsversuche gevierteilt. Die Verzinkung erfolgte im nicht angelassenen Zustand nachdem sich herausgestellt hatte /42/, daß die Wärmebehandlung im Verzinkungsbad zu ähnlichen, in einigen Fällen sogar zu günstigeren mechanisch-technologischen Eigenschaften der Mattenstäbe führt als das herkömmliche Anlassen in Luft.

Die Betonstahlmatten und die Betonrippenstähle wurden tauchverzinkt. Da in der Regel 2 bis 2,5 m tiefe Verzinkungskessel zur Verfügung stehen, erfolgte das Eintauchen und Herausziehen der Matten nahezu senkrecht zur Lage der Längsstäbe in Querstabrichtung: Tatsächlich waren die Querstäbe um ca. 15° und die rechtwinklig angeordneten Längsstäbe dementsprechend um 75° zur Ausziehrichtung geneigt. Bei den Betonrippenstählen kamen mehrere Verzinkungsverfahren mit Variation der Probenführung, der Tauchdauer und Ausziehgeschwindigkeit zur Anwendung, wobei hier nur auf die wichtigsten eingegangen werden soll. In einer 1. Versuchsreihe wurden ca. 1,5 m lange Proben unter 45° zur Ausziehrichtung getaucht und ausgezogen. Nachdem diese Verzinkungsart insbe-

sondere für die unteren Stababschnitte keine optimalen Auflagen erbrachte, wurden in einer 2. Versuchsreihe 3 m lange Stäbe mit der Stabachse parallel zur Tauchrichtung eingeführt, im Zinkbad umgelegt und entsprechend wieder ausgezogen. Bei einer weiteren Variante wurden die Stäbe zusätzlich im Zinkbad gedreht, um die Verweildauer über die Probenlänge annähernd konstant zu halten. Da in der Praxis in der Regel Betonrippenstähle von 12 m Länge feuerverzinkt werden müssen, wo das Drehen im Zinkbad mit den herkömmlichen Einrichtungen Schwierigkeiten bereitet und zudem diese Verzinkungsvariante keine entscheidenden Verbesserungen gegenüber der 2. Versuchsreihe erbrachte, soll hier nicht näher auf diese Versuche eingegangen werden.

Tafel 2 enthält nähere Angaben zum Beizen, Fluxen und Verzinken. Als Beizlösung wurde Salzsäure verwendet, als Fluxmittel Ammoniumchlorid. Das Verzinken der Betonstahlmatten einerseits und der Betonrippenstähle andererseits erfolgte jeweils in einer anderen Verzinkerei; die Beiz- und Fluxbedingungen entsprachen den Erfahrungen der Verzinkereien. Die Betonstahlmatten wurden im Zinkbad 1 min getaucht und mit einer Geschwindigkeit von 5 m/min ausgezogen. Bei den Betonrippenstählen wurden die Stäbe in der 1. Versuchsreihe 1,25 min getaucht und mit 1 bzw. 10 m/min ausgezogen. In der Versuchsreihe 2-1 wurde bei gleichen Ausziehgeschwindigkeiten die Tauchzeit auf 0,75 min verringert. Die Bedingungen der Versuchsreihe 2-2 ergaben die optimalsten Zinkauflagen. Die 16 und 28 mm Stäbe wurden nach einer Tauchzeit von 0,75 min auf 85 % der Stablänge zunächst mit einer Geschwindigkeit von 10 und auf den restlichen 15 % mit einer Geschwindigkeit von 1 min ausgezogen. Bei den 8 mm Stäben betrugen die Ausziehgeschwindigkeiten nach einer Tauchzeit von nur 0,2 min entsprechend 5 bzw. 1 m/min. Die Eintauchgeschwindigkeit betrug in jedem Fall 10 m/min.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Dicke, Aufbau und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage

Zur qualitativen Beschreibung der Verzinkungsausführung kann festgestellt werden, daß die Auflagen aller Mattenstäbe und Betonrippenstähle mit 8 mm Durchmesser nach dem Verzinken ein glänzendes Aussehen zeigten. Bei den 16 mm Stabstählen stellte sich während der dem Verzinken folgenden Abkühlung in Luft stellenweise eine mattgraue Färbung ein; dies gilt insbesondere für die Si-legierte Güte BSt 500/550 RK. Die 28 mm Stäbe zeigten nach einem Abkühlen in Luft an nahezu allen Stellen der Oberfläche ein mattgraues Aussehen. Dies ist auf ein Durchwachsen

der Hartzinkschicht bis zur Zinkoberfläche zurückzuführen. Da die Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Verzinken mit zunehmendem Stabdurchmesser abnimmt und die dickeren Abmessungen - wie noch gezeigt wird - in der Regel dünnere Auflagen aufweisen, wird das genannte Verhalten verständlich. Durch ein Wasserabschrecken nach dem Verzinken konnte das Wachsen der Hartzinkschicht nach dem Verlassen des Zinkbades behindert werden, wodurch auch dickere Abmessungen eine glänzende Oberfläche erhielten.

Bei den Betonstahlmatten sind die Verhältnisse bezüglich Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage wie folgt:

Die 5, 6 und 7,5 mm Querstäbe sind auf dem gesamten Stabumfang verhältnismäßig stark verzinkt (Bild 1a). In der genannten Reihenfolge betragen die Zinkauflagen dieser Stäbe im Mittel 1587, 1459 und 1151 g/m². Die Rippenbereiche sind mit stärkeren Auflagen versehen als die Bereiche zwischen den Rippen. Besonders starke Reinzinkverdickungen befinden sich an den der Ausziehrichtung zugewandten Rippenübergängen (Bild 2). Die Längsstäbe zeigen mehr oder weniger starke Zinkverdickungen an der Stabunterseite (Bilder 1b bis 1d). Bei den 8,5 mm Längsstäben ist der Anteil des Stabumfangs mit derartigen Zinktropfen i.a. erheblich kleiner als bei den 5 mm Längsstäben. Das Erscheinungsbild bei den 8,5 mm Stäben entspricht zumeist Bild 1d, seltener Bild 1c. Im Bereich der Zinktropfen ist die mittlere Zinkauflage bei den Längsstäben i.a. dicker, außerhalb der Tropfen dagegen dünner als bei den Querstäben. Bei den 5 bzw. 8,5 mm Längsstäben betragen die Zinkauflagen im Mittel 1165 bzw. 765 g/m².

Bei den Betonrippenstählen schwankt die Güte der Zinkauflage (insbesondere die Dicke und der Aufbau) je nach der gewählten Verzinkungsart (Tauchdauer, Ausziehgeschwindigkeit, Probenführung), der Stahlgüte und dem Durchmesser der Stäbe mehr oder weniger stark und ist auch über die Probenlänge und bei bestimmten Verzinkungsausführungen auch über den Umfang nicht gleichmäßig. Auch die Betonrippenstähle, vor allem die 8 mm Stäbe, neigen zu örtlichen Reinzinkverdickungen, jedoch sind diese hier in der Regel weniger kritisch als bei den Betonstahlmatten aus dünneren Stäben. Örtlich höhere Auflagen treten bevorzugt an jenem Rippenfluß von Schrägrippen auf, welcher der Ausziehvorrichtung zugewandt ist (Bild 3). Bei herkömmlicher Probenführung (Eintauchen und Ausziehen der Stäbe geneigt oder parallel zur Tauchrichtung) werden die Verdickungen stets zum Probenende hin stärker. Bei einem "geneigten" Ausziehen sind dieser Zinkverdickungen besonders beim unteren Stabumfang vorhanden. Bei einem "parallelen" Ausziehen der Proben verlagern sich Zinkverdickungen häufig von den Schrägrip-

pen in den Bereich von Längsrippen (Bild 4). Dies gilt vor allem für die dickeren Abmessungen, wo das Zink beim Ausziehen wegen der geringen Abkühlungsgeschwindigkeit noch relativ gut entlang der Schrägrippen ablaufen kann und sich dann an den spiralförmig verlaufenden Längsrippen ansammelt. Bei 3 m langen Betonrippenstählen betragen die mittleren Zinkauflagen bei den optimalsten Verzinkungsbedingungen (s.u.) in der Reihenfolge 8 mm - 16 mm - 28 mm (BSt 420/500 RK) - 16 mm (BSt 500/550 RK) 639, 384, 520, 501 g/m², wobei die Zinkauflagen gegenüber diesen Mittelwerten am zuerst ausgezogenen Probenanfang i.M. 16 % niedriger und am zuletzt ausgezogenen Probenende i.M. 26 % höher liegen.

Bei den Betonstahlmatten muß auch bezüglich der Dicke der Hartzinkschicht zwischen Quer- und Längsstäben unterschieden werden. Bei den 5, 6 und 7,5 mm Querstäben mit Si-Gehalten von 0,04, 0,17 und 0,08 % betragen die Hartzinkschichtdicken im arithmetischen Mittel etwa 70 bis 100 µm und bei den 5 und 8,5 mm Querstäben mit Si-Gehalten <0,01 % etwa 40 bis 50 µm. Bei den Betonrippenstählen betragen die Hartzinkschichtdicken bei den 8 bzw. 16 mm Stäben mit 0,21 bzw. 0,23 % Si im arithmetischen Mittel ca. 40 bis 50 µm und bei den 16 bzw. 28 mm Stäben mit 0,48 bzw. 0,08 % Si etwa 50 bis 60 µm. Dies gilt, wenn die sich aus Tauchdauer und Ausziehgeschwindigkeit ergebende Gesamtverweildauer der Stäbe im Zinkbad 1 bis 1,5 min nicht übersteigt und die dickeren Abmessungen 16 und 28 mm spätestens 30 sec nach dem Ausziehen aus dem Zinkbad in Wasser abgeschreckt werden. Bei längeren Verweildauern im Zinkbad, langsameren Ausziehgeschwindigkeiten und Abkühlen der feuerverzinkten (dickeren) Stäbe in Luft können die Hartzinkschichtdicken erwartungsgemäß erheblich größer sein. Die bezüglich der Hartzinkschichtdicken gemachten Feststellungen bestätigen an anderer Stelle /39 bis 41/ gemachte Erfahrungen, daß zwischen etwa 0,03 und 0,12 und oberhalb 0,25 bis 0,30 % Silicium im Stahl die Hartzinkschichten stärker anwachsen können.

In qualitativer Hinsicht sind die Zinkauflagen bei Betonstahlmatten und Betonrippenstählen ähnlich ausgebildet. Bei der Hartzinkschicht ist stets einer verhältnismäßig dünnen δ₁-Palisadenschicht eine im Verhältnis zur Gesamtdicke wesentlich stärkere ζ-Schicht überlagert. Die γ-Phase ist nicht deutlich ausgebildet. Bild 5 zeigt das Aussehen von Zinkauflagen im Schliff (Bilder 5b und d) bzw. im Bruch (Bilder 5a, c und e) nach Biegeverformung. Die Gesamtverweildauer dieser Proben im Zinkbad lag bei 1 - 1,5 min. Bezüglich der Gesamtauflage und der Hartzinkschichtdicke werden ausgesuchte Bereiche dargestellt. Die Bilder 5a und b kennzeichnen maximale und die Bilder 5c und d minimale Zinkauflagen bei Betonrippenstählen. Bild 5e ent-

spricht einer bei Betonstahlmatten (Querstäben) festgestellten Starkverzinkung. Bild 6 zeigt die Zinkauflage im Kerbgrund und in den Spalten der Schweißung bei Einzelstab- und Doppelstahlmatten. Diese Bereiche weisen, vergleichbar den Rippenbereichen, verstärkte Reinzinkauflagen auf. Die sich nahezu berührenden Längsstäbe bei Doppelstahlmatten sind häufig durch eine Zinkbrücke verbunden, so daß zwischen den Stäben im Bereich der Schweißung ein von Zink umgebener Hohlraum vorhanden ist.

Im folgenden sollen die erzielten Zinkauflagen quantitativ beschrieben werden. Bisher wurde zur Bestimmung der Gesamtzinkauflage das Flächengewicht durch chemisches Ablösen des Überzuges ermittelt. Hierzu 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 bestimmt. Beim volumetrischen Verfahren nach DIN 51 213 - Prüfung metallischer Überzüge auf Drähten - wird der beim chemischen Ablösen freiwerdende Wasserstoff bestimmt, woraus die Menge des abgelösten Zinks errechnet wird. Bei einer Dichte von $7,15 \text{ g/cm}^3$ bei feuerverzinkten Überzügen erhält man aus dem bestimmten Flächengewicht die durchschnittliche Dicke des Überzuges in Gramm Zinkauflage je Quadratmeter. Der Nachteil dieser Verfahren liegt darin, daß nur ein Mittelwert festgestellt wird, dünnere Bereiche und Verdickungen jedoch nicht angezeigt werden. Außerdem geben sie keine Auskunft über den Aufbau und die Gleichmäßigkeit von Zinkschichten.

Im vorliegenden Fall wurde bei allen verzinkten Werkstoffen die Dicke der Gesamtzinkauflage und der Hartzinkschicht an Schliffen unter dem Mikroskop ausgemessen und mit statistischen Verfahren ausgewertet. Es wurden Längs- und Querschliffe gefertigt; bei den Längsschliffen wurden die Rippenreihen genau mittig geschnitten. Bei den Betonstahlmatten erfolgte die Probennahme über die gesamte Länge der Stäbe. Diese über die Stablänge ermittelten Werte wurden zusammen ausgewertet, nachdem hier keine systematische Änderung der Zinkverteilung festgestellt wurde. Bei den Betonrippenstählen wurden pro Material und Versuchsreihe an definierten Stellen der Stäbe (Stabende, Stabmitte, Stabanfang) Proben für die Messungen entnommen. Bei den "geneigt" ausgezogenen Stäben wurde zusätzlich nach Stabober- bzw. -unterseite unterschieden. Pro Variante wurden bei den Betonstahlmatten ca. 2000 und bei den Betonrippenstählen 800 Meßstellen berücksichtigt.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich im wesentlichen auf Kenngrößen, die eine möglichst große Aussagefähigkeit im Hinblick auf eine praxisge-

rechte Beurteilung der Zinkauflage ermöglichen. Aus der Häufigkeitsverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz wurden die Häufigkeiten 0,5, 50, 90, 95 und 99,5 abgegriffen und gesondert aufgetragen. Diese Zahlen geben an oberhalb bzw. unterhalb welcher Schichtdicke ein bestimmter Prozentsatz der Werte liegt. Die Häufigkeit 0,5 % entspricht der minimalen Schichtdicke für 99,5 % der Staboberfläche. Sie charakterisiert somit die im Hinblick auf den Korrosionsschutz ungünstigsten Wert. Die Häufigkeit 50 % ist der statistische Mittelwert \bar{x} , der angibt ober- bzw. unterhalb welchem Wertes der Schichtdicke je 50 % aller Werte liegen. Die Häufigkeiten 90, 95 und 99,5 % geben die maximalen Schichtdicken für diesen Prozentsatz der Staboberfläche an. Zusammen mit dem statistischen Mittelwert charakterisieren sie somit die im Hinblick auf die Haftung der Zinkauflage kritischen örtlichen Zinkverdickungen. Neben den genannten statistischen Kenngrößen wurde auch der arithmetische Mittelwert \bar{x}_{ar} bestimmt. Er liegt bei den hier vorhandenen, auf örtliche Zinkverdickungen zurückzuführenden "schiefen" Verteilungen, stets oberhalb des statistischen Mittelwertes \bar{x} . Der arithmetische Mittelwert ermöglicht eine Umrechnung der gemittelten Schichtdicke in das Flächengewicht.

Die genannten Kenngrößen seien zunächst am Beispiel einer Betonstahlmatte (Werkstoff 1) erläutert (Bild 7). Die geringsten Zinkauflagen für 99,5 % der Staboberflächen (Häufigkeit 0,5 %) betragen für den Längs- bzw. Querstab 20 bzw. 75 μm . Die statistischen Mittelwerte liegen bei 70 bzw. 175 μm . Sowohl bei den Längs- als auch Querstäben betragen die maximalen Schichtdicken für 90 % der Staboberfläche 340 μm . Für z.B. 99,5 % der Staboberflächen ist die max. Schichtdicke bei den Längsstäben mit 910 μm erheblich größer als bei den Querstäben; bei den letzteren liegen die Maximalwerte hier bei 500 μm . Die Hartzinkauflagen der Querstäbe sind in allen Bereichen der Staboberflächen etwa doppelt so hoch wie bei den Längsstäben. Für die Gesamtzinkauflage bestätigen die in Bild 7 dargestellten Häufigkeitsverteilungen die in Bild 1 gezeigten Zusammenhänge: Insgesamt stärkere Auflagen bei den Querstäben, jedoch auf 10 % der Staboberfläche durch Zinktropfen an der Stabunterseite ausgeprägtere Zinkverdickungen bei den Längsstäben.

In Bild 8 sind für alle Stäbe der Betonstahlmatten die charakteristischen Häufigkeiten der Gesamtzinkschicht und der Hartzinkschicht aufgetragen. Dieses Bild verdeutlicht - ebenso wie Häufigkeitsverteilungen im Wahrscheinlichkeitsnetz - die Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkschichten. Bei den Querstäben nehmen die Gesamtzinkauflagen auf 90 % der Staboberfläche mit dem Durchmesser ab, auf 5 % der Staboberfläche dagegen zu. Insgesamt gesehen sind die Auflagen der

Querstäbe für einen größeren Bereich der Staboberfläche sehr hoch. Für 10 % der Oberfläche liegen die Zinkauflagen je nach Durchmesser oberhalb 240 - 340 μm (maximal bei 600 μm). Die starken Zinkauflagen der Querstäbe haben mehrere Gründe. Die verhältnismäßig hohen mittleren Auflagen dürften z.T. auf die Siliciumgehalte (Tafel 1) zurückzuführen sein, welche das Wachstum der Hartzinkschichten begünstigen. Die hohen Zinkauflagen auf ca. 50 % der Oberfläche und insbesondere die Zinkverdickungen können mit der Geometrie der Stäbe zusammenhängen. Bei den dünnen Stäben führt deren hohe Abkühlungsgeschwindigkeit beim Verlassen des Zinkbades dazu, daß das zwischen den Rippen befindliche Zink nicht mehr im notwendigen Maße ablaufen kann. In diesem Sinne wirken auch die bei geringeren Stabdurchmessern engeren Rippenabstände, die zu einer erhöhten Makrorauigkeit führen. Daß bei den Querstäben die Spitzenwerte der Zinkauflage bei steigendem Durchmesser noch zunehmen können, hängt vermutlich mit der zunehmenden Rippenhöhe zusammen.

Die bei den Längsstäben festgestellten Zusammenhänge (Bild 8) verdeutlichen zunächst den auch bei den Querstäben festgestellten Einfluß des Durchmessers. Die Spitzenwerte der Zinkauflage bei etwa 10 % der Staboberfläche (340 bis 910 μm bei den 5 mm Stäben und 140 bis 820 μm bei den 8 mm Stäben) sind auf die bereits erwähnte Tropfenbildung an der Stabunterseite zurückzuführen. Für die insgesamt geringeren mittleren Auflagen der Längsstäbe gegenüber den Querstäben (auch bei gleichem Durchmesser der Stäbe) können zwei Gründe angeführt werden: Zum einen das Abfließen des Reinzinks zur Stabunterseite der Längsstäbe (wo es jedoch nur zu einem Teil abtropft) und das Fehlen von Silicium im Längsstabwerkstoff (Tafel 1), was hier die Ausbildung stärkerer Hartzinkschichten verhindert.

In Bild 9 sind an Betonrippenstählen erzielte Versuchsergebnisse dargestellt. Bei dieser Versuchsreihe 1 (Tafel 2) wurden 1,5 m lange Betonrippenstähle BSt 420/500 RK 1,25 min getaucht und mit einer Geschwindigkeit von 10 m/min ausgezogen. Die Stäbe waren hierbei um 45° zur Tauchrichtung geneigt. Es wurde die Dicke und Gleichmäßigkeit der Gesamtzinkschicht und Hartzinkschicht über die Probenlänge (bei der Gesamtzinkschicht nach Stabober- und Stabunterseite getrennt) festgestellt. Im Bild ist zu erkennen, daß die mittleren Hartzinkschichtdicken und in erster Linie vermutlich deshalb auch die mittleren Gesamtauflagen wegen der über die Stablänge geringfügig zunehmenden Verweildauer im Zinkbad ebenfalls etwas zunehmen. Bei den 28 mm Stäben ist die Hartzinkschicht im statistischen Mittel mit 80 μm stärker ausgebildet als bei den 8 und 16 mm Stäben (i.M. 53 μm), was einerseits

legierungsbedingt sein dürfte (Si-Gehalte, Tafel 1) und andererseits auf die geringere Abkühlungsgeschwindigkeit der 28 mm Stäbe nach dem Verlassen des Zinkbades (Nachwachsen der Hartzinkschicht) zurückgeführt werden kann. Bei allen Proben betragen die niedrigsten auftretenden Zinkschichtdicken etwa 50 μm . Es treten Verdickungen der Reinzinkauflage auf, welche über die Stablänge zunehmen und an der Stabunterseite stets stärker ausgebildet sind als an der Staboberseite. Das mitgerissene flüssige Zink läuft beim Ausziehen entlang der Stäbe und sammelt sich zum Stabende hin, besonders an der Stabunterseite an, von wo es nicht ausreichend abtropfen kann. Die Reinzinkverdickungen über die Probenlänge nehmen mit steigendem Durchmesser der Betonrippenstähle ab. Hier kommt also der gleiche Effekt wie bei den Betonstahlmatten zum Tragen, daß nämlich mit steigender Abkühlungsgeschwindigkeit und geringer werdendem Abstand der Schrägrippen (bei fallendem Durchmesser) das Abfließen des Reinzinks zunehmend behindert wird. Insgesamt gesehen ist die statistische Verteilung der Zinkauflagen bei den 8 mm Betonrippenstählen vergleichbar jener der 8,5 mm Mattenstähle, wenn man einmal von den durch die unterschiedliche Probenführung beim Ausziehen bedingten zweitrangigen Effekten absieht. Bei den 8 mm Betonrippenstählen treten über die Stablänge für 10 % der Staboberfläche Schichtdicken von mehr als 120 bis 225 μm auf und für 0,5 % Spitzenwerte von 190 bis 520 μm . Bei den 16 und 18 mm Stäben wurden nur an den Stabenden (an der Stabunterseite) ähnlich starke Gesamtauflagen wie bei den 8 mm Stäben festgestellt.

In der vorgenannten Versuchsreihe 1 wurden "geneigte" Stäbe auch mit Geschwindigkeiten von 1 m/min ausgezogen. Hier stellten sich insgesamt keine günstigeren Verhältnisse ein als bei Ausziehggeschwindigkeiten von 10 m/min. Bei vergleichbaren Verteilungen der Gesamtzinkauflage über die Stablänge sind hier - wegen der insgesamt längeren Verweildauer im Zinkbad - die Hartzinkschichten zum Stabende hin erheblich größer und die anteiligen Reinzinkschichten geringer, da beim Ausziehen weniger Zink mitgerissen wird. Bezüglich der Zinkverteilung über den Stabumfang sind die Verhältnisse bei langsameren Ausziehggeschwindigkeiten eher ungünstiger: An der Stabunterseite am Probenende wurden hier bei allen Durchmessern stärkere Reinzinkansammlungen festgestellt als nach dem schnellen Ausziehen der Stäbe. Im übrigen ist der Einfluß der Ausziehggeschwindigkeit auf die Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflagen qualitativ ähnlich wie im folgenden für eine weitere Versuchsreihe beschrieben.

Bei der Versuchsreihe 2-1 (Tafel 2) wurden 3 m lange Betonrippenstähle BSt 420/500 RK und BSt

500/550 RK 0,75 min getaucht und parallel zur Tauchrichtung ausgezogen. Nach dem Ausziehen wurden die 16 und 28 mm Stäbe in Wasser abgeschreckt. Bild 10 zeigt die Versuchsergebnisse für Ausziehgeschwindigkeiten von 10 m/min. Im Vergleich zur Versuchsreihe 1 (bei der allerdings nur 1,5 m lange Stäbe untersucht wurden) besteht folgender Unterschied: Wegen der kürzeren Tauchzeiten und bei den 16 und vor allem 28 mm Stäben auch durch die dem Verzinken folgende Wasserabschreckung sind die Hartzinkschichtdicken geringer, was bei den 8 mm Stäben zu etwa 10 und bei den 16 und 28 mm Stäben zu etwa 30 % geringeren mittleren Auflagen führt. Bei den "parallel" ausgezogenen Drähten nehmen die Rinzinkverdickungen ebenfalls zum Probenende hin zu. Das Zink verläuft jedoch über den gesamten Probenumfang gleichmäßig ab und kann sich nicht, wie bei den "geneigt" ausgezogenen Proben einseitig auf einer Umfangshälfte der Stäbe besonders stark anhäufen. Dadurch und weil auch die mittleren Auflagen geringer sind, weisen die "parallel" ausgezogenen Stäbe im ungünstigsten Fall (Stabende) weniger stark ausgeprägte Verdickungen der Zinkauflage auf als die "geneigt" ausgezogenen (Stabende, Stabunterseite). Bei der Versuchsreihe 2-1 sind bei den 16 mm Stäben keine grundlegenden Unterschiede zwischen dem Werkstoff 5 und 7 (BSt 420/500 RK bzw. 500/550 RK) festzustellen. Der höhere Siliciumgehalt von Werkstoff 7 (Tafel 1) erhöht die Zinkauflage bei den hier untersuchten kurzen Tauchzeiten und hohen Ausziehgeschwindigkeiten gegenüber Werkstoff 5 nur unwesentlich.

Bild 11 gibt die Ergebnisse der Versuchsreihe 2-1 wieder, wo die Stäbe im Unterschied zu den zuvor beschriebenen Versuchen - anstelle mit einer hohen mit einer niedrigen Ausziehgeschwindigkeit (1 m/min) aus dem Zinkbad ausgezogen wurden. Dieses langsame Ausziehen führt wegen der dadurch insgesamt höheren Verweildauer im Zinkbad zu einem starken Anwachsen der Hartzinkschichten über die Probenlänge. Dies gilt insbesondere für die 28 mm Stäbe aus BSt 420/500 RK und 16 mm Stäbe aus BSt 500/550 RK mit 0,07 bzw. 0,48 % Silicium. Derartige Si-Gehalte können bekanntlich bei ausreichend langer Verweildauer der Stähle im Zinkbad das Wachstum der Hartzinkschicht begünstigen. Obwohl bei dem sehr langsamen Ausziehen, insbesondere bei den dickeren Stababmessungen das Reinzink beim Ausziehen über die gesamte Stablänge gut ablaufen kann (am Probenende sind die maximalen Reinzinkauflagen auf 10 % der Staboberfläche im Vergleich zu den mit 10 m/min ausgezogenen 8, 16 und 28 mm Stäben um etwa 36, 62 bzw. 39 % niedriger), sind die Gesamtauflagen deshalb für alle Häufigkeiten der statistischen Verteilung größer als bei den schnell ausgezogenen Stäben: Bei den Werkstoffen 4 bis 7 sind die mittleren Auflagen in g/m² bei Ausziehgeschwindigkeiten von 1 gegenüber 10 m/min um 28, 70, 63 bzw. 89 % höher.

Die in den Versuchsreihen 1 und 2-1 bei den Betonrippenstählen erzielten Zinkauflagen sind nicht zufriedenstellend, da in den unteren Stabbereichen, vor allem aber an den Stabenden im Kerbgrund der Schrägrippen Zinkverdickungen auftreten. Bei Tauchzeiten von 0,75 min und hohen Ausziehgeschwindigkeiten von 10 m/min überlagern hier örtlich hohe Reinzinkauflagen eine verhältnismäßig dünne, im statistischen Mittel etwa 55 µm starke mittlere Auflage. Bei niedrigen Ausziehgeschwindigkeiten beträgt die mittlere Auflage wegen der stark anwachsenden Hartzinkschicht am Stabende im statistischen Mittel etwa 120 µm, wobei örtlich noch höhere Gesamtauflagen auftreten als nach schnellem Ausziehen. Derartige sowohl mit hohen als auch niedrigen Ausziehgeschwindigkeiten bei Betonrippenstählen erreichte Zinkauflagen > 200 µm führen beim Biegen dieser Stähle im Bereich der Zinkverdickungen zu Abplatzungen (s.u.). Hohe Hartzinkschichten fördern solche Zinkabplatzungen durch Rißbildung in der Zinkauflage. Da Betonrippenstähle häufig gerade in den Endbereichen abgebogen werden müssen, sind somit erhöhte und wenig verformungsfähige Zinkauflagen an den Stabenden von Nachteil.

Es wurden daher weitere Verzinkungsversuche durchgeführt, um optimale Auflagen zu erreichen. Gegenüber den bisher beschriebenen Versuchsreihen wurden z.T. weitere Verbesserungen bei der in Tafel 2 genannten Versuchsreihe 2-2 erzielt. Bei den 8 mm Stäben wurde die Tauchzeit auf 0,2 min reduziert und die Stäbe wurden 85 % der Stablänge mit Geschwindigkeiten von 5 und auf der Restlänge mit 1 m/min parallel zur Tauchrichtung ausgezogen. Die 16 und 28 mm Stäbe wurden bei Tauchzeiten von 0,75 min entsprechend auf 85 % Länge mit 10 und auf der Restlänge ebenfalls mit 1 m/min parallel zur Tauchrichtung ausgezogen und 30 sec nach dem Ausziehen in Wasser abgeschreckt.

Bild 12 gibt die Ergebnisse dieser Versuchsreihe wieder. Bei den 8 mm Stäben lassen sich so über die Stablänge gleichmäßige Auflagen mit einem statistischen Mittel von 65 µm erzielen; die maximalen Auflagen für 10 % der Staboberfläche liegen etwa zwischen 120 und 240 µm. Die Hartzinkschichten betragen nahezu in allen Stabbereichen weniger als 40 µm.

Bei den 16 und 28 mm Stäben entsprechen die Zinkauflagen im oberen und mittleren Bereich der Stäbe jenen der Versuchsreihe 2-1. Durch ein Absinken der Ausziehgeschwindigkeit in den unteren Stabbereichen konnte hier im Vergleich zu einem durchgehend schnellen Ausziehen bei den 16 mm Stäben die Reinzinkverdickungen reduziert werden. Das verlangsamte Ausziehen am Stabende führt jedoch hier - wegen des hohen Siliciumgehaltes von 0,48 % - vor allem bei dem Werkstoff 7 zu etwas

höheren Hartzinkschichten. Bei den 28 mm Stäben bringt die durch das Absenken der Ausziehgeschwindigkeit erzielte Verminderung der örtlichen Zinkverdickungen keine weitere Verbesserung, da die Hartzinkschicht hier im gleichen Maße anwächst. Insgesamt gesehen lassen sich so bei den 16 mm Stäben BSt 420/500 RK über die Stablänge Zinkauflagen mit einem statistischen Mittel von 30 bis 50 μm erzielen, wobei die Werte der Hartzinkschicht zwischen 25 und 45 μm liegen. Die maximalen Auflagen für 10 % der Staboberfläche betragen etwa 55 bis 200 μm . Bei den 28 mm Stäben aus BSt 420/500 RK und 16 mm Stäben aus BSt 500/550 RK betragen die mittleren Gesamtzinkschichtdicken im statistischen Mittel etwa 40 bis 80 μm und die Hartzinkschichten 25 bis 62 μm . Auf 10 % der Oberfläche sind maximale Auflagen von 70 bis 220 μm vorhanden. Die gegenüber den 16 mm Stäben aus BSt 420/500 RK insbesondere am Stabende höheren mittleren Hartzink- und Gesamtzinkschichten sind sicherlich eine Folge der den Werkstoffen 6 und 7 zulegierten Siliciumgehalte (Tafel 2).

Durch weitere Versuche wurde festgestellt, daß bei den 16 und 28 mm Stäben die Hartzinkschichten und somit auch die mittleren Gesamtauflagen durch verkürzte Tauchzeiten (z.B. 0,2 min) noch weiter herabgesetzt werden können, jedoch besteht hierbei auch die Gefahr, daß das Zink wegen ungenügender Durchwärmung der Stäbe "anbackt". Bei 16 und 28 mm Stäben sollten daher Tauchzeiten von 0,5 min nicht unterschritten werden, wenn die Stäbe mit hohen Geschwindigkeiten von 10 m/min ausgezogen werden.

Bei Würdigung aller bei Betonstahlmatten und Betonrippenstählen erzielten Ergebnisse kann zusammenfassend festgestellt werden, daß beim Tauchverzinken von gerippten Stählen die mittlere Zinkauflage (Bild 13 obere Kurve) und vor allem die Ungleichmäßigkeit der Zinkschichten mit fallendem Durchmesser stark zunehmen. Dies ist vor allem auf die mit abnehmendem Durchmesser steigende Abkühlungsgeschwindigkeit der Stäbe beim Verlassen des Zinkbades und die Abnahme der Rippenabstände zurückzuführen. Ein schnelles Abkühlen der Stäbe beim Ausziehen und eine hohe Makrorauigkeit bewirken, daß von den Stäben viel Reinzink mitgerissen wird. Bei Stäben < 8 mm führt dies zu hohen mittleren Auflagen und extremen Verdickungen im Rippenbereich. Bei den Stäben ≥ 8 mm kommt es, beim Ausziehen der Stäbe parallel zur Tauchrichtung, lediglich im Kerbgrund der Schrägrippen insbesondere am Probenende zu örtlich höheren Auflagen. Dieses Verhalten drückt sich in der sprunghaften Zunahme der mittleren Reinzinkauflage bei Durchmessern < 8 mm (Bild 13 untere Kurve) aus. Der Siliciumgehalt der Stähle spielt insofern eine Rolle, als dieser insbesondere bei Gehalten von 0,04 und 0,08 % bei den Mattenstählen und bei Gehalten von 0,07 und 0,48

% bei den 1 nach Verweildauern von mehr als 1 min im Zinkbad zu einem beschleunigten Anwachsen der Hartzinkschichten führten. Da mit abnehmender Ausziehgeschwindigkeit besonders bei den dünneren Abmessungen das Reinzink besser ablaufen kann, jedoch - vor allem bei kritischen Siliciumgehalten - hierdurch das Anwachsen der Hartzinkschichten zum Stabende hin gefördert wird, ergeben sich je nach Stabdurchmesser besondere Verzinkungsbedingungen. Betonstahlmatten und Betonrippenstählen geringerer Durchmesser ≤ 10 mm sollten nach Tauchzeiten von nur 0,2 bis 0,5 min mit mittleren Geschwindigkeiten von 5 m/min ausgezogen werden. Betonrippenstähle > 10 mm können nach Tauchzeiten von 0,5 bis 0,75 min mit Geschwindigkeiten von 10 m/min ausgezogen werden, sollten jedoch unmittelbar danach in Wasser abgeschreckt werden. Bei Betonrippenstählen von 8, 16 und 28 mm Durchmesser konnten durch ein Absenken der Ausziehgeschwindigkeit am Probenende die örtlichen Zinkverdickungen reduziert werden. Bei dünneren Stäben < 8 mm ist ein diesbezüglich vorteilhafter Einfluß nicht zu erwarten, da hier auch bei sehr niedrigen Ausziehgeschwindigkeiten noch viel Reinzink mitgerissen wird.

3.2 Beanspruchbarkeit der Zinküberzüge

Bei den Verzinkungen werden am gebeizten Werkstoff häufig Oberflächenrauheitsmessungen durchgeführt, um sie gegebenenfalls zur Deutung der Ergebnisse von Haftungsversuchen und der mechanisch-technologischen Prüfungen heranzuziehen. Die Rauigkeit wird durch das Gesamttiefenmaß R_t ("Rauhtiefe"), das mittlere Tiefenmaß R_p ("Glättungstiefe") und die mittlere Rauhtiefe R_a gekennzeichnet. Dabei gibt R_t die absolute Entfernung von der höchsten Spitze bis zum tiefsten Tal an. R_p entspricht der mittleren größten Entfernung der verschiedenen großen Spitzen und Täler, von einer Bezugslinie aus gemessen. R_a bezeichnet die durchschnittliche Höhe des Profils, gemessen von der Grundlinie. Die Rauhtiefe R_t , die Extremwerte der Rauigkeit angibt, hat vor allem bei der Beurteilung von Oberflächen hinsichtlich mechanisch-technologischer Eigenschaften Bedeutung. Bezüglich der Haftung vermitteln die gemittelten Rauhtiefen eine bessere Aussage.

Nach dem Beizen wurden in Längsrichtung der Stäbe bei den Betonstahlmatten und Betonrippenstählen die in Tafel 3 wiedergegebenen Werte festgestellt. Die kaltgewalzten Stäbe der Betonstahlmatten weisen geringere Rauigkeiten auf als die aus warmgewalzten Stäben hergestellten verdrihten Betonrippenstähle.

Betonstahlmatten und Betonrippenstähle können in der Praxis im gebogenen Zustand und als Bügelbewehrung verwendet werden. Sie werden gebogen zur

Verkürzung der Verankerungslänge (in der Regel als Widerhaken) und zur Herstellung von Schlaufenstößen. Bei Durchmessern < 20 mm sind hierbei Biegerolldurchmesser von $4 d_s$ (d_s = Stabdurchmesser) und bei Durchmessern ≥ 20 mm solche von $7 d_s$ erlaubt. Für Schrägaufbiegungen und andere Krümmungen (z.B. in Rahmenecken) dürfen Betonstähle - je nach Betondeckung - um Biegerollen von 10 bis $20 d_s$ gebogen werden. Beim Biegen um 4 , 7 , 10 und $20 d_s$ werden die Stäbe auf der Krümmungsaußenseite um etwa 20 , 13 , 9 , bzw. 5 % gedehnt und auf der Krümmungsinnenseite entsprechend gestaucht. Bei gerippten Stählen ist die Krümmung jedoch i.a. nicht kontinuierlich, da die Verformung sich auf die Rippenübergänge konzentrieren kann.

Wegen der Notwendigkeit, Betonstähle für den praktischen Einsatz auch biegen zu müssen, spielt das Rißverhalten und die Haftung der Zinkauflage eine wichtige Rolle. Maß für die Haftung sollte einerseits die Dehnung der Außenfaser der Stäbe sein, bei der der Zinküberzug gerade einreißt und andererseits die Dehnung bzw. Stauchung ab der das Verbundverhalten zwischen Stahl und Zinkauflage aufgehoben wird und die Zinkschichten sich abzulösen beginnen.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wurden alle Verzinkungsausführungen zunächst um solche Rollendurchmesser gebogen, daß sich maximale Dehnungen bzw. Stauchungen von i.M. 20 % einstellen. Das charakteristische Verhalten der Betonstahlmatten ist in Bild 14 dargestellt. Bild 14a zeigt die gedehnte Zone eines $8,5$ mm Längsstabes (die Zinkverdickungen an der Stabunterseite wurden hierbei nicht mit erfaßt). Bei diesem Stab treten in Abstand von etwa $0,2$ bis $0,5$ mm zahlreiche Risse auf. Im Bereich der Rippenanläufe wird die Rißbildung begünstigt, da hier stets mehr oder weniger starke Reinzinkverdickungen vorhanden sind (22 bzw. 8 % der Zinkauflage > 100 bzw. $200 \mu\text{m}$). Wie bei metallographischen Untersuchungen festgestellt wurde hat sich das Zink zwischen den Rippen teilweise, im Kerbgrund der Rippen dagegen vollständig vom Stahluntergrund angelöst. In Bild 14b wird das entsprechende Verhalten eines 6 mm Querstabes gezeigt. Hier treten im Abstand von etwa $1 - 1,5$ mm stark klaffende Zinkrisse auf. Die Zinkauflage hat sich gänzlich vom Stahluntergrund abgehoben und ist bei anderen Proben auch bereits gänzlich abgelättert. Bei diesem Stab betragen 76 % bzw. 22 % der Auflage > 100 bzw. $200 \mu\text{m}$. Bild 15 zeigt das Verhalten der Zinkauflage im Bereich einer Schweißnaht bei Dehnungen um 20 %. Die Haftung der Zinküberzüge ist im Kerbgrund der verschweißten Längs- und Querstäbe günstiger zu beurteilen als außerhalb der Schweißnaht. Dafür sind vor allem Dehnungsbehinderungen verantwortlich.

Das Verhalten verzinkter Betonrippenstähle bei 20 % Dehnung ist Bild 16 zu entnehmen. Die obere Bildreihe (Bild 16a bis 16c) ist typisch für den Endbereich von Stäben, welche mit hohen Geschwindigkeiten von 10 m/min aus dem Zinkbad gezogen wurden. Hier kommt es im Bereich von erhöhten Zinkauflagen (18 bis 45 % der Auflage $> 100 \mu\text{m}$ und 6 bis 13 % der Auflage $> 200 \mu\text{m}$) zu zahlreichen Rissen; diese weisen Abstände von $0,2$ bis $0,5$ mm auf. Bei den stärker klaffenden Rissen hat sich das Zink örtlich vom Untergrund abgelöst. Die Stäbe der mittleren Bildreihe (Bilder 16d und 16e) wurden mit niedrigen Geschwindigkeiten von 1 m/min ausgezogen. Am Stabende führen erhöhte Hartzinkschichten zu insgesamt stärkeren Auflagen als zuvor genannt: 50 bzw. 55 % der Auflage ist stärker $100 \mu\text{m}$ und 2 bzw. 6 % stärker $200 \mu\text{m}$. Hier bilden sich nach dem Biegen auf allen Bereichen der Staboberfläche klaffende Risse. Zwischen den Rissen hat sich das Zink vom Stahluntergrund gelöst.

Die Bilder 16f bis 16h zeigen das Verhalten von verzinkten Stäben, welche einerseits nur verhältnismäßig niedrige mittlere Hartzink- und Gesamtzinkschichten, andererseits aber auch kaum Zinkverdickungen $> 200 \mu\text{m}$ aufweisen. Solche Zinkauflagen (auch am Probenende) können eingestellt werden, wenn die Stäbe nach Tauchzeiten $\leq 0,75$ min zunächst mit hohen (5 bzw. 10 m/min) und am Probenende mit niedrigen (1 m/min) Geschwindigkeiten parallel zur Tauchrichtung aus dem Zinkbad ausgezogen werden. Hier treten nach dem Biegen in der Zugzone sehr fein verteilte Risse in der Zinkauflage auf. Diese Rißbildung ist bei dem Stab in Bild 16h etwas ausgeprägter, da hier infolge hoher Siliciumgehalte (Werkstoff 7) die Hartzinkschichten etwas stärker angewachsen sind. Durch metallographische Untersuchungen wurde festgestellt, daß bei den Stäben der unteren Bildreihe eine Haftung des Zinks auf dem Stahl noch weitgehend vorhanden ist. Nur im Bereich der Risse kann sich das Zink beidseitig der Risse bis zu maximal $100 \mu\text{m}$ vom Stahl ablösen. Auffallend ist, daß sich die 8 mm Betonrippenstähle (Bild 16f) hinsichtlich der Haftung des Zinks, auch bei vergleichbarer Auflage, beim Biegen etwas günstiger verhalten als die $8,5$ mm Mattenstähle (Bild 14a). Dies kann auf die höheren Rauigkeiten der Betonrippenstähle gegenüber den Mattenstählen (Tafel 3) zurückgeführt werden.

Gleichermaßen wie bei Dehnung wurde das Verhalten der Zinkauflagen auch bei Stauchung untersucht. Bei Verformungen von 20 % des Stahluntergrundes wurde festgestellt, daß in all jenen Fällen wo örtlich hohe Auflagen zu einem örtlichen Abplatzen bei Dehnung führen, sich derartige Auflagen auch bei Stauchung vom Stahl abheben (Bild 17). Bei vergleichbaren Verzinkungsausführungen, wie in den Bildern 16f bis 16h, wo auf der Zug-

seite zahlreiche feine Risse auftreten, wurden dererlei Erscheinungen auf der Druckseite nicht bzw. nur im erheblich geringeren Maße festgestellt.

Für alle Verzinkungsausführungen wurden auch das Rißverhalten und die Haftung des Zinks bei geringeren Verformungsgraden des Stahluntergrundes untersucht. Das Auftreten erster Anrisse in der Zinkauflage ist weitgehend unabhängig von der Güte (Dicke und Aufbau) der Zinkauflage und der Rauigkeit des Stahluntergrundes: Bei den Betonstahlmatten und den Betonrippenstählen treten erste durchgehende Risse bereits kurz nach Überschreiten der 0,2-Dehngrenze des Stahluntergrundes auf und zwar bevorzugt im Rippenbereich. Mit zunehmender Dehnung nimmt die Rißzahl zu und die Risse klaffen auf, wodurch diese auch für das Auge erkennbar werden. Mit steigender Zinkauflage nehmen die Abstände der Zinkrisse und die Rißbreite zu (Bild 18). Bei entsprechend dicken Auflagen kommt es auch schon bei verhältnismäßig geringen Dehnungen zu örtlichen Haftungsverlusten und Abblätterungen des Zinks. Bei Hartzinkschichtdicken von i.M. 50 bis 75 µm muß mit örtlichen Haftungsverlusten ab 5 bis 7 % Dehnung gerechnet werden, wenn die Gesamtauflagen auf einigen Quadratmillimetern der Staboberfläche durchgehend 200 µm übersteigen. Dies ist z.B. bei allen untersuchten Betonstahlmatten der Fall.

4. Beurteilung der Ergebnisse

Beim Tauchverzinken von gerippten Betonstählen (Betonstahlmatten, Betonrippenstähle) nimmt die mittlere Zinkauflage und die Ungleichmäßigkeit der Zinkschichten mit abnehmendem Durchmesser stark zu. Dies ist vor allem auf die mit abnehmendem Durchmesser steigende Abkühlungsgeschwindigkeit der Stäbe beim Verlassen des Zinkbades und die Abnahme der Rippenabstände zurückzuführen. Ein schnelles Abkühlen der Stäbe beim Ausziehen und eine hohe Makrorauigkeit bewirken, daß von den Stäben viel Reinzink mitgerissen wird.

Bei den untersuchten Betonstahlmatten (Stabdurchmesser 5 bis 8,5 mm) sind daher neben den Längsstäben vor allem die in Ausziehrichtung liegenden Querstäbe, selbst im Hinblick auf in der Praxis vorkommenden kritische Korrosionsbedingungen, viel zu stark verzinkt. Die hohen Zinkauflagen wirken sich derart ungünstig auf das Rißverhalten und die Haftung des Zinks aus, daß bei praxiserrechter Handhabung (Abbiegen um einen Dorn des vierfachen Stabdurchmessers) mit einem Abblättern der Zinkauflage gerechnet werden muß. Bei den kaltgewalzten Betonstahlmatten ist sicherlich auch die im Vergleich zu Betonrippenstählen verhältnismäßig geringer Oberflächenrauigkeit von Nachteil auf die Haftung des Zinks.

Bei abgeblätternen Zinkauflagen ist natürlich der erhoffte spezielle Korrosionsschutz nicht gewährleistet. Außerdem gilt zu berücksichtigen, daß bei den stark verzinkten Mattenabschnitten, die für das Verbundverhalten im Beton wichtige bezogene Rippenfläche um ca. 20 - 25 % abnimmt. Gleichzeitig wird auch die Neigung der Rippenflanken kleiner: Einer Neigung von etwa 50° beim unverzinkten Stab stehen bei Rippenbereichen mit starker Auflage solche von i.M. 20° gegenüber.

Wegen des ungünstigen Verbundverhaltens Zinkstahl bei Betonstahlmatten mit bisher üblichen Durchmesserkombinationen sollten daher verzinkte Betonstahlmatten nach dem Verzinken grundsätzlich nicht mehr gebogen werden. Ein Abkrümmen von Matten würde entfallen, wenn diese z.B. als Bewehrung in flächigen Tragwerken eingesetzt werden. Sollen feuerverzinkte Matten im gebogenen Zustand zum Einsatz kommen, so müßte das Verzinken nach dem Biegen, das in der Regel heute in Biegebetrieben erfolgt, durchgeführt werden.

Bei den Betonrippenstählen können dünnere und gleichmäßigere Zinkauflagen erzielt werden, als bei den Betonstahlmatten. Dies gilt auch für die 8 mm Stäbe. Hier lassen sich bei den Betonrippenstählen durch entsprechende Probenführung Zinkverdickungen weitgehend vermeiden, während bei den quer zur Ausziehrichtung liegenden 8,5 mm Längsstäben von Matten an der Stabunterseite Zinktropfen zu örtlich höheren Zinkschichten führen. Die Zinkauflagen bei den Betonrippenstählen betragen bei optimaler Verzinkung auch in den zu Verdickungen neigenden Rippenbereichen i.a. weniger als 200 µm, sind jedoch hier bei den 8 mm Stäben durchweg höher als bei den 16 und 28 mm Stäben. Beim Biegen verzinkter Betonrippenstähle sind, wenn überhaupt, nur bei den 8 mm Stäben Schwierigkeiten bezüglich der Haftung der Zinkauflage zu erwarten. Dies könnte z.B. der Fall sein, wenn solche Stäbe, wie im vorliegenden Fall nicht untersucht, kritische Siliciumgehalte aufweisen. Im allgemeinen Hochbau werden Betonrippenstähle mit 8 aber auch 10 mm Durchmesser überwiegend als Bügel und Montagestäbe verwendet. Das Biegen der Bügel erfolgt z.T. in Biegebetrieben, zum größten Teil jedoch noch auf Baustellen. Da aus Rationalisierungsgründen die Tendenz besteht auch Bügel in immer stärkeren Maße in Biegebetrieben vorzufertigen, wäre zukünftig ein Verzinken nach Fertigung der Bügel zu empfehlen. Montagestäbe werden in der Regel nicht gebogen, so daß sich hier keine Probleme bezüglich der Haftung der Zinkauflage stellen. Betonrippenstähle ≥ 12 mm werden in Biegebetrieben und auf der Baustelle in der Regel nur dann gekrümmt, wenn sie zur Aufnahme der Schubkräfte schräg aufgebogen oder in Rahmenecken angeordnet werden. Hierfür sind jedoch nur Biegungen um Biegerollen des 20-fachen und in Ausnahmefällen des 10-fachen

Stabdurchmessern erlaubt; dies ergibt im ungünstigsten Fall etwa 9 % Biegeverformung wo noch keine Abplatzungen des Zinks auftreten sollten. Im übrigen wird aus Gründen der Rationalisierung der Bewehrungstechnik in zunehmendem Maße auf Schrägbiegungen verzichtet.

5. Zusammenfassung

An feuerverzinkten Überzügen auf Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl 5 bis 8,5 mm Durchmesser und kaltumgeformten Betonrippenstählen 8 bis 28 mm Durchmesser aus BSt 420/500 RK und BSt 500/550 RK wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Erprobung der technischen Möglichkeiten zur einwandfreien Feuerverzinkung von kaltumgeformten Betonrippenstählen und geschweißten Betonstahlmatten aus kaltumgeformten gerippten Stäben.

Definition der tatsächlichen Verhältnisse bezüglich Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage mittels statistischer Verfahren.

Feststellung der Umformbarkeit des Verbundwerkstoffes Stahl-Zink und Haftung der Zinkschicht auf dem Stahl.

- Erörterung der erzielbaren Verzinkung im Hinblick auf eine Anwendung feuerverzinkter Betonstähle aus gerippten Stäben.

Es wurde festgestellt, daß insbesondere die bei Betonstahlmatten verwendeten dünnen Abmessungen von 5 bis 7,5 mm Durchmesser zu extrem starken Verzinkungen und zu einer hohen Ungleichmäßigkeit der Zinkauflage mit örtlichen Zinkverdickungen neigen. Bei den für Längsstäbe der Matten verwendeten größeren Durchmessern können Zinkverdickungen an der Stabunterseite auftreten. Seitens der Verzinkungstechnologie bestehen aus erster Sicht keine Möglichkeiten diesem Verhalten zu begegnen. Die hohen Zinkauflagen wirken sich äußerst nachteilig auf das Rißverhalten und die Haftung des Zinks beim Biegen aus. Bei praxisgerechter Handhabung (Abbiegen) muß mit einem Abblättern der Zinkauflage gerechnet werden.

Bei Betonrippenstählen können dünnere und gleichmäßigere Zinkauflagen als bei Betonstahlmatten erzielt werden. Hier lassen sich durch eine optimale Verzinkungstechnologie Zinkverdickungen weitgehend vermeiden. Beim Biegen verzinkter Betonrippenstähle sind, wenn überhaupt, nur bei den 8 mm Stäben Schwierigkeiten bezüglich der Haftung zu erwarten. Dies könnte z.B. der Fall sein, wenn diese Abmessungen einen kritischen Siliciumgehalt aufweisen, der das Wachstum der Hartzinkschicht fördert.

Für alle verzinkten, gerippten Betonstähle gilt, daß mit Haftungsverlusten und Abblättern des Zinks beim Biegen gerechnet werden muß, wenn bei Hartzinkschichtdicken von i.M. 50 bis 75 µm die Gesamtauflagen, auch nur örtlich, mehr als 200 µm betragen.

Es empfiehlt sich, gerippte Betonstähle (vorzugsweise die dünneren Abmessungen) erst nach dem Biegen feuerverzinken.

Literatur

- Halstead, P.E.: Chem. & Incl. (1957)
- /2/ Eijnsbergen, J.F.H. van: Dt. Bauztg. 69 (1964) S. 748/50.
- 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/ Eijnsbergen, J.F.H. van: Verzinken 4 Nr. 2, S. 26/29 u. 32.
7. 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.
- /8/ Böttcher, H.J. Masch.-Markt 76 (1970) S. 837/39.
- /9/ Rehm, G., u.U. Nürnberger: Stahl u. Eisen 98 (1978) S. 392/98.
- 10/ 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.
- /11/ Duval, R., u.G. Arliquoie: Mém. sci. Rev. Métallurg. 71 (1974) S. 719/27.
- /12/ Martin, H., u.A. Rauen: Wie unter 10). S. 62/77.
- 13/ Cornet, J., u.B. Bresler: Mater. Protection 5 (1966) Nr. 4, S. 69/72.
- /14/ Bresler, B., u.J. Cornet: Dt. Bauztg. 70 (1965) S. 762/66.
- /15/ Kaesche, H.: Werkst. u. Korrosion 20 (1969) S. 119/24.
- /16/ 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.
- /17/ Rauen, A.: Untersuchungen zum Korrosionsverhalten verzinkter Bewehrung im Beton. Wie unter 5). S. 1/13.
- 18/ Burggrave, A.H.: Bauing. 46 (1971) S. 366
- /19/ Brodbeck, M.: Schweiz. Bauztg. 72 (1954) S. 256/57.
- /20/ Cornet, J., u.B. Bresler: Mater. Protection 4 (1965) Nr. 11, S. 35/37.
- /21/ Sehlmeier, E.A.: MM-Industriej 77 (1971) S. 2217/19.
- /22/ 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.
- 3/ Bird, C.F.: Corrosion Prevention and Control 65 (1964) S. 17.
- /24/ Scott, O.I., u.H.J. Leung: Bond characteristics of concrete reinforcing tendons coated with zinc. ILZRO Project ZE 222, Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle, N.S.W. 2308, Australia, 1978.
- /25/ Tripler, J.E., u. others: Methods for Reducing Corrosion of Reinforcing Steel. National Co-operative Highway Research Program, NCHRP Report No. 23, 1966
- /26/ Cornet, J., T. Ishikawa u.B. Bresler: Mater. Protection 7 (1968) Nr. 3, S. 44/46.
- /27/ Investigations on Mechanical Behavior of Galvanized Steel Reinforcement. Project N ZE-170, Reports 1-4, International Lead Zinc Research Organization, New York 1971 und 1972.
- /28/ Okamura, H., u.Y. Hisamatsu: Mater. Performance 15 (1976) Nr. 7, S. 43/47.
- /29/ Building Research Station Digest, 109 second series, p. 8. Zinc - coated reinforcement for concrete. London HMSO 1969.
- /30/ Horstmann, D. Stahl u. Eisen 91 (1971) S. 125/29.
- /31/ Funke, P., u.Ch. Pavlidis: Stahl u. Eisen 92 (1972) S. 867/73.

- /32/ Nieth, F.: Bänder, Bleche, Rohre 14 (1973) S. 95/102.
- /33/ Hawkins, N.M.: ACI Journal (1976) S. 104/15.
- /34/ Wiegand, H.,u.F. Nieth: Draht 21 (1970) S. 767/70.
- /35/ Nieth, F.,u.H. Wiegand: Archiv Eisenhüttenwes. 46 (1975) S. 589/93.
- /36/ Hempel, M.,u.D. Horstmann: Archiv Eisenhüttenwes. 42 (1971) S. 309/18.
- /37/ Matting, A.,u.H. Wolf: Archiv Eisenhüttenwes. 33 (1962) S. 217/21.
- /38/ Wiegand, H.,u.F. Nieth: Stahl u. Eisen 84 (1964) S. 82/88.
- /39/ Horstmann, D.: Archiv Eisenhüttenwes. 46 (1975) S. 137/41.
- /40/ Böttcher, H.-J.: Metall 32 (1978) S. 236/40.
- /41/ Heubner, U.,u.F. Nilmen: Werkst. u. Korrosion 30 (1979) S. 169/79.
- /42/ Nürnberger, U.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. H..... (2. Veröffentlichung)

ANHANG

Tafeln
Bilder

Tafel 1:

Sorten, Durchmesser und chemische Zusammensetzung der untersuchten Betonstahlmatten und Betonrippenstähle

Werkstoff	Sorte	Güte	d	chemische Analyse (%)						
			mm	C	Si	Mn	P	S		
1 QS	Betonstahlmatte 75x75	BSt 500/550 RK	5,0	0,09	0,04	0,42	0,021	0,021		
1 LS			5,0	0,10	<0,01	0,37	0,041	0,019		
2 QS			150x250		6,0	0,07	0,17	0,52	0,019	0,021
2 LS					8,5	0,11	<0,01	0,32	0,024	0,022
3 QS			D150/250		7,5	0,12	0,08	0,54	0,076	0,027
3 LS					8,5d	0,11	<0,01	0,40	0,027	0,025
4	Betonrippenstahl	BSt 450/500RK	8	0,11	0,21	0,52	0,011	0,011		
5			16	0,15	0,23	0,55	0,014	0,020		
6			28	0,19	0,07	1,00	0,018	0,039		
7			BSt 500/550 RK	16	0,20	0,48	1,42	0,016	0,025	

N < 0,006 %, Cr < 0,1 %, Ni < 0,01 %, Mo < 0,05 %, Cu < 0,01 %, Al < 0,01

Tafel 2:

Verzinkungsbedingungen (Beizen, Fluxen, Verzinken) für die Betonstahlmatten und kaltverformten Betonrippenstähle

Werkstoff	Beizen			
	HCl-Gehalt	Fe-Gehalt	Temperatur	Dauer
	Gew. %	g/l Fe	°C	min
1 bis 3	14	80	40	3,5
4 bis 7	12	70	12-15	45

Werkstoff	Fluxen		
	Lösung	Temperatur	Tauchzeit
		°C	min
1 bis 3	5° Bé NH ₄ Cl	75	5
4 bis 7	15° Bé NH ₄ Cl	15	1

Werkstoff	Versuchsreihe	Verzinken		
		Temperatur	Tauchzeit	Ausziehgeschwindigkeit
		°C	min	m/min
1 bis 3	-	465	1	5
4 bis 6	1	460	1,25	1 und 10
4 bis 7	2-1 ¹⁾	460	0,75	1 und 10
4	2-2	460	0,20	5 (1) ²⁾
5 bis 7	2-2 ¹⁾	460	0,75	10 (1) ²⁾

1) 16 und 28 mm Stäbe ca. 30 sec nach dem Ausziehen in Wasser von ca. 30° C abgeschreckt

2) Abminderung der Ausziehgeschwindigkeit von 5 bzw. 10 auf 1 m/min nach Ausziehen von ca. 85 % der Stablänge

Tafel 3:

Rauhigkeitsbestimmungen an Betonstählen nach dem Beizen

Werkstoff	Rauhigkeit (Mittelwerte) in µm		
	R _t	R _a	R _p
Betonstahlmatte	8,8	1,9	3,5
Betonrippenstahl	46,8	7,0	23,9

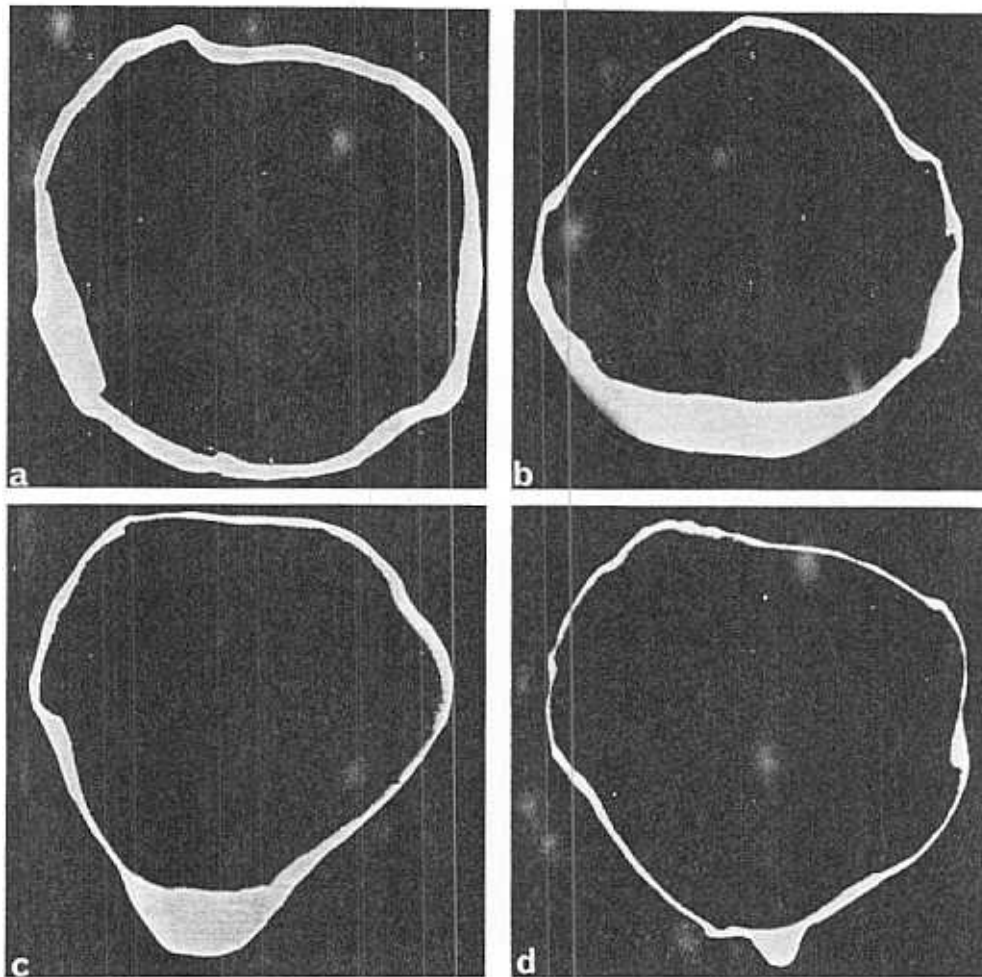


Bild 1:

Zinkauflagen bei Betonstahlmatten (Querschliffe):
 a) Querstab 5 mm Durchmesser, b) bis d) Längsstäbe
 5 mm Durchmesser

30:1

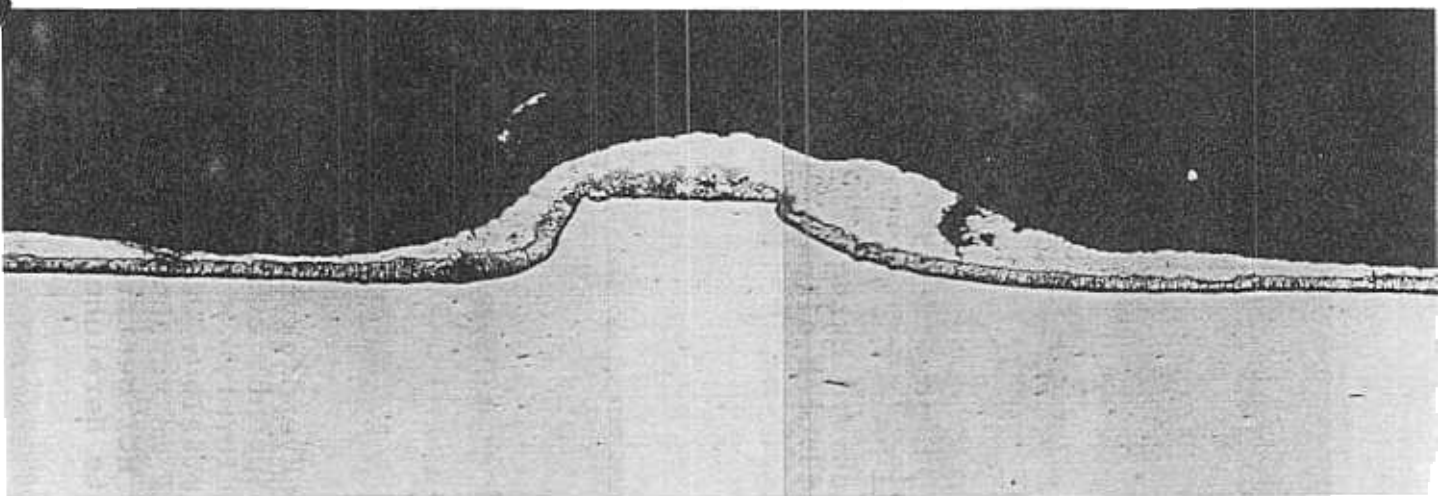


Bild 2:

Reinzinkverdickungen im Schrägrippenbereich von Betonstahlmatten,
 Längsschliff in verdünnter alkoh. HCl geätzt (ausgesuchte Bereiche)

75:1

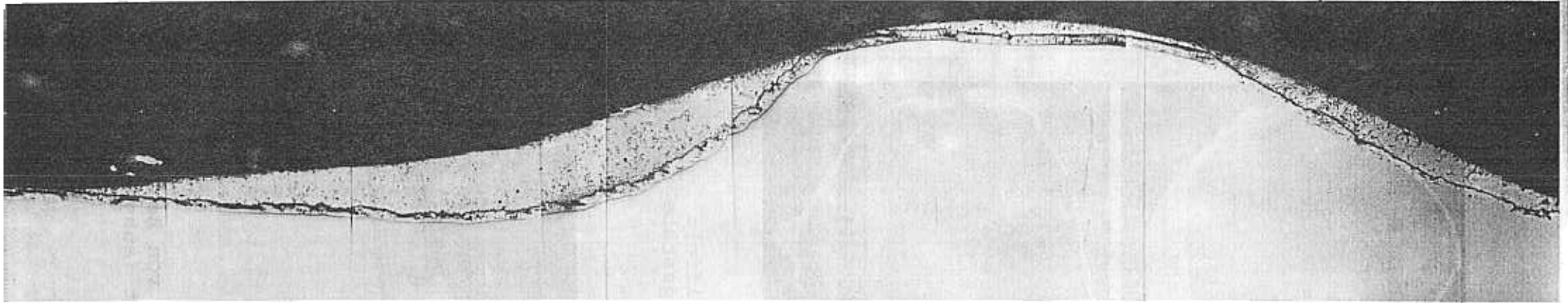


Bild 3:

Reinzinkverdickung im Schrägrippenbereich von kaltumgeformten Betonrippenstählen, Längsschliff in verdünnter alkoh. HCl geätzt (ausgesuchte Bereiche)

150:1

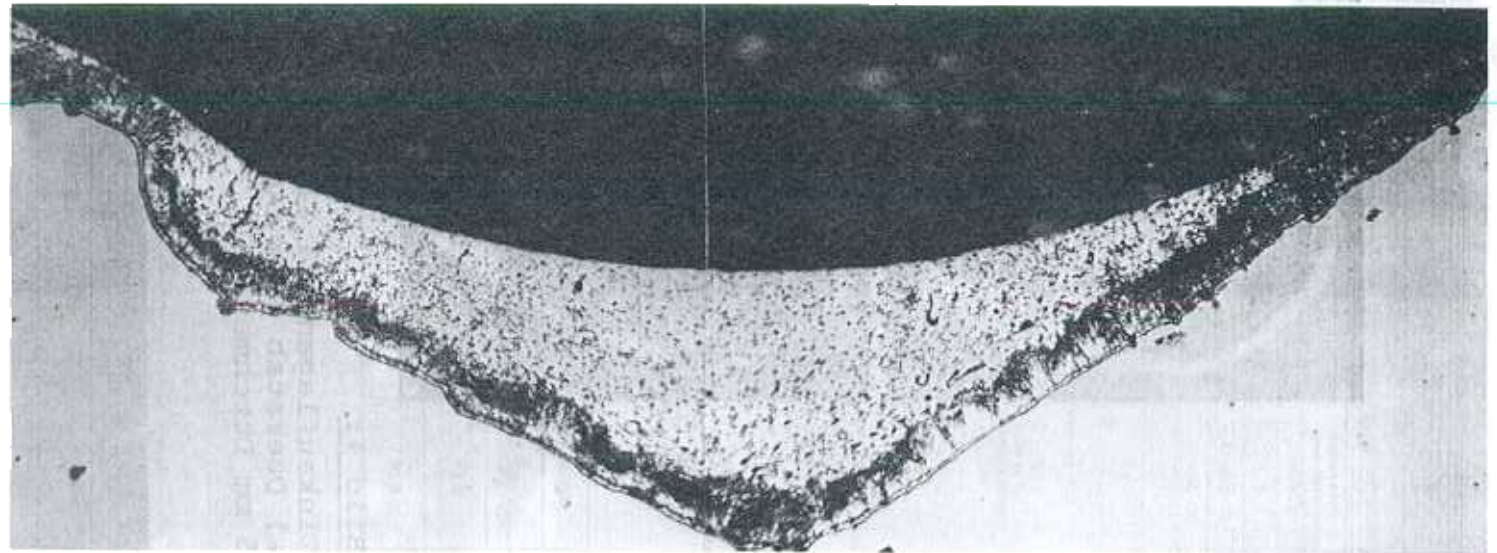


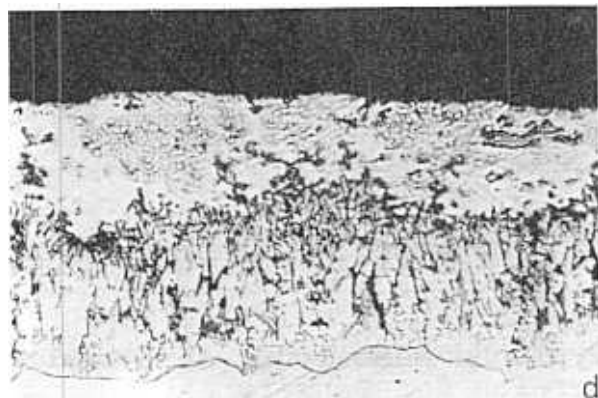
Bild 4:

Reinzinkverdickung im Längsrippenbereich von kaltumgeformten Betonrippenstählen, Querschliff in verdünnter alkoh. HCl geätzt (ausgesuchte Bereiche)

500:1

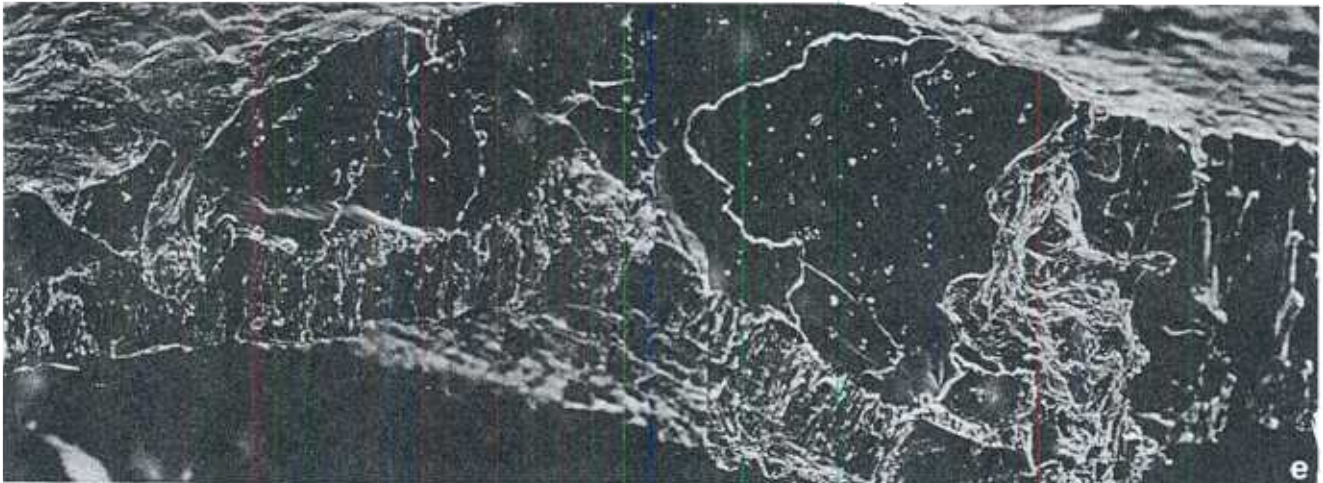


hohe Reinzinkauflage, verhältnismäßig niedrige
Hartzinkschicht



geringe Reinzinkauflage, verhältnismäßig niedrige
Hartzinkschicht

100:1



nohe Reinzinkauflage, stärker angewachsene Hartzinkschicht

Bild 5:

Zinkauflagen bei kaltumgeformten, gerippten Betonstählen (bezüglich der Auflagen - Gesamtschichtdicke, Hartzinkschicht ausgesuchte Bereiche)

50:1

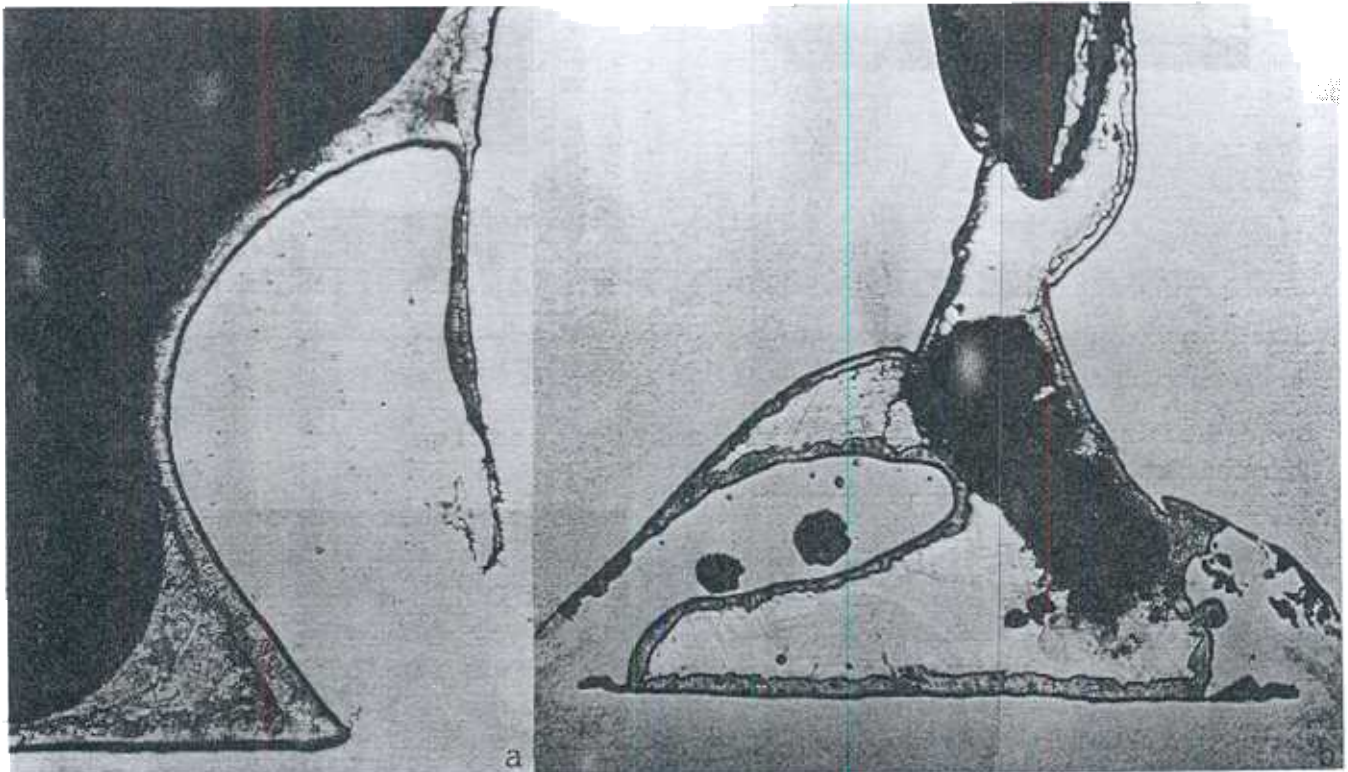


Bild 6:

Typische Ausbildung des Zinküberzuges bei Betonstahlmatten im Bereich der Schweißnaht

- a - Zinkauflage im Kerbgrund aufgequetschter Vorsprünge
- b - Zinkauflage im Zwischenbereich von Doppelstäben

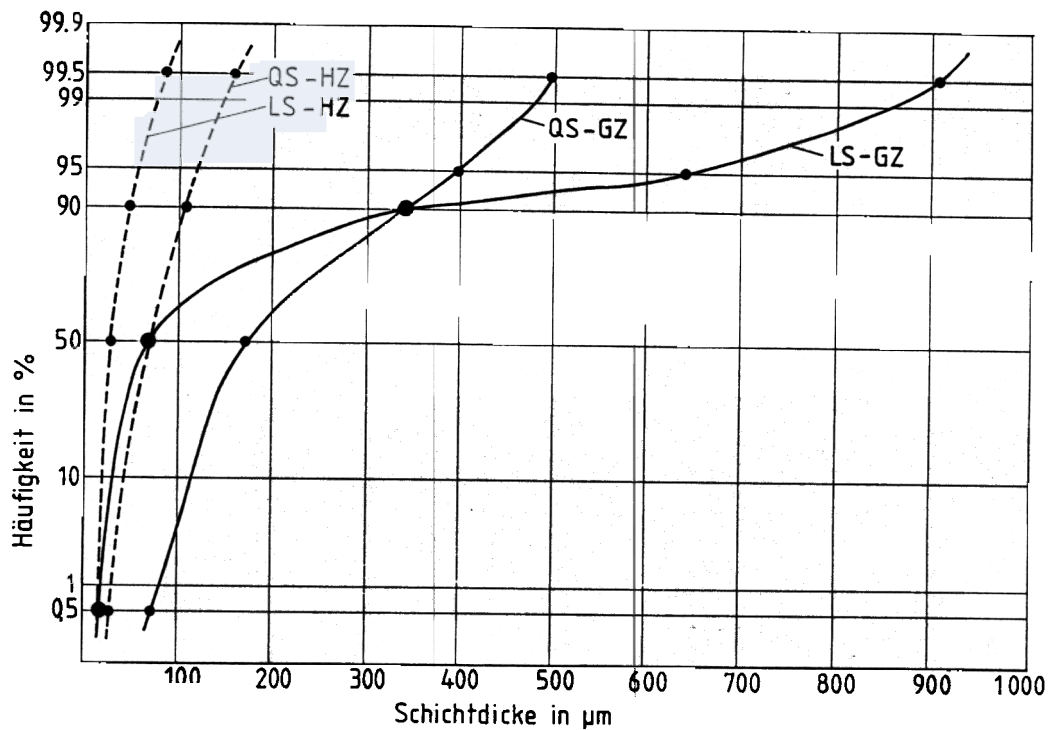


Bild 7:

Häufigkeitsverteilung für die Dicke der Hartzinkschicht (HZ) und der Gesamtzinkauflage (GZ) von feuerverzinkten Betonstahlmatten aus Längsstäben (LS) und Querstäben (QS) von 5 mm Durchmesser; Werkstoff 1 nach Tafel 1

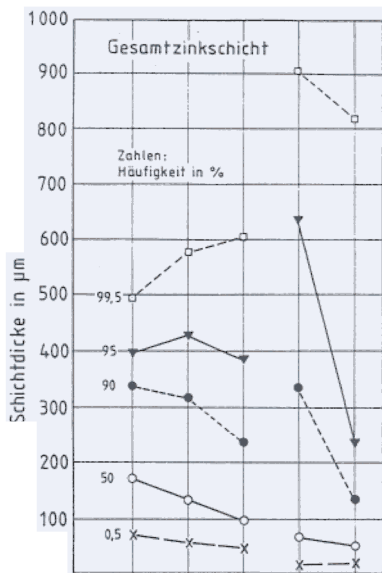
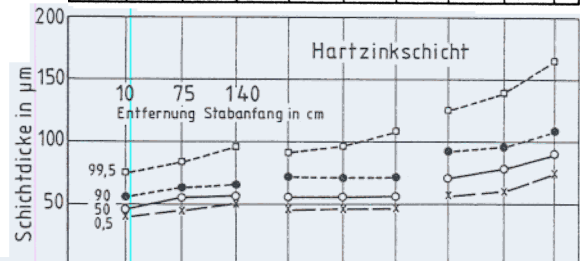
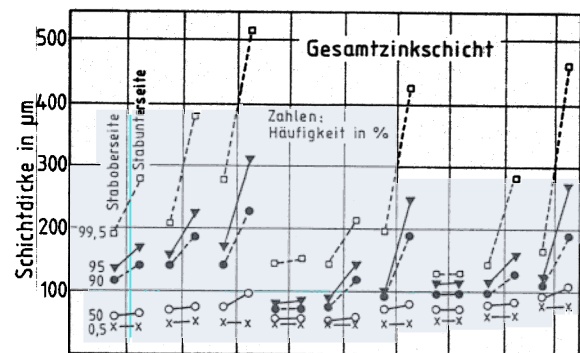
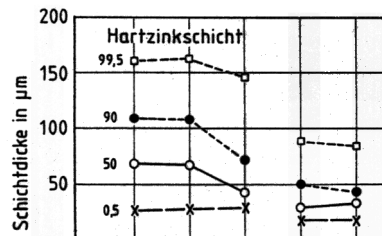


Bild 8:
Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (statistische Auswertung) bei Betonstahlmatten ohne Berücksichtigung der Schweißstellen; Verzinkungsbedingungen Tafel 1
QS = Querstab, LS = Längsstab



Güte		BSt 420/500 RK								
Werkstoff		4			5			6		
φ	mm	8			16			28		
X _{ar}	µm	84	108	114	69	78	96	87	100	120
FG	g/m ²	729			579			732		

Bild 9:

Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (statistische Auswertung) bei 1,5 m langen Betonrippenstählen, Verzinkungsbedingungen Tafel 1 (Versuchsreihe 1, hier: Ausziehgeschwindigkeit 10 m/min)

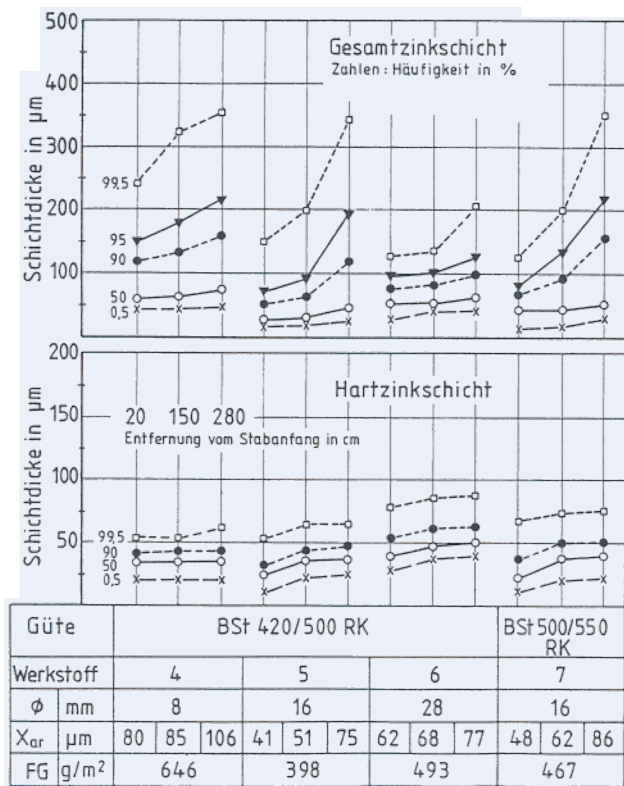


Bild 10:

Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (statistische Auswertung) bei 3 m langen Betonrippenstählen, welche parallel zur Tauchrichtung ausgezogen wurden; Verzinkungsbedingungen Tafel 1 (Versuchsreihe 2-1, hier: Ausziehggeschwindigkeit 10 m/min)

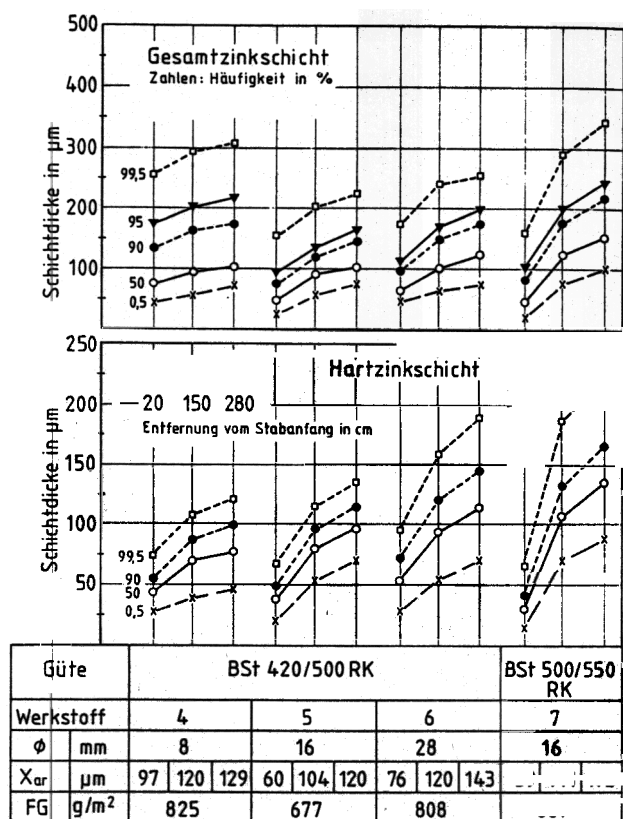


Bild 11:

Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (statistische Auswertung) bei 3 m langen Betonrippenstählen, welche parallel zur Tauchrichtung ausgezogen wurden; Verzinkungsbedingungen Tafel 1 (Versuchsreihe 2-1, hier: Ausziehggeschwindigkeit 1 m/min)

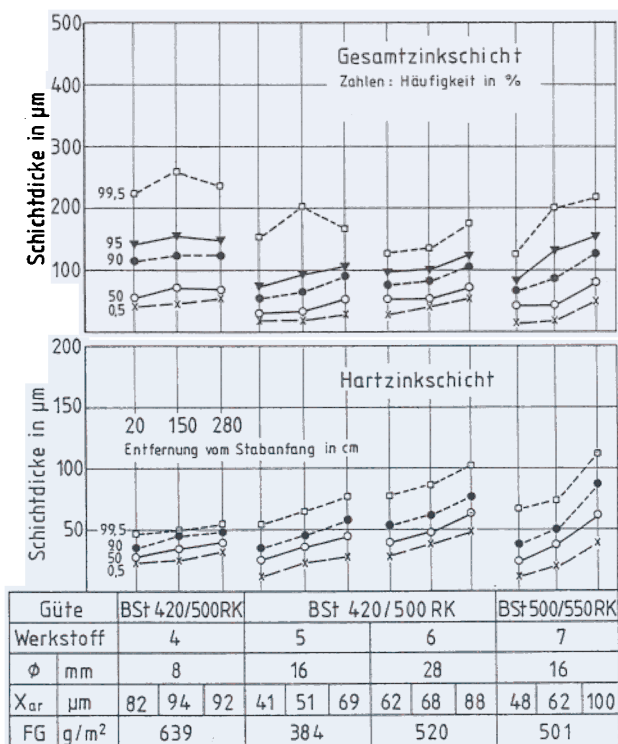


Bild 12:

Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflage (statistische Auswertung) bei 3 m langen Betonrippenstählen, welche parallel zur Tauchrichtung ausgezogen wurden; Verzinkungsbedingungen Tafel 1 (Versuchsreihe 2-2)

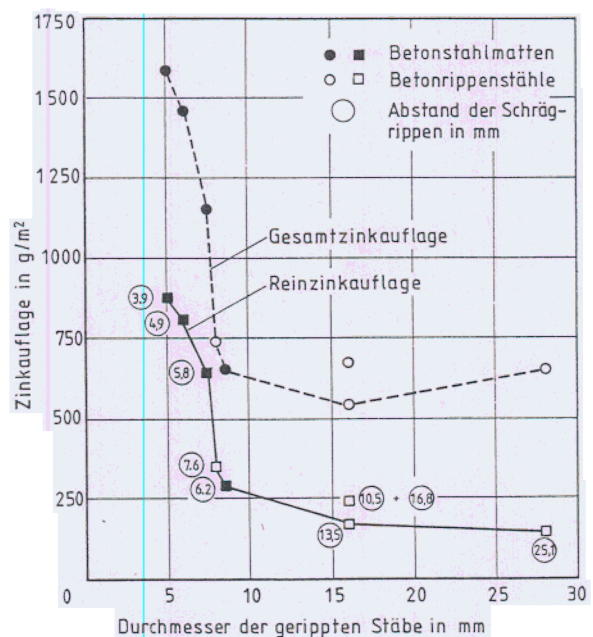
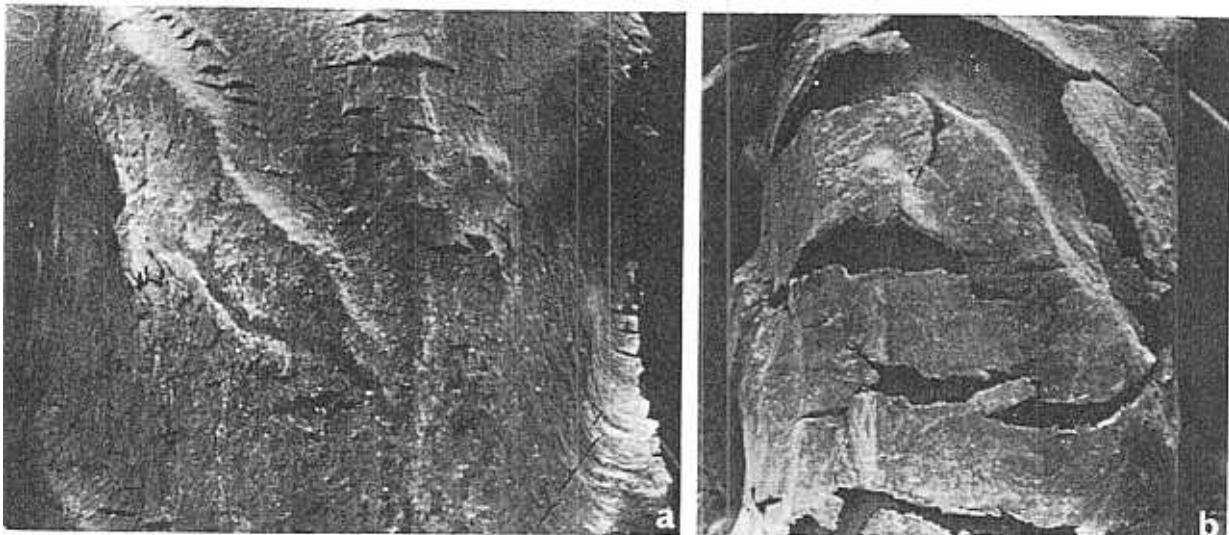


Bild 13:

Abhängigkeit der Gesamtzinkauflage und Reinzinkauflage vom Durchmesser gerippter Betonstähle (Betonstahlmatten, kaltumgeformte Betonrippenstähle) Tauchzeit ca. 1 min, Ausziehggeschwindigkeit 5 m/min, Ausziehrichtung parallel zur Stabachse, Durchmesser 8 bis 28 mm wurden 10 sec nach dem Ausziehen in Wasser von 30° C abgeschreckt



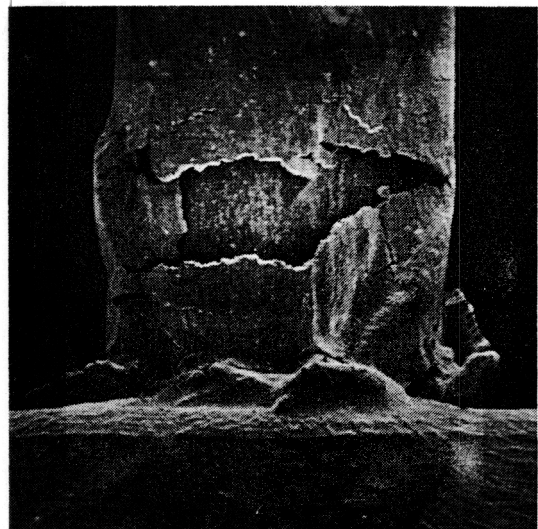
\bar{x} - GZ	= 56 μm	135 μm
\bar{x} - HZ	= 32 μm	67 μm
GZ > 100 μm	= 22 %	76 %
GZ > 200 μm	= 8 %	22 %

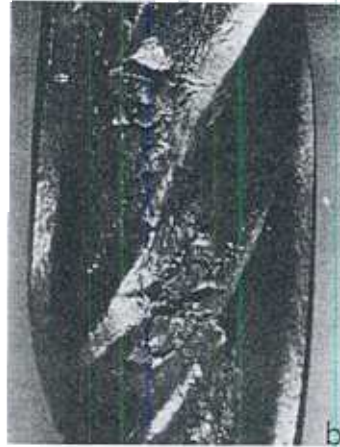
Bild 14:

Zinkauflage der Betonstahlmatten BSt 500/550 RK nach Biegeverformung ($\epsilon_{\text{max}} \approx 20$ %), a-Längsstab 8,5 mm \varnothing , b-Querstab 6 mm \varnothing (Werkstoffe 1 bis 3), GZ = Gesamtzinkschicht, HZ = Hartzinkschicht

Bild 15:

Zinkauflage der Betonstahlmatten BSt 500/550 RK im Schweißnahtbereich nach Biegeverformung (Werkstoff 2, Querstab, 6 mm \varnothing).





\bar{x} - GZ = 95 μm
 \bar{x} - HZ = 55 μm
 GZ > 100 μm = 45 %
 GZ > 200 μm = 13 %

81 μm
 55 μm
 38 %
 9 %

52 μm
 40 μm
 18 %
 6 %

Bild 16:

Zinkauflage der kaltumgeformten Betonrippenstähle nach Biegeverformung ($\epsilon_{\text{max}} \approx 20$ %); GZ = Gesamtzinkschicht, HZ = Hartzinkschicht

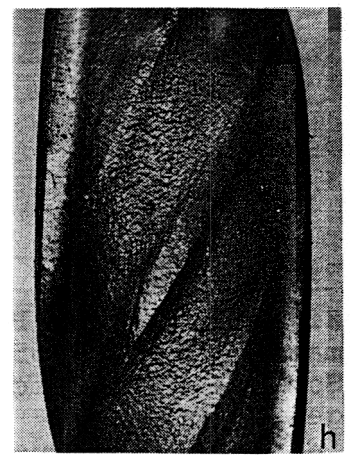


Bilder 16a bis 16e
typisch für Versuchs-
reihen 1 und 2-1
(Stabenden)

Bilder 16f bis 16h
typisch für Versuchs-
reihe 2-2 (Stabenden)

\bar{x} - GZ = 105 μm
 \bar{x} - HZ = 77 μm
 GZ > 100 μm = 55 %
 GZ > 200 μm = 6 %

101 μm
 95 μm
 50 %
 2 %



\bar{x} - GZ = 52 μm
 \bar{x} - HZ = 41 μm
 GZ > 100 μm = 18 %
 GZ > 200 μm = 0 %

57 μm
 40 μm
 12 %
 0 %

74 μm
 56 μm
 14 %
 0 %

60:1

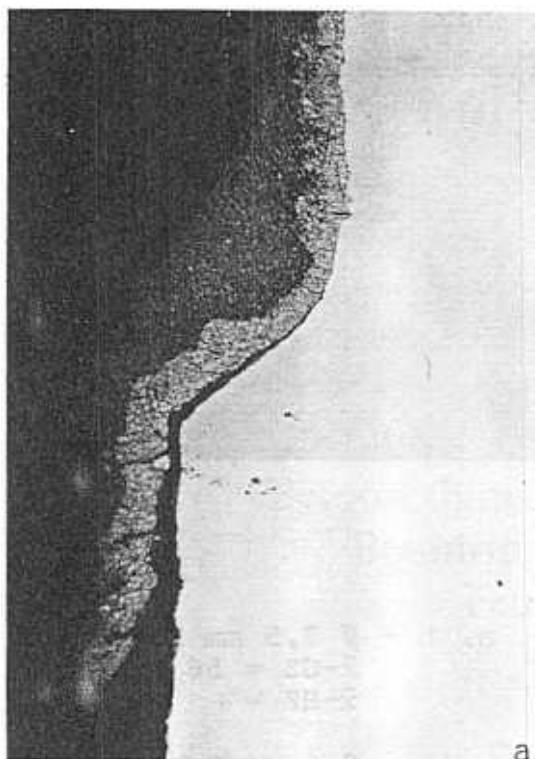
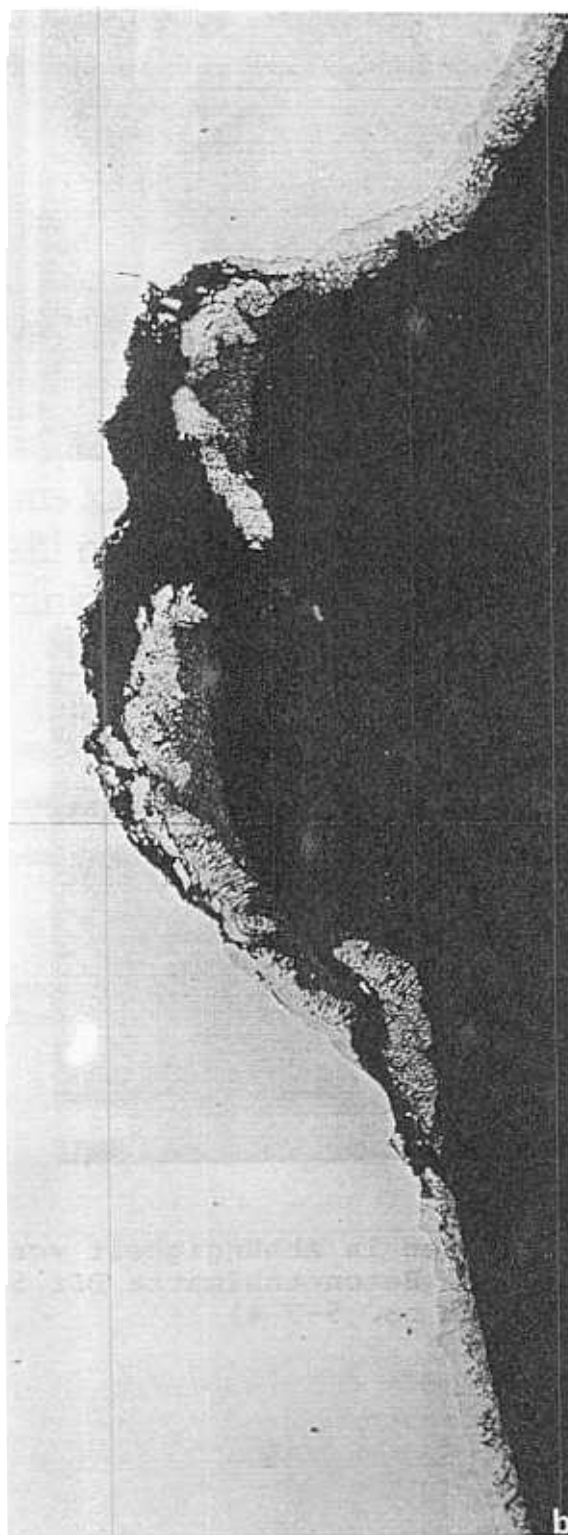


Bild 17:

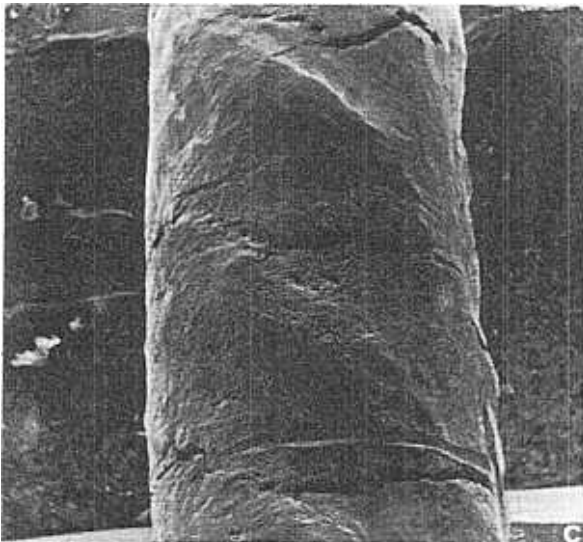
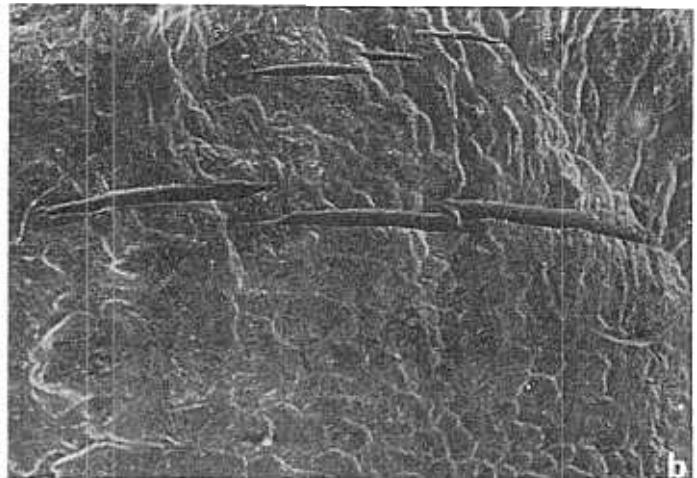
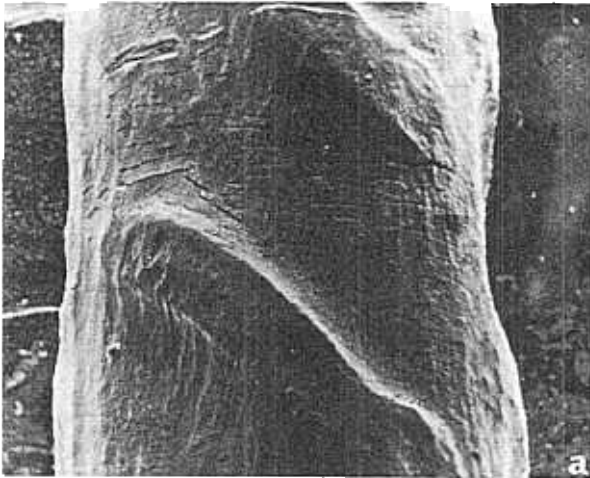
Zinkverhalten eines 8,5 mm
Mattenstabes (Werkstoff 2,
Tafel 1) nach Biegeverfor-
mung um 20 %; a-Krümmungs-
außenseite, b-Krümmungs-
innenseite

60:1



10:1

70:1



a, b - \varnothing 7,5 mm Längsstab
 \bar{x} -GZ = 56 μ m 101 μ m
 \bar{x} -HZ = 42 μ m

c - \varnothing 6 mm Querstab
 \bar{x} -GZ = 135 μ m
 \bar{x} -HZ = 67 μ m

Bild 18:

Rißverhalten in Abhängigkeit von der Zinkauflage
(Beispiel: Betonstahlmatte BSt 500/550 RK) (hier
Dehnung um ca. 5-7 %)