

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

Gleichzeitig Bericht Nr. 83
des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.



Inhalt

| | |
|---|-------|
| Zusammenfassung, Summary, Résumé | 33 |
| 1. Einführung | 33 |
| 2. Eigenschaften von und Anforderungen bei Betonrippenstählen | 33 |
| 2.1 Betonstahlmatten | 33 |
| 2.2 Kaltumgeformte Betonrippenstähle | 34 |
| 3. Versuchswerkstoffe | 35 |
| 4. Versuchsergebnisse | 36 |
| 4.1 Betonstahlmatten | 36 |
| 4.2 Betonrippenstähle | 37 |
| 5. Erörterung der Versuchsergebnisse | 39 |
| 6. Zusammenfassung | 41 |
| Literatur | 41 |
| Anhang: Bilder | 43–50 |

1. Einführung

Bei einer im Vergleich zu unverzinkten Betonstählen gleichberechtigten Anwendung feuerverzinkter Betonstähle muß vorausgesetzt werden, daß durch den Verzinkungsvorgang die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls nicht beeinträchtigt werden. Bei warmgewalzten Betonstählen kann davon ausgegangen werden, daß eine Feuerverzinkung das Festigkeits-Verformungsverhalten nur unwesentlich verändert /1 bis 4/. Das Schwingfestigkeitsverhalten dieser Stähle wird durch ein Feuerverzinken offenbar jedoch nachteilig beeinflusst /4, 5/, was allerdings im Widerspruch zu Ergebnissen an feuerverzinkten Baustählen steht /6 bis 8/.

An kaltumgeformten und nachträglich feuerverzinkten Betonstählen sind bisher keine diesbezüglichen Ergebnisse bekannt geworden. Hier sind jedoch als Folge der Wärmeeinwirkung im Zinkbad je nach Dauer dieser Anlaßbehandlung und Zinkbadtemperatur Änderungen der Festigkeits- und Verformungskennwerte zu erwarten. Von kaltumgeformten Baustählen her ist bekannt /6/, daß durch die Wirkung des Zinkbades eine Alterung vorweggenommen wird, die sich bei entsprechend langer Gebrauchsdauer auf natürlichem Weg ohnehin einstellen würde.

Für geschweißte Stähle scheint bedeutsam, daß durch die thermische Wirkung des Zinkbads nachteilige Zugeigenspannungen herabgesetzt werden /9, 10/, was sich vorteilhaft z.B. auf das Dauerschwingverhalten geschweißter und feuerverzinkter Stähle auswirken kann /6, 10/.

Eine problemlose Anwendung feuerverzinkter Betonstähle in Sonderfällen, wo sich der normalerweise durch die Betonumhüllung gegebene Schutz als unzureichend erweist, bedarf einer klaren Definition der tatsächlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften. Bestimmte, auf ein Feuerverzinken dieser Werkstoffe zurückzuführende Eigenschaftsänderungen müssen in Verbindung mit deren Herstellungsverfahren gesehen werden. Im folgenden sollen die Fertigungsverfahren, Eigenschaften und speziellen Anforderungen an Betonstahlmatten und kaltumgeformte Betonrippenstähle kurz herausgestellt werden.

2. Eigenschaften von und Anforderungen bei Betonrippenstählen

2.1 Betonstahlmatten

Die Eigenschaften von geschweißten Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl sind ausführlich beschrieben /11/. Bei der Herstellung wird Walzdraht, zumeist der Güte D 9-1 nach DIN 17140 - Walzdraht aus Massenstählen und unlegier-

ten Qualitätsstählen - bzw. der Mattensondergüte B 44, durch Ziehen, Kaltwalzen und Kaltrippen auf Abmessungen von 4,0 bis 12,0 mm gebracht. Die Querschnittsabnahme liegt in der Regel zwischen 21 und 48 %. Das nach dem Rippen zumeist aufgetrommelte Material wird gerichtet und mittels elektrischer Widerstandspunktschweißung in sogenannten Mehrpunktschweißmaschinen zu Matten verschweißt. Nach dem Schweißen werden die Matten etwa 1/2 Stunde bei Temperaturen von 370 bis 420° C angelassen. Hierdurch erhält der Werkstoff durch Anstieg der 0,01-Dehngrenze die vorgeschriebene bilineare Charakteristik. Das Anlassen bewirkt Alterungsvorgänge beim kaltverformten Werkstoff und durch Entspannungsglühen einen Abbau der durch die Kaltverformung und das Schweißen bewirkten Eigenspannungen. Für den ungeschweißten Grundwerkstoff bewirkt das Anlassen eine entscheidende Verbesserung des Verformungsverhaltens (Erhöhung der Bruch- und Gleichmaßdehnung) und nach bisherigen Erfahrungen auch eine Verbesserung des Biegeverhaltens an der Schweißstelle.

Die Anforderungen an die technologischen Eigenschaften geschweißter Betonstahlmatten aus BSt 500/550 RK sind durch die DIN 488 - Betonstahl - definiert. Hier werden entsprechend den heutigen Erkenntnissen folgende Ansprüche an Betonstahlmatten gestellt:

- Einhaltung einer Streckgrenze von mindestens 500 N/mm² und einer Zugfestigkeit von mindestens 550 N/mm².
- Nachweis einer ausreichenden Verformbarkeit im Zugversuch (Mindestwert der Bruchdehnung 8 %) und im Rückbiegeversuch; im letzteren Fall dürfen an der Biegestelle weder Anrisse noch ein Bruch auftreten.
- Bestehen eines Faltversuches an der Schweißstelle; bei der in der Zugzone liegenden Schweißstelle sollte die Biegefähigkeit des Stabes bis zu einem Biegewinkel von 60° gewährleistet sein.
- Nachweis der Scherfestigkeit an den Schweißstellen; von den Schweißstellen sollen Scherkräfte von 30 % der Streckgrenzenlast des Zugstabes aufgenommen werden.
- Nachweis einer Dauerschwingfestigkeit von i. M. 120 N/mm² an nicht einbetonierten, geraden Stäben mit mindestens einem aufgeschweißten Querstab. Dieser Nachweis ist nur im Fall einer Anwendung der Matten bei nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung zu erbringen.

Die Festigkeitswerte der geschweißten Betonstahlmatten lassen sich durch die Eigenschaften des Walzdrahtes und den Verformungsgrad gezielt ein-

stellen. Bei ordnungsgemäßem Anlassen kann nur eine unbedeutende Abminderung der Zugfestigkeit und Streckgrenze eintreten. Die im Zugversuch ermittelten Verformungskennwerte lassen sich - wie bereits geschildert - durch das Anlassen entscheidend verbessern/11, 12/. Bei etwa 5 % der Zugproben werden im Zugversuch Schweißstellenbrüche festgestellt, welche in der Regel zu einer Abminderung der Bruchdehnungswerte führen.

Bei Beanspruchung auf Biegen ist ein ausreichendes Verformungsverhalten der Stäbe außerhalb der Schweißung in der Regel gegeben. Beim Biegeversuch an der Schweißstelle treten gelegentlich Brüche auf (Sprödbrüche nach wenigen Grad Biegung oder duktile Brüche nach größeren Biegewinkeln). Die Bewertung solcher Brüche ist schwierig, da der Versuch selbst keine Beziehung zur Praxis hat: Hier darf nur außerhalb der Schweißstelle gebogen werden. Eine Sprödbbruchneigung der Schweißung im Kaltversuch nimmt mit dem Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorgehalt sowie dem Durchmesser zu /11/. Wie auch eigene Versuche gezeigt haben, verhalten sich nicht angelassene Betonstahlmatten stets ungünstiger als angelassene.

Die Scherfestigkeit der Schweißknoten nimmt in der Regel mit steigendem Durchmesser des Zugstabes ab /13/. Wenn man jedoch die Scherkraft nicht auf den Querschnitt des Zugstabes, sondern auf die Fläche der tragenden Schweißlinse bezieht, so ist die tatsächliche Scherfestigkeit unabhängig vom Stabdurchmesser.

Die bei den Betonstahlmatten erzielten Dauerschwingfestigkeitswerte sind im wesentlichen abhängig vom Durchmesser Verhältnis der verschweißten Stäbe und der Probenform (Einfach- bzw. Doppelquerstabprobe) /11, 14/: Das Dauerschwingverhalten wird durch ein großes Verhältnis Längsstab-/Querstabdurchmesser positiv beeinflusst; Proben aus Einfachstabmatten verhalten sich günstiger als solche aus Doppelstabmatten. Es scheint auch ein Einfluß der chemischen Zusammensetzung zu bestehen /14/: Für sehr niedriggekohlte Werkstoffe (C-Gehalt $\leq 0,07$ %) wurde im Mittel ein ungünstigeres Verhalten festgestellt als bei kohlenstoffreicheren.

2.2 Kaltumgeformte Betonrippenstähle

Die Eigenschaften kaltumgeformter Betonrippenstähle sind z.B. in /15, 16/ beschrieben. Diese Stähle erhalten ihre endgültigen Eigenschaften durch eine an das Warmwalzen anschließende Kaltverformung. Bei den tordierten Stäben werden die schräggerippten Stäbe durch Verdrehen um einen Verdrillgrad von 8 bis 12 d_s (d_s = Stabdurchmesser) kaltverformt. Die kaltverformten Betonrip-

penstähle der Güte BSt 420/500 RK werden aus unberuhigten oder beruhigten kohlenstoffärmeren Stählen hergestellt (das Ausgangsmaterial entspricht etwa dem Stahl St 37 nach DIN 17100 - Allgemeine Baustähle). Üblicherweise liegen die Kohlenstoff-, Silicium- und Mangangehalte dieser Stähle zwischen 0,05 und 0,22, 0,01 und 0,4 bzw. 0,2 und 0,8 %. Bei den größeren Abmessungen (>20 mm Durchmesser) sind im allgemeinen die höheren Werte für Kohlenstoff, Silicium und/oder Mangan anzutreffen: Bei den kaltumgeformten Stählen werden die höherwertigen Güten BSt 500/550 RK vorzugsweise mit etwas höheren Kohlenstoffgehalten als bei den Stählen BSt 420/500 RK und mit weiteren Zusätzen an Silicium (bis 0,5 %) und Mangan (bis 1,5 %) und z.T. auch an Chrom (bis 0,25 %) hergestellt.

Durch das Verdrillen der Stähle wird gegenüber dem nur warmgewalzten Zustand insbesondere eine Erhöhung der Streckgrenze und im geringeren Maße auch der Zugfestigkeit erzielt. Die Werte der Bruch- und Gleichmaßdehnung werden dabei abgemindert. Die tordierten Stähle weisen neben einer meist stetig gekrümmten Spannungs-Dehnungsline bedingt durch den Herstellungsprozess auch unterschiedliche Festigkeiten über den Querschnitt auf. Der Mantel der verdrillten Stäbe ist stark kaltverfestigt und hart, der Kern jedoch noch fast so weich wie im Walzzustand. Durch das Verdrillen erhalten die Staboberflächen Schubelängsspannungen /16, 17/, welche im Bereich des Kerbgrundes der Schräggerippen ein Maximum aufweisen.

Im Hinblick auf mögliche Eigenschaftsveränderungen beim Feuerverzinken spielt das Alterungsverhalten der kaltumgeformten Stähle eine wichtige Rolle. Dieses hängt bekanntlich von der chemischen Zusammensetzung, dem Kaltverformungsgrad und der Temperatur ab. Tordierte Stähle zeigen bereits bei Raumtemperatur eine natürliche Alterung, welche insbesondere die 0,01-Dehngrenze, dagegen weniger stark die 0,2-Dehngrenze und die Zugfestigkeit anhebt. Die Bruch- und Gleichmaßdehnung wird nur geringfügig abgemindert, die Brucheinschnürung kaum beeinflusst /18, 19/. Die natürliche Alterung hat nach etwa 2 Jahren einen stabilen Zustand erreicht; der Stahl hat dann insgesamt eine ausgeprägtere Streckgrenze und eine verbesserte bi-lineare Charakteristik.

Eine künstliche Alterung wird bei kaltumgeformten Betonrippenstählen vorzugsweise bei 250° C durchgeführt /18 bis 20/. Hier stellen sich nach 1/4 bis 1 Stunde ähnliche Festigkeits-Verformungsverhältnisse ein wie bei Raumtemperatur nach etwa 2 Jahren /19/. Bei höheren Anlaßtemperaturen kann zuerst wegen Überalterung und später infolge Rekristallisation des kaltverformten Gefüges eine Entfestigung des Werkstoffes (im Vergleich zum

nur kaltverformten Ausgangswerkstoff) eintreten. Aufgrund von Anlaßversuchen bei höheren Temperaturen /19/ ist hiermit bei 450° C erst ab etwa 1/2 Stunde, bei 500° C jedoch bereits nach wenigen Minuten zu rechnen. Das Verhalten bei höheren Anlaßtemperaturen gilt gleichermaßen auch für Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl.

Die Anforderungen an die technologischen Eigenschaften von kaltumgeformten Betonrippenstählen sind für die Güte BSt 420/500 RK durch die DIN 488 - Betonstahl definiert; die Anforderungen für die Güte BSt 500/550 RK sind den Zulassungen zu entnehmen:

- Einhaltung einer Streckgrenze von mindestens 420 N/mm² und einer Zugfestigkeit von 500 N/mm² für die Güte BSt 420/500 RK bzw. entsprechend 500 bzw. 550 N/mm² für die Güte BSt 500/550 RK.
- Nachweis einer ausreichenden Verformbarkeit im Zugversuch (Mindestwert der Bruchdehnung 10 %) sowie im Rückbiege- und Faltversuch (nur bei Betonrippenstahl BSt 500/550 RK). Bei den Biegeversuchen dürfen an der Biegestelle weder Anrisse noch ein Bruch auftreten.

Nachweis einer Dauerschwingfestigkeit von i.M. 200 N/mm² an Stäben, welche um eine Rolle vom 15fachen Stabdurchmesser gebogen und im einbetonierten Zustand geprüft wurden.

Die geforderten Festigkeits- und Verformungskennwerte von kaltumgeformten Betonrippenstählen lassen sich durch die Eigenschaften des Walzdrahtes und den Verwindegrad einstellen. Auch zur Erzielung einer ausreichenden Sprödbbruchsicherheit beim Biegen sind Vorkehrungen getroffen. Bei Betonrippenstählen nimmt die Sprödbbruchgefahr /21, 22/ i.a. mit steigender Festigkeit, zunehmendem Durchmesser und abnehmendem Biegerolldurchmesser zu. Auch die Oberflächengestaltung der Stäbe ist von Einfluß; z.B. quergewalzte Stähle verhalten sich grundsätzlich anfälliger als schräggewalzte. In der Praxis wird diesen Zusammenhängen durch die Festlegung von unteren Biegedorndurchmessern für die einzelnen Betonstahlgüten und -abmessungen Rechnung getragen. Die hier untersuchten kaltumgeformten Betonrippenstähle BSt 420/500 RK und BSt 500/550 RK dürfen im Fall von Durchmessern < 20 mm um Biegerollen von 4 d_s (d_s = Stabdurchmesser) und bei Durchmessern > 20 mm nur um 7 d_s gebogen werden. Bei den Betonstahlprüfungen sind die Anforderungen allerdings schärfer. Im Faltversuch für die Güten BSt 500/550 RK werden die 8, 16 und 28 mm Stäbe um Biegedorndurchmesser von 2,5, 3 bzw. 4 d_s gebogen. Die Sprödbbruchsicherheit der Rippenstähle im gealterten Zustand läßt sich durch den Rückbiegeversuch nachweisen, wo die Stäbe um den zweifa-

chen der vorgenannten Biegedorndurchmesser gebogen und nach Alterung rückgebogen werden. Kaltumgeformte Betonrippenstähle bestehen in der Regel problemlos die gegenüber der Praxis verschärften Anforderungen.

Die bei Betonrippenstählen im einbetonierten Zustand erzielten Dauerschwingfestigkeiten sind primär von der Kerbwirkung (Spannungskonzentrationsfaktor) der Schrägrippen abhängig. Bei gebogenen, einbetonierten Stäben tritt gegenüber geraden Stäben eine Abminderung der Dauerschwingfestigkeit ein, die um so stärker ausfällt, je geringer der Biegedurchmesser im Verhältnis zum Stabdurchmesser ist. Im gekrümmten Zustand erfährt der Stab im Krümmungsbereich Zusatzspannungen und eine Veränderung der Materialeigenschaften: Beim Biegen von gerippten Stählen kommt es an den Übergängen Stabkern/Rippen zu örtlich hohen Kaltverformungen. Dabei wird nicht nur die Kerbwirkung der Rippen erhöht, sondern auch die Verformungsfähigkeit des Stahls örtlich erniedrigt; dies insbesondere nach zusätzlicher Alterung. Das Biegen führt weiterhin zu Zugeigenspannungen auf den innen liegenden Stahlfasern im Krümmungsbereich. Jedoch ist davon auszugehen, daß sich die Eigenspannungen durch sich wiederholende Be- und Entlastungen allmählich abbauen.

3. Versuchswerkstoffe

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an unverzinkten und verzinkten Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl und kaltumgeformten Betonrippenstählen durchgeführt. Die Werkstoffe sowie die Behandlung der untersuchten Betonstähle sind in Tafel 1 wiedergegeben. Zusätzliche Informationen über die chemische Analyse der Werkstoffe, die Verzinkungsbedingungen (Tauchverzinkung) und die Dicke und Gleichmäßigkeit der Zinkauflagen sind in einer vorausgegangenen Veröffentlichung /24/ wiedergegeben.

In Tafel 1 zeigen bei den Betonstahlmatten (Werkstoffe 1 bis 3) 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.

Die Betonrippenstähle wurden im unverzinkten Zustand etwa 2 Monate nach der Fertigstellung ge-

prüft, so daß hier bereits eine gewissen Alterung der Stähle eingetreten ist. Bei den Betonstahlmatten wird zusätzlich zwischen nicht angelassenen und angelassenen Matten unterschieden, welche beide sowohl unverzinkt als auch verzinkt untersucht wurden.

Für die mechanisch-technologischen Eigenschaften feuerverzinkter Betonstähle sind die sich aus der Tauch- und Ausziehggeschwindigkeit sowie der Tauchdauer ergebenden Verweilzeiten τ_{Ges} im Zinkbad von Bedeutung. Diese Verweilzeiten betrugen bei den Betonstahlmatten etwa 1 bis 1,5 min und bei den Betonrippenstählen durchmesserbezogen 0,5, 0,75, 1,25 sowie 3 und 6 Minuten.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Betonstahlmatten

Die Ergebnisse der Zugversuche an feuerverzinkten Betonstahlmatten sowie am unverzinkten Ausgangsmaterial sind in Bild 1 wiedergegeben. Es wird unterschieden zwischen den Behandlungszuständen schwarz - nicht angelassen, schwarz - angelassen, nicht angelassen - verzinkt und angelassen - verzinkt. Ebenso wie durch das Anlassen in Luft (in der Regel in großen Öfen etwa 1/2 Stunde bei 370 bis 420° C) stellen sich auch beim Feuerverzinken (Verweildauer im Zinkbad von 465° C etwa 1 bis 1,5 Minuten) charakteristische Änderungen der wesentlichen Kennwerte ein. Bei den verzinkten Materialien wurde bei der Definition der Festigkeit unterschieden zwischen Spannungen $R = P_{\text{Fe+Zn}}/F_{\text{Fe}}$ und $R = P_{\text{Fe+Zn}}/F_{\text{Fe+Zn}}$. Läßt man bei der Bestimmung der Festigkeit den Anteil der Zinkauflage am Querschnitt zunächst unberücksichtigt, dann betragen die Änderungen der mechanischen Kennwerte für Betonstahlmatten BSt 500/550 RK:

Vergleich schwarz - nicht angelassen und schwarz - angelassen

| | |
|-------------|-------------------------------------|
| $R_{p0,01}$ | : + 5,3 bis + 20,2 % (i.M. +15,4 %) |
| $R_{p0,2}$ | : 0 bis + 4,2 % (i.M. + 2,3 %) |
| R_m | : - 3,0 bis + 1,6 % (i.M. - 0,3 %) |
| A_g | : +30 bis +104 % (i.M. +69 %) |
| A_{10} | : + 9 bis + 42 % (i.M. +25 %) |
| Z | : -20 bis + 30 % (i.M. + 4 %) |

Vergleich schwarz - nicht angelassen und nicht angelassen - verzinkt

(Die mechanischen Kennwerte der Stäbe nicht angelassen - verzinkt und angelassen - verzinkt sind praktisch identisch, weshalb auf eine gesonderte Auswertung der letzteren an dieser Stelle verzichtet wird).

| | |
|-------------|-----------------------------------|
| $R_{p0,01}$ | : 3,2 bis + 20,0 % (i.M. +16,3 %) |
| $R_{p0,2}$ | : 1,4 bis + 4,0 % (i.M. + 1,6 %) |
| R_m | : 3,5 bis + 3,4 % /i.M. - 0,4 %) |
| A_g | : 1 bis +281 % (i.M. +154 %) |
| A_{10} | : 5 bis + 55 % (i.M. + 44 %) |
| Z | : 3 bis + 38 % (i.M. + 4 %) |

Demnach werden bei den Betonstahlmatten durch die Anlaßbehandlung im Zinkbad die Werte der 0,01-Dehngrenze i.M. um 16 und jene der 0,2-Dehngrenze i.M. um 2 % erhöht. Die Zugfestigkeit bleibt nahezu unbeeinflusst. Die Gleichmaßdehnung wird i.M. um 154 und die Bruchdehnung um 44 % verbessert. Die Beeinflussung der Brucheinschnürung ist - wie bei den in Luft angelassenen Matten - nicht einheitlich, bleibt jedoch i.M. durch die Feuerverzinkung unbeeinflusst.

Bei den feuerverzinkten Betonstahlmatten entsprechen die Werte für die 0,01-Dehngrenze, 0,2-Dehngrenze und Brucheinschnürung i.M. in etwa jenen einer in Luft angelassenen Betonstahlmatte. Die verzinkten Werkstoffe haben jedoch wesentlich höhere Bruch- und vor allem Gleichmaßdehnungen als in Luft angelassene, unverzinkte Matten. Die Verbesserungen der Gleichmaß- und Bruchdehnung bei feuerverzinkten Stäben gegenüber in Luft angelassenen nehmen im Mittel mit steigendem Durchmesser zu. Die Erhöhung der Gleichmaßdehnung ist besonders bei den 7,5 mm Stäben (Werkstoff 3) sehr ausgeprägt; dieser Werkstoff besitzt einen ungewöhnlich hohen Phosphorgehalt von 0,076 %.

Wird bei der Bestimmung der Festigkeit, wie allgemein üblich, die Kraft auf den Gesamtquerschnitt einschließlich des Zinkquerschnitts /24/ bezogen, dann liegen die derart definierten Festigkeitswerte naturgemäß umso niedriger, je dicker die Zinkauflage ist. Wie aus Bild 1 deutlich wird, ist diese "Festigkeitsseinbuße" in einigen Fällen beträchtlich. Bei Werkstoff 1 Querstab (Bild 1), wo der Anteil des Zinks am Querschnitt immerhin 17 % ausmacht, werden deshalb die bei einem BSt 500/550 RK geforderten Zugfestigkeiten und 0,2-Dehngrenzen nicht mehr erreicht.

Bei 6 % der durchgeführten Zugversuche traten die Brüche unmittelbar neben der Widerstandspunktschweißung, bei 94 % deutlich außerhalb der Schweißstelle auf. Die Schweißstellenbrüche blieben bei der Auswertung unberücksichtigt; sie wurden bei 3 Werkstoffen sowohl bei unverzinkten als auch verzinkten Stäben festgestellt. Bei diesen Brüchen lagen die Zugfestigkeiten, Gleichmaßdehnungen, Bruchdehnungen und Brucheinschnürung i.M. um 1, 7, 28 und 40 % niedriger als bei den außerhalb der Schweißstelle gebrochenen Stäben.

Die Scherfestigkeit der Schweißknoten der Betonstahlmatten wurde an durch Zugversuche vorbereit-

steten Zugproben ermittelt, bei denen die Schweißstelle außerhalb des Einschnürbereiches des Stabbruchs liegt. Bei den Scherproben wurde zwecks Prüfung der Scherfestigkeit der Schweißung sowohl am dickeren Längsstab als auch am dünneren Querstab gezogen. Bei den Scherproben mit Doppelstäben wurde ein einzelner Stab des Doppelstabes gezogen. Die Prüfung erfolgte gemäß den Vorschriften der DIN 488, Blatt 5 - Betonstahl; Betonstahlmatten, Prüfungen.

In Bild 1 sind für alle untersuchten Behandlungszustände die auf die Streckgrenzenlasten der Zugstäbe bezogenen Scherkräfte angegeben.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß das Scherverhalten geschweißter Betonstahlmatten durch eine Feuerverzinkung nicht beeinflusst wird. Die vier pro Abmessung gewählten Behandlungszustände weisen vergleichbare Scherfestigkeiten auf. Unabhängig von einer Verzinkung nehmen die Scherfestigkeiten jedoch mit zunehmenden Durchmesser des Zugstabes erwartungsgemäß ab (Tafel

Die Faltversuche an den Betonstahlmatten wurden entsprechend den Vorschriften derart ausgeführt, daß der angeschweißte Stab auf der Krümmungsaußenseite zu liegen kommt und um einen Dorn von $4 d_s$ (d_s = Stabdurchmesser) gebogen wird. Gebogen wurde bis zu einem Biegewinkel von 180° , also über den in den Vorschriften geforderten Winkel von 60° hinaus. Die Faltversuche wurden sowohl an den dünneren Querstäben als auch an den dickeren Längsstäben durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 2 zusammengefaßt. Im Bild ist der prozentuale Anteil der Proben mit Biegewinkeln $<180^\circ$ und der mittlere Biegewinkel dieser am Schweißknoten gebrochenen Proben aufgezeichnet. Der Anteil der Brüche nimmt in der Reihenfolge nicht angelassen - schwarz, angelassen - schwarz, nicht angelassen - verzinkt und angelassen - verzinkt ab und die Biegewinkel der gebrochenen Proben in der gleichen Reihenfolge zu. Gegenüber dem nicht angelassenen - schwarzen Werkstoff bringt eine Feuerverzinkung somit eine stärkere Verbesserung als das normale Anlassen in Luft. Die besten Ergebnisse zeigten jedoch jene Schweißknoten, die sowohl in Luft angelassen als auch feuerverzinkt wurden. Das Anlassen in Luft und auch die Wärmebehandlung im Zinkbad erwies sich insbesondere für die Schweißknoten der 7,5 mm Stäbe als vorteilhaft, wo im nicht angelassenen Zustand (vermutlich wegen des hohen Phosphorgehaltes von 0,076 %) 70 % der Proben bei Biegewinkeln um 60° brachen. Im Hinblick auf die geltenden Vorschriften (keine Brüche bis zu einem Biegewinkel von 60°) sind alle feuerverzinkten Schweißknoten bedingungsgemäß.

Die Dauerschwingversuche wurden an schwarzen - angelassenen und nicht angelassenen - verzinkten Betonstahlmattenabschnitten bei Oberspannungen von 70 % der 0,2-Dehngrenze und einer Frequenz von ca. 125 Hz durchgeführt. Die Grenzlastspielzahl betrug 5,0 Mill. Die Prüfung erstreckte sich in erster Linie auf den unteren Zeitfestigkeits- und den Dauerfestigkeitsbereich.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 3 dargestellt. Es wird deutlich, daß ein Feuerverzinken die dynamische Belastbarkeit der Schweißknoten in jedem Fall verbessert. Bezogen auf Grenzlastspielzahlen von $5 \cdot 10^6$ beträgt die Erhöhung der Dauerschwingfestigkeit im Mittel etwa 35 %. Am auffallendsten ist die Verbesserung bei den 6,0 und 7,5 mm Stäben (Bilder 3.2 und 3.3), die im in Luft angelassenen Zustand nur mäßige Dauerfestigkeitswerte aufweisen. Dies ist aufgrund anderer Untersuchungen /11, 14/ darauf zurückzuführen, daß kleine Durchmesserhältnisse (Durchmesser des Prüfstabes/Durchmesser des angeschweißten Stabes <1) und die Anordnung von Doppelstäben) dauerfestigkeitsmindernd wirken.

4.2 Betonrippenstähle

Die Ergebnisse der Zugversuche an feuerverzinkten Betonrippenstählen sowie am unverzinkten Ausgangsmaterial sind in Bild 4 wiedergegeben. Die Verweilzeit der 8, 16 und 28 mm-Stäbe im Zinkbad betrug jeweils 0,75, 1,0 und 1,25 Minuten (bis das sog. "Abkochen" vollständig beendet war) und für alle Abmessungen 3,0 und 6,0 Minuten.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen, wenn man den Anteil der Zinkauflage am Querschnitt unberücksichtigt läßt ($R = P_{Fe+Zn}/F_{Fe}$): Für die Verweildauern im Zinkbad von etwa 1 Minute betragen die Änderungen der mechanischen Kennwerte für BSt 420/500 RK (8 bis 28 mm Durchmesser) im Vergleich zum unverzinkten Ausgangsmaterial

| | |
|------------|---------------------------------------|
| $R_{p0,0}$ | : + 40,0 bis + 55,0 % (i.M. + 46,5 %) |
| $R_{p0,2}$ | : + 6,8 bis + 14,9 % (i.M. + 10,2 %) |
| R_m | : + 10,0 bis + 13,8 % (i.M. + 11,6 %) |
| A_g | : + 27,5 bis + 87,2 % (i.M. + 52,0 %) |
| A_{10} | : - 0,8 bis + 23,5 % (i.M. + 11,6 %) |
| Z | : - 32,1 bis + 16,0 % (i.M. - 3,1 %) |

Demnach werden bei den kaltumgeformten Betonrippenstählen der Güte BSt 420/500 RK durch die Anlaßbehandlung im Zinkbad die Werte der 0,01-Dehngrenze im Mittel um 47 % und jene der 0,2-Dehngrenze und Zugfestigkeit im Mittel um 10 bzw. 12 % erhöht. Die Gleichmaßdehnung wird im Mittel um 52 % (bei den dünneren Abmessungen sogar um 87 %) verbessert. Die Bruchdehnungen werden i.M. um 12 % erhöht; dabei sind jene der dünneren Abmessun-

gen (8 und 16 mm Ø) nach dem Verzinken etwa 10 bis 20 % höher, während sich die Werte der Bruchdehnung für die 28 mm-Stäbe bei einer Verweildauer im Zinkbad von ca. 1 Minute praktisch nicht ändern. Auch das Verhalten der Brucheinschnürung ist nicht einheitlich. Bei dünneren Abmessungen wird diese durch das Feuerverzinken um etwa 5 - 15 % verbessert, bei den dickeren Stäben dagegen um etwa 30 % vermindert, wobei hier jedoch die Brucheinschnürung mit insgesamt etwa 40 % nach dem Verzinken noch ausreichend hoch liegt.

Für die Verweildauern im Zinkbad von etwa 1 Minute betragen die Änderungen der mechanischen Kennwerte für BSt 500/550 RK (16 mm Durchmesser) im Vergleich zum unverzinkten Ausgangsmaterial

$R_{p0,01}$: + 59,0 %
 $R_{p0,2}$: + 13,7 %
 R_m : + 13,7 %
 A_g : + 11,9 %
 A_{10} : + 0,7 %
 z : - 13,3 %

Im Vergleich zu einem BSt 420/500 RK derselben Abmessung sind die Zunahmen der Dehngrenzen und der Zugfestigkeit infolge des Feuerverzinkens etwa gleich. Die Zunahme der Gleichmaßdehnung bzw. Bruchdehnung ist mit 12 gegenüber 28 % bzw. 1 gegenüber 24 % geringer als beim BSt 420/500 RK. Die Abnahme der Brucheinschnürung von 13 % entspricht jener, die auch beim BSt 420/500 RK festgestellt wurde.

Nach längeren Verweildauern im Zinkbad (3 und 6 Minuten, Bild 4) liegen die 0,01-Dehngrenze der kaltumgeformten Betonrippenstähle etwa 30 - 40 %, die 0,2-Dehngrenze und Zugfestigkeit dagegen im Mittel nur noch geringfügig höher als beim unverzinkten Ausgangsmaterial. Im Vergleich zu Verweildauern von 1 Minute nehmen die Dehngrenzen und Festigkeiten nach 3 bis 6 Minuten somit wiederum etwas ab; die Verformungskennwerte nehmen erwartungsgemäß mit der Verzinkungsdauer eher noch zu.

Wird bei der Bestimmung der Festigkeit, wie allgemein üblich, die Kraft auf den Gesamtquerschnitt einschließlich des Zinkquerschnitts bezogen, dann liegen die derart definierten Festigkeitswerte naturgemäß um so niedriger, je dicker die Zinkauflage ist. Da die Festigkeitserhöhungen des Grundmaterials i.a. sehr hoch sind, braucht bei den üblichen Zinkauflagen /24/ jedoch eine merkliche "Festigkeitsseinbuße" gegenüber dem Ausgangszustand nicht befürchtet werden.

Insgesamt gesehen bringt die Feuerverzinkung für die kaltumgeformten Betonrippenstähle bezüglich

der mechanisch-technologischen Kennwerte eine wesentliche Verbesserung. Der Anlaßvorgang führt bei den anzustrebenden kurzen Tauchzeiten beim Verzinken /24/ zu erhöhten Dehngrenzen und Zugfestigkeiten; die stetig gekrümmte Spannungs-Dehnungslinie erhält dabei eine bi-lineare Charakteristik. Die Verformungsgrößen (Gleichmaßdehnung und Bruchdehnung) werden insbesondere bei der Güte BSt 420/500 RK erhöht.

In Anlehnung an die geltenden Vorschriften für Betonstähle (DIN 488, Blatt 3 - Betonstahl; Betonstabstahl, Prüfungen) wurden feuerverzinkte Betonrippenstähle nach Tauchdauern von 1, 3 und 6 Minuten einem Faltversuch (dieser ist an sich nur für die Güte BSt 500/550 RK vorgesehen) und nach Tauchdauern von 1 Minute einem modifizierten Rückbiegeversuch unterworfen.

Im Faltversuch wurden von den Stababmessungen 8, 16 und 28 mm je 5 Proben um einen Biegedorn-durchmesser von $2,5 d_s$ bei den 8 mm Stäben, $3 d_s$ bei den 16 mm Stäben und $4 d_s$ bei den 28 mm Stäben gebogen. Unter diesen Bedingungen zeigten sich nach einem Biegewinkel von 180° keine Anrisse bzw. Brüche im Stahl, jedoch Ribbildung in der Zinkauflage /24/.

Beim Rückbiegeversuch wurden zunächst unverzinkte Stäbe 8, 16 und 28 mm um einen Dorn von $5 d_s$, $6 d_s$ und $8 d_s$ mit einem Biegewinkel von etwa 90° gebogen. Daraufhin wurden die Stäbe 1 Minute bei 460° C feuerverzinkt und danach in Wasser abgeschreckt. Danach wurden die Stäbe um mindestens 20° zurückgebogen. Es zeigten sich weder Anrisse noch Brüche im Stahl. In einer weiteren Versuchsreihe wurde eine gleiche Zahl von Stäben, die nur 1 Minute feuerverzinkt wurden, entsprechend wie vorgenannt gebogen, dann 1 Stunde bei 100° C künstlich gealtert und nach Abkühlung auf Raumtemperatur um mindestens 20° zurückgebogen. Auch hier konnten die Proben ohne Anriß oder Bruch zurückgebogen werden.

Es kann somit davon ausgegangen werden, daß kaltumgeformte Betonrippenstähle auch nach zusätzlicher starker Biegeverformung beim bzw. nach einer Feuerverzinkung nicht zu Versprödung neigen.

Zur Beurteilung von Stahlbetonbauteilen unter Dauerschwingbeanspruchung sind nicht nur Kenntnisse über das Verhalten der beiden Werkstoffe Stahl und Beton, sondern auch über den Verbundwerkstoff Stahlbeton erforderlich. Das Verhalten der Betonstähle bei schwingender Beanspruchung interessiert somit in erster Linie im einbetonierten Zustand. Die Sicherheit von Bauwerken erfordert es, einen Werkstoff einzusetzen, der hierbei unter den ungünstigsten, in der Praxis vorkommenden Bedingungen geprüft ist und dabei bestimmte Güteeigenschaften besitzt. Betonstäh-

le können nur dann als einachsig beansprucht gelten, solange sie z.B. als gerade Stähle im reinen Biegebereich eines Stahlbetonbalkens verlegt sind, oder beispielsweise als Stoßverbindung - die nicht im gekrümmten Zustand eingebaut werden darf - verwendet werden. Ungünstiger werden die Verhältnisse bei gebogenen Stählen (Bügel, Aufbiegungen), oder im Querkraftbereich von Balken. In diesen Fällen ist u.a. zu berücksichtigen, daß die Bewehrungsstäbe nicht nur Spannungen in Richtung der Stabachse erhalten sondern auch senkrecht dazu. Gegenüber reinen Stahlteilen spielt bei Stahlbetonteilen eine Rolle, daß der Beton nur in geringem Maße Zugspannungen übernehmen kann und somit bereits bei verhältnismäßig geringen Zugbelastungen Risse im Beton auftreten können. Da der Beton im Rißbereich keine Zugspannungen mehr übertragen kann, hat in diesem Bereich der Stahl die volle Spannung zu übernehmen.

Unter Berücksichtigung dieser vorgenannten Umstände fordert die DIN 488 - Betonstahl die Prüfung im einbetonierten gekrümmten Zustand anhand eines normierten Stahlbetonbalkens. Gemäß Bild 5 wird der zu prüfende Stab in seiner Mitte um einen festgelegten Dorn von 15 d gebogen. Der durch die beiden Stabschenkel eingeschlossene Winkel beträgt 135°. Nach dem Biegen wird der Stab üblicherweise 1/2 Stunde bei 250° C geteilt. Jeweils ein Probestab wird in einen rechteckigen Balken von 1,75 Länge einbetoniert. Beim Betonieren werden an festgelegten Stellen durch Einlegen von Blechstreifen Risse im Beton vorgegeben. Am Balkenende werden die Stäbe ausreichend verankert.

Die Balken werden bei einer Spannweite von 1,5 m durch eine Einzellast belastet. Die Querschnittshöhe nimmt von Balkenende nach den Auflagern hin affin zum Biegemoment ab. Dadurch wird eine Anpassung an die Form der Prüfstäbe erreicht und die rechnerische Stahlspannung auf einer Länge von etwa 1 m nahezu konstant gehalten. Die Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit erfolgt dem Verwendungszweck entsprechend im Biege-Schwellversuch bei einer Oberspannung von 70 % der Streckgrenze.

Im vorliegenden Fall wurden unverzinkte und feuerverzinkte Betonrippenstähle der Güte BSt 420/500 RK, Ø 16 mm, geprüft. Die feuerverzinkten Proben waren hälftig nach dem Biegen und hälftig vor dem Biegen verzinkt worden. Zur Herstellung der Balken wurde Beton der Güte B 45 nach 30 - 50 Tagen und Zement PZ 55 F verwendet. Die Balken wurden in langsam laufenden hydraulischen Pulsatoren mit einer Frequenz von etwa 3 bis 4 Hz geprüft. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Bild 6 dargestellt. Aus diesen Ergebnissen ist folgendes abzuleiten:

Es besteht kein signifikanter Unterschied zwischen Proben, welche vor bzw. nach dem Biegen feuerverzinkt wurden. Sowohl im Zeitfestigkeits- als auch Dauerfestigkeitsbereich verhalten sich die feuerverzinkten Stäbe ungünstiger als die unverzinkten. Bei den feuerverzinkten 6 Proben, welche bei der geforderten Schwingbreite von 200 N/mm² geprüft wurden, erreichte keine die Grenzlastspielzahl von $N = 2 \cdot 10^6$. Die feuerverzinkten Proben weisen eine Dauerschwingfestigkeit von etwa 180 N/mm² auf. Die in der DIN 488, Blatt 6 - Betonstahl; Eignungsnachweis und Güteüberwachung, genannten Anforderungen (bei einer Schwingbreite von 200 N/mm² sollen 90 % der Proben mindestens $0,6 \cdot 10^6$ Lastspiele ertragen) sind - bei Berücksichtigung sämtlicher erzielter Ergebnisse - gerade noch erfüllt worden.

Bei den feuerverzinkten Stäben hatten sich an der Grenzfläche Zink-Beton chemische Reaktionen abgespielt. Das Zink war mit Reaktionsprodukten und Mörtelbestandteilen überzogen. Nach Ablösen der Mörtelbestandteile zeichnete sich auf den Stählen eine "Mosaikstruktur" in der Zinkauflage ab, die vermutlich auf die Entwicklung von Wasserstoff während der Erstarrungsphase zurückzuführen ist. Diese Erscheinung ist stark vom Chromatgehalt der verwendeten Zemente abhängig und bei niedrigen Chromatgehalten besonders ausgeprägt /24/.

5. Erörterung der Versuchsergebnisse

Bei den etwa 1 bis 1,5 Minuten feuerverzinkten Betonstahlmatten, egal ob vorher in Luft angelassen oder nicht angelassen, entsprechen die Werte für R_m , $R_{p0,2}$ und $R_{p0,01}$ in etwa jenen von in Öfen bei 370 bis 420° C angelassenen Matten, wenn bei der Bestimmung dieser Kenngrößen der Anteil der Zinkauflage am Querschnitt unberücksichtigt bleibt. Wird bei der Bestimmung die Kraft auf den Gesamtquerschnitt einschließlich der Zinkauflage bezogen, dann liegen die derart definierten Festigkeitswerte naturgemäß umso niedriger, je dicker die Zinkauflage ist. Bei den stark verzinkten dünneren Abmessungen kann diese scheinbare "Festigkeitseinbuße" dazu führen, daß die für Betonstahlmatten BSt 500/550 RK geforderte 0,2-Dehngrenze und Zugfestigkeit nicht erreicht wird. Durch das Feuerverzinken wird die Verformungsfähigkeit des kaltumgeformten Grundwerkstoffes (Bruch- und Gleichmaßdehnung) und auch der Schweißknoten (im Kaltversuch) stärker erhöht als bei dem üblichen Anlassen in Luft. Bei den feuerverzinkten Stäben liegen bei den 5, 6, 7,5 und 8,5 Stäben gegenüber den normal angelassenen Stäben die Werte der Gleichmaßdehnung um 17, 47, 103 und 63 % und jene der Bruchdehnung um 7, 11, 21 und 30 % höher. Das Feuerverzinken wirkt sich

demnach mit steigendem Durchmesser zunehmend günstiger auf das Verformungsverhalten des Grundwerkstoffes aus. Die Gleichmaßdehnung wird im besonderen Maße bei den 7,5 mm Stäben verbessert, welche einen ungewöhnlich hohen Phosphorgehalt von 0,076 % aufweisen. Die Knotenscherfestigkeit der Schweißungen wird durch eine zusätzliche Wärmebehandlung nicht beeinflusst. Das Schwingfestigkeitsverhalten der feuerverzinkten Schweißknoten ist gegenüber normal angelassenen erheblich verbessert; die Dauerschwingfestigkeit liegt im Mittel etwa 35 % höher.

Ein Feuerverzinken kann somit das Anlassen in Luft ersetzen, weshalb nicht angelassene Betonstahlmatten verzinkt werden können. Die Wärmebehandlung im Zinkbad führt bei Tauchzeiten von 1 bis 1,5 Minuten sogar zu günstigeren Kombinationen der technologischen Kennwerte als das herkömmliche Anlassen. Die Vorteile des Anlassens im Zinkbad gegenüber jenem in Luft dürften auf einen größeren Wärmeübergang sowie die schnellere und gleichmäßigere Erwärmung zurückzuführen sein. Hiervon profitieren offenbar in erster Linie die dickeren Abmessungen. Die intensive Wärmeeinwirkung im Zinkbad führt sicherlich auch zu einem verstärkten Abbau von Schweißeigenspannungen, weshalb das Verformungsverhalten der Schweißstelle beim Biegen und das Dauerschwingverhalten günstig beeinflusst werden. Die Verbesserungen des Schwingfestigkeitsverhaltens durch ein Feuerverzinken kann u.a. auch auf die Schutzwirkung des Zinks zurückgeführt werden, da bereits die umgebende Luft - gegenüber dem Vakuum - als ein grenzflächenaktives, die Dauerschwingfestigkeit herabsetzendes Medium angesehen werden kann.

Bei den kaltumgeformten Betonrippenstählen von 8 bis 28 mm Durchmesser werden die Werte für R_m , $R_{p0,2}$ und $R_{p0,01}$ durch ein Feuerverzinken (Tauchzeit etwa 1 Minute) im Mittel um 12, 11 bzw. 50 % erhöht, wenn man bei der Bestimmung dieser Kenngrößen den Anteil der Zinkauflage am Querschnitt unberücksichtigt läßt. Wird bei der Bestimmung der Festigkeit die Kraft auf den Gesamtquerschnitt einschließlich des Zinks bezogen, dann liegen die derart definierten Festigkeitswerte zwar niedriger, jedoch braucht eine "Festigkeits-einbuße" gegenüber dem Ausgangszustand nicht befürchtet werden. Durch die mit dem Feuerverzinken verbundene Wärmebehandlung werden die Werte der Gleichmaß- und Bruchdehnung bei der Betonstahlgüte BSt 420/500 RK im Mittel um 52 bzw.

12 und bei der Güte BSt 500/550 RK um 12 bzw. 1 % erhöht. Die stärksten Verbesserungen dieser Verformungskennwerte durch ein Feuerverzinken sind bei den dünnen Abmessungen möglich, welche hier im nur kaltverformten Zustand die niedrigsten Gleichmaß- und Bruchdehnungen aufweisen. Im Vergleich zu Tauchzeiten im Zinkbad von 1 Minute nehmen die Dehngrenzen und Festigkeiten nach 3 bis 6 Minuten wiederum etwas ab und die Verformungskennwerte erwartungsgemäß eher noch zu. Durch das Feuerverzinken nimmt die Sprödbrechneigung der Betonrippenstähle beim Biegen nicht zu. Dies gilt auch für den Fall, daß die Stähle vor dem Verzinken stark gebogen und danach zurückgebogen werden. Im gebogenen, einbetonierten Zustand ist das Dauerschwingverhalten gebogener, einbetonierter, feuerverzinkter Betonrippenstähle ungünstiger als jenes unverzinkter Proben. Bei Berücksichtigung der geltenden Bewertungskriterien wären die Anforderungen im vorliegendem Fall jedoch gerade noch erfüllt worden.

Bezüglich des Festigkeits-Verformungsverhaltens bringt eine Feuerverzinkung bei kaltumgeformten Betonrippenstählen somit eine Verbesserung. Die Spannungs-Dehnungslinie erhält eine bi-lineare Charakteristik, was bei nur kaltumgeformten Stählen i.a. nicht der Fall ist und die Werte der Zugfestigkeit und Streckgrenze steigen bei gleichzeitiger Verbesserung der Verformbarkeit noch an.

Für das ungünstigere Schwingfestigkeitsverhalten feuerverzinkter Betonrippenstähle gegenüber unverzinkten im einbetonierten Zustand gelten folgende Überlegungen:

Es ist nicht auszuschließen, daß eine Wasserstoffentwicklung an der Stahloberfläche sich nachteilig auf das Dauerschwingverhalten der feuerverzinkten Stähle ausgewirkt hat. Zu einer Wasserstoffentwicklung in Beton muß bei verzinkten Teilen wegen der Reaktionen des Zinks mit frischem Beton gerechnet werden. Dieser Wasserstoff könnte sich in erster Linie in den nach dem Biegen stärker kaltverformten und wegen der besonderen Kerbwirkung als Bruchausgangsstelle wirkenden Rippenübergängen anreichern und dort die Rißbildung begünstigen. Auch die durch das Beizen der Stähle vor dem Verzinken erhöhte Oberflächenrauigkeit (die Rauhtiefe der Betonrippenstähle in Längsrichtung wird durch das Beizen von im Mittel 26,4 µm auf 46,8 µm erhöht) könnte sich im Dauerschwingversuch ausgewirkt haben.

6. Zusammenfassung

An Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl BSt 500/550 RK, Stabdurchmesser 5 bis 8,5 mm und kaltumgeformten Betonrippenstählen BSt 420/500 RK und BSt 500/550 RK, Stabdurchmesser 8 bis 28 mm, wurden Untersuchungen im unverzinkten und feuerverzinkten Zustand durchgeführt, um den Einfluß des Verzinkens auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften zu ermitteln. Die Prüfungen umfaßten Zug-, Scher-, Falt und Dauerschwingversuche an geraden Stäben in Luft bei den Betonstahlmatten und Zug-, Biege-, Rückbiege- und Dauerschwingversuche im gekrümmten, einbetonierten Zustand bei den Betonrippenstählen.

Die Wärmebehandlung im Zinkbad führt bei den Betonstahlmatten zu einem günstigeren Festigkeits-Verformungsverhalten des Grundwerkstoffes und der Schweißknoten als das Anlassen in Luft bei 370 bis 420° C. Auch das Schwingfestigkeitsver-

halten wird durch die Feuerverzinkung erheblich verbessert. Ein Feuerverzinken kann somit ein Anlassen in Luft ersetzen, weshalb nicht angelassene Betonstahlmatten verzinkt werden können.

Bei den Betonrippenstählen bewirkt das Anlassen im Zinkbad eine bi-lineare Charakteristik der Spannungs-Dehnungslinie. Dabei steigen die Werte der Zugfestigkeit und Streckgrenze bei gleichzeitiger Verbesserung der Verformbarkeit (insbesondere bei der Güte BSt 420/500 RK) noch an. Durch das Feuerverzinken nimmt die Sprödbbruchneigung der Betonrippenstähle beim Biegen nicht zu. Dies gilt auch für den Fall, daß die Stähle vor dem Verzinken stark gebogen und danach zurückgebogen werden. Feuerverzinkte, gebogene Betonrippenstähle zeigen im einbetonierten Zustand ein ungünstigeres Schwingfestigkeitsverhalten als unverzinkte. Die an Betonrippenstähle gestellten Anforderungen werden jedoch gerade noch erfüllt.

Literatur

- /1/ Eijnsbergen, J.F.H. van: Dt. Bauztg. 69 (1964) S. 748/50.
- /2/ 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.
- /3/ Martin, H., u.A. Rauen: In: Verhalten von verzinkten Spannstählen und Bewehrungsstählen. Berlin/München/Düsseldorf 1974. (Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. H. 242) S. 62/77.
- /4/ Hawkins, N.M.: ACI Journal (1976) S. 104/15.
- /5/ Investigations on Mechanical Behavior of Galvanized Steel Reinforcement, Project No. ZE-170, Reports 1-4. International Lead Zinc Research Organization, New York 1971 und 1972.
- /6/ Wiegand, H., u.F. Nieth: Draht 21 (1970) S. 767/70.
- /7/ Nieth, F., u.H. Wiegand: Archiv Eisenhüttenwes. 46 (1975) S. 589/93.
- Hempel, M., u.D. Horstmann: Archiv Eisenhüttenwes. 42 (1971) S. 309/18.
- /9/ Matting, A., u.H. Wolf: Archiv Eisenhüttenwes. 33 (1962) S. 217/21.
- /10/ Wiegand, H., u.F. Nieth: Stahl u.Eisen 84 (1964) S. 82/88.
- 1/ Rehm, G., u.D. Rußwurm: Betonwerk u. Fertigteiltechnik (1975) S. 332/37, 391/98 u. 422/44.
- /12/ Papsdorf, W.: In: Herstellung von Stahldraht, Teil 2. Hrsg.: Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf 1969. S. 52/53.
- 13/ Neubert, B., u.U. Nürnberger: Zur Frage der Knotenscherfestigkeit von geschweißten Betonstahlmatten. Veröffentlichung in Vorbereitung.
- /14/ Rehm, G., u.U. Nürnberger: Schriftenreihe Schweißen u. Schneiden 5 (1974), Bericht 1, S. 1/26.
- /15/ Rehm, G.: Beton 16 (1966) S. 285/89
- /16/ Peiter, A.: Archiv Eisenhüttenwes. 38 (1967) S. 625/33.

- /17/ Kallenbach, H. Röntgenografische Bestimmung von Eigenspannungen in Betonrippenstahl. Bericht Nr. 56 des Materialprüfungsamtes für das Bauwesen der Technischen Hochschule München, 1964.
- /18/ Soretz, St.: Betonstahl in Entwicklung, Heft 1, 1953 Hrsg. Tor-Isteg Steel Corporation, Luxemburg.
- /19/ Nürnberger, U.: Z.Z. laufende Alterungsversuche an kaltumgeformten Betonrippenstählen.
- /20/ Banerjee, P.: Einfluß verschiedenartiger Kaltverformung nach künstlicher Alterung auf die mechanischen Eigenschaften unruhiger Rippentorstähle. Dissertation Aachen 1965.
- /21/ Soretz, St.: Betonstahl in Entwicklung, Heft 6, 1957. Hrsg. Tor-Isteg Steel Corporation, Luxemburg.
- /22/ Lückcrath, W.: Stahl u. Eisen 77 (1957) S. 11/15.
- /23/ Rehm, G., u.U. Nürnberger: Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter wirklichkeitsnahen Beanspruchungsbedingungen. Demnächst in der Schriftenreihe des Otto-Graf-Instituts, Stuttgart.
- /24/ Nürnberger, U.: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H.... (1. Veröffentlichung)

ANHANG

Bilder

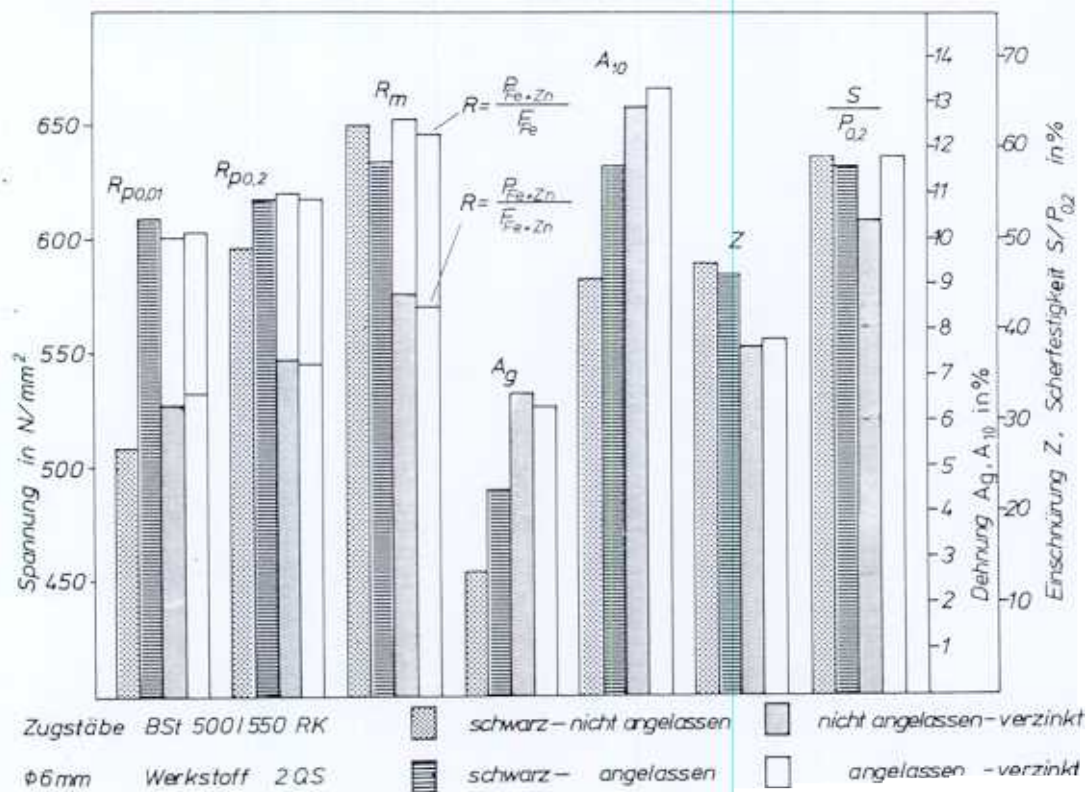
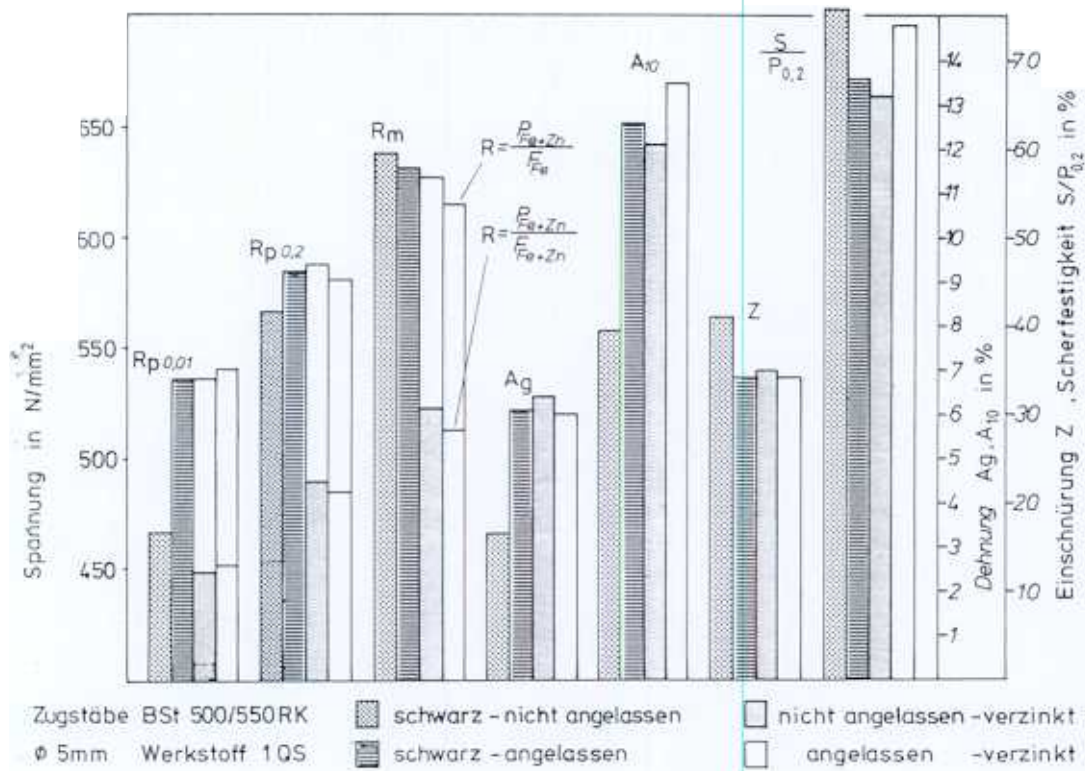


Bild 1:

Ergebnisse der Zugversuche und Scherversuche an verzinkten Betonstahlmatten und am unverzinkten Ausgangsmaterial

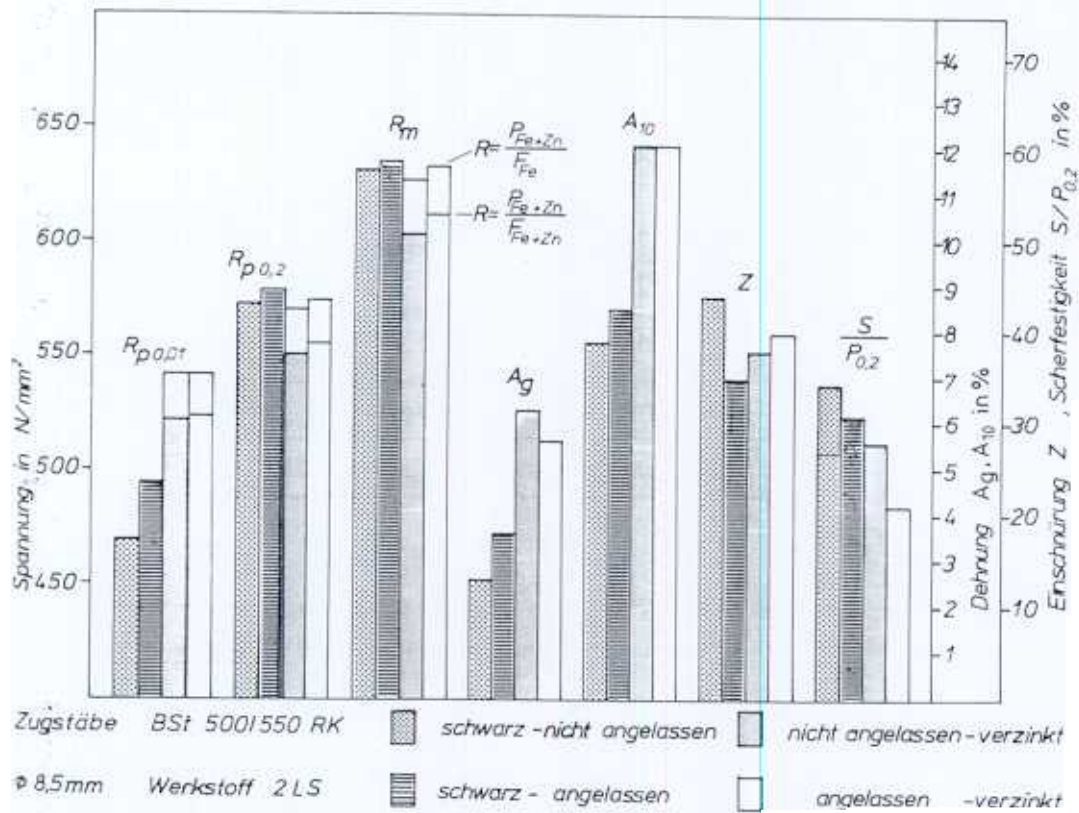
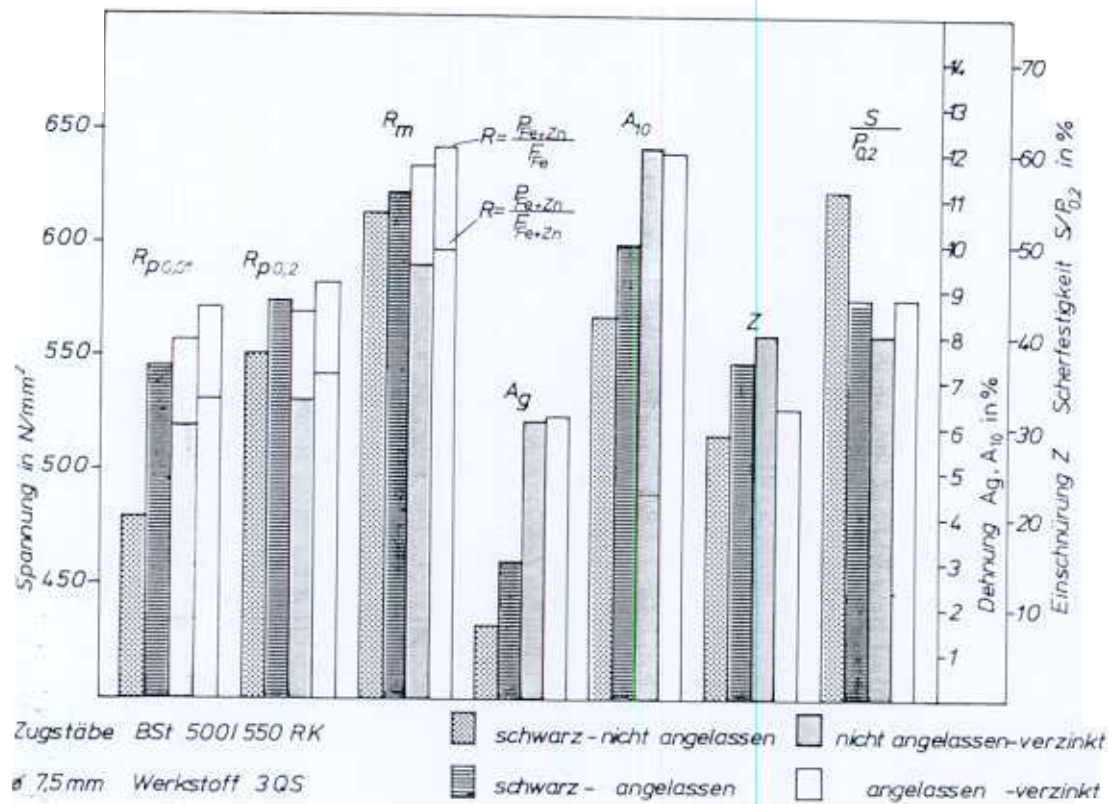


Bild 1:

Ergebnisse der Zugversuche und Scherversuche an verzinkten Betonstahlmatten und am unverzinkten Ausgangsmaterial

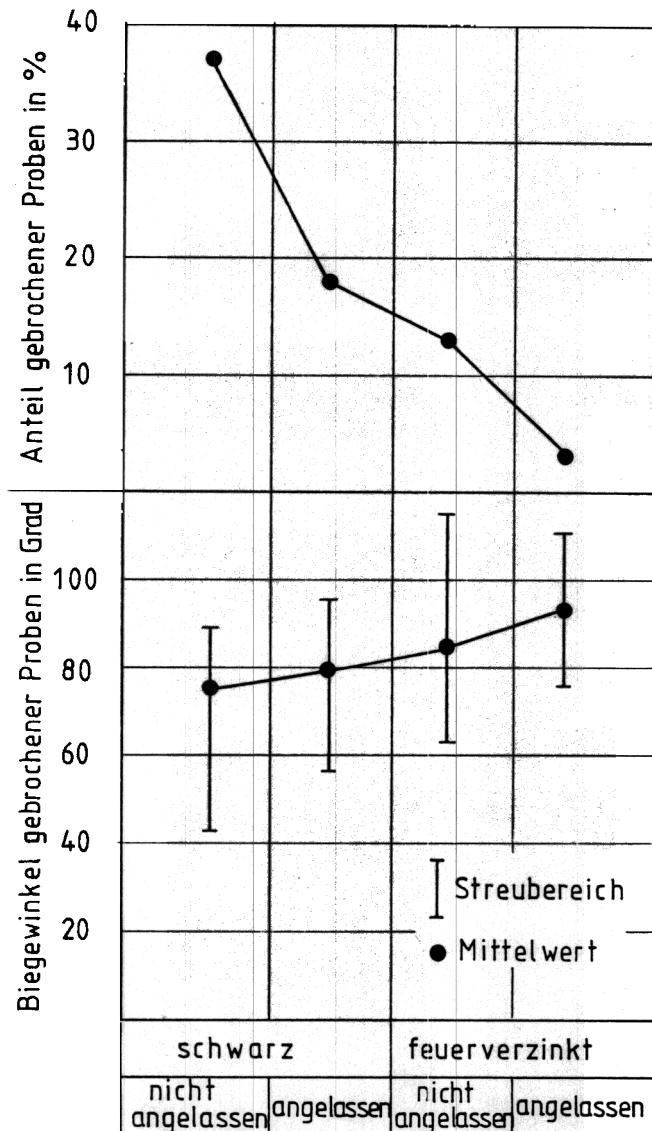
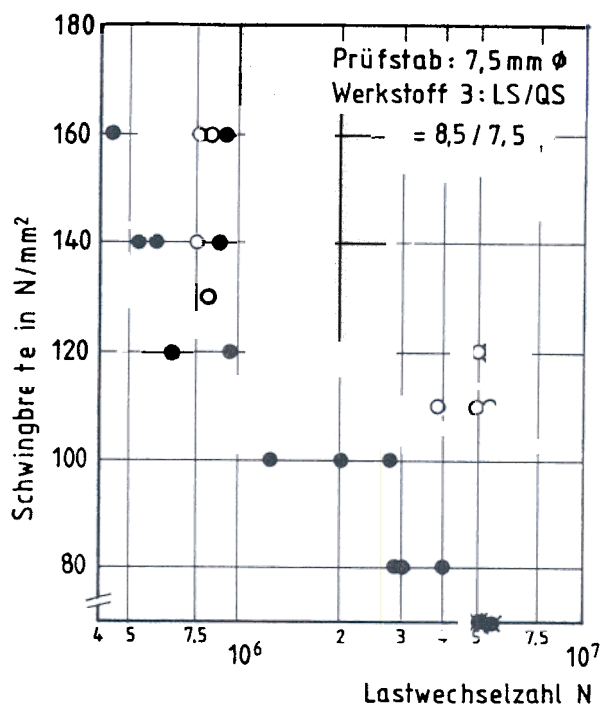
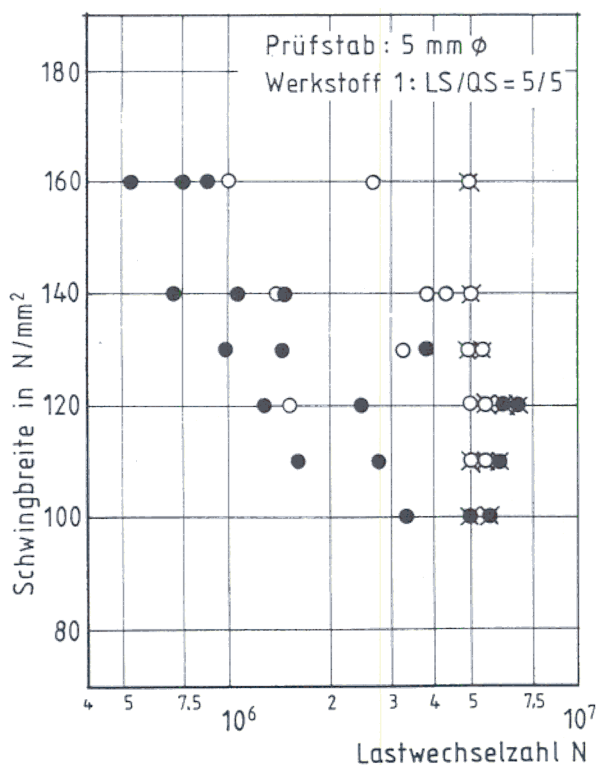
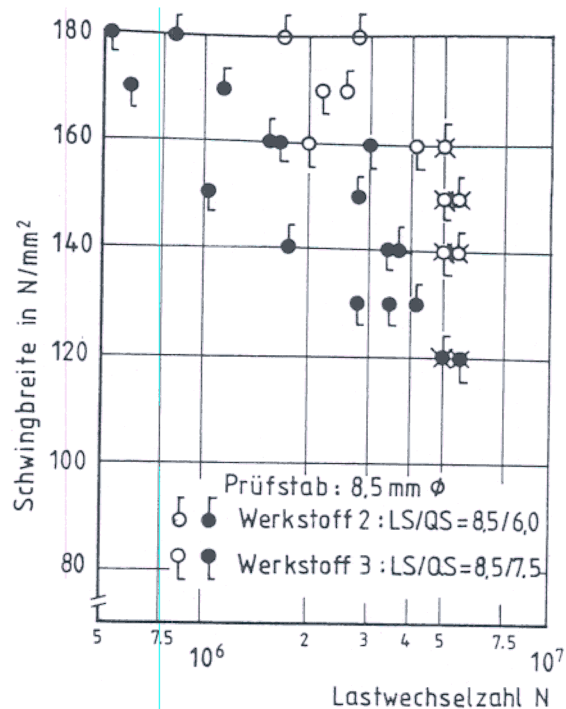


Bild 2:

Ergebnisse der Faltversuche an unverzinkten und verzinkten Betonstahlmatten (gemittelte Werte)



- schwarz - angelassen
- nicht angelassen - verzinkt
- ✕ ✕ ohne Bruch ausgebaut



- schwarz - angelassen
- nicht angelassen - verzinkt
- ✕ ✕ ohne Bruch ausgebaut

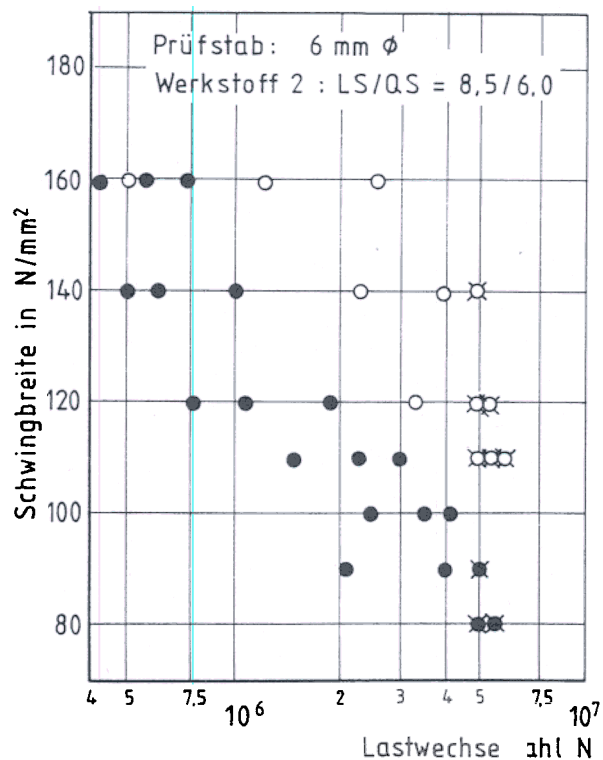


Bild 3:

Ergebnisse der Dauerschwingversuche an unverzinkten und verzinkten Betonstahlmatten

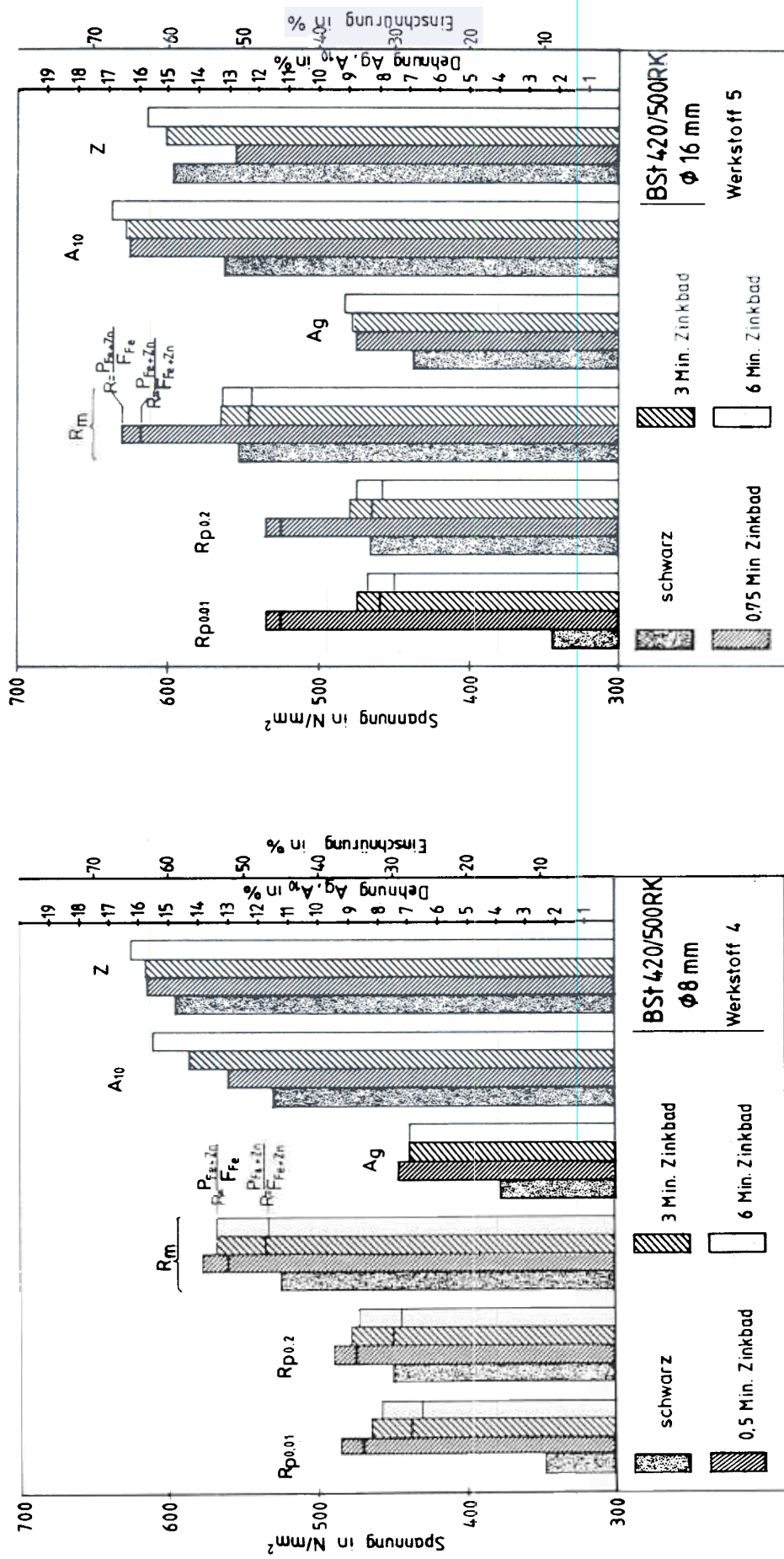


Bild 4:

Ergebnisse der Zugversuche an verzinkten Betonrippenstählen und am unverzinkten Ausgangsmaterial

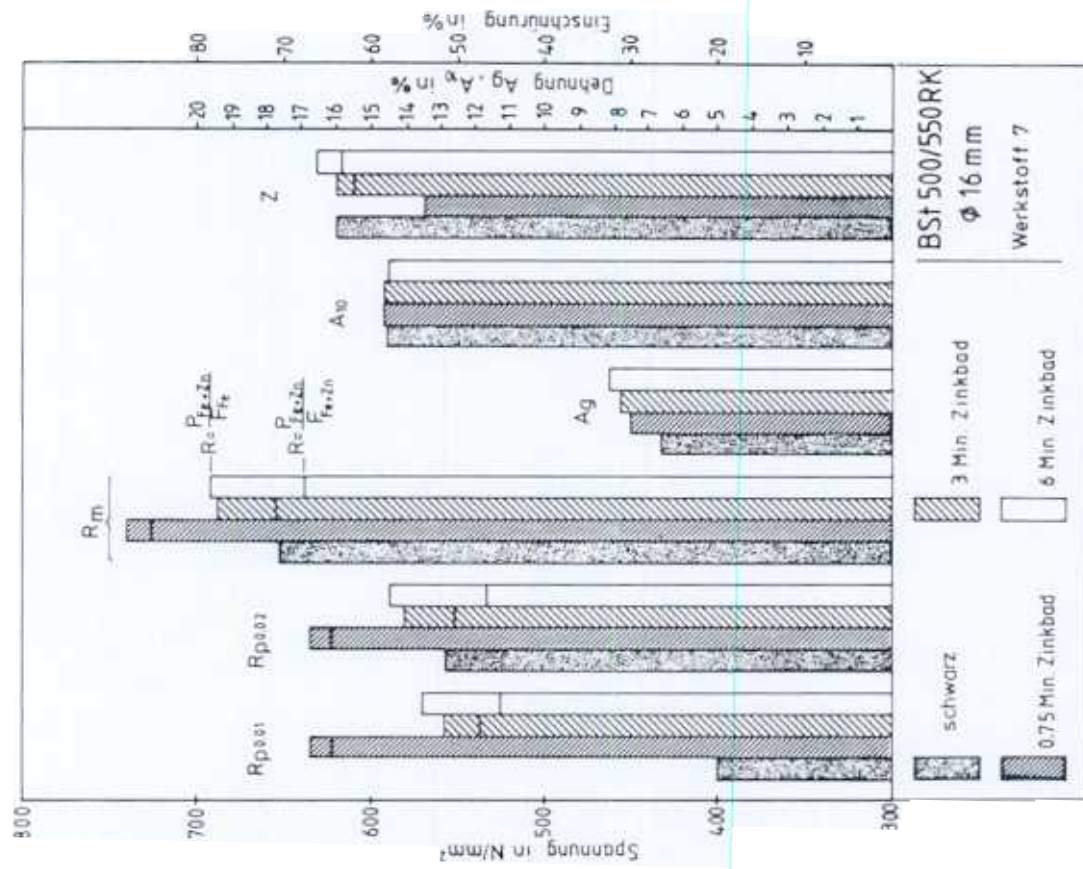
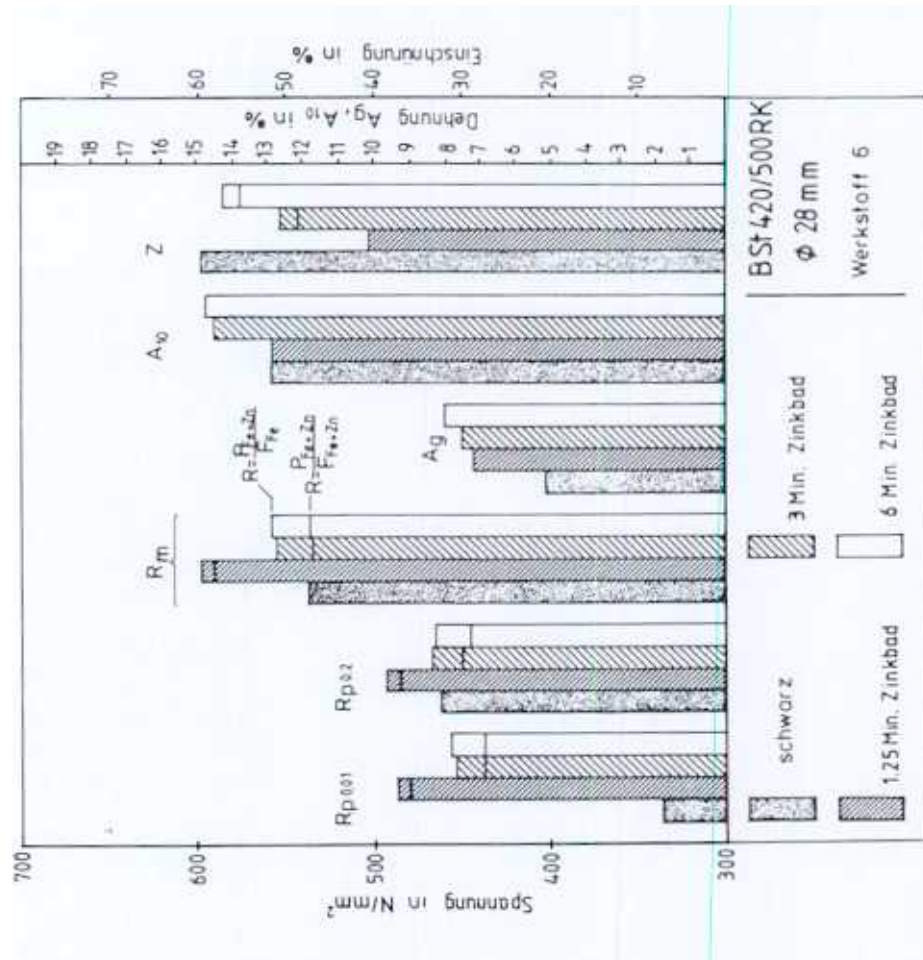


Bild 4:
Ergebnisse der Zugversuche an verzinkten Betonrippen-
stählen und am unverzinkten Ausgangsmaterial

