

Verzinkung, Feucht/Trocken, unter
Verzinkung, Feucht/Trocken, unter
Verzinkung, Feucht/Trocken, unter

Untersuchungen über das Verhalten verzinkter Bewehrung in Beton

Bericht erstattet

von

Dr.-Ing. H. MARTIN

Dipl.-Chem. A. RAUEN

Technische Universität München

[Gleichzeitig Bericht Nr. 68 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.]

Verzinkung, Feucht/Trocken, unter
Verzinkung, Feucht/Trocken, unter
Verzinkung, Feucht/Trocken, unter

Inhalt

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Vorwort, Synopsis, Summary | 62 |
| 1. Einführung | 63 |
| 1.1 Grundlagen der Korrosion von Stahl in Beton | 63 |
| 1.1.1 Karbonatisierung von Beton | 64 |
| 1.1.2 Lochfraßkorrosion | 64 |
| 1.2 Verzinkung der Bewehrung als Korrosionsschutz | 65 |
| 1.3 Versuchsprogramm | 65 |
| 2. Durchgeführte Untersuchungen | 66 |
| 2.1 Verhalten der Zinkschicht von Bewehrungsstählen in Beton | 66 |
| 2.1.1 Feuerverzinkte Stähle in nicht karbonatisiertem Beton | 66 |
| 2.1.2 Einfluß der Verzinkungsart in nicht karbonatisiertem Beton | 68 |
| 2.2.1 Zinkabtragung | 70 |
| 2.2.2 Vergleich des Korrosionsverhaltens zwischen verzinkter und unverzinkter Bewehrung in Beton | 71 |
| 2.3 Verhalten verzinkter Betonstähle (unbehandelt) im Zug- und Biegeversuch | 73 |
| 2.3.1 Verhalten im Zugversuch | 74 |
| 2.3.2 Verhalten im Biegeversuch | 74 |
| 2.3.2.1 Faltversuche | 74 |
| 2.3.2.2 Rückbiegeversuche | 75 |
| 3. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse | 76 |
| 3.1 Verhalten der Zinkschicht im alkalischen Beton | 76 |
| 3.2 Schutzwirkung der Zinkschicht in karbonatisiertem Beton | 77 |
| 3.3 Einfluß des Verzinkens auf die Materialeigenschaften von unbehandeltem Betonstahl | 77 |

Vorwort

Sowohl gegenüber Chlorid in hochalkalischen Medien wie auch in sonstigen angreifenden Lösungen von annähernd neutraler bis schwach basischer Reaktion haben sich Verzinkungsschichten als Korrosionsschutz für Stahl gut bewährt. Es lag deshalb nahe zu prüfen, ob in durch Korrosion hoch beanspruchten Bauteilen durch Verzinken der Bewehrungsstähle eine Verbesserung der Korrosionssicherheit erzielbar ist.

Aus der Literatur sind zwar zahlreiche Untersuchungen vor allem über den Verbund verzinkter Stähle in Beton sowie über die Korrosionsschutzwirkung der Verzinkung von Bewehrungsstählen unter speziellen Umgebungsverhältnissen bekannt. Die Ergebnisse widersprechen sich aber manchmal.

Wir sahen unsere Aufgabe darin, zunächst einige Grundsatzzfragen unter praxisnahen Verhältnissen näher zu klären, bevor auf so wichtige vor allem aber in den Untersuchungsmethoden sehr aufwendige und zeitraubende Anwendungsgebiete, wie z. B. den Korrosionsschutz an Rißstellen oder unter Chlorideinwirkung eingegangen werden sollte. So ist es keineswegs selbstverständlich, daß die Zinkschicht im hochalkalischen Milieu des Betonporenwassers beständig ist und u. U. erst nach Jahrzehnten, wenn die Karbonatisierungsgrenze des Betons die Stahleinlagen erreichen sollte, noch in genügender Dicke zur Verfügung steht. Daß durch die mit der Feuerverzinkung zwangsläufig verbundene Wärmebehandlung Veränderungen der technologischen Kennwerte der Betonstähle auftreten, ist für kaltverformtes Material zu erwarten, aber auch für die hier untersuchten unbehandelten (naturharten) Stähle zumindest der Untersuchung wert. Wichtiger schien uns im Augen-

blick noch die Untersuchung, ob die verhältnismäßig weichen Zinkschichten die mechanischen Beanspruchungen, die Betonstähle nun einmal ertragen müssen, unbeschadet überstehen und welche Erscheinungen an der Grenzfläche Stahl – Zink bei Biegebeanspruchung zu beobachten sind.

Von den in Beton auftretenden Korrosionserscheinungen ist die als Folge von Karbonatisierung auftretende flächenhafte Abtragung am besten praktisch und theoretisch untersucht. Wesentliche neue Gesichtspunkte sind, was den Korrosionsmechanismus betrifft, wohl nicht mehr zu erwarten. Es schien uns deshalb angebracht mit vergleichenden Korrosionsuntersuchungen hier zu beginnen und zu prüfen, ob die theoretisch zu erwartende Korrosionsschutzwirkung auch in der Praxis auftritt.

Bei der Beurteilung wurde in einigen Punkten auf eine allzu ins Einzelne gehende Auslegung der Versuchsergebnisse verzichtet, da wir der Meinung sind, daß die vorliegende Untersuchung allenfalls als Beginn einer viel weiter greifenden Versuchsserie gelten kann.

Die Durchführung der Versuche erfolgte am Institut für Massivbau der Technischen Universität München im Auftrag des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V. als

AIF Forschungsvorhaben 1684.

Beiden Organisationen sei an dieser Stelle für die Bereitstellung der notwendigen Forschungsmittel herzlich gedankt.

Bei den Herren Dr. Horstmann, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf und Dr. Klingele, Institut für Rasterelektronenmikroskopie, München, bedanken wir uns für die Mithilfe bei der Anfertigung von Bildern.

Die Verfasser

Synopsis

Nach einer kurzgefaßten Darstellung der grundsätzlichen möglichen Korrosionsvorgänge an Stahl in Beton wird über Versuche mit feuerverzinkten Bewehrungsstählen berichtet, die in Zementmörtel eingebettet waren.

Zur Herstellung der Prüfkörper wurden 2 Portlandzemente sowie 2 Hochofenzemente mit unterschiedlichem natürlichem Chromatgehalt verwendet.

In die Untersuchung waren 3 verschiedene Verzinkungsmodifikationen – normale Feuerverzinkung, Feuerverzinkung mit einer nachfolgenden Galvanealingbehandlung und Feuerverzinkung mit geringem Aluminiumzusatz zur Erzielung einer Reinzinkschicht – einbezogen.

Zur Ermittlung der Beständigkeit der Zinkschicht im nicht karbonatisierten Beton wurden die Prüfkörper bei unterschiedlicher relativer Feuchte gelagert, sowie in einem verschärften Versuch einer Feucht-Trocken-Behandlung unterzogen.

Die Untersuchungen zeigten, daß eine Zinkauflösung stattfindet, die jedoch bei normalen Feuchtigkeitsbedingungen bald praktisch zum Stillstand kommt. Eine inhibierende Wirkung des aus dem Zement stammenden Chromates wurde nicht festgestellt.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die korrosionsschützende Wirkung der Verzinkung im Vergleich mit unverzinkten Proben nach Karbonatisierung des Zementmörtels überprüft. Die karbonatisierten Prüfkörper

wurden einer Wechsellagerung Feucht/Trocken unterworfen. Während an nicht verzinkten Stählen unter dieser Beanspruchung Rostbildung beobachtet wurde, blieben die verzinkten Stähle frei von Rost.

Um einen möglichen Einfluß des Verzinkens auf die Materialkennwerte von Betonstählen festzustellen, wurden entsprechend den geltenden Vorschriften für Betonstähle Stahlprüfungen durchgeführt.

Bei den verwendeten naturharten Betonstählen trat keine ungünstige Beeinflussung der Zugfestigkeit oder der Bruchdehnungswerte durch den Verzinkungsvorgang ein. Bei Biege- und Rückbiegeversuchen wurden Querrisse in der Zinkschicht hervorgerufen, die auch zu Abplatzungen innerhalb der Zinkschicht führten.

Summary

A brief description of the possible processes of corrosion on steel in concrete is followed by a report on tests carried out on galvanised reinforcing bars embedded in concrete mortar.

The test specimens were made of two different types of Portland cement and two types of blastfurnace-slag cement with different amounts of natural chromate.

The tests were carried out on three variations of zink:

- a) standard galvanised coating
- b) galvanised coating followed by galvanealing treatment

- c) galvanised coating with a low content of aluminium to gain a pure zink coating.

To ascertain the stability of the zink coating in non-carbonated concrete, the test specimens were stored at various relative humidities and tested under extreme moist and dry conditions.

The tests showed that a disintegration of zink takes place. This, however, comes practically to a standstill as soon as normal humid conditions prevail. The chromate in the cement was not found to have an inhibitory effect.

In a second test series, the effectiveness of zink as a corrosion preventor after carbonation of the cement mortar in comparison to nongalvanised specimens was examined. The carbonated test specimens were subjected alternatively to moist/dry storage. Whereas, on the nongalvanised bars rust formation could be observed, the galvanised bars remained stainless.

To find out if the zink coating has an influence on the material constants of the reinforcing bars, appropriate steel tests were carried out in accordance with the reinforcing steel testing regulations.

The galvanising process had no negative influence on the tensile strength or on the ultimate strain of the untreated reinforcing bars. As a result of bending and rebending tests, transverse cracks developed on the surface which were followed by scaling of the zink coating.

1. Einführung

1.1 Grundlagen der Korrosion von Stahl in Beton

Wenn wir uns fragen, unter welchen Umständen verzinkte Bewehrung für Beton sinnvoll sein kann, ist es nützlich, Möglichkeiten und Grenzen des Korrosionsschutzes aufzuzeigen, die Beton gegenüber unverzinktem Stahl besitzt.

Der chemisch unter Hydratation und Hydrolyse reagierende Bestandteil des Betons – der Zement – spaltet bei vollständiger Umsetzung größere Mengen Calciumhydroxid ab, bei Portlandzement ergeben sich theoretisch bis zu 25 % bezogen auf das Zementgewicht, praktisch wird wegen unvollständiger Hydratation dieser Wert jedoch nicht erreicht. Bei anderen Zementarten (Hochofenzement, Traßzement) ist der Anteil niedriger. Das Porenwasser im Beton liegt stets als gesättigte Calciumhydroxidlösung über einer sehr großen Reserve von festem Calciumhydroxid vor. Damit ist eine Pufferlösung

von pH 12,6 mit außerordentlich hoher Kapazität gegeben. Thermodynamische Betrachtungen und elektrochemische Messungen, die besagen, daß in Lösungen dieser hohen Basizität Stähle passiviert sind, werden durch Untersuchungen aus der Praxis bestätigt. Es zeigt sich an alten Bauwerken, daß im hochalkalischen Beton Eisen über praktisch unbegrenzte Zeit völlig vor Korrosion geschützt bleibt. Dieser Schutz wird durch eine submikroskopisch dünne, lückenlose Oxidhaut erreicht. Es gibt kein technisches Korrosionsschutzsystem, das die so erzielte Hemmung der Eisenauflösung übertrifft oder ihr auch nur nahe käme. Korrosion der Stahlbewehrung kann aus diesem Grunde nur auftreten, wenn besondere Verhältnisse vorliegen. Man weiß heute, daß – einwandfreie Bauausführung vorausgesetzt – nur zwei grundsätzliche Möglichkeiten des Versagens dieses Schutzmechanismus gegeben sind:

- a) Karbonatisierung des Betons, d. h. Neutralisation der basischen Betonbestandteile unter der Wirkung der Luftkohlenensäure, und
- b) Einwirkung von Halogenidionen, insbesondere von Chloridionen, im alkalischen Beton.

Diese beiden entscheidenden Vorgänge sollen noch etwas genauer betrachtet werden. Es sei hervorgehoben, daß sie nur die Voraussetzung darstellen, die gegeben sein muß, damit Korrosion stattfinden kann. Es gibt weitere Bedingungen, die die Korrosionsgeschwindigkeit steuern. So ist z. B. der Zutritt der Luft für die Geschwindigkeit der kathodischen Teilreaktion maßgebend. Da Korrosion im elektrochemischen Sinne nur in Elektrolyten stattfinden kann, ist auch die Gegenwart einer flüssigen Phase, d. h. einer Mindestfeuchtigkeit des Betons, erforderlich, um nennenswerte Korrosionsgeschwindigkeiten zu ermöglichen.

1.1.1 Karbonatisierung von Beton

Die Erdatmosphäre enthält in den unteren Luftschichten durchschnittlich 0,03 % CO_2 , die anderen sauren Bestandteile (SO_2 und NO_2) treten in ihrer Bedeutung dem gegenüber stark zurück. Durch Eindiffusion dieser Gase in den stets porösen Beton findet eine Neutralisierung des Calciumhydroxids statt.

Man bezeichnet diesen Vorgang als Karbonatisierung. Die Karbonatisierungstiefe kann mit ausreichender Genauigkeit durch Aufsprühen 0,1 %iger alkoholischer Phenolphthaleinlösung auf frische Betonbruchflächen bestimmt werden. Die Auswertung gestaltet sich besonders einfach, weil nicht Farbtiefen gemessen werden müssen, sondern die karbonatisierte Schicht farblos bleibt, während die unkarbonatisierte Zone sich tief rot färbt. Da es sich hier um einen fundamentalen Vorgang handelt, sind zahlreiche Versuche unternommen worden, die gesetzmäßige Abhängigkeit der Karbonatisierungstiefe von der Zeit in Formeln zu fassen. Aus dem 1. Fick'schen Gesetz kann man Gleichungen der Form $x = a \cdot \sqrt{t}$ ableiten; neuerdings hat Smolczyk versucht, den Zusammenhang zwischen Betonfestigkeit und Karbonatisierungswiderstand mathematisch zu erfassen [1]. Von Schießl [2] wurde auf dem Betontag 1973 in einem Vortrag die zur Zeit am besten zutreffende Auswertung vorliegender Versuchsergebnisse vorgelegt. Zwar ergibt sich anhand dieser Gleichungen, daß es prinzipiell keine maximale Karbonatisierungstiefe im Beton gibt, sondern in unendlich langen Zeiträumen eine völlige Durchkarbonatisierung stattfinden muß, jedoch schließt das nicht aus, daß es eine praktische Grenze gibt, bei der der weitere Fortschritt so langsam erfolgt, daß während der normalen Lebensdauer eines Bauwerkes keine weitere Erhöhung der Karbonatisierungstiefe mehr feststellbar ist. Bei gut verdichtetem Beton mit Zementgehalten $\sim 300 \text{ kg/m}^3$ liegt dieser Wert unter 2 cm. Wenn die Betondeckung der Stähle diesen Wert erreicht oder überschreitet, ist im allgemeinen der Korrosionsschutz auch ohne zusätzliche Maßnahmen gewährleistet.

Oft kann aus architektonischen oder konstruktiven Gründen diese Mindestüberdeckung aber nicht eingehalten werden. Bei Fertigteilen spielt auch das Transportgewicht eine große Rolle, und da aus statischen Gründen die Bewehrung nicht in der Mitte eines Bauteiles angeordnet werden kann, sucht man die Betondeckung so gering als irgend möglich zu halten.

Hier sind ebenso wie in den Fällen, wo zwar die Betondeckung hoch ist, die Betonqualität aber nicht ausreicht, früher oder später Schäden zu erwarten, die zunächst das Aussehen, später den Bestand eines Bauwerkes beeinträchtigen.

Die Korrosion im karbonatisierten Beton äußert sich als flächenhafte Abtragung, in späteren Stadien treten dicke Rostkrusten auf, die die Betonüberdeckung absprenge, da bekanntlich in Rost umgewandeltes Eisen ein wesentlich größeres Volumen einnimmt.

Ein Korrosionsphänomen, das man zunächst nicht mit der Karbonatisierung in Zusammenhang bringen möchte, erweist sich bei näherem Hinsehen ebenfalls als weitgehend abhängig vom Karbonatisierungsvorgang. Gemeint sind Rostbildungen an der Bewehrung im Bereich von Rissen. Dabei mag festgehalten sein, daß Stahlbeton meist als gerissen gerechnet wird. Entlang der Rißufer karbonatisiert der Beton relativ schnell. Korrosion setzt erst ein, wenn der Elektrolyt, d. h. der die Stahloberfläche benetzende Flüssigkeitsfilm, einen pH-Wert < 9 aufweist.

1.1.2 Lochfraßkorrosion

Die einzige Möglichkeit, wie auch ohne Karbonatisierung Stahl im Beton durch Korrosion schwer geschädigt werden kann, besteht in der Einwirkung von Chlorid (oder anderen Halogeniden, außer Fluorid). Der Mechanismus der Chloridkorrosion ist etwa folgendermaßen anzunehmen:

Die Passivschicht im Stahl wird an sehr vereinzelten Stellen durchbrochen, die sich dadurch bildende winzige Korrosionsnarbe bleibt dann aber ständig aktiv und vertieft sich. Es bildet sich ein quasistabiler Zustand aus, der sich darin äußert, daß die Umgebung des „Loches“ vor Korrosion geschützt bleibt und nur im Lochgrund eine außerordentlich rasche Eisenauflösung erfolgt. Die vorhandenen Chloridionen werden dabei nicht verbraucht, sondern bleiben als eine Art Katalysator wirksam.

Diese anschaulich als „Lochfraß“ bezeichnete Art der Korrosion beschränkt sich auf Bedingungen, bei denen die Stahloberfläche passiviert ist; bemerkenswerterweise tritt sie auch bei Edelstählen auf. Über die Chloridmengen, die noch toleriert werden können, gehen die Meinungen sehr auseinander.

Es konnte gezeigt werden, daß in Ca(OH)_2 -Lösungen eine korrosionsfördernde Wirkung noch herab bis zu 10^{-3} val/l nachweisbar ist [4]. Allerdings sind die

Hydratationsprodukte des Zements in der Lage, einen Teil des Chlorids zu binden und unschädlich zu machen. Die in Ca(OH)_2 -Lösungen gewonnenen Ergebnisse können deshalb nicht unmittelbar auf Beton übertragen werden. Nach [5] wird angenommen, daß ernsthafte Schäden bei Chloridgehalten auftreten können, die 0,4 % des Zementgewichts überschreiten.

Es ist zu bedenken, daß z. B. nach der Deutschen Zementnorm DIN 1164, die unseres Wissens als einzige den Chloridgehalt begrenzt, bis zu 0,1 % Chlorid im Zement zulässig sind. Gehalte von nur 0,02 % in den Zuschlägen ergeben damit bei einer üblichen Betonrezeptur bereits 0,2 % Chlorid bezogen auf das Zementgewicht.

Zu Befürchtungen können heute allerdings in der Hauptsache die Umgebungsverhältnisse eines bewehrten Bauteils Anlaß geben. Bauten im Tidebereich sind besonders gefährdet. Abwechselnde Durchfeuchtung mit stark salzhaltigem Meerwasser und nachfolgende Austrocknung sind besonders gefährlich. Dagegen ist bei Bauteilen, die ständig unter der Wasseroberfläche liegen, der Korrosionsfortschritt gehemmt, weil ein ausreichender Sauerstoffzutritt nicht erfolgen kann. Daß auch die Luft in Küstengegenden relativ hohe Mengen Chlorid enthält, ist bekannt.

Bei Brücken im Binnenland können durch Tausalze beträchtliche Chloridmengen in den Beton gelangen. Bauelemente, die größere Mengen Chlorid enthalten, können bei Feuchtigkeitseinwirkung erhebliche Chloridmengen an den mit ihnen in Verbindung stehenden Beton abgeben.

Neben diesen mehr grundsätzlichen Möglichkeiten gibt es zahlreiche weitere, wie mit Absicht (Erhärtungsbeschleunigung!) oder versehentlich Chlorid in bewehrten Beton gelangen und dort zu schweren Schäden führen kann.

Zusammenfassend muß man feststellen, daß es eine Reihe von Möglichkeiten gibt, unter denen der im allgemeinen gute Korrosionsschutz, den Beton der eingebetteten Bewehrung verleiht, versagen muß.

Es erhebt sich nun die Frage: Bringt eine Verzinkung des Stahls in den beiden grundsätzlichen Fällen, wo wir dies befürchten müssen (Karbonatisierung des Betons und Einwirkung von Chlorid), eine wesentliche Verbesserung?

1.2 Verzinkung der Bewehrung als Korrosionsschutz

Entscheidend für die Eignung von Verzinkungsschichten für Stahlbewehrung in Beton ist selbstverständlich, daß sie chemisch beständig im hochalkalischen Milieu des Betonporenwassers sind. Wie vorstehend ausgeführt, ist im Beton mit pH-Werten $\sim 12,6$ zu rechnen. Das ist genau das Gebiet, in dem Zink sich unter Zinkatbildung aufzulösen beginnt, eine Folge seines amphoteren Charakters. Die Abhängigkeit der Abtragungsgeschwindigkeit vom pH-Wert ist in diesem Gebiet so scharf

ausgeprägt, daß Veränderungen von 0,1 pH eine Vervielfachung der Zinkauflösung bedeuten können. Es steht ganz außer Frage, daß kleine Nebenbestandteile eine entscheidende Rolle spielen; dies gilt ebenso für die Verzinkungsschichten selbst wie für das Korrosionsmilieu, also den Beton. Der Chromatgehalt des Zements ist nach den Untersuchungen der Building Research Station Watford, England [6] dabei die entscheidende Einflußgröße auf Seiten des Betons. Beim feuerverzinkten Stahl ist aus elektrochemischen Messungen abzuleiten, daß die Eisen-Zink-Legierungsschichten ein eisenähnlicheres Verhalten zeigen als die relativ dünne Reinzinkschicht [7]. Das bedeutet, daß selbst im ungünstigsten Fall einer zunächst raschen Auflösung der äußeren Zinkschicht sehr bald eine Selbsthemmung eintreten sollte, wenn die erste Eisen-Zink-Legierungsschicht erreicht wird. Eine vollständige Auflösung der Feuerverzinkungsschicht ist deshalb nicht zu erwarten. Im großen und ganzen muß man jedoch feststellen, daß unsere Kenntnisse zu diesem wichtigen Problem noch sehr spärlich sind.

Es wäre umso vorteilhafter, diesen Mangel rasch zu beseitigen als vorliegende Untersuchungen zu zeigen scheinen, daß verzinkte Stähle der Einwirkung von Chlorid wesentlich besser widerstehen als unverzinkte. So haben Cornet und Mitarbeiter [8] darauf hingewiesen, daß erst ein wesentlich höherer Chloridgehalt zum Zusammenbruch der Passivschicht führt, wenn man Verzinkungsschichten mit blankem Eisen vergleicht. Von Kaesche wurde sogar angegeben [7], daß etwa die hundertfache Chloridmenge nötig ist, um einen elektrochemisch nachweisbaren Effekt bei verzinktem gegenüber unverzinktem Stahl zu erzielen.

1.3 Versuchsprogramm

Der vorliegende Bericht beschränkt sich bewußt auf die Klärung einiger wichtiger grundsätzlicher Fragen in Zusammenhang mit der Anwendung verzinkter Bewehrung im Stahlbetonbau.

Auch der Korrosionsschutz gegenüber Chlorideinwirkung war nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens.

Die 3 Hauptziele des Versuchsprogramms lassen sich wie folgt formulieren:

- a) Wie und nach welchem Zeitgesetz erfolgt im alkalischen Beton unter verschiedenen Umgebungsverhältnissen eine Veränderung der Zinkschutzschicht?
- b) Kann der Korrosionsschutz für Bewehrungsstähle im karbonatisierten Beton durch Verzinken langfristig sichergestellt oder zumindest gegenüber unverzinktem Stahl verbessert werden?
- c) Genügen feuerverzinkte Stähle den mechanischen Anforderungen, die an Betonstähle gestellt werden, und welche Verformungen werden ertragen, ohne daß der Verbund zwischen Eisen und Zink gestört wird?

Es ist ohne weiteres einzusehen, daß die Klärung dieser Fragen auch Voraussetzung für eine Anwendung der

Verzinkung im Spannbetonbau sein muß – selbstverständlich wären hierfür jedoch umfangreiche weitere Untersuchungen nötig.

2. Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Verhalten der Zinkschicht von Bewehrungsstählen in Beton

2.1.1 Feuerverzinkte Stähle in nicht karbonatisiertem Beton

Zur Klärung der unter 1.3 a) formulierten Fragestellung wurden Prüfkörper aus Zementmörtel in den Abmessungen $4 \times 4 \times 16$ cm mit zentrisch eingelegtem verzinktem Stahl hergestellt. Die Zinkauflage sollte möglichst gleichmäßig sein und etwa 600 g Zn pro m^2 betragen.

Als Bindemittel wurde je ein Portlandzement PZ 275 mit hohem und niedrigem Chromatgehalt sowie je ein Hochofenzement HOZ 275 mit hohem und niedrigem Chromatgehalt verwendet.

Die Chromatgehalte betragen:

| | | |
|--------|---------------------------------------------|------------------------|
| Ze I | Portlandzement mit hohem Chromatgehalt: | 27,50 ppm CrO_4^{--} |
| Ze IH | Hochofenzement mit hohem Chromatgehalt: | 18,75 ppm CrO_4^{--} |
| Ze II | Portlandzement mit niedrigem Chromatgehalt: | 7,25 ppm CrO_4^{--} |
| Ze IHH | Hochofenzement mit niedrigem Chromatgehalt: | 6,00 ppm CrO_4^{--} |

Tabelle 1a: Chemische Analyse des Zementes ZeI PZ 275 DIN 1164, Schwenk, Werk Karlstadt

| | |
|-------------------|-----------|
| Glühverlust | 2,06 % |
| Unlös. Rückstand | 0,79 % |
| Lösliches SiO_2 | 18,89 % |
| Al_2O_3 | 6,49 % |
| FeO | - |
| Fe_2O_3 | 3,12 % |
| MnO | - |
| Mn_2O_3 | 0,08 % |
| CaO | 63,28 % |
| MgO | 1,74 % |
| SO_3 | 2,53 % |
| K_2O | 1,25 % |
| Na_2O | 0,81 % |
| Cl^- | 0,1 % |
| Rest | - |
| CrO_4^{--} | 27,50 ppm |

Tabelle 1b: Chemische Analyse des Zementes ZeI H HOZ 275 DIN 1164, Schwenk, Werk Karlstadt

| | |
|-------------------|----------|
| Glühverlust | 2,72 % |
| Unlös. Rückstand | 0,55 % |
| Lösliches SiO_2 | 21,33 % |
| Al_2O_3 | 5,28 % |
| FeO | - |
| Fe_2O_3 | 2,27 % |
| MnO | - |
| Mn_2O_3 | 0,07 % |
| CaO | 63,51 % |
| MgO | 1,44 % |
| SO_3 | 2,71 % |
| K_2O | 0,67 % |
| Na_2O | 0,15 % |
| Cl^- | 0,1 % |
| Rest | - |
| CrO_4^{--} | 7,25 ppm |

Tabelle 1c: Chemische Analyse des Zementes ZeII PZ 275 DIN 1164, Märker, Werk Harburg

| | |
|-------------------|-----------|
| Glühverlust | 2,02 % |
| Unlös. Rückstand | 0,43 % |
| Lösliches SiO_2 | 24,82 % |
| Al_2O_3 | 11,31 % |
| FeO | 2,06 % |
| Fe_2O_3 | - |
| MnO | 0,52 % |
| Mn_2O_3 | - |
| CaO | 51,12 % |
| MgO | 2,98 % |
| SO_3 | 2,97 % |
| K_2O | 0,98 % |
| Na_2O | 0,70 % |
| Cl^- | 0,1 % |
| Rest | 0,09 % |
| CrO_4^{--} | 18,75 ppm |

Tabelle 1d: Chemische Analyse des Zementes ZeII H HOZ 275 DIN 1164, Märker, Werk Harburg

| | |
|-------------------|----------|
| Glühverlust | 0,10 % |
| Unlös. Rückstand | 0,46 % |
| Lösliches SiO_2 | 24,35 % |
| Al_2O_3 | 10,31 % |
| FeO | 1,88 % |
| Fe_2O_3 | - |
| MnO | 0,49 % |
| Mn_2O_3 | - |
| CaO | 52,69 % |
| MgO | 2,89 % |
| SO_3 | 3,12 % |
| K_2O | 0,52 % |
| Na_2O | 0,23 % |
| Cl^- | 0,1 % |
| Rest | 2,96 % |
| CrO_4^{--} | 6,00 ppm |

Die chemische Analyse der Zemente ist in den Tabellen 1a – d enthalten.

Beim Stahl handelte es sich um einen glatten Rundstahl mit einem Durchmesser von 12 mm (Betonstahl IIa), die chemische Analyse ist in Tabelle 2 aufgeführt. Der Stahl wird im folgenden als Stahl A₀ bezeichnet.

Tabelle 2: Stahlanalysen

| | C % | Si % | Mn % | Cr % | P % | S % |
|----------------------|-------|-------|------|-------|--------|-------|
| Stahl A ₀ | 0,330 | 0,223 | 0,66 | 0,492 | 0,0799 | 0,058 |
| Stahl A ₁ | 0,295 | 0,230 | 1,15 | 0,064 | 0,0199 | 0,035 |
| Stahl B ₁ | 0,365 | 0,278 | 0,92 | 0,546 | 0,0340 | 0,040 |

Die mechanischen Kennwerte des Stahles sind in Tabelle 3 mitgeteilt.

Tabelle 3: Materialkennwerte für Stahl A₀ – glatter Rundstahl St 1 – Herstellerwerk: Acciaieria Pisogne

| d _x | F _e | B _S | B _{0,2} | B _Z | b ₁₀ | Behandlung |
|----------------|-----------------|--------------------|------------------|----------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| mm | mm ² | kp/mm ² | | | % | |
| 11,95 | 112,19 | n.b. | 62,21 | 20,0 | 21,8 | Ausgangszustand |
| 11,94 | 112,04 | " | 61,23 | 21,8 | | |
| 11,94 | 111,92 | " | 60,22 | 25,0 | | |
| 11,97 | 112,54 | " | 61,13 | 21,8 | | |
| 11,90 | 111,24 | " | 61,30 | 20,0 | | |
| 11,89 | 111,04 | 29,90 | 60,70 | 22,5 | | |
| 11,96 | 112,32 | 30,72 | 59,65 | 22,5 | | |
| 11,91 | 111,49 | 30,41 | 61,71 | 23,3 | | |
| 11,95 | 112,10 | 30,06 | 61,02 | 21,7 | | |
| 12,01 | 113,25 | 43,97 | 57,22 | 20,8 | 24,2 | galvanisalt |
| 12,04 | 113,89 | 43,02 | 56,72 | 24,2 | | |
| 12,06 | 114,14 | 43,80 | 56,77 | 23,3 | | |
| 12,06 | 114,15 | 44,15 | 58,00 | 21,7 | | |
| 12,02 | 113,54 | 42,27 | 56,72 | 23,3 | | |
| 12,02 | 113,54 | 41,22 | 60,24 | 19,2 | 21,7 | 300 g/m ² Zinkauflage |
| 11,97 | 112,52 | 39,64 | 57,95 | 21,7 | | |
| 11,99 | 112,96 | 39,84 | 58,25 | 24,2 | | |
| 11,98 | 112,73 | 39,39 | 58,01 | 26,6 | | |
| 12,04 | 113,85 | 40,58 | 57,97 | 25,0 | | |
| 12,09 | 114,78 | 41,82 | 58,37 | 22,5 | 22,5 | feuerverzinkt ~600 g/m ² durch Verzinkungsverband |
| 12,07 | 114,49 | 41,75 | 57,82 | 22,5 | | |
| 12,04 | 113,79 | 41,30 | 57,65 | 24,2 | | |
| 12,03 | 113,57 | 41,21 | 58,11 | 21,7 | | |
| 12,06 | 114,20 | 41,51 | 58,49 | 24,2 | | |
| 12,02 | 113,41 | 37,74 | 59,26 | 22,5 | 21,7 | feuerverzinkt ~600 g/m ² durch Fa. Schörg u. Sohn, München |
| 12,02 | 113,54 | 37,52 | 58,66 | 22,5 | | |
| 12,04 | 113,80 | 37,78 | 58,87 | 21,7 | | |
| 12,02 | 113,54 | 38,93 | 59,72 | 21,7 | | |

x) aus Gewicht ermittelt

n.b. = nicht bestimmt

Die Verzinkung erfolgte in der Verzinkerei Schörg und Sohn in München. Nach Angaben lag die Badtemperatur bei 455 °C, die Verweilzeit betrug 2 Minuten.

Bei der Ermittlung der Zinkauflage mußte leider festgestellt werden, daß eine einigermaßen einheitliche Schichtdicke nicht erzielt worden war; als Beispiel seien die an 15 jeweils 2 cm langen Abschnitten nach dem chemischen Ablöseverfahren ermittelten Werte angeführt:

| | | | | | | |
|--------|---|----------------------|----|----------------------|----|----------------------|
| Probe: | 1 | 485 g/m ² | 6 | 528 g/m ² | 11 | 795 g/m ² |
| | 2 | 608 " | 7 | 538 " | 12 | 750 " |
| | 3 | 721 " | 8 | 470 " | 13 | 748 " |
| | 4 | 447 " | 9 | 460 " | 14 | 675 " |
| | 5 | 778 " | 10 | 625 " | 15 | 598 " |

Daraus ergibt sich eine mittlere Zinkauflage von 615 g/m² mit einer Streuung von 123 g/m². Der Variationskoeffizient liegt bei 20 %.

Die ursprüngliche Absicht, die nach Korrosionsbeanspruchung verbliebene Schichtdicke mittels eines elektrochemischen Verfahrens bei den jeweiligen Prüfterminen festzustellen, wurde daraufhin aufgegeben, weil keine vernünftige Aussage über die Geschwindigkeit der Zinkauflösung zu erwarten war. Die Bestimmung des Fortschreitens der Zinkauflösung wurde nach folgendem Verfahren vorgenommen:

2 cm lange Prismenabschnitte wurden aus den Prüfkörpern herausgesägt, die Mörtelüberdeckung durch Abschlagen entfernt. Die noch mit Mörtelresten behafteten Stababschnitte wurden mit 5 %iger Essigsäure behandelt und die in der Essigsäure gelösten Zinkionen mittels Äthylendiamintetraacetat (Titriplex III) titrimetrisch bestimmt. Als Indikator diente 3,3' Dimethylnaphthidin [9]. Man ging dabei von der Vorstellung aus, daß nur das bei der Reaktion zwischen hydratisiertem Zement und metallischem Zink gebildete Ca(Zn(OH)₃) · 2H₂O [10] erfaßt wird und der Angriff der stark verdünnten Essigsäure auf die Zinkschicht vernachlässigbar klein bleibt. Die Mörtelüberdeckung wurde auf Analysenfeinheit zerkleinert und die in den Mörtel eingedrungenen Zinkionen auf gleiche Weise ermittelt. Das gesamte gelöste Zink wurde dann in metallisches Zink umgerechnet und unter der Annahme einer Dichte von 7,13 g/cm³ für die äußere Verzinkungsschicht in µ als abgetragene Zinkschicht angegeben.

Das Verfahren ist sicher mit einigen Fehlerquellen behaftet, aufgrund der ungleichmäßigen Zinkauflage blieb jedoch keine andere Wahl als die, statt der verbliebenen Zinkauflage auf irgend eine Weise die zum jeweiligen Prüftermin abgetragenen Zinkschichtdicken zu bestimmen.

Der Mörtel wurde nach folgendem Rezept gemischt:

- 6 Gew.-Teile Zement
- 3,6 Gew.-Teile Wasser
- 6 Gew.-Teile Normensand I
- 12 Gew.-Teile Normensand II

Von jeder Variante wurden jeweils 10 Prüfkörper bei 40, 60, 70 und 100 % r.F. im Klimaraum bei 20 °C gelagert.

Die Prüfung erfolgte nach 7 Tagen, 1 Monat, 6 Monaten, 1 Jahr und 2 Jahren.

Es wurden folgende Abtragungswerte ermittelt:

Tabelle 4: Zinkabtragung in μ an feuerverzinktem Stahl (Auflage 600 g/m²) in Normenmörtel bei Lagerung in Umgebung mit verschiedener Luftfeuchtigkeit, in Abhängigkeit von der Zement-sort.

| Prüfalter | 40% rel. Feuchte | | | | 60% rel. Feuchte | | | |
|-----------|------------------|------|------|-------|------------------|------|------|-------|
| | ZeI | ZeIH | ZeII | ZeIII | ZeI | ZeIH | ZeII | ZeIII |
| 7 Tage | 5,3 | 3,6 | 1,8 | 1,4 | 6,8 | 3,5 | 1,5 | 1,4 |
| 1 Monat | 4,4 | 2,9 | 1,4 | 2,1 | 4,0 | 3,1 | 1,8 | 1,8 |
| 6 Monate | 4,6 | 2,0 | 1,8 | 1,9 | 5,2 | 2,4 | 1,5 | 1,4 |
| 1 Jahr | 8,0 | 5,2 | 2,6 | 2,1 | 5,8 | 4,2 | 2,1 | 2,1 |
| 2 Jahre | 4,5 | 3,0 | 2,5 | 2,6 | 6,8 | 2,7 | 3,8 | 5,5 |

| Prüfalter | 80% rel. Feuchte | | | | 100% rel. Feuchte | | | |
|-----------|------------------|------|------|-------|-------------------|------|------|-------|
| | ZeI | ZeIH | ZeII | ZeIII | ZeI | ZeIH | ZeII | ZeIII |
| 7 Tage | 4,9 | 3,9 | 1,5 | 1,6 | 4,6 | 2,1 | 1,7 | 1,6 |
| 1 Monat | 3,8 | 3,1 | 1,5 | 2,0 | 4,6 | 3,0 | 1,9 | 1,7 |
| 6 Monate | 3,5 | 2,4 | 2,6 | 1,6 | 5,2 | 4,5 | 2,5 | 1,7 |
| 1 Jahr | 7,2 | 3,5 | 2,8 | 2,4 | 10,0 | 5,3 | 3,5 | 2,3 |
| 2 Jahre | 5,2 | 4,0 | 4,8 | 3,3 | 12,5 | 7,2 | 5,0 | 5,0 |

2.1.2 Einfluß der Verzinkungsart in nicht karbonatisiertem Beton

Um extreme Verhältnisse, wie sie bei einer wechselnden Durchfeuchtung von Betonbauteilen auftreten, zu simulieren und um gleichzeitig den Einfluß verschiedener Verzinkungsarten zu studieren, wurden gleichartige Prismen, wie oben beschrieben, hergestellt. Die Stähle waren verschiedenen Behandlungen unterzogen worden.

f : feuerverzinkte Stähle mit ca. 600 g/m² Zinkauflage

Tabelle 5: Rauigkeitsprüfung an feuerverzinktem Betonstahl A₀
4 Meßstellen jeweils um 90° gedreht (Angaben in μ)

| Probe Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R | 18,4 | 20,1 | 10,4 | 55,0 | 25,0 | 20,0 | 18,3 | 18,0 | 17,0 | 41,0 | 13,0 | 16,1 | 11,6 | 33,0 | 16,0 |
| | 10,1 | 25,0 | 19,0 | 21,6 | 16,9 | 22,0 | 15,0 | 25,0 | 14,9 | 9,3 | 9,9 | 23,0 | 16,7 | 10,6 | 11,0 |
| | 13,1 | 24,0 | 10,4 | 17,6 | 16,3 | 20,4 | 24,0 | 10,0 | 24,0 | 12,6 | 24,0 | 16,0 | 13,1 | 13,0 | 18,4 |
| | 9,2 | 40,1 | 12,7 | 10,7 | 35,0 | 15,9 | 10,0 | 24,1 | 14,6 | 13,6 | 13,9 | 12,0 | 9,7 | 20,3 | 18,0 |
| CLA | 2,0 | 5,5 | 2,0 | 5,6 | 2,3 | 3,3 | 2,5 | 4,6 | 2,4 | 4,3 | 2,8 | 1,8 | 1,6 | 3,6 | 2,9 |
| | 1,4 | 5,0 | 3,9 | 3,3 | 3,4 | 5,4 | 2,7 | 4,0 | 3,8 | 1,8 | 1,8 | 3,0 | 2,7 | 2,0 | 2,2 |
| | 1,5 | 4,4 | 1,4 | 3,3 | 3,0 | 2,8 | 4,0 | 2,2 | 2,7 | 2,4 | 3,4 | 3,5 | 1,4 | 1,9 | 2,5 |
| | 2,3 | 7,4 | 2,6 | 1,6 | 4,2 | 1,8 | 2,8 | 4,7 | 2,1 | 2,5 | 2,0 | 1,8 | 2,3 | 3,8 | 4,4 |
| RMS | 2,2 | 6,5 | 2,1 | 5,8 | 2,4 | 3,6 | 2,5 | 4,8 | 2,6 | 4,8 | 3,0 | 2,1 | 1,6 | 3,7 | 2,9 |
| | 1,6 | 5,5 | 4,3 | 3,7 | 3,8 | 6,1 | 3,0 | 4,3 | 4,0 | 1,9 | 1,8 | 3,3 | 2,8 | 2,1 | 2,2 |
| | 1,6 | 5,1 | 1,7 | 3,6 | 3,1 | 2,9 | 4,5 | 2,4 | 2,9 | 2,4 | 3,9 | 3,5 | 1,3 | 2,0 | 2,5 |
| | 2,3 | 8,4 | 2,9 | 1,6 | 4,5 | 2,1 | 2,9 | 5,2 | 2,2 | 2,6 | 2,0 | 1,8 | 2,3 | 3,9 | 4,6 |

| Probe Nr. | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|-----------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R | 23,0 | 11,5 | 11,5 | 19,0 | 27,5 | 25,0 | 13,5 | 17,9 | 14,6 | 13,5 | 11,1 | 34,0 | 37,0 | 14,7 | 6,7 |
| | 34,0 | 12,7 | 20,0 | 15,0 | 18,3 | 10,0 | 11,4 | 28,0 | 15,5 | 12,7 | 19,4 | 23,0 | 27,5 | 17,2 | 26,5 |
| | 19,0 | 5,9 | 22,9 | 27,5 | 7,4 | 37,0 | 13,9 | 17,7 | 23,0 | 22,6 | 21,4 | 39,5 | 17,4 | 8,4 | 26,5 |
| | 42,0 | 16,5 | 24,0 | 144,0 | 10,4 | 25,0 | 23,5 | 9,4 | 14,8 | 9,0 | 15,5 | 21,3 | 10,9 | 23,2 | 10,1 |
| CLA | 3,4 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,8 | 4,0 | 1,7 | 1,9 | 2,2 | 3,2 | 2,5 | 2,5 | 3,9 | 2,3 | 1,3 |
| | 3,2 | 2,9 | 3,9 | 2,0 | 2,8 | 2,4 | 1,5 | 6,3 | 3,1 | 2,4 | 3,7 | 4,0 | 4,0 | 1,9 | 3,5 |
| | 2,7 | 1,0 | 4,5 | 2,8 | 2,3 | 5,9 | 1,4 | 3,5 | 2,4 | 2,6 | 3,0 | 4,8 | 3,7 | 1,4 | 3,5 |
| | 3,9 | 2,4 | 4,0 | 4,3 | 2,0 | 3,8 | 3,7 | 2,9 | 3,1 | 2,4 | 2,9 | 3,5 | 1,9 | 2,4 | 1,7 |
| RMS | 3,7 | 2,3 | 2,2 | 2,2 | 3,1 | 4,5 | 1,8 | 1,9 | 2,4 | 3,4 | 2,7 | 2,7 | 4,1 | 2,4 | 1,3 |
| | 3,4 | 3,1 | 4,3 | 2,1 | 2,8 | 2,6 | 1,6 | 6,9 | 3,3 | 2,5 | 4,1 | 4,1 | 4,3 | 2,1 | 3,6 |
| | 2,9 | 1,0 | 4,6 | 3,0 | 2,4 | 6,5 | 1,5 | 4,3 | 2,5 | 2,7 | 3,1 | 5,7 | 4,0 | 1,5 | 3,6 |
| | 4,2 | 2,8 | 4,3 | 4,7 | 2,0 | 4,2 | 4,2 | 3,1 | 3,2 | 2,5 | 3,0 | 3,9 | 1,9 | 2,7 | 1,9 |

R = Rauhtiefe in μ

CLA = Center Line Average Height in μ

RMS = Root Mean Square Height in μ

r : Reinzinkauflage ca. 300 g/m²

g : galvannealte verzinkte Stäbe mit ca. 600 g/m² Zinkauflage

Die Verzinkung wurde vom Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V. übernommen, nähere Angaben liegen uns nicht vor.

Als Stahl wurde ebenfalls die Stahlsorte A₀ gewählt.

Jeweils 10 Prüfkörper der verschiedenen Varianten wurden Wechsellagerungsversuchen unterworfen, die in siebentägiger Naßlagerung, Trocknung bei 60 °C und dreitägiger Trockenlagerung bestanden (= 1 Prüfrunde).

Jeweils 2 Prüfkörper wurden nach 1, 4, 16, 32 und 64 Prüfrunden untersucht.

Insgesamt betrug die Anzahl der Prüfkörper für diesen Teil des Versuchsprogrammes 120.

Die Untersuchung der Zinkabtragung erfolgte wie weiter oben geschildert mittels Titriplex III.

Die Prüfung der Rauhtiefe konnte nur an den feuerverzinkten Stählen im Ausgangszustand durchgeführt werden. Nach dem Aufschlagen war der Meßbereich des Gerätes für die einbetonierten Stäbe nicht mehr ausreichend.

Die Messung erfolgte mit dem Perth-O-Meter (Hommelwerke GmbH, Mannheim). Der Vollständigkeit halber sind die Meßwerte in Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 6: Zinkabtragung in μ von Stählen mit normaler Feuerverzinkung (600 g/m^2), mit Reinzinkschicht (300 g/m^2) und galvannealten feuerverzinkten Stählen bei einer Wechsellagerbeanspruchung.

| | Ze I | | | Ze I H | | |
|---------------|-------|-----|------|---------|-----|------|
| | f | r | g | f | r | g |
| 1 Prüfrunde | 1,8 | 0,9 | 0 | 1,2 | 1,7 | 0,8 |
| 4 Prüfrunden | 2,9 | 4,1 | 3,5 | 2,6 | 6,1 | 1,6 |
| 16 Prüfrunden | 3,1 | 3,2 | 0,5 | 2,8 | 2,4 | 0,4 |
| 32 Prüfrunden | 9,4 | 7,0 | 16,3 | 4,8 | 6,0 | 4,1 |
| 64 Prüfrunden | 7,6 | 7,6 | 17,0 | 5,4 | 6,3 | 16,5 |
| | | | | | | |
| | Ze II | | | Ze II H | | |
| | f | r | g | f | r | g |
| 1 Prüfrunde | 1,8 | 1,7 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 3,8 |
| 4 Prüfrunden | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 1,0 |
| 16 Prüfrunden | 1,3 | 1,2 | 0,2 | 0,9 | 1,2 | 0,6 |
| 32 Prüfrunden | 3,0 | 4,0 | 10,5 | 3,4 | 3,1 | 17,5 |
| 64 Prüfrunden | 3,8 | 3,3 | 20,1 | 4,0 | 4,6 | 19,0 |

f = 600 t/m^2

r = Reinzinkschicht 300 g/m^2

g = feuerverzinkte und galvannealte Stähle (600 g/m^2)

2.2 Verhalten feuerverzinkter unbehandelter Betonrippenstähe in karbonatisiertem Beton

In einer weiteren Versuchsreihe wurden mit feuerverzinkten Rippenstähen BS 42/50RU bewehrte Betonkörper in einer Klimakammer karbonatisiert und dann einer Feucht/Trocken-Lagerung unterworfen. Zum Vergleich dienten gleichartige Versuchskörper bei denen die Stähle nicht verzinkt waren. Als Stähle wurden unbehandelte Rippenstähe $d_e = 12 \text{ mm}$ gewählt.

Tabelle 7: Materialkennwerte für Stahl A₁ – Betonrippenstahl BS 42/50 RU (St IIIa) – Herstellerwerk: Eisenwerk Annahütte-Hammerau

| d_e x) | F_e | B_S | B_Z | b_{10} | Behandlung |
|----------|-----------------|--------------------|-------|----------|--------------------------------------------------------------|
| mm | mm ² | kp/mm ² | | % | |
| 11,95 | 112,20 | 44,60 | 64,76 | 22,5 | Ausgangszustand |
| 11,96 | 112,37 | 44,67 | 64,61 | 24,2 | |
| 11,96 | 112,43 | 44,83 | 64,57 | 23,4 | |
| 11,97 | 112,57 | 44,77 | 64,67 | 24,2 | |
| 11,98 | 112,73 | 44,71 | 64,40 | 22,5 | |
| 11,95 | 112,17 | 45,91 | 64,63 | 22,5 | |
| 11,95 | 112,22 | 45,27 | 64,52 | 22,5 | |
| 11,96 | 112,38 | 45,20 | 64,42 | 21,7 | |
| 11,95 | 112,19 | 44,39 | 64,35 | 25,0 | |
| 11,95 | 112,21 | 44,74 | 64,34 | 23,3 | |
| 11,96 | 112,38 | 44,13 | 65,85 | 24,2 | |
| 11,95 | 112,08 | 44,43 | 64,42 | 22,5 | unverzinkt, einbetoniert nach ca. 1-jähriger Wechsellagerung |
| 11,95 | 112,12 | 44,60 | 64,75 | 23,3 | |
| 11,98 | 112,48 | 44,81 | 64,19 | 25,0 | unverzinkt, einbetoniert nach ca. 2-jähriger Wechsellagerung |
| 11,98 | 112,74 | 44,71 | 64,22 | 25,0 | |
| 11,95 | 112,21 | 44,02 | 65,95 | 24,2 | |
| 11,98 | 112,79 | 45,98 | 64,01 | 20,8 | |
| 12,01 | 113,31 | 44,31 | 64,07 | 22,5 | |
| 12,00 | 113,16 | 45,07 | 64,15 | 24,2 | verzinkt, vor Einbau |
| 12,08 | 114,56 | 47,31 | 67,39 | 23,4 | |
| 12,00 | 113,14 | 45,13 | 60,10 | 24,2 | |
| 12,10 | 114,95 | 44,37 | 62,12 | 25,8 | |
| 12,14 | 115,81 | 47,15 | 65,97 | 23,4 | |
| 12,33 | 119,37 | 43,06 | 61,16 | 22,5 | verzinkt, einbetoniert, vor Karbonatisierung des Betons |
| 12,32 | 119,22 | 42,61 | 62,74 | 20,0 | |
| 12,32 | 119,20 | 43,45 | 61,07 | 22,5 | |
| 12,36 | 119,96 | 42,52 | 62,19 | 24,2 | verzinkt, einbetoniert nach ca. 1-jähriger Wechsellagerung |
| 12,27 | 118,23 | 43,81 | 61,74 | 25,0 | |
| 12,31 | 119,06 | 42,16 | 62,82 | 24,2 | verzinkt, einbetoniert nach ca. 2-jähriger Wechsellagerung |
| 12,32 | 119,23 | 42,44 | 61,56 | 18,3 | |
| 12,29 | 118,65 | 42,14 | 62,87 | 20,8 | |

x) aus Gewicht bestimmt

Stahl A₁ mit hoher Bruchdehnung
Stahl B₁ mit niedriger Bruchdehnung

Die Analysen der Stähle sind in Tabelle 2, die mechanischen Kennwerte sind in den Tabellen 7 und 8 enthalten. Für die Herstellung des Feinbetons wurden die Zemente Ze II und Ze IIIH, also jeweils die mit dem niedrigsten Chromatgehalt gewählt.

Tabelle 8: Materialkennwerte für Stahl B₁ – Betonrippenstahl BS 42/50 KU (St III a) – Herstellerwerk: Acciaieria Pisogne

| d_e x) | F_e | B_S | $B_{0,2}$ | B_Z | b_{10} | Behandlung |
|----------|-----------------|--------------------|-----------|-------|----------|--------------------------------------------------------------|
| mm | mm ² | kp/mm ² | | % | | |
| 11,77 | 109,00 | | 52,37 | 82,96 | 15,0 | Ausgangszustand |
| 11,87 | 110,68 | | - | 85,11 | 14,2 | |
| 11,80 | 109,37 | | 53,03 | 84,66 | 13,3 | |
| 11,93 | 111,82 | | 47,40 | 80,66 | 12,5 | |
| 11,90 | 111,21 | | 48,73 | 84,89 | 12,5 | unverzinkt, einbetoniert nach Karbonatisierung des Betons |
| 11,75 | 108,52 | | 53,44 | 85,70 | 13,3 | |
| 11,93 | 111,75 | | 49,67 | 82,33 | 15,0 | |
| 11,92 | 111,65 | | 51,95 | 85,45 | 13,3 | unverzinkt, einbetoniert nach ca. 1-jähriger Wechsellagerung |
| 11,88 | 110,84 | | 50,07 | 84,26 | 13,3 | |
| 11,98 | 112,75 | | 51,62 | 85,85 | 12,5 | |
| 11,76 | 108,67 | | 52,27 | 84,66 | 11,7 | |
| 11,98 | 112,64 | | 53,30 | 84,69 | n.b. | |
| 11,91 | 111,33 | | 51,20 | 84,97 | 14,2 | unverzinkt, einbetoniert nach ca. 2-jähriger Wechsellagerung |
| 12,17 | 116,39 | 51,72 | | 76,47 | 15,8 | verzinkt, vor Einbau |
| 12,11 | 115,13 | 54,20 | | 78,52 | 13,4 | |
| 12,11 | 115,19 | 52,09 | | 76,75 | 12,5 | |
| 12,15 | 115,90 | 53,32 | | 76,79 | 13,4 | |
| 12,15 | 115,86 | 54,03 | | 77,51 | 11,7 | |
| 12,21 | 117,03 | 53,83 | | 77,25 | 12,5 | |
| 12,12 | 115,29 | 53,60 | | 77,54 | 12,5 | |
| 12,08 | 114,68 | 53,72 | | 77,78 | 11,7 | |
| 12,15 | 115,99 | 53,80 | | 77,25 | 13,3 | |
| 12,21 | 117,09 | 53,29 | | 76,18 | 11,7 | verzinkt, einbetoniert, vor Karbonatisierung des Betons |
| 12,28 | 118,41 | 54,39 | | 76,51 | 12,5 | |
| 12,13 | 115,65 | 53,26 | | 76,27 | 13,3 | |
| 12,33 | 119,33 | 54,97 | | 76,59 | 11,7 | |
| 12,15 | 115,88 | 51,43 | | 76,46 | - | verzinkt, einbetoniert, nach ca. 1-jähriger Wechsellagerung |
| 12,32 | 119,30 | 52,64 | | 75,44 | 12,5 | |
| 12,37 | 120,13 | 55,27 | | 76,91 | 13,3 | |
| 12,29 | 118,70 | 53,75 | | 76,16 | 11,7 | |
| 12,24 | 117,75 | 53,16 | | 75,75 | 11,7 | verzinkt, einbetoniert, nach ca. 2-jähriger Wechsellagerung |
| 12,20 | 116,98 | 52,32 | | 76,59 | 10,8 | |
| 12,19 | 116,62 | 53,08 | | 76,23 | 13,3 | |

x) aus Gewicht bestimmt

Die Stähle waren feuerverzinkt (Schörg und Sohn, München) mit einer Sollauflage von ca. 600 g/m^2 .

Die Betonrezeptur ist in Tabelle 9 angegeben. Die Betondruckfestigkeit betrug im Alter von 7 Tagen im Mittel 286 kp/cm^2 .

Tabelle 9: Zusammensetzung des Betons

| Siebdurchgang der Zuschläge | |
|-----------------------------|------|
| 0,2 mm | 15% |
| 1,0 mm | 45% |
| 3,0 mm | 84% |
| 7,0 mm | 100% |

Betonrezeptur

| Beton aus Portlandzement | | Beton aus Hochofenzement |
|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| Zementmenge | 350 kg/m^3 | 370 kg/m^3 |
| Zuschläge 0 - 7 | 1760 kg/m^3 | 1700 kg/m^3 |
| Wasser | 210 l/m^3 | 225 l/m^3 |
| w/z-Wert | 0,60 | 0,61 |

Da für den Untersuchungszweck die Betondruckfestigkeit ohne Belang ist, wurde auf eine weitergehende Charakterisierung des Feinbetons verzichtet. Die Maße der Prüfkörper betrugen 4 x 4 x 60 cm. Nach etwa einmonatiger Lagerung in der Halle des Institutes wurden die Probekörper in einem Klimaraum (20 °C, 55 % r.F.), dessen Atmosphäre auf 3 Vol. % CO₂ angereichert war, karbonatisiert.

Jeweils 9 Prüfkörper von jeder Variante wurden dann einer Wechsellagerung unterzogen, die aus 6 Tagen Lagerung im Sprühwasser (Münchener Leitungswasser) und 10 Tagen Trockenlagerung bestand.

Je 6 Prüfkörper mit den Stählen A₁ und B₁ verzinkt, wurden nach Karbonatisierung in einem Klimaraum gelagert.

Insgesamt wurden 144 Prüfkörper hergestellt und untersucht.

2.2.1 Zinkabtragung

Die Zinkabtragung läßt sich aufgrund der komplizierten Geometrie der Rippenstähle nicht auf die selbe Art berechnen. Um wenigstens untereinander Vergleichswerte zu erhalten, wurde die abgetragene Zinkmenge auf cm-Stahllänge angegeben. Es war ohnehin nicht Ziel dieser Versuchsreihe, die Zinkabtragung zu ermitteln, es sollte vielmehr die korrosionsschützende Wirkung des Zinküberzugs im karbonatisierten Beton im Vergleich mit blanken Stählen überprüft werden.

Die Zinkabtragung vor der Karbonatisierung war so gering, daß eine Angabe nicht sinnvoll ist. Diese Erscheinung mag mit der trockenen Lagerung in der Halle des Institutes zusammenhängen.

Nach der Karbonatisierung wurden folgende Werte ermittelt:

| | | |
|----------------------|--------|---------------------|
| Stahl A ₁ | Ze II | 20,0 mg Zink pro cm |
| Stahl A ₁ | Ze IHH | 9,2 mg Zink pro cm |
| Stahl B ₁ | Ze II | 22,2 mg Zink pro cm |
| Stahl B ₁ | Ze IHH | 5,2 mg Zink pro cm |

Es handelt sich hier und im folgenden jeweils um die Mittelwerte aus 3 Bestimmungen an 4 cm langen Abschnitten.

Weder die verzinkten noch die nicht verzinkten Stähle waren zu diesem Zeitpunkt korrodiert.

Nach halbjähriger Lagerung im Klimaraum bzw. Wechsellagerung anschließend an die Karbonatisierung ergaben sich folgende Werte:

| | | Klimaraum | Wechsellagerung |
|----------------------|--------|---------------|-----------------|
| Stahl A ₁ | Ze II | 40,0 mg Zn/cm | 24,0 mg Zn/cm |
| Stahl A ₁ | Ze IHH | 25,1 mg Zn/cm | 15,8 mg Zn/cm |
| Stahl B ₁ | Ze II | 25,7 mg Zn/cm | 30,9 mg Zn/cm |
| Stahl B ₁ | Ze IHH | 28,8 mg Zn/cm | 33,4 mg Zn/cm |

Erstaunlich ist dabei, daß mit der Stahlsorte A₁ offenbar bei der Lagerung im Klimaraum die Abtragung am

höchsten ist, dagegen bei der Stahlsorte B₁ bei der Lagerung in Wechsellagerung. Da die absoluten Werte jedoch sehr ähnlich sind, muß auf eine zufällige Abweichung geschlossen werden. Die starken Unterschiede zwischen dem Verhalten der im Feinbeton aus Hochofenzement und der im Feinbeton aus Portlandzement einbetonierten Stähle, wie sie nach der Karbonatisierung festgestellt wurden, haben sich ausgeglichen. Wir erklären uns diese Erscheinung damit, daß der Beton aus Hochofenzement in der CO₂-Kammer wie bekannt schneller karbonatisiert und daß nach der unter Wasserabspaltung ablaufenden Karbonatisierung (Ca(OH)₂ + CO₂ → CaCO₃ + H₂O) unter den verhältnismäßig trockenen Umgebungsbedingungen in der CO₂-Kammer (55 % r.F.) die Zinkauflösung zunächst zum Stillstand kam. Bei der erhöhten Luftfeuchtigkeit im Klimaraum und insbesondere bei der Wechsellagerung löste sich die Zinkschicht dann jedoch sehr schnell bis zu dem Betrag, der auch bei den übrigen Versuchen ermittelt wurde. Gestützt wird diese Vermutung durch die Feststellung, daß nach zweijähriger Lagerung kein signifikanter Zuwachs an Abtragung mehr auftrat.

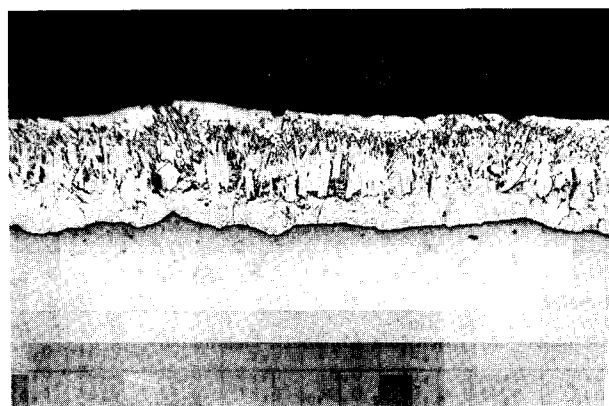


Bild 1: Metallografischer Schliff, Feuerverzinkter Stahl (A₀) vor dem Einbetonieren. Vergrößerung 200fach.

Bild 1 zeigt in einem metallographischen Schliff¹⁾ den Aufbau der Zinkschicht vor dem Einbetonieren der Stäbe. In Bild 2 ist deutlich erkennbar die oberste Reinzinkschicht durch Einwirkung des alkalischen Betons weggeätzt, im Bereich der Rippen geht die Veränderung der Zinkschicht schon weitaus tiefer (Bild 3).

Die Zinkabtragung nach 2jähriger Wechsellagerung bzw. Lagerung im Klimaraum ergab folgende Werte:

| | | Klimaraum | Wechsellagerung |
|----------------------|--------|---------------|-----------------|
| Stahl A ₁ | Ze II | 38,1 mg Zn/cm | 29,4 mg Zn/cm |
| Stahl A ₁ | Ze IHH | 28,2 mg Zn/cm | 21,9 mg Zn/cm |
| Stahl B ₁ | Ze II | 29,4 mg Zn/cm | 33,2 mg Zn/cm |
| Stahl B ₁ | Ze IHH | 28,9 mg Zn/cm | 34,8 mg Zn/cm |

1) Anfertigung durch Herrn Dr. Horstmann, Max-Planck-Institut für Eisenforschung.

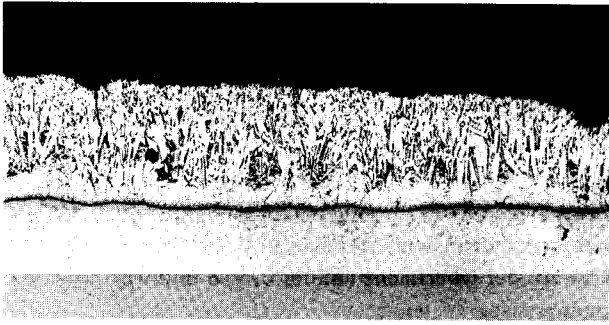


Bild 2: Metallografischer Schliff, Feuerverzinkter Stahl (A_1) nach 2jähriger Wechsellagerung im einbetonierten Zustand.
Vergrößerung 100fach.

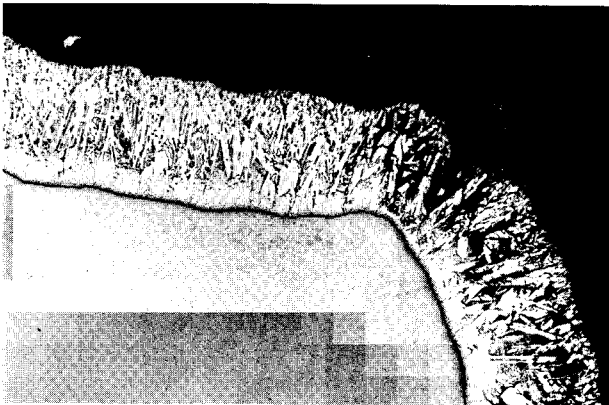


Bild 3: Metallografischer Schliff, Feuerverzinkter Stahl (A_1) nach 2jähriger Wechsellagerung im einbetonierten Zustand. Bereich der Rippenkante.
Vergrößerung 100fach.

Diese Abtragungen entsprechen umgerechnet in μ in etwa den Werten, wie sie unter 2.1.1 und 2.1.2 ermittelt wurden, auf die Umrechnung wurde jedoch aus den oben angeführten Gründen verzichtet.

2.2.2 Vergleich des Korrosionsverhaltens zwischen verzinkter und unverzinkter Bewehrung in Beton

Bevor die Prüfkörper im CO_2 -Raum karbonatisiert wurden, zeigt sich erwartungsgemäß keinerlei Rostangriff auf den unverzinkten Stäben. Die verzinkten Stäbe sind mit einer dünnen festhaftenden Schicht überzogen, die aus Calciumhydroxozinkat mit Zementmörtel bestehen dürfte (Bild 4).

An einigen wenigen Stäben war das Feinbetongefüge in unmittelbarem Kontakt mit der verzinkten Stahloberfläche stark gestört. Auf den Stählen zeichnete sich eine „Mosaikstruktur“ ab, die wir auf die Entwicklung von Wasserstoff während der Erstarrungsphase des Zementleims zurückführen (Bild 5). Diese Erscheinung wurde nur an einzelnen Stäben beobachtet und zwar nur bei solchen, die in Beton eingebettet waren, der mit Ze II also dem Portlandzement mit dem niedrigen Chromatgehalt von 7,25 ppm hergestellt war.

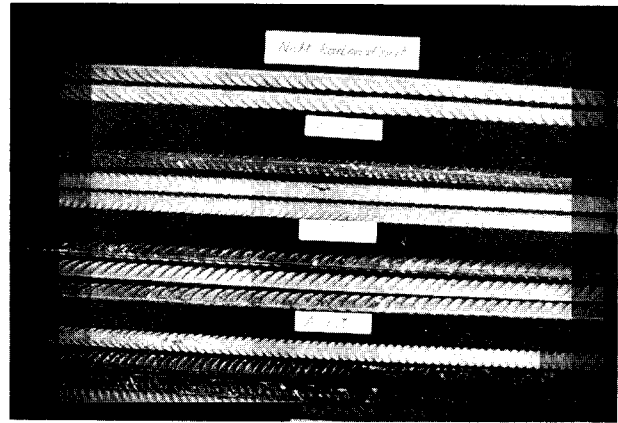


Bild 4: Übersicht über das Aussehen der einbetonierten, verzinkten und unverzinkten Stähle A_1 und B_1 , ausgebaut vor der Karbonatisierung des Betons.

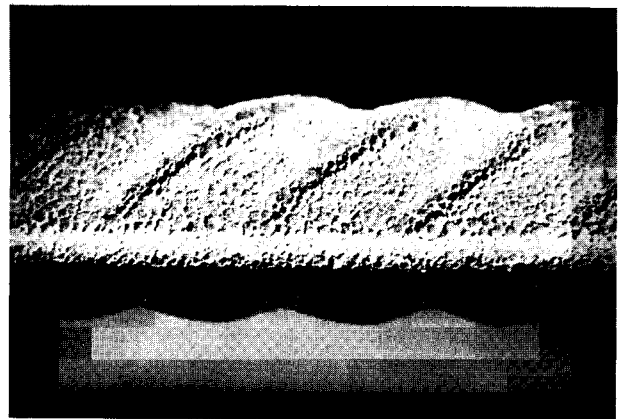


Bild 5: Ausgebauter Betonrippenstahl (A_1) mit „Mosaikstruktur“.

Bereits unmittelbar nach der Karbonatisierung des Betons beginnt der Rostangriff auf den unverzinkten Stahl. Das ist unter anderem mit darauf zurückzuführen, daß beim Karbonatisierungsablauf Wasser entsteht, das in der sonst verhältnismäßig trockenen Umgebung ausreicht, die Korrosion der unverzinkten Stäbe in Gang zu bringen. Bei einem Vergleich scheint der Korrosionsangriff auf den unverzinkten Stahl in Beton aus Hochofenzement etwas stärker ausgeprägt als in Portlandzementbeton, dies dürfte mit dem etwas schnelleren Anlaufen der Karbonatisierung des Betons aus Hochofenzement zusammenhängen. Die nach Augenschein etwas geringere Korrosion des Stahles B_1 ist wohl nur zufällig bedingt.

Nach halbjähriger Lagerung im Klimaraum bei $20^\circ C$ und 60 % r.F. ist der Rostangriff noch sehr schwach. Die verzinkten Stähle zeigen keine äußerlich erkennbare Schädigung. Die unvermeidlichen Streuungen bei Korrosionsversuchen unter nahezu „natürlichen“ Bedingungen führten dazu, daß bei Aufschlagen nach der Karbonatisierung besonders stark korrodierte Stähle zufällig ausgewählt wurden. So wird der Eindruck vorgetäuscht, als ob bei der Lagerung im Klimaraum wieder eine Verminderung der Korrosion erfolgt sei.

Die halbjährige Behandlung in der Wechsellagerung zeigt im Vergleich zur Klimaraumlagerung deutlich stärkere Oberflächenkorrosion der unverzinkten Stähle; die verzinkten Stäbe sind nicht angegriffen.

Grundsätzlich haben sich nach 1jähriger Lagerung die bereits nach der Karbonatisierung angedeuteten Tendenzen verstärkt. Außer einer Verstärkung des Korrosionsangriffs bei den unverzinkten Stäben, besonders deutlich bei der Wechsellagerung, ist jedoch kein neuer Einfluß zu

bemerken. Die verzinkten Stäbe sind nach wie vor ohne äußerlich sichtbaren Korrosionsangriff.

Nach Abschluß der Versuchsreihe mit Ende der zweijährigen Behandlung im Klimaraum bzw. in der Wechsellagerung zeigen die verzinkten Stäbe des Stahles A₁ und B₁ sowohl in karbonatisiertem Beton aus Portlandzement wie aus Hochofenzement keinen Angriff der den Stahluntergrund erreicht und somit keinerlei Spuren von Rost auf der Oberfläche (Bilder 6, 7, 8 und 9).



Bild 6: Übersicht über das Aussehen des verzinkten und unverzinkten Stahles A₁ nach 2jähriger Lagerung im Klimaraum bzw. Behandlung in der Wechsellagerung, Portlandzement-Beton.

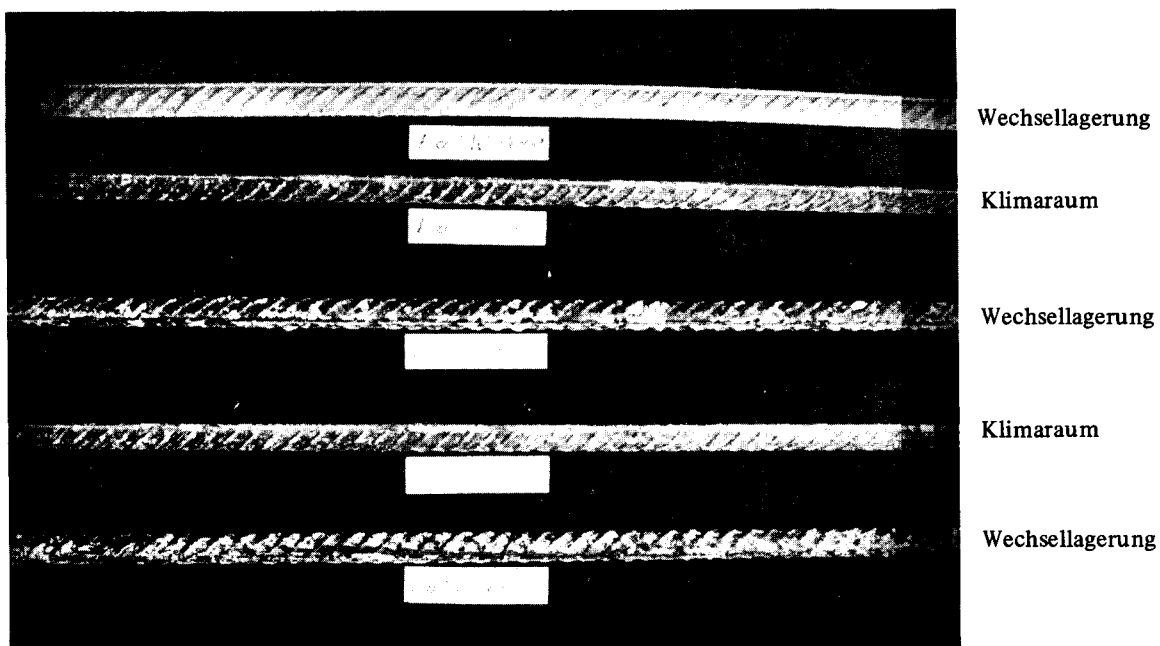


Bild 7: Übersicht über das Aussehen des verzinkten und unverzinkten Stahles A₁ nach 2jähriger Lagerung im Klimaraum bzw. Behandlung in der Wechsellagerung, Beton aus Hochofenzement.

Die unverzinkten Stähle dagegen zeigen in allen Fällen Oberflächenrost, der bei der Lagerung im Klimaraum als geringfügig angesehen werden kann; bei der Behandlung in der Wechsellagerung ist jedoch ein unvermindertes Fortschreiten der Korrosion festzustellen, das nach zweijähriger Versuchsdauer bereits zu festhaftenden Rostkrusten geführt hat.

Es zeigt sich bei dieser Versuchsreihe, daß durch die Verzinkung des Stahles selbst unter extrem ungünstigen

Bedingungen — Karbonatisierung des Betons und wechselnde Durchfeuchtung — das Auftreten von Rost an der Bewehrung verhindert werden kann.

2.3 Verhalten verzinkter Betonstähle (unbehandelt) im Zug- und Biegeversuch

Daß an Stähle, die im Beton Zugkräfte übernehmen sollen, bestimmte Anforderungen in Bezug auf Streckgrenze und Zugfestigkeit zu stellen sind, ist ohne

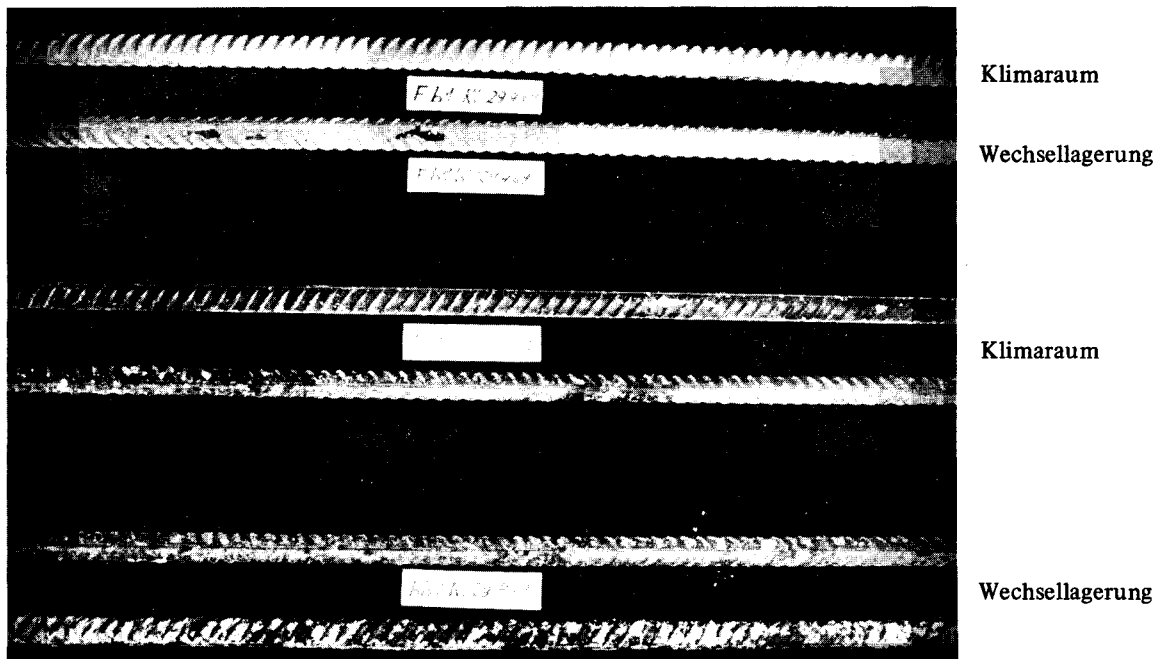


Bild 8: Übersicht über das Aussehen des verzinkten und unverzinkten Stahles B₁ nach 2jähriger Lagerung im Klimaraum bzw. Behandlung in der Wechsellagerung, Portlandzement-Beton.

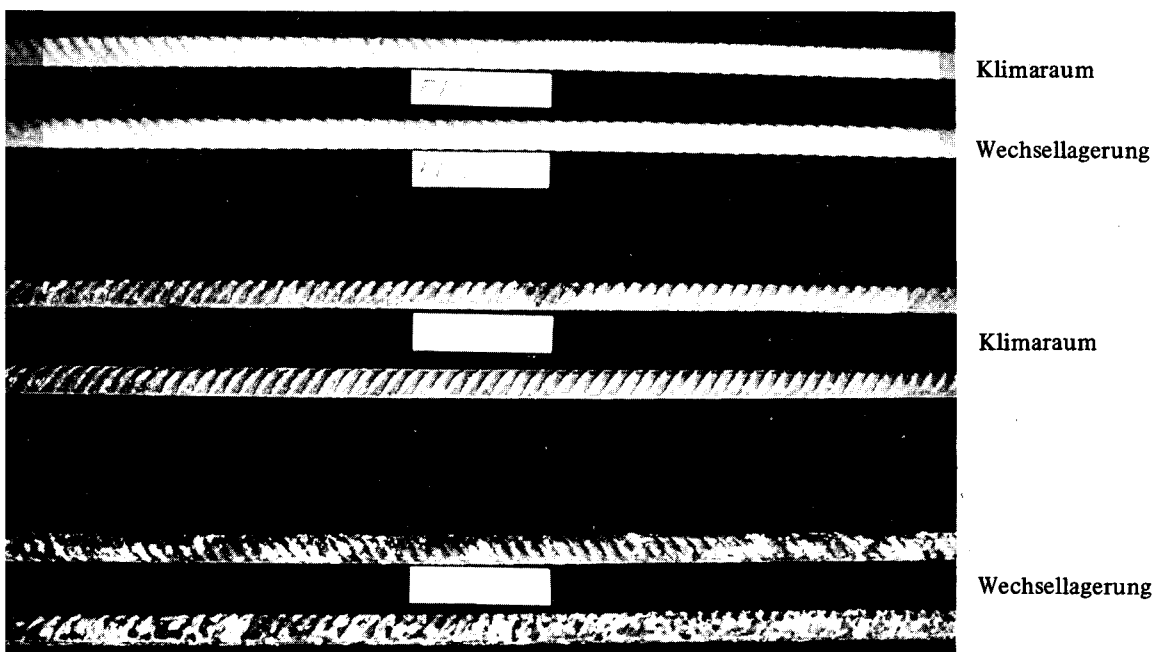


Bild 9: Übersicht über das Aussehen des verzinkten und unverzinkten Stahles B₁ nach 2jähriger Lagerung im Klimaraum bzw. Behandlung in der Wechsellagerung, Beton aus Hochofenzement.

weiteres klar. Darüberhinaus sind jedoch weitere Stahleigenschaften von Bedeutung, die sich unter dem Stichwort Verformungsvermögen zusammenfassen lassen.

Betonstähle müssen – häufig auf der Baustelle selbst – zu Bewehrungskörben verflochten und in engen Radien gebogen werden. Sie sind starker mechanischer Beanspruchung beim Transport, auf der Baustelle und beim Einbringen in die Schalung ausgesetzt.

Für verzinkte Betonstähle ergeben sich somit 2 grundsätzliche Bedingungen. Zum einen dürfen durch den Verzinkungsvorgang die mechanischen Kennwerte des Stahles wie Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung nicht zum Ungünstigen hin verändert werden, zum anderen muß die Verzinkungsschicht, wenn sie im Beton eine Schutzwirkung ausüben soll, die verschiedenen Beanspruchungsarten durch Verformung, Abrieb und sonstige rauhe Behandlung vor dem Einbetonieren ohne nennenswerten Schaden überstehen.

2.3.1 Verhalten im Zugversuch

Die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche sind in den Tabellen 3, 7, 8 zusammengestellt.

Bei der Bewertung der Prüfergebnisse muß der Anteil der Zinkschicht am Querschnitt berücksichtigt werden; die Einzelwerte der Querschnitte in den Tabellen 3, 7, 8 sind aus dem Gewicht, also einschließlich Zinkgewicht, wie bei der Betonstahlprüfung üblich, ermittelt. Für den Vergleich unverzinkter und verzinkter Proben muß daher eine Umrechnung der Ergebnisse der verzinkten Proben auf den reinen Stahlquerschnitt erfolgen, da die Zinkschicht wegen des geringeren E-Moduls und einer wesentlich kleineren Zugfestigkeit kaum einen Beitrag zur Gesamtbruchlast des Stabes liefert. Rechnet man die Ergebnisse der Zugversuche an verzinkten Proben auf den unverzinkten Querschnitt des Ausgangsmaterials um, so erhält man im Mittel folgende Werte:

| Probenanzahl n | F_0 mm ² | R_S kp/mm ² | $R_{0,2}$ kp/mm ² | R_Z kp/mm ² | b_{10} % | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------------------------|
| Stahl A₀ | | | | | | |
| 9 | 111,9 | | 30,3 | 61,0 | 22,1 | nicht verzinkt |
| 5 | 111,9 | 44,2 | | 58,0 | 22,7 | galvanealt ¹⁾ |
| 5 | 111,9 | 40,6 | | 59,1 | 23,3 | 300 g/m ² (Reinzink) ¹⁾ |
| 5 | 111,9 | 42,3 | | 59,2 | 23,0 | 600 g/m ² (feuerverzinkt) ¹⁾ |
| 4 | 111,9 | 38,6 | | 60,0 | 22,1 | 600 g/m ² (feuerverzinkt) ²⁾ |
| Stahl A₁ | | | | | | |
| 19 | 112,31 | 44,8 | | 64,6 | 23,2 | nicht verzinkt |
| 12 | 112,31 | 46,0 | | 65,4 | 23,4 | 600 g/m ² (feuerverzinkt) ²⁾ |
| Stahl B₁ | | | | | | |
| 13 | 110,76 | | 51,0 | 84,5 | 13,1 | nicht verzinkt |
| 20 | 110,76 | 56,4 | | 81,0 | 12,7 | 600 g/m ² (feuerverzinkt) ²⁾ |

1) Verzinkt durch Gemeinschaftsausschuß Verzinken

2) Verzinkt durch Fa. Schörg u. Sohn, München

Wie aus den Tabellen 7 und 8 hervorgeht, war innerhalb der Versuchsdauer weder bei den verzinkten noch bei den

unverzinkten Stäben ein zeitlicher Einfluß auf die Zugversuchswerte vorhanden. Das bedeutet, daß bei den korrodierten unverzinkten Proben die Schädigung noch zu gering war, um sich im Zugversuch zu zeigen. Für die verzinkten Stäbe, die während der Versuchsdauer nicht korrodiert waren, läßt sich daraus schließen, daß eine Versprödung nicht eingetreten ist. Die Zusammenfassung aller verzinkten und nicht verzinkten Proben, wie vorstehend geschehen, ist daher gerechtfertigt.

Vergleicht man die Mittelwerte von verzinkten und unverzinkten Proben, so läßt sich feststellen:

Bei den Stählen A₀ und B₁, die im Ausgangszustand keine ausgeprägte Streckgrenze aufwiesen, trat diese nach dem Verzinken auf, wobei der Streckgrenzenwert R_S deutlich über dem ursprünglichen $R_{0,2}$ -Wert liegt. Die Verzinkungsart war dabei ohne wesentlichen Einfluß.

Bei Stahl A₁, der bereits vor dem Verzinken eine ausgeprägte Streckgrenze aufwies, kann ebenfalls auf eine allerdings geringfügige Erhöhung der Streckgrenze nach Verzinken geschlossen werden.

Zugfestigkeit und Bruchdehnung wurden durch das Verzinken bei keiner der drei Stahllarten verändert.

2.3.2 Verhalten im Biegeversuch

2.3.2.1 Faltversuche

Entsprechend den geltenden Vorschriften für Betonstähle wurden am glatten Rundstahl (Stahl A₀) an verzinkten und unverzinkten Proben Faltversuche um einen Biegedurchmesser $D = 2 d_e$ (= 24 mm) bis zu einem Biegewinkel von ca. 180° durchgeführt.

Jeweils 5 Proben der Behandlungsarten

unverzinkt (Ausgangsmaterial)

galvanealt

300 g/m² Reinzinkschicht

600 g/m² feuerverzinkt

ließen sich unter den oben genannten Bedingungen bis zu 180° biegen, ohne daß Anrisse oder Brüche im Stahl auftraten.

Wie bereits eine augenscheinliche Betrachtung zeigte, wiesen die verzinkten Proben Druck- und Schleifstellen im Bereich der Biegerollen und der Gegenhalter auf. Wie Bild 10 zeigt, waren in Einzelfällen auch Abplatzungen auf der Zugseite zu beobachten. Bei den Proben mit Reinzinkauflagen und denjenigen mit Feuerverzinkung waren außerdem im Bereich der Krümmung Risse in der Zinkschicht zu beobachten. Um den Zustand der Zinkschichten nach dem Biegen zu dokumentieren, wurden metallografische Schliffe¹⁾ und Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop²⁾ vorgenommen.

1) Anfertigung durch Dr. Horstmann, Max-Planck-Institut für Eisenforschung

2) Anfertigung gemeinsam mit Dr. Klingele, München

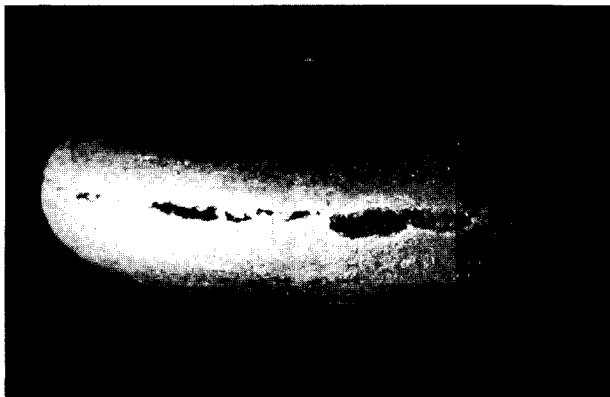


Bild 10: Abplatzungen der Zinkschicht auf der Zugseite beim Faltversuch (Stahl A₀).

Wie die Bilder 11 – 15 zeigen, sind in der Zugzone der Faltversuchsproben stets Risse vorhanden (auch bei den galvanealten), wobei eine deutliche Abstufung hinsichtlich Rißbreite und Rißabstand vorhanden ist.

Die größten Werte treten bei normaler Feuerverzinkung auf, die kleinsten bei galvanealten.

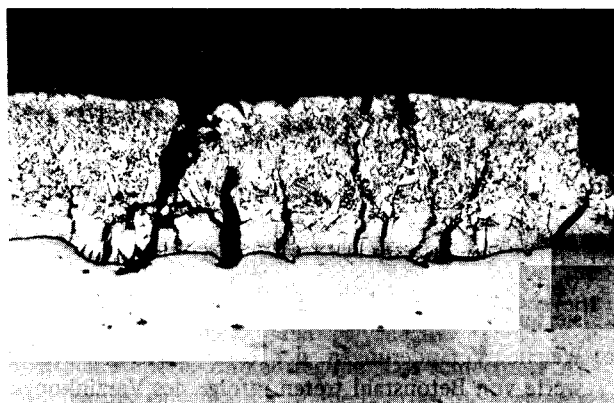


Bild 11: Feuerverzinkter Stahl (A₀), Risse im Bereich der Zugzone beim Faltversuch, Vergrößerung 200fach, metallografischer Schliff.

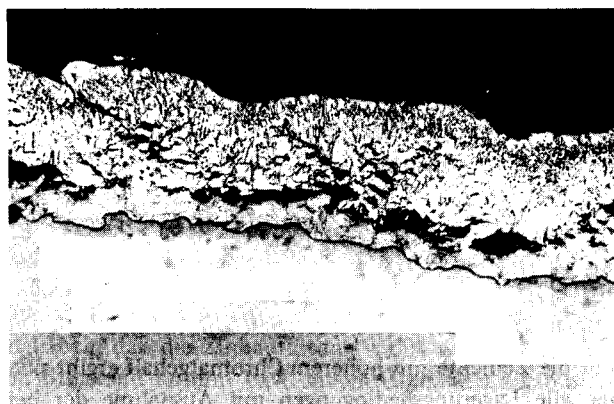


Bild 12: Feuerverzinkter Stahl (A₀), Risse im Bereich der Druckzone beim Faltversuch, Vergrößerung 200fach, metallografischer Schliff.

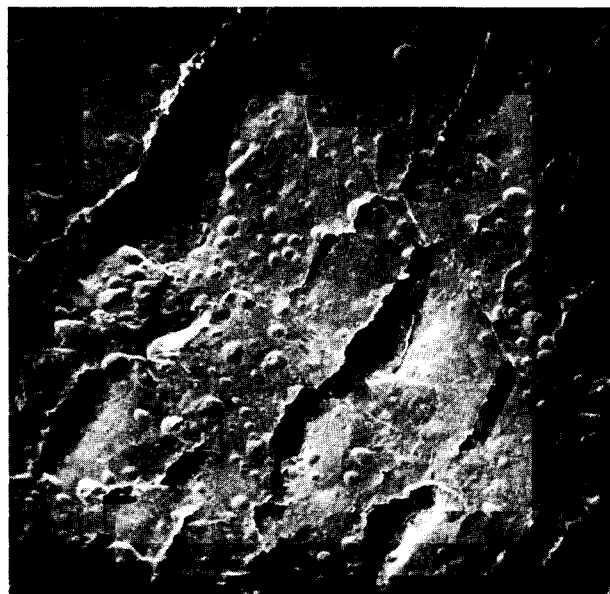


Bild 13: Feuerverzinkter Stahl (A₀), Risse im Bereich der Zugzone beim Faltversuch, Vergrößerung 20fach, Rasterelektronenmikroskop.

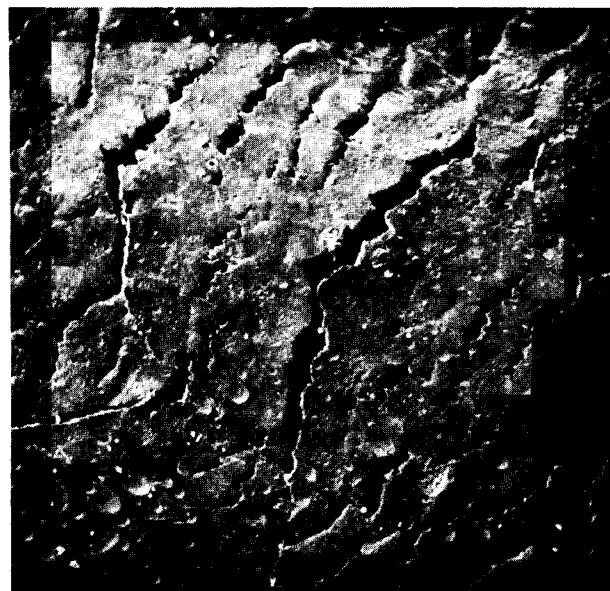


Bild 14: Stahl mit Reinzinkauflage (A₀), Risse im Bereich der Zugzone beim Faltversuch, Vergrößerung 20fach, Rasterelektronenmikroskop.

Wie aus dem Bild 11 zu ersehen ist, gehen die Risse auf der Zugseite teilweise bis zur Stahloberfläche durch. In der Druckzone sind dagegen Risse parallel zur Oberfläche entstanden (siehe Bild 12).

2.3.2.2 Rückbiegeversuche

Entsprechend den geltenden Vorschriften für Betonstähle wurden an den gerippten Stählen (Stahl A₁ und B₁) an verzinkten und unverzinkten Proben vor dem Einbau sowie an verzinkten Proben nach ca. 2jähriger

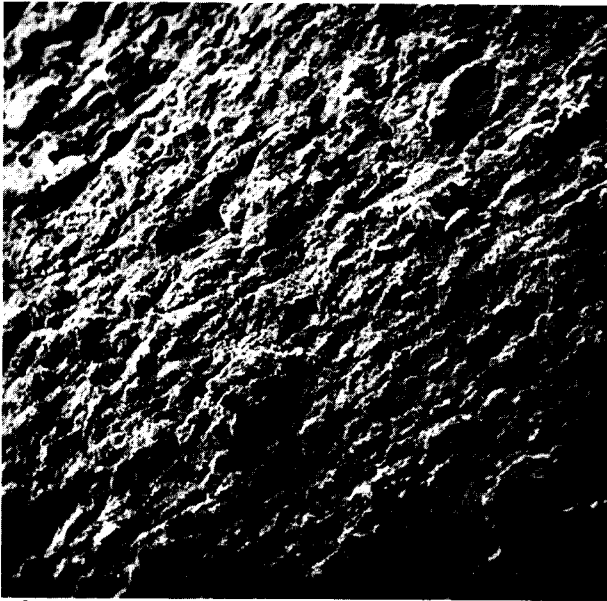


Bild 15: Galvanealter feuerverzinkter Stahl (A_0), Risse im Bereich der Zugzone beim Faltversuch, Vergrößerung 20fach, Rasterelektronenmikroskop.

Wechselagerung Rückbiegeversuche durchgeführt. Dabei wurden die Stäbe zunächst um einen Biegedorn von $D = 5 d_e$ ($= 60 \text{ mm}$) bis zu einem Biegewinkel von ca. 90° gebogen, anschließend 1/2 Stunde bei 250°C künstlich gealtert und nach Abkühlen auf Raumtemperatur zurückgebogen.

An jeder Stahlart und jeder Variante wurden 5 Versuche durchgeführt. Alle Proben ließen sich, ohne daß Anrisse oder Brüche im Stahl auftraten, um mehr als 45° zurückbiegen.

Hinsichtlich des Verhaltens der Zinkschicht beim Hin- und Zurückbiegen ergaben sich bei den nicht einbetonierten Proben zwischen den Stählen A_1 und B_1 Unterschiede. Bei Stahl B_1 traten im äußeren und inneren Bereich der Krümmung Querrisse und Abplatzungen der Zinkschicht (siehe Bild 16 und 17) auf. Bei Stahl A_1 waren dagegen nur im inneren Bereich der Krümmung vereinzelt sehr feine Querrisse zu beobachten.



Bild 16: Feuerverzinkter Rippenstahl (B_1) nach dem Rückbiegeversuch, Krümmungsaußenseite.



Bild 17: Feuerverzinkter Rippenstahl (B_1) nach dem Rückbiegeversuch, Krümmungsinseite.

Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten kann möglicherweise in verschiedenem Abkühlen nach dem Zinkbad begründet sein; die Stähle A_1 zeigten nämlich eine glänzende Oberfläche, während die Stähle B_1 mit ihrer matten Oberfläche mehr galvanealten Stählen ähnelten. Die geringen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung dürften kaum als Ursache für das vorbeschriebene Verhalten in Frage kommen.

3. Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Im Auftrag des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V., Düsseldorf, wurde am Institut für Massivbau ein mehrjähriges Versuchsprogramm mit folgender Themenstellung bearbeitet:

- Welche Veränderungen erfährt die Zinkschicht auf Betonstahl im alkalischen Beton.
- Ergibt sich durch Verzinken der Bewehrung eine Verbesserung des Korrosionsschutzes im karbonatisierten Beton.
- Welche Veränderungen der technologischen Kennwerte von Betonstahl treten infolge des Verzinkungsvorgangs auf.

3.1 Verhalten der Zinkschicht im alkalischen Beton

In einer ersten Versuchsreihe wurden feuerverzinkte Betonstähle in Zementmörtel eingebettet und die Zinkabtragung in Abhängigkeit von der Zeit und den Lagerungsbedingungen ermittelt. Die Prüfkörper wurden bei 40, 60, 80 und 100 % r.F. gelagert. Die Ermittlung der Zinkauflösung erfolgte durch chem. Bestimmung des oxidierten Zinkes an der Oberfläche des verzinkten Stahles und im umgebenden Beton. Die Werte wurden dann in Schichtdicke metallisches Zink umgerechnet. Es waren 4 Zementsorten in das Versuchsprogramm einbezogen, jeweils 2 Portlandzemente und zwei Hochofenzemente mit hohem und niedrigem Chromatgehalt.

Für die Zemente mit höherem Chromatgehalt ergibt sich für alle Lagerungsbedingungen mit Ausnahme der bei 100 % r.F., daß bereits innerhalb einer Woche die Zinkabtragung im wesentlichen zum Stillstand kommt. Die Abtragung liegt unter 10μ , und ist bei Mörtel aus

Hochofenzement noch deutlich kleiner. Bei den Proben, die sehr feucht gelagert waren (100 % r.F.), ist die Abtragung des Zinks innerhalb des Versuchszeitraumes nicht völlig zum Stillstand gekommen, jedoch hat sie sich soweit verlangsamt, daß im 2. Jahr nur noch durchschnittlich 1/5 der Abtragung des ersten Jahres auftrat. Der Höchstwert liegt nach 2 Jahren etwa bei 12 μ .

Bei Zement mit niedrigem Chromatgehalt schreitet auch während des zweiten Jahres die Zinkabtragung noch langsam fort. Der Größtwert beträgt jedoch nur etwa die Hälfte des Wertes, der bei den Zementen mit hohem Chromatgehalt gemessen wurde. Diese Ergebnisse stehen teilweise in Gegensatz zu Berichten, die dem Chromat im Zement eine stark inhibierende Wirkung zuschreiben. Der Widerspruch mag sich daraus erklären, daß Chromat als sogenannter passivierender Inhibitor bei unzureichender Dosierung eine Verstärkung der Korrosion hervorrufen kann. Der höchste Chromatgehalt betrug bei den Versuchen 27,5 ppm im Zement.

In einer zweiten Versuchsreihe waren unterschiedliche Verzinkungsarten – Galvannealing-Schicht, Reinzinkauflage und feuerverzinkt – in die Untersuchungen einbezogen. Die Lagerungsbedingungen waren hier insofern wesentlich ungünstiger als wechselnde Durchfeuchtung und Trockenlagerung vorgenommen wurde, die nach unseren Erfahrungen schärfsten Beanspruchungen in der Praxis und bei anderen Versuchen entsprechen. Die Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe haben sich im wesentlichen bestätigt. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Stählen mit Reinzinkauflage und den feuerverzinkten Stählen ist nicht aufgetreten; er ist auch nicht zu erwarten, da von der Zinkabtragung nur die äußere in beiden Fällen gleichartige Schicht erfaßt wurde. Dagegen zeigten die galvannealten Stäbe eine wesentlich stärkere Zinkabtragung. Das schlechtere Abschneiden der galvannealten Stähle überraschte deswegen, weil hier für die bis zur Staboberfläche reichende Eisenzinklegierung eine gewisse Passivierung erwartet werden konnte. Die Abtragungswerte liegen für die galvannealten Stäbe in Maximum bei 20 μ .

3.2 Schutzwirkung der Zinkschicht in karbonisiertem Beton

Vergleichsversuche mit unverzinktem und verzinktem Betonstahl in karbonisiertem Beton haben ergeben, daß sich durch Verzinken zuverlässig das Auftreten von Rost auch unter ungünstigen Bedingungen verhindern läßt. Zwar gilt dies streng zunächst nur für den Versuchszeitraum von 2 Jahren, jedoch ist zu berücksichtigen, daß die Versuche über Zinkabtragung nachgewiesen haben, daß die Zinkauflösung verhältnismäßig rasch zum Stillstand kommt bzw. einem Grenzwert zustrebt, der nur einem Anteil der Verzinkungsschicht entspricht. Deshalb ist der Schluß erlaubt, daß das Auftreten von Rost auch bei längerer Beanspruchungsdauer sehr wahrscheinlich nicht zu befürchten ist. Voraussetzung dafür

ist, daß die Zinkschicht eine so gute Haftung auf der Stahloberfläche aufweist, daß Absprengungen vermieden werden können.

3.3 Einfluß des Verzinkens auf die Materialeigenschaften von Betonstahl

Die Materialeigenschaften – statisches Festigkeitsverhalten und Verformungsvermögen – der drei im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens untersuchten Bewehrungsstähle mit 12 mm Stabdurchmesser:

glatter Betonrundstahl St II a

Betonrippenstahl St III a mit hoher Bruchdehnung

Betonrippenstahl St III a mit niedriger Bruchdehnung

wurden durch das Verzinken nicht ungünstig beeinflusst. Während bei Zugfestigkeit, Bruchdehnung, Biege- bzw. Rückbiegeverhalten keine Veränderung gegenüber nicht verzinkten Proben beobachtet wurde, war bei der Streckgrenze in der Regel eine geringe Erhöhung nach dem Verzinken eingetreten. Beim Biegen der verzinkten Proben traten abhängig vom Biegedurchmesser Querrisse in der Zinkschicht auf, die häufig auch zu Abplatzungen innerhalb der Zinkschicht führten. Dickere Stäbe als die hier untersuchten dürften sich wegen der Festlegung des Biegerollendurchmessers auf ein Vielfaches des Stabdurchmessers etwa gleich verhalten, doch müßte dies durch weitere Untersuchungen noch abgeklärt werden.

Wichtiger erscheint die Klärung der Frage, inwieweit die in der Zinkschicht nach dem Biegen auftretenden Risse und Abplatzungen zu einer Verminderung der Korrosionsschutzwirkung verzinkter Bewehrungsstähle in karbonisiertem Beton führen können.

Literatur

- [1] Die allgemeinen Ausführungen folgen weitgehend A. Rauen, Vortrag an Int. Verzinkertagung 1970, Düsseldorf
- [2] H.G. Smolczyk, Rilem Symposium Prag 1969, Prelim. Report
- [3] P. Schießl, Arbeitstagung des Deutschen Betonvereins Mai 1973, Berlin, Sicherheit von Betonbauten
- [4] H. Kaesche, Archiv Eisenhüttenwesen 36 (1965) S. 911 ff.
- [5] W. Richartz, Zement-Kalk-Gips 22 (1969) S. 447 ff.
- [6] L.H. Everett, K.W.J. Treadaway, 8. Intern. Verzinkertagung 1967, London
- [7] H. Kaesche, Gutachten Az. 1.3/4571, Juli 1968
- [8] I. Comet, T. Jshikawa, B. Bresler, Mater. Protection 7 (1968) S. 44
- [9] E.G. Brown, T.J. Hayes, Analyt. chim. Acta. 9, 6, (1953)
- [10] G. Rehm, A. Lämmke, Betonsteinzeitung 36, 360 (1970)