

Dr.-Ing. Ulf Nürnberger

Korrosionsverhalten verzinkter Spannstähle in gerissenem Beton

Bericht Nr. 94
des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.

Korrosionsverhalten verzinkter Spannstähle in gerissenem Beton

von

Dr.-Ing. Ulf Nürnberger

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

Gleichzeitig Bericht Nr. 94
des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e.V.

Die Untersuchungen wurden vom Gemeinschaftsausschuß Verzinken
über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen
(AIF) vom Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) finanziert

Sonderdruck aus Heft 353 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton
– DAfStb –

Korrosionsverhalten verzinkter Spannstähle in gerissenem Beton

Zusammenfassung

An schwarzen und feuerverzinkten Spannstählen mit Zinkauflagen von 13,9 und 19,4 μm wurden Korrosionsversuche an gespannten Stählen in gerissenem Beton durchgeführt. Im Hinblick auf besonders ungünstige konstruktive Ausbildungen wurden Betondeckungen von etwa 2 cm und Betonrißbreiten von etwa 0,2 und 0,4 mm gewählt. Die gerissenen und z. T. künstlich karbonatisierten Betonkörper wurden bis zu 2 Jahren einer Wechselbeanspruchung mit Wasser, SO_2 -haltigem Wasser und künstlichem Meerwasser unterzogen oder unter atmosphärischen Bedingungen ausgelagert.

Die Versuche lassen insgesamt erkennen, daß im Fall geringer Betondeckungen und bei den gewählten Rißbreiten eine Feuerverzinkung von etwa 15 μm keine erheblichen Vorteile erbringt, da Zink im Betonriß nicht stabil ist. Bei diesbezüglich empfindlichen Stählen sind nach erfolgter Zinkkorrosion im Betonriß auch Rißkorrosionsbrüche möglich. Die Versuche lassen jedoch den Schluß zu, daß bei stärkeren Zinkauflagen ein verbesserter Korrosionsschutz im gerissenen Beton zu erwarten ist. Ungeklärt ist noch das Zinkkorrosionsverhalten im Fall höherer Betondeckungen. Bei weiteren Versuchen an Bauteilen in praxisnaher Umgebung wurden daher die Zinkauflage und Betondeckung als weitere Parameter eingeführt.

Corrosion Behaviour of Galvanized Prestressing Steel in Cracked Concrete

Summary

Corrosion tests were carried through in cracked concrete upon galvanized and not-galvanized prestressing steel with a zinc cover of 13,9 and 19,4 μm . In view of especially unfavorable constructions concrete covers of about 2 cm and crack widths of about 0,2 to 0,4 mm were chosen. The cracked and partly artificially carbonized concrete elements were exposed up to 2 years to alternating wet (water, water containing SO_2 or artificial sea water) or stocked under atmospheric conditions.

The tests show that in the case of small concrete covers and for the chosen crack widths a galvanisation of about 15 μm does not give great advantages because the zinc in the concrete crack does not stay stable. For sensitive steel it is even possible that fractures due to stress corrosion occur in the cracked concrete because of zinc corrosion. However the tests permit the conclusion that for thicker zinc covers a better protection against corrosion may be expected in the cracked concrete. It is however not yet clear how the corrosion behaviour of zinc will develop in the case of bigger concrete covers. That's why in further tests with elements exposed to an environment near to practice the zinc layer and concrete cover were introduced as further parameters.

Tenue à la corrosion d'armatures de précontrainte galvanisées dans du béton fissuré

Résumé

On a réalisé dans du béton fissuré des essais de corrosion sur des armatures galvanisées et non-galvanisées avec une couche de zinc de 13,9 et 19,4 μm . En tenant compte de constructions très défavorables on a choisi des enrobages en béton d'environ 2 cm et des largeurs de fissures dans le béton d'environ 0,2 et 0,4 mm. Les éléments de béton fissurés et en partie carbonatisés artificiellement ont été exposés jusqu'à deux années à une sollicitation alternée par de l'eau, eau contenant SO_2 et eau de mer artificiel ou stockés sous des conditions atmosphériques.

Les essais montrent que dans le cas d'enrobages en béton minces et pour des largeurs de fissures choisies une galvanisation d'environ 15 μm n'offre pas d'avantages considérables étant donné que le zinc dans le béton n'est stable. Pour des aciers sensibles il est pourtant possible que des ruptures dues à la corrosion sous contrainte apparaissent dans le béton fissuré causées par la corrosion du zinc. Les essais permettent la conclusion que des couches de zinc plus épaisses laissent attendre une meilleure protection contre la corrosion dans le béton fissuré. Il n'est pourtant pas clair comment la tenue à la corrosion du zinc se développera dans le cas d'enrobages en béton plus épais. C'est pourquoi la couche de zinc et l'enrobage en béton sont introduits comme paramètres dans d'autres essais sur des éléments exposés à un environnement proche à la pratique.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Problemstellung	83
2. Bisheriger Kenntnisstand	84
2.1 Mechanismus der Korrosion in Betonrissen	84
2.2 Ergebnisse praxisnaher Untersuchungen	84
2.3 Korrosionsverhalten feuerverzinkter Stähle in Beton	85
2.4 Wasserstoffrißkorrosion feuerverzinkter Spannstähle	87
3. Versuchsmaterialien	87
4. Versuchsdurchführung	88
5. Ergebnisse	90
5.1 Untersuchungen an gebrochenen Proben	90
5.2 Korrosionsverhalten in Betonrissen	91
5.2.1 Mechanismus der Korrosion von Zink und Stahl im gerissenen Beton	91
5.2.2 Intensität der Stahlkorrosion schwarzer und feuerverzinkter Proben	92
5.2.3 Zugversuche an ausgelagerten Proben	94
6. Zusammenfassende Beurteilung der Versuchsergebnisse	94
Literatur	96
Anhang: Tabellen, Bilder	99

1. PROBLEMSTELLUNG

Die Schutzwirkung des Betons für den eingebetteten Bewehrungsstahl ist sowohl chemischer als auch physikalischer Natur:

Der Beton besitzt infolge der stark alkalischen Reaktion bei der Hydratation des Zements einen hohen pH-Wert (~ 12,5 bis 13,6) und schützt dadurch die Oberfläche des von ihm bedeckten Stahls. Dabei kann selbst in Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff im Beton keine Korrosion einsetzen.

Der Beton bildet durch seinen Diffusionswiderstand ein physikalisches Hindernis gegen den Zutritt von Gasen (Sauerstoff, Kohlendioxid, Schwefeldioxid), Feuchtigkeit und anderen schädlichen Stoffen (z.B. chloridhaltige Salze) zur Stahloberfläche.

Voraussetzung für eine Korrosion von Stahl in Beton sind die Anwesenheit eines Elektrolyten mit möglichst hoher Ionenleitfähigkeit und von Sauerstoff an der Stahloberfläche sowie eine ungehinderte Eisenauflösung. Dabei müssen alle Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein.

Die Wassergehalte von Betonbauten im Freien sind in der Regel ausreichend hoch und auch elektrolytisch leitfähig. Auch der für die Korrosion im Beton notwendige Sauerstoff ist - von bestimmten Anwendungsfällen abgesehen - zumeist vorhanden. Eine ungehinderte Eisenauflösung ist jedoch nur möglich, wenn sich bei der Karbonatisierung die Hydroxide im Beton in Karbonate umwandeln oder freie Chloride über einen bestimmten Grenzwert hinaus an den Stahl gelangen. Die beiden letztgenannten Vorgänge werden durch eine gewisse Durchlässigkeit des Betons für Kohlendioxid /1/ bzw. Chlorid /2/ gefördert.

Besonders Risse im Beton stellen im Hinblick auf die Korrosion der Bewehrung ein ernstes Problem dar, denn sie unterbrechen mehr oder weniger vollständig die Schutzwirkung gegenüber der Umgebung, welche die ungerissene Betondeckung gewährleistet. Hat sich ein Riß bis zur Bewehrung hin geöffnet, so haben Luft, Feuchtigkeit und Aggressivstoffe Zutritt zur Stahloberfläche. Eine Korrosion der Bewehrung kann eintreten nach Karbonatisierung der Betonrißufer oder wenn Chloride durch den Riß an den Stahl gelangen. Die Karbonatisierung entlang der Rißufer geht erheblich schneller vonstatten als im ungerissenen Beton /1/. Bezüglich der Eindiffusion von Schadstoffen wie z.B. Chloriden stellen Risse im Beton ein vernachlässigbares Hindernis dar.

In der Zugzone von Stahlbetonbauten sind Risse im Beton unvermeidbar, da der Beton nur sehr geringe Zugspannungen aufnehmen kann. Bei Spannbeton ist die Gefahr von Rissen im Beton wesentlich geringer als bei Stahlbeton, da die zulässigen Zugbeanspruchungen des Betons auch bei beschränkter Vorspannung unter Last auf die Werte der Betonzugfestigkeit zu begrenzen sind. Trotzdem treten auch bei Spannbetonkonstruktionen, wie z.B. Brücken, gelegentlich Risse im Beton auf, wodurch die Dauerhaftigkeit der Spannbewehrung eingeschränkt wird. Ernste Rißschäden sind in der Regel auf Eigen- oder Zwangsspannungen infolge der Temperatureinflüsse zurückzuführen /3/. Als rißgefährdete Stellen gelten Übergänge von dickeren zu dünneren Bauteilen, un stetige Querschnittschwächungen und Arbeitsfugen.

Im Spannbetonbau hat das Problem einer Korrosionsgefährdung der Spannbewehrung durch die Neufassung der DIN 4227, Teile 1 und 2 (Spannbeton. Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Bauteile mit teilweiser Vorspannung) und Einführung der teilweisen Vorspannung erneut an Bedeutung gewonnen. Mit der teilweisen Vorspannung von bewehrten Massivbaukonstruktionen gewinnt man einen Konstruktionspielraum, der sich vom Spannbeton bis zum klassischen Stahlbeton erstreckt. Für den Korrosionsschutz der Bewehrung entsteht hierbei jedoch die besondere Problematik, daß Spannstähle auch in gerissene Zonen gelangen können und Situationen ähnlich denen der schlaffen Bewehrung in Stahlbetonbauten ausgesetzt werden. Zwar ist die teilweise Vorspannung bisher nur für Spannbeton mit nachträglichem Verbund zugelassen (wobei höchstens in Hüllrohren befindliche und verpreßte Spannglieder in Betonrissen zu liegen kommen können), jedoch ist diese Bauweise grundsätzlich auch bei Konstruktionsteilen mit sofortigem Verbund möglich. Im letzteren Fall könnten ungeschützte Spannstähle einen Betonriß durchkreuzen.

Falls bei Spannbetonbauteilen aus konstruktiven oder anderweitigen Gründen infolge hoher auftretender Gebrauchslasten mit Betonrißbildung zu rechnen ist, und reichen diese Risse bis zur Spannbewehrung, dann ist der Langzeitschutz der Stähle nicht sichergestellt. Dies gilt vor allem dann, wenn Entwurf und konstruktive Ausbildung keine hohen Betondeckungen zulassen und die Einwirkungsbedingungen der Umgebung und eine durch Standort und Nutzung bedingte Sonderbelastung (z.B. chloridhaltige Umgebung) selbst bei optimaler Durchbildung der Konstruktion ungünstige Korrosionsverhältnisse auf Dauer erwarten lassen. Die bisherigen Kriterien für den Langzeitkorrosionsschutz von Spannstahl in gerissenem Beton müssen daher modifiziert werden.

Unter den vorgenannten Bedingungen könnte der Langzeitschutz auch durch besondere Korrosionsschutzmaßnahmen der Spannstähle sichergestellt werden kann. In der hier durchgeführten Arbeit galt es abzuklären, inwieweit ein Feuerverzinken der Spannstähle als eine diesbezüglich sinnvolle Maßnahme angesehen werden kann. Da zum Verhalten von feuerverzinktem Bewehrungsstahl in gerissenem Beton kaum Untersuchungsergebnisse vorliegen, wurden zunächst an vorgespannten und gerissenen Modellkörpern aus Beton umfangreiche Untersuchungen unter Laborbedingungen, auch unter Einbeziehung besonders kritischer Korrosionsbedingungen, und im Freien durchgeführt. Die Versuche sind zwischenzeitlich durch eine praxisnähere Auslagerung von Bauteilen in städtischem Klima, Industrieatmosphäre und im Meeresklima bzw. Meerwasserbereich ergänzt worden.

Hier wird zunächst über die Auslagerungsversuche an den Modellkörpern berichtet. Die Ergebnisse dieser Versuche sind auf die Verhältnisse bei Stahlbeton übertragbar.

2. BISHERIGER KENNNTNISSTAND

2.1 Mechanismus der Korrosion in Betonrissen

Eine exakte Erfassung der Korrosionsverhältnisse in Rissen des Betons ist äußerst schwierig, da diese von einer Reihe sich beeinflussender Faktoren abhängen. Es sind dies die jeweiligen pH-Verhältnisse des Elektrolyten im RiB, die RiBbreite und RiBhöhe, die Menge der schon vorhandenen Korrosionsprodukte und die Feuchtigkeits-Trockenwechsel-Periodizität. Beschleunigend für den Korrosionsvorgang sind hierbei insbesondere Schwefeldioxid- und Chlorid-Einwirkungen.

Korrosion am Stahl ist grundsätzlich möglich, wenn

- die RiBufer bis in Höhe der Bewehrung karbonatisiert sind,
- die Passivierung am Stahl im Bereich der RiBstelle durch eingewanderte Chloride aufgehoben ist.

Da sowohl Karbonatisierung als auch Chloriddiffusion von der Betonaußenseite her schneller entlang der RiBufer ins Betoninnere fortschreiten als im ungerissenen Beton, wird in gewissen Zeiträumen der Nutzung eine im ungerissenen Beton noch passivierte Stahloberfläche an den RiBstellen von sehr engen Bereichen mit aktivierter Stahloberfläche unterbrochen.

Unter den genannten Voraussetzungen sind im RiBbereich mehrere von der Ursache her zwar unterschiedliche, in ihrer Auswirkung auf die Korrosion des Stahls im RiBbereich jedoch nur schwer unterscheidbare Teilprozesse der Korrosion möglich /1,4/ :

- normale abtragende Korrosion;
- Spaltkorrosion an der Berührungsfäche RiBufer - Stahl;
- Korrosion durch Elementbildung zwischen anodischen Bereichen des Stahls im RiB und den passivierten (kathodischen) Zonen im ungerissenen Beton.

Aufgrund theoretischer Überlegungen und durch Versuche belegt kann nach Karbonatisierung der RiBufer oder in Gegenwart freier Chloride in nicht zu feuchtem Beton (häufige relative Luftfeuchte 70 - 80 %) oder bei gelegentlicher Chloridbeaufschlagung und Austrocknung kein systematischer Einfluß der RiBbreite auf den Korrosionsabtrag in RiBstellen erwartet werden falls die Betondeckung nur wenige cm beträgt /1/. Durch eine Erhöhung der Betondeckung wird insbesondere dann ein verbesserter Korrosionsschutz erreicht, wenn ständig eine hohe Betonfeuchtigkeit oder Wassersättigung des Betons vorliegt, da hierdurch die Karbonatisierung im RiB sowie eine Sauerstoffdiffusion im rissenahen Beton (bei Korrosion durch Elementbildung) und im RiB selbst (bei abtragender Korrosion und Spaltkorrosion) behindert wird:

Vergleicht man nämlich die Diffusionsverhältnisse des Sauerstoffs in ausgetrockneten und wassergefüllten Rissen, dann gilt nach Überlegungen von /5/, daß der Sauerstoff im erstgenannten Fall etwa 4mal schneller diffundieren kann als im letztgenannten. Hieraus kann gefolgert werden, daß in ständig mit Wasser gefüllten Rissen auch bei depassivierter Stahloberfläche die

Bewehrung weniger schnell korrodieren kann als in trockenen Rissen oder bei gelegentlichem Wasserzutritt.

Bei steigender Betondeckung wirken sich auch abnehmende RiBbreiten zunehmend günstig aus, da schmale Risse hier auch bei nicht zu hohen Ausgleichsfeuchten (Betonteile im Freien) Feuchtigkeit zurückhalten, was zum einen die Karbonatisierung und zum anderen die Nachdiffusion des Sauerstoffs zum Stahl behindert.

Bei Korrosion des Stahls in Rissen von Beton wird zumeist festgestellt /1,6/, daß die Ausdehnung der Korrosion in Richtung der Stabachse bedeutend größer ist als die Breite der Risse. Sie ist weiterhin unmittelbar an der RiBstelle am stärksten und nimmt nach beiden Seiten hin ab. Die der RiBöffnung (Zugseite eines Biegegliedes) zugekehrte Umfangshälfte der Bewehrungsstäbe ist stets stärker korrodiert als die abgewandte Seite. In gerissenen Betonkörpern ist im RiBbereich die Korrosion auch häufig stärker als bei ungeschützten Stahlstäben mit vergleichbarer Korrosionsbeanspruchung. All diese Erscheinungen sprechen im Prinzip für eine kombinierte Wirkungsweise der genannten Korrosionsmechanismen a) bis c).

Eine Korrosion im RiBbereich durch Elementbildung (Korrosionsmechanismus c)) ist allerdings begrenzt. Für die Wirksamkeit der Bewehrung im BetonriB als Anode ist nämlich die Leitfähigkeit des Betons ausschlaggebend, da bei Wirkung eines Korrosionselementes im Porenelektrolyten ständig OH^- -Ionen und - falls vorhanden - auch Cl^- - und SO_4^{--} -Ionen von den kathodischen Bereichen zur Anode wandern müssen. In der Praxis kann die Elementbildung keine allzu großen Auswirkungen auf die Korrosion haben, da die Geschwindigkeit der OH^- -Ionenwanderung im allgemeinen sehr gering ist und damit die Ausbreitungswiderstände der Kathoden sehr groß sind. Im ungünstigsten Fall werden wenige cm Stahl im Beton als Kathode wirksam, was Kathoden/Anoden-Verhältnissen von etwa 100 : 1 entspricht. Real ist jedoch zu berücksichtigen, daß Bedingungen, welche die Leitfähigkeit des Betons erhöhen (z.B. hohe Feuchtigkeit) die Sauerstoffdiffusion begrenzen. Dagegen wird in trockenem Beton, wo Sauerstoff nahezu ungehindert zur Kathode gelangen kann, die Elektrolytleitfähigkeit des Betons stark herabgesetzt.

2.2 Ergebnisse praxisnaher Untersuchungen

Die in der Literatur genannten Ergebnisse zum Korrosionsverhalten von Bewehrungsstählen in Betonrissen sind auf den ersten Blick widersprüchlich, können bei sachgerechter Analyse jedoch in den wesentlichen Punkten in Übereinstimmung gebracht werden.

Bei Auslagerungsversuchen im Freien wird in der Regel eine Zunahme der Korrosionstiefe mit wachsender RiBbreite und abnehmender Betondeckung festgestellt /7, 8, 9/. Im Fall geringer Betondeckungen bis etwa $\bar{u} = 3$ cm ist der Einfluß der RiBbreite auf die Tiefe der Korrosion im RiB allerdings von untergeordneter Bedeutung /1, 8, 10/, jedoch nimmt die Ausdehnung der Korrosion beidseitig des Risses mit steigender RiBbreite zu. Auch bei ungünstigen Korrosionsverhältnissen (häufige Befeuchtung und Austrocknen der Risse, Anwesenheit

von Schadstoffen) wurde bei geringen Betondeckungen kein erheblicher Einfluß der Rißbreite festgestellt /6/. Andererseits ergaben umfangreiche Untersuchungen an Bauwerken im Freien, daß selbst Rißbreiten bis 1 mm nicht zu kritischer Korrosion der Bewehrung führen müssen, wenn die Betondeckung ausreichend hoch gewählt wird /11/. Der positive Einfluß hoher Betondeckungen kommt auch bei den in /6/ durchgeführten Wechselbefeuchtungsversuchen zum Ausdruck. Bei normalen Korrosionsverhältnissen (Lagerung im Freien) nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit in Betonrissen mit der Zeit stark ab /7, 10/.

In stark verunreinigter Industrieluft entsteht bei gleicher Rißbreite und Betondeckung stärkere Korrosion als unter normalen Witterungsverhältnissen /7/. Die Gefahr eines starken Korrosionsangriffes besteht insbesondere bei Einwirkung von Chloriden (z.B. Streusalze, Meerwasser, PVC-Brandgase) auf gerissenen Beton /6/. Dabei wirkt sich eine abwechselnde bzw. gelegentliche Durchfeuchtung des Betons mit chloridhaltigem Wasser und nachfolgende Austrocknung am nachteiligsten aus. Z.B. bei Meeresbauten sind die in der Wasserwechselzone und vor allem Spritzwasserzone liegenden Bauteile und die Bewehrung im Bereich von Verdunstungsflächen bei aus dem Meerwasser beraustretenden Bauteilen am meisten gefährdet /12, 13/.

Bei nur gelegentlicher Durchfeuchtung mit Meerwasser und intensiver Austrocknung erweist sich die Korrosion offensichtlich umso unabhängiger von der Betondeckung je größer die Rißbreite ist /13, 14/. Bei häufigerer Durchfeuchtung (z.B. im Tidebereich des Meeres) wirken sich höhere Betondeckungen und/oder abnehmende Rißbreiten zunehmend günstiger aus /12/. Eigene Untersuchungen an der 27 Jahre alten Westmole Helgoland zeigten für Bauteile mit gelegentlicher Spritzwasserbeanspruchung bereits Korrosion bei Rißbreiten um 0,2 mm, wenn die Betondeckung etwa 5 cm beträgt. Ab Rißbreiten von 0,3 - 0,4 mm war diese stärker ausgeprägt, was sich in einer deutlichen Abzehrung der Stähle und der Ausbildung voluminöser Korrosionsprodukte auf der der Betonaußenfläche zugewandten Seite der Stähle äußerte.

Die Korrosionstiefe nahm bis zu Rißbreiten von 2 mm nur noch unwesentlich zu, jedoch erhöhte sich mit der Rißbreite der Umfang der korrodierten Stahloberfläche. Eine weitere Zunahme der Betondeckung auf etwa 10 cm führte selbst bei Rißbreiten um 1 mm zu erheblich reduzierten Korrosionsangriffen am Stahl.

Bei ständig mit chloridhaltigem Wasser (Meerwasser) ausgesetzten Bauteilen sind Risse im Beton weniger kritisch zu bewerten /12/: Bei der Westmole Helgoland wurde nach 21 Jahren selbst an Rissen bis zu 1 mm Breite keine kritische Stahlkorrosion festgestellt, wenn die Betondeckung mindestens 5 cm beträgt /15/. Wasser in den Betonrissen hemmt den Sauerstoffzutritt zur Bewehrung offenbar derart, daß selbst in Anwesenheit hoher Chloridgehalte keine gefährliche Korrosion auftritt.

In der Literatur werden an mehreren Stellen Grenzwerte von Rißbreiten genannt /8, 9, 16, 17/. Diese werden für aggressive

Umgebungsverhältnisse (Einwirkung von Chloriden, Rauchgasen) mit 0,1 bis 0,2 mm bei gleichzeitig ausreichend hoher Betondeckung in der Regel niedriger angesetzt als für "normale" Beanspruchungen (etwa 0,2 bis 0,3 mm). Für Stahlbeton wird dabei für "normale" Beanspruchung meist eine erforderliche Betondeckung von mindestens 2,5 bis 3 cm und für aggressive Umgebungsverhältnisse eine solche von mehr als 5 cm gefordert. Bei Spannbeton und kritischen Korrosionsbeanspruchungen werden die erforderlichen Überdeckungen noch höher angesetzt.

Diese Angaben werden jedoch nicht ausreichend begründet: Daß möglicherweise je nach Umgebungsverhältnissen eine untere kritische Rißbreite besteht, ließe sich vor allem damit erklären, daß schmale Risse auch bei gelegentlicher Trockenbeanspruchung infolge eines Wasserrückhaltevermögens nicht austrocknen und somit - vor allem bei hohen Überdeckungen - nicht in ausreichendem Maße Sauerstoff und eventuell auch Schadstoffe zum Stahl gelangen. Weiterhin ist bekannt, daß die Rißbreiten mit zunehmender Entfernung von der Betonoberfläche erheblich abnehmen.

2.3 Korrosionsverhalten feuerverzinkter Stähle in Beton

Voraussetzung für die Eignung von Feuerverzinkungen auf Bewehrungsstählen ist, daß Zink im hochalkalischen Milieu des Betonporenwassers beständig ist und daß ein wirksamer Schutz in jenen Fällen besteht, wo unverzinkter Stahl als besonders gefährdet gilt: Z.B. in karbonatisiertem Beton, bei Einwirkung von Chloriden auf Beton oder in gerissenen Beton.

In alkalischen Medien, auch Beton, löst sich Zink als Folge seines amphoteren Charakters zunächst unter Zinkatombildung auf. Nach Abschluß der ersten Reaktionen mit der Alkalität des Betons ist jedoch mit der Zinkatombildung eine Art passivierende Wirkung verbunden, so daß die Korrosion des Zinks erheblich verlangsamt wird. Unter nicht oder nur wenig aggressiven Bedingungen hat die Verzinkung keinen entscheidenden Einfluß auf die Dauerhaftigkeit der Stähle, da bei Beachtung der geltenden Normen und Verarbeitungsrichtlinien ein alkalischer Schutz der Stähle in der Regel langfristig gewährleistet wird und auch ohne Verzinkung keine Korrosion eintritt.

Aus praxisnahen Langzeituntersuchungen /18/ ist jedoch abzuleiten, daß eine Feuerverzinkung z.B. in jenen Fällen einen Vorteil erbringt, wo aufgrund der Betonart und (geringen) Betondeckung mit einer raschen Karbonatisierung des Betons am Stahl gerechnet werden muß. Auch aus Vergleichsversuchen von /19, 20, 21/ mit unverzinkten und verzinkten Betonstählen in karbonatisiertem Beton ist zu folgern, daß sich unter ungünstigen Korrosionsbedingungen durch ein Verzinken das frühzeitige Auftreten von Rost an der Bewehrung verhindern läßt. Dies gilt vor allem dann, wenn der Anteil der Fe-Zn-Legierungsschichten an der Gesamtauflage hoch ist. In feuchtem, karbonatisiertem Beton und gleichzeitig geringer Betondeckung ist die Auflösungs geschwindigkeit von Zink vergleichbar jener von schwarzem Stahl /20, 22/. Unter diesen ungünstigen Verhältnissen ist die Lebensdauer einer Verzinkung daher begrenzt. Jedoch kann bei ausreichend hoher Zinkauflage auch hier der Beginn einer Stahlkorrosion um Jahre, wenn nicht sogar Jahrzehnte verzögert

werden, wenn nicht zusätzliche Einflüsse (z.B. hohe Chloridgehalte im Beton) zur Geltung kommen.

Das Verhalten feuerverzinkter Bewehrung gegenüber Chloridbeanspruchung wurde sowohl durch Erhebungen an bestehenden Bauwerken als auch durch langjährige Naturversuche überprüft. Bei der Zusammenstellung von Ergebnissen ist zu unterscheiden nach Untersuchungen

- wo Bauteile ständig oder zumindest häufig mit chloridhaltigem Wasser in Kontakt stehen (z.B. in der Dauertauchzone und der Wasserwechselzone des Meeres) und
- wo Bauteile nur gelegentlich mit Chloriden beaufschlagt werden und vorübergehend zumindest teilweise austrocknen konnten (z.B. Bauten, welche gelegentlich Meer-Spritzwasser ausgesetzt sind und streusalzbeaufschlagte Brücken).

Bei ständig mit Meerwasser durchfeuchteten Bauteilen bringt eine Feuerverzinkung keinen Vorteil, wenn ein ausreichend dichter Beton und eine Betondeckung von mehreren cm verwendet werden /13, 23/. Unter diesen Bedingungen ist wegen der behinderten Eindiffusion von Sauerstoff zur Bewehrung sowohl schwarzer als auch feuerverzinkter Stahl unempfindlich gegenüber Korrosion, selbst wenn sich nach langzeitiger Beanspruchung Chloridgehalte $>1\%$, bezogen auf den Zementanteil, am Stahl einstellen.

Bei Bauteilen mit gelegentlicher Chloridbeaufschlagung und zumindest teilweiser Austrocknung des Betons erwies sich eine Feuerverzinkung als vorteilhaft. Der Beginn der Stahlkorrosion wurde erheblich verzögert /13, 24/, ebenso der Beginn von korrosionsbedingter Rißbildung des Betons und von Betonabplatzungen.

Für die Praxis ist eine Feuerverzinkung der Betonstähle dann zu empfehlen, wenn bei Chloridangebot zur Betonoberfläche die Betondeckung gering ist und der Beton im Hinblick auf den Korrosionsschutz keine optimalen Eigenschaften aufweist. Im Hinblick auf solche Verhältnisse wurden von /18/ vergleichende Auslagerungsversuche über 5 Jahre an unverzinktem und verzinktem Betonstahl in chloridhaltigem Beton durchgeführt; der Chloridgehalt betrug 0 bis $3,2\%$ (bezogen auf den Zementanteil). Aufgrund dieser Untersuchungen kann bei Chloridgehalten bis etwa 1% für den verzinkten Stahl im Vergleich zum unverzinkten von etwa halb so großen Abtragungen (des Zinks) ausgegangen werden. Bis etwa 1% Chlorid bringt die Verzinkung somit eine merkliche Verbesserung im Vergleich zum blanken Stahl. Zink wird nicht nur weniger stark angegriffen als Stahl, die Korrosionsprodukte des Zinks sind auch weniger voluminös als jene des Eisens, was sich im Hinblick auf die Rißbildung des Betons günstig auswirkt. Bei vorsichtiger Schätzung kann die Lebensdauer einer etwa $100\ \mu\text{m}$ starken Auflage auf mindestens 30 Jahre festgelegt werden.

Bei Chloridgehalten $>1\%$ war die Abtragsrate des Zinks nach mehr als 1 Jahr größer als jene von Stahl. Die Zinkauflage wurde dadurch rasch aufgezehrt. Der positive Einfluß der Verzinkung hinsichtlich Stahlkorrosion und Rißbildung des Betons war daher nur für einen kurzen Zeitraum gegeben. In-

samt bietet eine Feuerverzinkung daher bei Anwesenheit von Chloridgehalten $>1\%$ keine wesentlichen Vorteile.

Die in /18/ genannten Ergebnisse werden im Prinzip auch von anderer Seite /25/ bestätigt. Z.B. aus elektrochemischen Versuchen /20/ ist bekannt, daß bei Chloridgehalten $>1\%$ Gew. %, bezogen auf den Zementanteil, sich eine Feuerverzinkung erheblich unedler verhält als schwarzer Stahl. Die Stromdichte bzw. Korrosionsgeschwindigkeit des Zinks übersteigt dann jene von schwarzem Stahl, wodurch die Verzinkung rasch aufgezehrt werden kann.

Inwieweit die Verzinkung im Bereich von Betonrissen den Stahl gegenüber Chloridangriff schützt, ist bisher nicht ausreichend geklärt, da gesicherte Unterlagen aus baupraktischen Untersuchungen nicht vorliegen. Bei Wechselbefeuchtungsversuchen mit chloridhaltigem Wasser wurde festgestellt /26/, daß sich in gerissenem Beton (Rißbreite $0,2 - 0,5\ \text{mm}$) gelagerte verzinkte Betonstähle nur temporär günstiger verhielten als unverzinkte. Bereits nach wenigen Monaten korrodierten unverzinkte und verzinkte Stähle im Rißbereich gleichermaßen stark. Unter Bedingungen, die bei schwarzer Bewehrung in Betonrissen zu keinem starken Angriff führen (wassergesättigter Beton und hohe Betondeckungen), sind sicherlich auch feuerverzinkte Stähle weitgehend beständig.

In Rissen von Beton müssen für feuerverzinkten Stahl Verhältnisse zugrunde gelegt werden, die jenen im karbonatisierten Beton und solchen bei atmosphärischer Korrosion nahe kommen, wenn auch modifizierte Betrachtungen angezeigt sind. In Betonrissen kann sich am Rißgrund im Elektrolyten ein pH-Wert von etwa 6 bis 12 einstellen. Gewisse Ansäuerungen des Elektrolyten im Spalt sind nicht auszuschließen. In dem genannten pH-Bereich bilden sich auf der Zinkoberfläche Deckschichten, welche dann ihrerseits wegen ihrer guten Beständigkeit und geringen Wasserlöslichkeit den eigentlichen Korrosionsschutz übernehmen /27/. In stärker sauren und alkalischen Lösungen erfolgt eine Korrosion des Zinks unter Wasserstoffentwicklung. Im Übergangsbereich $p_{\text{H}} = 4$ bis 6 bestimmen an einer frischen Zinkoberfläche die Konkurrenzvorgänge der Bildung und Auflösung von Deckschichten die Korrosionsgeschwindigkeit des Zinks.

Legt man für den Rißgrund nach einer bestimmten Zeit (nach Karbonatisierung der Rißufer, Andiffusion von Chloriden) Verhältnisse der atmosphärischen Korrosion zugrunde, dann wird die Deckschichtenbildung des Zinks und deren Auflösung und/oder Abtragung maßgeblich bestimmt durch den Umfang des im Betonrisses zur Verfügung stehenden Wassers, durch Verunreinigungen der Umgebung in Form von Schwefeldioxid, Stickstoffverbindungen und Chloriden sowie die Belüftungsverhältnisse im Betonriß am Stahl.

Einen bedeutenden Einfluß auf das Korrosionsverhalten hat der SO_2 -Gehalt der Luft /28/. Die mit der Zinkoberfläche in Berührung kommende SO_2 -Menge und auch die vorhandene Feuchtigkeit /29/ bestimmen den Korrosionsfortschritt. Die sich bildende schweflige Säure reagiert mit den Schutzschichten des Zinks unter Bildung von Zinksulfid. Dadurch werden

Schutzschichten z.T. geschwächt und bilden sich aus dem Grundmetall nach. Dies bedeutet eine Korrosion des Zinks. Der Kohlendioxidgehalt der Luft und kohlenstoffsäurehaltige Wässer haben i.a. keinen nachteiligen Einfluß auf das Korrosionsverhalten von verzinktem Stahl. Eine Karbonatisierung kann vielmehr zu einer Stabilisierung der oxidischen Deckschichten führen /30/.

In Gegenwart von Chloriden im wässrigen Elektrolyten des Risses wird Zink stärker angegriffen. Nach /31/ soll das Maximum der Korrosion bei 0,1 normalen Lösungen (0,58 %) liegen, da bei größeren Konzentrationen die Sauerstofflöslichkeit abnimmt. /32/ führt Ergebnisse von Versuchen an Zink in belüfteten NaCl-Lösungen an, aus denen hervorgeht, daß das Chlorid in fast allen Konzentrationen Lochfraß hervorruft. Bei Anwesenheit von Chloriden ist der Angriff in weichem Wasser (Regenwasser, Schwitzwasser) stärker als in hartem.

Für die Bildung der schützenden Deckschichten ist eine unbehinderte Belüftung der verzinkten Oberfläche wichtig. Dadurch finden Sauerstoff, Luftfeuchtigkeit und Kohlendioxid Zutritt. Schwitzwasser führt, insbesondere bei längerem Verbleiben dieser Feuchtigkeit und gehemmtem Luftzutritt (Sauerstoffverarmung, mangelnde CO_2 -Zufuhr) zu einer besonderen Art der Zinkkorrosion. Es entsteht ein voluminöses, weißes, unstabiles unter der Bezeichnung "Weißrost bekanntes Zinkoxidhydrat /27, 33/, welches nicht zur Deckschichtenbildung geeignet ist. Wenn sich die Weißrostbildung langfristig fortsetzt, wird das Zink stark angegriffen und schnell abgebaut. Im Fall ausgeprägter differentieller Belüftung (Belüftungselemente) an Zinkoberflächen, z.B. in Rissen des Betons, kann bei ungleichmäßiger Ausbildung der Korrosionsprodukte offenbar leicht loch- oder muldenförmiger Angriff des Zinks auftreten. Hinzu kommt noch, daß durch kathodische OH^- -Anreicherung auch die hydroxidischen Schichten infolge des amphoteren Charakters des Zinks abgebaut werden können.

2.4 Wasserstoffrißkorrosion feuerverzinkter Spannstähle im gerissenen Beton

Bei der Verwendung von verzinkten, hochfesten Drähten in gerissenem Beton stellt sich die Frage nach der Bedeutung der Elementbildung Eisen-Zink im Falle von örtlich verletzten Zinkschichten als Folge einer Zinkkorrosion (Lochfraß des Zinks) bei differentieller Belüftung im Rißbereich. In wässrigen Elektrolyten und unter den Bedingungen der atmosphärischen Korrosion wird dem Zink bei kleineren Verletzungen der Zinkschicht eine Fernschutzwirkung zugeschrieben /34/; der Stahluntergrund wird durch diesen Effekt kathodisch geschützt. Experimentell sind bisher unterschiedliche Ergebnisse über die Wirksamkeit des Fernschutzes von Zink bei atmosphärischen Korrosionsbedingungen bekannt geworden. Nach /35/ ist die Fernschutzwirkung umso besser, je feuchter und aggressiver die Atmosphäre ist.

Im Zusammenhang mit der Frage der kathodischen Polarisierung der freiliegenden Stahloberfläche durch das Zink gewinnt bei gespannten hochfesten Drähten die Wasserstoffabscheidung und -aufnahme im zinkfreien Bereich an Bedeutung. Unversehrte

Zinküberzüge sind nahezu undurchlässig für Wasserstoff und verhindern somit wasserstoffinduzierte Sprödbrüche. Jedoch können sich an einer freiliegenden Stahloberfläche eines verzinkten Drahtes in annähernd neutralen, wässrigen Lösungen unter normaler Gasatmosphäre vorübergehend erhöhte Wasserstoffaktivitäten einstellen /36/. Diese Aktivitäten, welche zu einer Wasserstoffbeladung der Drähte und bei empfindlichen Stählen auch zu Brüchen führen können, fallen mit der Zeit durch Ausbildung deckender, die Korrosion des Zinks und die Aufnahme von Wasserstoff hemmender Schichten ab. Unterbleibt die Deckschichtbildung, z.B. als Folge differentieller Belüftung in Spaltzonen, dann verläuft der Zinkabtrag hier ungehemmt, und die eine Wasserstoffrißkorrosion begünstigenden Verhältnisse werden langfristig aufrechterhalten /37/.

3. VERSUCHSMATERIALIEN

Die vorliegenden Untersuchungen wurden an unverzinkten (schwarzen) und feuerverzinkten Spannstählen durchgeführt. Als Ausgangsmaterial wurden glatte Drähte der Güten St 1570/1770, $d_s = 5,0$ mm (patentiert, gezogen, angelassen) und St 1420/1570, $d_s = 6,0$ mm (vergütet) verwendet. Tabelle 1 zeigt die mechanischen Kennwerte vor und nach dem Feuerverzinken und die chemische Zusammensetzung der Stähle. Durch das Feuerverzinken werden die Festigkeitswerte der kaltverformten Drähte (Bez. 1) abgemindert; der feuerverzinkte, kaltverformte Draht entspricht einer Stahlgüte St 1375/1570. Bei dem vergüteten Stahl (Bez. 2) wird die 0,01-Dehngrenze durch das Feuerverzinken angehoben, wodurch die Streckgrenze insgesamt ausgeprägter wird. Diese Feststellungen sind konform mit früheren Untersuchungen an schwarzen und feuerverzinkten-Drähten aus kaltverformten und vergüteten Spannstählen /38, 39/.

Die Verzinkung der Spannstähle erfolgte kontinuierlich im Durchlaufverfahren, wobei die Reinzinkauflage beim Verlassen des Zinkbades abgestreift wurde. Tabelle 2 enthält die wesentlichen Angaben zur Bleibadentfettung, zum Beizen, Fluxen und Feuerverzinken. Diese Verzinkungsbedingungen entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik.

Die Bestimmung der Zinkauflage wurde nach DIN 50952 (Bestimmung des Flächengewichtes von Zinküberzügen auf Stahl durch chemisches Ablösen des Überzuges) durchgeführt und mittels Ausmessen der Zinkauflage unter dem Rasterelektronenmikroskop. Nach der ersten Methode wurden das Flächengewicht FG (g/m^2) und der arithmetische Mittelwert x_{ar} (μm) bestimmt. Durch die zweite Meßmethode konnten die Häufigkeitsverteilungen der Zinkauflage mittels statistischer Verfahren ermittelt werden. Als Beurteilungskriterium wurden hierbei der statistische Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung S bei Normalverteilung herangezogen. Die genannten Kenngrößen sind in Bild 1 wiedergegeben. Die mittlere Zinkauflage der gezogenen bzw. vergüteten Drähte beträgt 19,4 bzw. 13,9 μm (139 bzw. 99 g/m^2). Die geringen Standardabweichungen der Zinkdicken von 2,6 bzw. 2,5 μm verweisen auf eine gleichmäßige Zinkauflage. Mit den für dünne Drähte in Tabelle 2 ausgewiesenen Verzinkungsbedingungen lassen sich somit nur verhältnismäßig

geringe Zinkschichtdicken erzielen. Diese bestehen analog den früheren Untersuchungen an feuerverzinkten Spannstählen /38, 39/ primär aus Eisen-Zink-Legierung (Hartzinkschicht) und einer zusätzlichen Bedeckung aus einem Gemisch von Reinzink und Hartzinkkristallen.

Bei den feuerverzinkten, vergüteten Stählen (Sorte 2.2) wiesen die Stahloberflächen gelegentlich Verzinkungsfehler in Form von zinkfreien Stellen auf (Bild 2). Diese Nullstellen der Zinkauflage blieben bei der Häufigkeitsverteilung in Bild 1 unberücksichtigt. Sie waren auch ohne erkennbaren Einfluß auf das Ergebnis der Korrosionsuntersuchungen in Rißbereichen des Betons.

Da bei den in Betonrißkörpern ausgelagerten schwarzen und feuerverzinkten vergüteten Spannstählen auch Brüche infolge Wasserstoffrißkorrosion auftraten, wurde zur Kennzeichnung der Spannstahleigenschaften auch das Rißkorrosionsverhalten herangezogen. In Anlehnung an anderweitige Untersuchungen an Spannstählen /40/ und die in Rissen des Betons zu erwartenden Alkalitätsverhältnisse wurde die Lebensdauer in alkalischem und neutralem Wasser (nur bei Stahl der Bez. 2) mit Zusätzen von 5 g SO_4^{--} (als K_2SO_4) / l und $0,5 \text{ g Cl}^-$ (als KCl) / l geprüft. Als Promotor für die Wasserstoffaufnahme wurde der Lösung auch $1,0 \text{ g SCN}^-$ (als KSCN) / l beigefügt. Es wurde das schwarze Ausgangsmaterial, das feuerverzinkte Material und das feuerverzinkte Material mit ringförmig (mechanisch) entzinkten Bereichen von etwa 3 mm Breite bei Spannungen von 80 % der Zugfestigkeit geprüft. Im letzteren Fall sollten Verhältnisse berücksichtigt werden, die sich bei möglicher örtlicher Korrosion des Zinks im Betonriß einstellen können. In der alkalischen Lösung wurden den Proben, wie in Bild 3 zeichnerisch dargestellt, Spaltkörper übergeschoben. Aus den Versuchen in /40/ ist nämlich bekannt, daß sich in den Spalten zwischen Spaltkörper und Drahtoberfläche auch bei ansonsten alkalischer Umgebung erniedrigte pH-Werte einstellen können, wodurch bei Korrosion Wasserstoff freigesetzt werden kann.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse der Zeitstandversuche. Im unverzinkten Zustand weist der vergütete Stahl der Bez. 2.1 bei den Versuchsbedingungen eine vergleichsweise niedrige und der gezogene der Bez. 1.1 eine hohe Standzeit auf. In der alkalischen Lösung mit Spaltkörper sind die Standzeiten erheblich niedriger als in der neutralen Lösung; die Brüche in der alkalischen Lösung erfolgten stets im Spaltbereich.

Eine intakte Verzinkung führte bei beiden Versuchsmaterialien (Bez. 1.2 und 2.2) zu wesentlich höheren Standzeiten als beim schwarzen Ausgangsmaterial.

Eine Beschädigung der Zinkauflage erwies sich nur im Fall des vergüteten Stahls 2.2 in der alkalischen Lösung als zunehmend standzeitvermindernd. Hier wirkte sich vermutlich eine kathodische Polarisierung der unverzinkten Bereiche im Spalt nachteilig aus.

Die hohe Empfindlichkeit der vergüteten Stähle mit beschädigter Zinkauflage unter Spaltkorrosionsbedingungen lassen ein

frühzeitiges Versagen dieser Stähle in Betonrissen möglich erscheinen. Voraussetzung ist jedoch eine vorzeitige Zinkabtragung im Rißbereich.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die schwarzen (Bez. 2.1) und feuerverzinkten Drähte (Bez. 1.2 und 2.2) wurden mit zylindrischen Betonkörpern von etwa 20 cm Länge und 40 mm Durchmesser umgeben. Die Angaben zum verwendeten Beton sind Tabelle 3 zu entnehmen. Nach Erhärtung des Betons wurden durch Spannen der Drähte in einem Spannrahmen Querrisse im Betonkörper erzeugt (Bild 4). Die mittleren Rißbreiten in Abhängigkeit von der Belastung der Drähte kann Bild 5 entnommen werden. Ein Teil der Prüfkörper wurde künstlich karbonatisiert (bis im Riß mit $w = 0,2 \text{ mm}$ die Rißufer bis zum Stahl karbonatisiert waren). Die Prüfkörper wurden sodann einer Korrosionsbeanspruchung mit Wasser, SO_2 -haltigem Wasser bzw. künstlichem Meerwasser unterzogen oder unter atmosphärischen Bedingungen (nur feuerverzinkt) ausgelagert.

Eine eingehendere Beschreibung der Probenbehandlung sei im folgenden gebracht:

- a) Betonieren der zylindrischen Probe mit innenliegendem Spannstahl auf etwa 100 mm Länge. Nach Abbinden des Betons Anbetonieren einer zweiten Probenhälfte; dadurch Ausbildung einer Arbeitsfuge zwischen beiden Betonabschnitten.
- b) 28-tägige Auslagerung der Proben unter Feuchthaltung des Betons.
- c) Spannen der Drähte und Erzeugung von Rissen im Beton (an und außerhalb der Arbeitsfuge); beim Spannen der Prüfkörper wurde eine mittlere Rißbreite von 0,2 bzw. 0,4 mm in der Arbeitsfuge angestrebt.
- d) Abdeckung der seitlich aus den Betonzyklindern herausragenden und mit Keilen verankerten Drähte mit Mörtel.
- e) 3-tägige Auslagerung der Proben unter Feuchthaltung des Betons.
- f) Künstliche Karbonatisierung eines Teils der Probekörper durch tägliches Besprühen mit CO_2 -gesättigtem Wasser in einem Klimaraum mit 40°C ; Dauer der Karbonatisierung 54 Tage (1296 h). Die nicht zu karbonatisierenden Proben wurden 54 Tage bei 22°C und 50 - 60 % relativer Luftfeuchte gelagert.
- g) Wechselbefeuchtung der Proben mit
 - Leitungswasser (Variante 1),
 - dest. Wasser + 0,1 Gew.% SO_2 (Variante 2),
 - künstlichem Meerwasser (1,8 Gew.% Cl^-) (Variante 3) bzw. Auslagerung bei atmosphärischen Bedingungen (Proben von November - März unter Vordach) (Variante 4).

Um Durchfeuchtungs-/Austrocknungszyklen zu erhalten, wurden die Betonkörper bei den Varianten 1 bis 3 täglich folgendem Verfahren unterworfen:

8 Uhr:

dreimaliges Besprühen der Betonkörper mit der jeweiligen Korrosionslösung (Durchfeuchtung),

zusätzliches Befeuchten der Risse durch Hinzugabe von je 1,0 ml Korrosionslösung in die 0,4 mm breiten, bzw. je 0,5 ml Korrosionslösung in die 0,2 mm breiten Beton-

- Belassen der Probekörper im durchfeuchteten Zustand bis 16 h (8 Stunden) durch Umwickeln der Probekörper mit Tüchern, die vorher mit der jeweiligen Lösung durchtränkt wurden.

16 Uhr:

Entfernen der feuchten Tücher und Austrocknen der Betonkörper einschließlich Rißbereich, bis 8 Uhr (16 Stunden).

In dem Raum, in dem die Betonkörper behandelt wurden, herrschte eine Temperatur von 30°C, die rel. Luftfeuchte betrug i.M. 40 - 50 %.

- h) Entnahme von Proben nach Bruch des Spannstahles, bzw. nach 1296 h + 8400 h (1. Entnahme) und nach 1296 h + 15600 h (2. Entnahme).

Zur Erzeugung der gewünschten Rißbreiten von $w = 0,2$ bzw. 0,4 mm mußte der vergütete Draht auf etwa 0,38 bzw. 0,72 R_m und der gezogene Draht auf 0,33 bzw. 0,63 R_m vorgespannt werden. An Parallelproben wurde nach etwa 10^4 Stunden die verbliebene Restspannung der höher vorgespannten feuerverzinkten, vergüteten und gezogenen Drähte ermittelt. Der festgestellte Spannungsabfall lag bei 4 - 5 % bzw. 7 - 8 %. Bei Berücksichtigung der Versuchsbedingungen (Höhe der Anfangsvorspannung, ~ 1300 h bei 40°C und 8700 h bei 30°C) wäre aufgrund bekannter Versuchsdaten eine bis zu 50 % höhere Relaxation zu erwarten gewesen. Der tatsächlich festgestellte geringere Spannungsabfall dürfte vor allem auf eine Federwirkung der verwendeten Versuchsrahmen zurückzuführen sein, was ein gewisses Nachspannen der Drähte bewirkt.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht des Versuchsprogramms. Die insgesamt 56 Probekörper werden unterteilt nach künstlicher Karbonatisierung (je + /nein -), angestrebter Rißbreite in der Arbeitsfuge w_1 und Korrosionsbeanspruchung. Zusätzlich sind die vorzeitig gebrochenen Proben gekennzeichnet.

Die tatsächlich erzeugten Rißbreiten, die in Einzelfällen von den angestrebten etwas abweichen, sind in Tabelle 5 aufgeführt. Neben den Rissen in den Arbeitsfugen (w_1) sind etwa im mittleren Bereich der beiden angrenzenden Teilzylinder weitere Risse w_2 von zumeist kleinerer Rißbreite aufgetreten. Bei der Auswertung der Korrosion in den Betonrissen wurden nahezu sämtliche vorhandene Risse berücksichtigt. Im Bericht

wird der Einfachheit halber $w = 0,15$ bis 0,25 und $w = 0,35$ bis 0,50 auch mit $w \sim 0,20$ bzw. $w \sim 0,40$ bezeichnet.

Die Karbonatisierung der Proben infolge künstlicher Karbonatisierung und Lagerung in Luft bzw. nach zusätzlicher Auslagerung bei Korrosionsbeanspruchung war Schwankungen unterworfen. Ein deutlicher Einfluß der Art der Korrosionsbeanspruchung auf die Karbonatisierung war nicht festzustellen, was zumindest im Fall der SO_2 -Beanspruchung überraschte, da SO_2 ähnlich wie CO_2 in der Lage ist, das $Ca(OH)_2$ des Porenwassers umzuwandeln (in Sulfate), wonach ebenfalls ein pH-Abfall im Beton auftreten sollte. Bild 6 zeigt den ungefähren Verlauf der Karbonatisierungsfront nach künstlicher Karbonatisierung (~ 1300 h CO_2) und Lagerung in Luft (~ 1300 h Luft) und nach zusätzlicher 8400 stündiger Auslagerung (1. Entnahme). Die CO_2 -Behandlung führte zu einer frühzeitigen Karbonatisierung der Rißufer, jedoch hatte die Wechselbefeuchtung (vor allem die Trocknungsphase) langfristig den gleichen Effekt: Die nicht künstlich karbonatisierten Risse waren nach etwa 2000 bis 4000 h Wechselbefeuchtung ebenfalls bis zum Stahluntergrund karbonatisiert. Der Einfluß der Rißbreite auf die Karbonatisierungstiefe der Rißufer ist ausgeprägt. Wegen der üblichen Verbundstörungen erstreckt sich die Karbonatisierung vom Betonriß ausgehend bis zu 1 cm entlang der Drahtachse.

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse ist auch die Verteilung der Chloride (nach Meerwasserbeanspruchung) bzw. Sulfate (nach Beanspruchung mit SO_2 -haltigem Wasser) von Interesse. Bild 7 zeigt die Verteilung an wasserlöslichen Chloriden in Proben nach 750 h und 15600 h. Es wird unterteilt nach den Betonzonen Z 1, Z 2 und Z 3 und den Rißbreiten $w = 0 - 0,15 - 0,45$ mm ($w = 0$ mm entspricht dem ungerissenen Beton). Die Eindiffusion der Chloride in den Beton erfolgte verhältnismäßig rasch. Nach 750 h wurden am Stahl (Zone Z 3) bereits im ungerissenen Beton die (bei schwarzem Stahl) für eine Korrosion kritischen Grenzgehalte an Chloriden von 0,4 Gew.% überschritten. Die Chloridgehalte im Beton nehmen mit der Beanspruchungsdauer deutlich zu. Bei den vorhandenen geringen Betondeckungen ist der Einfluß der Rißbreite ohne erhebliche Bedeutung auf den Chloridgehalt im angrenzenden Beton. Das schließt allerdings nicht aus, daß sich im Wasser des Risses noch höhere Chloridgehalte einstellen als im Porenelektrolyten des Betons.

Bild 8 verdeutlicht die Sulfatverteilung (wasserlöslicher Gehalt) im Beton nach 15600 h. Die Proben zur Analyse wurden nach einem gleichen Schema entnommen, wie in Bild 7 dargestellt. Auch hier ist die Rißbreite ohne Einfluß auf den Sulfatgehalt im angrenzenden Beton. Jedoch stellen sich in den äußeren Zonen des Betons stets höhere Gehalte ein als in den tieferen Betonzonen. Vermutlich werden die Sulfate vom Beton chemisch abgebunden, was eine Eindiffusion behindert. Bezüglich der für eine Korrosion in alkalischem Beton kritischen Gehalte an wasserlöslichen Sulfaten existieren in der Literatur keine exakten Angaben. Anhand der späteren Auswertungen wurde jedoch festgestellt, daß freie Sulfate von 6 - 7 Gew.% (bezogen auf den Zementanteil) in alkalischem Beton noch keine gefährliche Korrosion hervorrufen.

5. ERGEBNISSE

5.1 Untersuchungen an gebrochenen Proben

Während der Auslagerung unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen und nach Behandlung der Proben mit Meerwasser traten bei 3 von insgesamt 12 schwarzen und 5 von insgesamt 32 feuerverzinkten Stählen der Sorte St 1420/1570 auch Brüche auf (Tabelle 4). 6 der 8 Brüche erfolgten nach Einstellung hoher Rißbreiten ($w \sim 0,4$ mm) und bei angelegten mechanischen Spannungen von etwa $0,7 R_m$. 2 Brüche traten in Rißkörpern mit $w \sim 0,2$ mm und Spannungen von etwa $0,4 R_m$ auf. Bei sämtlichen Brüchen in Betonrissen (7 x) und in einem Betonlunker (1 x) war der Beton am Stahl (Rißufer) karbonatisiert, während außerhalb der Betonrisse die Karbonatisierungsfrent den Stahl noch nicht erreicht hatte.

Die wesentlichen Angaben zu den Brüchen sind in den Tabellen 6 und 7 zusammengefaßt:

Bruch 1, Probe 54

Noch während der Karbonatisierungsbehandlung zu Beginn der Versuche (nach 396 h) trat bei der feuerverzinkten Probe etwa 8 mm neben der Arbeitsfuge ($w = 0,45$ mm) ein Bruch auf. Am Bruchausgang wurden keine zinkfreien Stellen am Stahl festgestellt. Jedoch war in der Arbeitsfuge ein Verzinkungsfehler nach Bild 2 vorhanden.

Bruch 2, Probe 18

Bei einer künstlich karbonatisierten Probe wurde nach 750 h Chloridbehandlung an einer schwarzen Probe in der Arbeitsfuge des Betons ($w = 0,45$ mm) ein Bruch festgestellt. Im Rißbereich und am Bruchausgang war der Draht lochfraßartig korrodiert, dagegen frei von Korrosion außerhalb von Betonrissen.

Bruch 3, Probe 20

In einem nicht künstlich karbonatisierten Probekörper kam es bei einer schwarzen Probe nach 2400 h Chloridbehandlung in der Arbeitsfuge des Betons ($w = 0,40$ mm) zu einem Bruch. Im Rißbereich und am Bruchausgang lag starke Narbenkorrosion vor, außerhalb der Betonrisse war geringe Narbenkorrosion beim Stahl vorhanden.

Bruch 4, Probe 26

In einem nicht künstlich karbonatisierten Betonkörper wurde bei einer feuerverzinkten Probe nach 3860 h Chloridbeaufschlagung in einem Betonlunker am Ende des zylindrischen Betonkörpers ein Bruch festgestellt. Am Bruchausgang war das Zink auf 2 - 3 mm² wegkorrodiert, und am Bruchausgang war eine Lochfraßnarbe vorhanden. In den Betonrissen wurde ebenfalls eine Zinkkorrosion und Narbenkorrosion am Stahl bei $w = 0,25$ mm festgestellt. Außerhalb der Betonrisse war das Zink örtlich bis flächig abgetragen, wobei beim Stahl jedoch noch kein erkennbarer Korrosionsabtrag vorhanden war.

Bruch 5, Probe 55

In einer künstlich karbonatisierten Probe wurde bei einem

feuerverzinkten Draht nach 8180 h Auslagerung in der freien Atmosphäre in einem Betonriß mit $w = 0,40$ mm ein Bruch festgestellt. Im Rißbereich am Bruchausgang war das Zink bis zum Stahluntergrund wegkorrodiert. Am Stahl selbst wurden nahe des Bruchausgangs örtliche Korrosionsansätze vorgefunden. Außerhalb der Betonrisse war das Zink nur minimal abgetragen.

Bruch 6, Probe 56

In einer künstlich karbonatisierten Betonprobe trat bei einem feuerverzinkten Draht nach 8240 h Auslagerung in der freien Atmosphäre in einer Arbeitsfuge mit $w = 0,45$ mm ein Bruch auf. Bezüglich der Zink-/Stahlkorrosion in den Betonrissen und im rissefreien Beton wurden vergleichbare Erscheinungen wie bei Bruch 5 festgestellt.

Bruch 7, Probe 28

In einem nicht künstlich karbonatisierten Probekörper kam es bei einer feuerverzinkten Probe nach 14640 h Chloridbehandlung in der Arbeitsfuge des Betons ($w = 0,50$) zu einem Bruch. Auf der gesamten Probe war das Zink flächig abgetragen (nur noch vereinzelte Bereiche mit Restzink) und der Stahl war lokal mit starker Narbenkorrosion behaftet. Auch nahe des Bruchausgangs wurde eine tiefe Lochfraßnarbe (Tiefe $\sim 1,5$ mm) festgestellt. Die Betonoberfläche wies einen schwachen Längsriß in Richtung des Drahtes auf.

Bruch 8, Probe 19

In einer nicht künstlich karbonatisierten Probe wurde bei einem schwarzen Stahl nach 14710 h Chloridbehandlung in einem Betonriß ($w = 0,10$ mm) ein Bruch festgestellt. Auf der gesamten Probe war der Stahl muldenförmig abgetragen und wies tiefe Lochfraßnarben auf. Am Bruch betrug die max Abtragtiefe etwa 1,5 mm. Wegen der starken Korrosionserscheinungen auf der gesamten Probeoberfläche wies der Beton Längsrisse infolge Betonabspregung auf.

Faßt man alle Brucherscheinungen zusammen und läßt Bruch 1 (Verzinkungsfehler) und Bruch 4 (Betonlunker) unberücksichtigt, dann gilt folgendes festzustellen:

- In Betonrissen treten gegenüber dem rissefreien Bereich bevorzugt Rißkorrosionsbrüche auf. Dabei handelt es sich vermutlich um eine durch örtliche Korrosion (auch starke Narbenkorrosion) induzierte Wasserstoffrißkorrosion.
- Zu frühzeitigen Brüchen neigen insbesondere unverzinkte Stähle, deren umgebender Beton und der Rißbereich hohe Chloridgehalte aufweisen (Brüche 2 und 3).
- Unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen sind bei feuerverzinkten Stählen im Fall der gewählten geringen Betondeckungen und bei hohen Rißbreiten ($w \sim 0,40$ mm) Brüche möglich, da die Zinkauflage im Rißbereich nicht stabil ist und der Stahl dann lokal angegriffen wird (Brüche 5 und 6).
- Nach langandauernder starker Korrosionsbeanspruchung durch Chloride verhalten sich feuerverzinkte und schwarze

Drähte bezüglich Korrosion gleichermaßen ungünstig. Im Fall von Brüchen überwiegt wahrscheinlich die Kerbwirkung der vorhandenen, bis 1,5 mm tiefen Korrosionsnarben. Hierdurch sind bei den hochfesten Drähten reine Sprödbrüche infolge Unterschreitung der Kerbzugfestigkeit möglich. Dabei kann der zusätzliche Einfluß von Wasserstoff eine untergeordnete Rolle spielen (Brüche 7 und 8).

- e) Eine SO_2 -Beanspruchung wirkte sich nicht zunehmend schädigend auf das Bruchverhalten der Stähle aus.

Die Tatsache, daß nur die Betonkörper mit vergüteten Drähten Drahtbrüche aufwiesen, dürfte auch die höhere Empfindlichkeit dieser Stähle gegenüber Wasserstoffrißkorrosion im Vergleich zu den kaltgezogenen Drähten zurückzuführen sein.

Eine Reihe typischer Korrosions- bzw. Brucherscheinungen sollen anhand der folgenden Bilder dokumentiert werden:

In der Regel traten die Brüche in den breiteren Arbeitsfugen auf (Bild 9.1); nur in einem Fall lag der Bruch wenige mm vom Riß entfernt (Bild 9.2). Je nach Art und Dauer der Korrosionsbeanspruchung und des Korrosionsschutzes (schwarz, feuerverzinkt) wurden Rostablagerungen im Rißbereich festgestellt. Die stärksten Rostablagerungen traten bei den mit Chloriden beaufschlagten, schwarzen Drähten auf (Bild 9.3).

Die Bilder 10 bis 13 zeigen das Verhalten der gebrochenen schwarzen Stähle mit Chloridbeanspruchung. Nach kurzzeitiger Chloridbehandlung wurde nur in den Rißbereichen Korrosion festgestellt (Bild 10); hier trat Lochfraßkorrosion am Stahl auf, und der Bruchausgang erfolgte an einer etwa 0,35 mm tiefen Korrosionsnarbe (Bild 11). Die Korrosionsintensität des Stahles im Betonriß war nahezu unabhängig von der Rißbreite ($w = 0,15$ bzw. $0,45$ mm).

Nach langzeitiger Chloridbeanspruchung schwarzer Drähte trat intensive Korrosion (muldenförmiger Abtrag und Lochfraßkorrosion) entlang der gesamten Stahloberfläche auf und der Beton wurde infolge der Sprengwirkung der Korrosionsprodukte längs aufgerissen (Bild 12). Der Bruchausgang liegt an einer Stelle mit starker Korrosionsabzehrung (Korrosionstiefe bis 1,5 mm) (Bild 13).

Nach langzeitiger Chloridbeanspruchung feuerverzinkter Drähte wiesen die Drahtoberflächen lokal intensive Narbenkorrosion entlang der gesamten Drahtlänge und korrosionsbedingte Längsrißbildung des Betons auf (Bild 14). Im Bereich des Betonrisses entlang der Probe trat vermutlich nach dem Aufreißen verstärkte Karbonatisierung und Korrosion auf. Der unmittelbare Bruchausgang liegt im Bereich einer etwa 0,25 mm tiefen Narbe (Bild 15); etwa 90° versetzt zum Bruchausgang liegt eine ausgedehntere Korrosionsnarbe von etwa 1,5 mm Tiefe.

Die Bilder 16 bis 18 zeigen beispielhaft das Korrosions- und Bruchverhalten eines feuerverzinkten Drahtes nach atmosphärischer Auslagerung. Im Bereich des Betonrisses mit $w = 0,40$ mm,

in welchem der Bruch erfolgte, sind kaum sichtbare Korrosionserscheinungen festzustellen (Bild 16); dagegen sind in der Arbeitsfuge gleicher Breite Rostablagerungen vorhanden. Am Bruchausgang ist - erkennbar an den Röntgenverteilungsbildern für Zink und Eisen (Bild 17) - eine flächenhafte, jedoch lokal begrenzte Abzehrung des Zinks vorhanden. Unterhalb der Bruchfläche am Bruchausgang sind örtliche Korrosionsansätze am Stahl festzustellen.

5.2 Korrosionsverhalten in Betonrissen

5.2.1 Mechanismus der Korrosion von Zink und Stahl im gerissenen Beton

Das Korrosionsverhalten schwarzer und feuerverzinkter Drähte wird im folgenden am Beispiel des vergüteten Stahls St 1420/1570 (Bez. 2) beschrieben.

Atmosphärische Korrosion, Wechselbefeuchtung mit Wasser

Der Mechanismus der Korrosion schwarzer und feuerverzinkter Drähte in Betonrissen unterschied sich bei atmosphärischer Korrosion nicht wesentlich von jener bei Wechselbefeuchtung, weshalb hier nur auf das Korrosionsverhalten in der freien Atmosphäre eingegangen wird.

Feuerverzinkte Drähte zeigten nach 8180 h im Rißbereich auf einer Länge von bis zu 1 cm vom Riß entfernt einen flächenhaften Abtrag des Zinks. Bild 19.1 zeigt die verzinkte Drahtoberfläche nach Behandlung mit Kaliumhexacyanoferrat; eine Dunkelfärbung der Oberflächen verweist auf zinkfreie Bereiche. Nach Abbeizen der Zinkauflage zeigten sich im riß- bzw. rißnahen Bereich Ansätze einer örtlichen Korrosion auf der Stahloberfläche (Bilder 19.2 und 19.3).

Die Bilder 19.4 und 19.5 zeigen die Zinkauflage in der Arbeitsfuge vor dem Abbeizen an Stellen geringerer Korrosionsintensität. Die Zinkauflage wurde offenbar zunächst nur örtlich angegriffen, wobei in den Lochfraßstellen des Zinks z.T. auch Korrosionsprodukte auszumachen waren (Bild 19.4). Die Bilder 19.6 und 19.7 zeigen die Zusammensetzung in den Angriffstellen des Zinks in den Bildern 19.4 bzw. 19.5 an. Im ersteren Fall deuten die hohen Fe- und Zn-Peaks auf einen nur teilweisen Zinkabtrag hin (evtl. bis auf die eisenreicheren Hartzinkschichten). Im zweiten Fall zeigt die Analyse einen Abtrag des Zinks bis zur Stahloberfläche an, wobei in den Eisen-Korrosionsprodukten auch Reste von Zink eingebaut sind.

Die Bilder 19.8 bis 19.10 verdeutlichen den örtlichen Angriff in der Zinkauflage nach Ablösen der Fe-Zn Korrosionsprodukte anhand einer Übersichtsaufnahme und der Röntgenverteilungsbilder für Eisen und Zink. Die Neigung von Zink zu Lochfraßkorrosion in karbonatisierten Rissen bei bloßem Angriff von Feuchtigkeit wird hier besonders deutlich.

In Bild 20 wird das Korrosionsverhalten feuerverzinkter Drähte im Betonriß nach 15600 h atmosphärischer Korrosion dargestellt. Die Intensität der Stahlkorrosion im Rißbereich (Bilder

20.1 bis 20.3) hat gegenüber der vorgenannten, nur halb so langen Auslagerung (Bild 19) erheblich zugenommen. Die Korrosion ist vom Typ des Lochfraßes. Wie aus den Bildern 20.4 bis 20.6 hervorgeht, ist diese intensivere Stahlkorrosion auf einen verstärkten, flächenhaften Abtrag des Zinks im Rißbereich zurückzuführen.

Schwarze Drähte wiesen im Betonriß qualitativ vergleichbare Korrosionserscheinungen auf wie feuerverzinkte nach erfolgter Zinkkorrosion (z.B. Bilder 20.1 bis 20.3).

Wechselbefeuchtung mit SO₂-haltigem Wasser

Das Aussehen feuerverzinkter bzw. schwarzer Drähte nach langzeitiger (15600 h) Beaufschlagung mit SO₂-haltigem Wasser wird in den Bildern 21 bzw. 22 dargestellt. Anhand der Übersichtsaufnahme und Röntgenverteilungsbilder ist zu erkennen (Bilder 21.1 bis 21.3), daß bei feuerverzinkten Drähten das Zink im Rißbereich nach langandauernder Beanspruchung flächenhaft abgetragen wird. Auch nach intensiver SO₂-Zugabe findet ein Zinkabtrag nur im karbonatisierten Rißbereich statt, im angrenzenden alkalischen Beton wurde das Zink nur geringfügig angegriffen (Bilder 21.4 bis 21.6). Im Übergangsbereich karbonatisierter/nicht karbonatisierter Beton erfolgte eine lochfraßartige Zinkkorrosion (Bilder 21.7 bis 21.9). Diese Korrosionsform des Zinks dürfte für den Beginn einer Zinkkorrosion durch SO₂-haltiges Wasser im karbonatisierten Riß charakteristisch sein. Nach Entfernung der Korrosionsprodukte des Zinks und Eisens zeigte der Stahluntergrund im Rißbereich einen intensiven lochfraßartigen Angriff. Das Aussehen der Drähte entsprach dann in etwa jenem unverzinkter Stähle nach gleich langer SO₂-Beanspruchung (Bild 22).

Wechselbefeuchtung mit Meerwasser

Im folgenden wird auf das Korrosionsverhalten bei Beanspruchung mit Meerwasser eingegangen. Bild 23 zeigt das Verhalten der feuerverzinkten Drähte im Betonriß bzw. außerhalb von Betonrissen nach verhältnismäßig kurzzeitiger Beanspruchung von 3860 h. Aufgrund der in Bild 23.1 gezeigten Teilansicht der Probe nach dem Aufbrechen könnte man zunächst schließen, daß bereits nach dieser Zeit auf der gesamten Drahtlänge der Stahl korrodiert ist. Nach dem Abbeizen der Probe zeigte sich ein wenn auch starker Abtrag des Stahluntergrundes jedoch nur in den Betonrissen bzw. in dem angrenzenden Beton (Bild 23.2). In den Rißzonen des Betons wiesen die Proben nach dem Ausbau starke Ablagerungen voluminöser Korrosionsprodukte des Eisens auf (Bild 23.3) und nach dem mechanischen Entfernen des Rostes eine deutlich erkennbare Abzehrung des Zinks und des Stahls (Bild 23.4). Die Abtragung der Zinkauflage im Rißbereich wird auch aus einem Vergleich der Röntgenverteilungsbilder für Eisen und Zink (Bilder 23.5 und 23.6) mit dem Übersichtsbild 23.4 deutlich.

Die Zinkkorrosion außerhalb der Betonrisse wird in einer Übersicht des Bildes 24.1 verdeutlicht. Nach der Behandlung mit Kaliumhexacyanoferrat werden die zinkfreien Stellen schwarz gefärbt. Das Zink ist hier flächig wegkorrodiert, wie auch aus der Teilansicht des Bildes 24.1 und den zugehörigen Röntgenverteilungsbildern für Zink und Eisen (Bilder 24.2 und 24.3)

deutlich wird. Die Bilder 24.5 und 24.6 zeigen Korrosionsprodukte des Eisens bei örtlicher bzw. flächiger Korrosion des Zinks in stärkerer Vergrößerung. Diese Korrosion des Stahluntergrundes außerhalb der Risse hatte zu diesem Zeitpunkt jedoch noch keinen intensiven Stahlabtrag zur Folge (s.a. Bild 23.2).

Wie noch an späterer Stelle (Bilder 29 und 30) gezeigt wird, wurden ab 4000 bis 8000 h die Drähte auch außerhalb der Betonrisse infolge Chloridkorrosion stark abgetragen.

Bild 25 zeigt an einem Beispiel das Verhalten eines schwarzen Drahtes nach 750 h Chlorideinwirkung. Bei den unverzinkten Stählen trat im Betonriß bereits erheblich früher Narbenkorrosion auf als bei den feuerverzinkten (Bild 23). Außerhalb der Betonrisse erfolgte die Chloridkorrosion gegenüber dem Rißbereich verzögert, jedoch bei schwarzen Drähten etwa 3 bis 4mal früher als bei den feuerverzinkten.

5.2.2 Intensität der Stahlkorrosion schwarzer und feuerverzinkter Proben

Durch Probeentnahmen nach 8400 h (~ 1 Jahr) und 15640 h (~ 2 Jahre) wurde die Intensität der Stahlkorrosion in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer, Stahlsorte bzw. Dicke der Zinkauflage (99 bzw. 139 g/m²), der Betonrißbreite (w = 0,2 mm, w = 0,4 mm) und der Art der Korrosionsbeanspruchung (Atmosphäre, Wechselbefeuchtung mit Wasser, SO₂-haltigem Wasser, Meerwasser) untersucht. Es wurde noch zusätzlich unterschieden nach Proben mit und ohne künstliche Karbonatisierung zu Versuchsbeginn.

Für die Intensität der Korrosion wurden folgende Bewertungskriterien zugrunde gelegt:

- a) Korrosionsbedingte Längsrißbildung des Betons,
- b) augenscheinlicher Rostbefall nach Längsauftrennen der Proben,
- c) Stahlangriff nach Abbeizen der Proben,
- d) Festigkeits-Verformungsverhalten im Zugversuch (Abschnitt 5.2.3).

Zu a)

Korrosionsbedingte Längsrißbildung des Betons wurde zuerst bei den schwarzen (hier wurde nur St 1420/1570, Bez. 2.1. untersucht) nach Chloridbeanspruchung festgestellt, und zwar schon vor der 1. Entnahme. Die Längsrißbildung ging stets von den zuerst korrodierten Stahlbereichen im Betonriß aus (Bild 26). Bei den feuerverzinkten Stählen trat nach Chloridzugabe nur ab etwa der 2. Entnahme korrosionsbedingte Längsrißbildung des Betons auf, jedoch nur bei den schwächer verzinkten Stählen der Sorte St 1420/1570 (Zinkauflage 99 g/m²) (Bild 14).

Sämtliche mit Wasser und SO₂-haltigem Wasser beaufschlagten Betone und die atmosphärischen Korrosionsbedingungen ausgesetzten Proben waren bis zur 2. Entnahme frei von kor-

rosionsbedingten Längsrissen im Beton, da im Bereich zwischen den anfänglich erzeugten Betonquerrissen keine Korrosion des Stahls eintrat.

Zu b)

Zwecks Feststellung des Rostbefalls und dessen Zuordnung zu Betonrissen ($w \sim 0,2$ bzw. $0,4$ mm) wurden die aus dem Spinnrahmen ausgebauten Proben längs aufgetrennt und zur Feststellung der Karbonatisierung auch mit Phenolphthalein-Lösung behandelt. Bezüglich der augenscheinlich erkennbaren Korrosion wurden, von wenigen Ausnahmen abgesehen, keine erheblichen Unterschiede zwischen Proben der 1. bzw. 2. Entnahme festgestellt. In den Bildern 27 und 28 wurden daher getrennt nach den beiden untersuchten Stahlorten vornehmlich die Proben der 1. Entnahme abgebildet.

In den Bildern 27 und 28 sind die Befunde für die Stähle St 1420/1570, schwarz bzw. feuerverzinkt, und St 1570/1770, feuerverzinkt, getrennt nach Korrosionsbedingungen aufgeführt. Folgende wesentlichen Ergebnisse sind festzuhalten:

St 1420/1570 (Zinkauflage 99 g/m^2) (Bild 27)

Wasser (schwarz und feuerverzinkt, nicht künstlich karbonatisiert und künstlich karbonatisiert)

- 1 - Es besteht kein erheblicher Unterschied im Rostbefall zwischen nicht künstlich und künstlich karbonatisierten Proben;
- 2 - im Betonriß ist der Rostbefall bei feuerverzinkten Stählen etwas geringer als bei schwarzen;
- 3 - der Rostbefall im Riß nimmt mit der Rißbreite etwas zu.

Atmosphäre (nur feuerverzinkt, nur künstlich karbonatisiert)

Bei gleicher Rißbreite ist der Rostbefall insgesamt etwa geringer als nach Wechselbefeuchtung mit Wasser (s.o.).

SO_2 -haltiges Wasser (schwarz und feuerverzinkt, nicht künstlich karbonatisiert und künstlich karbonatisiert)

- 1 - Es besteht kein erheblicher Unterschied im Rostbefall zwischen nicht künstlich und künstlich karbonatisierten Proben;
- 2 - im Betonriß ist der Rostbefall bei feuerverzinkten Stählen etwas geringer als bei schwarzen;
- 3 - der Rostbefall im Riß erfolgte nahezu unabhängig von der Rißbreite;
- 4 - der Rostbefall ist insgesamt etwas stärker als nach Wechselbefeuchtung mit Wasser.

Meerwasser (schwarz und feuerverzinkt, nicht künstlich karbonatisiert und künstlich karbonatisiert)

- 1 - Es besteht kein erheblicher Unterschied im Rostbefall zwischen nicht künstlich und künstlich karbonatisierten Proben;
- 2 - auf der gesamten Drahtlänge ist der Rostbefall (zumindest stellenweise) bei schwarzen Stählen ausgeprägter als bei feuerverzinkten;

- 3 - bei den gewählten Betondeckungen ist der Rostbefall im Riß nicht wesentlich stärker als im rissefreien Beton;
- 4 - der Rostbefall ist insgesamt erheblich stärker als bei den mit Wasser und SO_2 -haltigem Wasser behandelten Proben.

St 1570/1770 (Zinkauflage 139 g/m^2) (Bild 28)

Wasser, SO_2 -haltiges Wasser, Meerwasser (nur feuerverzinkt, künstlich karbonatisiert)

Qualitativ bestehen grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge wie bei den feuerverzinkten Proben St 1420/1570. Insgesamt gesehen ist der Rostbefall der Proben in Betonrissen (Wasser, SO_2 -haltiges Wasser) und zusätzlich zwischen den Rissen (Meerwasser) geringer als bei den Stählen St 1420/1570 mit niedrigerer Zinkauflage.

Zu c)

Zur Feststellung des Korrosionsangriffes am Stahl wurden die Drahtproben aus dem Beton herausgelöst und in verdünnter Salzsäure gebeizt. Hiernach wurden sämtliche Korrosionsangriffe fotografiert und das für die Probenoberseite charakteristische Korrosionsbild wurde den Versuchsparametern zugeordnet. Bild 29 zeigt den Korrosionsangriff der Stähle St 1420/1570 (Bez. 2) nach der 1. Entnahme in Abhängigkeit von der Oberfläche (schwarz, feuerverzinkt), der Rißbreite ($w = 0,4$ bzw. $0,2$ mm), der Vorbehandlung der Proben (künstlich karbonatisiert K, nicht künstlich karbonatisiert L) und dem Medium (Wasser, SO_2 -haltiges Wasser, chloridhaltiges Wasser-Meerwasser und atmosphärische Auslagerung). Es gelten folgende Zusammenhänge (analog dem unter zu b) genannten Rostbefall):

- 1 - Es besteht kein erheblicher Unterschied der Korrosion zwischen künstlich und nicht künstlich karbonatisierten Proben;
- 2 - im Betonriß und den angrenzenden Bereichen ist die Korrosion bei schwarzen und feuerverzinkten Stählen nur geringfügig verschieden:
Nach Wasser und SO_2 -Beaufschlagung sind die Korrosionstiefen im Riß bei schwarzen Stählen etwas größer als bei feuerverzinkten, nach Meerwasserbehandlung zeigen die schwarzen Proben muldenförmigen Abtrag und Lochfraß, die feuerverzinkten dagegen nur Lochfraßkorrosion;
- 3 - ein wesentlicher Einfluß der Rißbreite auf die Korrosionstiefen (Wasser, SO_2 -haltiges Wasser) ist nicht vorhanden, jedoch nimmt die Ausdehnung der Korrosion beidseitig der Risse mit der Rißbreite etwas zu;
- 4 - der Korrosionsbefall nimmt in der Reihenfolge atmosphärische Auslagerung, Wechselbefeuchtung mit Wasser, Wechselbefeuchtung mit SO_2 -haltigem Wasser, Wechselbefeuchtung mit Meerwasser zu; dabei ist die Korrosion nach atmosphärischer Auslagerung erheblich geringer als nach Wechselbefeuchtung mit Wasser und SO_2 -haltigem Wasser und die Korrosion nach Wechselbefeuchtung mit Meerwasser erheblich ausgeprägter als bei den übrigen Medien.

In Bild 30 wird der Korrosionsangriff der Stähle St 1420/1570 (Bez. 2) und 1570/1770 (Bez. 1) nach der 2. Entnahme in Ab-

hängigkeit von den Prüfparametern gezeigt. Für den Stahl St 1420/1570 gelten prinzipiell die gleichen Zusammenhänge wie für die Proben nach der 1. Entnahme. Jedoch hat die Intensität der Korrosion gegenüber der 1. Entnahme noch zugenommen.

Im Fall der Stähle St 1570/1770 hat sich die gegenüber den Stählen St 1420/1570 stärkere Verzinkung bereits positiv ausgewirkt. Bei Wechselbefeuchtung mit Wasser ist keine erkennbare Korrosion der Stähle vorhanden und nach SO₂-Beaufschlagung wurden auch nur die Stähle in den breiteren Rissen (w ~ 0,4 mm) geringfügig angegriffen. Bei den mit Meerwasser behandelten Proben ist der Stahl zwar ebenfalls stark korrodiert, jedoch sind die Angriffstiefen bei St 1570/1770 geringer als bei den schwächer verzinkten Stählen St 1420/1570.

5.2.3. Zugversuche an ausgelagerten Proben

Zur quantitativen Beschreibung der Korrosion wurden an Proben der 2. Entnahme auch Zugversuche durchgeführt, wobei die Kennwerte Zugfestigkeit R_m, Gleichmaßdehnung A_G, Bruchdehnung A₁₀ und Brucheinschnürung Z wie bei unkorrodierten Proben bestimmt wurden. Die mechanischen Kennwerte der korrodierten Proben wurden jenen unkorrodierten gegenübergestellt.

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 8 und Bild 31 wiedergegeben. Bei der Zusammenstellung in Bild 31 sind Mittelwerte der Messungen eingezeichnet, wobei lediglich nach schwarz/feuerverzinkt und dem Medium unterschieden wird. Der Einfluß der Rißbreite des Betons bleibt unberücksichtigt, zumal festgestellt wurde, daß im Zugversuch zahlreiche Proben nicht an den der max. Rißbreiten zuzuordnenden Korrosionsstellen gebrochen sind (Tabelle 8). Nur im Fall der extrem stark korrodierten Stähle St 1420/1570 nach Meerwasserbehandlung und den nicht korrodierten Stählen St 1570/1770 nach Wechselbefeuchtung mit Wasser sind auch Brüche außerhalb von Betonrissen aufgetreten. Bild 32 zeigt typische, von Korrosionsstellen ausgehende Zugbrüche.

Bei den Zugversuchen wurden die Verformungskennwerte infolge korrosionsbedingter Kerbwirkung erwartungsgemäß prozentual stärker herabgesetzt als die Zugfestigkeit. Entsprechend dem Schädigungsgrad (Bild 30) verheilten sich die feuerverzinkten Proben aus St 1420/1570 im Vergleich zu neuwertigen etwas günstiger als die schwarzen (Bild 31.1) und die schwächer feuerverzinkten Drähte aus St 1420/1570 (Bild 31.2) erheblich ungünstiger als die stärker feuerverzinkten Drähte aus St 1570/1770 (Bild 31.2).

Die Kennwerte der Drähte nehmen in der Reihenfolge Ausgangszustand - Auslagerung in der Atmosphäre - Wechselbefeuchtung mit Wasser - Wechselbefeuchtung mit SO₂-haltigem Wasser - Wechselbefeuchtung mit Meerwasser ab.

Legt man das Festigkeits-Verformungsverhalten der Drähte zugrunde und mittelt im letzteren Fall über A_G, A₁₀ und Z, dann gelten folgende Abminderungen der Kennwerte:

			<u>Verformung</u>	<u>Festigkeit</u>
St 1420/1570 - schwarz	- Wasser		49 %	2 %
	- SO ₂		59 %	4 %
	- Meerwasser		94 %	37 %
St 1420/1570 feuerverzinkt (13,9 µm)	- Atmosphäre		0 %	0 %
	- Wasser		29 %	1 %
	- SO ₂		35 %	2 %
	- Meerwasser		85 %	14 %
St 1570/1770 feuerverzinkt (19,4 µm)	- Wasser		3 %	0 %
	- SO ₂		15 %	0 %
	- Meerwasser		63 %	7 %

6. ZUSAMMENFASSENDE BEURTEILUNG DER VERSUCHS- ERGEBNISSE

An schwarzen und feuerverzinkten Spannstählen der Güten St 1570/1770 (patentiert, gezogen, angelassen), d_s = 5,0 mm und St 1420/1570 (vergütet), d_s = 6,0 mm, wurden Korrosionsversuche in gerissenem Beton durchgeführt. Die mittleren Zinkauflagen der Drähte betragen 19,4 bzw. 13,9 µm (139 bzw. 99 g/m²). Die Verzinkung der Drähte erfolgte kontinuierlich im Durchlaufverfahren, wobei die Reinzinkauflage beim Verlassen des Zinkbades abgestreift wurde. Diese Verzinkungsbedingungen und die dabei erzielten verhältnismäßig geringen Zinkschichtdicken entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik.

Die Drähte wurden mit zylindrischen Betonkörpern (Betongüte B 45) von etwa 20 cm Länge und 40 mm Durchmesser umgeben; die Betondeckung betrug somit 18 bzw. 17 mm. Nach Erhärten des Betons wurden durch Spannen der Drähte in einem Spannrahmen Querrisse im Betonkörper mit Rißbreiten von w ~ 0,2 bzw. 0,4 mm erzeugt. Je nach erzeugter max. Rißbreite betrug die Anfangsvorspannung der vergüteten Drähte 0,38 bzw. 0,72 R_m und die der gezogenen Drähte 0,33 bzw. 0,43 R_m.

Die gerissenen Prüfkörper wurden anschließend in den Betonrissen zum Teil künstlich karbonatisiert und sodann einer Wechselbeanspruchung mit Wasser, SO₂-haltigem Wasser (0,1 Gew.-% SO₂) und künstlichem Meerwasser unterzogen oder unter atmosphärischen Bedingungen (nur feuerverzinkt) ausgelagert. Bei der Wechselbeanspruchung betrug die Feuchtephase 8 h und die Austrocknungsphase 16 h (30 °C, 40 - 50 % relative Luftfeuchtigkeit). Die Proben wurden nach Bruch eines Spannstahls bzw. nach etwa 1 Jahr (1. Entnahme) und etwa 2 Jahren (2. Entnahme) entnommen. Bei den Wechselbefeuchtungsversuchen waren auch die nicht künstlich karbonatisierten Risse nach etwa 2000 bis 4000 h bis zum Stahluntergrund karbonatisiert.

Während der Auslagerung der Proben unter atmosphärischen Bedingungen und nach Behandlung mit Meerwasser traten bei

2 von insgesamt 12 schwarzen und 4 von insgesamt 32 feuerverzinkten Stählen der Sorte St 1420/1570 auch Brüche in Betonrissen auf. Die verwendeten Stähle St 1420/1570 waren nachweislich empfindlicher gegenüber Wasserstoffrißkorrosion als andere Stähle dieser Sorte. 2 weitere Brüche erfolgten im Zusammenhang mit einem Verzinkungsfehler bzw. einem Betonlunker. Bei dem (feuerverzinkten) Stahl St 1570/1770 (12 Proben) traten keine Brüche auf. Die Brüche in Betonrissen verteilen sich wie folgt:

schwarzer Stahl - Chloride	-	750 h
schwarzer Stahl - Chloride	-	2400 h
verzinkter Stahl - Atmosphäre	-	8180 h
verzinkter Stahl - Atmosphäre	-	8240 h
verzinkter Stahl - Chloride	-	14640 h
schwarzer Stahl - Chloride	-	14710 h

Faßt man alle Brucherscheinungen zusammen, dann gilt folgendes festzustellen:

- In Betonrissen können bei hinsichtlich Wasserstoffrißkorrosion empfindlichen Stählen gegenüber dem rissfreien Bereich bevorzugt Brüche auftreten. Dabei handelt es sich vermutlich um eine durch örtliche Korrosion (auch starke Narbenkorrosion) induzierte Wasserstoffrißkorrosion.
- Zu frühzeitigen Brüchen neigen insbesondere unverzinkte Stähle, deren umgebender Beton und der Rißbereich hohe Chloridgehalte aufweisen.
- Unter atmosphärischen Korrosionsbedingungen sind bei feuerverzinkten Stählen im Fall der gewählten geringen Betondeckungen und bei hohen Rißbreiten ($w \sim 0,40$ mm) Brüche möglich, da die Zinkauflage im Rißbereich nicht stabil ist und der Stahl dann lokal angegriffen wird.
- Nach langandauernder starker Korrosionsbeanspruchung durch Chloride verhalten sich feuerverzinkte und schwarze Drähte bezüglich Korrosion gleichermaßen ungünstig. Im Fall von Brüchen überwiegt wahrscheinlich die Kerbwirkung der vorhandenen, bis 1,5 mm tiefen Korrosionsnarben. Hierdurch sind bei den hochfesten Drähten auch reine Sprödbrüche infolge Unterschreitung der Kerbzugfestigkeit möglich. Dabei kann der zusätzliche Einfluß von Wasserstoff eine untergeordnete Rolle spielen.
- Eine SO_2 -Beanspruchung wirkte sich nicht zunehmend schädigend auf das Bruchverhalten der Stähle aus.

An gerissenen und gezielt entnommenen Probekörpern wurden Art und Umfang einer Zink-/Stahlkorrosion in den Betonrissen verfolgt. Nach Karbonatisierung der Rißufer und Korrosionsbeanspruchung (wässriger Elektrolyt im Riß) wird das Zink im Riß abgetragen. Bei Chloridbeanspruchung setzt Korrosion am feuerverzinkten Stahl bereits ein, bevor die Karbonatisierungsfront im Riß den Stahl erreicht hat. Durch vergleichende Betrachtung konnte festgestellt werden, daß bereits bei atmo-

sphärischen Korrosionsbedingungen das Zink im Betonriß mindestens 5mal schneller abgetragen wird als bei freier Bewitterung. Vermutlich behindert die unzureichende Belüftung im Spalt die Ausbildung schützender Deckschichten.

Die Abtragsgeschwindigkeit von Zink in Betonrissen nimmt in der Reihenfolge atmosphärische Korrosionsbedingungen - Wechselbefeuchtung mit Wasser - Wechselbefeuchtung mit SO_2 -haltigem Wasser - Wechselbefeuchtung mit Meerwasser zu. Zink im Betonriß wird unter allen Korrosionsverhältnissen zunächst lochfraßartig angegriffen. Der Lochfraß des Zinks geht dann in einen flächenhaften Zinkabtrag und Lochkorrosion des Stahls über. Wachsen die Lochkorrosionsstellen des Stahls nach langen Versuchszeiten und/oder intensiver Korrosionsbeanspruchung zusammen, dann ergibt sich insgesamt ein ringförmiger, mehr oder wenig ungleichmäßiger Angriff. Die geschilderte Art und die Geschwindigkeit der Zink-/Stahlkorrosion ist von der Rißbreite des Betons im Bereich $w \sim 0,2$ bis $0,4$ mm nahezu unabhängig.

Trotz verhältnismäßig rascher Zinkkorrosion im Spalt ist das Zink zunächst in der Lage, den Korrosionsangriff des Stahluntergrundes im Spalt zu verzögern. Bei den geringen Zinkauflagen von nur $14 \mu\text{m}$ setzt z.B. bei Chloridbeanspruchung die Stahlkorrosion im Riß bei feuerverzinkten Stählen etwa 5mal später ein als bei schwarzen. Der verhältnismäßig rasche Zinkabtrag im Spalt in allen Medien läßt jedoch schwarze und feuerverzinkte Drähte bereits nach 1 bis 2 Jahren gleichermaßen schnell korrodieren. Dünne Zinkauflagen schützen den Stahl somit nur temporär, jedoch wurde am Beispiel des etwas stärker verzinkten gezogenen Stahls (Zinkauflage $19,4 \mu\text{m}$) erkannt, daß sich höhere Zinkauflagen günstiger auswirken. Bei Chloridangriff muß jedoch auch bei erhöhten Zinkauflagen von einer nur begrenzten Lebensdauer ausgegangen werden, wenn - wie bei Wechselversuchen - Feuchtigkeit und Sauerstoff an die verzinkte Oberfläche gelangen können.

Die Stahlkorrosion schwarzer und feuerverzinkter Stähle nimmt analog der Zinkkorrosion (s.o.) in der Reihenfolge atmosphärische Auslagerung - Wechselbefeuchtung mit Wasser - SO_2 -haltigem Wasser - Meerwasser zu. Dabei ist die Korrosion nach atmosphärischer Auslagerung erheblich geringer als nach Wechselbefeuchtung mit Wasser bzw. SO_2 -haltigem Wasser und die Korrosion nach Wechselbefeuchtung mit Meerwasser wesentlich ausgeprägter als bei den übrigen Medien. Bei nur dünnen Zinkauflagen bestimmt langfristig ausschließlich die Intensität der Korrosionsbeanspruchung den Stahlabtrag; die Feuerverzinkung und die Rißbreite sind dann ohne erheblichen Einfluß auf die Korrosionstiefe. Höhere Zinkauflagen sind in der Lage, bei Angriff von wässrigen Lösungen - auch bei gelöstem SO_2 , jedoch nicht in Gegenwart erhöhter Chloridgehalte - einen Stahlangriff wesentlich zu behindern.

Als Maßstab für die temporär korrosionsschützende Wirkung von Zink in Abhängigkeit von Prüfmedium können die korrosionsbedingten Abminderungen der Festigkeit (R_m) und Verformungskennwerte (A_G, A_{10}, Z) der nach 2 Jahren Auslagerung entnommenen Drähte herangezogen werden:

Verformung Festigkeit

St 1420/1570	schwarz	Wasser	49 %	2 %
		- SO ₂	59 %	4 %
		- Meerwasser	94 %	37 %
St 1420/1570	feuer- verzinkt (13,9 µm)	- Atmosphäre	0 %	0 %
		- Wasser	29 %	1 %
		- SO ₂	35 %	2 %
		- Meerwasser	85 %	14 %
170/1770	feuer- verzinkt (19,4 µm)	- Wasser	3 %	0 %
		- SO ₂	15 %	0 %
		- Meerwasser	63 %	7 %

Die relativen Abminderungen nehmen in der Reihenfolge feuer-
verzinkt 19,4 µm - feuerverzinkt 13,9 µm - schwarz und den
Korrosionsbelastungen Atmosphäre - Wasser - SO₂haltiges
Wasser - Meerwasser zu. Abnahmen der Festigkeit durch Kor-
rosion im Riß nach 2 Jahren traten nur bei folgenden Varianten
nicht auf:

- 13,9 µm Zinkauflage - Atmosphäre
- 19,4 µm Zinkauflage - (Atmosphäre)
- Wasser
- SO₂-haltiges Wasser

Jedoch sind Abminderungen der Festigkeit/Verformung kein
alleiniger Maßstab für die Gefährdung der feuerverzinkten
Drähte in Betonrissen, da bei diesbezüglich empfindlichen
Spannstählen trotz nur geringfügiger Korrosion im Betonriß
(Variante St 1420/1570, 13,9 µm Zinkauflage, atmosphärische
Korrosionsbedingungen) Wasserstoffrißkorrosionsbrüche möglich
sind. Für eine Wasserstoffkorrosion reichen eine Zinkkorrosion
im karbonatisierten Riß und minimale Stahlkorrosion aus.

Die Versuche lassen insgesamt erkennen, daß im Fall geringer
Betondeckungen und Rißbreiten von 0,2 bis 0,4 mm eine Feuer-
verzinkung mit Auflagen von etwa 15 µm bei starker Kor-
rosionsbelastung keine erheblichen Vorteile erbringt. Die Ver-
suche lassen jedoch den Schluß zu, daß bei stärkeren Zinkauf-
lagen ein verbesserter Korrosionsschutz zu erwarten ist.
Ungeklärt ist noch das Zinkkorrosionsverhalten im Fall er-
höhter Betondeckungen. Bei weiteren Versuchen an Bauteilen
in praxisnaher Umgebung werden daher die Zinkauflage und
Betondeckung als weitere Parameter eingeführt.

Die Untersuchungen wurden vom Gemeinschaftsausschuß Ver-
zinken über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungs-
vereinigungen (AIF) vom Bundesministerium für Wirtschaft
finanziert, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

LITERATUR

- /1/ P. Schießl: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der
erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter
besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des
Betons. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahl-
beton 255 (1976).
- /2/ U. Nürnberger: Korrosionsprobleme des Stahls bei
Massivbauten im Offshore-Bereich. Beitrag zur Kor-
rosionstagung der Schiffbautechnischen Gesellschaft e.
21. - 23.2.1983, Hamburg.
- /3/ F. Leonhardt: Rißschäden an Betonbrücken - Ursache
und Abhilfe. Beton- und Stahlbetonbau 74 (1979), 36.
- /4/ A.W. Beeby: Concrete in the Oceans. Cracking and
Corrosion. Techn. Rep. No. 1, Cement and Concrete
Assoc., Department of Energy, Great Britain 1978.
- /5/ A. Bäumel, H.-J. Engell: Die Auswirkung von Kalzium-
chlorid auf das Korrosionsverhalten von Stahl in Beton.
Beton 10 (1960), 256.
- /6/ G. Rehm, R. Frey, U. Nürnberger: Versuche zur Er-
mittlung der Korrosionsempfindlichkeit von Spannstählen.
Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 309
(1980).
- /7/ G. Rehm, H. Moll: Versuche zum Studium des Einflusses
der Rißbreite auf die Rostbildung an der Bewehrung von
Stahlbetonbauteilen. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß
für Stahlbeton 169 (1964), 4.
- /8/ .Commissie voor Uitvoering van Research (CUR):
Onderzoek naar de toelaatbare scheurbreedte in gewapend
betonconstructies. C.U.R. Rapport 10, Delft 1956.
- /9/ H.L. Moll: Über die Korrosion von Stahl in Beton.
Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 169
(1964), 63.
- /10/ B. Tremper: The Corrosion of Reinforcing Steel in
Cracked Concrete. J. Americ. Concrete Inst. 43 (1947),
1137.
- /11/ St. Soretz: Korrosionsschutz im Stahlbeton und Spann-
beton. Betonstein-Zeitung 33 (1967), 58.
- /12/ R. Bertrand: Corrosion à la mer de structures en béton
armé et précontraint. Annales de l'Institut Technique du
Bâtiment et des Travaux Publics 360 (1978) April, Série
Béton, No. 176,62.
- /13/ P. Duffant, L. Duhoux, B. Henze: Corrosion des aciers
dans le béton armé. Essais réalisés dans l'estuaire de la
Rance de 1959 à 1971. Annales de l'Institut Technique
de Bâtiment et Travaux Publics 305 (1973) May.

- /14/ J. Brocard: Corrosion des aciers dans le béton armé. RILEM-Symposium, Stockholm 1957, Vol I, 49 and Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics M 126 (1958), 755.
- /15/ E. Kern: Korrosionsschutz von Stahl im Beton. VDI-Berichte 285 (1977), 83.
- /16/ G. Rehm, A. Raven: Korrosion von Stahl im Beton. Betonstein-Zeitung 34 (1968), 258.
- /17/ B. Heuzé: Cathodic Protection on Concrete Offshore Platforms. Mater. Performance 19 (1980), 24.
- /18/ K.W.J. Treadaway, B.L. Brown, R.N. Cox: Durability of Galvanized Steel in Concrete. In: Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete. STP 713, ASTM, 1980, 102.
- /19/ H. Martin, A. Raven: Untersuchungen über das Verhalten verzinkter Bewehrung in Beton. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 242 (1974), 62.
- /20/ J.A. Gonzales, C. Andrade: Kinetics Variables Determining Corrosion of Galvanized Reinforcements Embedded in Concrete. 3. FIP-Symposium on "Stress Corrosion Cracking", El Escorial, Spain, Sept. 1981.
- /21/ O.I. Scott, H.J. Leung: Bond Characteristics of Concrete Reinforcing Tendons Coated with Zinc. ILZRO Project ZE 222, Department of Mechanical Engineering, University of Newcastle, N.S.W. 2308, Australia 1978.
- /22/ J.A. Gonzales, S. Algaba, C. Andrade: Effect of Carbonation, Chlorides and Relative Ambient Humidity on the Corrosion of Galvanized Rebars Embedded in Concrete. Brit. Corros. J. (1982), noch unveröffentlicht.
- /23/ D. Stark: Measurement Techniques and Evaluation of Galvanized Reinforcing Steel in Concrete Structures in Bermuda. In: Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, STP 713, ASTM, 1980, 132.
- /24/ A.R. Cook, S.F. Radtke: Recent Research on Galvanized Steel for Reinforcement of Concrete. In: Chloride Corrosion of Steel in Concrete. STP 629, ASTM, 1976, 51.
- /25/ I. Cornet, B. Bresler: Corrosion of Steel and Galvanized Steel in Concrete. Mater. Protection 5 (1966), 69.
- /26/ International Lead Zinc Research Organization: Investigations on Mechanical Behaviour of Galvanized Steel Reinforcement. Project No. ZE-170, Report 1-4. New York 1971/72.
- /27/ Die Korrosionsbeständigkeit feuerverzinkten Stahles. Merkblatt 400, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1983.
- /28/ U. Barton, F. Beranek: Werkstoffe und Korrosion 10 (1959), 377.
- /29/ G. Schikorr: Korrosionsverhalten von Zink, Bd. 1, Metall-Verlag, Berlin 1965.
- /30/ E.A. Anderson, M.L. Fuller: Metals and Alloys 10 (1939), 282.
- /31/ G. Schikorr: Die Zersetzungerscheinungen der Metalle. Verlag J.A. Barth, Leipzig 1945.
- /32/ H.H. Uhlig: The Corrosion Handbook. John Wiley u. Sons Verlag, New York 1948.
- /33/ H. Bablik: Das Feuerverzinken. Wien 1941, 164.
- /34/ G. Rehm, U. Nürnberger, G. Riecke: Untersuchungen über die Eigenschaften verzinkter hochfester Spannstähle. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 242 (1974), 5.
- /35/ G. Schikorr: Galvanotechnik 54 (1963), 122.
- /36/ E. Riecke: Untersuchungen über den Einfluß des Zinks auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen. Werkstoffe und Korrosion 30 (1979), 619.
- /37/ U. Nürnberger, R. Frey: Untersuchungen zur Rißkorrosion hochfester Seildrähte durch Schwitzwasser. Werkstoffe und Korrosion 32 (1981), 201.
- /38/ G. Rehm, U. Nürnberger: Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Spannstählen. Technologische Eigenschaften kaltgezogener und nachträglich feuerverzinkter Spannstähle. Stahl und Eisen 98 (1978), 394.
- /39/ G. Rehm, U. Nürnberger: Untersuchungen über den Einfluß einer Feuerverzinkung auf die Eigenschaften von kaltumgeformten Betonrippenstählen und vergüteten Spannstählen. AIF-Forschungsvorhaben Nr. 4001. Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart 16.5.1979.
- /40/ G. Rehm, U. Nürnberger, R. Frey: Zur Korrosion und Rißkorrosion bei Spannstählen. Werkstoffe und Korrosion 32 (1981), 211.

Anhang:

Tabellen

Bilder

Aus drucktechnischen Gründen sind die farbigen
Bilder auf den Seiten 145 bis 160 zusammenge-
faßt.

<u>Bild</u>	<u>Seite</u>
9	145
10	146
12, 14	147
16	148
23.1	149
26	150
27	151 bis 157
28	159 und 160



Bez.	Sorte St	D _{mr}	Ober- fläche	R _{p0,01}	R _{p0,2}	R _m	A ₁₀	A _g	Z	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
		mm		N/mm ²		%										
1.1	1570/1770	5,0	schwarz	1420	1711	1819	8,7	3,3	50	0,67	0,26	0,52	0,020	0,015	0,07	0,018
1.2	1570/1770	5,0	verzinkt	1295	1530	1715	8,8	4,2	48							
2.1	1420/1570 ¹⁾	6,0	schwarz	1391	1560	1670	9,0	3,9	53	0,51	1,48	0,63	0,014	0,015	0,58	0,022
2.2	1420/1570	6,0	verzinkt	1449	1562	1662	8,3	3,5	53							

1) Güte 54 SiCr 6

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Stähle

Bez.	Sorte	Bleibadent- fettung		Salzsäure- beize (1)		Wasserspülung mit Spritzdüsen	Fluxen NH ₄ Cl-3°Bé		Abstreifverzinkung					
		T	t	T	t		T	t	p	T	v	t	α_1	α_2
		°C	sec	°C	sec		°C	sec	atü	°C	m/min	sec	Grad	
1.2	1570/1770	400	6	42	23		65	2	50	460	16	15	13	21
2.2	1420/1570	400	7	42	27		65	2	50	460	14	17	13	21

1 8 Gew.% HCl, 75 g/l Fe

T = Temperatur v = Durchlaufgeschwindigkeit
t = Tauchzeit α_1 = {Ablenkwinkel an der Tauchwalze } = Einlauf
p = Abstreifdruck α_2 = {gegenüber Horizontalen } = Auslauf

Tabelle 2: Verzinkungsbedingungen der Spannstähle

Zementart	PZ 45 F
CrO ₄ -Gehalt (Zement)	≈ 40 - 80 ppm
Zuschlag	0 - 8 mm, normale Sieblinie
w/z-Wert	0,5
Verdichtung	durch Rütteln
Betongüte	B 45
Betonfestigkeit - 28 Tage	54 N/mm ²

Tabelle 3:
Angaben zum verwendeten
Beton

Material St	Karbo- natisie- rung	w ₁ mm	Korrosionsbeanspruchung			
			Wasser	Wasser + Cl ⁻	Wasser + SO ₂	Atmos- phäre
1420/1570 schwarz	+	0,2	1	17	33	X
	+	0,4	2	⑱	34	
	-	0,2	3	⑲	35	
	-	0,4	4	⑳	36	
1420/1570 verzinkt	+	0,2	5	21	37	49 , 50
	+	0,2	6	22	38	51 , 52
	+	0,4	7	23	39	53 , ⑤④
	+	0,4	8	24	40	⑤⑤ , ⑤⑥
	-	0,2	9	25	41	X
	-	0,2	10	⑳	42	
	-	0,4	11	27	43	
	-	0,4	12	⑳	44	
1570/1770 verzinkt	+	0,2	13	29	45	X
	+	0,2	14	30	46	
	+	0,4	15	31	47	
	+	0,4	16	32	48	

w₁ = angestrebte Rißbreite in Arbeitsfuge

Tabelle 4: Übersicht des Versuchsprogramms und der während der 2jährigen Auslagerung gebrochenen Proben (○)

Probe	W ₁ Soll	W ₁ ist	W ₂ ist
1	0,20	0,25	-
2	0,40	0,40	0,25
3	0,20	0,25	-
4	0,40	0,45	0,15
5	0,20	0,25	0,15
6	0,20	0,20	0,15
7	0,40	0,35	0,15
8	0,40	0,45	0,15
9	0,20	0,20	0,20
10	0,20	0,25	0,15
11	0,40	0,50	0,15
12	0,40	0,35	0,20
13	0,20	0,25	0,15
14	0,20	0,25	0,15
15	0,40	0,40	0,15
16	0,40	0,50	-
17	0,20	0,20	-
18	0,40	(0,45)	0,15
19	0,20	0,20	(0,10)
20	0,40	(0,40)	0,20
21	0,20	0,25	0,15
22	0,20	0,30	0,10
23	0,40	0,50	0,15
24	0,40	0,40	0,15
25	0,20	0,20	0,10
26 ¹	0,20	0,25	0,10
27	0,40	0,50	0,25
28	0,40	(0,50)	0,20

Probe	W ₁ Soll	W ₁ ist	W ₂ ist
29	0,20	0,25	
30	0,20	0,30	
31	0,40	0,45	
32	0,40	0,40	
33	0,20	0,25	
34	0,40	0,45	
35	0,20	0,30	
36	0,40	0,50	
37	0,20	0,20	0,15
38	0,20	0,20	0,15
39	0,40	0,40	0,25
40	0,40	0,45	0,25
41	0,20	0,25	0,10
42	0,20	0,25	0,25
43	0,40	0,40	0,25
44	0,40	0,40	0,25
45	0,20	0,25	-
46	0,20	0,30	
47	0,40	0,45	
48	0,40	0,40	
49	0,20	0,25	0,15
50	0,20	0,20	0,20
51	0,20	0,20	0,20
52	0,20	0,30	0,30
53	0,40	0,45	0,20
54	0,40	(0,45)	0,30
55	0,40	0,40	(0,40)
56	0,40	(0,45)	0,45

1) Bruch im Bereich eines Betonlunkers im seitlichen Probenabschluß

Tabelle 5: Mittlere Rißbreiten (mm) der untersuchten Probekörper, () Risse mit Brüchen



Bruch Nr.	Proben-Nr.	Oberfläche	Künstl. Karbon.	w^1 (mm)	Medium	Zeit bis zum Bruch (h)	Bruchlage	Stahlspannung
1	54	verzinkt	+	0,45	(CO ₂)	336 h(K)	8 mm neben AF	0,7 R _m
2	18	schwarz	+	0,45	Cl ⁻	1296 h(K)+750 h(Cl ⁻)	AF	0,7 R _m
3	20	schwarz	-	0,40	Cl ⁻	1296 h(L)+2400 h(Cl ⁻)	AF	0,7 R _m
4	26	verzinkt	-	entfällt	Cl ⁻	1296 h(L)+3860 h(Cl ⁻)	Betonlunker	0,4 R _m
5	55	verzinkt	+	0,40	Atmosphäre	1296 h(K)+8180 h(A)	BR	0,7 R _m
6	56	verzinkt	+	0,45	Atmosphäre	1296 h(K)+8240 h(A)	AF	0,7 R _m
7	28	verzinkt	-	0,50	Cl ⁻	1296 (L)+14640 h(Cl ⁻)	AF	0,7 R _m
8	19	schwarz	-	0,10	Cl ⁻	1296 (L)+14710 h(Cl ⁻)	BR	0,4 R _m

1 am Bruch, AF = Arbeitsfuge, BR = Betonriß, NK = Narbenkorrosion

Tabelle 6: Zusammenstellung der gebrochenen Stahlproben St 420/1570

Bruch Nr.	Proben-Nr.	Oberfläche	Korrosionszustand über Probenlänge		
			am Bruchausgang	in AF und BR (kein Bruch)	im ungerissenen Beton
	54	verzinkt	keine Zn-freien Stellen	kaum Zn-Korrosion, jedoch "Verzinkungsfehler" in AF (8 mm neben Bruch)	minimale Zn-Korrosion
2	18	schwarz	NK des Stahls in AF (w = 0,45 mm)	NK in Riß (w = 0,15 mm)	keine Stahlkorrosion
3	20	schwarz	NK des Stahls in AF (w = 0,40 mm)	NK im Riß (w = 0,20 mm)	vereinzelte geringe NK
4	26	verzinkt	NK des Stahls in Betonlunker	NK in AF (w = 0,25 mm) örtlicher bis flächiger Zn-Abtrag bis zum Stahl in Riß (w = 0,10 mm)	örtlicher bis flächiger Zn-Abtrag bis zum Stahl (kein erkennbarer Korrosionsabtrag des Stahls)
5	55	verzinkt	örtlicher Zn-Abtrag bis zum Stahl, lokale Korrosionsansätze des Stahls in BR (w = 0,40 mm)	örtlicher Zn-Abtrag bis zum Stahl, lokale Korrosionsansätze des Stahls in AF (w = 0,40 mm)	minimale Zn-Korrosion
6	56	verzinkt	örtlicher Zn- und Stahlabtrag in AF (w = 0,45 mm)	örtlicher Zn- und Stahlabtrag in Riß (w = 0,45 mm)	minimale Zn-Korrosion
7	28	verzinkt	flächiger Zn-Abtrag bis zum Stahl, NK des Stahls in AF (w = 0,50 mm)	flächiger Zn-Abtrag bis zum Stahl, NK des Stahls in BR (w = 0,20 mm)	flächiger Zn-Abtrag bis zum Stahl, NK
8	19	schwarz	NK des Stahls in BR (w = 0,10 mm)	NK in AF (w = 0,20 mm)	NK und muldenförmiger Abtrag

AF = Arbeitsfuge, BR = Betonriß NK = Narbenkorrosion

Tabelle 7: Korrosionszustand der gebrochenen Stahlproben St 1420/1570 (siehe auch Tabelle 6)

Probe	Stahl- sorte St	Ober- fläche	Medium	R _m	A ₁₀	A _g	Z	Bruch an Rißbreite	max. Rißbreite		
				N/mm ²	%	%	%				
1	1420/ 1570	schwarz	W	1638	5,0	2,4	38,6	0,25	0,25		
3				1627	5,3	1,4	32,0	0,25	0,20		
4				1619	3,3	0,9	30,5	0,45	0,45		
33					W + SO ₂	1602	3,8	0,6	26,2	0,25	0,25
35						1595	4,2	0,9	33,0	0,30	0,30
36						1602	3,8	1,0	27,2	0,50	0,50
19						1050	0,8	0	5,2	0,20	0,20
53	1420/ 1570	verzinkt	A	1659	8,0	3,4	52,5	0,45	0,45		
50				1652	8,3	3,8	53,3	0,20	0,20		
51				1655	8,0	3,2	53,3	0,20	0,20		
52				1659	8,0	3,5	55,5	0,30	0,30		
5			W	1652	4,7	2,4	38,6	0,15	0,25		
6				1648	5,5	1,6	36,6	0,15	0,20		
7				1658	6,0	1,8	46,2	0,35	0,35		
8				1648	5,8	1,6	46,2	0,45	0,45		
9				1650	5,3	2,4	30,5	0,20	0,20		
10				1660	6,3	3,0	38,6	0,25	0,25		
12				1648	7,2	2,4	53,3	0,35	0,35		
44			W + SO ₂	1624	6,3	1,4	48,6	0,25	0,40		
42				1638	4,7	1,6	33,3	0,25	0,25		
40				1621	5,3	2,0	37,6	0,25	0,45		
37				1641	4,7	1,6	33,3	0,15	0,20		
38				1638	5,3	1,8	38,6	0,15	0,20		
41				1645	7,7	2,6	51,0	0,10	0,25		
21			W + Cl ⁻	1490	2,5	0	8,2	0,25	0,25		
22				1397	2,5	0	16,0	0,10	0,30		
24				1426	2,5	0	14,9	0	0,40		
25	1380	1,3		0	9,7	0	0,20				
13	1570/ 1770	verzinkt	W	1727	8,6	3,6	48,1	0	0,25		
14				1732	9,0	4,6	48,1	0	0,25		
16				1707	8,0	3,6	48,0	0	0,50		
45			W + SO ₂	1717	8,4	3,6	48,1	0,25	0,25		
47				1712	6,4	2,6	45,2	0,45	0,45		
29			W + Cl ⁻	1645	4,6	1,0	29,4	0,10	0,25		
30				1610	3,6	1,0	26,0	0,30	0,30		
32				1513	2,6	0,3	19,4	0,25	0,40		

Tabelle 3 Me: (siehe Ke: :ah:pxc Entn:

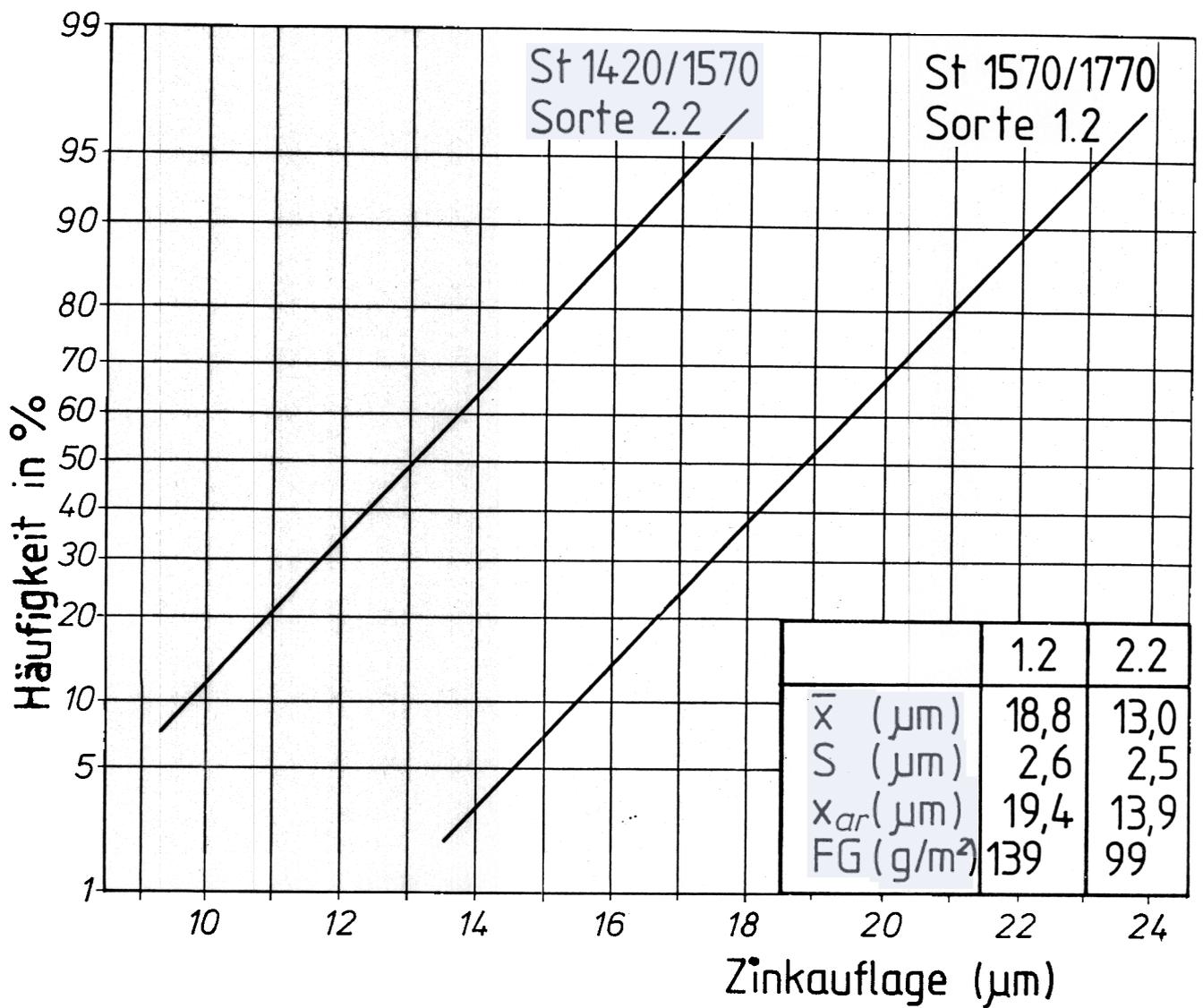
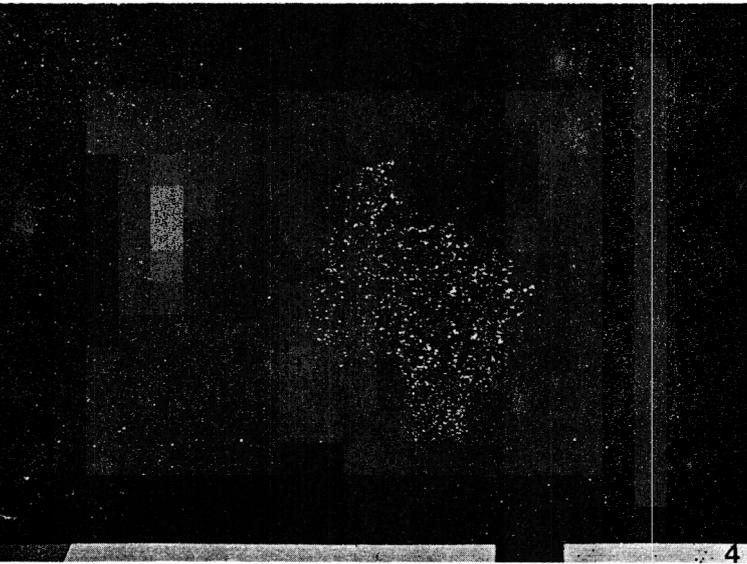
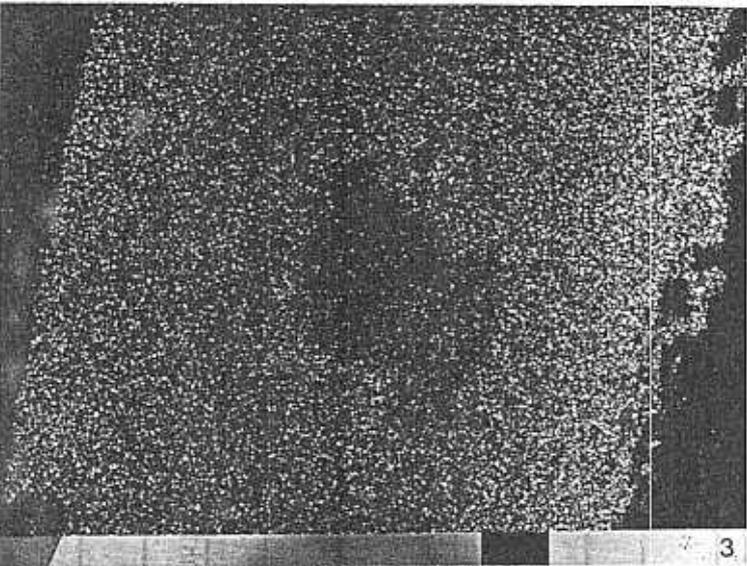
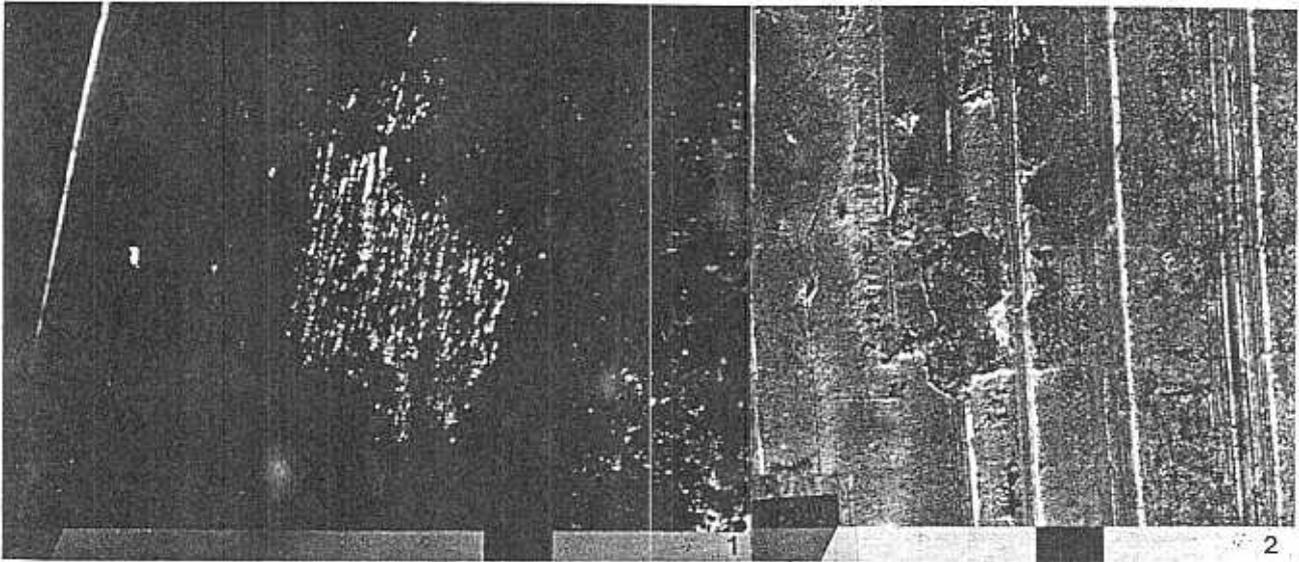


Bild 1: Häufigkeitsverteilung der Zinkauflage für die Materialien 1.2 und 2.2



µm

nk

ho

tah.

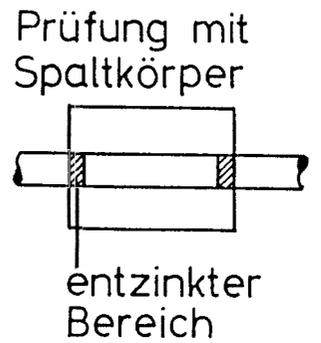
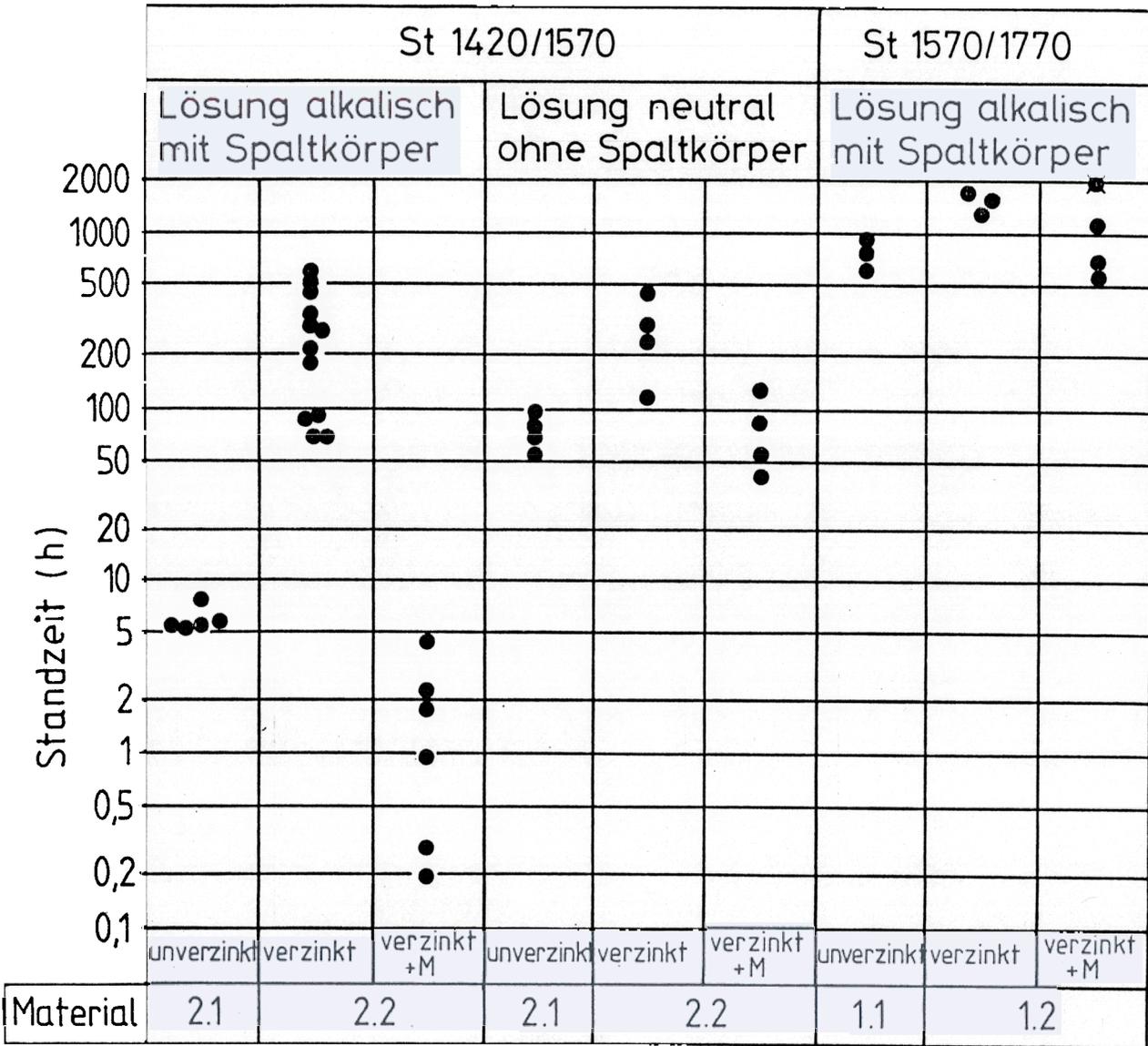
Te 1h d

Bild 2: V nkung sh.

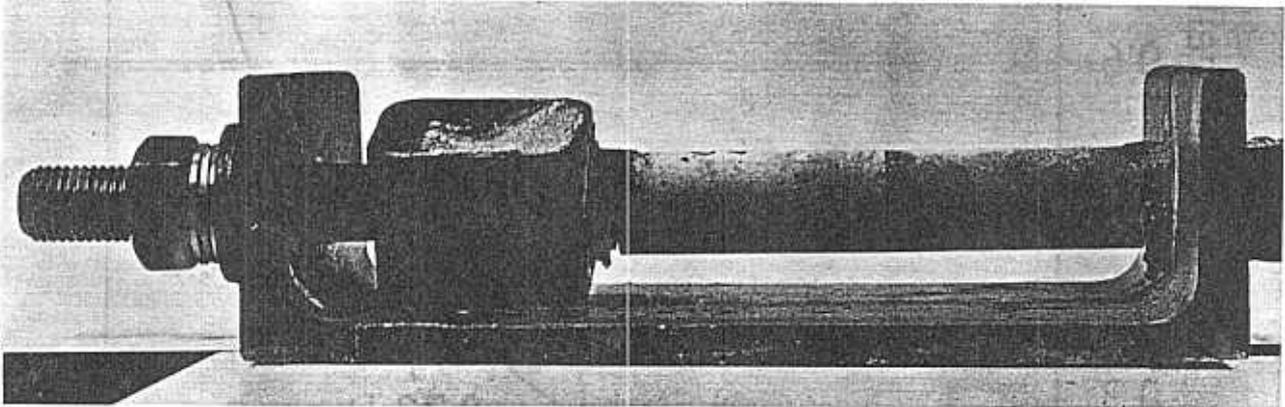
/

So

Bild 3:
 Ergebnisse von Spannungsrißkorrosionsversuchen in Wasser +
 $5,0 \text{ g SO}_4^{--}/\text{l} + 0,5 \text{ g Cl}^-/\text{l} + 1,0 \text{ g SCN}^-/\text{l}$ bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$
 ($\sigma = 0,8 R_m$)



M = örtlich me-
 chanisch
 entzinkt



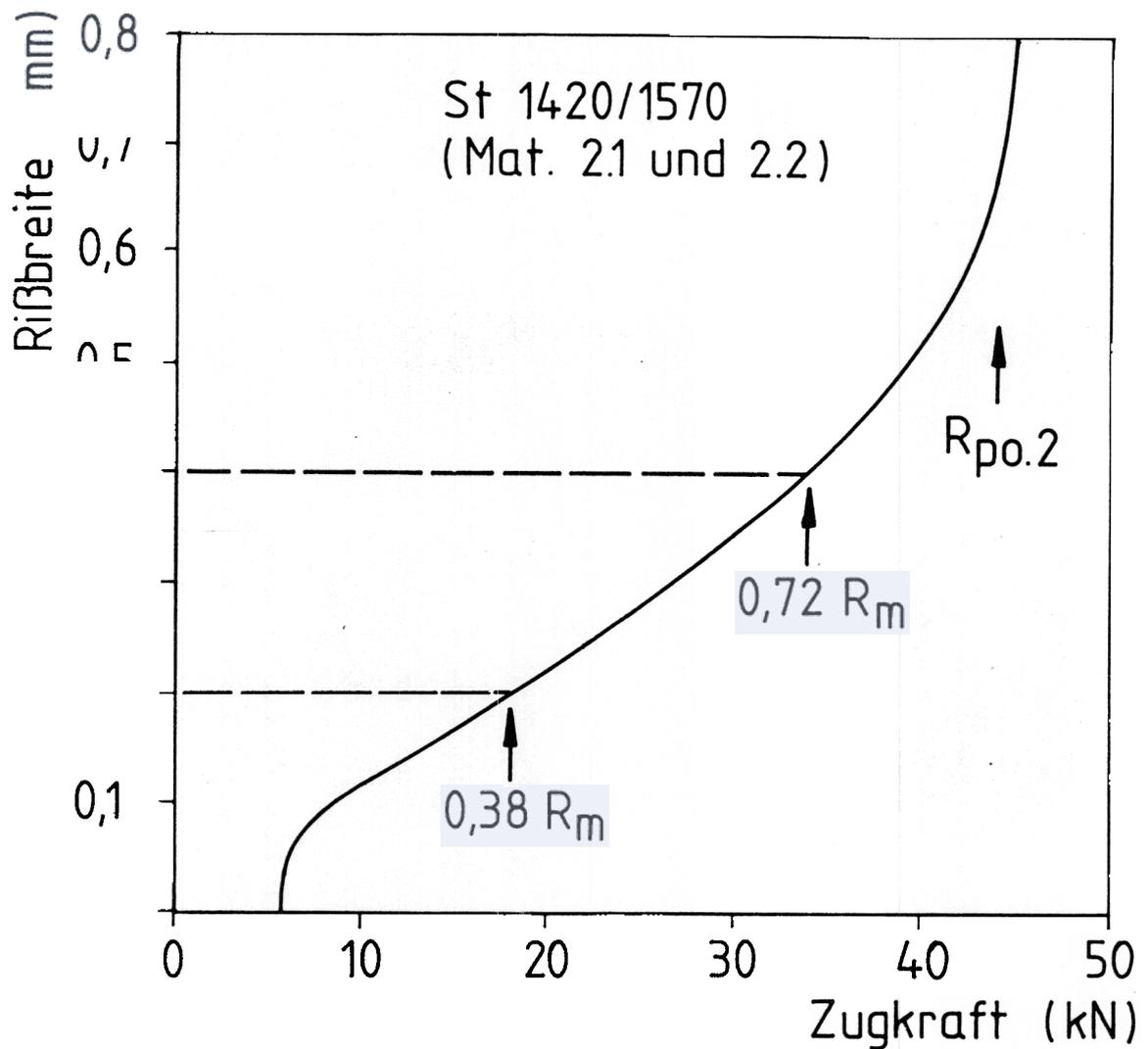
Abmessung des Betonkörpers

$l \approx 200 \text{ mm}$ $\ddot{u} \approx 17 - 18 \text{ mm}$

$\varnothing \approx 40 \text{ mm}$ $w \approx 0,2 - 0,4 \text{ mm}$

Bild 4:

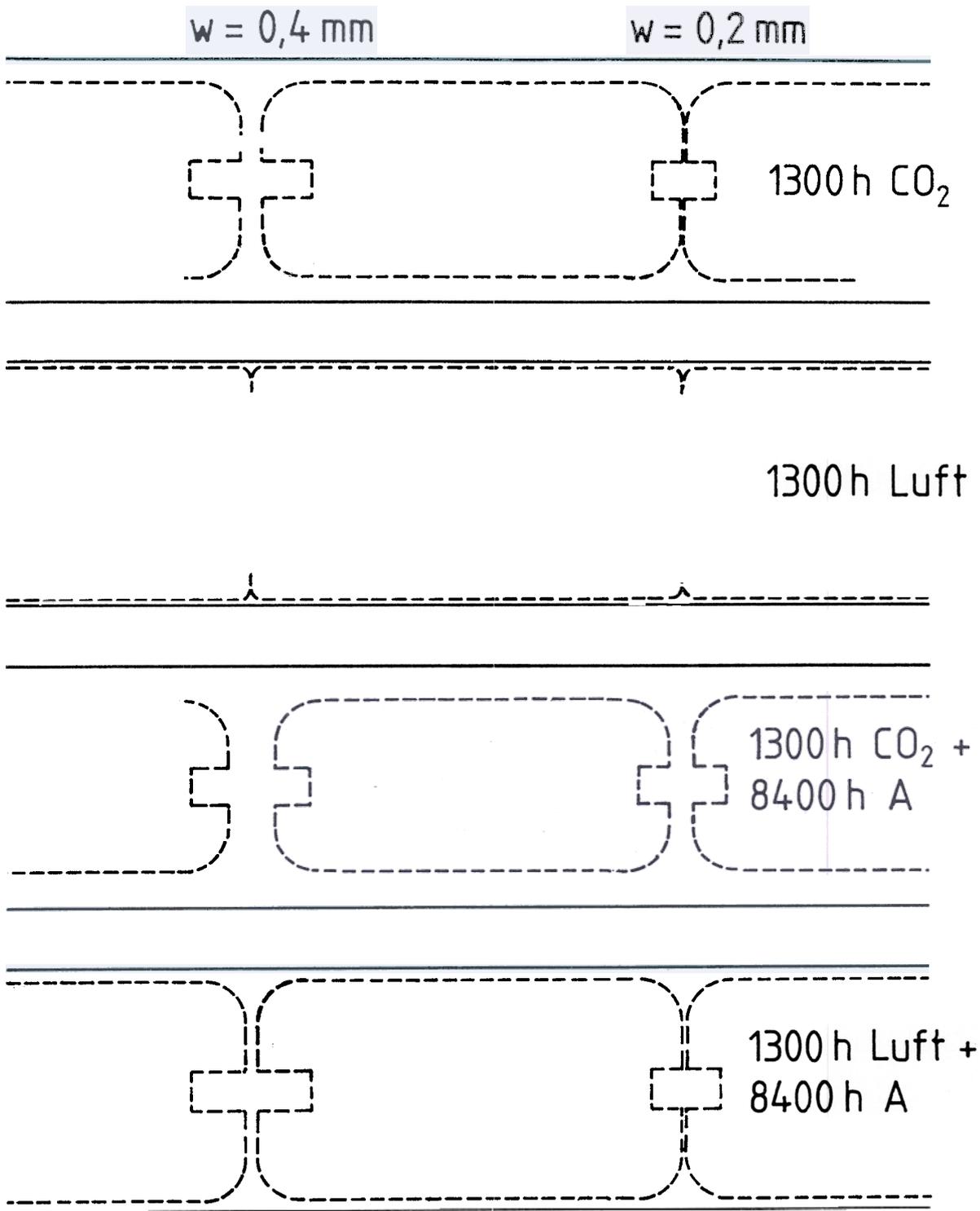
Prüfkörper im gespannten Zustand und Abmessungen des Betonkörpers



St 1570/1770 (Mat. 1.2)

$w \approx 0,2 \text{ mm} \hat{=} G = 0,33 R_m$
$w \approx 0,4 \text{ mm} \hat{=} G = 0,63 R_m$

Bild 5: Mittlere RiBbreite in Abhängigkeit von der Belastung der Drähte



A = Auslagerung

Bild 6: Mittlere Karbonatisierung von gerissenen Betonkörpern in Abhängigkeit von der Rißbreite, Art der Auslagerung (künstlich karbonatisiert, nicht künstlich karbonatisiert) und der Auslagerungszeit

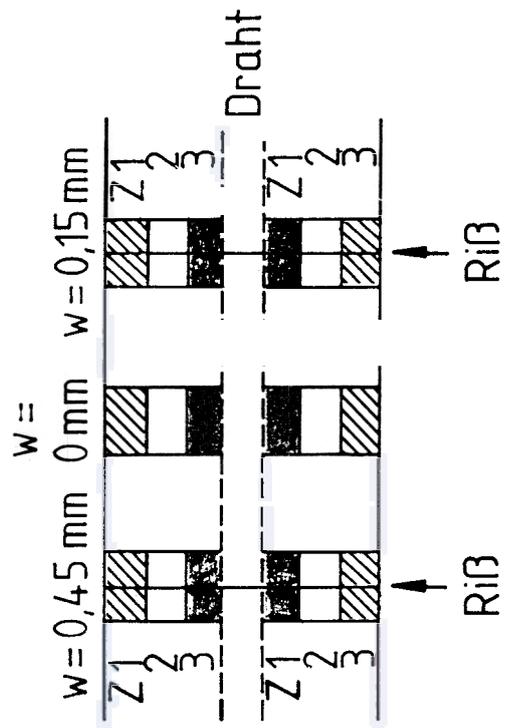
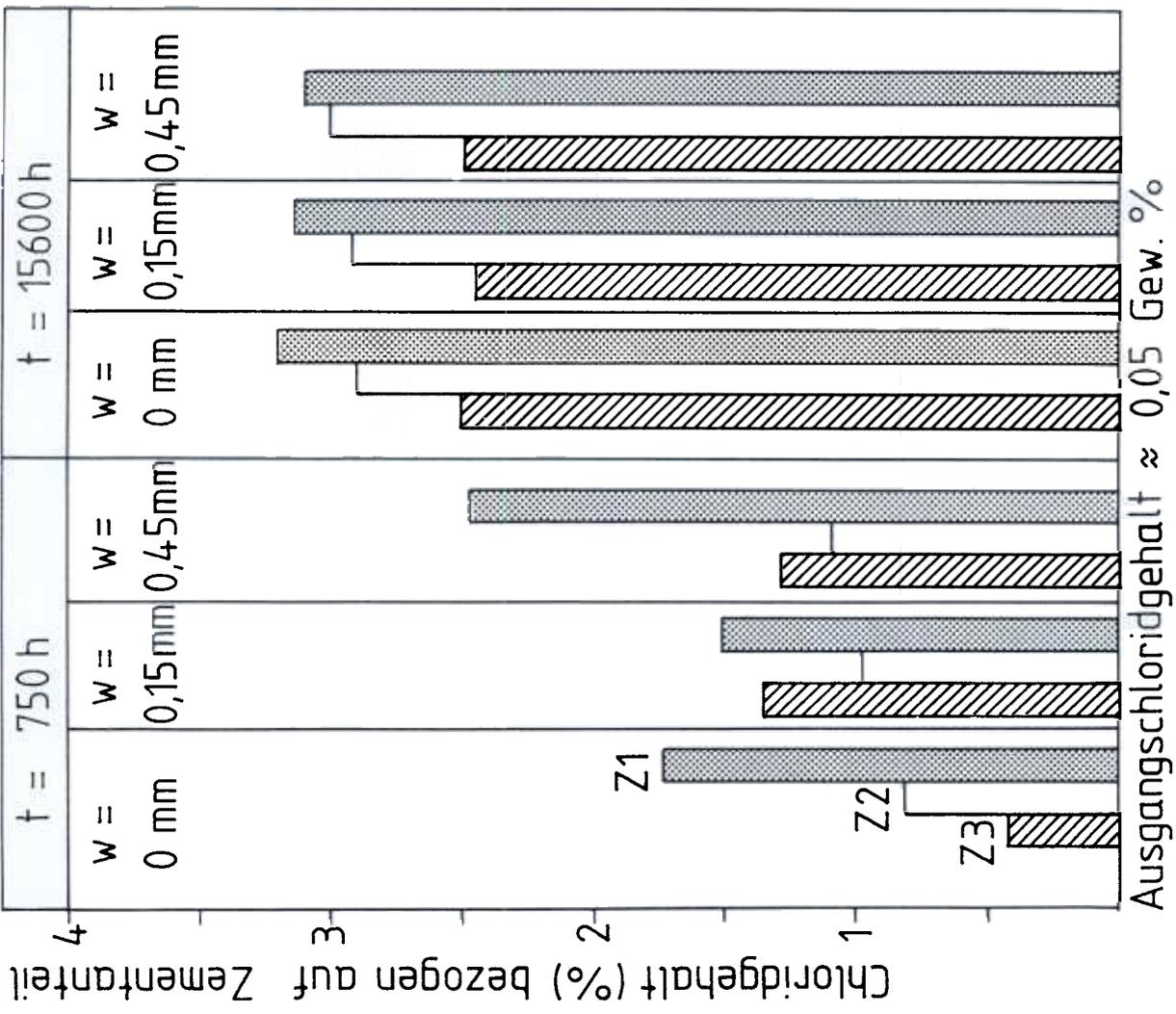


Bild 7:
Chloridverteilung im Beton nach
Beaufschlagung mit Meerwasser

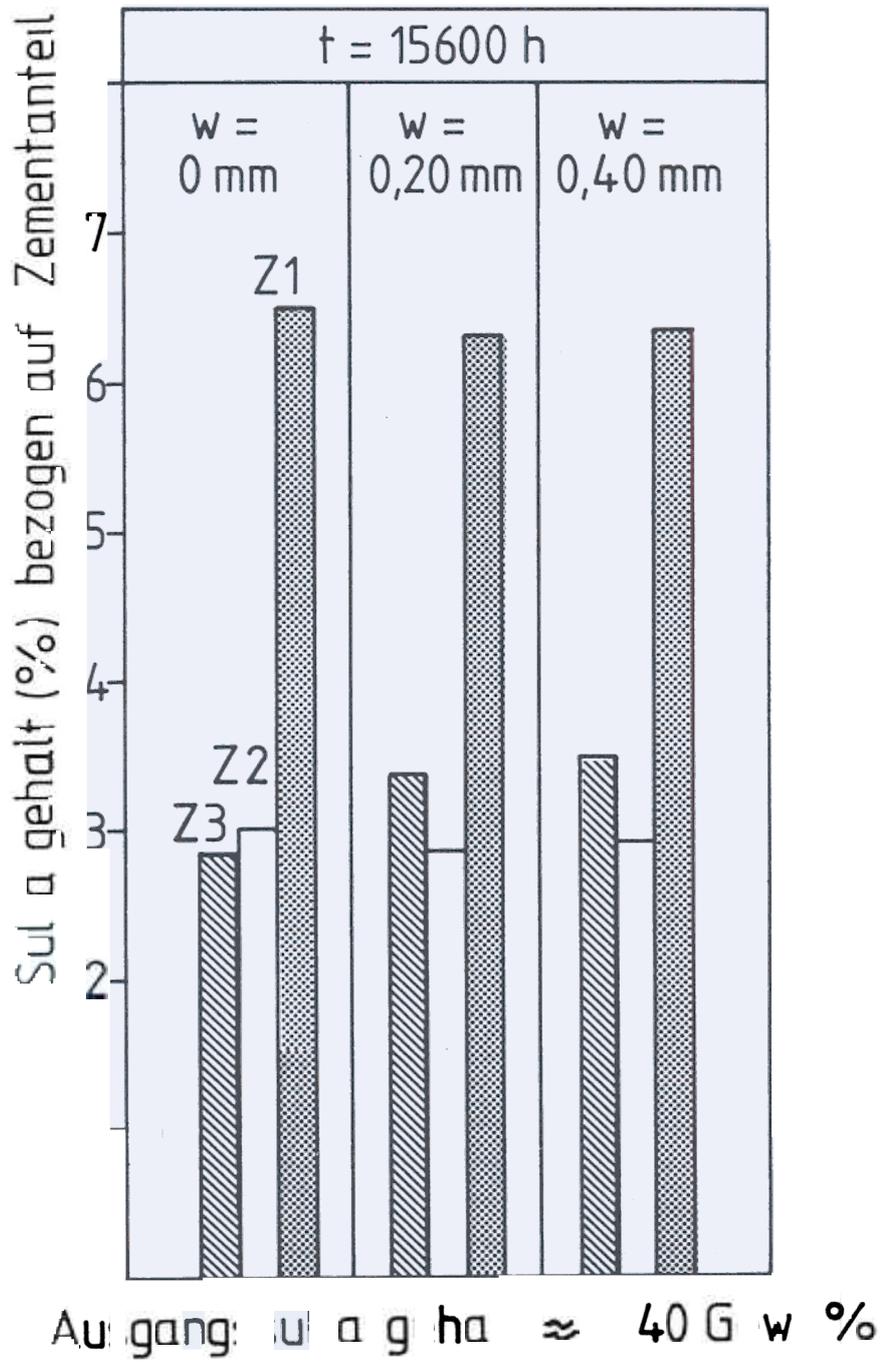
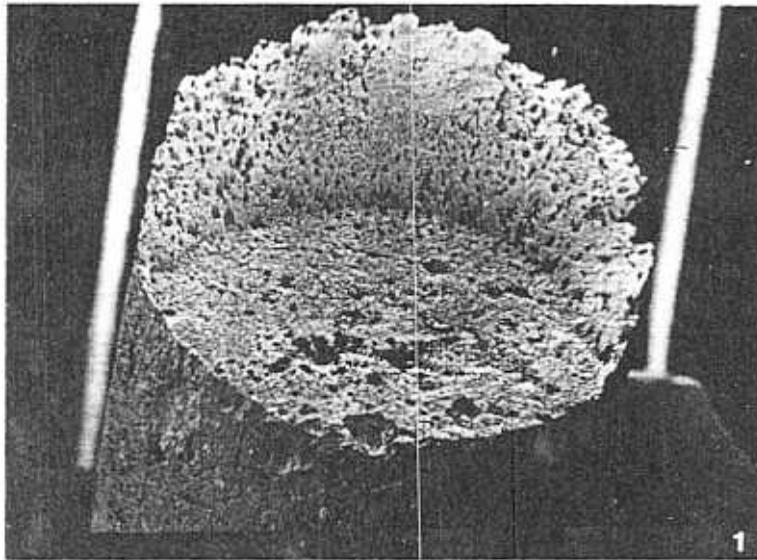


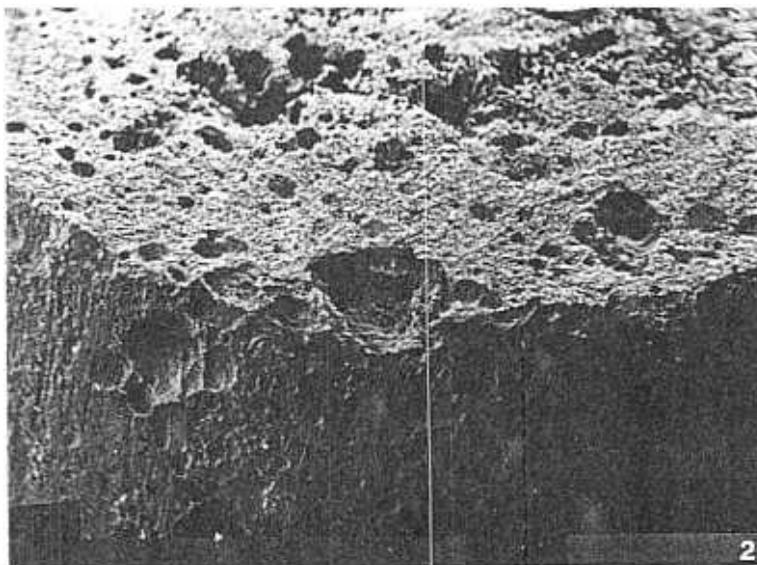
Bild 8:

im



Bruchüber-
sicht, Probe
gebeizt

1 mm



Bruchaus-
gang, Probe
gebeizt

400 μm

Bild 11

Bruch von Probe 18 in Arbeitsfuge ($w = 0,45 \text{ mm}$),
s.a. Bild 10

Bild 13:

he

ge he

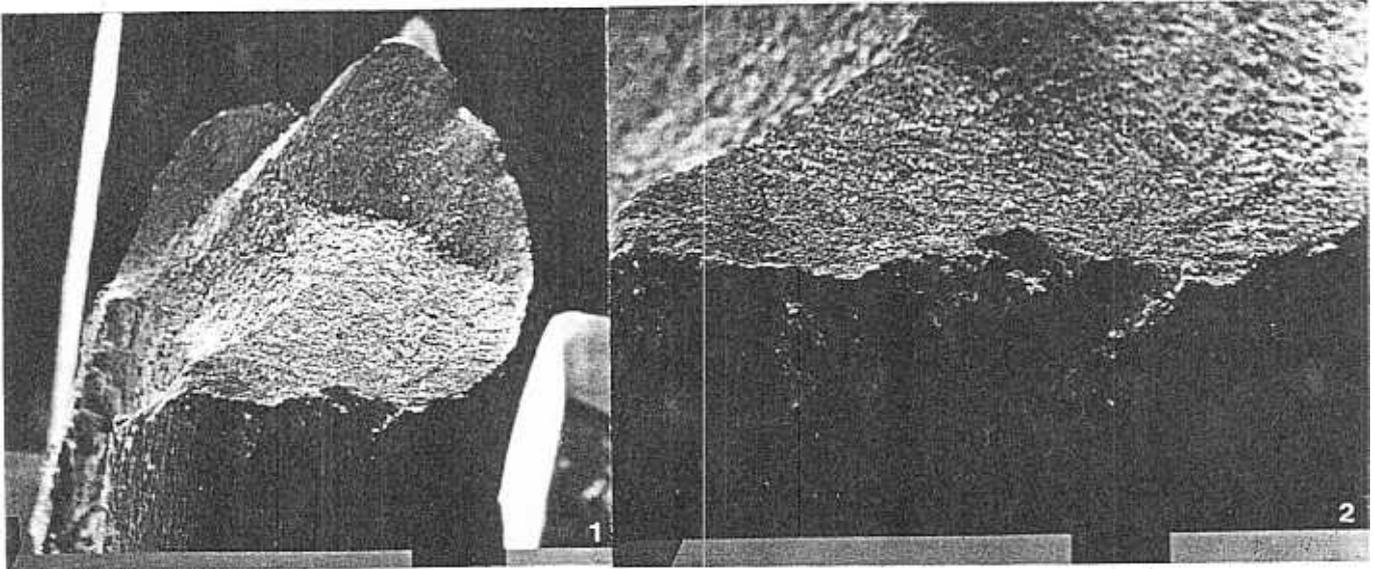
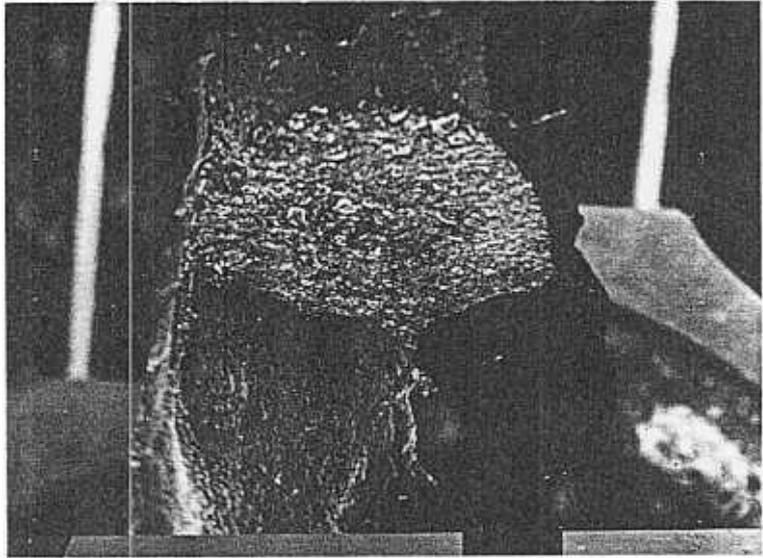
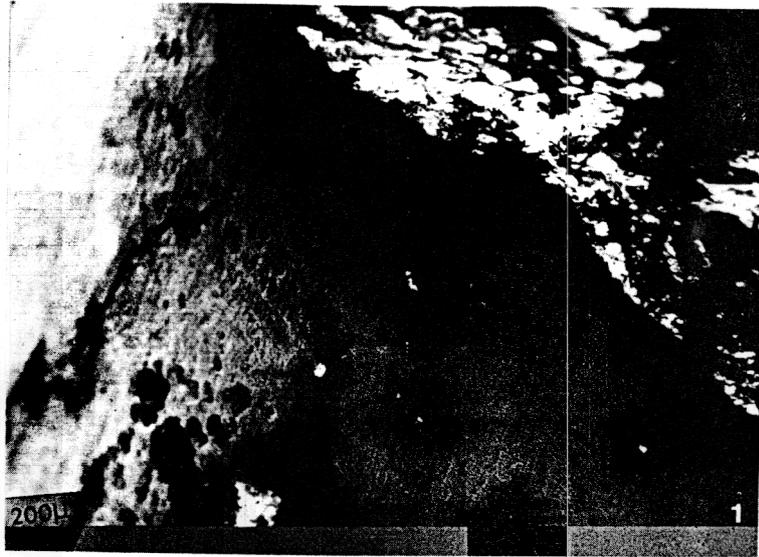


Bild 5:

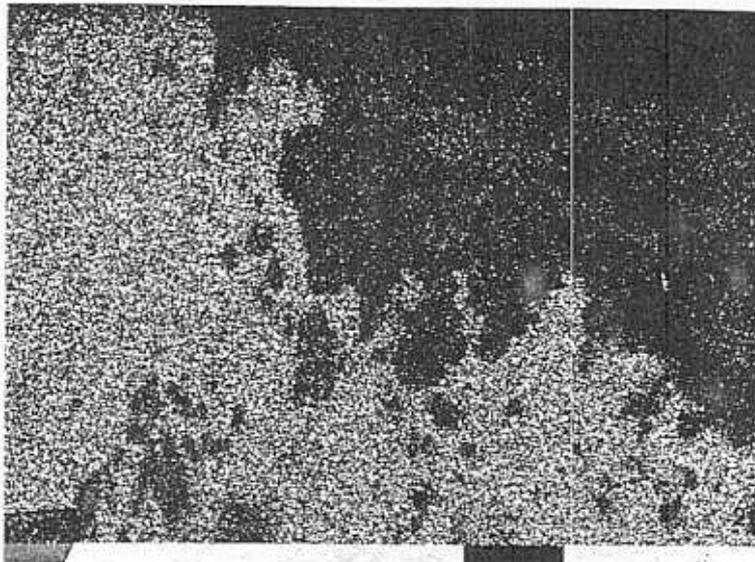
ob

Ar

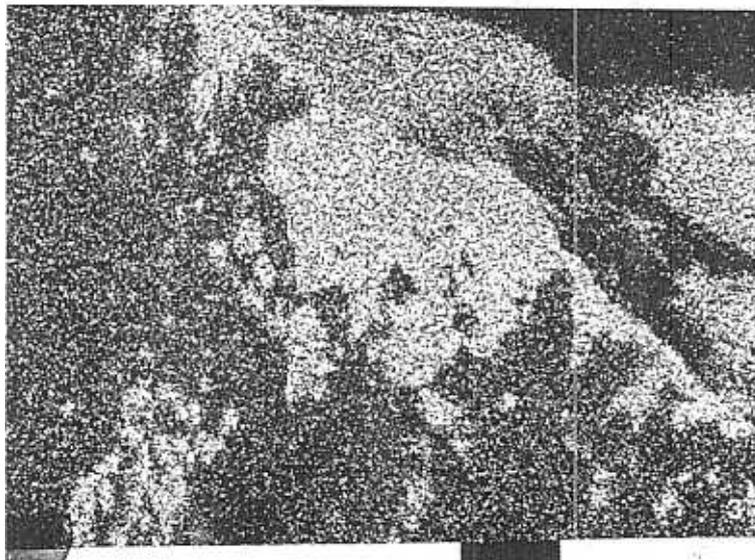


ob
ge in g

h ob



nk
he .b d



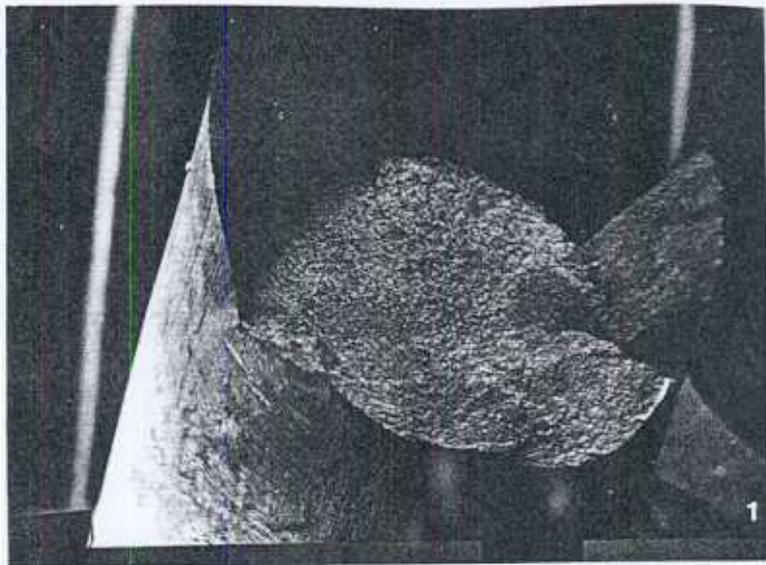
he
h rtb

Bild 7:
Zinkabtrag

h ga ob

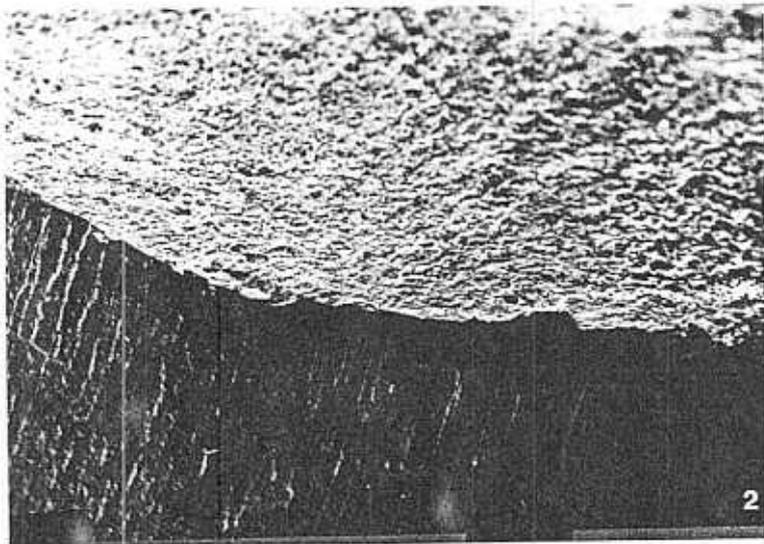
d

Bruchübersicht



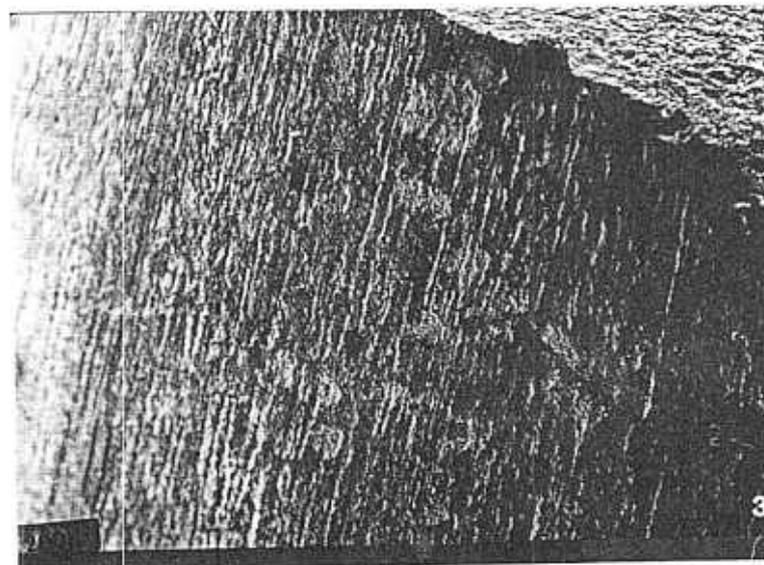
1 mm

Bruchausgang



200 μm

Korrosionsansätze dicht
neben dem Bruchausgang



200 μm

Bild 18:
Bruch von Probe 55 in einem Betonriß ($w = 0,40 \text{ mm}$),
Probe gebeizt, s.a. Bild 16

Bild 19: siehe Seite 121 bis 123

Untersuchung der Zink-/Stahlkorrosion im Bereich
von Betonrissen

hier : Probe 55, Arbeitsfuge : $w = 0,20$ mm

Sorte : St 1420/1570 - feuerverzinkt

Beton : karbonatisiert (K), Auslagerung im Freien (A)

Zeit 1296 h (K) + 8180 h (A)

Bild 20: siehe Seite 124 und 125

Untersuchung der Zink-/Stahlkorrosion im Bereich von
Betonrissen

hier : Probe 50, Betonriß : $w = 0,20$ mm

Sorte : St 1420/1570 - feuerverzinkt

Beton : Karbonatisiert (K), Auslagerung im Freien (A)

Zeit 1296 h (K) + 15600 h (A)

Bild 21: siehe Seite 126 bis 128

Untersuchung der Zink-/Stahlkorrosion im Bereich von
Betonrissen

hier : Probe 42, Betonriß : $w = 0,25$ mm

Sorte : St 1420/1750 - feuerverzinkt

Beton : nicht karbonatisiert (L), SO_2 -Beanspruchung
(SO_2)

Zeit : 1296 h (L) + 15600 h (SO_2)

Bild 22: siehe Seite 129

Untersuchung der Stahlkorrosion im Bereich von
Betonrissen

hier : Probe 36, Arbeitsfuge : $w = 0,50$ mm

Sorte : St 1420/1570 - schwarz

Beton : nicht karbonatisiert (L), SO_2 -Beanspruchung (SO_2)

Zeit 1296h(L) + 15600 h (SO_2)

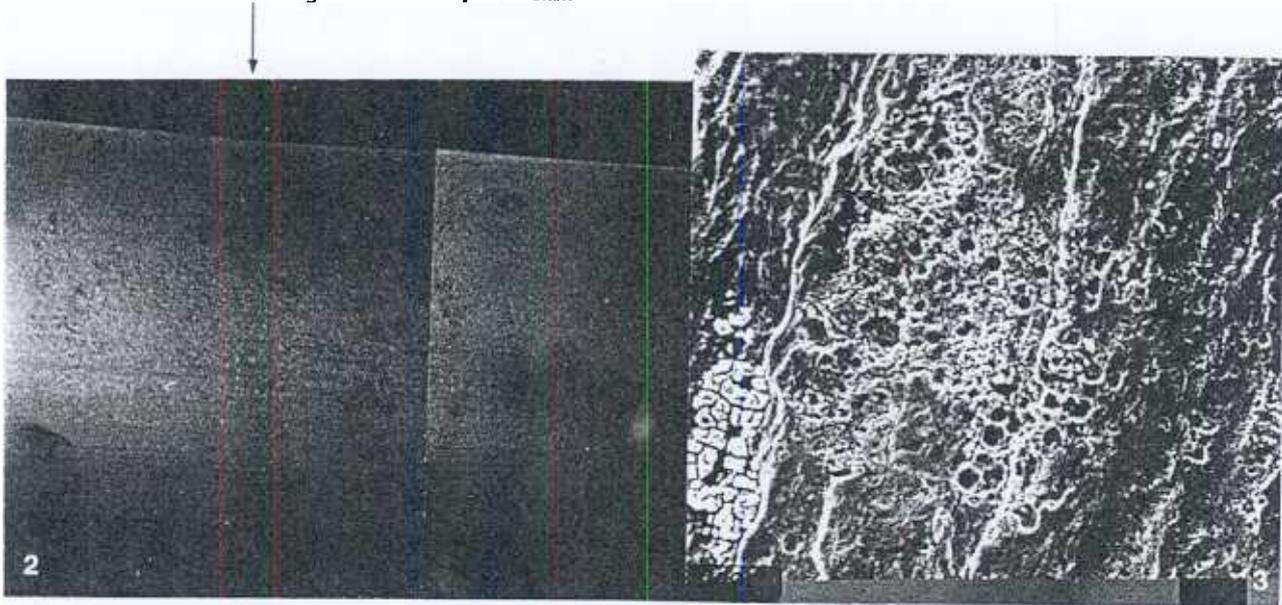
Drahtoberfläche
 nach Behandlung
 mit Kaliumhexacyano-
 ferrat bei $U = 4 \text{ V}$
 (Stahl = Anode)
 schwarze Stellen =
 Zn-freie Bereiche



1



Arbeitsfuge $w = 0,45 \text{ mm}$



Drahtoberfläche gebeizt

örtliche Zink-
 korrosion in Ar-
 beitsfuge (Ori-
 nalzustand)

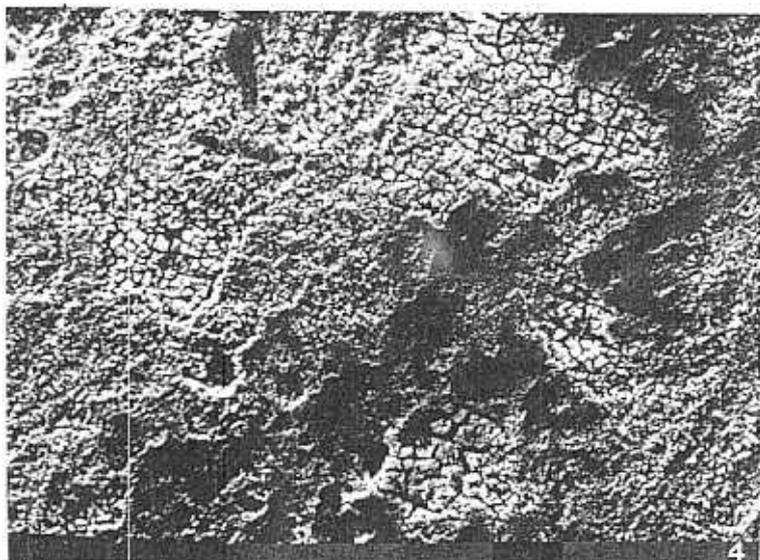
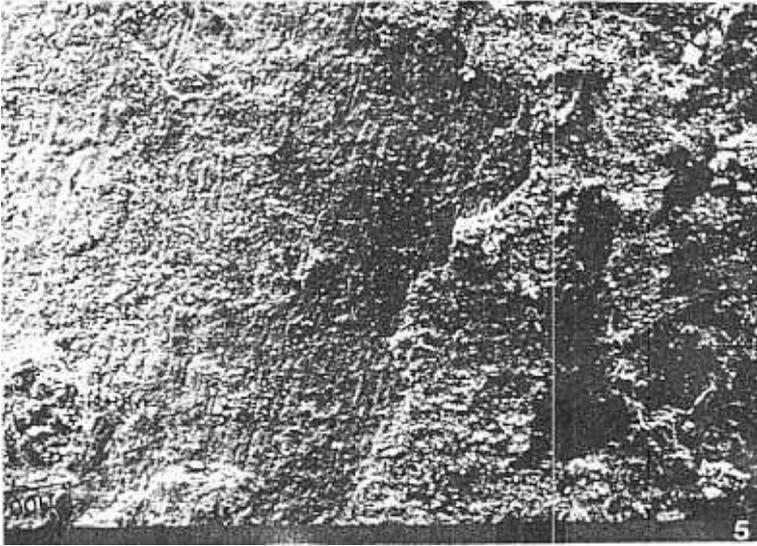
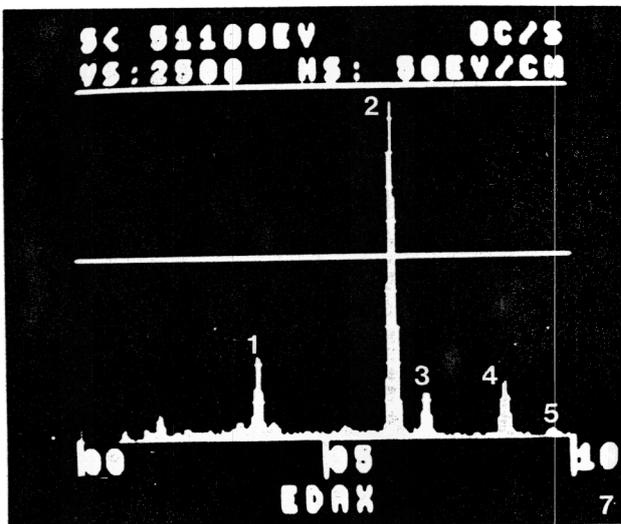
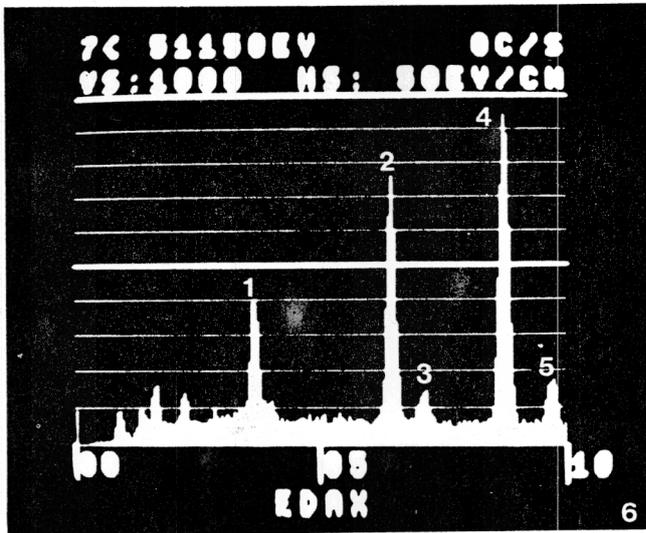


Bild 19

20 μm



Ö:



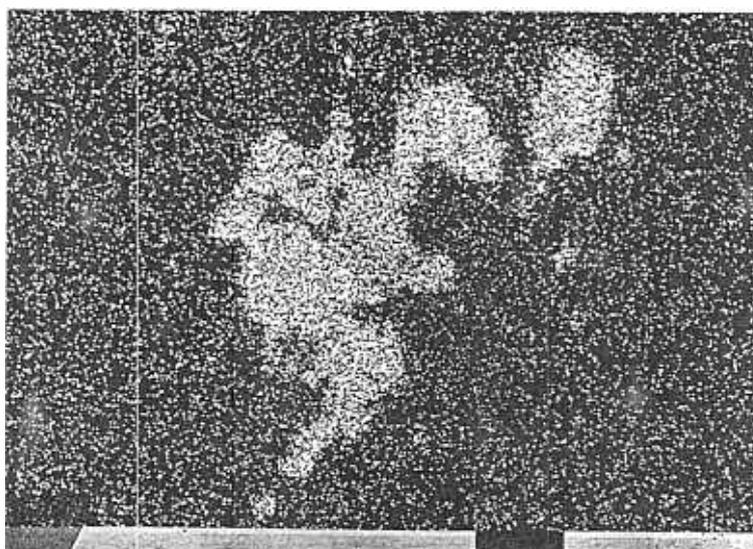
An .y:

Y:

örtliche Korrosion
des Zinks in Arbeits-
fuge nach Ablösen der
Fe-Zn Korrosionspro-
dukte



Eisenverteilung (hell)
des Stahluntergrundes,
von Teilbild 8



Zinkverteilung (hell)
der ankorrodierten
Zinkauflage,
von Teilbild 8

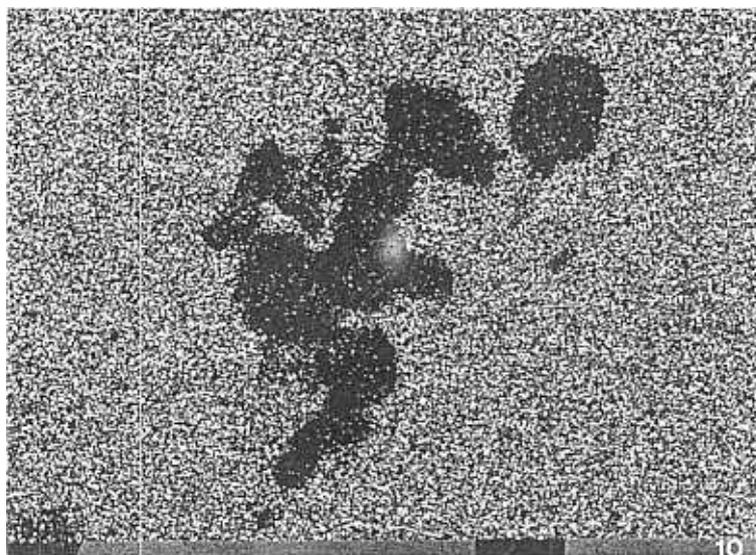
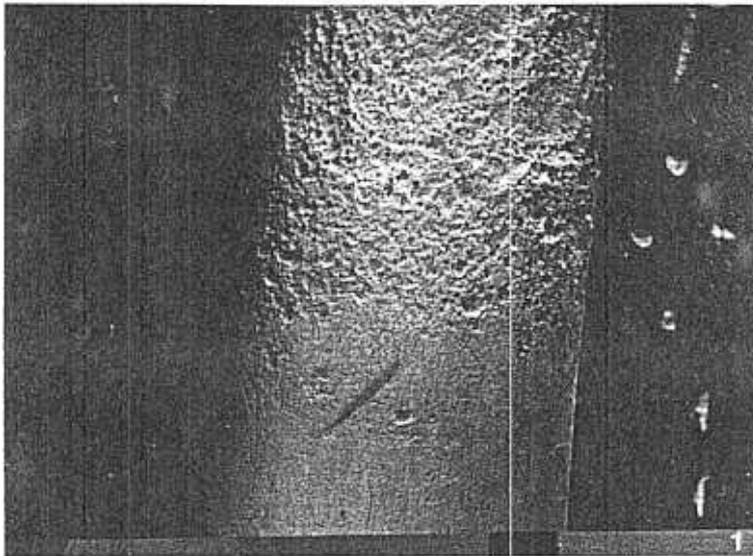


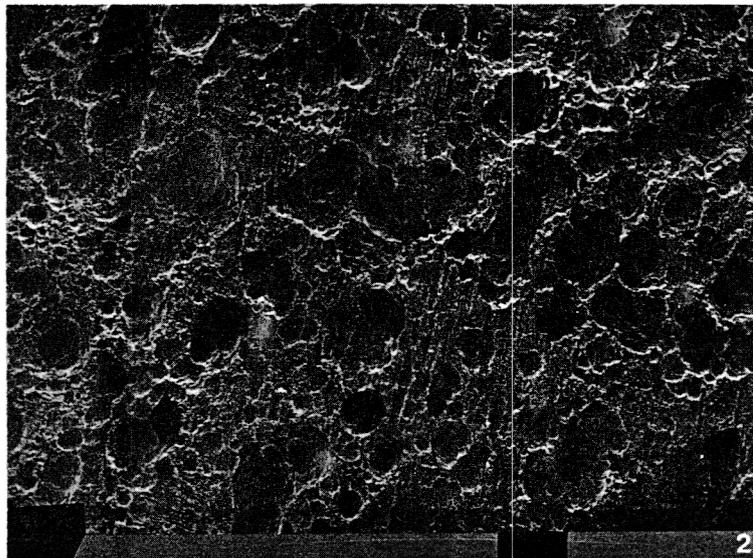
Bild 19

100 µm



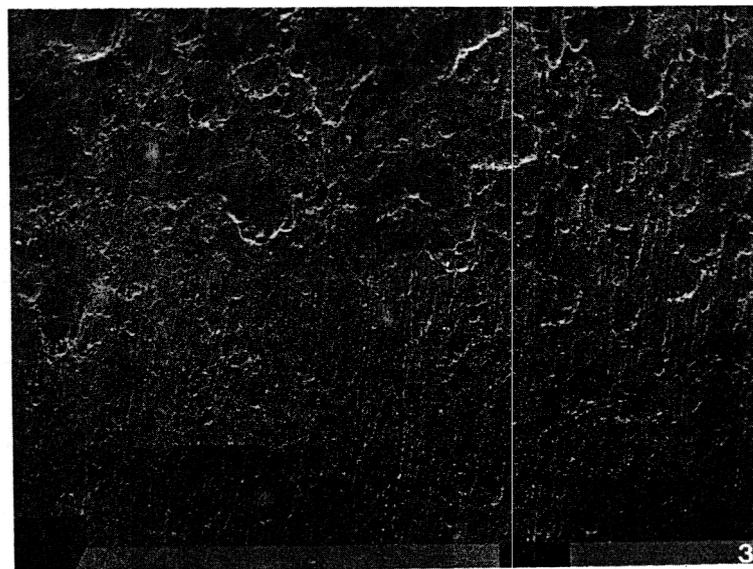
1 mm

ah



200 μm

ob



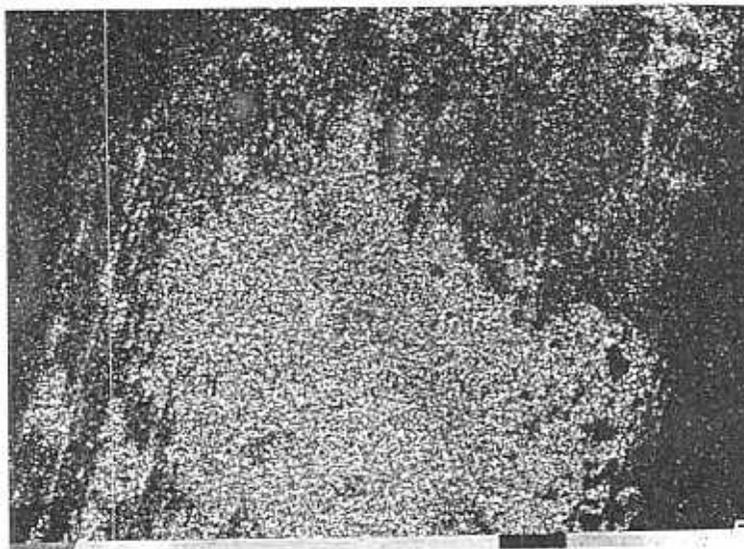
μm

fib be
 rh /
 ob ho
 bo
 o

flächige Korrosion
des Zinks im
Betonriß nach Ab-
lösen der Fe-Zn-
Korrosionsprodukte



Eisenverteilung (hell)
des Stahluntergrundes,
von Teilbild 4



Zinkverteilung (hell)
der ankorrodierten
Zinkauflage,
von Teilbild 4

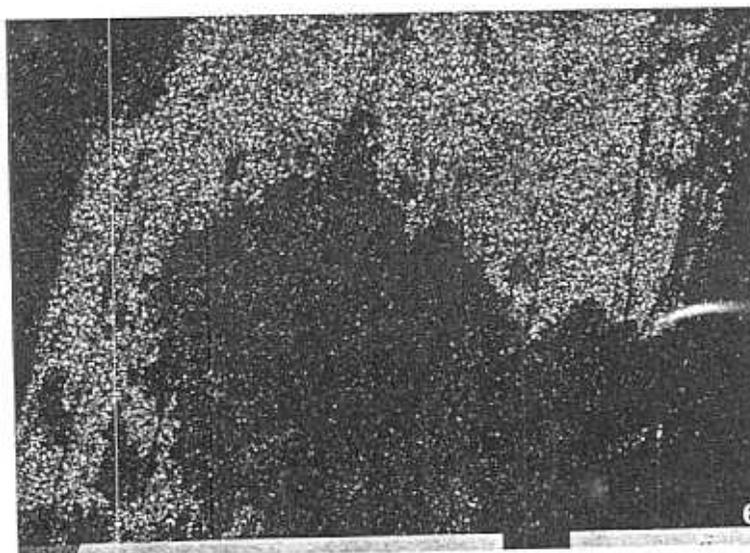
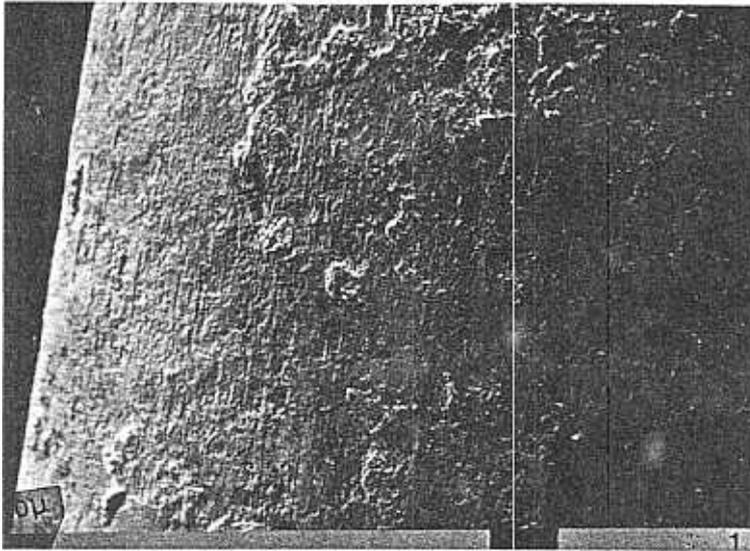
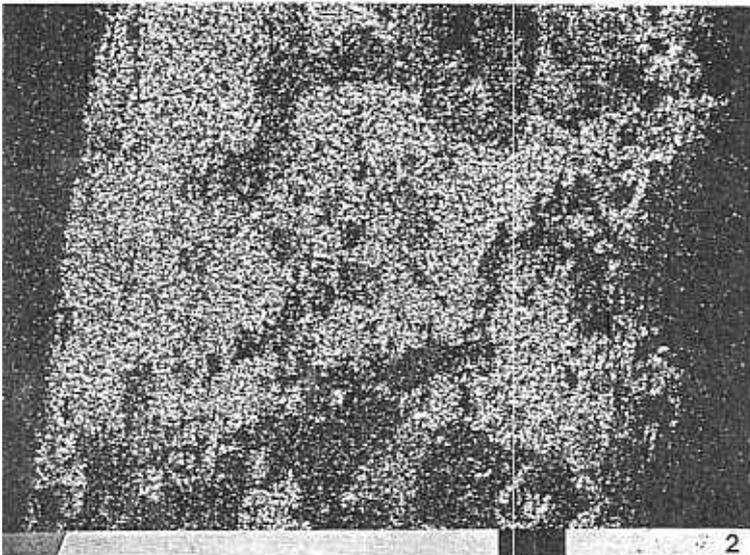


Bild 20

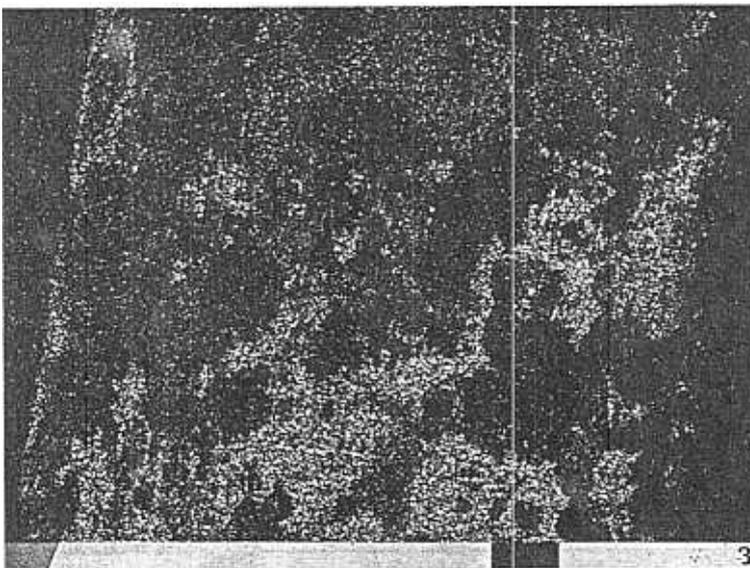
400 μm



flächige Korrosion
des Zinks im Beton-
riß nach Ablösen der
Fe-Zn-Korrosionspro-
dukte



Eisenverteilung (hell)
des Stahluntergrundes,
Von Teilbild 1

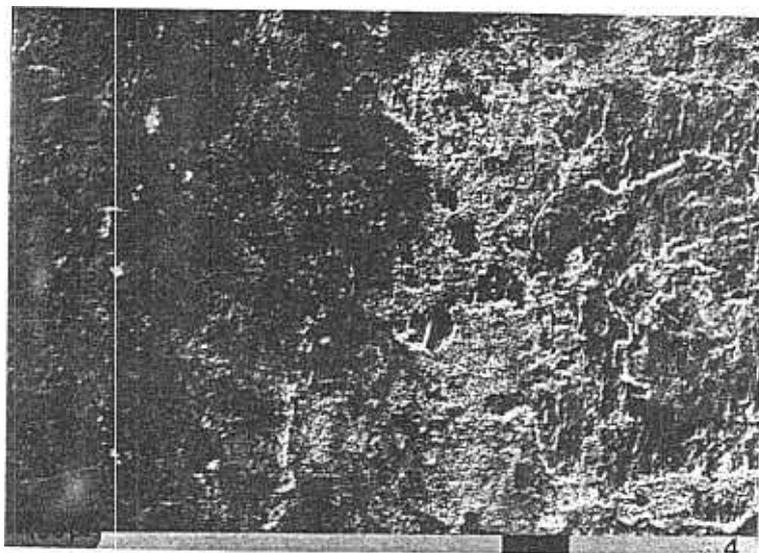


Zinkverteilung (hell
der ankorrodierten
Zinkauflage,
von Teilbild 1

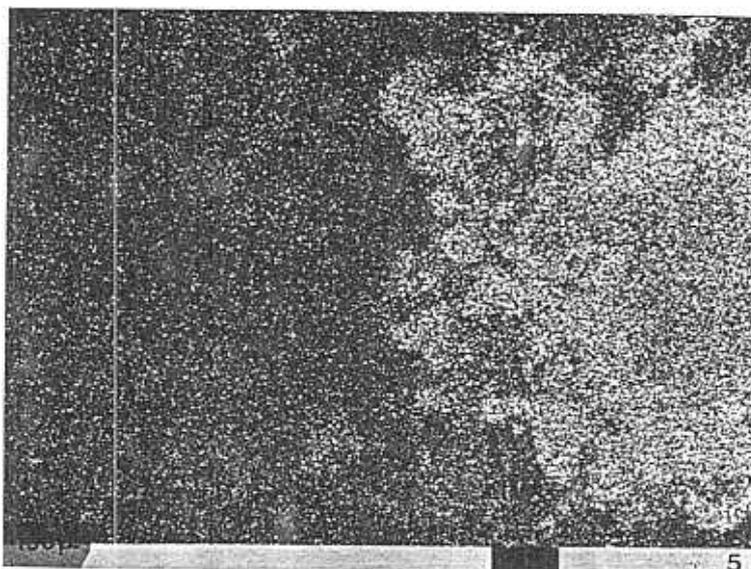
400 μm

Bild 21

flächige (rechts) und örtliche Korrosion (Mitte) des Zinks etwa 5 mm neben dem Betonriß nach Ablösen der Fe-Zn-Korrosionsprodukte, links Zink unter alkalischem Beton



Eisenverteilung (hell) des Stahluntergrundes, von Teilbild 4



Zinkverteilung (hell) der ankorrodierten Zinkauflage, von Teilbild 4

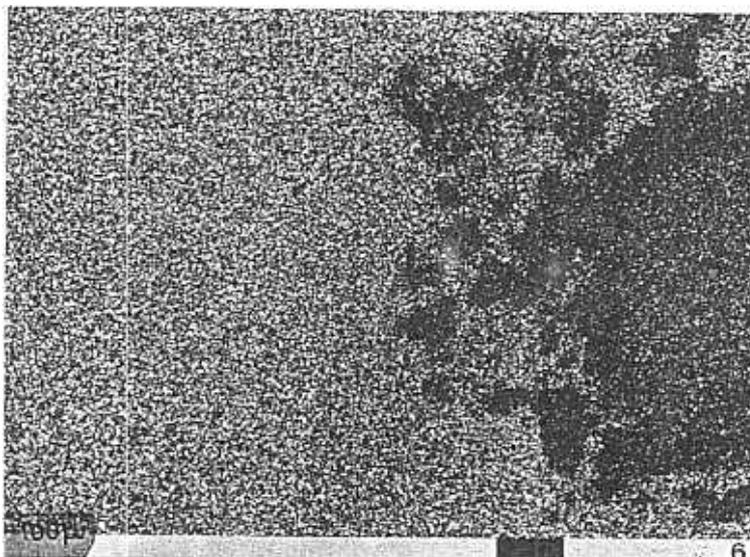
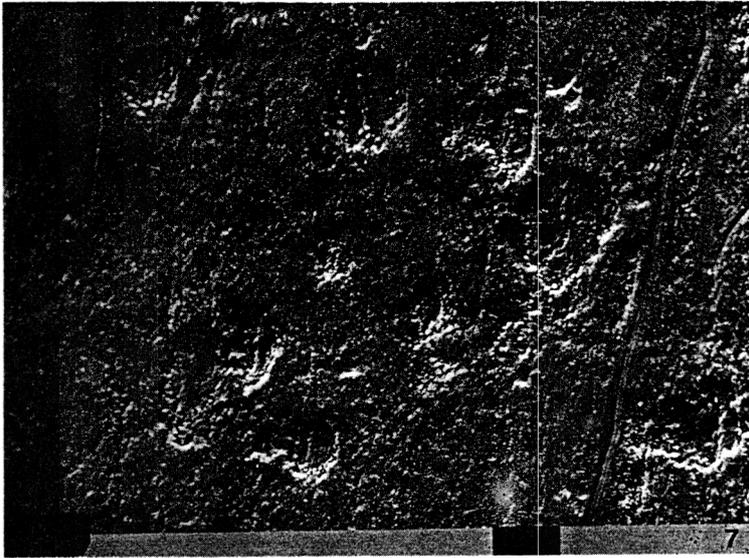
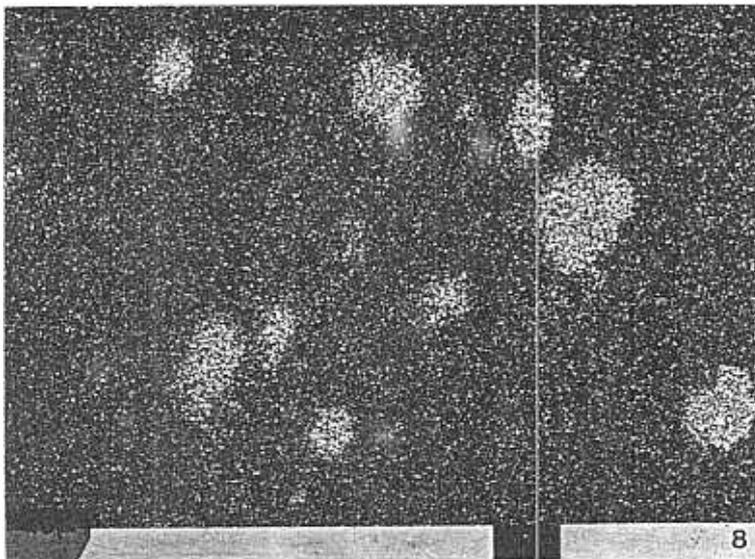


Bild 21

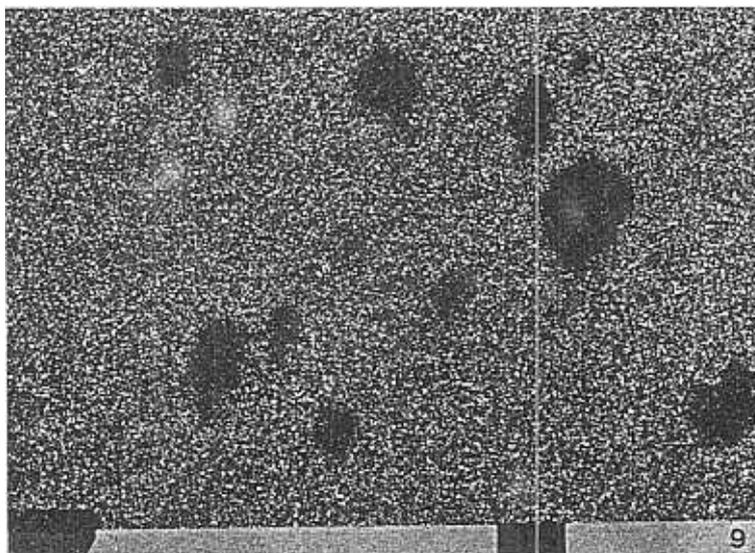
100 μm



Örtliche Korrosion
des Zinks etwa 5 mm
neben Betonriß nach
Ablösen der Fe-Zn-
Korrosionsprodukte



Eisenverteilung
(hell) des Stahl-
untergrundes,
von Teilbild 7



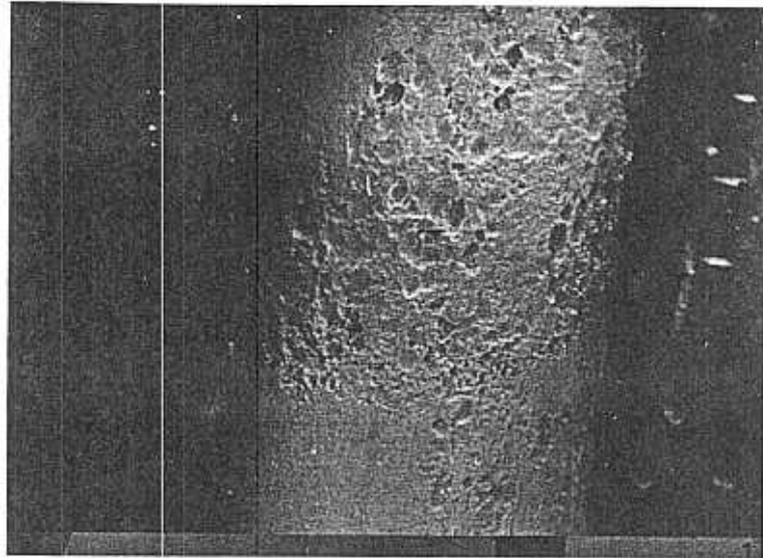
Zinkverteilung (hell)
der ankorrodierten
Zinkauflage,
von Teilbild 7

10 μm

Bild 21

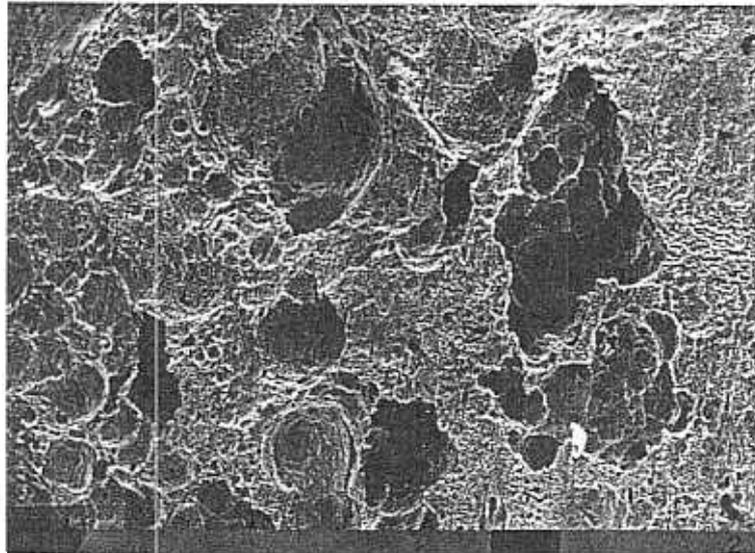
Betonriß →

Drahtoberfläche
gebeizt



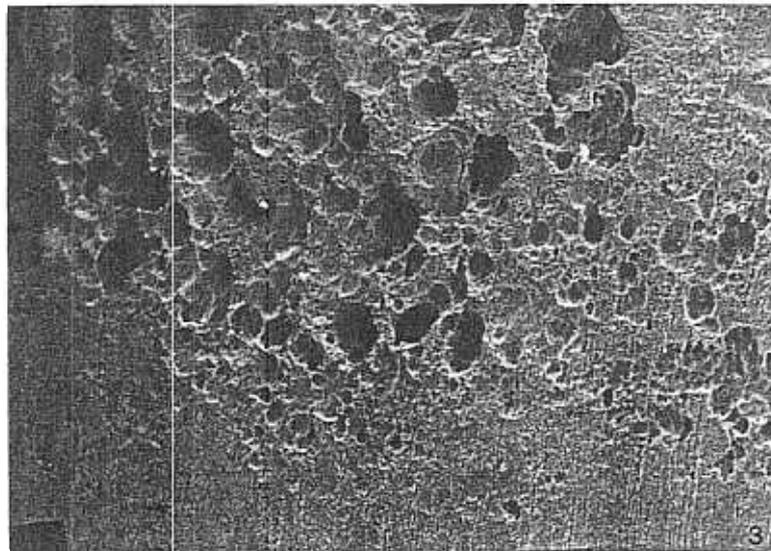
1 mm

Betonriß, Draht-
oberfläche gebeizt



100 µm

Übergangsbereich
karbonatisiert/
nicht karbonatisiert,
Drahtoberfläche
gebeizt



200 µm

Bild 22

Bild 23: siehe auch Seite 131 und Bild 23.1 auf Seite 149
Untersuchung der Zink-/Stahlkorrosion im Bereich von
Betonrissen

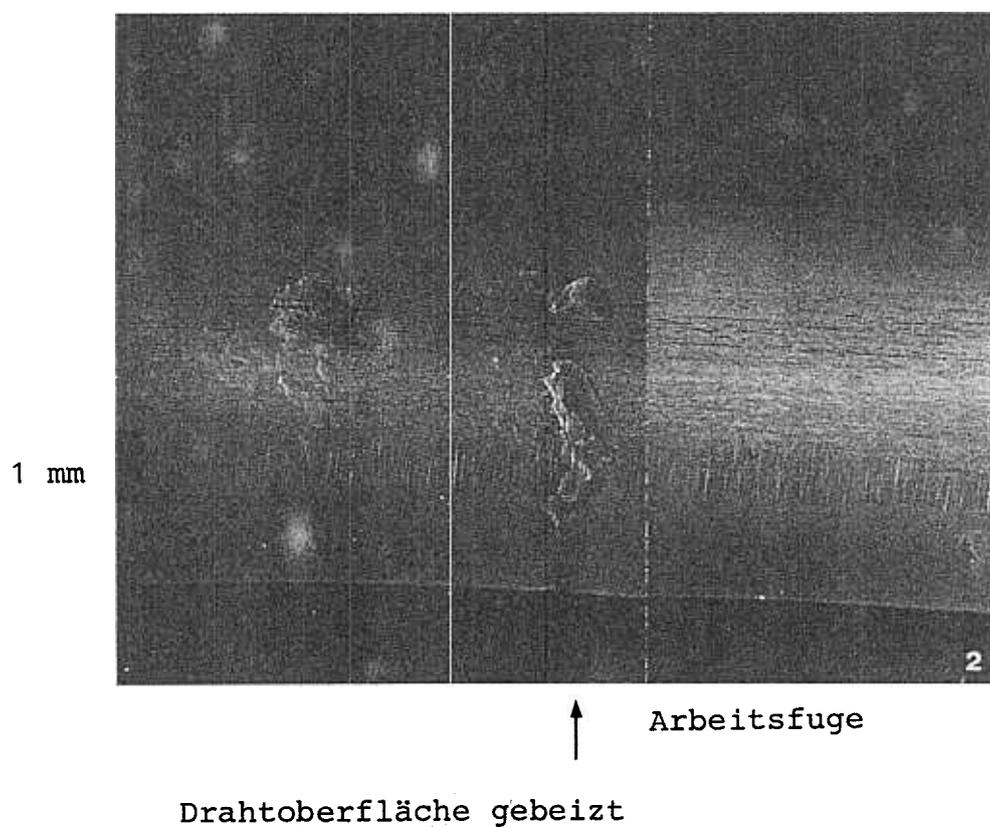
hier : Probe 26, Arbeitsfuge : $w = 0,25$ mm,
Betonriß : $w = 0,10$ mm

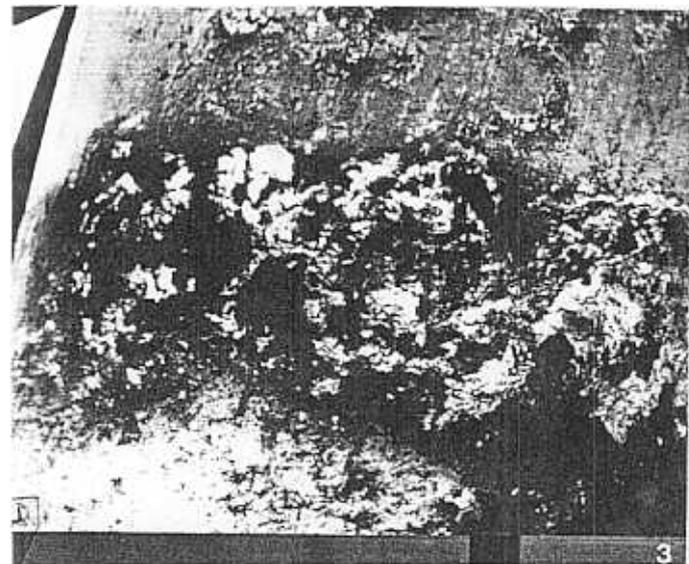
Sorte : St 1420/1570 - feuerverzinkt

Beton : nicht karbonatisiert (L), Chloridbeanspruchung
(CL^-)

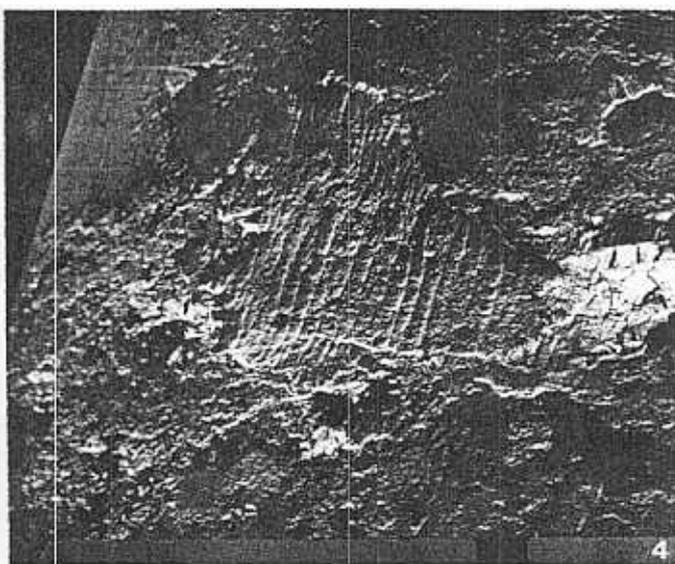
Zeit 1296 h (L) + 3860 h (Cl)

Korrosionszustand des Drahtes und Karbonatisierung des Betons



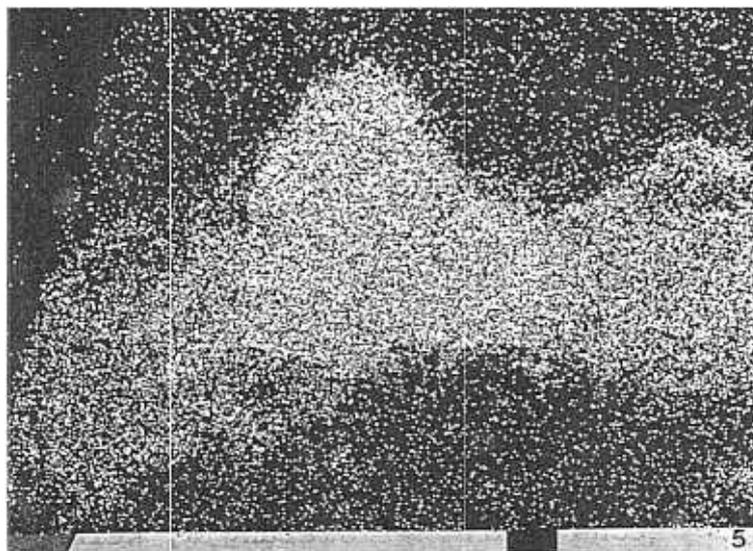


vor Entfernung der Korrosions-
produkte



nach mechanischer Entfernung
lockerer Korrosionsprodukte

Eisenverteilung
(hell) auf der Draht-
oberfläche (Korrosions-
produkte des Eisens),
von Teilbild 4



Zinkverteilung (hell)
auf der Drahtoberflä-
che (Korrosionsprodukte
des Zinks),
von Teilbild 4

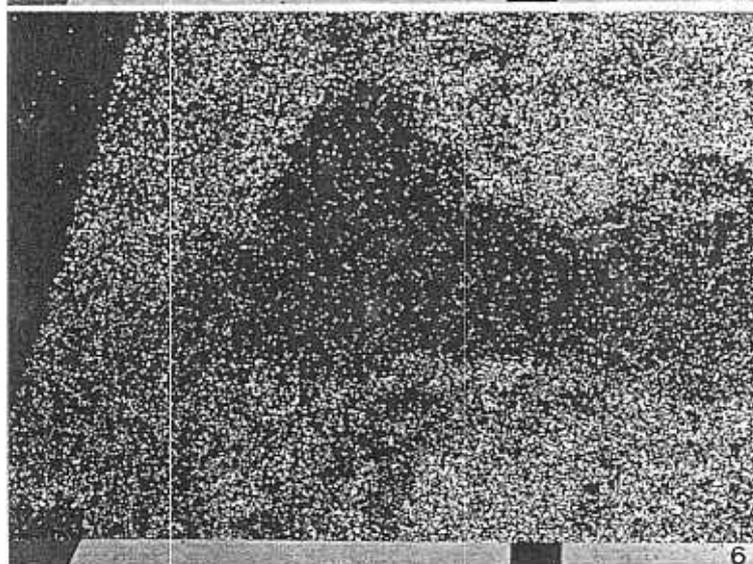


Bild 23

200 μm

Bild 24: siehe Seite 133 und 134

Untersuchung der Zink-/Stahlkorrosion außerhalb von
Betonrissen

hier : Probe 26

Sorte 1420/1570 - feuerverzinkt

Beton : nicht karbonatisiert (L), Chloridbeanspruchung (Cl⁻)

Zeit 1296 h (L) + 3860 h (Cl⁻)

Bild 25: siehe Seite 135

Untersuchung der Stahlkorrosion im Bereich von Betonrissen

hier : Probe 18, Betonriß : w = 0,15 mm

Sorte : St 1420/1570 - schwarz

Beton : Karbonatisiert (K), Chloridbeanspruchung (Cl⁻)

Zeit 1296 h (K) + 750 h (Cl⁻)

Bild 29: siehe Seite 136 und 137

Korrosion der schwarzen und feuerverzinkten Drähte
in Abhängigkeit von der Rißbreite w, der Vorbehandlung
des Betons (Karbonatisierung K, keine Karbonatisierung L)
und der Art der Korrosionsbeanspruchung

hier: 1. Entnahme nach 8400 h

Bild 30: siehe Seite 138 bis 141

Korrosion der schwarzen und feuerverzinkten Drähte
in Abhängigkeit von der Rißbreite w, der Vorbehandlung
des Betons (Karbonatisierung K, keine Karbonatisierung L)
und der Art der Korrosionsbeanspruchung

hier: 2. Entnahme nach 15600 h

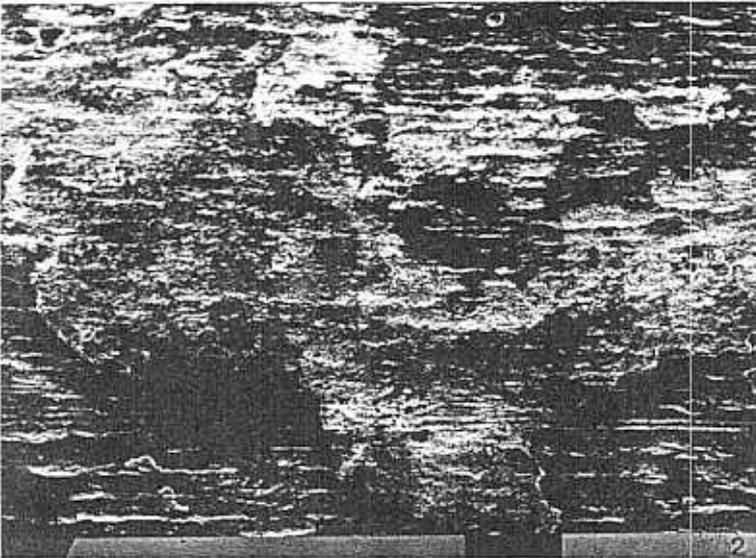


Drahtoberfläche im rissefreien Bereich nach Behandlung mit Kaliumhexacyanoferrat bei $U = 4 \text{ V}$ (Stahl = Anode)

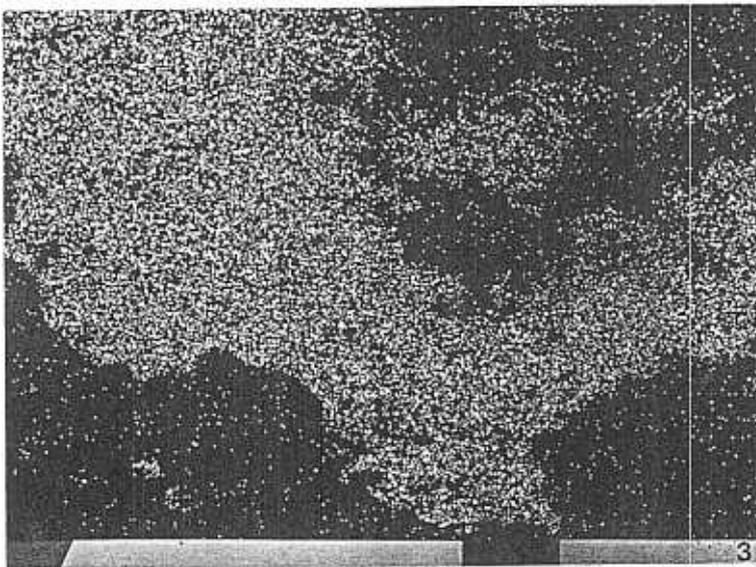


1

schwarze Stellen = Zn-frei Bereiche



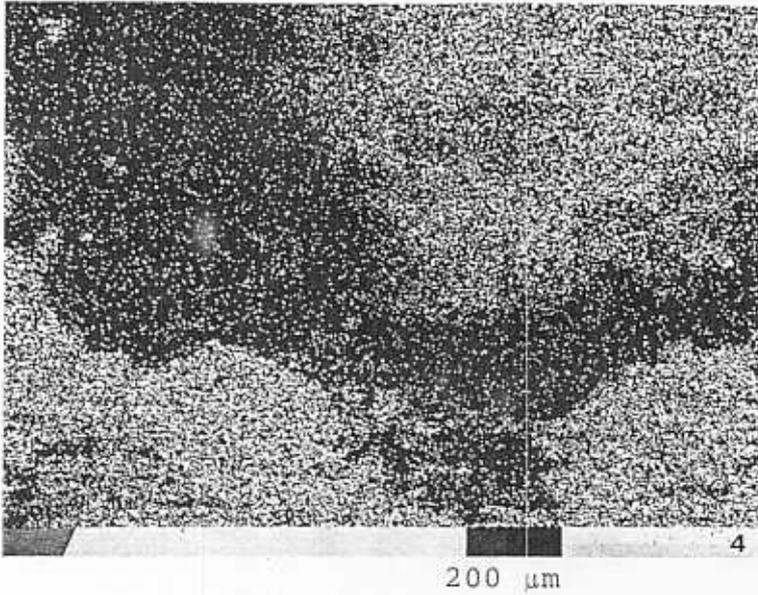
Ausschnitt aus Teilbild 24.1 (Bereiche mit und ohne Zinkauflage) nach mechanischer Entfernung der Eisenkorrosionsprodukte



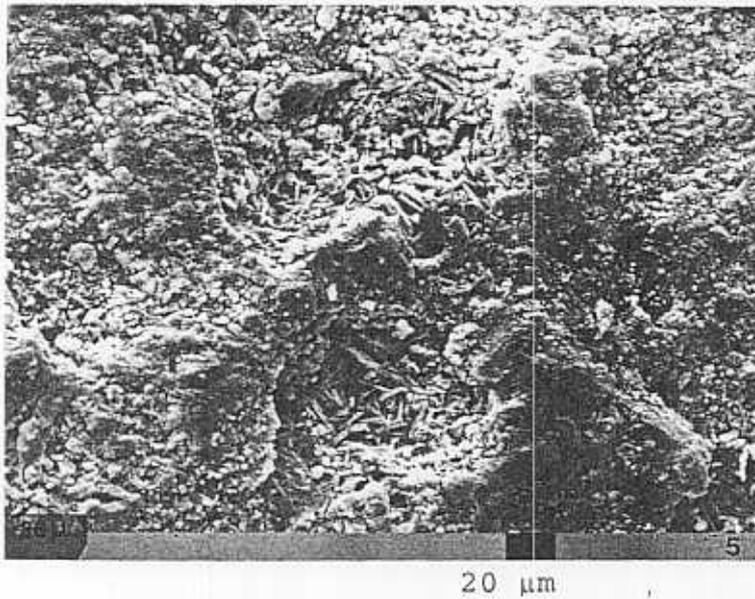
Zinkverteilung (hell der ankorrodierten Zinkauflage, von Teilbild 2)

200 μm

Bild 24

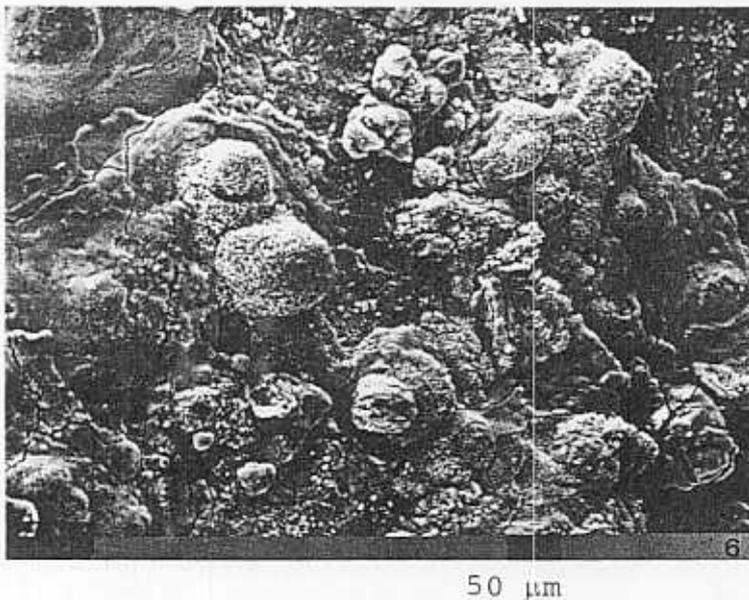


Eisenverteilung
(hell) des Stahl-
untergrundes,
von Teilbild 2



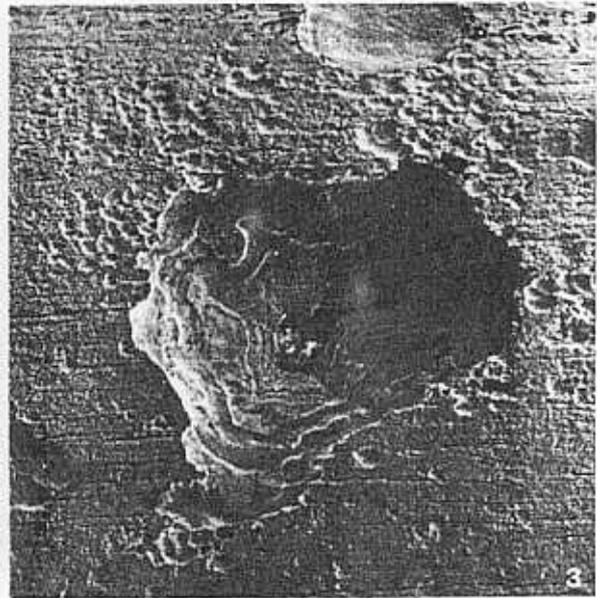
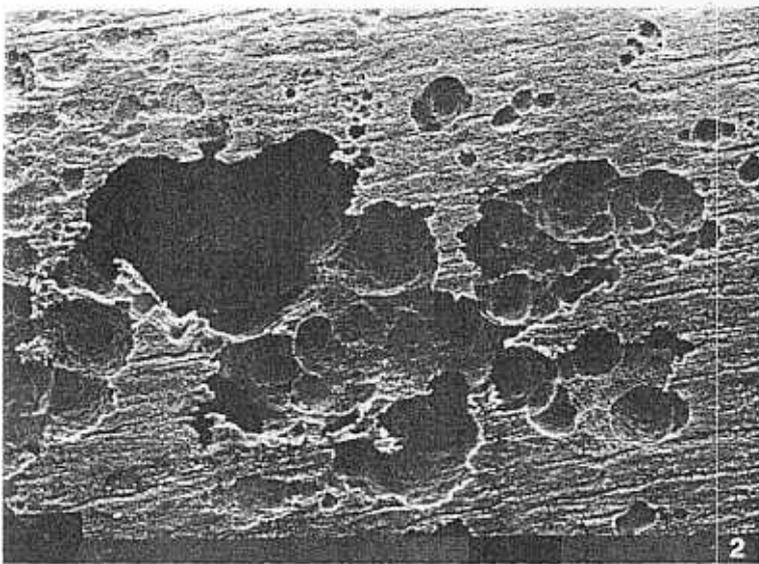
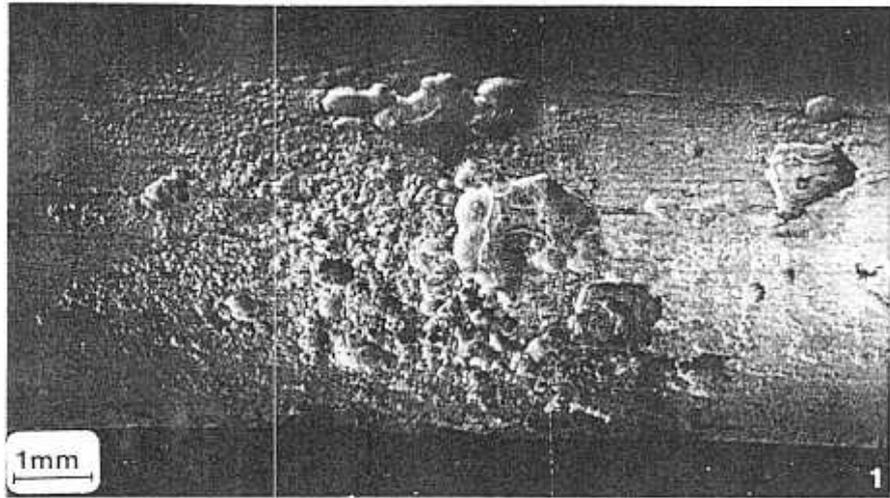
Ausschnitte aus
Teilbild 24.1
vor mechanischer
Entfernung der
Eisenkorrosions-
produkte

Örtliche Stahlkor-
rosion in Berei-
chen mit Restzink-
auflage



Rostbelag in
Zn-freiem Bereich

Bild 24



200 μm

Betonriß, Drahtoberfläche gebeizt

Analyse der Korrosions-
produkte
innerhalb einer Korro-
sionsnarbe

- | | |
|--------|----------------------------------|
| 1 - Al | 5 - K |
| 2 - Si | 5 - Ca |
| 3 - S | 7 - $\text{Fe}_{\text{K}\alpha}$ |
| 4 - Cl | 8 - Fe_{KB} |

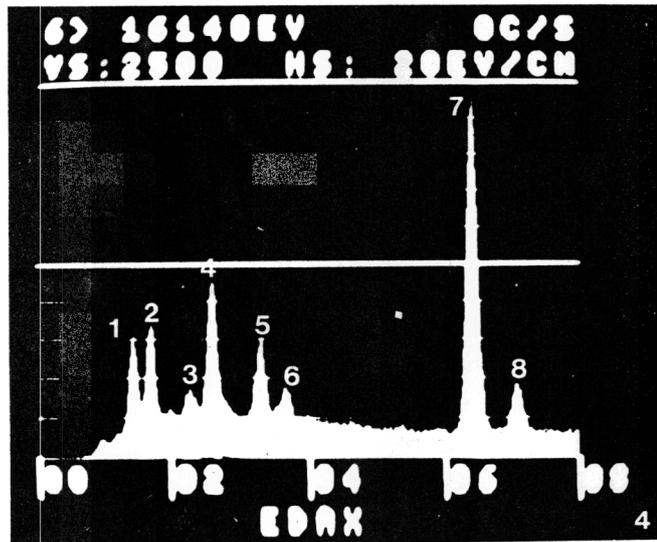


Bild 25

schwarz				feuerverzinkt			
w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm		w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm	
K	L	K	L	K	L	K	L
Wasser - St 1420/1570							
	Keine Probe entnommen						
Siehe 1. Spalte (w = 0,4 mm und w = 0,2 mm liegen dicht nebeneinander)							
SO ₂ - St 1420/1570							
			Keine Probe entnommen				

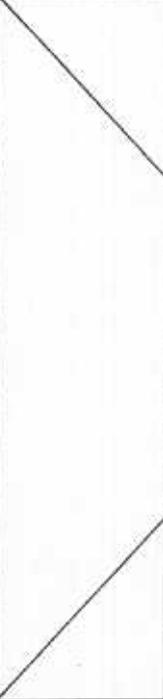
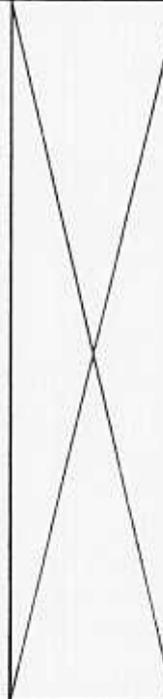
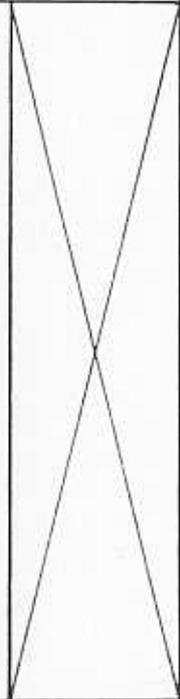
schwarz				feuerverzinkt			
w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm		w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm	
K	L	K	L	K	L	K	L
Chlorid - St 1420/1570							
Probe vorzeitig gebrochen	Probe vorzeitig gebrochen		Keine Probe entnommen	Keine Probe entnommen		Keine Probe entnommen	
Atmosphäre - St 1420/1570							
							

Bild 29

schwarz				feuerverzinkt			
w \approx 0,4 mm		w \approx 0,2 mm		w \approx 0,4 mm		w \approx 0,2 mm	
K	L	K	L	K	L	K	L
Wasser - St 1420/1570							
Keine Probe mehr vorhanden							
SO ₂ - St 1420/1570							
Keine Probe mehr vorhanden	Keine Probe mehr vorhanden						

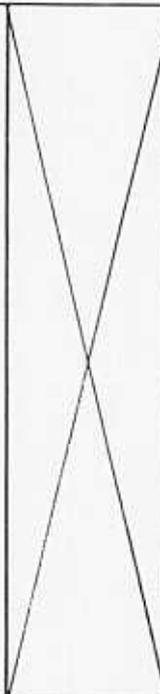
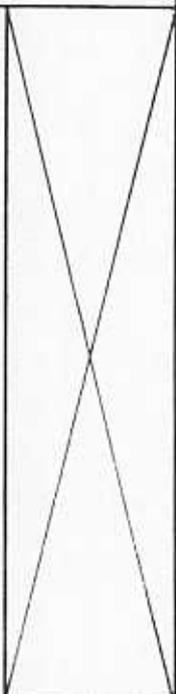
schwarz				feuerverzinkt			
w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm		w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm	
K	L	K	L	K	L	K	L
Chlorid - St 1420/1570							
Probe vorzeitig gebrochen		Probe vorzeitig gebrochen					
Atmosphäre St 1420/1570							
							

Bild 30

schwarz				feuerverzinkt			
w \approx 0,4 mm		w \approx 0,2 mm		w \approx 0,4 mm		w \approx 0,2 mm	
K	L	K	L	K	L	K	L
Wasser - St. 1570/1770							
SO ₂ - St. 1570/1770							

schwarz				feuerverzinkt			
w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm		w ≈ 0,4 mm		w ≈ 0,2 mm	
K	L	K	L	K	L	K	L
Chlorid - St 1570/1770							
Atmosphäre - St 1570/1770							

Bild 30

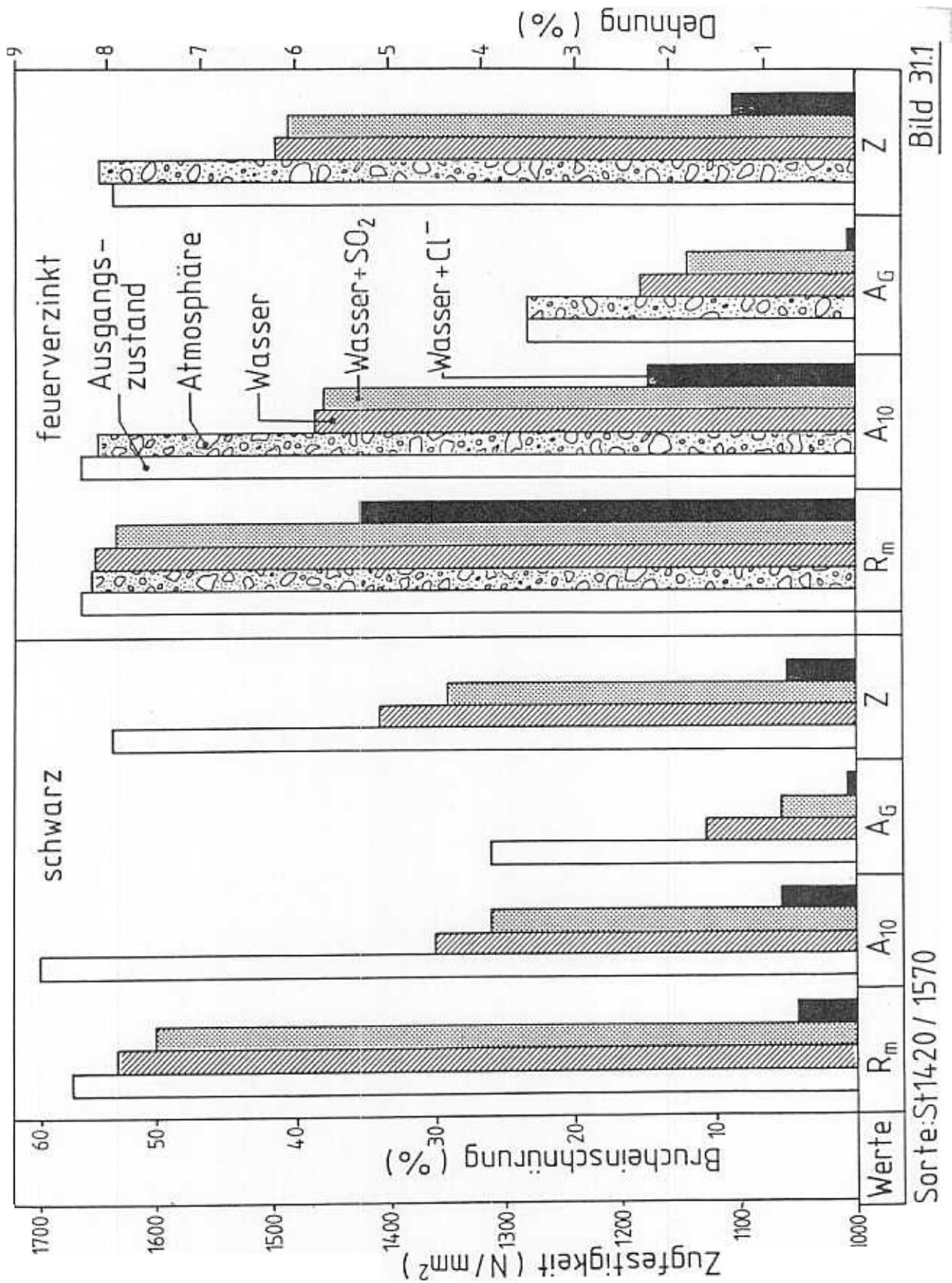
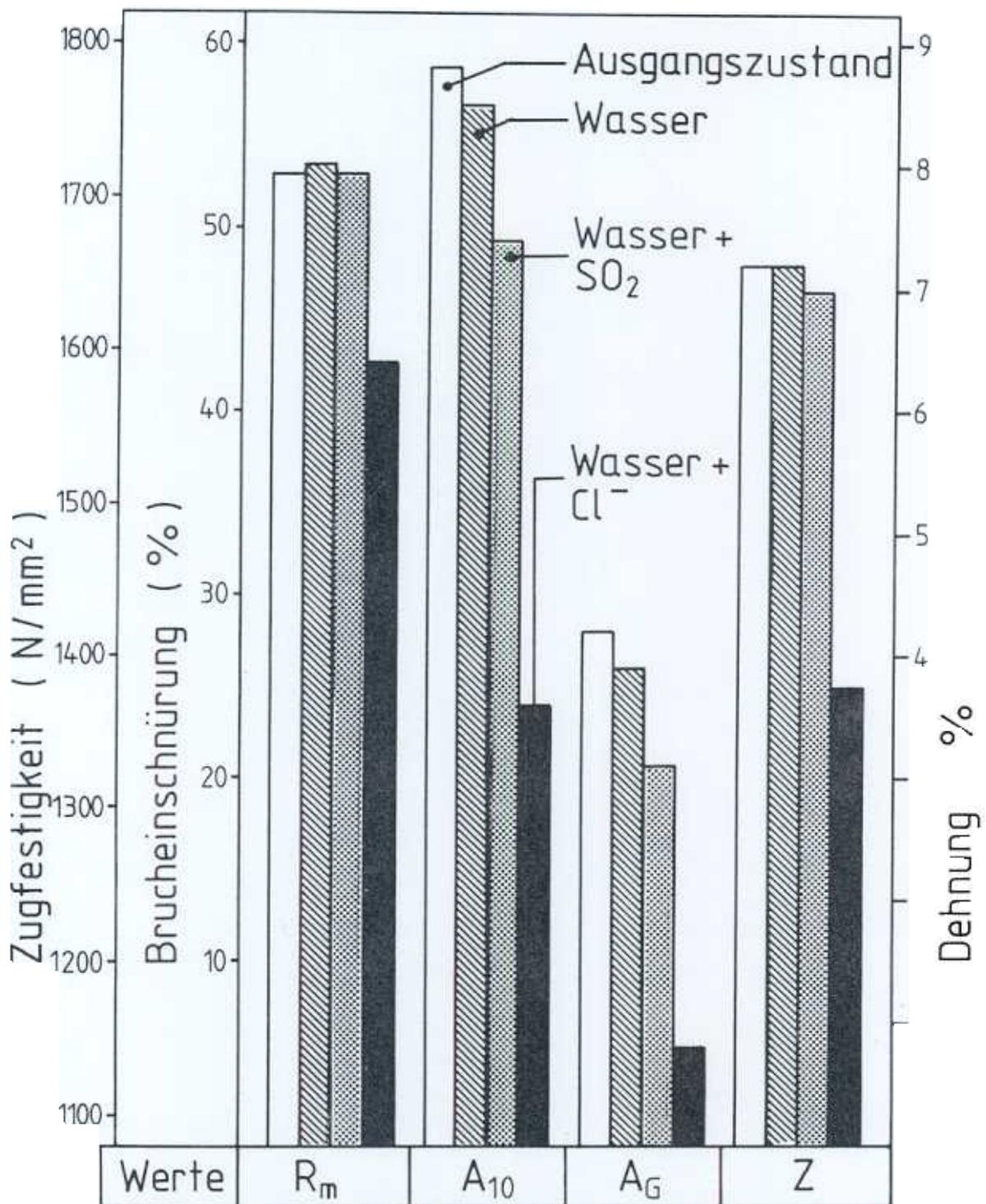


Bild 31.1 und 31.2

Mechanische Kennwerte der Stahlproben nach der 2. Entnahme



Sorte: St 1570/1770 - feuerverzinkt

B d 3 2



Probe 19



Probe 21



Probe 22



Probe 29



Probe 9



Probe 6

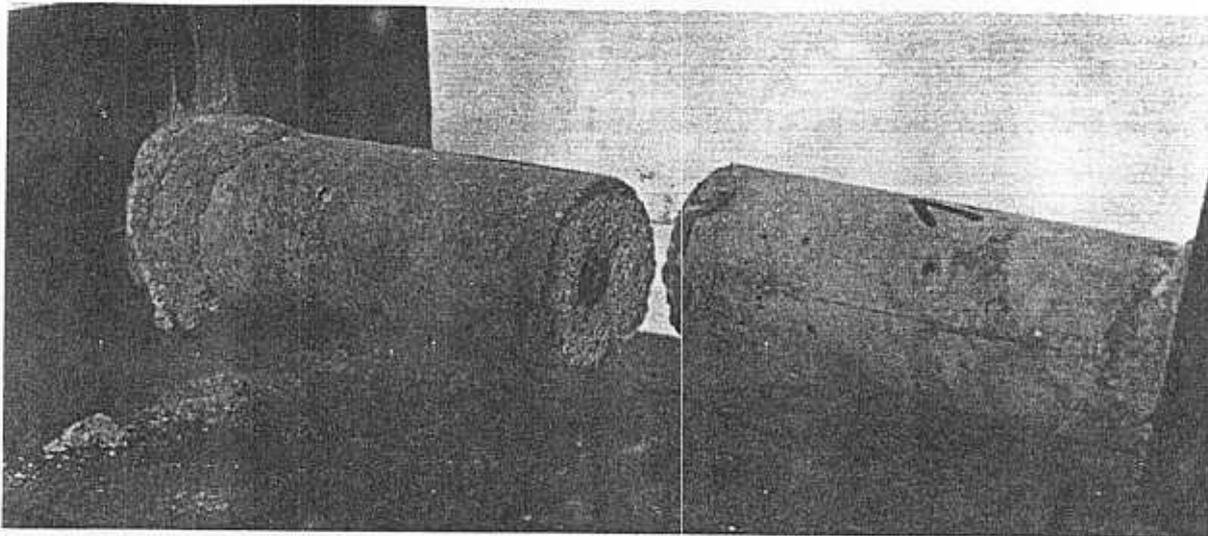


Probe 8

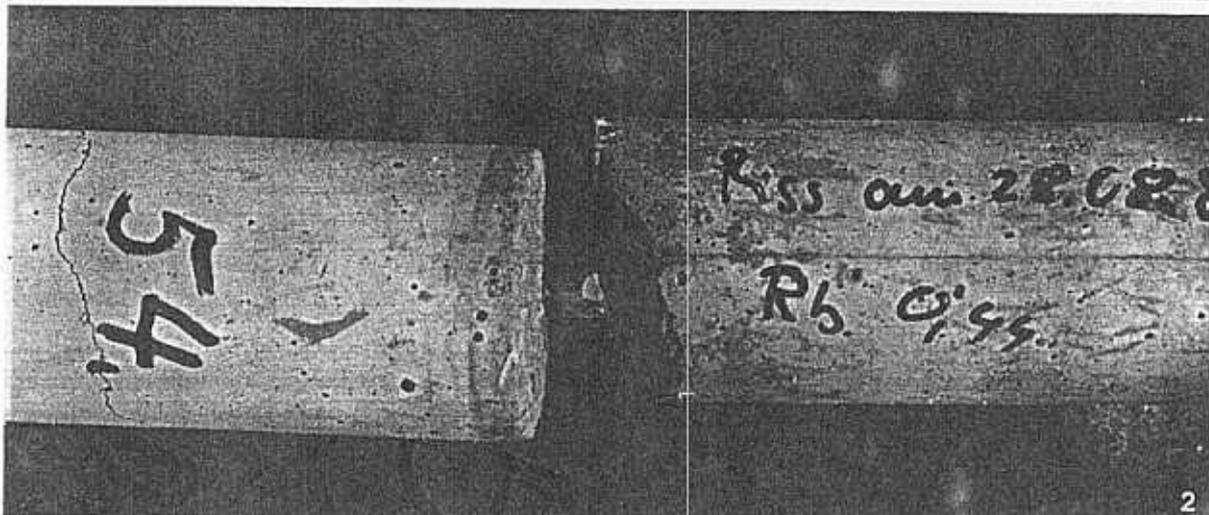
Bild 32

Zugbrüche an Korrosionsstellen

(Lage der Korrosion im Betonriß, s. Tabelle 8)

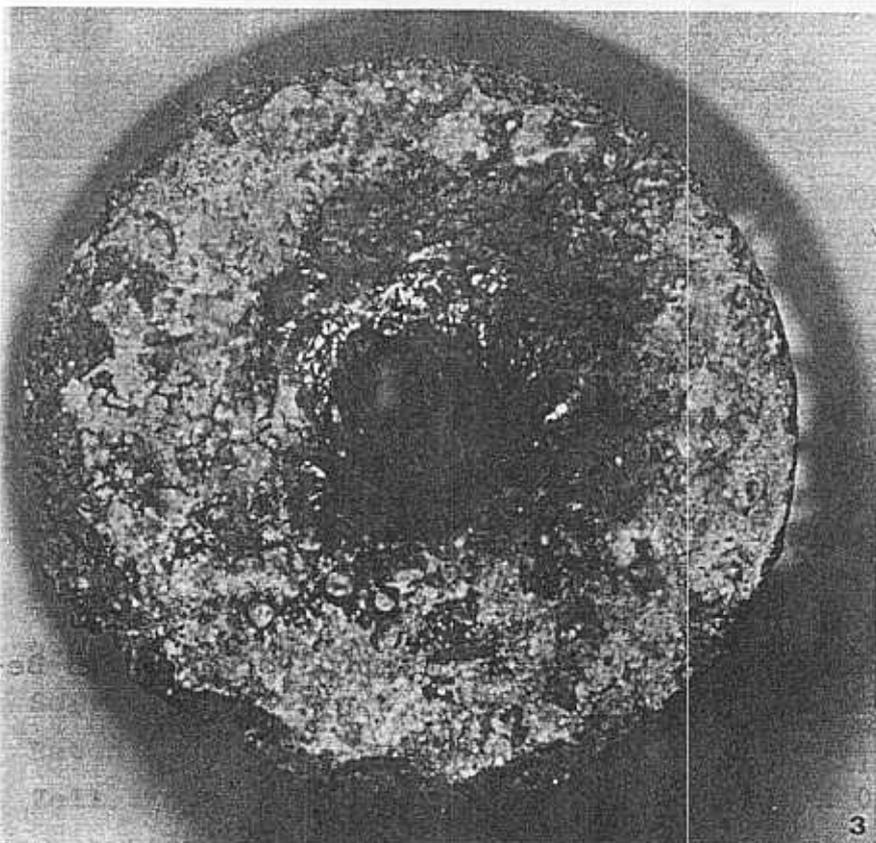


ob



Probe

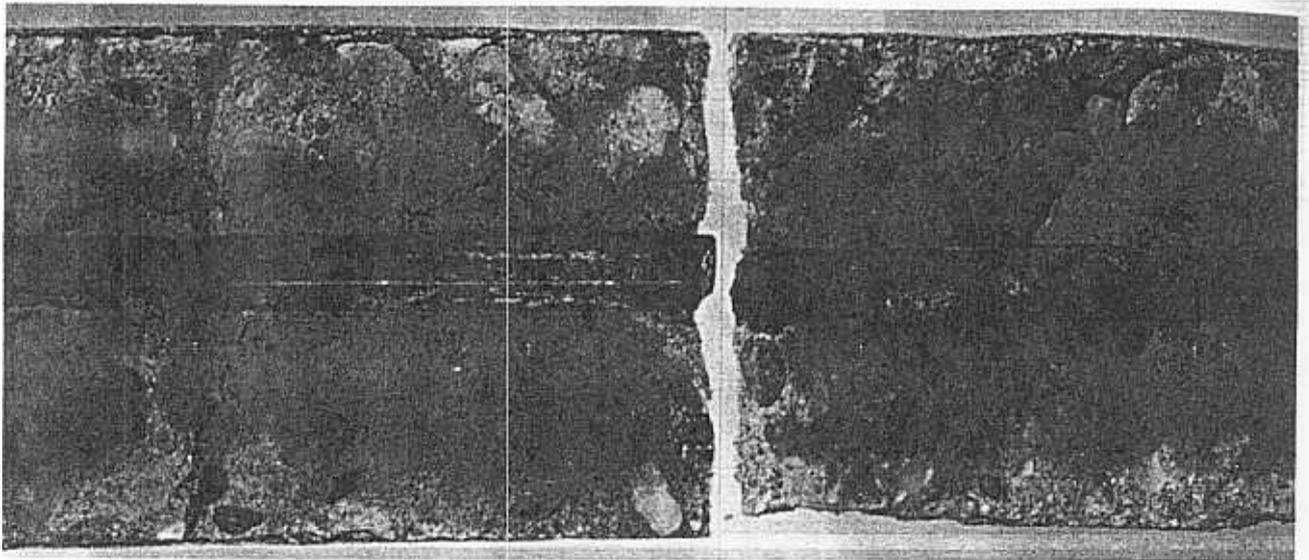
2



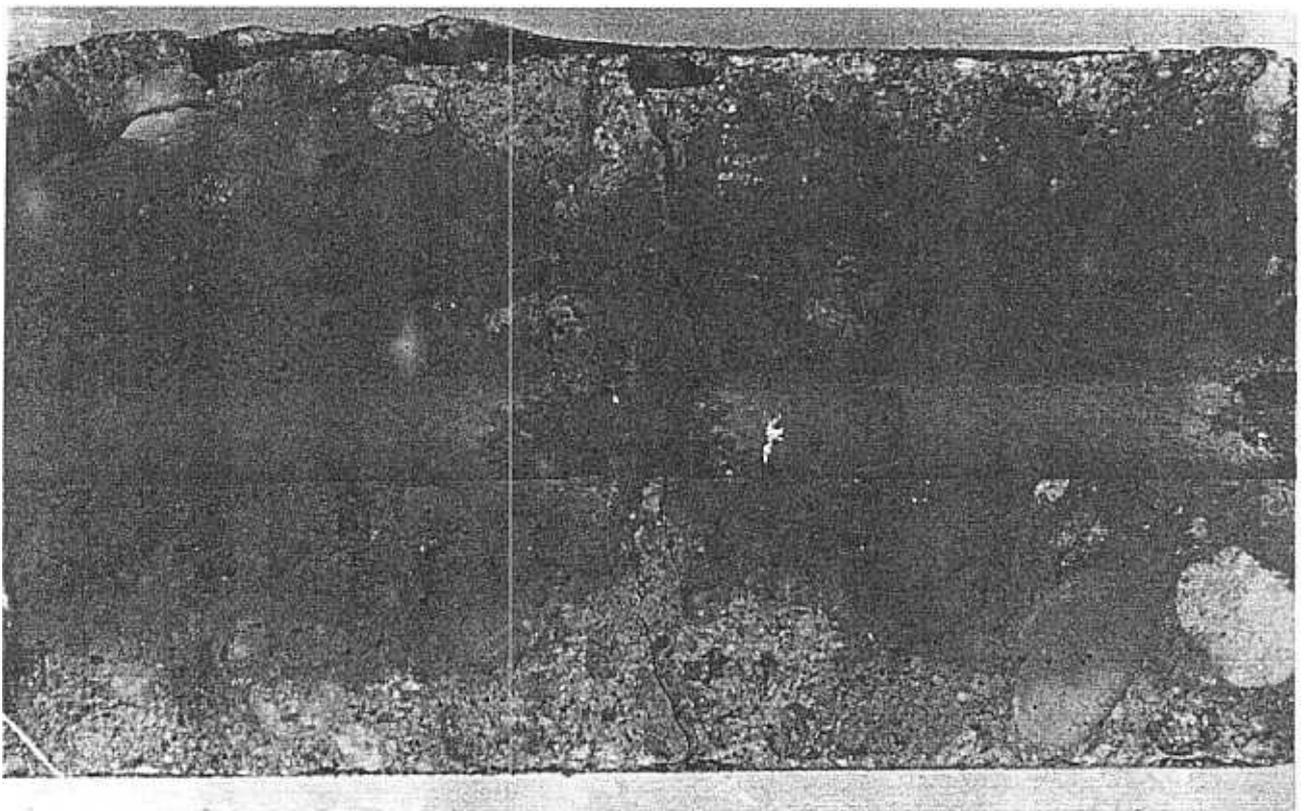
Probe 20

Bild 9:
Typisches Aussehen
gebrochener Probe

3



Arbeitsfuge



Betonriß

Bild 10:

Bruch von Probe 18 in Arbeitsfuge ($w = 0,45 \text{ mm}$) und Korrosion in Betonriß mit $w = 0,15 \text{ mm}$

Sorte: St 1420/1570 - schwarz

Beton: karbonatisiert (K), Chloridbeanspruchung (Cl^-)

Zeit : 1296 h (K) + 750 h (Cl^-)

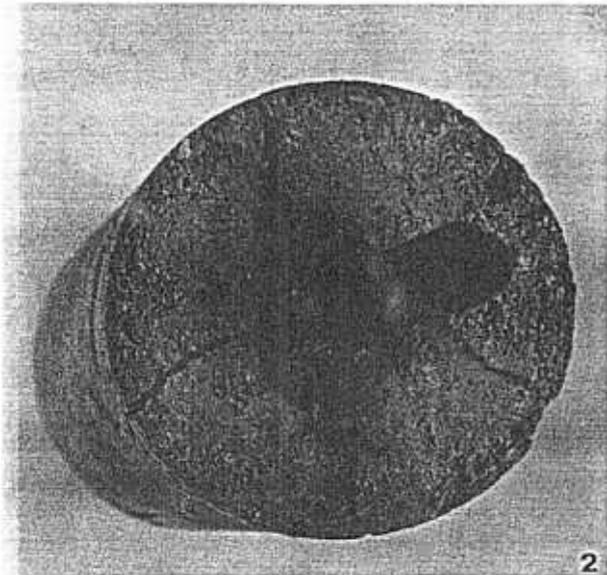
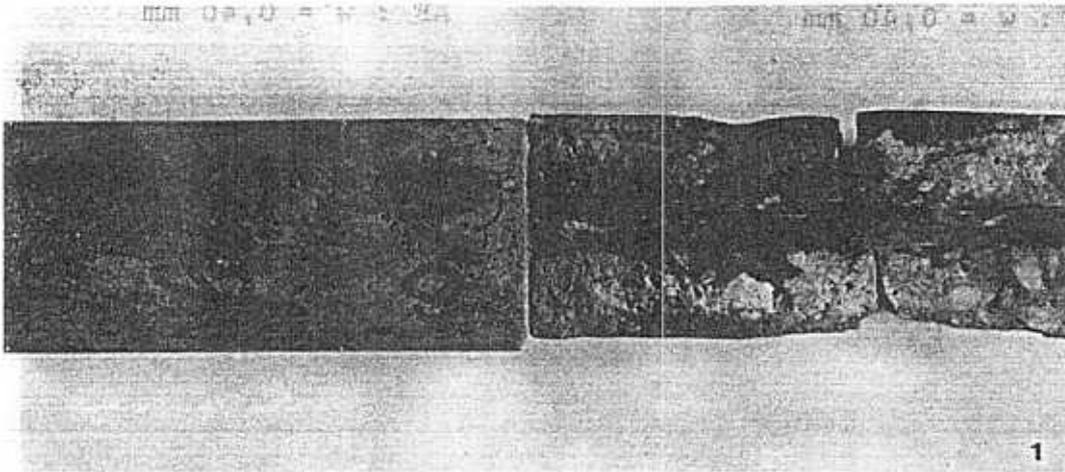


Bild 12:

Bruch von Probe 19 in Beton
riß ($w = 0,10$ mm) und Beton
aufplatzungen (Aufsicht Ar-
beitsfuge $w = 0,20$ mm)

Sorte: St 1420/1570 - schwarz

Beton: nicht karbonatisiert
Chloridbeanspruchung

Zeit: 1296 h (L) + 14710 h C

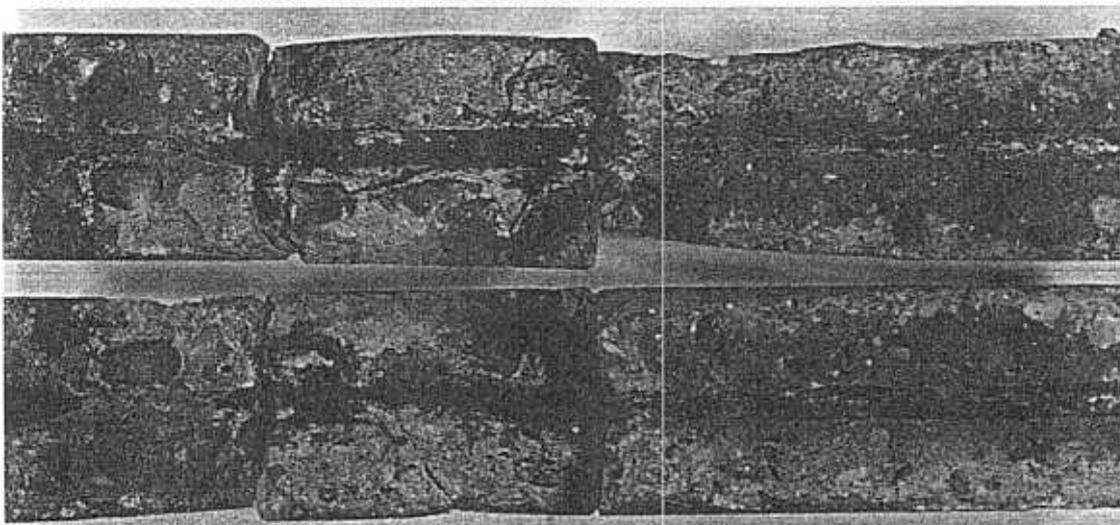


Bild 14:

Bruch: Probe 8 Arbeitsfuge (

Sorte: / uervink

Be: ch: karbonatisiert L Chloridbeanspruchung C

h 4 (

Riß : w = 0,40 mm

AF : w = 0,40 mm

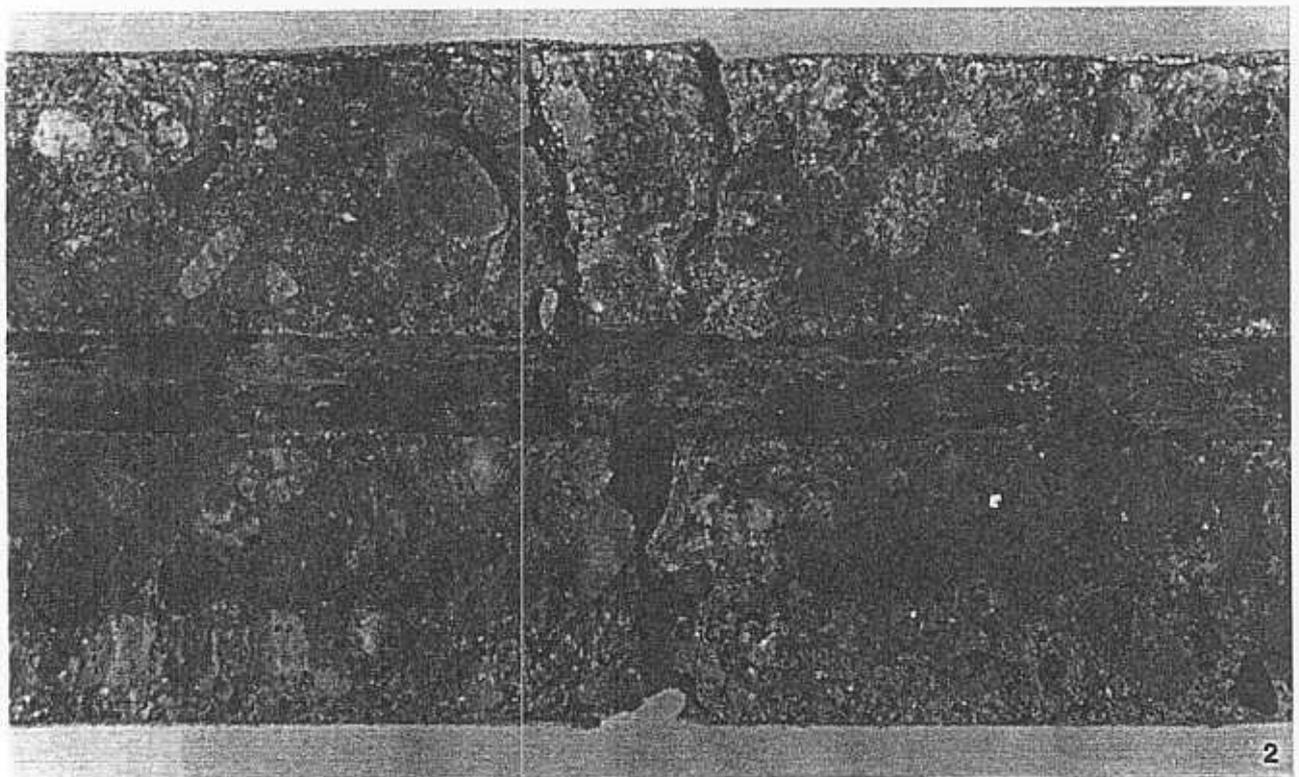
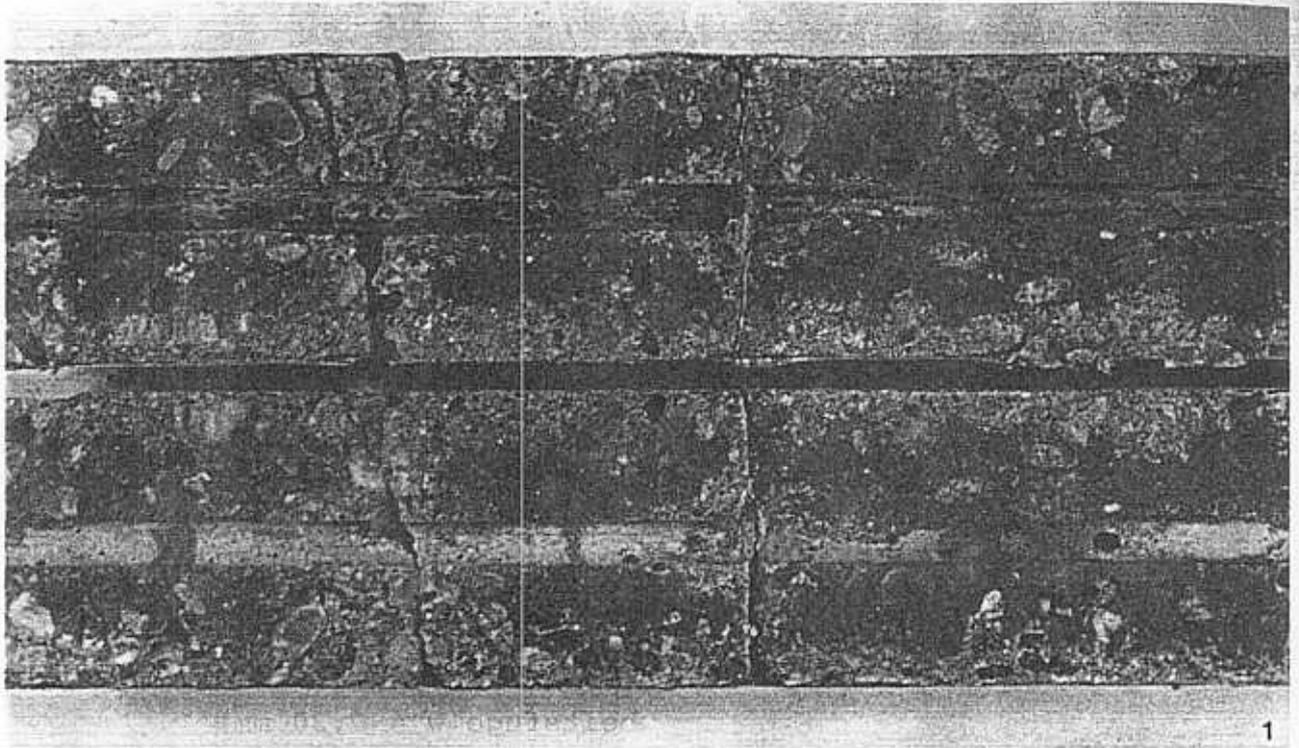


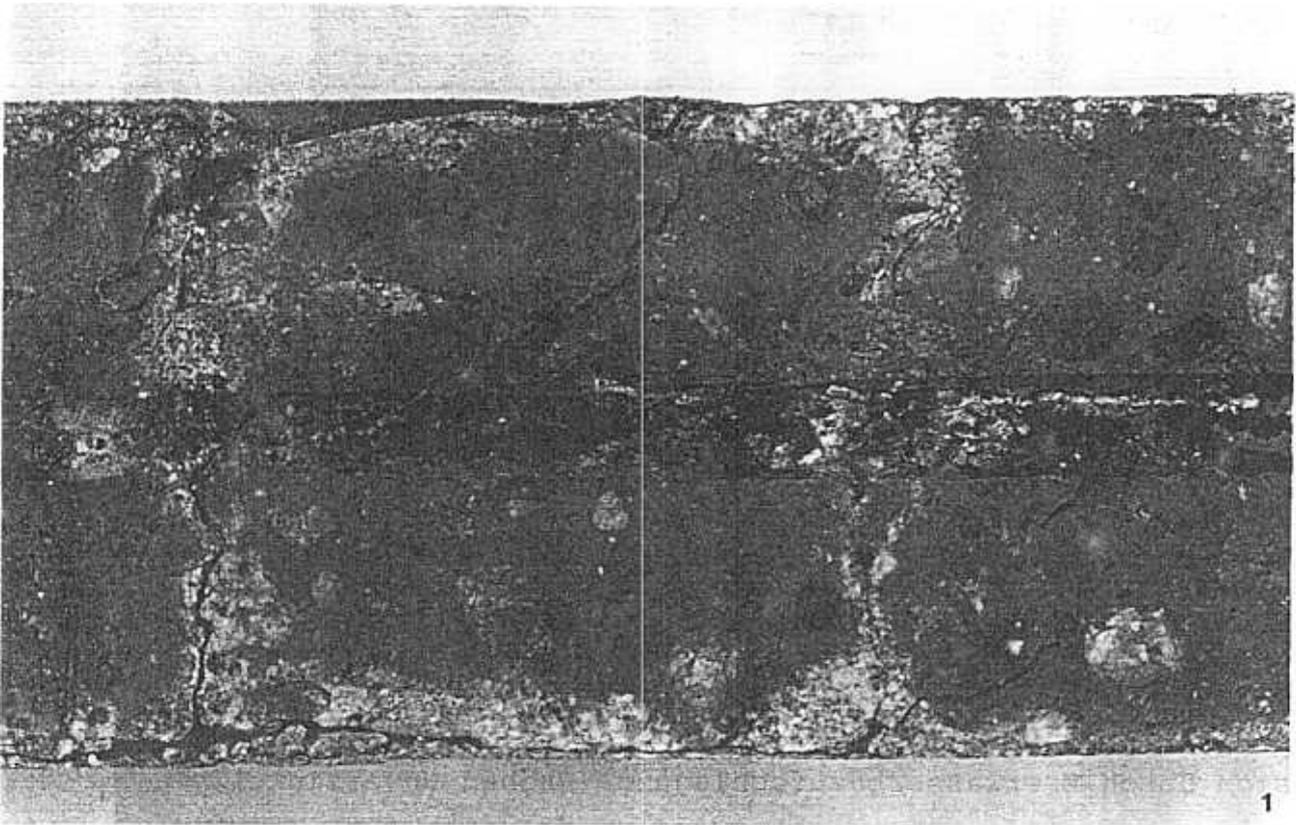
Bild 16:

Bruch von Probe 55 in einem Betonriß (w = 0,40 mm)

Sorte: St 1420/1570 - feuerverzinkt

Beton: karbonatisiert (K), Auslagerung im Freien (A)

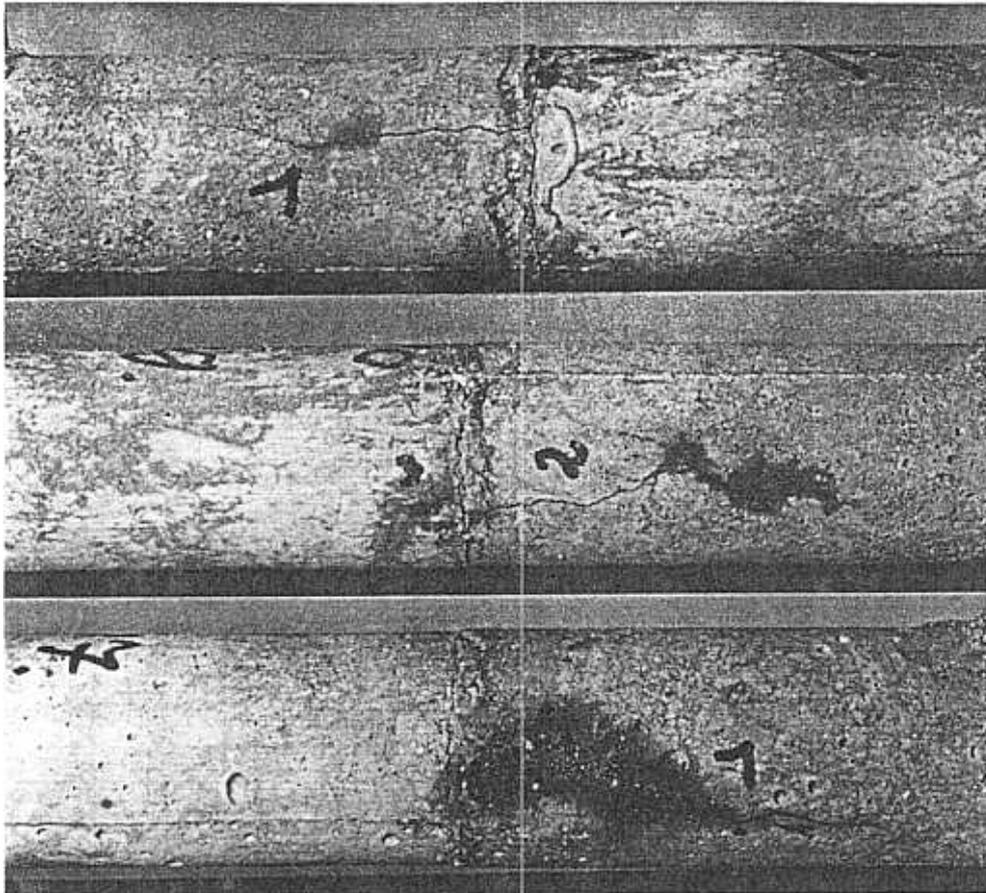
Zeit : 1296 h (K) + 8184 h (A)



Arbeitsfuge

Betonriß

Bild 23.1



Probe 19

Probe 19

Probe 17

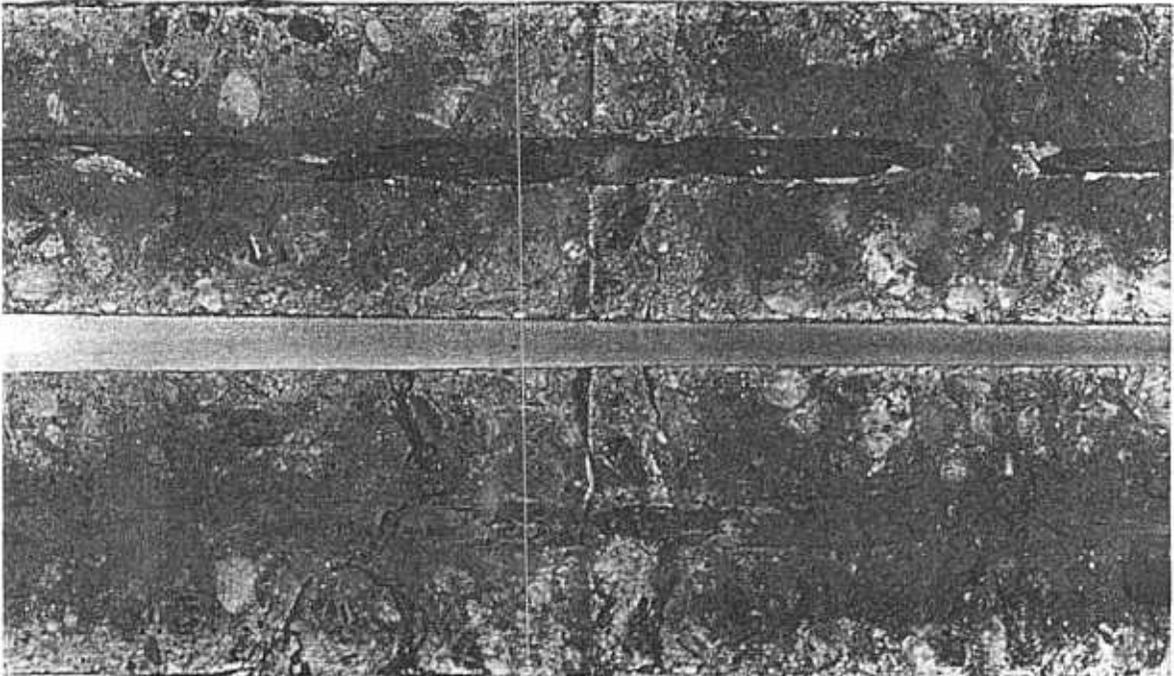
Bild 26:

Längsrißbildung im Beton infolge starker Stahlkorrosion durch Meerwasserbeaufschlagung (Proben unverzinkt)

Bild 27: siehe Seite 151 bis 157

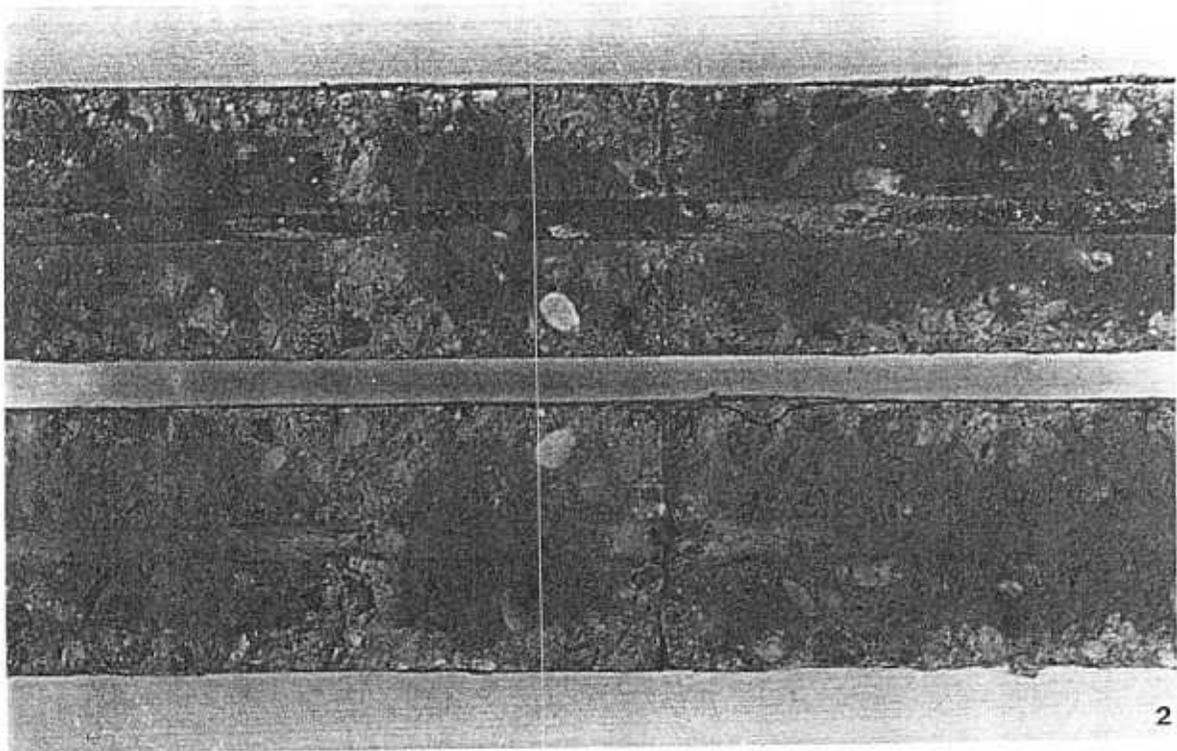
Korrosion der schwarzen und feuerverzinkten Drähte aus St 1420/1570 und Karbonatisierung des Betons in Abhängigkeit von der Korrosionsbeanspruchung.

(Die Aufnahmen stammen überwiegend von Proben der 1. Entnahme nach 8400 h, 1.E., wurden jedoch in 2 Fällen durch solche von Proben der 2. Entnahme nach 15600 h, 2.E., ergänzt)



1

Probe 2 schwar AF mm Riß w mm)



E

2

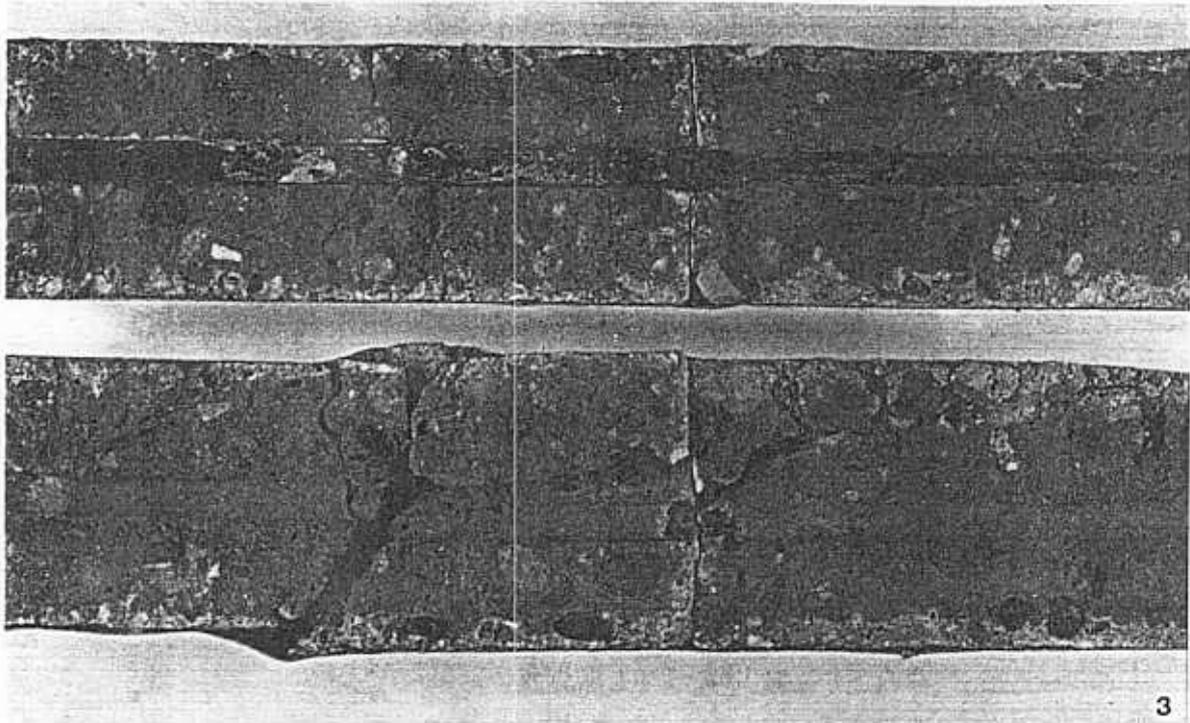
Probe feuerverzinkt (AF w 0 35 Riß w 0 5 mm

Proben künstl ch karbonatisiert

Medium: Wasse

St 420/1

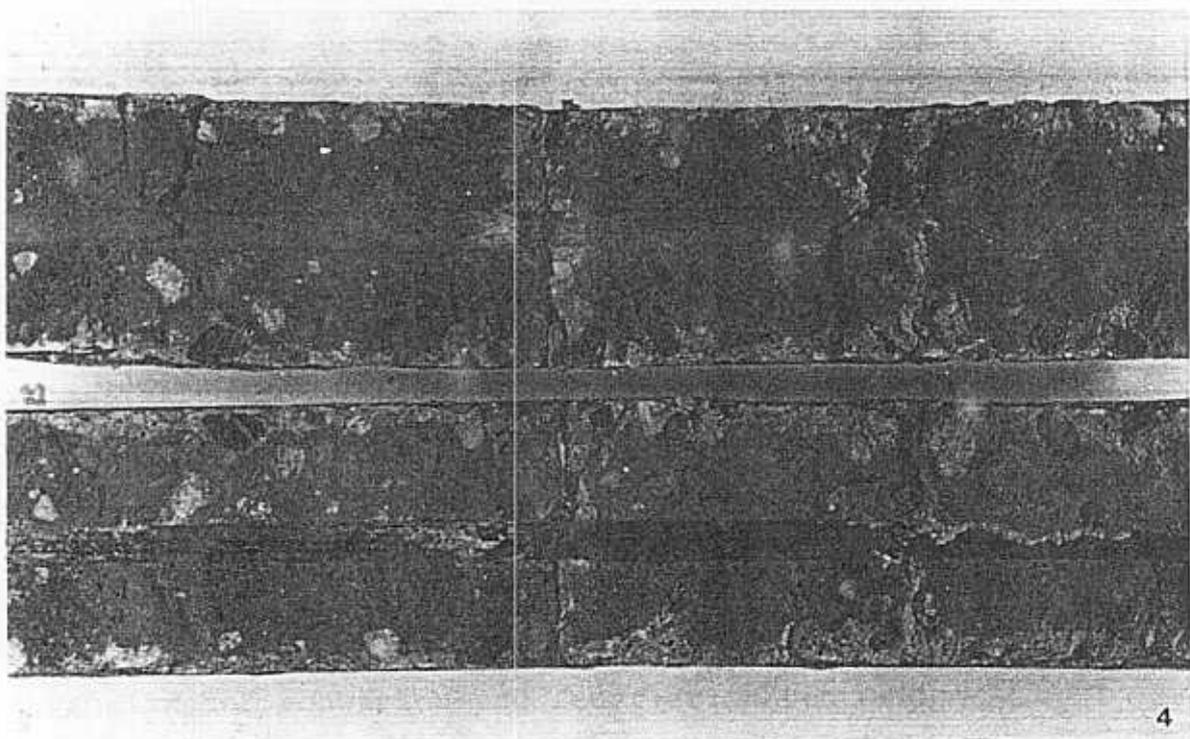
B d



3

1.E

Probe 3 - schwarz (AF : w = 0,25 mm)



4

1.E

Probe 11 - feuerverzinkt (AF : w = 0,5 mm, RiB : w = 0,15 mm)

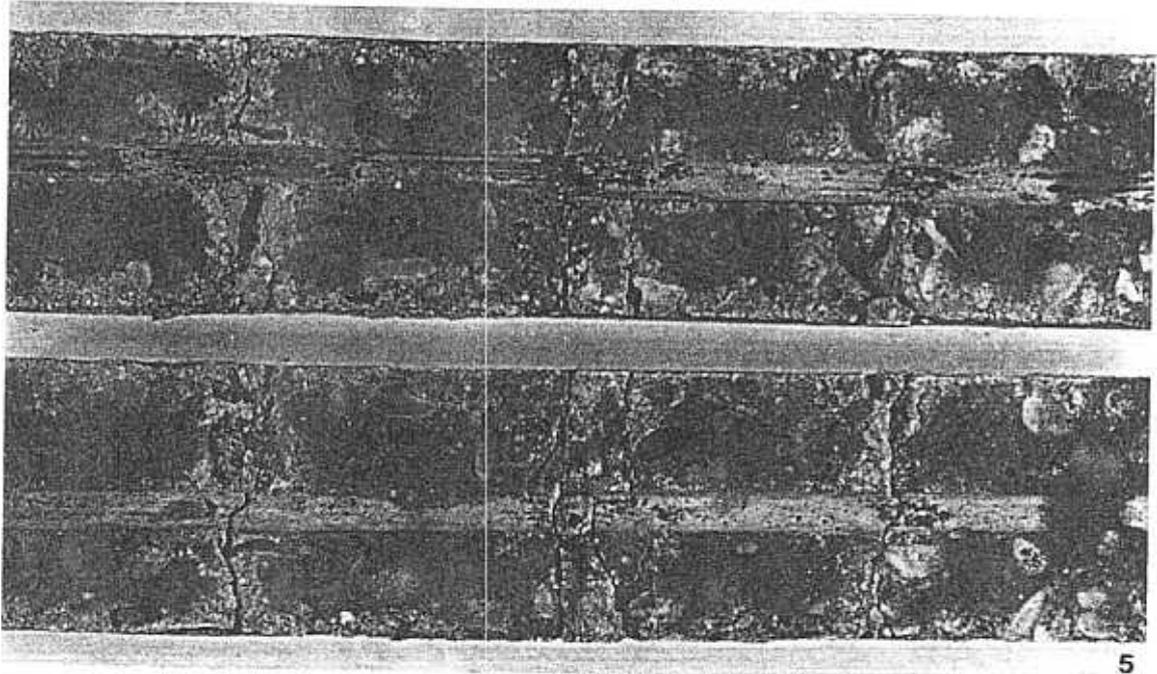
Proben nicht künstlich karbonatisiert

Medium: Wasser

St 1420/1570

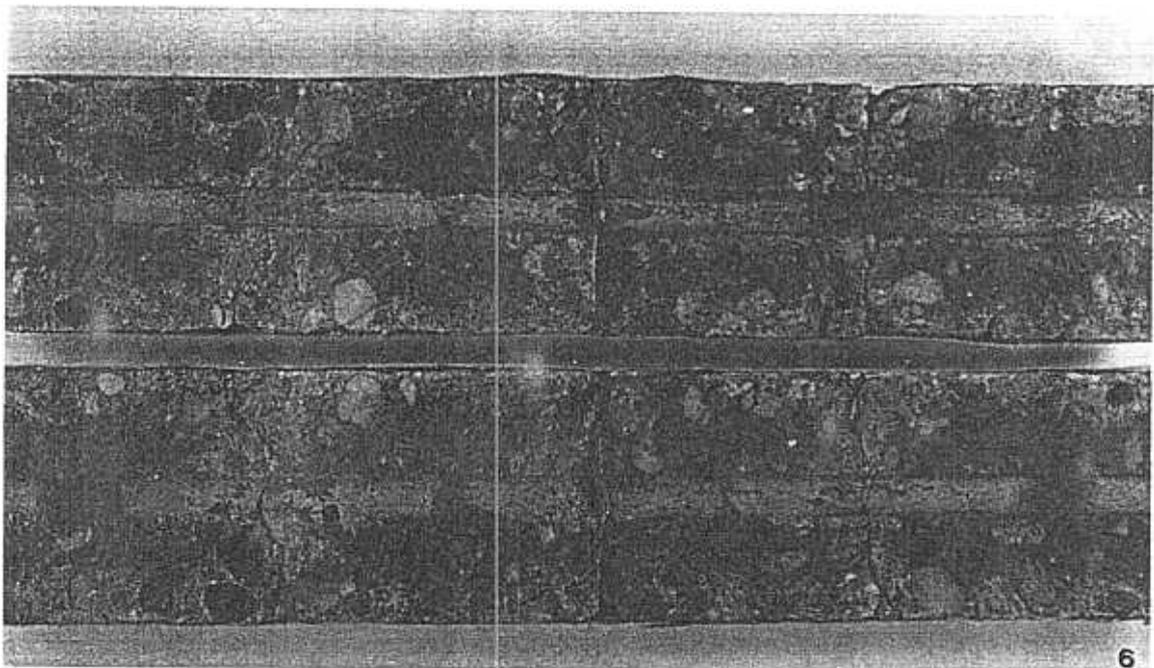
Bild 27

1.E



Probe 56 - feuerverzinkt (AF : w = 0,45 mm,
Risse : w = 0,45 mm)

2.E



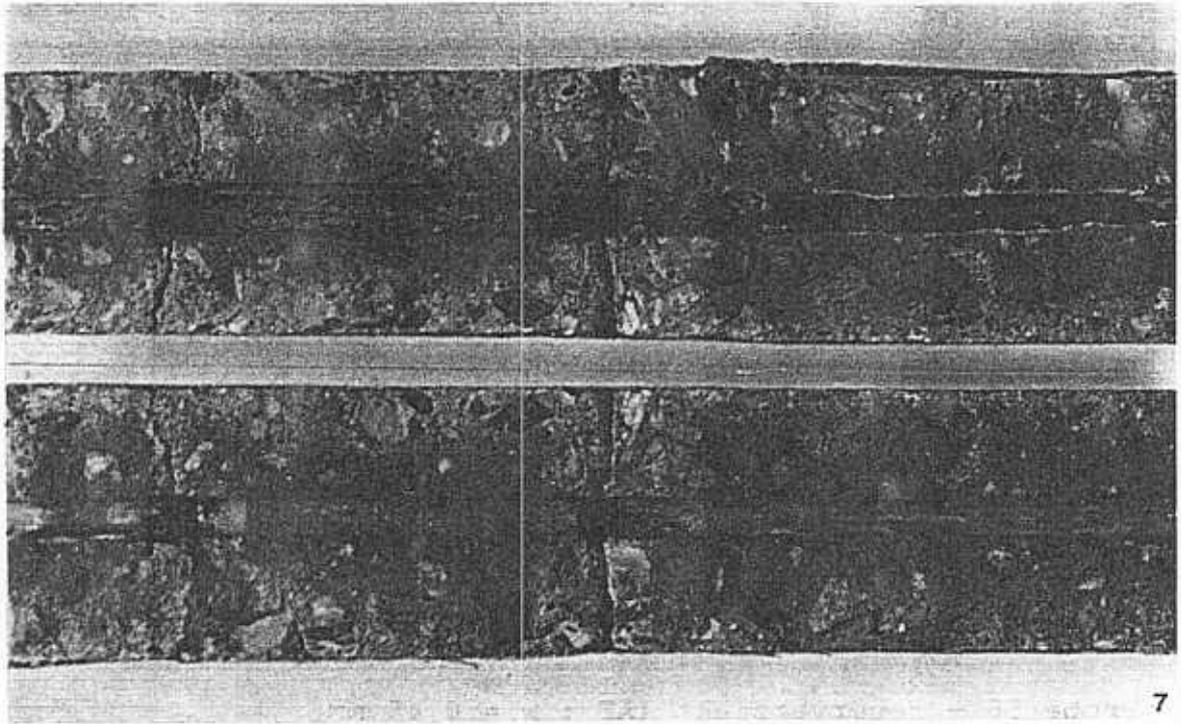
Probe 51 - feuerverzinkt (AF : w = 0,20 mm,
Risse : w = 0,20 mm)

Probe künstlich karbonatisiert

Medium: freie Atmosphäre

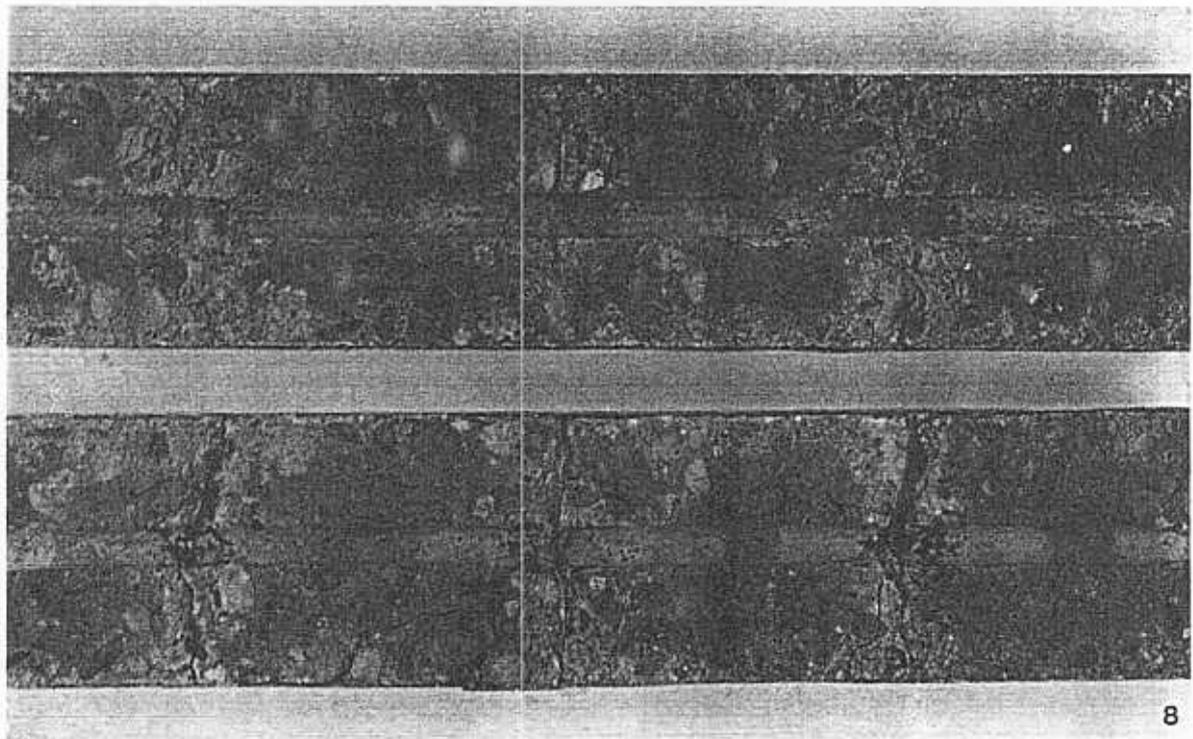
St 1420/1570

Bild 27



1.E

Probe 34 - schwarz (AF : w = 0,45 mm, RiB : w = 0,1 mm)



1.E

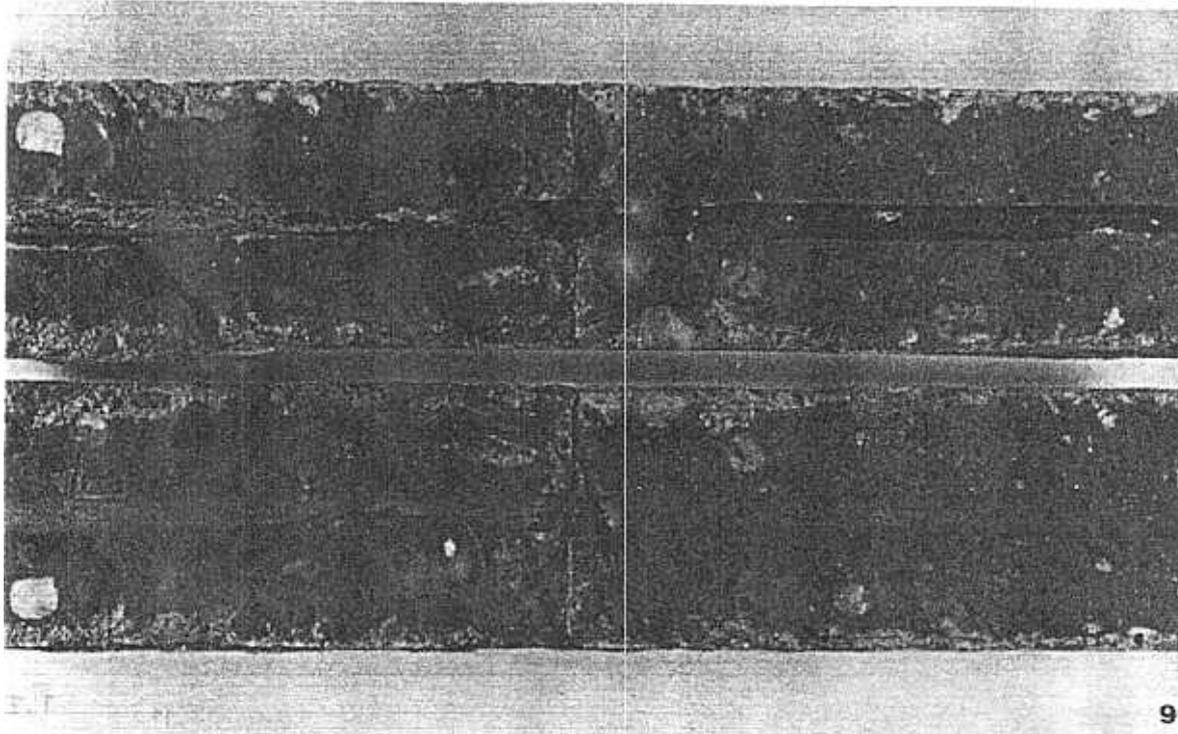
Probe 39 - feuerverzinkt (AF : w = 0,40 mm, RiB : w = 0,25 mm)

Proben künstlich karbonatisiert

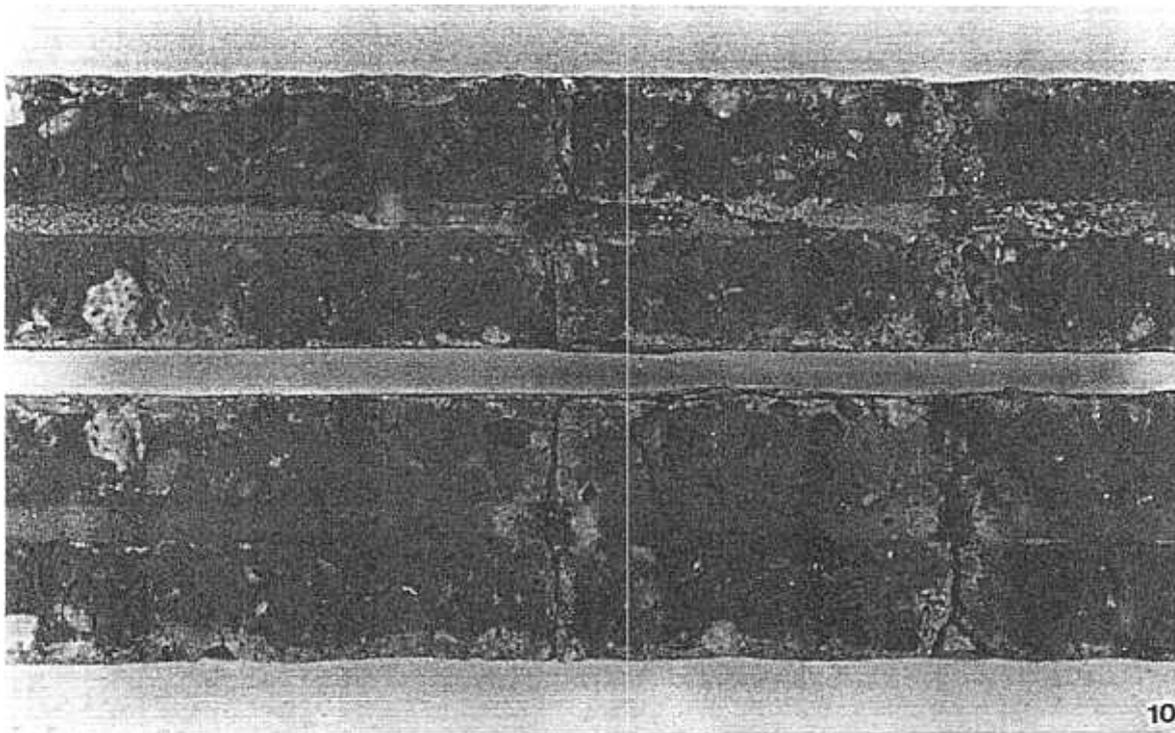
Medium: Wasser + SO₂

St 1420/1570

Bild 27



Probe 36 - schwarz (AF : w = 0,5 mm)



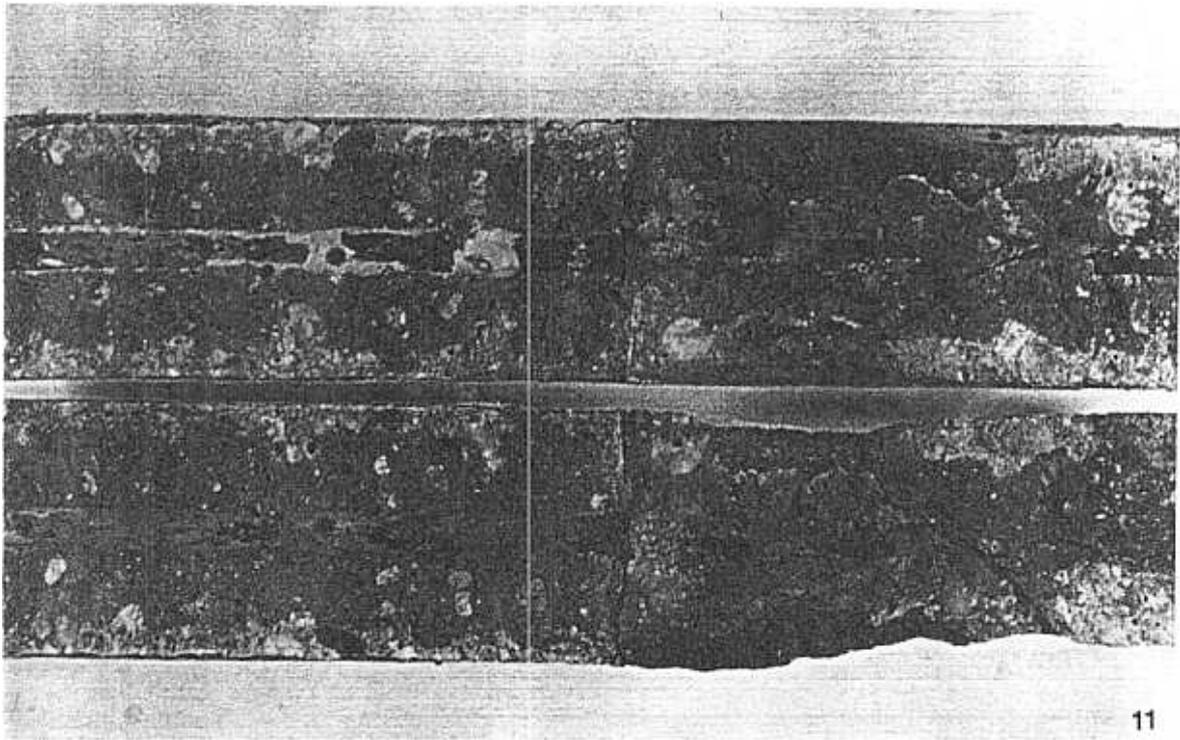
Probe 43 - feuerverzinkt (AF : w = 0,40 mm, RiB : w = 0,25 mm)

Proben nicht künstlich karbonatisiert

Medium: Wasser + SO₂

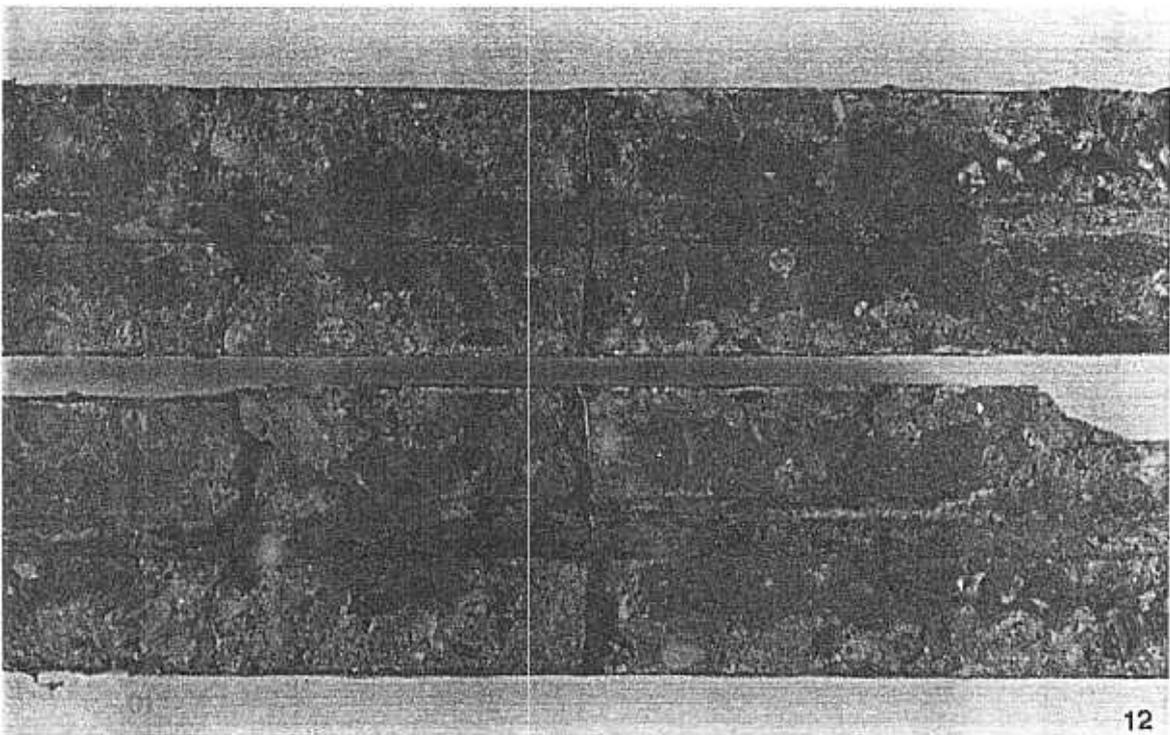
St 1420/1570

Bild 27



1.E

Probe 17 - schwarz (AF : w = 0,2 mm)



1.E

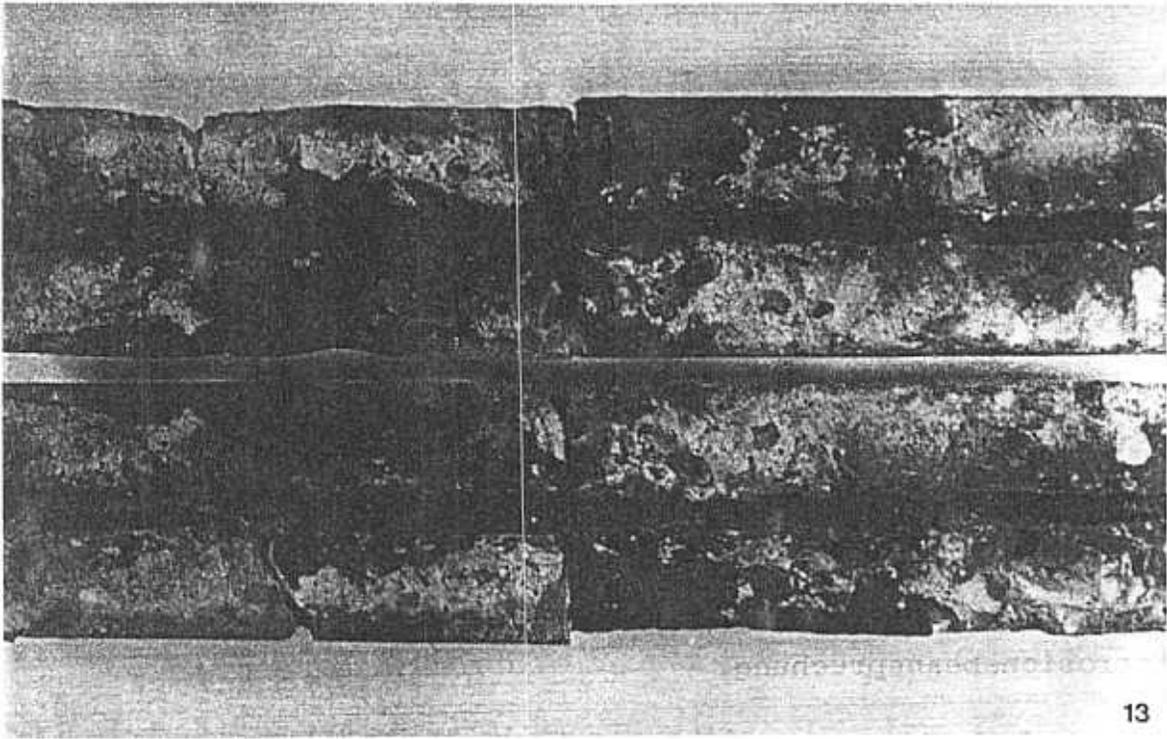
Probe 23 - feuerverzinkt (AF : w = 0,5 mm, Riß : w = 0,15 mm)

Proben künstlich karbonatisiert

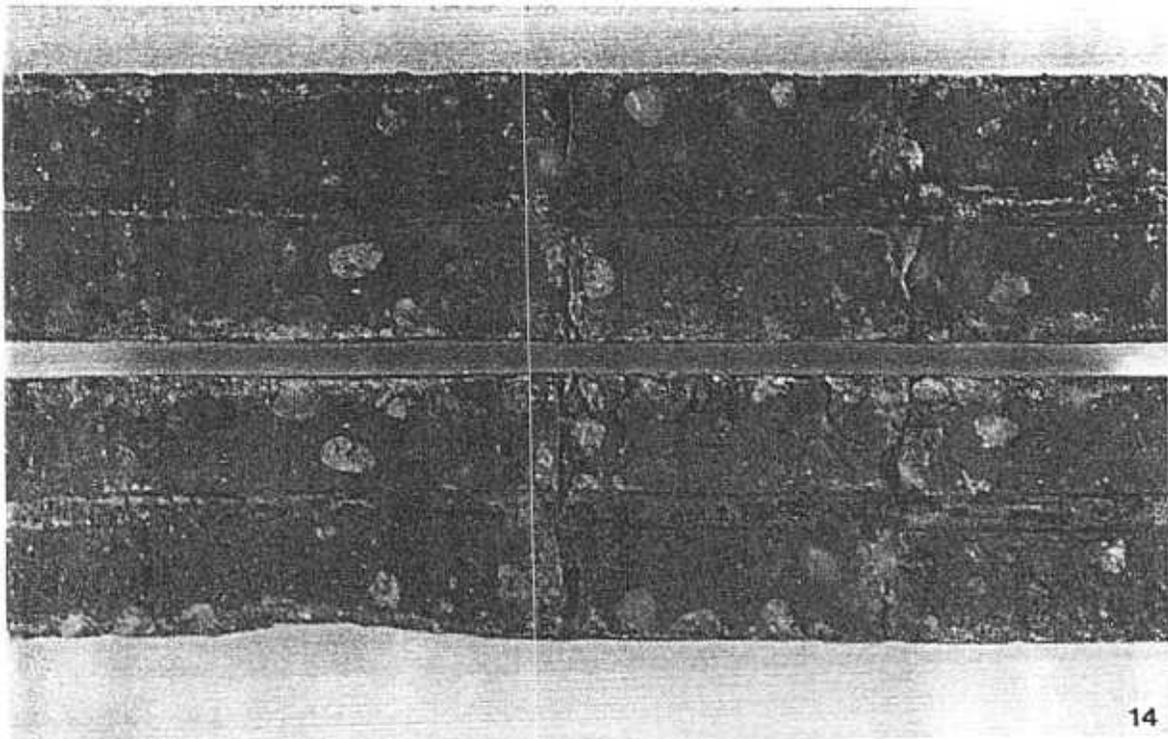
Medium: Meerwasser

St 1420/1570

Bild 27



Probe 9 schwarz AF w 0 10 mm RiB 0 0 mm



Probe feuerver inkt (AF w 0 50 mm RiB 25 mm)

Proben licht künstlich karbonatisiert

Medium Meerwa

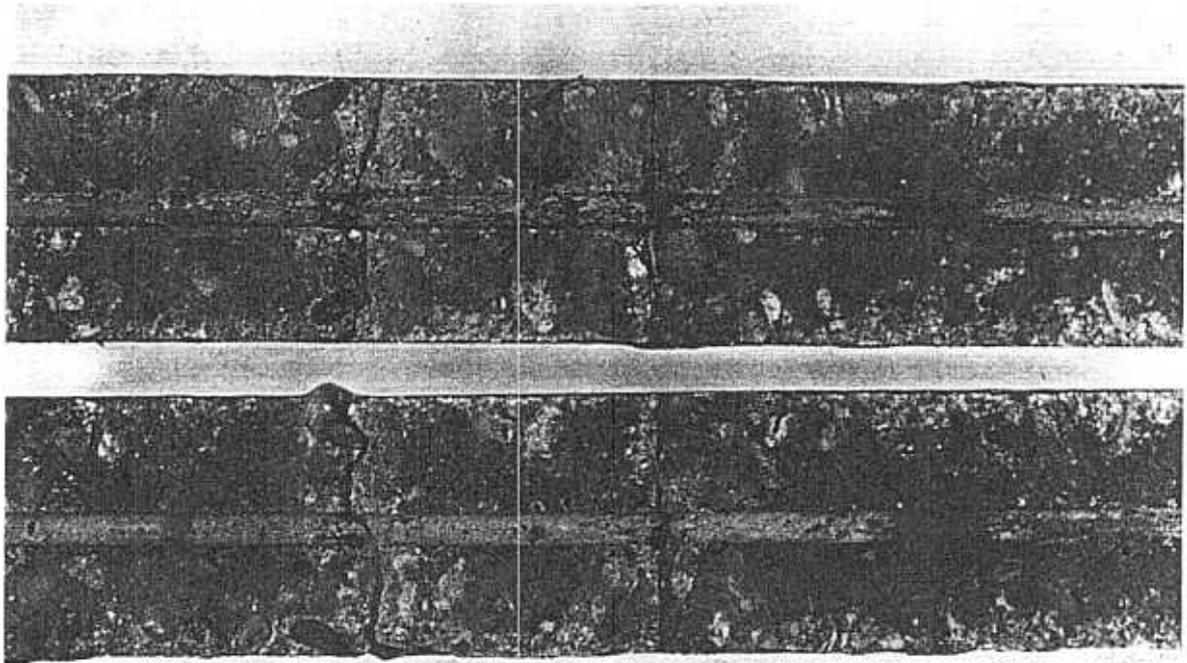
S 21 / 570

B ld

Bild 28: siehe Seite 159 und 160

Korrosion der feuerverzinkten Drähte aus St 1570/1770
und Karbonatisierung des Betons in Abhängigkeit von der
Korrosionsbeanspruchung.

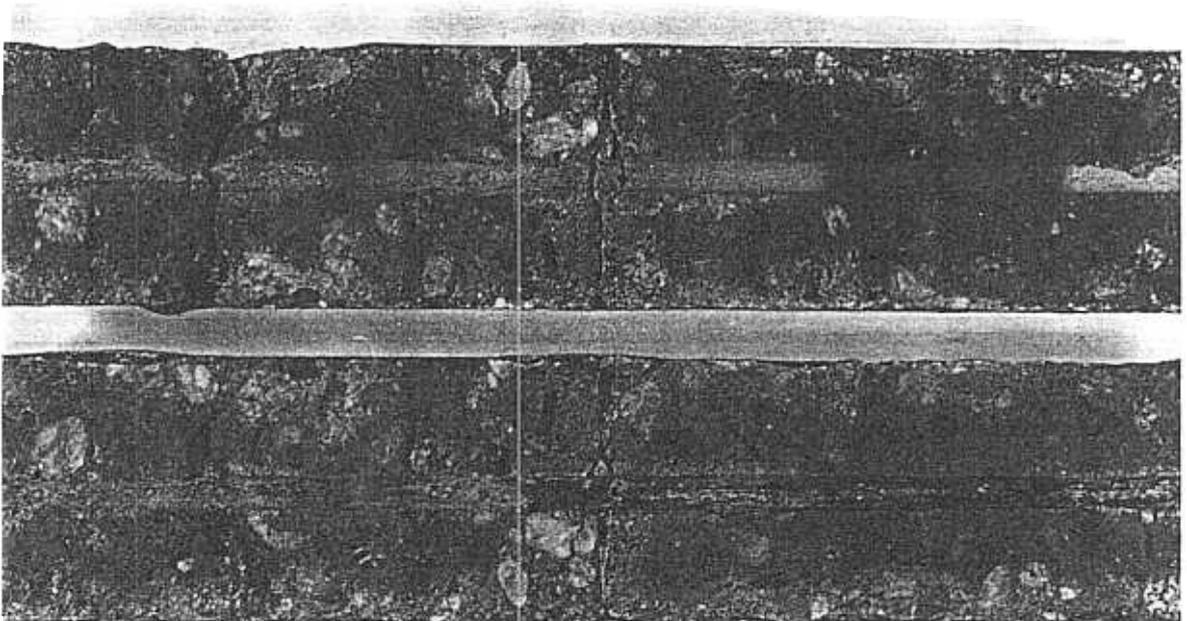
(Die Aufnahmen stammen überwiegend von Proben der 1. Ent-
nahme nach 8400 h, 1.E, wurden jedoch in einem Fall durch
eine der 2. Entnahme nach 15600 h, 2.E, ergänzt)



1.E

1

Probe 31 - feuerverzinkt (AF : w = 0,45 mm, RiB : w = 0,2 mm)
Medium: Meerwasser



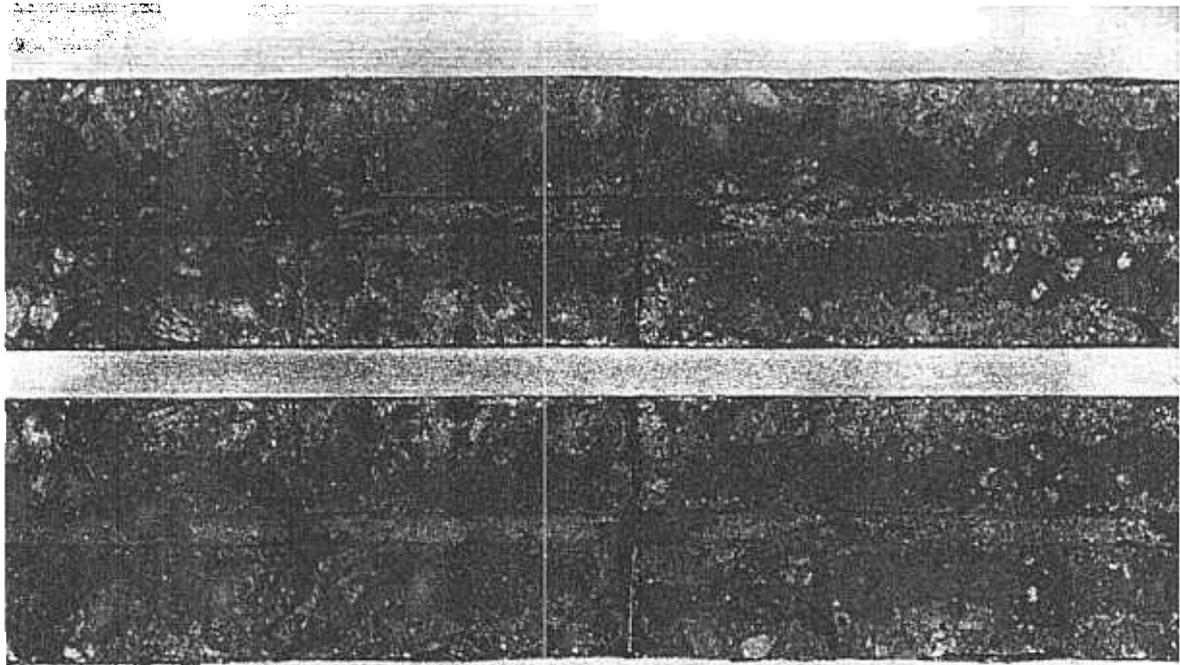
1.E

2

Probe 15 - feuerverzinkt (AF : w = 0,4 mm, RiB : w = 0,15 mm)
Medium: Wasser

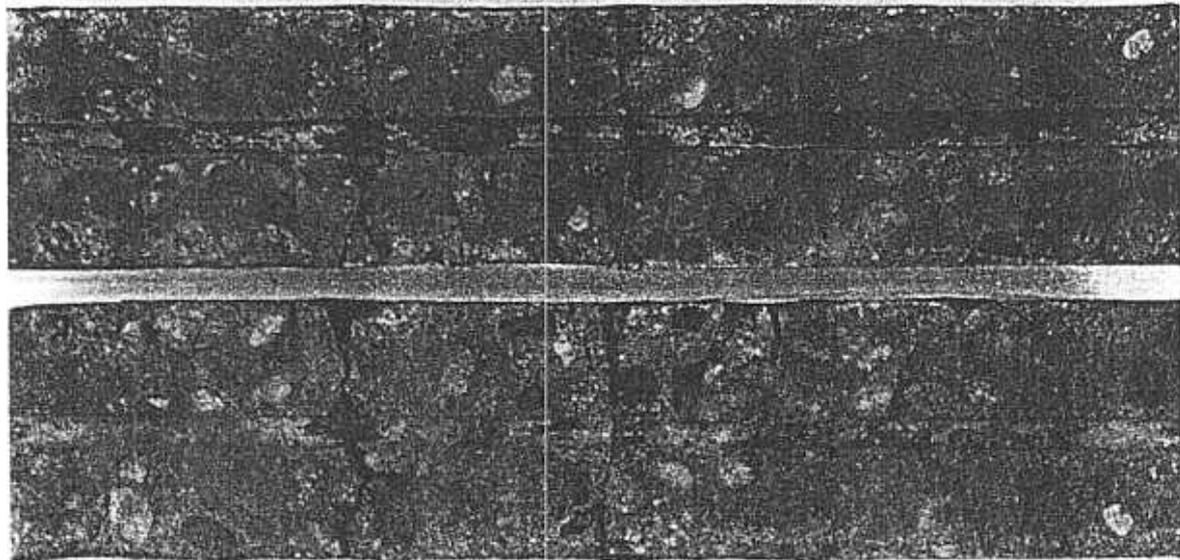
Proben künstlich karbonatisiert
St 1570/1770

Bild 28



3

Probe 29 - feuerverzinkt (AF : w = 0,25 mm, RiB : w = 0,10 mm)
Medium: Meerwasser



4

Probe 46 - feuerverzinkt (AF : w = 0,30 mm)
Medium: Wasser + SO₂

Proben künstlich karbonatisiert
St 1570/1770

Bild 28