

Chloridkorrosion von Stahl in gerissenem Beton

C Auslagerung gerissener, mit unverzinkten und feuerverzinkten Stählen bewehrten Stahlbetonbalken auf Helgoland

von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Gallus Rehm
Dr.-Ing. Ulf Nürnberger
Dipl.-Ing. Bernd Neubert

FORSCHUNGS- UND MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG
OTTO-GRAF-INSTITUT
STUTTGART

GW-Bericht Nr. 107

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einführung	91
Versuchswerkstoffe	91
3. Probekörper und deren Auslagerung	92
Ergebnisse	93
4.1 Augenscheinlicher Befund	93
4.2 Chloridgehalte des Betons	93
4.3 Karbonatisierung	93
4.4 Korrosionsverhalten der Stähle	93
4.4.1 Stahlkorrosion außerhalb von Biegerissen	94
4.4.2 Stahlkorrosion in Biegerissen	96
4.5 Korrosionsverhalten der Feuerverzinkung	97
5. Zusammenfassung	99
Literatur	101



1 EINFÜHRUNG

Aus den in Teil A beschriebenen Bauwerkserhebungen und Forschungsarbeiten sowie aus den in Teil B mitgeteilten Untersuchungsergebnissen geht hervor, daß in gerissenem Beton der den Betonriß kreuzende Bewehrungsstahl in besonderer Weise korrosionsgefährdet ist. Art und Umfang der Korrosion werden wesentlich durch das angreifende Medium und den Wasserhaushalt des Betons, die Betongüte und konstruktive Parameter wie Betondeckung und Rißbreite bestimmt. Besonders kritisch für den Stahl können jene Verhältnisse sein, wo chloridhaltige Wasser (Meerwasser, Wasser mit gelösten Streusalzen) im Wechsel mit Austrocknungsvorgängen auf die Bauwerksoberfläche einwirken.

Wegen dieser besonderen Korrosionsgefährdung des Betonstahls im Bereich von Betonrissen, insbesondere bei Einwirkung chloridhaltiger Wässer, empfehlen sich zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen in kritischen Anwendungsfällen. Eine mögliche Variante des zusätzlichen Korrosionsschutzes neben anderen (z.B. Betonbeschichtungen, Beschichtungen des Betonstahls, Inhibitoren im Beton, Kathodischer Korrosionsschutz /1/) stellt das Feuerverzinken der Betonstähle dar. Feuerverzinkte Stahloberflächen im Beton sind langfristig bei Anwesenheit von Chloriden deutlich beständiger als unverzinkte, da die Chloridionen in Form von schwerlöslichen basischen Zinkchloriden abgebunden werden /1,2/. Der Anwendung von Zinküberzügen im Betonbau sind jedoch auch Grenzen gesetzt, die dem Anwender bekannt sein sollten /3/:

Im Gegensatz zu unverzinktem Stahl, der durch die Alkalität des Porenwassers im Zementstein spontan passiviert wird, werden Zink und Zinküberzüge in grünem und jungem Beton zunächst rasch angegriffen. Es bilden sich aufgrund des amphoteren Charakters von Zink leicht lösliche Zinkate, was einen schnellen Abtrag der Zinkauflage bewirkt. Dünne Zinkauflagen um 10 µm können hierbei bereits aufgezehrt werden. Diese hohe Anfangskorrosionsrate verlangsamt sich mit der Zeit, da sich dichte Schutzschichten aus Calciumhydroxozinkaten bilden. In alkalischem, chloridfreiem Beton kommt die Korrosion dann nahezu zum Stillstand. Sie erhöht sich wiederum in karbonatisiertem Beton, jedoch ist die Zinkkorrosion dort noch sehr viel geringer als eine Stahlkorrosion. Gegenüber Chloriden sind Zinkauflagen nahezu beständig, wenn die Chloridgehalte etwa 1 % Chlorid, bezogen auf das Zementgewicht, nicht übersteigen. Bei Chloridgehalten oberhalb 1 % wird Zink bei steigenden Gehalten zunehmend abgetragen, weshalb in stark chloridhaltigem Beton die Feuerverzinkung nur einen temporären Schutz bietet. Dabei wird die zu erwartende Schutzdauer maßgeblich von der Dicke der Zinkauflage bestimmt.

Zum Mechanismus der Zinkkorrosion ist bekannt, daß als kathodische Gegenreaktion eine Sauerstoffreduktion und eine Wasserzersetzung stattfinden kann,

wobei beide Reaktionen gehemmt sind. Im aktiven Zustand der Korrosion (Zink in jungem oder stark chloridhaltigem Beton) überwiegt die Wasserzersetzung, d.h. Korrosion findet auch dann statt, wenn der Zutritt von Sauerstoff behindert ist.

Von einem kathodischen Schutz des Stahl durch Zink (z.B. im Bereich örtlicher Zinkabtragungen) ist nur im aktiven Zustand der Zinkkorrosion auszugehen. Mit Schutzschichten versehene Zinküberzüge sind zum kathodischen Schutz von Stahl nicht geeignet.

In einer früheren Arbeit der Verfasser zum Korrosionsverhalten feuerverzinkter Spannstähle in gerissenem Beton /4/ konnte festgestellt werden, daß dünne Zinkauflagen um 15 µm bei Zutritt von chloridhaltigem Wasser den Stahl im Betonriß nur temporär schützen. Bereits unter normalen atmosphärischen Verhältnissen im Riß wird diese geringe Zinkauflage verhältnismäßig rasch abgetragen. Seinerzeit konnten die verwendeten Spannstähle verzinkungsbedingt lediglich mit dieser geringen Zinkauflage versehen werden; heute sind infolge neuerer Entwicklungen bei Spannstählen auch höhere Auflagen um 50 µm möglich. Zwischenzeitlich werden auch Betonstähle werksmäßig feuerverzinkt, wobei diese nach dem Tauchverzinken, je nach Stahlart und Verzinkungsbedingungen, Auflagen von 100 bis 200 µm aufweisen /5/. Zinkauflagen >200 µm sind aus Gründen der dann stark reduzierten Haftung auf der Stahloberfläche und reduzierter Verbundwirkung Stahl - Beton nicht zugelassen /6/.

Zum Korrosionsverhalten dieser nach neuesten Gesichtspunkten feuerverzinkten Beton- und Spannstähle liegen noch keine umfassenden Erkenntnisse vor. Insbesondere, und das gilt für Feuerverzinkungen allgemein, kann nur wenig über das Verhalten in Betonrissen ausgesagt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher verstärkt dem Verhalten der genannten feuerverzinkten Bewehrungsstähle nachgegangen, wobei Fragen zur Chloridkorrosion im Vordergrund standen. Des weiteren wurden auch unverzinkte Betonstähle mit in die Untersuchungen einbezogen. Die Versuche wurden in Anlehnung an Verhältnisse bei Meeresbauten mit Meerwasserbeaufschlagung unter natürlichen Verhältnissen auf der Insel Helgoland durchgeführt. Aus den Resultaten wurden Hinweise zur notwendigen Betongüte, Betondeckung, zulässigen Rißbreite und zum besonderen Korrosionsschutz von Feuerverzinkungen bei Meerwasserzutritt zum Bauteil abgeleitet. Die Versuchsergebnisse sind in engem Zusammenhang mit den an gleichen Betonen im Labor erzielten /7/ zu sehen.

2 VERSUCHSWERKSTOFFE

Mit den in /7/, Tabelle 1, angegebenen Rezepturen für die Betone 3 und 7 wurden jeweils 3 Stahlbetonbalken hergestellt. Der Beton 3 mit dem ver-

hältnismäßig hohen Zementgehalt von 460 kg/m^3 und dem Wasserzementwert von 0,40 entsprach etwa einem B 55, der aus Vergleichsgründen gewählte Beton 7 mit 250 kg/m^3 Zement und einem w/z-Wert von 0,70 etwa einem B 35. Der Beton 3 kann als äußerst dicht und mit hohem Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden eingestuft werden, der Beton 7 weist demgegenüber keine allzu große Dichtigkeit auf.

Bei der Herstellung der Balken wurden Innenrüttler eingesetzt. Die Nachbehandlung unter feuchten Tüchern erstreckte sich über eine Woche.

Für die Biegezug- und -druckbewehrung der Balken wurden Rippenstähle BSt 450/500 RK, $d_s = 8 \text{ mm}$, in unverzinkter und feuerverzinkter Ausführung sowie feuerverzinkte Spannstähle (ungespannt) der Güte 1420/1570, $d_s = 7 \text{ mm}$, verwendet. Die unverzinkten Bügel wurden aus BSt 420/500 RK, $d_s = 6 \text{ mm}$, gefertigt.

Angaben zur Dicke der Feuerverzinkung sind Abb. 1 zu entnehmen. Hier sind die aus metallographischen Untersuchungen ermittelten Häufigkeitsverteilungen für die Zinkauflagen dargestellt. Der im Durchlaufverfahren kontinuierlich verzinkte Spannstahl weist im arithmetischen Mittel 400 g Zink/m^2 beziehungsweise eine Schichtdicke von $56 \text{ }\mu\text{m}$ auf. Der Betonstahl wurde tauchverzinkt; seine Auflage entspricht im arithmetischen Mittel 1223 g/m^2 beziehungsweise $171 \text{ }\mu\text{m}$. Der Aufbau der Zinküberzüge geht aus Abb. 2 hervor. Die Zinkauflage des Betonstahls besteht etwa je hälftig aus Eisen-Zink-Legierung (Hartzink) und Reinzink, die des feuerverzinkten Spannstahls etwa zu zwei Dritteln aus Hartzink und zu einem Drittel aus Reinzink.

3 PROBEKÖRPER UND DEREN AUSLAGERUNG

Die Abmessungen der Balken sowie die Anordnung der Bewehrung sind den Abb. 3 und 4 zu entnehmen. Die Betondeckung der Stäbe in den Bewehrungslagen 1 und 4 beziehungsweise 2 und 3 beträgt 2,5 beziehungsweise 5,0 cm und jene der Bügel etwa 2 cm. Bei einigen der 12 Bügel wurde die Betondeckung in der Zugzone zu 1,5 cm eingestellt.

Im Anschluß an die Nachbehandlung des Betons und eine ca. 4wöchige Nacherhärtung bei Raumtemperatur und ca. 70 % relativer Luftfeuchte wurden die Balken paarweise als Biegebalken zusammengespannt (Abb. 5), und zwar je ein Balken aus Beton 3 und Beton 7. Dabei bildeten sich Biege- und Schubrisse. Insbesondere die Balken aus Beton 7 wiesen neben Schrägrissen mit normalen Rißbreiten auch einige aufgeweitete Risse mit Breiten im Steg von 0,4 mm und mehr auf. Als Ursache für die erhöhten Stegrißbreiten können die aus dem Spannen herrührenden verhältnismäßig hohen Querkkräfte angenommen werden. Da aus versuchstechnischen Gründen

auch in der Druckzone Bewehrungsstäbe angeordnet waren, verliefen die Schrägrisse abschnittsweise entlang dieser Stäbe.

Die nach dem Zusammenspannen entstandenen Biegerisse waren an der Betonoberfläche zwischen $w \approx 0,1$ bis 0,5 mm breit. Abb. 6 zeigt als Abwicklung von Zugseite und Stegflächen die Rißbilder der drei Balkenpaare an den Auslagerungsorten 1, 2 und 3. Dabei und im folgenden wurden die Balken nach Auslagerungsort und Betonsorte bezeichnet: z.B. Balken 1.7 (Auslagerungsort 1, Beton 7) oder 2.3 (Auslagerungsort 2, Beton 3). Den Rißbildern sind die Rißbreiten zu Versuchsbeginn und Art und Lage der Bewehrungsstäbe zu entnehmen. Abb. 7 zeigt am Beispiel des Balkens 2.7 die Durchsetzung eines Querschnitts mit Biege- und Schubrisen. Dieser ungünstige Rißzustand mit Schrägrissen entlang aller 4 Bewehrungslagen wurde vor allem im Querkraftbereich nahe der Balkenenden festgestellt (in Abb. 7 wurden die Risse nachgezeichnet, weshalb diese breiter als in Wirklichkeit erscheinen)

Für die Auslagerung der drei Balkenpaare wurde die Insel Helgoland ausgewählt (siehe Abb. 1 und 2 in Teil B). Hauptparameter war dabei eine unterschiedliche Beaufschlagung mit Meerwasser. Balkenpaar 1 (Abb. 8) wurde im Vorhafenbereich auf einem als Wellenbrecher dienenden Betonwürfel (Kantenlänge $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}$) so angeordnet, daß beide Balken auf etwa 0,5 m Länge im oberen Bereich der Wechseltauchzone (WTZ) zu liegen kamen, während sich die anderen Hälften ca. 0 bis 0,5 m oberhalb des mittleren Hochwassers (mHW) befanden. Die unteren Balkenhälften von Balkenpaar 1 kamen somit im Tidewechsel zweimal pro Tag für mehrere Stunden mit Meerwasser in Kontakt. Die oberen Balkenhälften wurden demgegenüber regelmäßig stark mit Spritzwasser benetzt und gelegentlich, insbesondere bei erhöhten Windstärken, auch überflutet (Abb. 8.2).

Die Balkenpaare 2 und 3 wurden vor der neuen Westmole auf Resten der alten Westmole so aufgestellt, daß je nach Windstärke eine mehr oder weniger starke Benetzung mit Spritzwasser (SW) erfolgte. Balkenpaar 2 befand sich 18 m und Balkenpaar 3 8 m von der Molenkante (westliche Seeseite) entfernt. Zwar wurde Balkenpaar 3 sicherlich im Mittel häufiger mit Meerwasser beaufschlagt als Balkenpaar 2, für beide Balkenpaare trifft jedoch eine sehr unregelmäßige Berührung mit Meerwasser zu. Kurzen Phasen mit intensiver Meerwasserbeanspruchung, z.B. bei Sturm (Abb. 9) oder nur leichter Besprühung bei mittlerem bis starkem Wind folgten langzeitige Perioden (Tage bis Wochen) der Austrocknung (vor allem bei Balkenpaar 2).

Die Balkenpaare wurden insgesamt 2 Jahre auf Helgoland belassen und dann eingeholt. Sie wurden im Labor sorgfältig zerlegt und im Hinblick auf die korrosionstechnisch wichtigsten Zusammenhänge untersucht.

ERGEBNISSE

4.1 Augenscheinlicher Befund

Nach 2 Jahren wurden keinerlei korrosionsbedingte Betonabplatzungen und auch kein merklicher Austritt von Rost durch die Betonrisse festgestellt. Rostverfärbungen auf den Betonoberflächen stammten von der verrosteten Spannvorrichtung. Auffallend war jedoch der Bewuchs der Balken, der bereits nach wenigen Wochen Auslagerung einsetzte. Dieser Bewuchs mit Algen und/oder Flechten konzentrierte sich vielfach gerade auf die Bereiche der Betonrisse. Er war am stärksten in der Wechsellagerungszone von Balkenpaar 1 (Abb. 8.1 und 10), geringer und von anderer Art bei Balkenpaar 3 (Abb. 12) und kaum vorhanden bei Balkenpaar 2 (Abb. 11). Da die Intensität des Bewuchses in direkter Beziehung zur Intensität beziehungsweise Häufigkeit einer Benetzung von Beton mit Meerwasser steht, kann auch auf die Häufigkeit der Meerwasserbeaufschlagung rückgeschlossen werden: Die Intensität nimmt offenbar in der Reihenfolge Balkenpaar 2 - Balkenpaar 1 (Bereich 0 - 0,5 m > m HW) - Balkenpaar 3 - Balkenpaar 1 (Bereich WTZ) zu.

4.2 Chloridgehalte des Betons

Abb. 13 zeigt die in ungerissenen Teilbereichen der Balken erstellten Chloridprofile über die Betontiefe. Der dichtere Beton 3 setzt dem Eindringen von Chloriden einen erheblich höheren Widerstand entgegen als der Beton 7. Die hier für beide Betone festgestellten Gehalte liegen in vergleichbarer Größenordnung wie jene nach labormässiger Meerwasserbehandlung /7/.

Bezüglich des Einflusses der Art der Meerwasserbeaufschlagung gilt, daß die Chloridgehalte in der Reihenfolge Balkenpaar 1 - 3 - 2 zunehmen. Demnach entscheidet nicht die Häufigkeit beziehungsweise Dauer einer Benetzung über die Chlorideindringung, sondern die Intensität einer Austrocknung vor der Benetzung. Nur ein nach Durchfeuchtung gut ausgetrockneter Beton kann nachfolgend bei erneuter Meerwasserbenetzung durch kapillares Saugen wiederum hohe Gehalte an Chloriden aufnehmen. Die hier festgestellten Zusammenhänge stimmen mit jenen in /7/ überein, wonach bei Wechselbeanspruchung mit Meerwasser erheblich mehr Chloride vom Beton aufgenommen werden als beim Dauertauchen.

4.3 Karbonatisierung

In ungerissenen Bereichen des Betons 3 ($w/z = 0,4$) war eine Karbonatisierung nicht wahrnehmbar. Bei dem Beton 7 betrug die Karbonatisierungstiefe nur 0 bis 2 mm. Dies deutet darauf hin, daß die Feuchtigkeit der Betone im vorliegenden Fall eher noch höher war als bei gewöhnlichen Bauteilen im Freien

Die Karbonatisierungstiefe der Rißufer der Betonbiegerisse ist in Abb. 14 in Abhängigkeit von der Rißbreite und der Art der Auslagerung dargestellt. Dabei werden analog den Ergebnissen in Teil B zwei Karbonatisierungstiefen unterschieden. Bis zur Tiefe der Zeichen x,+ färbte sich der Beton nach Besprühen mit Phenolphthalein nicht. Zwischen den Zeichen x,+ und o,● lag eine rosagefärbte Zone, die nach kurzer Lagerung der Proben wieder verschwand. Im vorliegenden Fall wurde eine Mittelwertskurve durch die sich aus farbloser plus rosagefärbter Zone zusammensetzende Karbonatisierungstiefe gezogen.

Diese Karbonatisierungstiefe im Riß ist für die höherwertigere Betongüte Beton 3 etwas höher als für den poröseren Beton 7, was auch von /8/ gefunden und von diesem gedeutet wurde. Zwischen den Auslagerungsstellen 3, 2 und 1 (0 bis 0,5 m über mHW) wurden keine wesentlichen Unterschiede festgestellt; in der Wechsellagerungszone ist die Karbonatisierungstiefe insgesamt niedriger als an den vorgenannten Orten. Für die Rißbreiten $w = 0,1$ beziehungsweise 0,3 mm wurden folgende Mittelwerte der Karbonatisierungstiefe in mm festgestellt:

Karbonatisierungstiefe in mm				
Beton	WTZ		0 - 0,5 m > mHW, SW	
	w = 0,1	w = 0,3	w = 0,1	w = 0,3
3	9,5	15,0	11,2	17,3
7	7,4	11,4	9,5	16,0

Alle Längsstäbe lagen somit zum Zeitpunkt der Entnahme im Betonriß noch in alkalischem Beton.

4.4 Korrosionsverhalten der Stähle

Die Balken wurden in jeweils 8 bis 9 Abschnitte von etwa 10 cm Länge zerlegt, wobei jeder Abschnitt mindestens einen Biegerißeinhaltete. Aus diesen Betonsegmenten wurden Abschnitte der Längsstäbe und Bügel entnommen und in Abhängigkeit von

- der Betongüte,
- der Betondeckung,
- der Stahlart beziehungsweise Oberfläche (unverzinkt, verzinkt),
- dem Rißverhalten des Betons (Lage des Abschnittes im ungerissenen Beton oder einen Biegeriße - bzw. Schrägriß kreuzend) und
- der Art der Chloridbeaufschlagung beziehungsweise Balkenlage

zunächst im Hinblick auf folgende, eine Korrosion der Bewehrung kennzeichnende Größen untersucht:

- korrodierte Oberfläche KO (%)
- mittlerer Stahlabtrag der korrodierten Bereiche SA (μm)¹⁾
- max. Narbentiefe außerhalb von Biegerissen mNT (μm)
- Narbentiefe in Biegerissen NT (μm).

1) Hier wurde der pro Abschnitt festgestellte mittlere Abtrag auf den Anteil der korrodierten Oberfläche umgerechnet.

Die Größen KO, SA, mNT wurden herangezogen, um den Korrosionszustand der Drahtabschnitte im ungerissenen Beton beziehungsweise bei Lage entlang von Schubrisen zu charakterisieren. Mit NT wurde der örtliche Korrosionsangriff im Biegeriß gekennzeichnet.

Stahlkorrosion wurde erwartungsgemäß bei den unverzinkten Betonstählen, aber auch bei den feuerverzinkten Spannstählen, nicht jedoch bei den feuerverzinkten Betonstählen festgestellt.

4.4.1 Stahlkorrosion außerhalb von Biegerissen

Bei den entnommenen Stahlabschnitten wurde zunächst unterschieden, ob diese im Bereich von Schubrisen gelegen hatten oder nicht. Es wurde nämlich bei der Entnahme unmittelbar festgestellt, daß vor allem Stahlabschnitte aus Bereichen mit Schubrisen nahezu unabhängig von der Betondeckung besonders starke Rosterscheinungen aufwiesen. Die Abb. 15 und 16 verdeutlichen dies am Beispiel unverzinkter Betonstähle aus den Balken 1.7 und 2.7 (Beton 7 an den Auslagerungsorten 1 und 2). In den Bildern ist die prozentuale Verrostung der Oberfläche von entnommenen 10 cm Stahlabschnitten in Abhängigkeit von der Lage im Betonbalken aufgetragen. Es wird weiterhin unterschieden nach der Ober- und Unterseite der Stäbe und der Lage in schubrißfreien Bereichen beziehungsweise im Schubriß. Man erkennt, daß

- die Stähle entlang von Schubrisen im Mittel stärker korrodieren als außerhalb,
- die Korrosion mit zunehmender Betondeckung abnimmt,
- in schubrißfreien Bereichen die der Betonoberfläche zugewandte Stabseite in der Regel stärker korrodiert ist als die abgewandte Seite,
- die Korrosion über die Balkenlänge starken Streuungen unterworfen ist.

Abb. 17 verdeutlicht an Einzelbeispielen die Korrosion unverzinkter Betonstähle und feuerverzinkter Spannstähle aus Beton 7 vor (oben) und nach (unten) einem Abbeizen der Korrosionsprodukte.

Der Stahlangriff ist vorwiegend muldenförmig. Auffallend ist, daß auch bei den feuerverzinkten Stählen in Bereichen mit Zinkabtrag der Stahluntergrund bereits merklich angegriffen ist. Ein sog. kathodischer Schutz, bei dem der freiliegende Stahl durch das in benachbarten Bereichen noch vorhandene Zink geschützt wird, kommt im vorliegenden Fall offenbar nicht zum Tragen.

Ein vergleichbares Korrosionsverhalten wie in Schubrisen (Abb. 17) wurde auch im ungerissenen Beton bei niedrigen Betondeckungen und gleichzeitig geringer Betongüte (Beton 7) festgestellt. Die Abb. 18 und 19 zeigen hierzu korrodierte Ober-

flächen bei stärkerer Vergrößerung. Aus Abb. 19 wird auch die bereits angesprochene stärkere Korrosion der der Betonoberfläche zugewandten Stabseite (Oberseite) im Vergleich zur abgewandten Stabseite (Unterseite) deutlich.

Bei höheren Betondeckungen und/oder höherwertigerem Beton (Beton 3) war die Anrostung bezüglich Ausdehnung und Intensität sehr viel geringer.

In Abb. 20 erfolgt eine zusammenfassende Darstellung zur Stahlkorrosion unverzinkter Betonstähle und feuerverzinkter Spannstähle.¹⁾ Die Angaben sind Mittelwerte der Ergebnisse von 8 bis 9 Abschnitten von ca. 10 cm Länge. Parameter sind die Balkenlage, die Betongüte und die Betondeckung. Des Weiteren wird zwischen schubrißfreien Bereichen und der Lage in Schubrisen unterschieden. Bezüglich der Betondeckung wurden die 1. und 4. Bewehrungslage zur Betondeckung 2,5 cm und die 2. und 3. Bewehrungslage zur Betondeckung 5,0 cm zusammengefaßt. Die zusätzliche Betondeckung 1,5 cm bei den unverzinkten Betonstählen bezieht sich auf eine Reihe ausgewerteter Bügelabschnitte. Folgende wesentliche Ergebnisse wurden erzielt (ohne Berücksichtigung von Stababschnitten in Schubrisen):

Einfluß der Auslagerungsbedingungen

Alle Versuche an unverzinktem Betonstahl zeigen im Mittel, daß die Korrosion um so mehr abnimmt, je häufiger der Beton mit Meerwasser beaufschlagt wurde, d.h., je feuchter er war. In den folgenden beiden Tabellen werden das Balkenpaar 1 in der Wechsellastzone (WTZ) und das Balkenpaar 2 mit gelegentlicher Spritzwasserbeaufschlagung (SW) miteinander verglichen. Jeweils für die Betondeckungen $c = 1,5$ (Bügel) und 2,5 cm (Stabstahl) und die beiden Betone B 3 und B 7 sind die Absolutwerte und die auf den Faktor 1 bezogenen Verhältniswerte für die korrodierte Oberfläche KO (in %), den mittleren Stahlabtrag der korrodierten Bereiche SA (in μm) und die maximale Narbentiefe außerhalb von Biegerissen mNT (in mm) angegeben.

Korrosionseffekte außerhalb von Rissen in Abhängigkeit von der Befeuchtung				
Betondeckung $c = 1,5$ cm	Beton 3		Beton 7	
	WTZ	SW	WTZ	SW
KO absolut (%)	18	28	40	98
bezogen	1	1,6	1	2,4
SA absolut (μm)	58	130	130	380
bezogen	1	2,2	1	2,9
mNT absolut (mm)	0,34	0,58	0,51	0,88
bezogen	1	1,7	1	1,7

1) Alle Einzelergebnisse können bei Bedarf bei den Autoren eingesehen werden.

Korrosionseffekte außerhalb von Rissen in Abhängigkeit von der Befeuchtung				
Betondeckung c = 2,5 cm	Beton 3		Beton 7	
	WTZ	SW	WTZ	SW
KO	absolut (%)	2	6	39,5
	bezogen	1	3	20
SA	absolut (µm)	10	50	150
	bezogen	1	5	15
mNT	absolut (mm)	0,08	0,15	0,35
	bezogen	1	1,9	7

Demnach ist der Einfluß der Auslagerung bei dem poröseren Beton 7 und der höheren Betondeckung von 2,5 cm ausgeprägter als bei dem dichteren Beton 3 und der niedrigeren Betondeckung von 1,5 cm. Im Mittel aller Versuche ist die Korrosion im rissefreien Bereich in der Spritzwasserzone um folgende Faktoren stärker als in der Wechsellagerungszone

KO (%) : ca. 7
SA (µm) : ca. 6
mNT (mm) : ca. 3

Einfluß der Betongüte

Der Korrosionsangriff des unverzinkten Betonstahls ist in dem B 55 (Beton 3) erheblich geringer als in dem B 35 (Beton 7). Im Mittel aller Versuche wurden folgende Verhältnisswerte der Korrosion zwischen beiden Betongüten gefunden, wenn man zusätzlich noch zwischen der Betondeckung 1,5 und 2,5 cm unterscheidet:

Korrosionseffekte außerhalb von Rissen in Abhängigkeit von der Betongüte				
Betondeckung	c = 1,5 cm		c = 2,5 cm	
	B 3	B 7	B 3	B 7
KO	absolut (%)	23	134	6
	bezogen	1	5,8	1
SA	absolut (µm)	100	245	36
	bezogen	1	2,5	1
mNT	absolut (mm)	0,46	0,72	0,13
	bezogen	1	1,6	1

Hiernach ist der positive Einfluß eines höherwertigen Betons praktisch unabhängig von der Betondeckung.

Einfluß der Betondeckung

Bei abnehmender Betondeckung der unverzinkten Betonstähle steigt die Korrosion progressiv an. Im Mittel aller beim unverzinkten Betonstahl erzielten Ergebnisse wurden folgende Verhältnisswerte der Korrosion zwischen den verschiedenen Betondeckungen gefunden:

Korrosionseffekte außerhalb von Rissen in Abhängigkeit von der Betondeckung			
Betondeckung c (cm)	1,5	2,5	5,0
	alle Balkenlagen und Betongüten		
KO	absolut (%)	79	19
	bezogen	79	19
SA	absolut (µm)	173	65
	bezogen	19	7,2
mNT	absolut (mm)	0,59	0,20
	bezogen	20	6,7

Diese Verhältnisse sind nahezu unabhängig von der Betongüte (s.o.).

Einfluß der Feuerverzinkung bei Spannstählen

Bei den feuerverzinkten Spannstählen mit Zinkdicken von 56 µm ist die Stahlkorrosion geringer als bei den unverzinkten Betonstählen, jedoch erwies sich dieser zusätzliche Korrosionsschutz im vorliegenden Fall als nicht ausreichend. Im Mittel aller Versuche wurden für Betondeckungen von 2,5 cm folgende Verhältnisswerte der Korrosion zwischen unverzinktem Betonstahl und feuerverzinktem Spannstahl gefunden, wenn man noch zusätzlich zwischen dem Beton 3 und Beton 7 unterscheidet:

Korrosionseffekte außerhalb von Rissen in Abhängigkeit vom besonderen Korrosionsschutz				
Beton	Beton 3		Beton 7	
	BSt	v.Spst.	BSt	v.Spst.
KO	absolut (%)	6	1	32
	bezogen	6	1	2,1
SA	absolut (µm)	36	14	93
	bezogen	2,6	1	3,0
mNT	absolut (mm)	0,13	0,04	0,26
	bezogen	3,3	1	1,6

BSt = unverzinkter Betonstahl

v.Spst = feuerverzinkter Spannstahl

Der Zinkabtrag beziehungsweise Stahlangriff bei dem feuerverzinkten Stahl ist, verglichen mit der Korrosion bei unverzinkten Betonstählen, in dem dichteren Beton 3 erheblich geringer als in dem porösen Beton 7. Im letzteren Fall weist die 56 µm starke Feuerverzinkung keine hohe Schutzwirkung auf.

Einfluß von Schubrisen bei dem B 35

In Schubrisen des Betoninnern, die vor allem bei Beton 7 (B 35) eine größere Breite aufwiesen, korrodierten die unverzinkten Betonstähle, unabhängig von der Betondeckung (2,5 und 5,0 cm), vergleichbar stark wie im Fall des ungerissenen Betons mit Betondeckungen von 2,5 cm:

Korrosionseffekte von Stahlabschnitten in Abhängigkeit von der Zuordnung zu Schubrisen					
Korrosionsschutz Schubriß ja ¹⁾ /nein ²⁾		unverzinkt		verz. Spannstahl	
		ja	nein	ja	nein
KO	absolut (%)	29	32	20	15
	bezogen	0,9	1	1,3	1
SA	absolut (µm)	101	93	57	31
	bezogen	1,1	1	1,8	1
mNT	absolut (mm)	0,26	0,26	0,18	0,16
	bezogen	1	1	1,1	1

1) c = 2,5 und 5,0 cm
2) c = 2,5 cm

Feuerverzinkte Spannstähle korrodieren in Schubrisen eher noch stärker als im ungerissenen Beton und Betondeckungen von 2,5 cm.

4.4.2 Stahlkorrosion in Biegerissen

Im folgenden Abschnitt wird die Korrosion unverzinkter Betonstähle und feuerverzinkter Spannstähle behandelt. Im letzteren Fall war der Korrosionsschutz nicht ausreichend, weshalb der Stahluntergrund korrodierte. Auf die Zinkkorrosion feuerverzinkter Betonstähle, bei denen eine Abzehrung der Zinkauflage bis zum Stahluntergrund nicht eintrat, wird in Abschnitt 4.5 eingegangen.

Die Biegerisse wurden von der Biegezugbewehrung aus unverzinktem Betonstahl, feuerverzinktem Betonstahl und feuerverzinktem Spannstahl gekreuzt. Die Betondeckung dieser Stähle betrug 2,5 und 5,0 cm. Daneben lagen einzelne unverzinkte Bügel mit 1,5 und 2,5 cm Betondeckung abschnittsweise als Längsstäbe in den Rissen. Im folgenden werden die Korrosionseffekte der Bügelabschnitte und der Zugbewehrung getrennt behandelt.

Bügelabschnitte

Entlang der Bügelabschnitte war die Breite der Biegerisse nicht einheitlich. Da zudem nur eine begrenzte Probenzahl zur Verfügung stand, konnte die Korrosion nicht in Abhängigkeit von der Rißbreite ausgewertet werden. In der Folge wird daher die Korrosion von Bügelabschnitten entlang von Biegerissen mit Rißbreiten von $w = 0,1$ bis $0,35$ gemittelt.

Es wurde festgestellt, daß sich die Korrosion von Bügeln in Rissen nicht wesentlich von der Bügelkorrosion außerhalb von Biegerissen unterschied. Die folgende Zusammenstellung zeigt gemittelte Werte für den porösen Beton 7 in der Wechsellastzone (Balkenpaar 1) und nach gelegentlicher Spritzwasserbeaufschlagung (Balkenpaar 2). In der Wechsellastzone sind die Korrosionsgrößen praktisch identisch. In der Spritzwasserzone ist die Korro-

sion entlang der Risse nur geringfügig stärker als im rissefreien Bereich.

Korrosionseffekte von Bügelabschnitten mit c = 1,5 bis 2,0 cm in Abhängigkeit von einer Zuordnung zu Biegerissen in Beton B 7					
Lage		WTZ		SW	
Biegeriß ja/nein		ja	nein	ja	nein
KO	absolut (%)	17	15	72	61
	bezogen	1,1	1	1,2	1
SA	absolut (µm)	49	53	276	228
	bezogen	0,9	1	1,2	1
mNT	absolut (mm)	0,21	0,21	0,70	0,55
	bezogen	1,0	1	1,3	1

Biegezugbewehrung

Auch bei den unverzinkten Betonstählen und feuerverzinkten Spannstählen mit geringer Betondeckung ($c = 2,5$ cm) unterschied sich die Stahlkorrosion in Rissen (einschließlich der verbundgestörten angrenzenden Bereiche) nicht wesentlich von jener zwischen den Rissen. In den Abbildungen 21 und 22 wird dieser Sachverhalt verdeutlicht. Dort verweisen die Pfeile auf die Lage des Biegerisses im Beton, und die zugeordnete Tabelle kennzeichnet die Lage des Stahls im Balken, die Rißbreite sowie die Narbentiefe im Riß und die max. Narbentiefe zwischen den Biegerissen.

Dennoch sind die Rißbereiche bevorzugte Stellen von Korrosionsnarben (Abb. 21 bis 29). Deutlich wird dies in erster Linie bei den feuerverzinkten Drähten (Abb. 22, links) und/oder erhöhten Betondeckungen (Abb. 21, rechts und Abb. 22, rechts) sowie der höherwertigeren Betongüte (Abb. 25), bei welcher der Stahl zwischen den Rissen im besonderen Maße korrosionsgeschützt ist.

Bei den feuerverzinkten Spannstählen - wie auch den feuerverzinkten Betonstählen (Abschnitt 4.5) - korrodiert die Zinkauflage in dem chloridhaltigen Elektrolyten der Biegerisse offenbar stärker als im angrenzenden chloridhaltigen Beton. Neben Abb. 22 wird dies auch aus den Abb. 27 und 29 deutlich. Abb. 29 zeigt auf, daß das Zink im BiegeriB örtlich bis zum Stahluntergrund abgetragen wird (das Verteilungsbild für Eisen bestätigt den lokalen, vollständigen Abtrag). Aus Abb. 27 kann, wie auch aus Abb. 22, entnommen werden, daß im Bereich dieser lokalen Zinkabtragungen sofort örtliche Stahlkorrosion einsetzt. Offensichtlich können sich im Betonriß bei ungleichmäßiger oder mangelhafter Belüftung keine stabilen und somit schützenden Deckschichten ausbilden. Zudem übt die Zinkauflage zwischen den Betonrissen keinen ausreichenden kathodischen Schutz auf die zinkfreien Stahlbereiche im BiegeriB aus.

In der Abb. 30 ist die Narbentiefe im Biegeriß in Abhängigkeit von der Rißbreite aufgetragen. Dabei wird unterschieden nach der Oberfläche (unverzinkter Betonstahl, feuerverzinkter Spannstahl), nach der Betondeckung und in den einzelnen Teilbildern auch nach dem Auslagerungsort und der Betongüte. In Abb. 30 werden allerdings nur Ergebnisse von jenen Auslagerungsorten dargestellt, die nicht ständig mit Meerwasser in Berührung kamen. Dies sind der Bereich 0 bis 0,5 m > mHW des Balkenpaares 1 und die Spritzwasserzone (Balkenpaare 2 und 3). Jener Teil von Balkenpaar 1, welcher in der Wechsellagerungszone zu liegen kam, zeigte unabhängig von der Rißbreite ($w \approx 0,1$ bis $0,4$ mm), wie auch die Stähle in den ungerissenen Zwischenbereichen, nahezu keine Korrosion. In Bild 30 sind zum Vergleich auch die max. Narbentiefen von 10 cm Stahlabschnitten neben den Biegerissen eingetragen.

Aus den Teilbildern sind folgende wesentlichen Ergebnisse zu entnehmen:

- a) Die Korrosion (Narbentiefe) in Biegerissen ist starken Streuungen unterworfen.
- b) Bei den Betondeckungen von $c = 2,5$ cm (Abb. 30.1 und 30.3) sind die max. Narbentiefen von angrenzenden 10 cm Abschnitten von vergleichbarer Größenordnung wie die Narbentiefen in Biegerissen. Dennoch sind die Biegerisse bevorzugte Stellen von chloridbedingten Korrosionsangriffen, da allein aus statistischen Gesichtspunkten ein nur kurzer Stahlabschnitt im Biegeriß einem weitaus größeren Abschnitt zwischen den Biegerissen gegenübersteht.
- c) Im Mittel der Versuche ist eine Zunahme der Narbentiefe bei ansteigender Rißbreite vorhanden.
- d) Bei Betondeckungen von $c = 5,0$ cm (Abb. 30.2 und 30.4) sind die Narben im Biegeriß tiefer als in den angrenzenden ungerissenen Bereichen (vor allem ab Rißbreiten von $w \approx 0,25$ mm).
- e) Es besteht kein systematischer Einfluß des Auslagerungsortes (Balkenpaar 1 außerhalb der WTZ, 2 bzw. 3) auf die Intensität der Korrosion im Biegeriß.
- f) Im Mittel aller Versuche sind, gleiche Rißbreiten vorausgesetzt, die Narbentiefen bei Stählen in dem Beton 7 (B 35) etwa um den Faktor 2 tiefer als in dem Beton 3 (B 35).
- g) Es besteht ein starker Einfluß der Betondeckung: Bei einer Betondeckung von $c = 2,5$ cm tritt merkliche Korrosion (das sind Narbentiefen etwa $> 0,15$ mm, siehe Teil B des Berichtes) bereits bei Rißbreiten um $w = 0,1$ mm auf. Bei Betondeckungen von $c = 5,0$ cm wird eine Narbentiefe von $0,15$ mm erst ab Rißbreiten von etwa $0,3$ bis $0,4$ mm an der Betonoberfläche

überschritten. Bei 5 cm Betondeckung ist nämlich die wirksame Rißbreite am Stahl sehr viel geringer als z.B. bei $2,5$ cm Betondeckung, da Biegerisse bekanntlich zum Betonieren hin schmaler werden.

Die unter f) und g) genannten Zusammenhänge sprechen für eine Korrosion von Stahl im Betonriß durch Elementbildung (siehe Teil A, Abschnitt 2).

- h) Bei Betondeckungen von $c = 2,5$ cm ist die Narbentiefe für vergleichbare Rißbreiten bei den unverzinkten Betonstählen etwa um den Faktor 2 größer als bei den feuerverzinkten Spannstählen. Bei Betondeckungen von $c = 5,0$ cm sind die Angriffstiefen bei beiden Stahlorten vergleichbar. Dies unterstreicht den bereits angesprochenen Sachverhalt, daß die hier vorliegende Feuerverzinkung für einen dauerhaften Korrosionsschutz in Biegerissen nicht ausreicht

4.5 Korrosionsverhalten der Feuerverzinkung

Es wurde bereits vermerkt, daß feuerverzinkte Betonstähle mit Zinkauflagen von im Mittel $171 \mu\text{m}$ in keinem Fall eine erkennbare Korrosion des Stahluntergrundes aufwiesen. Zwecks Beurteilung der erhöhten Zinkauflage bei den Betonstählen waren grundlegende Untersuchungen zum Mechanismus und zur Intensität des Zinkabtrages erforderlich. Wegen des stellenweise völligen Zinkabtrages war dies bei den feuerverzinkten Spannstählen nicht möglich.

Bei den feuerverzinkten Betonstählen im chloridhaltigen Beton ließen sich zwei voneinander unterschiedliche Arten der Korrosion feststellen:

- einen über die gesamte Oberfläche vorhandenen, überwiegend gleichmäßigen, etwa $10 \mu\text{m}$ (für $c = 2,5$ cm) bzw. etwa $7,5 \mu\text{m}$ dicken (für $c = 5,0$ cm) Zinkabtrag;
- einen örtlichen, jedoch sehr ungleichmäßigen Abtrag, z.T. über die gesamte Zinkschichtdicke reichend (Lochfraß).

Die erstere Form des Abtrages ist in den Abb. 31 und 32 dargestellt. In Abb. 31 wird mittels energiedispersiver Röntgenanalyse und der Verteilung für Calcium nachgewiesen, daß der gleichmäßige Saum in hohem Maße Calcium enthält. In der Abb. 32 sind die Ergebnisse mehrerer Punktanalysen dargestellt, wonach diese Reaktionsschicht neben Zink und Calcium auch Silicium, jedoch kein Chlor enthält. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelt es sich hierbei um Korrosionsprodukte des Zinks infolge Alkalität des jungen Betons. Eine Reaktion, die frühzeitig stattfindet, noch bevor die Chloridfront die Zinkoberfläche erreicht. Es sei daran erinnert, daß die Deckschichten des Zinks in al-kalischem Beton Calciumhydroxozinkat $\text{Ca}[\text{Zn}(\text{OH})_3]_2$.

$2H_2O$ enthalten. Ohne Berücksichtigung von Sauerstoff und Wasserstoff besteht diese Verbindung aus 23 Mass.% Ca und 77 % Zn. Dies unterstreicht die Annahme, daß es sich bei dem in den Abb. 31 und 32 dargestellten Korrosionssaum entlang der Zinkoberfläche um den chloridunabhängigen Zinkabtrag handelt, der vor allem in dem noch jungen Beton stattfindet.

Die zweite Form des Zinkabtrages wird in den Abb. 33 bis 36 behandelt. Bild 33 zeigt, daß die Korrosionsprodukte des Zinks nahe der Reaktionsfront Anreicherungen von Chlor enthalten. Die mittels energiedispersiven Verfahrens erstellten Punktanalysen der Korrosionsprodukte in Abb. 34 verweisen auf unterschiedliche Gehalte von Zink, Calcium und Chlor. Merkliche Calciumanteile findet man nur in dem vorher beschriebenen Oberflächensaum. Da in den Korrosionsprodukten stets erhöhte Chloridgehalte nachgewiesen wurden, erscheint die Annahme gerechtfertigt, daß es sich um eine chloridabhängige Form der Zinkkorrosion handelt.

In Einzelfällen, vor allem wenn die Stäbe im Bereich von Schräggrissen lagen, war die Zinkauflage bis auf den Stahl abgetragen (Abb. 35). Die Korrosionsprodukte bestanden dann aus einem Gemisch von vor allem Eisen, Zink und Chlor.

Einzelaufnahmen der Zinkkorrosion feuerverzinkter Betonstähle in Beton 7 (B 35), der 2 Jahre im Spritzwasserbereich gelegen hatte, sind in Abb. 36.1 dargestellt. Die Betondeckung der Stäbe betrug 2,5 cm und der Chloridgehalt im stahlnahen Beton im Mittel 2,2 %. Sämtliche dargestellte Korrosionszustände traten bei den Stäben eines Versuchskörpers auf. Die in Bild 36.3 dargestellte Zinkkorrosion entspricht in etwa dem festgestellten mittleren Abtrag. Gemäß der in Abb. 36 dargestellten Bildfolge kann man sich die Zinkkorrosion bei zeitlich steigendem Chloridgehalt im Beton vorstellen: Zunächst erfolgt ein chloridunabhängiger, gleichmäßiger Abtrag (Abb. 36.1). Dieser Saum aus Korrosionsprodukten wird punktuell von Chloriden durchdrungen, wodurch Zink örtlich verstärkt angegriffen wird (Abb. 36.2). Danach schreitet die Korrosion mehr oder weniger gleichmäßig (Abb. 36.3) oft aber auf kleine Oberflächenbereiche beschränkt, fort. Die unmittelbar an die Stahloberfläche angrenzende Hartzinkschicht ist offenbar eine Barriere für den Zinkabtrag (Abb. 36.4 und 36.5). An wenigen Einzelstellen greift die Korrosion schließlich in den Stahluntergrund über, ohne daß jedoch sofort ein merklicher Materialabtrag erfolgt (Abb. 36.6).

Es wurde versucht, den Zinkabtrag der feuerverzinkten Betonstähle in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflußparametern zu bestimmen. Das Ablöseverfahren nach DIN 50952 (Bestimmung des Flächengewichtes von Zinküberzügen auf Stahl durch chemisches Ablösen des Überzuges) erwies sich im vorliegenden Fall als ungeeignet, da

sich Bestandteile des Zementsteins und feine Betonzuschläge nicht ohne weiteres von der Zinkoberfläche trennen ließen.

Es wurde daher am Beispiel des Betons 7 des Auslagerungsortes 2 (Balken 2.7) die verbliebene Restzinkauflage metallographisch bestimmt. An 37 Proben wurde durch Schliffe, wie in Abb. 36 dargestellt, mit jeweils ca. 200 Messungen im Rasterelektronenmikroskop die Restzinkauflage und die in etwa ursprüngliche Auflage (Restzink + Dicke der Korrosionsprodukte) ermittelt. Da die Korrosion in der Regel nur örtlich erfolgt war, ließ sich die ursprüngliche Zinkauflage durch Messungen außerhalb der Korrosionszonen relativ zuverlässig feststellen. Abb. 37 zeigt an einem Beispiel die Häufigkeitsverteilung der Zinkauflage vor und nach erfolgter Korrosion (2jährige Auslagerung). Der arithmetische Mittelwert des Zinkabtrages beträgt im vorliegenden Fall $188 - 147 = 41 \mu\text{m}$; davon entfallen ca. $8 \mu\text{m}$ auf die chloridunabhängige und ca. $33 \mu\text{m}$ auf die chloridbedingte Zinkkorrosion.

Abb. 38 zeigt den Zinkabtrag entlang des Balkens. Es wird unterschieden nach Bewehrungslage beziehungsweise Betondeckung, Ober- und Unterseite der Stäbe und Lage im schubrißfreien Bereich beziehungsweise entlang von Schubrisen. Man erkennt, daß

der Zinkabtrag bei fallender Betondeckung nimmt,

der Zinkabtrag in Schubrisen stärker ist als in den schubrißfreien Bereichen,

die Zinkkorrosion im rissefreien Beton entlang der der Betonoberfläche zugewandten Seite gegenüber der abgewandten Seite stärker ist.

Danach begünstigen jene Faktoren (niedrige Betondeckung, Betonrisse) die Zinkkorrosion, welche den Antransport von Chloriden und Sauerstoff zum Stahl erleichtern.

In dem hier besonders ungünstigen Korrosionsfall (Spritzwasserbereich, niedrige Betongüte B 35) betragen die über die Länge gemittelten Zinkverluste in den der Biegezugzone zugewandten Bewehrungslagen im Mittel aller Versuche:

Beton deckung (cm)	Zinkabtrag (μm)		
	Chlorid- unabhängig	Chlorid- abhängig	Summe
2,5	$\approx 10,0$	$\approx 16,0$	$\approx 26,0$
5,0	$\approx 7,5$	$\approx 6,5$	$\approx 14,0$

Für die einzelnen untersuchten Abschnitte ergab sich für $c = 2,5 \text{ cm}$ ein oberer beziehungsweise unterer Zinkabtrag von 29 bzw. $19 \mu\text{m}$ und für $c = 5,0 \text{ cm}$ von 15 bzw. $12 \mu\text{m}$.

In Schubrissen würde sich im Mittel ein Zinkabtrag von 27 μm , also vergleichbar dem Zinkabtrag im ungerissenen Beton bei $c = 2,5 \text{ cm}$, ergeben. Wegen der großen Streuung zwischen 17 und 38 μm verbietet sich jedoch eine Mittelwertbildung (Abb. 38).

Stichprobenartig wurde auch dem Zinkabtrag im Beton 3 (B 55) nachgegangen. Hier wurde im rissefreien Beton lediglich ein Zinkabtrag von im Mittel ca. 10 μm bei Betondeckungen von 2,5 cm und von ca. 5 μm bei Betondeckungen von 5,0 cm festgestellt. Diese Zinkabtragungen beziehen sich nahezu ausschließlich auf einen chloridunabhängigen Abtrag. In diesem Beton waren die Chloridgehalte am Stahl zu gering (Abb. 13), um eine chloridbedingte Korrosion zu bewirken. Dies gilt allerdings auch für den unverzinkten Stahl.

An Einzelbeispielen wurde mittels metallographischer Methode auch dem Zinkabtrag in Biegerissen nachgegangen. In Abb. 39 sind zunächst einige typische Bilder von der Zinkauflage in Biegerissen für den B 35 und Betondeckungen von $c = 2,5 \text{ cm}$ wiedergegeben. Die Bilder stellen Längsschliffe durch die der Betonoberfläche zugewandte Staboberfläche dar, wobei die ungefähre Lage des Biegerisses vermerkt ist. Man erkennt einen Anstieg der Zinkkorrosion ab etwa $w = 0,25 \text{ mm}$.

In Abb. 40 sind einige Meßwerte eingetragen. Es wurde der gemittelte Zinkabtrag über die Rißbreite sowie eine beidseitig angrenzende Meßstrecke von ca. 0,5 cm eingetragen. Dies stellt in etwa jenen Bereich dar, in dem Zink ab einer gewissen Rißbreite verstärkt abgetragen wird. Gegenüber einem Zinkabtrag von 26 μm im ungerissenen Beton und Betondeckungen von $c = 2,5 \text{ cm}$ liegt die Zinkkorrosion bei $w = 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 \text{ mm}$ im Mittel ca. 5 - 30 - 85 - 200 % höher. Bei Betondeckungen von $c = 5,0 \text{ cm}$ wurde bis $w = 0,4 \text{ mm}$ eine gegenüber dem ungerissenen Beton um ca. 140 % erhöhte Zinkkorrosion festgestellt. Bei dem Beton 3 (B 55), der vor allem wegen des hohen Zementgehaltes eine höhere Dichtigkeit als der Beton 7 (B 35) aufwies, war die Abzehrung der Zinkauflage im Riß geringer. Durch Stichproben wurde festgestellt, daß - gleiche Rißbreiten vorausgesetzt - der Zinkabtrag nur etwa die Hälfte ausmachte.

Alles in allem zeigen die Ergebnisse, daß feuerverzinkte Betonstähle in stark chloridhaltigem Beton (der keinen sehr hohen Anforderungen an die Dichtigkeit genügt) keine stabilen Deckschichten ausbilden und somit Zink abgetragen wird. Dieser Zinkabtrag erscheint in Anbetracht der hohen Auflage von im Mittel 170 μm im betrachteten Zeitraum von 2 Jahren noch vertretbar. Einen dauerhaften Schutz auf Jahrzehnte darf man allerdings unter diesen extremen Korrosionsbedingungen nicht erwarten. In Betonrissen wird die Schutzwirkung der Feuerverzinkung weiter abgemindert, wenn

Korrosionsbedingungen wie am Auslagerungsort vorliegen und die Rißbreite 0,3 mm überschreitet

In hochwertigem, dichten Beton (B 55) und/oder erhöhter Betondeckung ($c = 5,0 \text{ cm}$) ist eine Zinkkorrosion wegen geringer Chloridgehalte und verminderter Sauerstoffzufuhr über die Betondeckung weniger bedeutsam. Unter diesen Bedingungen ist aber auch der unverzinkte Betonstahl nicht erheblich korrosionsgefährdet. Letzteres gilt selbst im gerissenen Beton, wenn die Rißbreite bei 5 cm Überdeckung 0,3 bis 0,4 mm nicht überschreitet.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Stahlbetonbalken der Abmessung 100 x 20 x 15 cm wurden mit feuerverzinkten und unverzinkten Betonrippenstählen, $d_s = 8 \text{ mm}$ und feuerverzinkten Spannstählen, $d_s = 6 \text{ mm}$ sowie Bügeln bewehrt. Die mittlere Zinkauflage der Betonstähle betrug 171 μm , jene der Spannstähle 56 μm . Als Betongüte wurde B 35 und B 55 gewählt, wobei die Zementmenge und der w/z-Wert 250 kg/m^3 und 0,70 beziehungsweise 460 kg/m^3 und 0,40 betrugen. Die Betondeckung der Stähle wurde zu 1,5 cm und 2,0 cm (Bügel), 2,5 und 5,0 cm eingestellt.

Nach entsprechender Nachbehandlung und Erhärtung des Betons wurden die Balken paarweise als Biegebalken zusammengespannt, wobei Biege- und schräg verlaufende Schubrisse erzeugt wurden. Letztere traten in erster Linie bei der niedrigeren Betongüte auf. An ihrem oberen Ende verliefen die Schubrisse abschnittsweise parallel zu Bewehrungsstäben. In der Zugzone wurden an der Betonoberfläche Rißbreiten zwischen 0,1 bis 0,4 mm gemessen.

Die Balken wurden auf der Insel Helgoland wie folgt ausgelagert: Wechsellagerzone, 0 bis 0,5 m oberhalb des mittleren Hochwassers (Balkenpaar 1), gelegentlich Spritzwasserbeanspruchung (Balkenpaar 2), häufige Spritzwasserbeanspruchung (Balkenpaar 3).

Nach 2 Jahren wurden die Balken im Labor zerlegt und im Hinblick auf folgende eine Korrosion der Bewehrung kennzeichnende Größen untersucht:

KO : korrodierte Oberfläche (%)

SA : mittlerer Stahlabtrag der korrodierten Bereiche (μm)

mNT : maximale Narbentiefe außerhalb von Rissen (mm)

NT : Narbentiefe in Rissen (mm).

Folgende wesentliche Ergebnisse wurden erzielt:

Karbonatisierung

Alle Längsstäbe lagen sowohl im ungerissenen Beton als auch in Rissen noch in alkalischer Umgebung. In Betonrissen mit $w > 0,2 \text{ mm}$ war die Umgebung von Bügeln abschnittsweise auch karbonatisiert.

Chloridgehalte

Die Chloridgehalte im Beton nahmen in der Reihenfolge Wechselltauchzone - häufige Spritzwasserbeanspruchung - gelegentliche Spritzwasserbeanspruchung zu. Eine alternierende Befeuchtung mit chloridhaltigem Wasser und Austrocknung des Betons unterstützt somit eine Chloridanreicherung. In 1 cm Tiefe betrug der Chloridgehalt bei Beton B 35 im Mittel aller Auslagerungsorte 1,7 %, bezogen auf das Zementgewicht. Setzt man diesen Randgehalt mit 100 % an, so ist folgender Chloridverlauf über die Betontiefe in Abhängigkeit von der Betongüte vorhanden:

	c = 1 cm	c = 2,5 cm	c = 5 cm
B 55	51 %	31 %	9 %
B 35	100 %	94 %	69 %

D.h., mit steigender Betongüte wird das Chlorideindringvermögen erwartungsgemäß stark herabgesetzt.

Stahlkorrosion im ungerissenen Beton

Stahlkorrosion wurde bei den unverzinkten Betonstählen, aber auch bei den feuerverzinkten Spannstählen, nicht aber bei den feuerverzinkten Betonstählen festgestellt.

Einfluß der Auslagerungsbedingungen

Die Korrosion war um so geringer, je häufiger der Beton mit Meerwasser beaufschlagt wurde (je feuchter er war). Im Mittel aller Versuche war die Korrosion in der Spritzwasserzone um folgende Faktoren stärker als in der Wechselltauchzone:

KO (%)	:	ca. 7
SA (μ m)	:	ca. 6
mNT (mm)	:	ca. 3

Einfluß der Betongüte

Der Korrosionsangriff der Stähle war im B 35 erheblich stärker als im B 55. Im Mittel aller Versuche wurden für nicht verzinkte Stähle und Betondeckungen von 1,5 bis 2,5 cm folgende Verhaltenswerte B 35 zu B 55 gefunden:

KO (%)	:	ca. 6
SA (μ m)	:	ca. 3
mNT (mm)	:	ca. 2

Einfluß der Betondeckung

Mit abnehmender Betondeckung der Stähle steigt die Korrosion progressiv an. Im Mittel aller Versuche wurden folgende Verhältnismerte für blanke Stähle ermittelt:

	c = 1,0 cm	:	c = 2,5 cm	:	c = 5,0 cm
(%)	79	:	19	:	1
SA (μ m)	19	:	7	:	
mNT (mm)	20	:	7	:	

Einfluß der Feuerverzinkung bei Spannstählen

Bei den feuerverzinkten Spannstählen mit Zinkdicken von 56 μ m war die Stahlkorrosion zwar geringer als bei den unverzinkten Betonstählen, die Verzinkung erwies sich im vorliegenden Fall jedoch als nicht ausreichend. Die Stahlkorrosion begann gegenüber nicht verzinkten Stäben zeitlich später, ein kathodischer Schutz der freiliegenden Stahloberflächen durch die in benachbarten Bereichen noch vorhandene Zinkauflage wurde nicht festgestellt.

Im Mittel aller Versuche wurden nach 2jähriger Auslagerung für Betondeckungen von 2,5 cm folgende Verhältnismerte der Stahlkorrosion von unverzinktem Betonstahl zu feuerverzinktem Spannstahl gefunden:

KO (%)	:	ca. 4
SA (μ m)	:	ca. 3
mNT (mm)	:	ca. 2,5

Einfluß von Rissen

Bügelabschnitte

Bei Betondeckungen von 1,5 und 2,0 cm unterschied sich die Korrosion von Bügeln in Biegerissen mit Rißbreiten von 0,1 bis 0,35 mm an der Betonoberfläche nicht wesentlich von jener außerhalb von Rissen.

Zugbewehrung

Bei den Balken in der Wechselltauchzone mit Biegerissen bis zu $w \approx 0,25$ mm Breite (größere Rißbreiten waren hier nicht vorhanden) wurde keine, bei den Balken in der Spritzwasserzone und oberhalb des mittleren Tidehochwassers jedoch deutliche Korrosion festgestellt. Die gemessene Narbentiefe am Stahl nahm mit der Rißbreite zu. Bei Betondeckungen von 2,5 cm war der Korrosionsangriff an Rißstellen jedoch in derselben Größenordnung wie im Bereich zwischen den Rissen.

Es besteht ein deutlicher Einfluß der Betongüte und der Betondeckung auf die Korrosion im Riß: Bei vergleichbarer Rißbreite ergaben sich beim B 35 im Vergleich zum B 55 etwa die 2fachen Narbentiefen. Bei einer Betondeckung von 2,5 cm war Korrosion ab Rißbreiten von 0,1 mm, bei einer Betondeckung von 5,0 cm erst ab Rißbreiten von 0,3 bis 0,4 mm festzustellen.

Die Narbentiefen an Rißstellen waren beim unverzinkten Betonstahl etwa um den Faktor 2 größer als beim feuerverzinkten Spannstahl. Dieser Unterschied würde sich mit zunehmender Auslagerungsdauer sicher verringern und nach einigen Jahren vollständig verschwinden.

In Schubrissen im Innern des Betons wurde ein vergleichbar ungünstiges Korrosionsverhalten festgestellt wie in ungerissenem Beton mit niedriger Betondeckung und Betongüte.

Zinkkorrosion im ungerissenen Beton

Im ungerissenen Beton der Güte B 35 ergaben sich bei feuerverzinkten Betonstählen in der korrosionstechnisch ungünstigen Spritzwasserzone für Betondeckungen von 2,5 bzw. 5,0 cm nach 2 Jahren mittlere Zinkabtragungen von 26,0 bzw. 14,0 µm. Davon entfällt in beiden Fällen je etwa die Hälfte auf eine chloridunabhängige Korrosion (Zinkkorrosion infolge der hohen Alkalität des Porenwassers vor einer Schutzschichtbildung) bzw. eine chloridabhängige Korrosion. In der Folge dürfte die chloridabhängige Korrosion dominieren. In einem Beton der Güte B 55 lag der Zinkabtrag für Betondeckungen von 2,5 bzw. 5,0 cm bei 10,0 bzw. 5,0 µm.

Einfluß von Rissen

In Rissen war der Zinkabtrag höher als in ungerissenem Beton und nahm mit steigender Rißbreite zu, jedoch mit steigender Betondeckung ab. Bei B 35 und einer Betondeckung von 2,5 cm erwies sich eine Rißbreite von $\approx 0,3$ mm als kritische Grenze. In höherwertigem Beton und/oder bei höherer Betondeckung war die Zinkkorrosion auch in Rissen vernachlässigbar. Unter vergleichbaren Bedingungen waren aber auch unverzinkte Stähle nicht wesentlich korrodiert.

In Schubrissen wird Zink vergleichbar stark abgetragen wie in ungerissenem Beton und niedrigen Betondeckungen.

Bei der Bewertung der Feststellungen sind die Auslagerungsbedingungen und die vergleichsweise kurze Auslagerungsdauer zu berücksichtigen. Für eine Feuerverzinkung ergeben sich die aufgeführten Folgerungen:

- Bei einer Feuerverzinkung hängt die Wirksamkeit als Korrosionsschutz für Betonstähle bei Einwirkung chloridhaltiger Medien (z.B. Meerwasser) von der Dicke der Verzinkung und der Chloridkonzentration im Beton ab.
- Praktisch ausführbare Zinkschichtdicken von im Mittel 170 µm erleiden bei höheren Chloridgehalten als 1 % (bezogen auf Zementgewicht) im ungerissenen Beton in Abhängigkeit von der Belüftung (Betongüte = Dichtigkeit und Betondeckung = Diffusionsweg) innerhalb von 2 Jahren eine Chlorid-bedingte Abtragungsrate von bis zu 16 µm/a (ungünstigster Wert bei B 35 und c = 2,5 cm). Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Auslagerungsversuchen in /9/.

In Betonrissen ist ab 0,3 mm Breite mit gegenüber dem ungerissenen Beton stark ansteigender Korrosion zu rechnen: Nach 2 Jahren wurde für $w = 0,3$ mm bis zu 50 µm Zinkabtrag im Betonriß festgestellt. Die Korrosion ist aber auch von den Belüftungsverhältnissen im RiB abhängig.

Die Beobachtungen deuten auf Elementbildung mit einer Anode im RiB und der Kathode im angrenzenden ungerissenen Beton. Insofern sind die Betongüte und die Betondeckung über das Sauerstoffangebot von großer Bedeutung für eine Zinkkorrosion in Betonrissen.

Somit bietet eine Feuerverzinkung von i.M. 170 µm mit Kleinstwerten um 80 µm unter vergleichbaren sehr kritischen Korrosionsverhältnissen wie bei den ausgelagerten Balken keinen sicheren und dauerhaften Korrosionsschutz in mit Rissen durchsetzten Stahlbetonbauteilen. Eine Verzinkung kann hier den Beginn der Stahlkorrosion je nach Zinkdicke und Chloridkonzentration lediglich um Jahre verzögern. In bewehrten Betonbauteilen ohne Risse wird die zeitliche Verzögerung deutlich größer sein als in Bauteilen mit Rissen.

Insofern liegt der Vorteil einer feuerverzinkten Bewehrung bei Anwendungen, wo mit einer Karbonatisierung des Betons oder Chloridgehalten in Beton ≤ 1 % zu rechnen ist. Unter solchen Verhältnissen stellt die Feuerverzinkung auch in Betonrissen einen hohen Schutz dar.

Literatur

- 1/ U. Nürnberger: Besondere Maßnahmen für den Korrosionsschutz von Massivbauwerken im Off-shore-Bereich. Schiff und Hafen, Sonderheft "Meerwasserkorrosion" (1983) Februar, 61/66
- 2/ Merkblatt 400: Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl. Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 1983
- 3/ U. Nürnberger: Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl bei Berührung mit Baustoffen. Werkstoffe und Korrosion 37 (1986), 302/09
- 4/ U. Nürnberger: Korrosionsverhalten verzinkter Spannstähle in gerissenem Beton. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 353 (1984), 81/160
- 5/ U. Nürnberger: Eigenschaften von feuerverzinkten Überzügen auf kaltumgeformten Betonrippenstählen und Betonstahlmatten aus kaltgewalztem Betonrippenstahl. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 318 (1981), 3/30
- 6/ Zulassungsbescheid "Feuerverzinkte Betonstähle", Institut für Bautechnik Berlin, 30.11.1984
- 7/ G. Rehm, U. Nürnberger, B. Neubert, F. Nenninger: Einfluß von Betongüte, Wasserhaushalt und Zeit auf die Eindringung von Chloriden in Beton. In diesem Heft des DAfStb
- 8/ P. Schießl: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im

Anhang

Abbildungen 1 bis 40

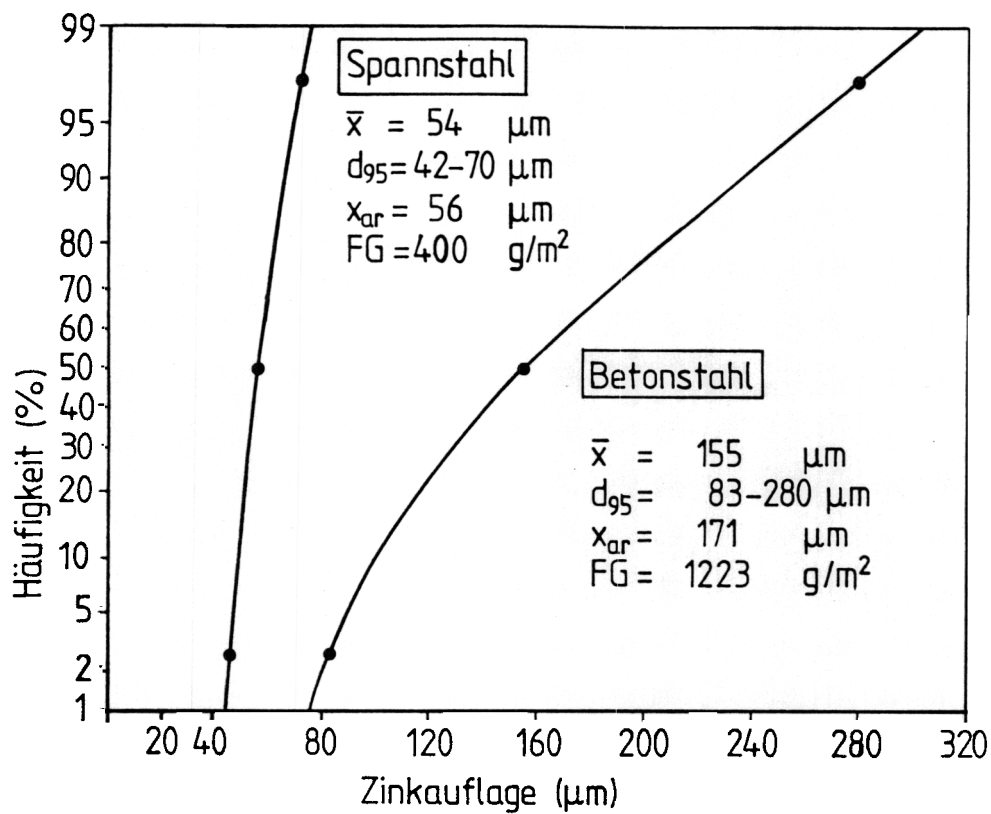


Abb. 1:
Häufigkeitsver-
teilungen der
Zinkauflagen
von Beton-
und Spannstahl

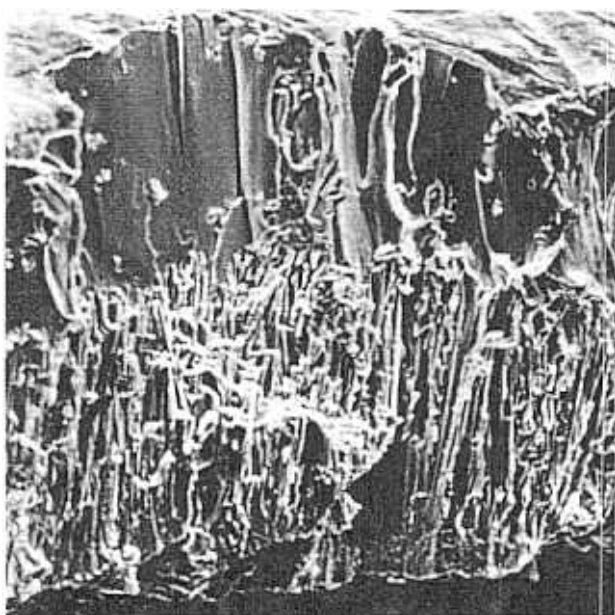
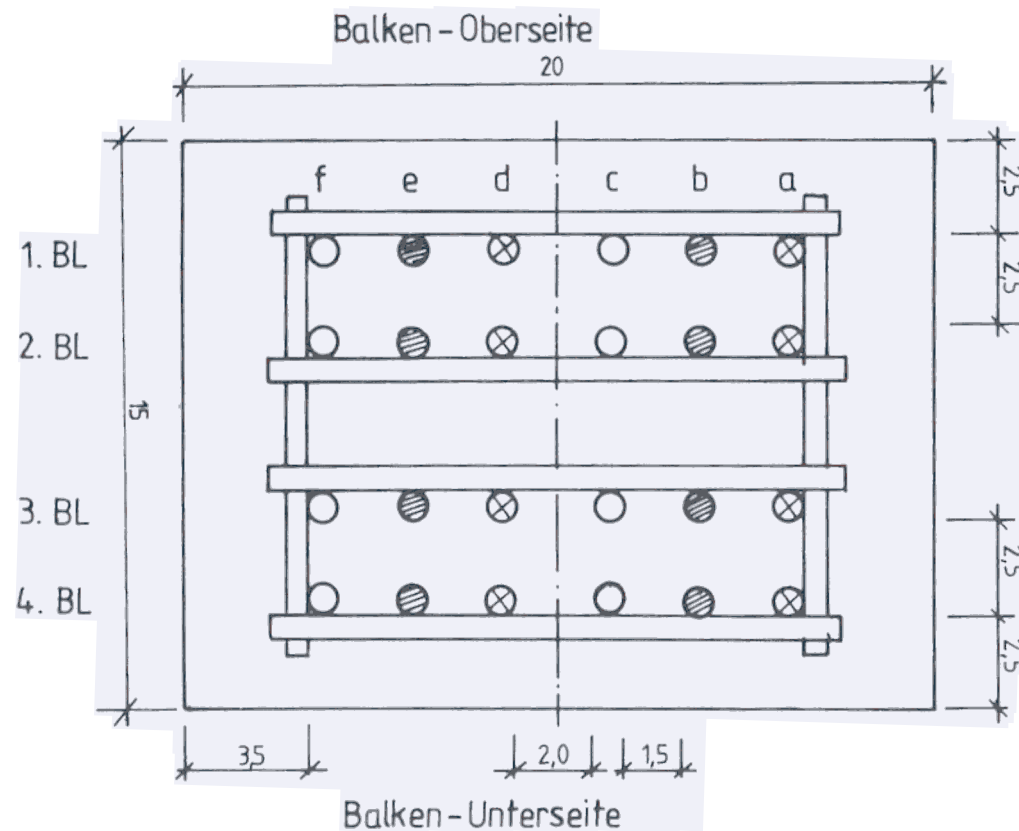
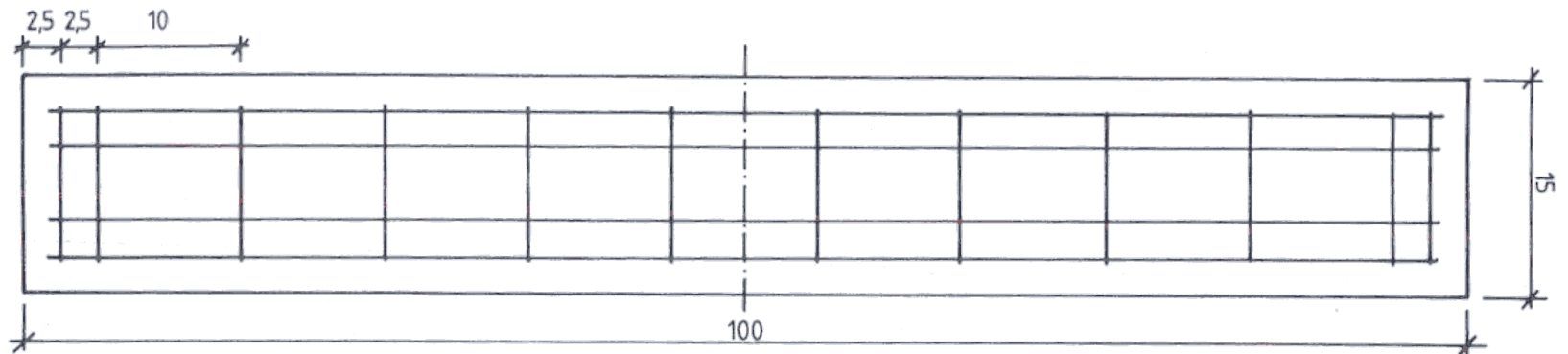


Abb. 2.1:
Bruch der Zinkauflage eines
verzinkten Betonstahls
(400 : 1)



Abb. 2.2:
Bruch der Zinkauflage eines
verzinkten Spannstahls
(1000 : 1)



○ Pos c,f 8 ϕ 8 BSt 420/500 RK, verzinkt

▨ Pos b,e 8 ϕ 8 BSt 420/500 RK

⊗ Pos a,d 8 ϕ 7 St 1420/1570, verzinkt

12 Bügel ϕ 6, geschweißt, s=10 cm

BL= Bewehrungslage

Abb. 3:

Abmessungen, Bewehrung und
Bezeichnung der Balken.

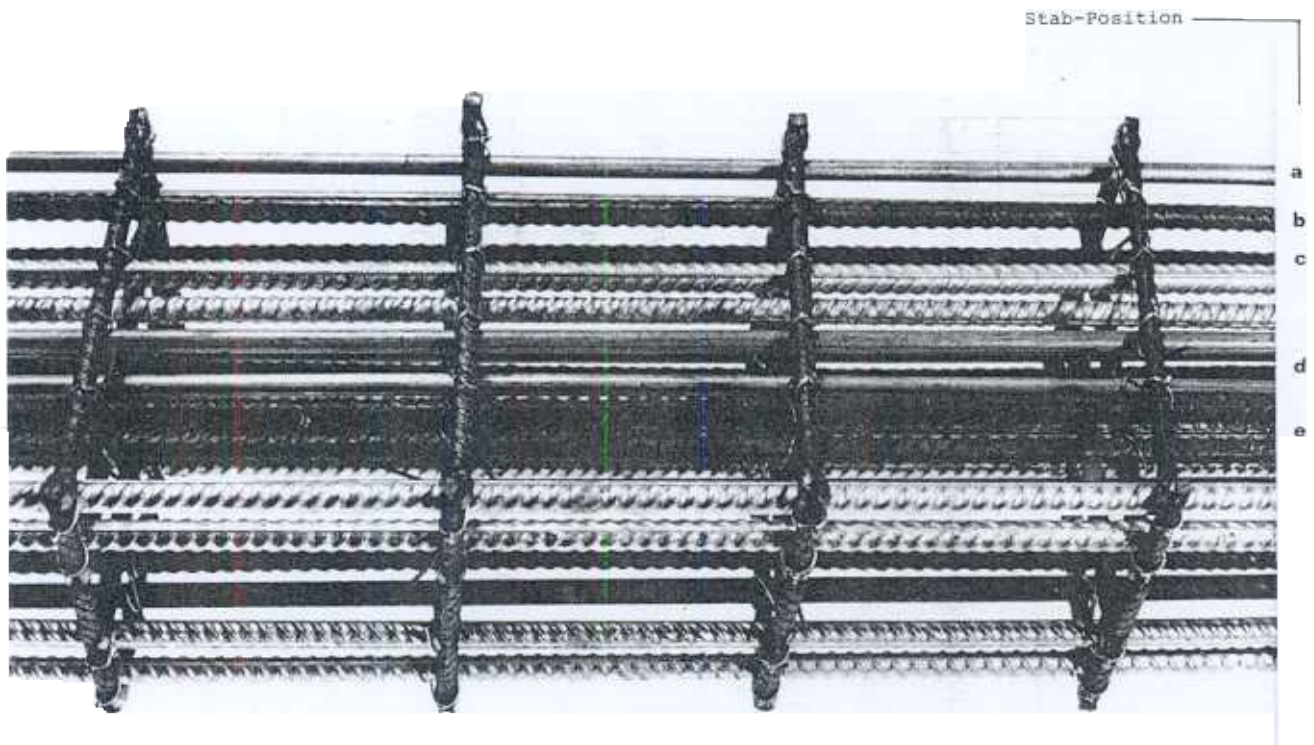


Abb. 4:
Bewehrungskorb eines Balkens (Ausschnitt)

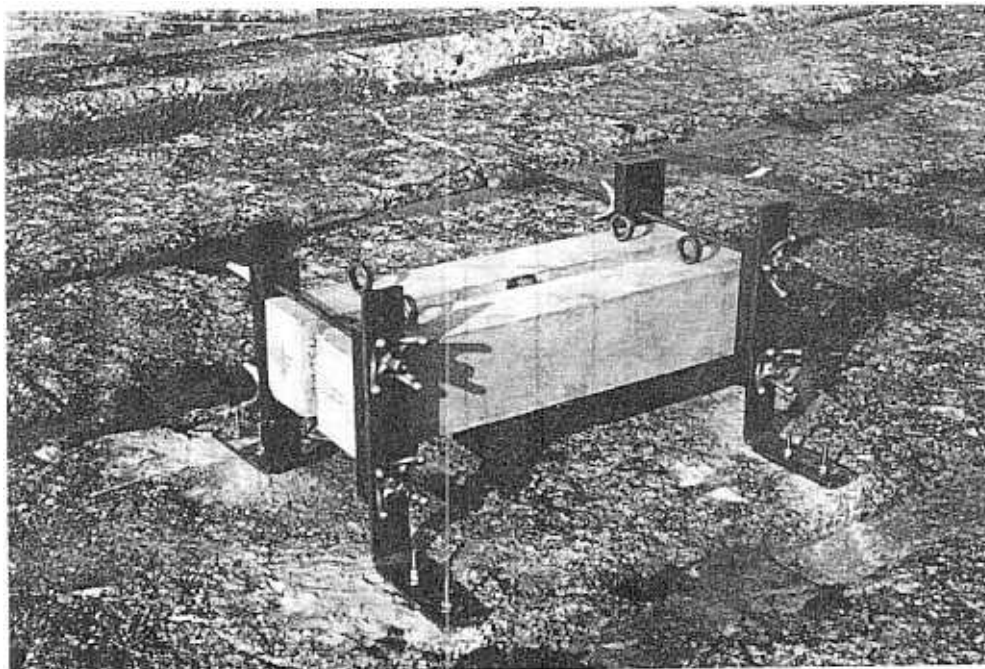


Abb. 5:
Balkenpaar nach Montage

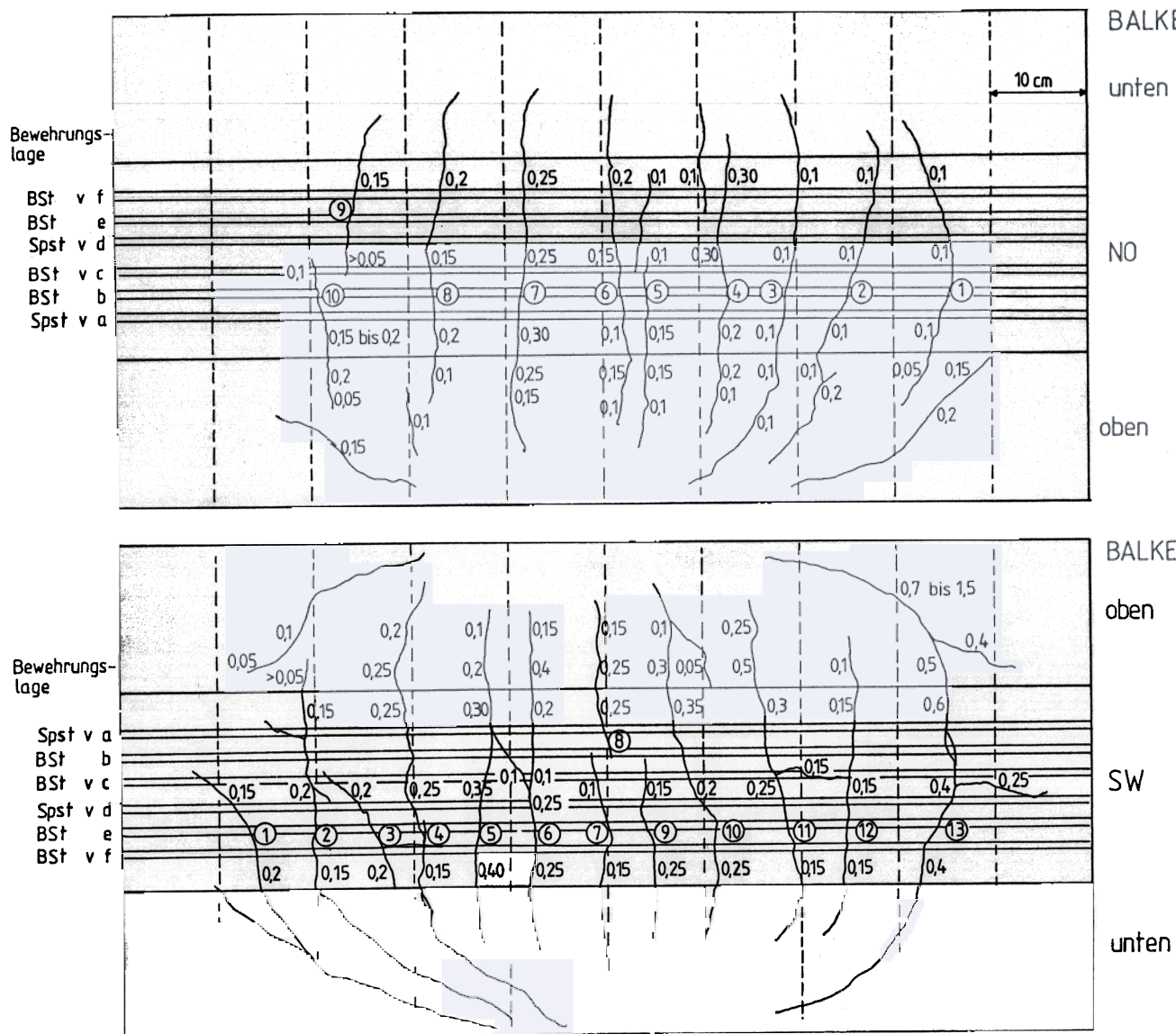


Abb. 2: Rißplan des Balkenpaars 2

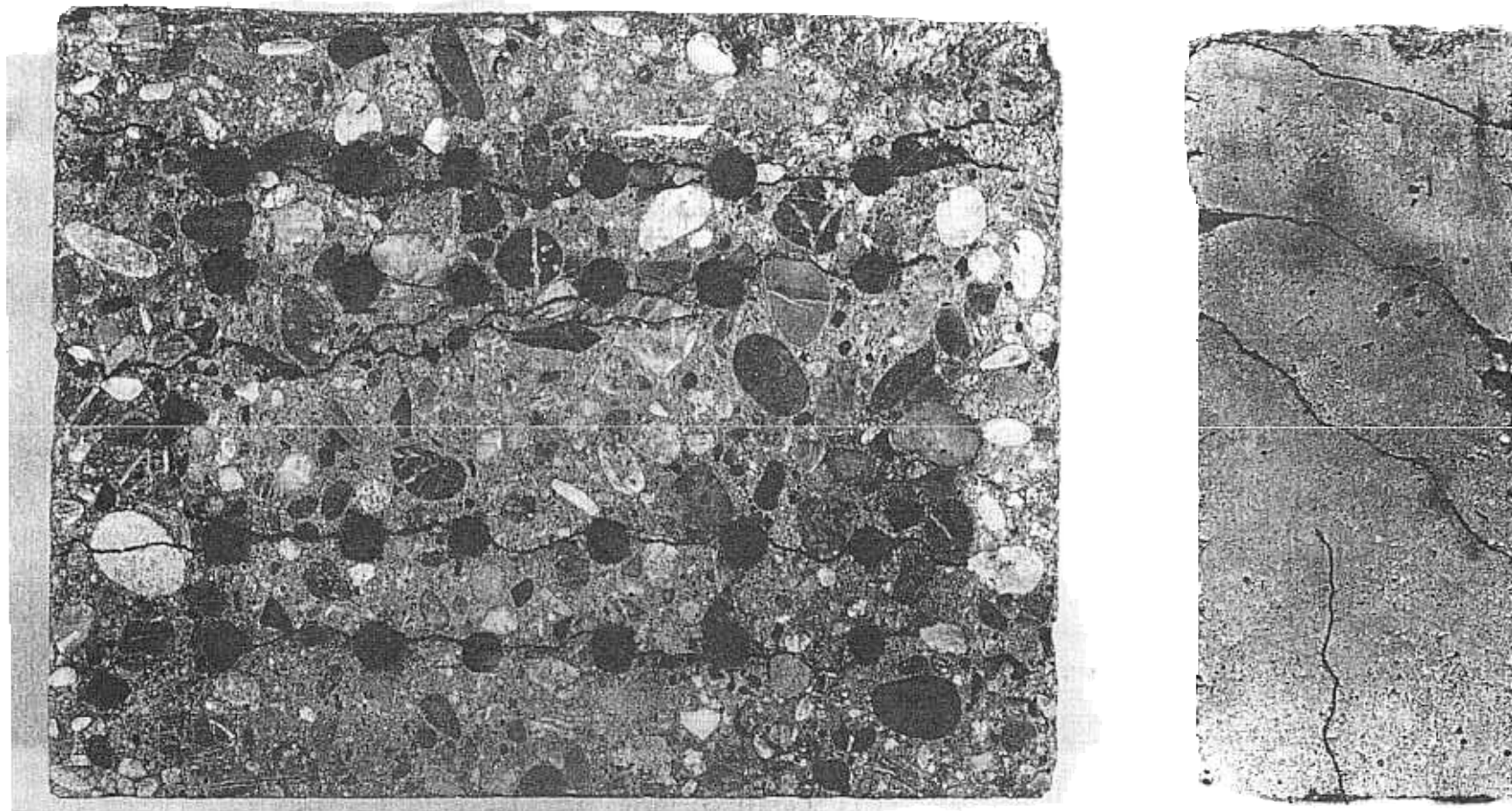


Abb. 7:

Rißzustand bei Balken 2.7, Schnitt ca. 25 cm vom Balkenende entfernt.

7.1: Balkenquerschnitt mit Rißufern der angeschnittenen Schubrißebenen

7.2: Seitenansicht des Balkens (Ausschnitt) mit Biegeriß und drei schrägen Schubrissen

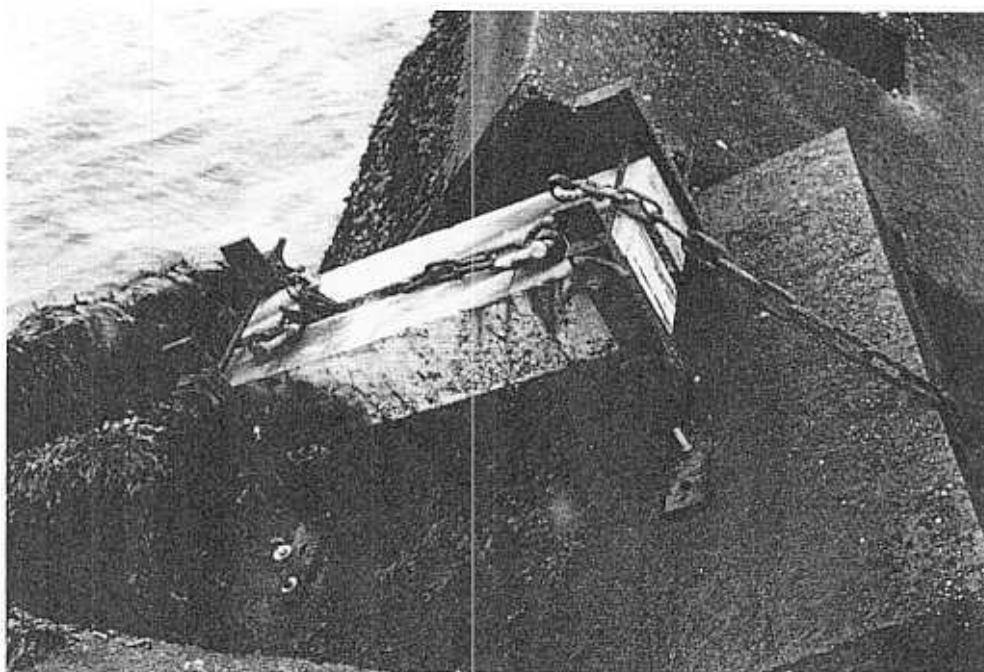


Abb. 8.1:
Balkenpaar 1 bei Ebbe (nach 4 Monaten)

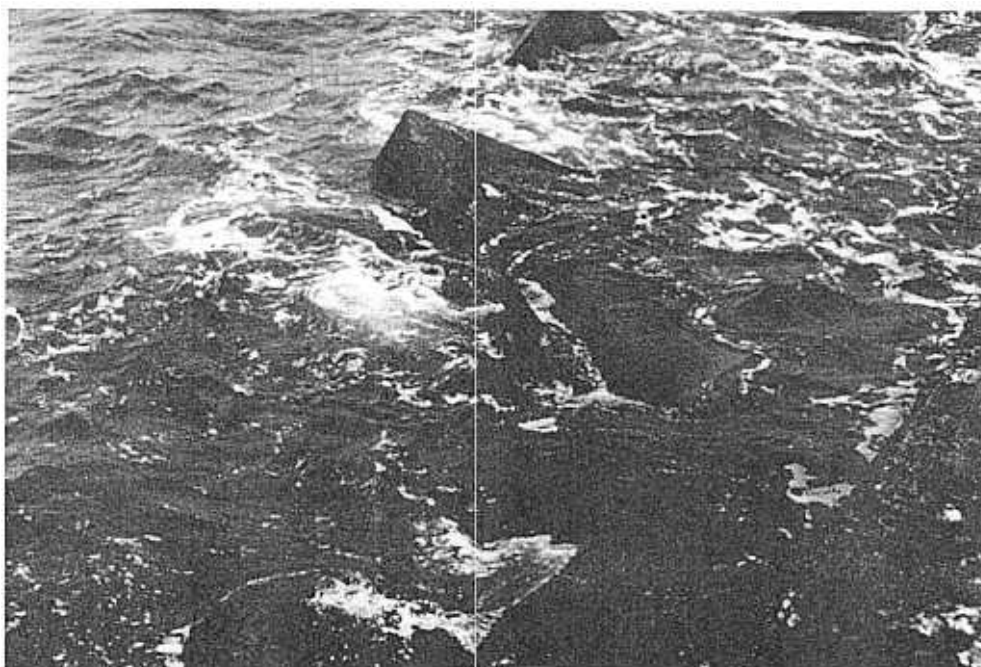
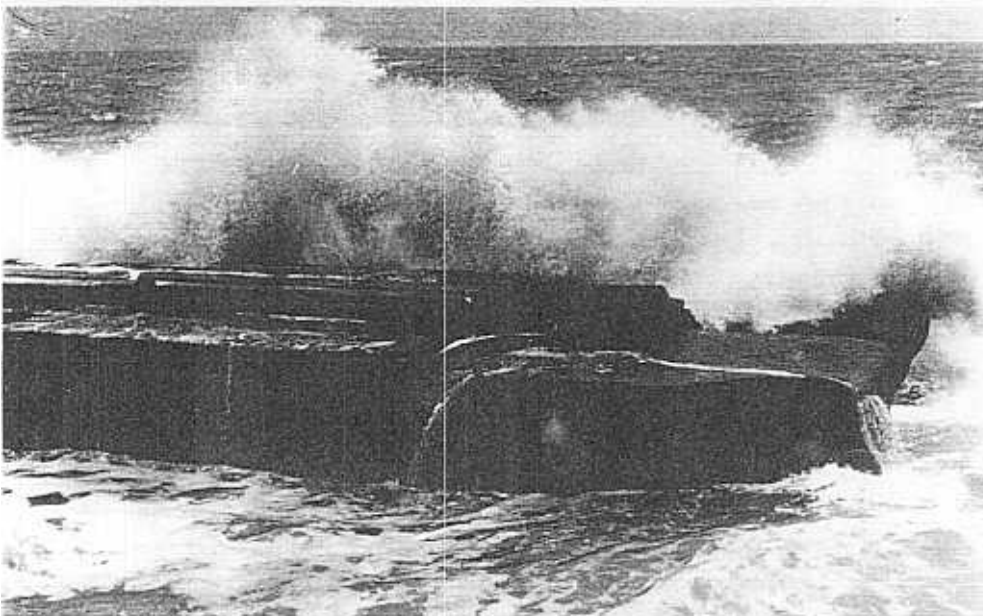


Abb. 8.2:
Balkenpaar 1 bei Flut (Windstärke 6,
Flut > mHW)



Balkenpaar
2 und 3



Balkenpaar 3



Balkenpaar 2

Abb. 9: Balkenpaare 2 und 3 bei Windstärke 8

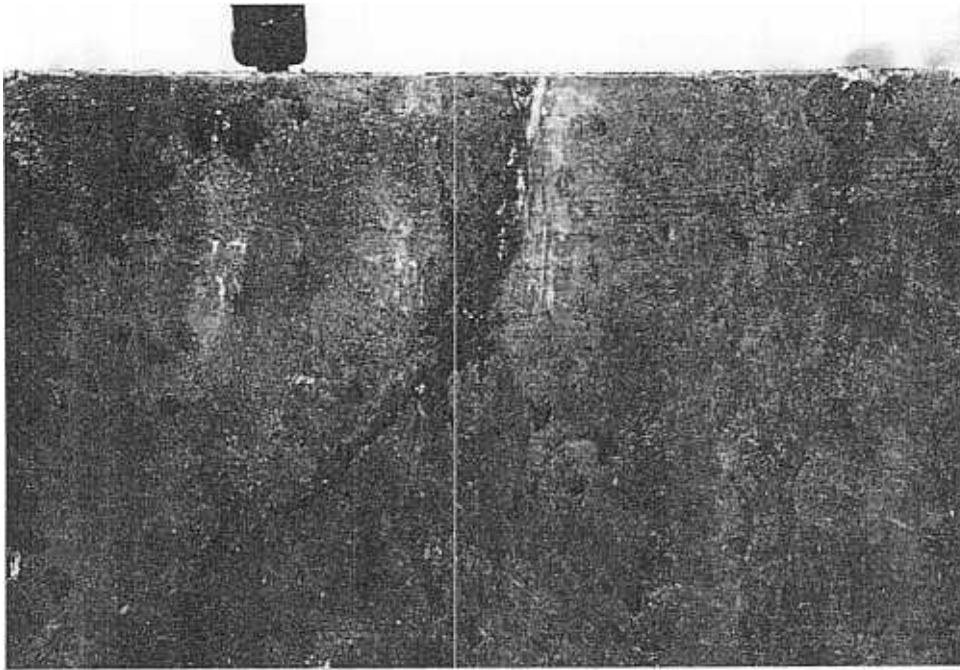


Abb. 10:
Bewuchs im Bereich von Betonrissen von Balken-
paar 1

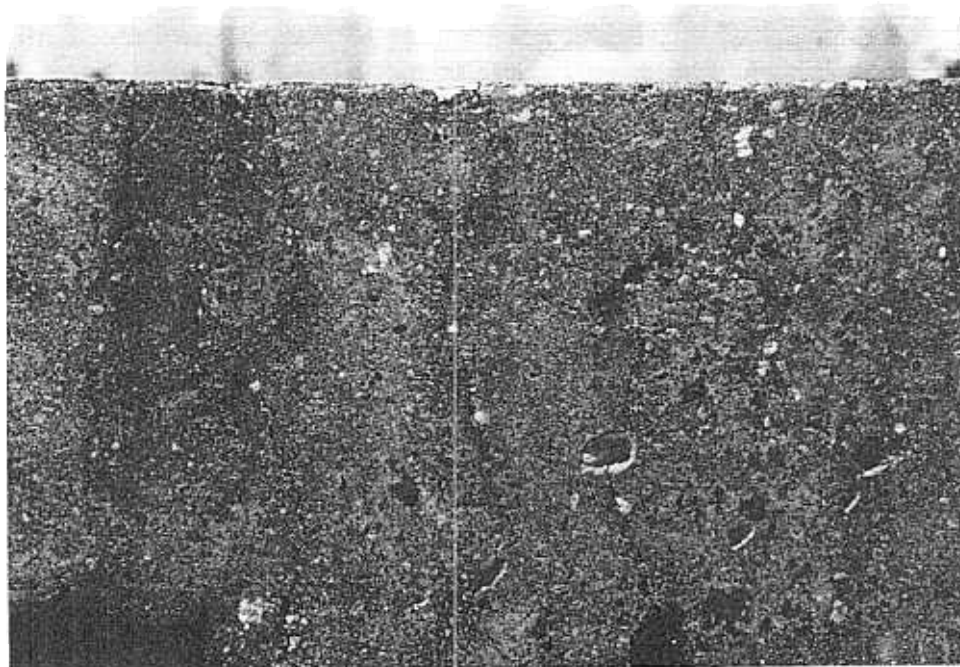


Abb. 11:
Kein sichtbarer Bewuchs im Bereich von Beton-
rissen von Balkenpaar 2

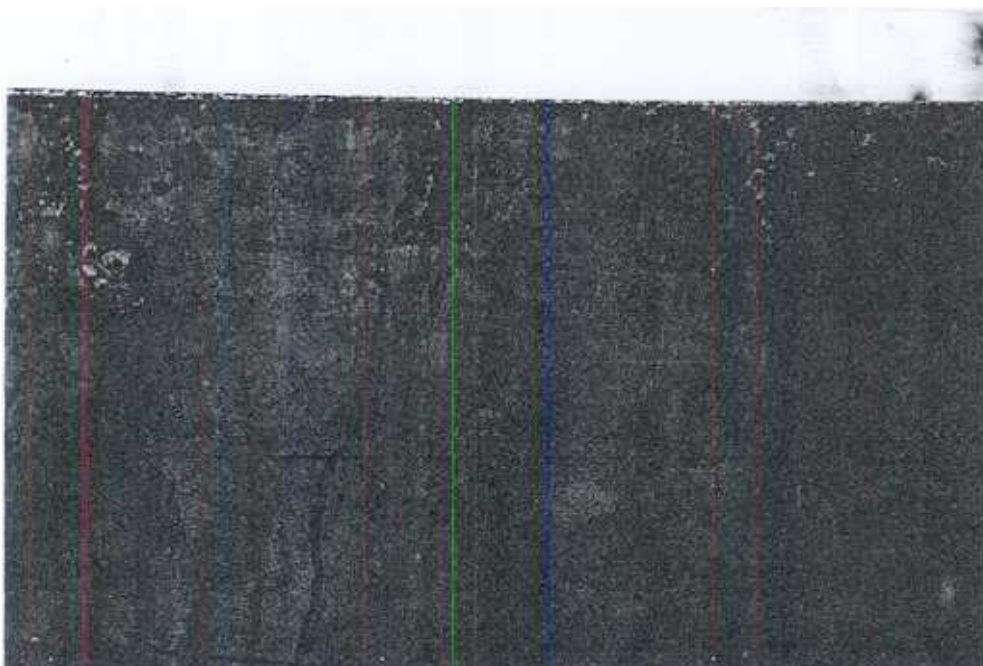
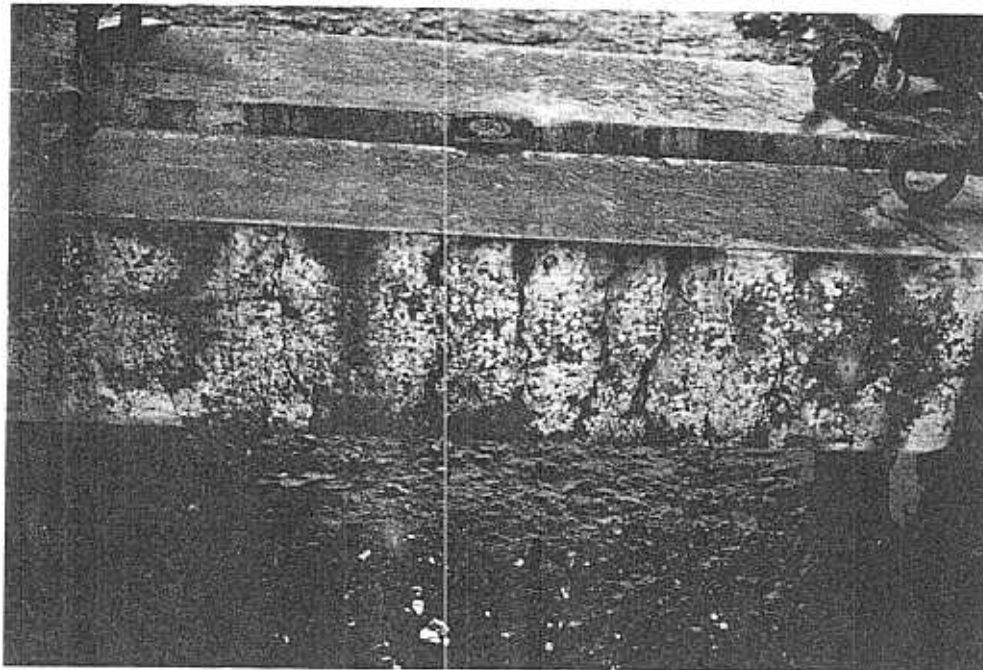


Abb. 12:
Bewuchs im Bereich von Betonrissen von Balken-
paar 3

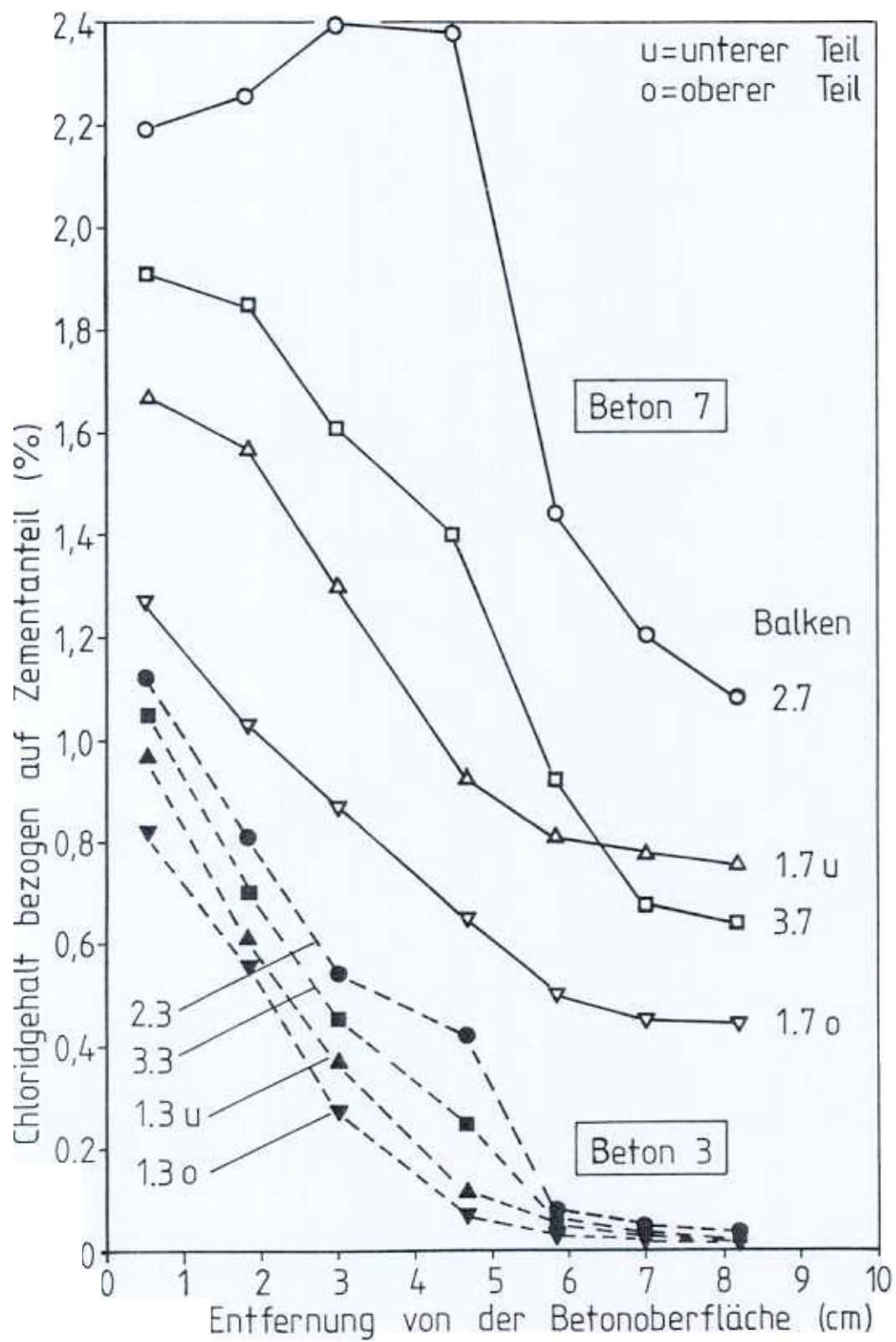


Abb. 13:
Chloridverteilung in den Betonbalken

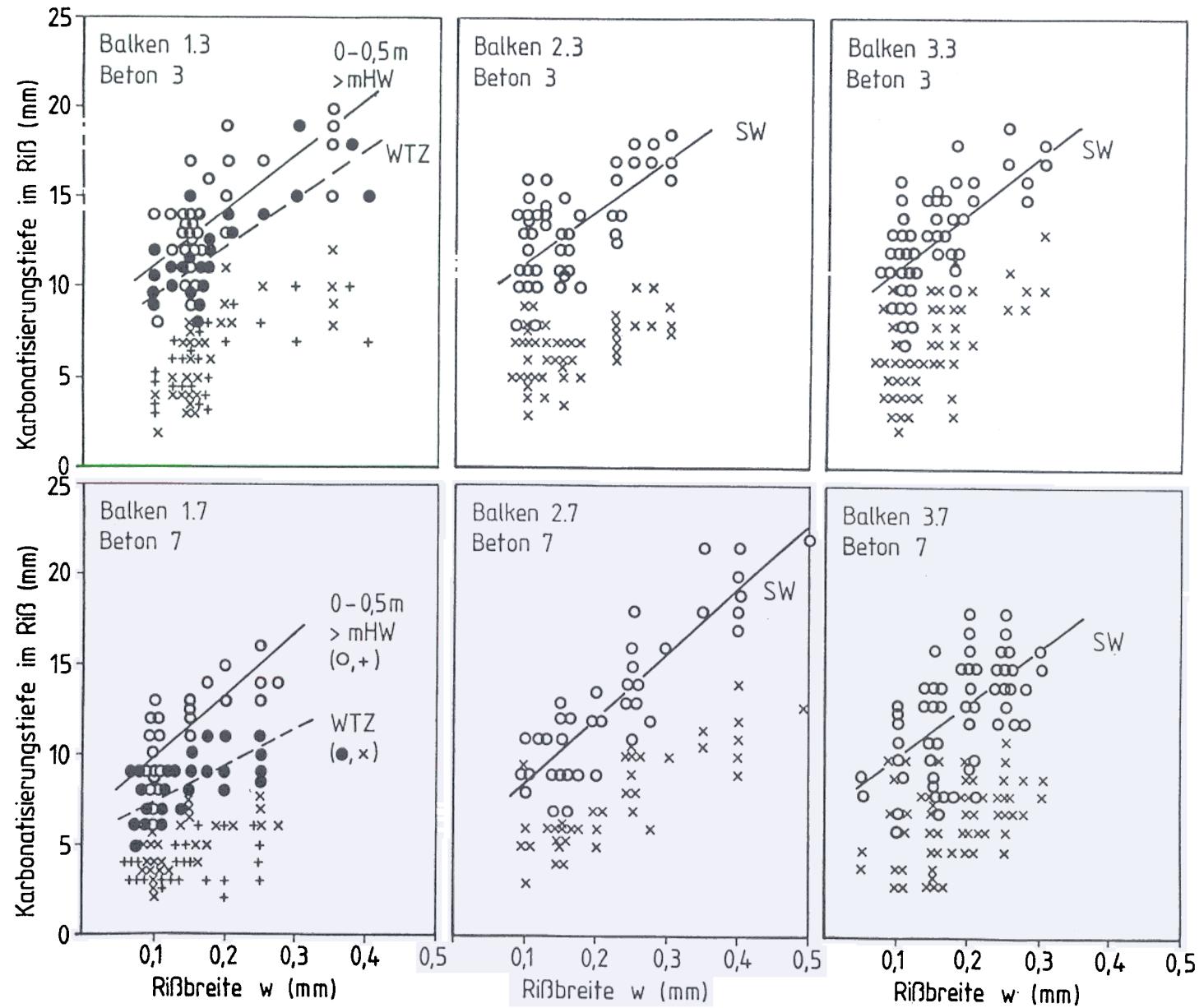


Abb. 14:
Karbonatisierungs-
tiefe der Balken in
Betonrissen nach
2 Jahren

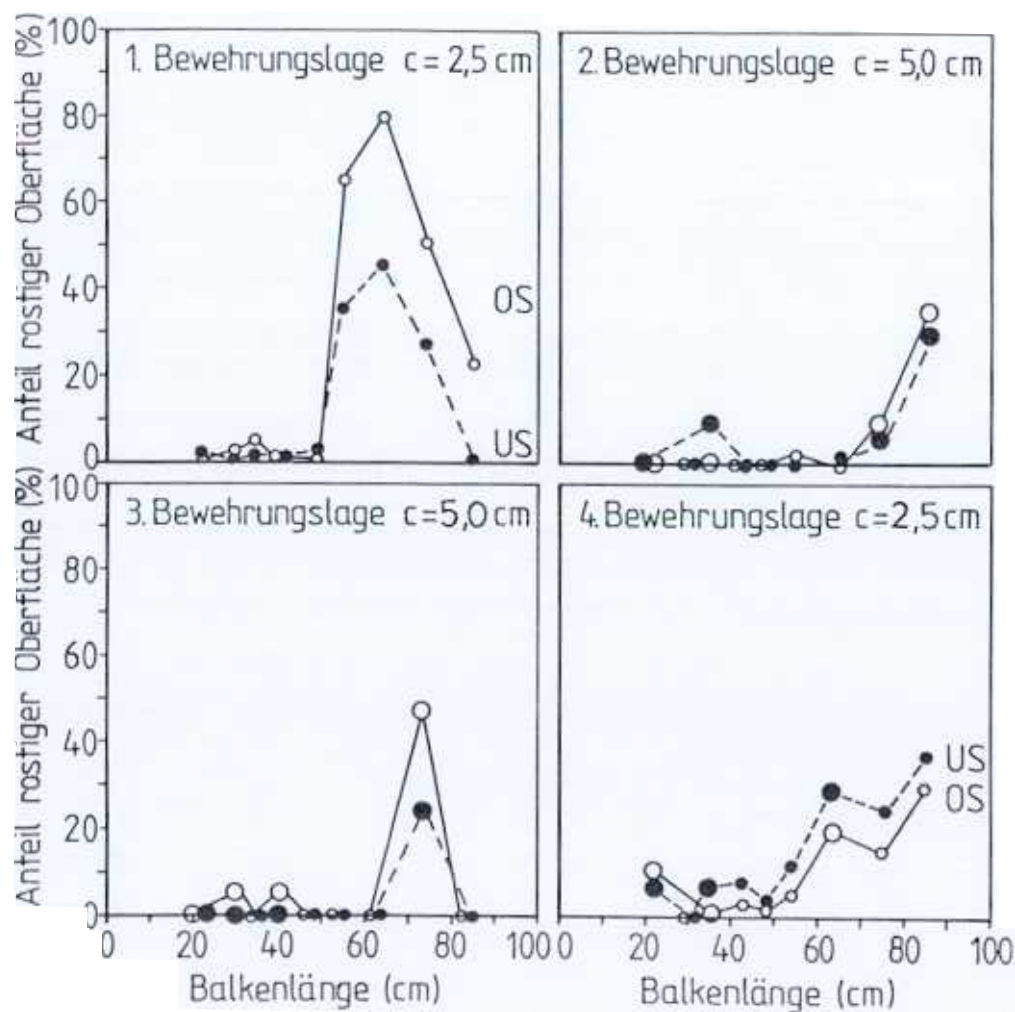
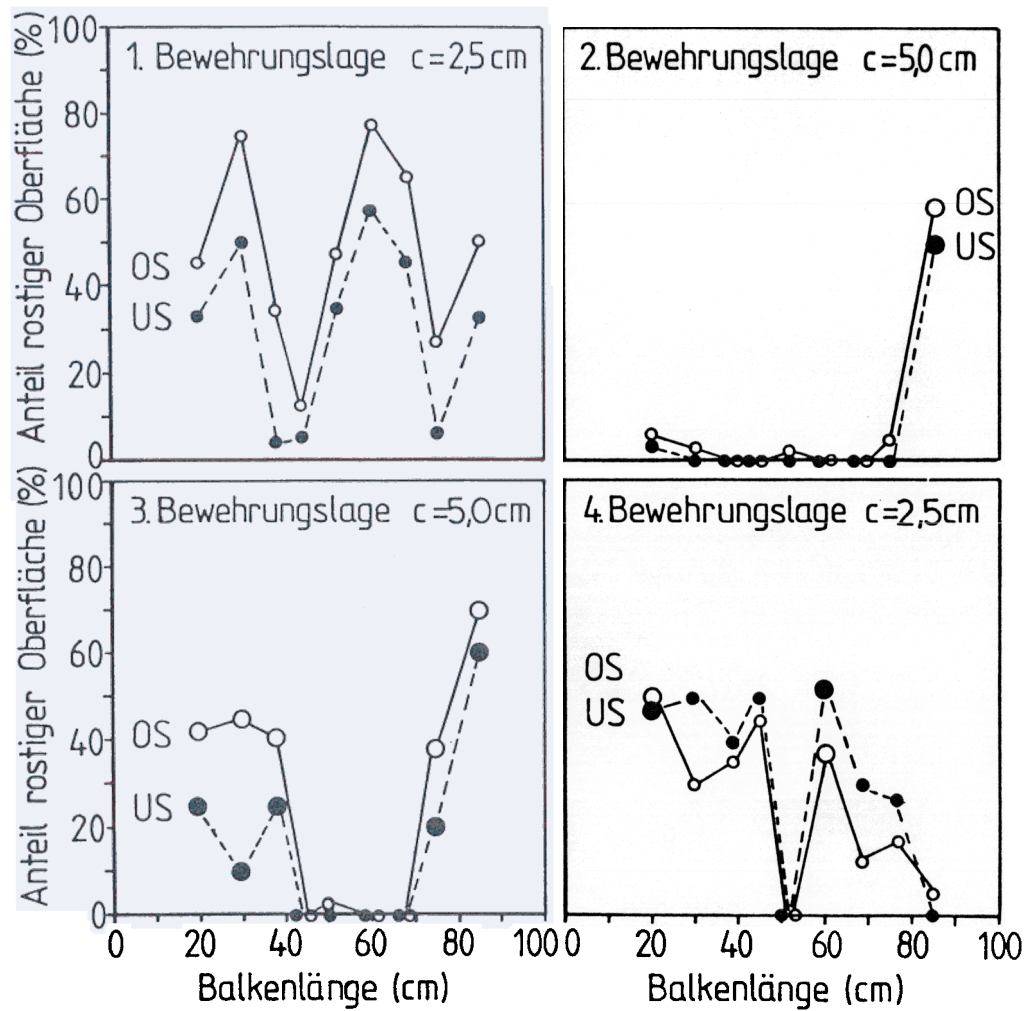


Abb. 15:
Anteil korrodierter (Rostprodukte)
Oberfläche entlang der Bewehrung,
ca. je 5 cm beidseitig der Biegerisse,
getrennt nach Stabober- und Stabunterseite

Balken 1.7
unverzinkter Betonstahl
innere Bewehrungslagen b und e (gemittelt)

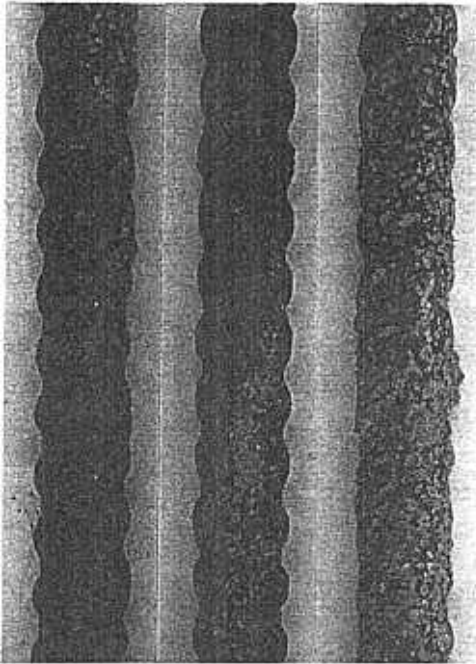


Balken 2.7
unverzinkter Betonstahl
innere Bewehrungslagen b und e (gemittelt)

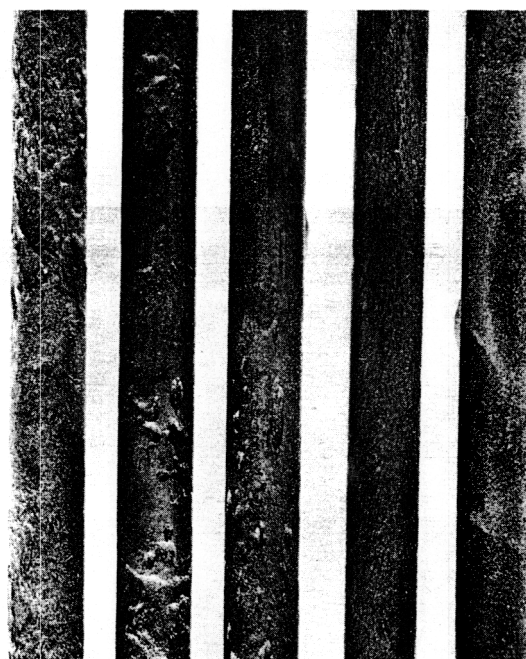
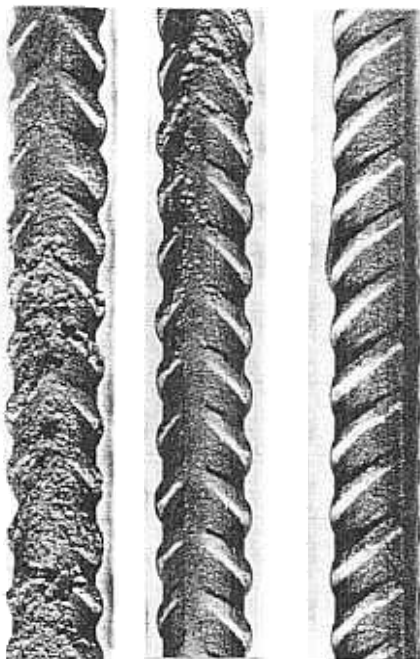
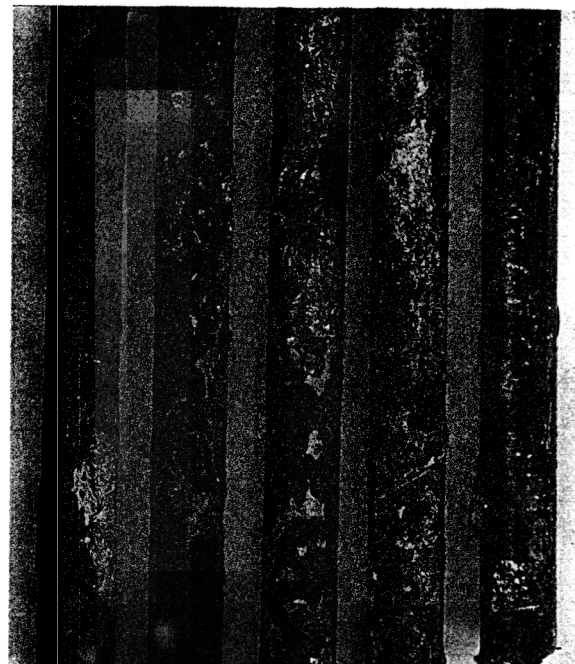
Abb. 16:
Anteil korrodierter (Rostprodukte)
Oberfläche entlang der Bewehrung,
ca. je 5 cm beidseitig der Biegeris-
se, getrennt nach Stabober- und Stab-
unterseite

BL = Bewehrungslage
OS = Oberseite des Stabes ○○
US = Unterseite des Stabes ●●
z.B. 0,15 = Breite der Biegerisse an
der Betonoberfläche
○● = Stahl nicht in Schubriß
○● = Stahl in Schubriß

unverzinkter Betonstahl



feuerverzinkter Spannstahl



Bezeichnung.	3e	4e	4e
E (cm)	85	60	50
Ober-/Unterseite	OS	OS	OS
Rißart	SR	SR	—
NT (mm)	0,95	0,38	0

4a	4a	4a	4d	3d
75	68	60	44	44
US	OS	OS	OS	US
SR	SR	SR	—	—
0,14	0,26	0,17	0,08	0

E = Entfernung vom Balkenende, NT = max. Narbentiefe
SR = Schubriß

Abb. 17:

Korrosion der unverzinkten Betonstähle und feuerverzinkten Spannstähle in Schubrisen (Balken 2.7)

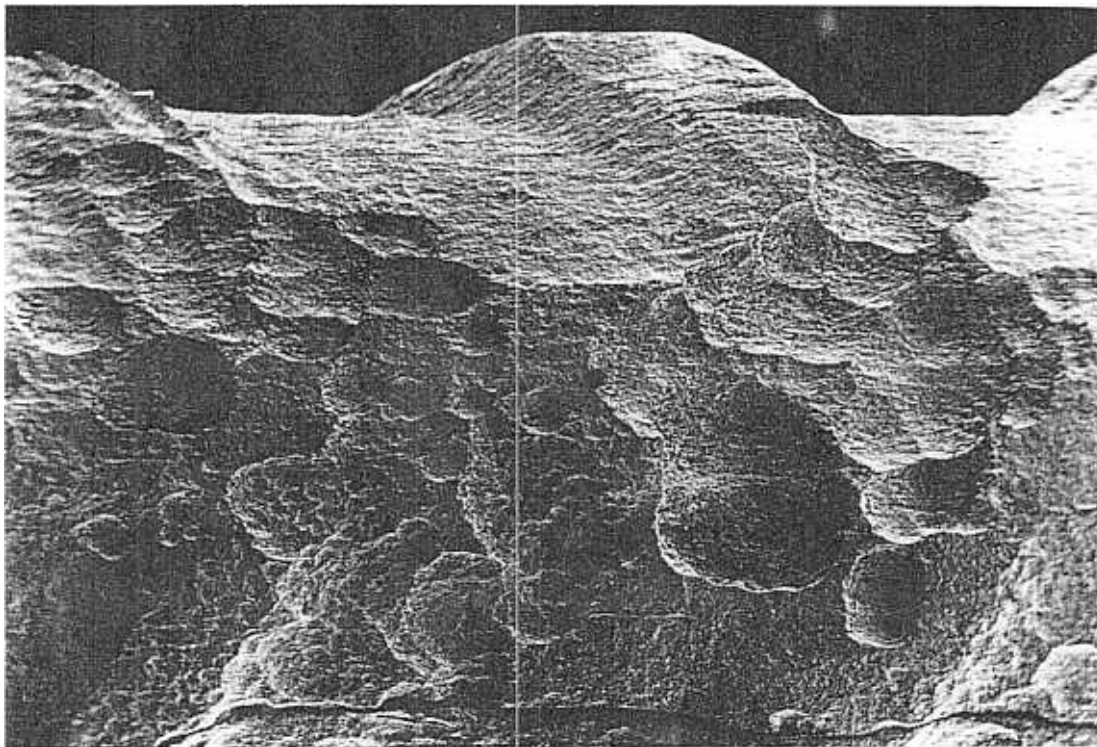


Abb. 18:
Korrosion eines Betonstahls im ungerissenen Betonbe-
reich (Balken 2.7, $c = 2,5$ cm), Probe gebeizt

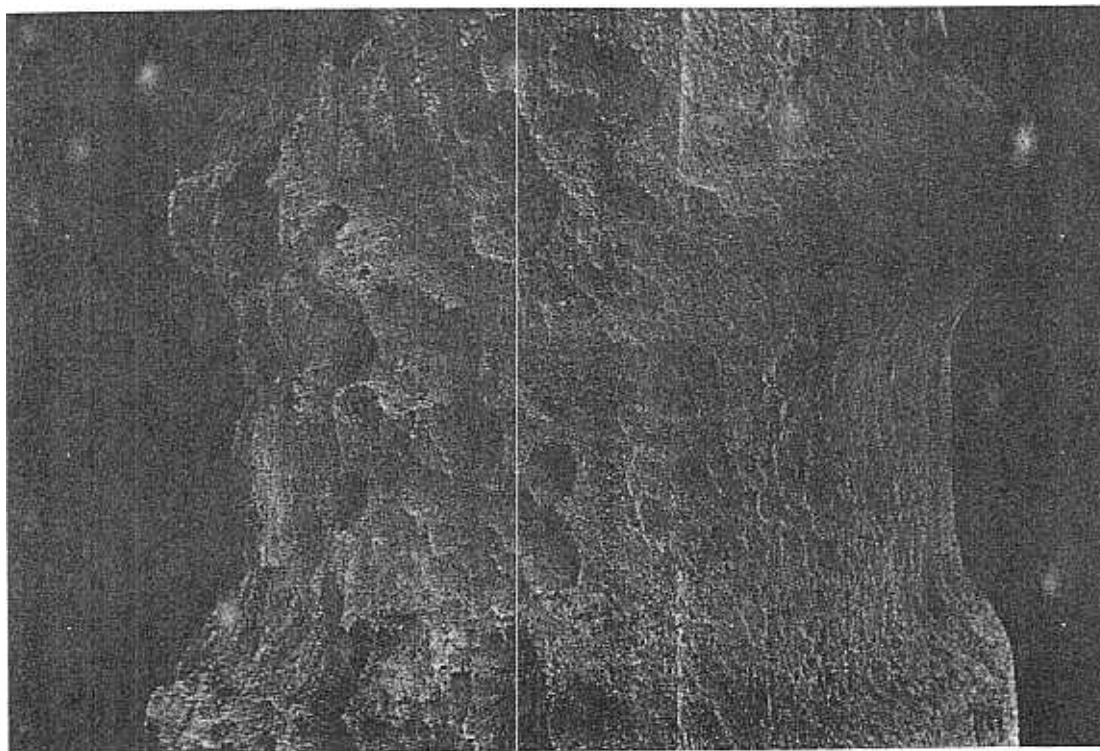


Abb. 19:
Korrosion eines Betonstahls im ungerissenen Betonbe-
reich (Balken 2.7, $c = 2,5$ cm), links: Oberseite,
rechts: Unterseite, Probe gebeizt

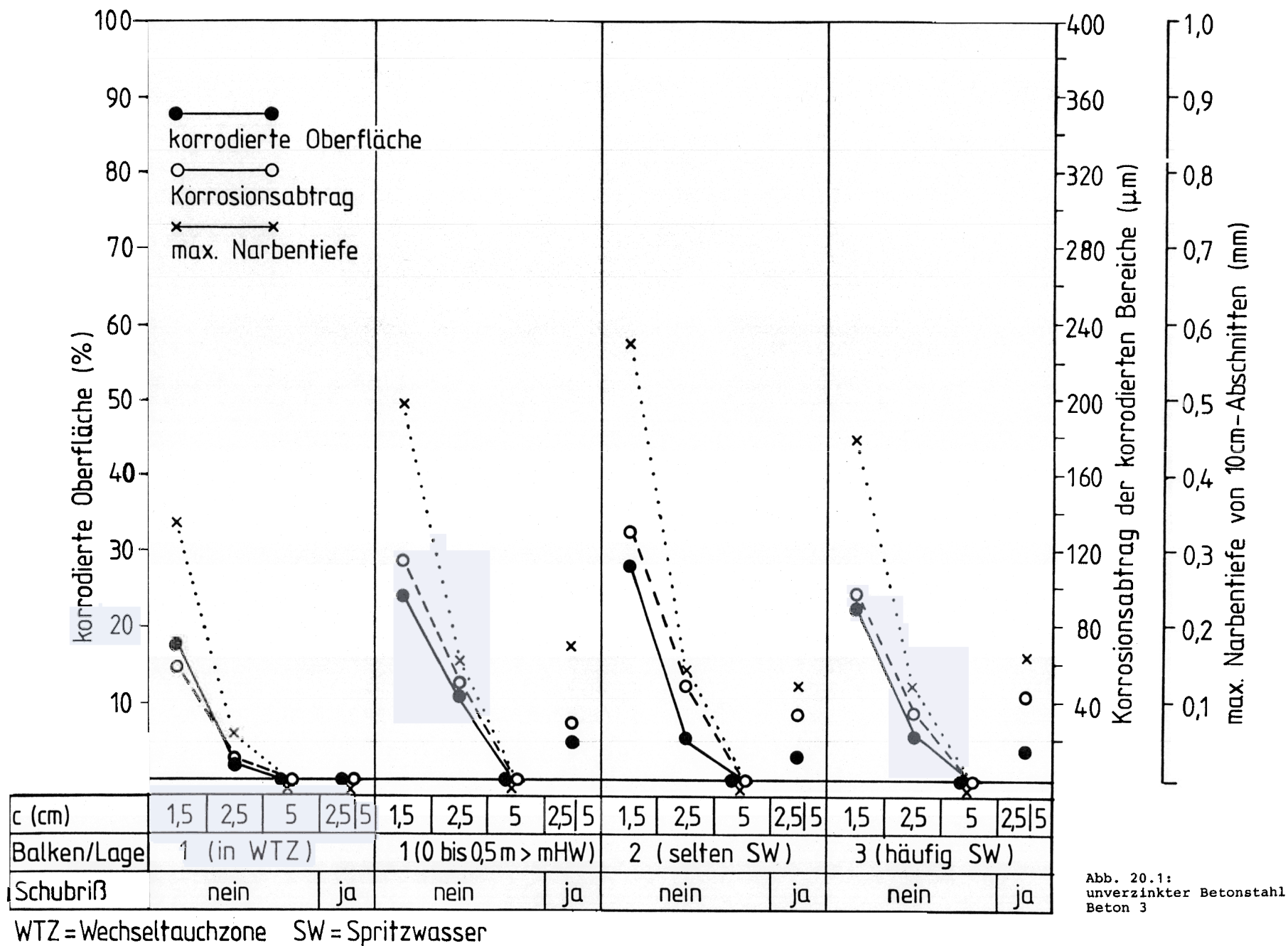
(

Seite 122 bis 124

Abb. 20:

Einfluß der Balkenlage, der Betongüte, der Betondeckung und von Schubrisen auf das Korrosionsverhalten der unverzinkten Betonstähle und der feuerverzinkten Spannstähle

hier: Mittelwerte aller Versuchswerte



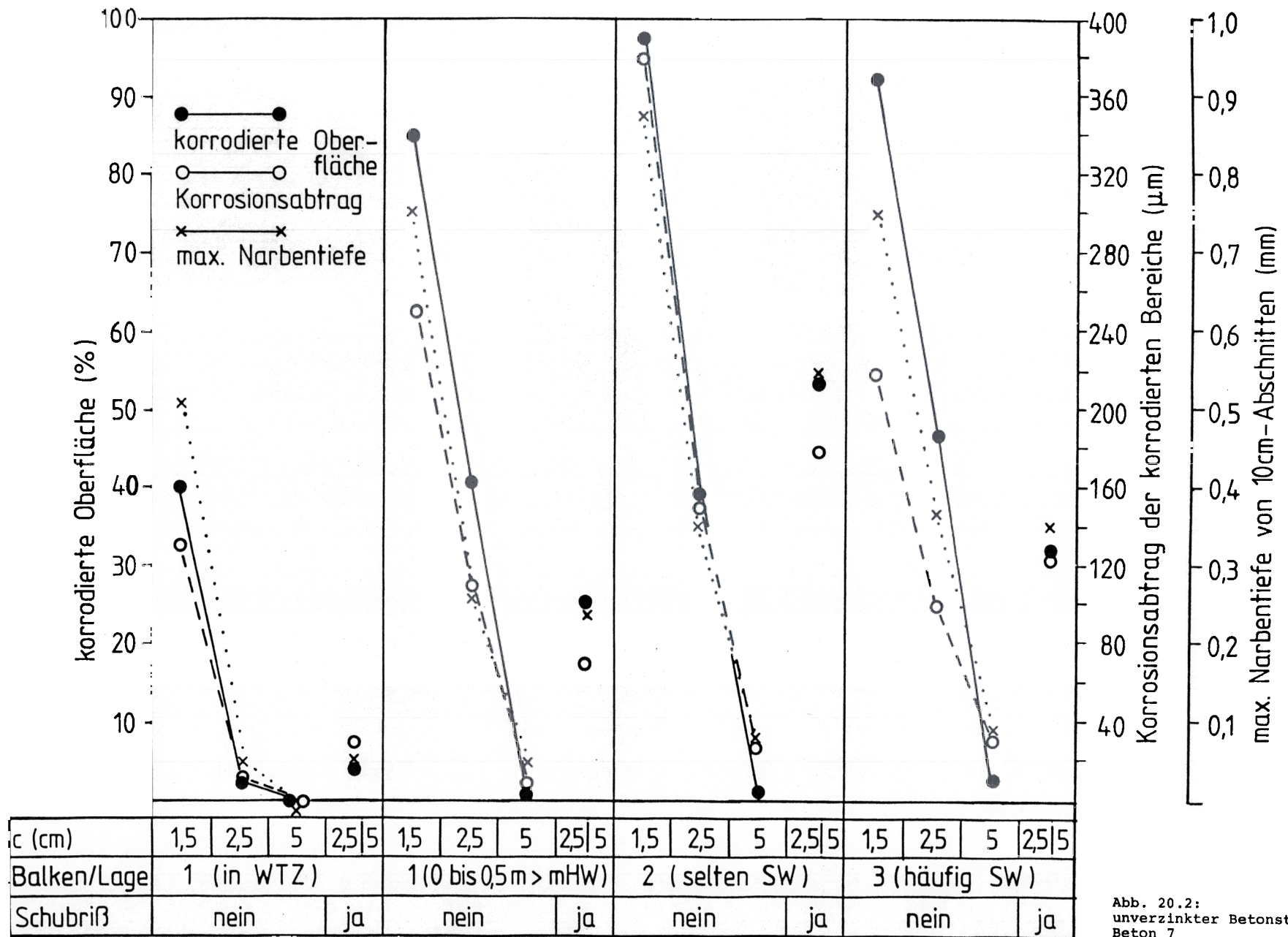
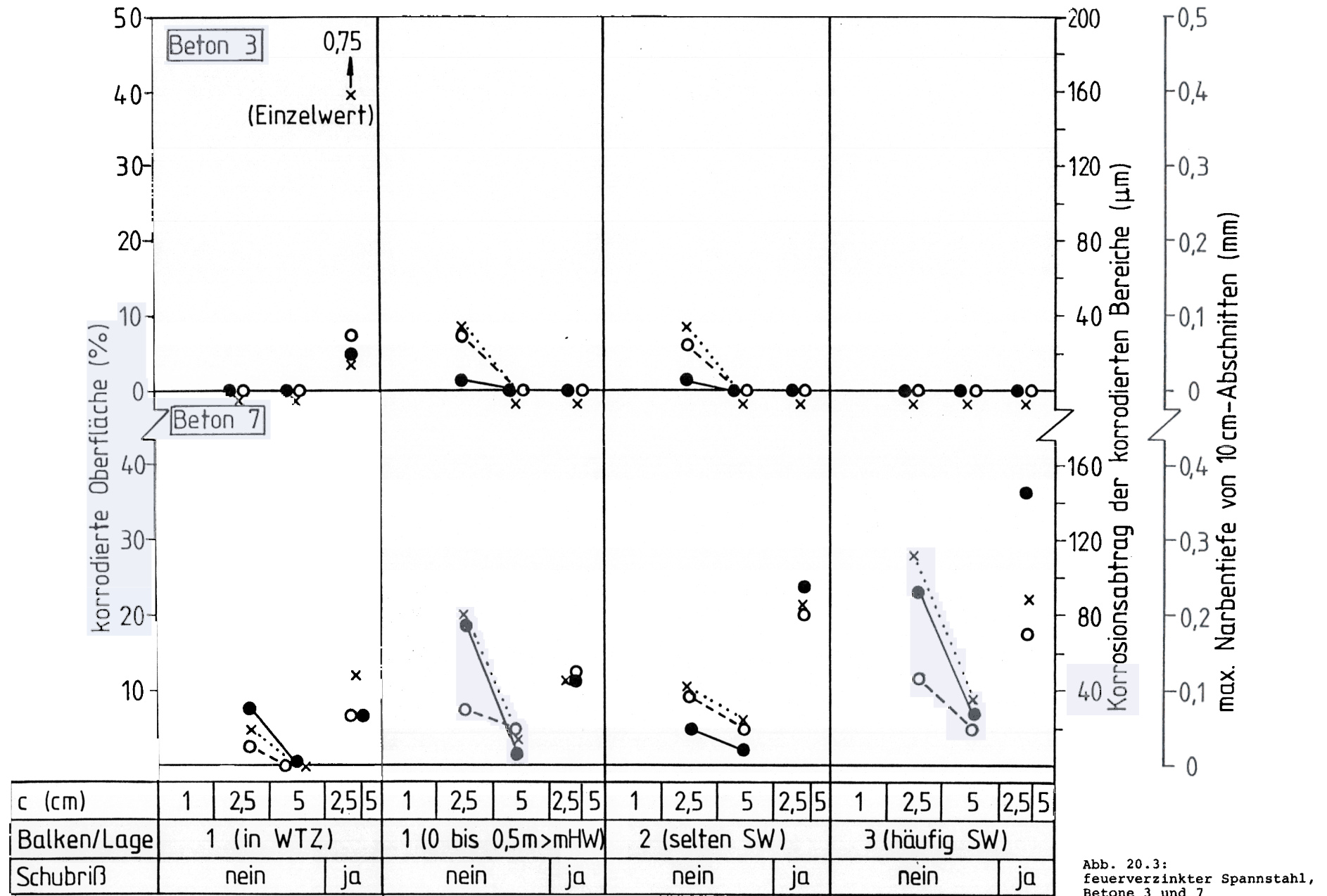
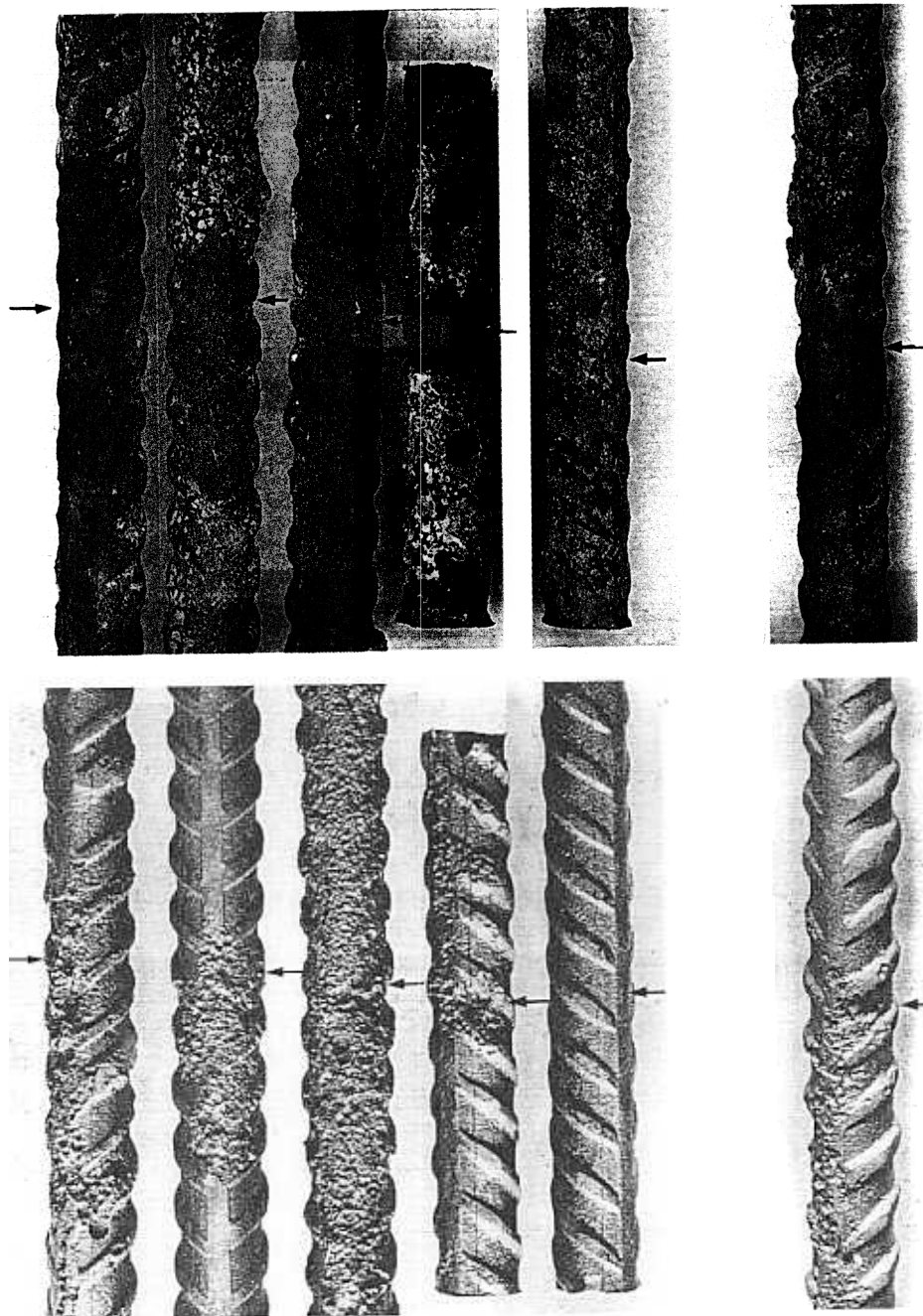


Abb. 20.2:
unverzinkter Betonstahl,
Beton 7



Nr. ① ② ③ ④ ⑤ ⑥



Bezeichnung.	1b	1e	1e	1b	1b
E (cm)	85	85	60	44	75
Ober-/Unterseite	OS	OS	OS	OS	OS
Rißart	BR	BR	BR	BR	BR
w (mm)	0,50	0,35	0,225	0,15	0,15
NT-R (mm)	1,20	0,71	0,33	0,45	0
NT (mm)	0,85	0,33	0,72	0,09	0

2b
85
OS
BR/SR
0,50
0,42
0,62

E = Entfernung vom Balkenende, NT-R = Narbentiefe im Riß,
NT = max. Narbentiefe außerhalb Riß, BR = Biegerið, SR = Schubriß
Abb. 21:

**Korrosion unverzinkter Betonstähle in Biegerissen des Betons
(Balken 2.7)**

Nr.

①

②

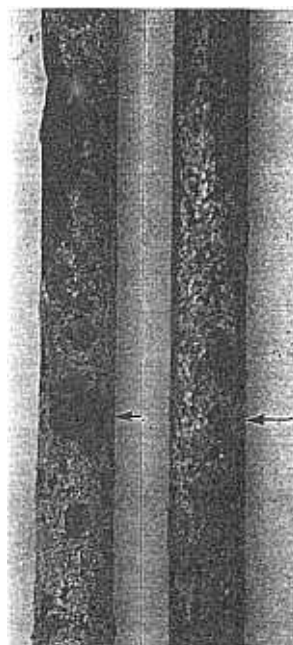
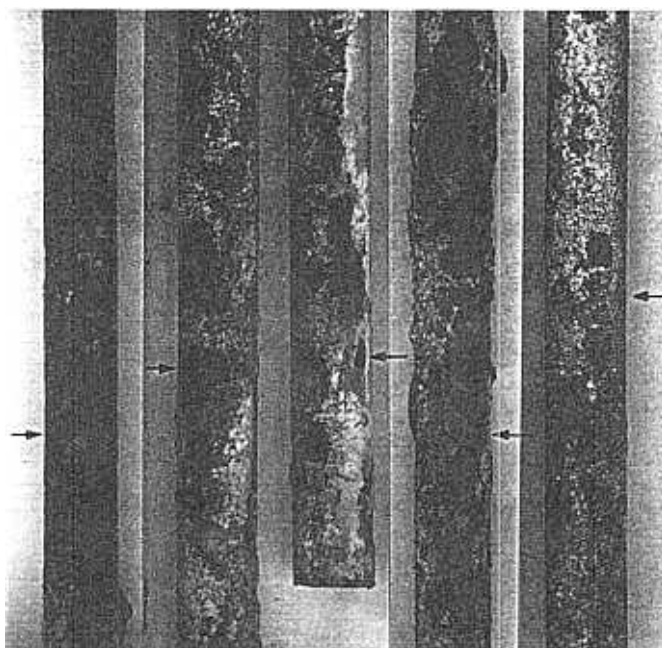
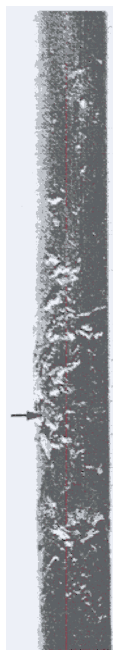
③

④

⑤

⑥

⑦



Bezeichng.	1a	1a	1a	1d	1a
E (cm)	84	60	30	60	75
Ober-/Unter- seite	OS	OS	OS	OS	OS
Rißart	BR/SR	BR	BR	BR	BR
w (mm)	0,50	0,35	0,25	0,20	0,15
NT-R (mm)	0,52	0,33	0,21	0,02	0
NT (mm)	0,28	0	0,05	0,15	0,08

2a	2a
84	60
OS	OS
BR/SR	BR
0,50	0,35
0,24	0,05
0,52	0,07

E = Entfernung vom Balkenende, NT-R = Narbentiefe im Riß,
NT = max. Narbentiefe außerhalb Riß, BR = Biegerið, SR = Schubriß

Abb. 22:

Korrosion feuerverzinkter Spannstähle in Biegerissen des Betons
(Balken 2.7)

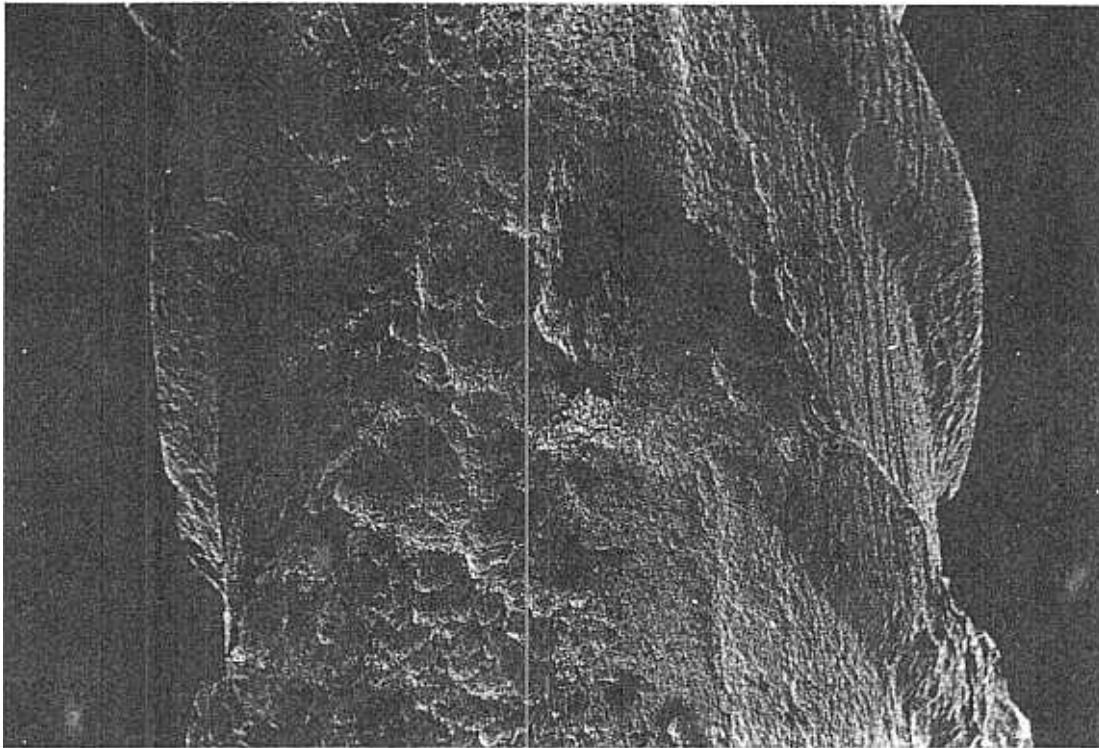
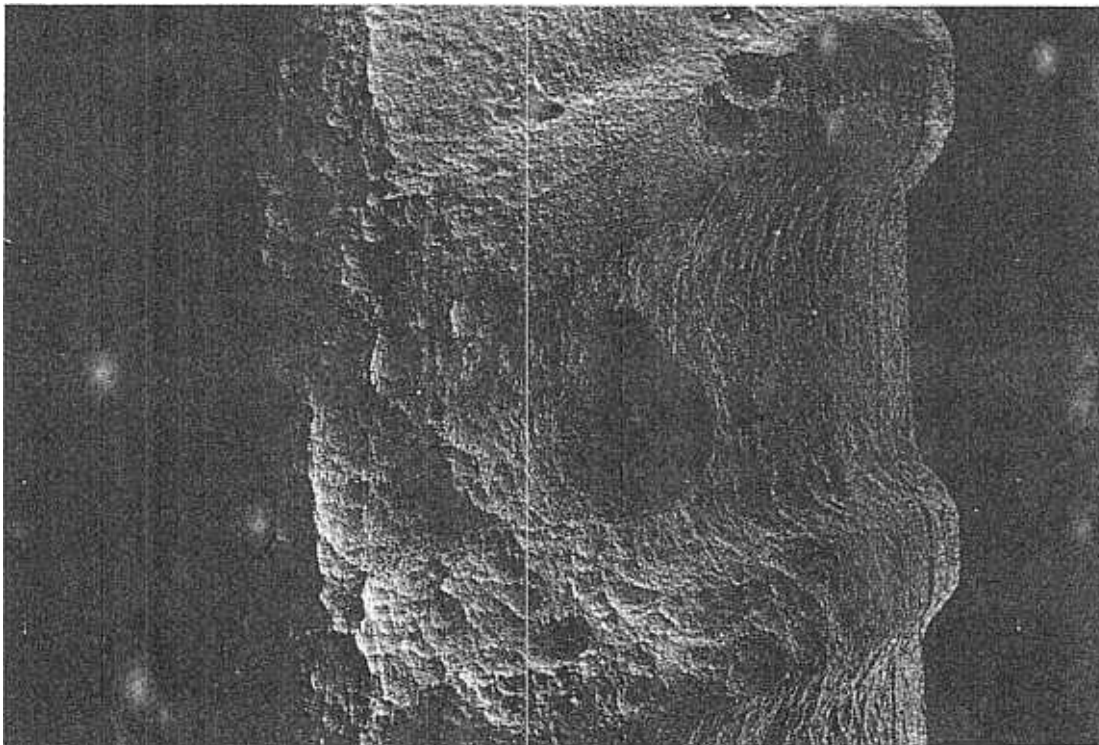


Abb. 23:
Korrosion eines Betonstahls im Biegeri des Betons (Balken
3.7, $c = 2,5$ cm, $w = 0,20$ mm, Narbentiefe = $0,48$ mm), Probe
gebeizt



18:1

Abb. 24:
Korrosion eines Betonstahls im Biegeri des Betons (Balken
2.7, $c = 2,5$ cm, $w = 0,20$, Narbentiefe = $0,74$ mm), Probe
gebeizt

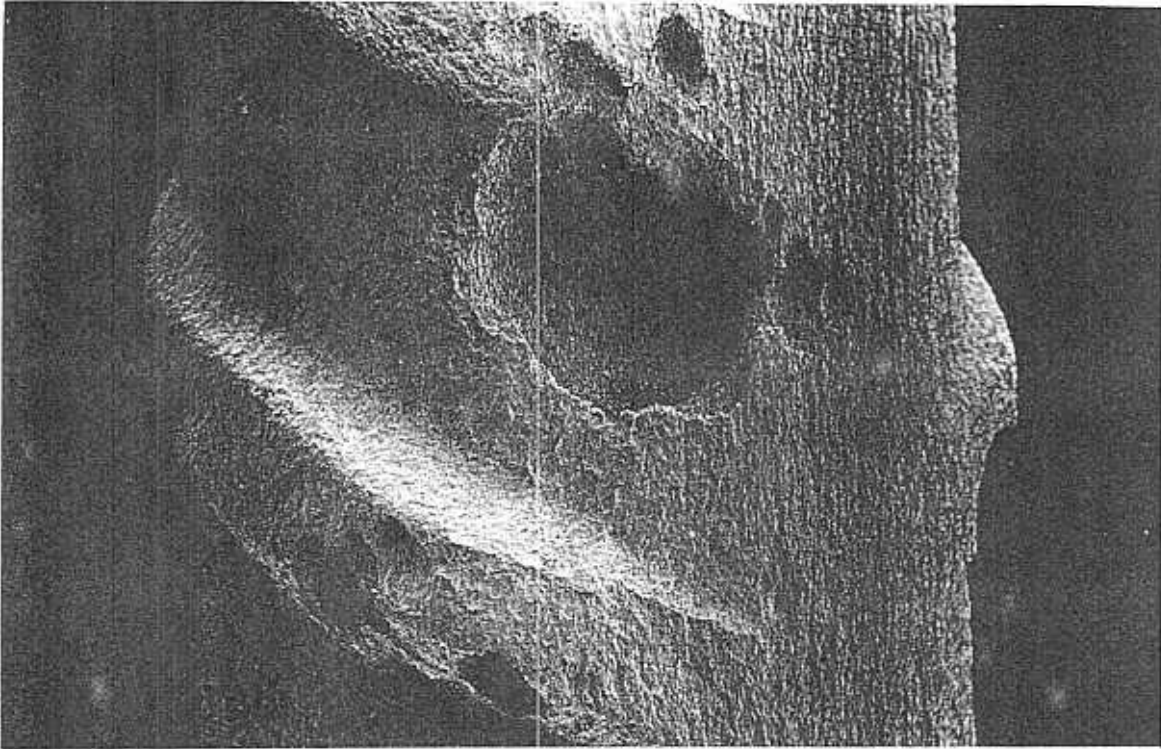


Abb. 25:
Korrosion eines Betonstahls im Biege-riß des Betons (Balken
1.3, $c = 2,5$ cm, $w = 0,35$ mm, Narbentiefe = $0,62$ mm), Probe
gebeizt

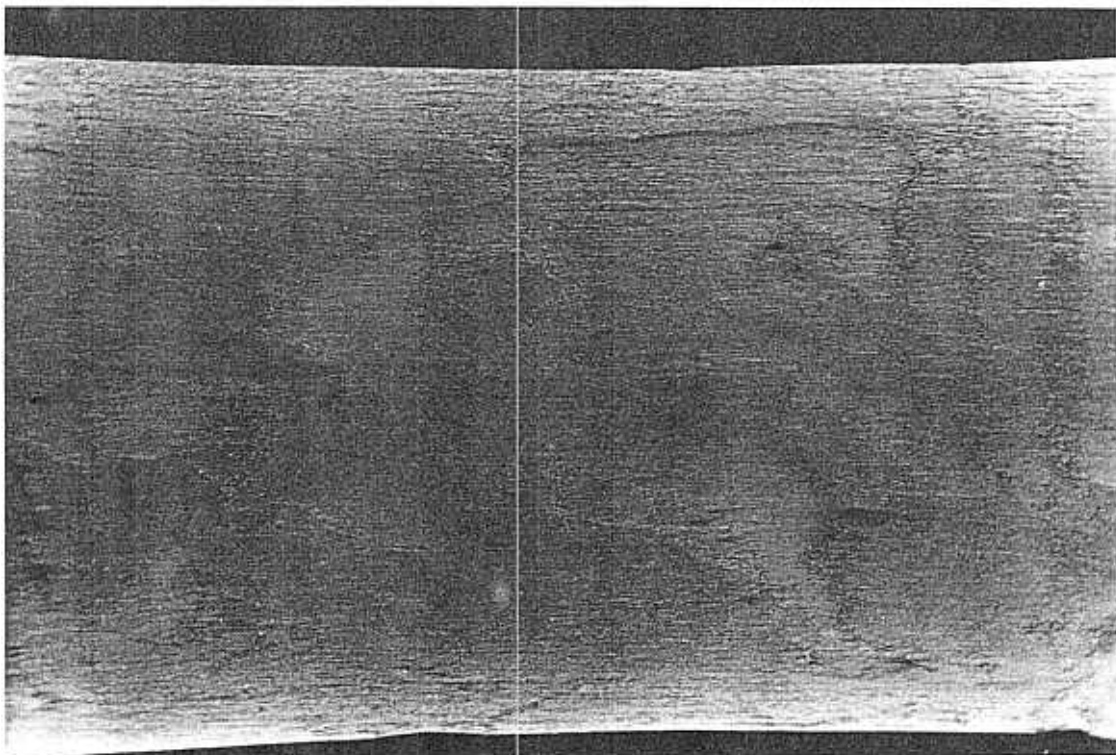
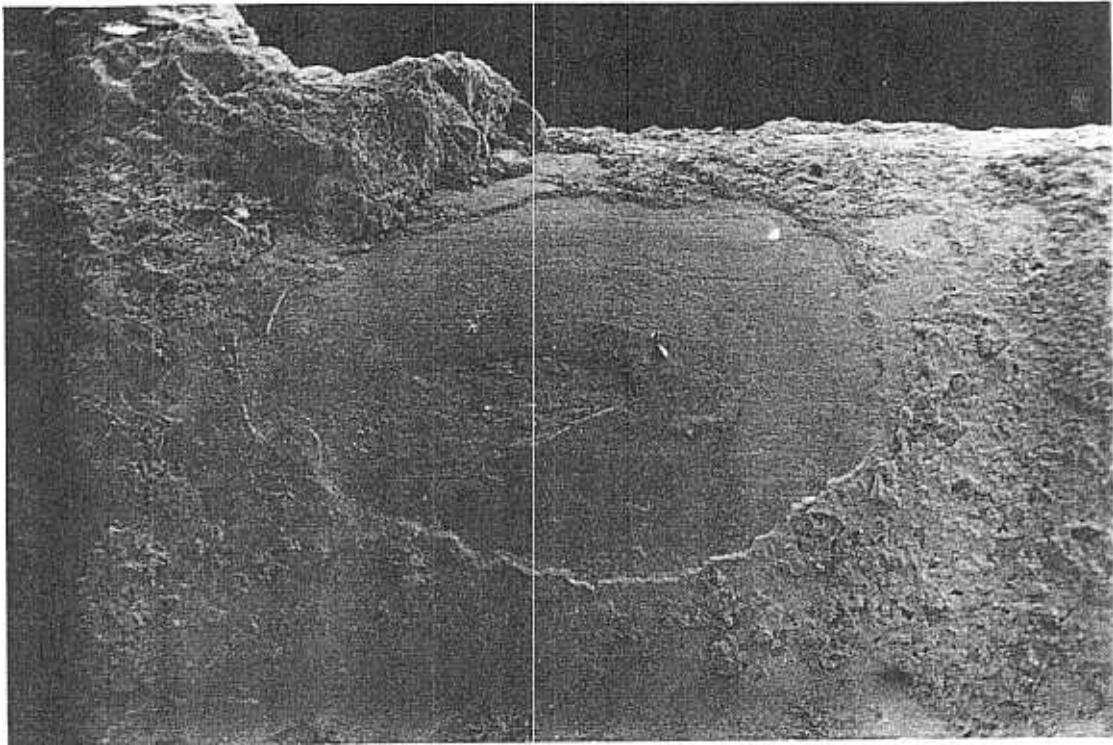
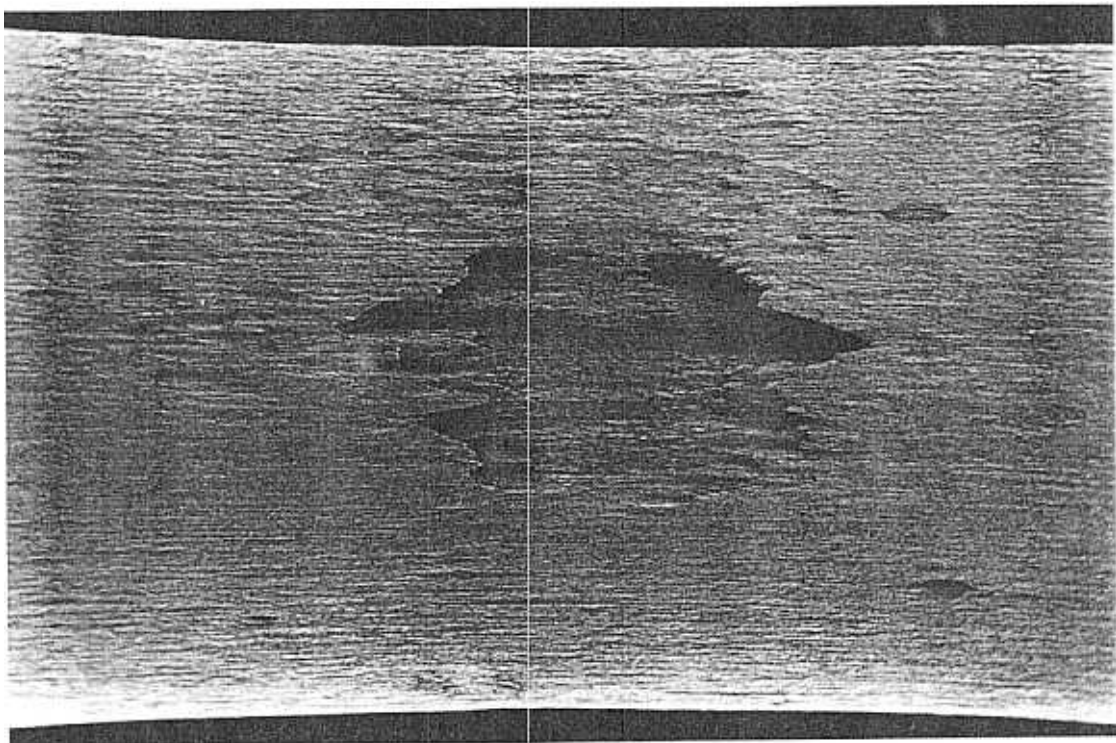
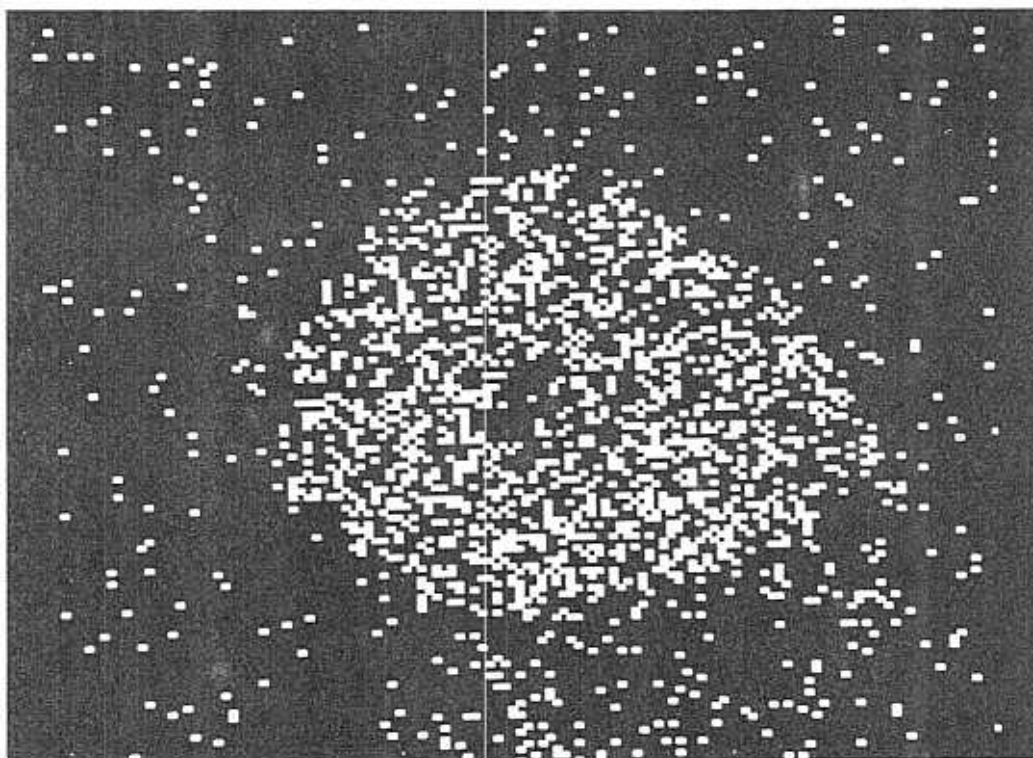


Abb. 26:
Korrosion eines feuerverzinkten Spannstahls im Biege-riß des
Betons (Balken 2.7, $c = 2,5$ cm, $w = 0,25$ mm, Narbentiefe
= $0,11$ mm), Probe gebeizt



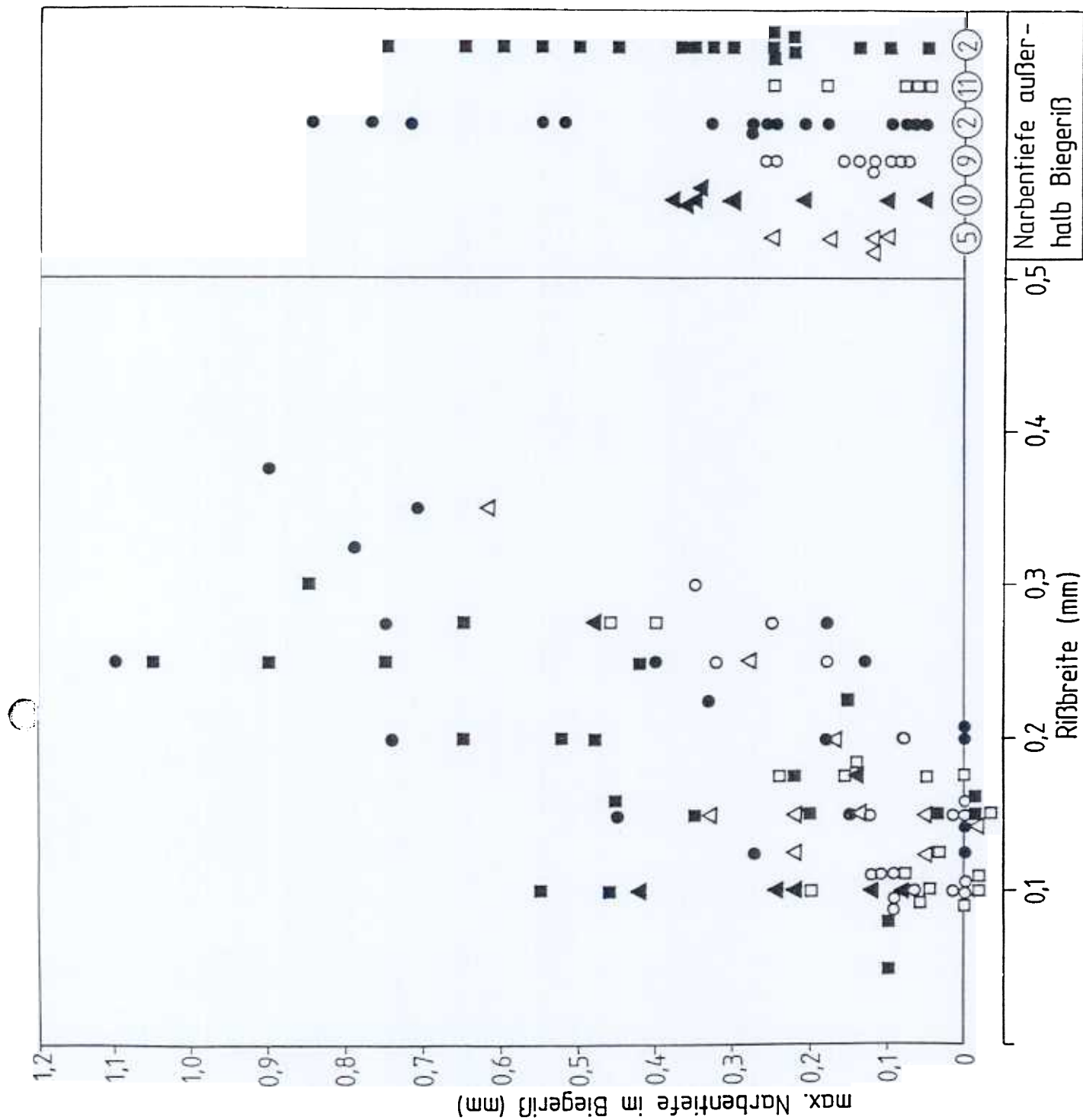
Spannstahl

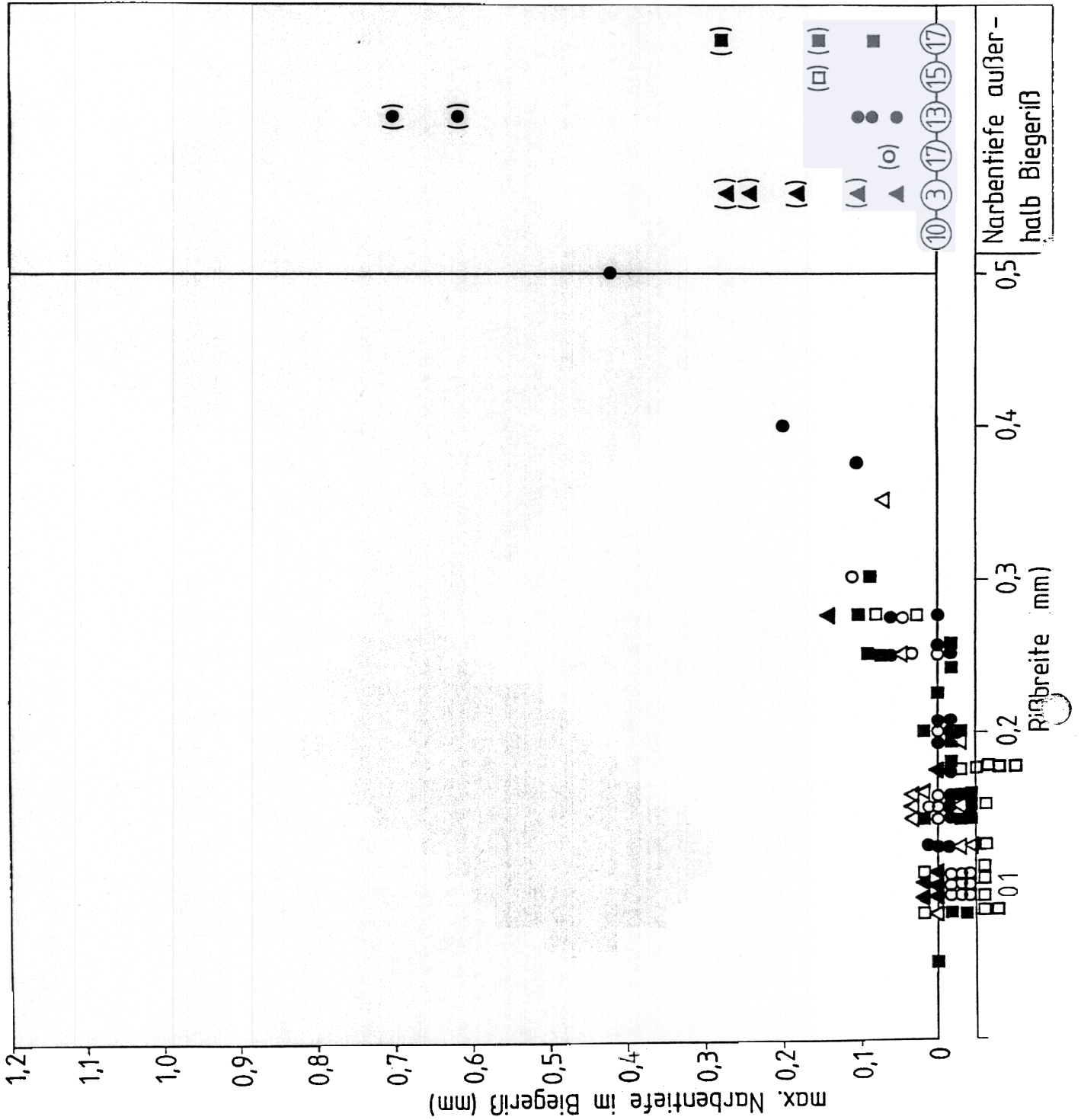


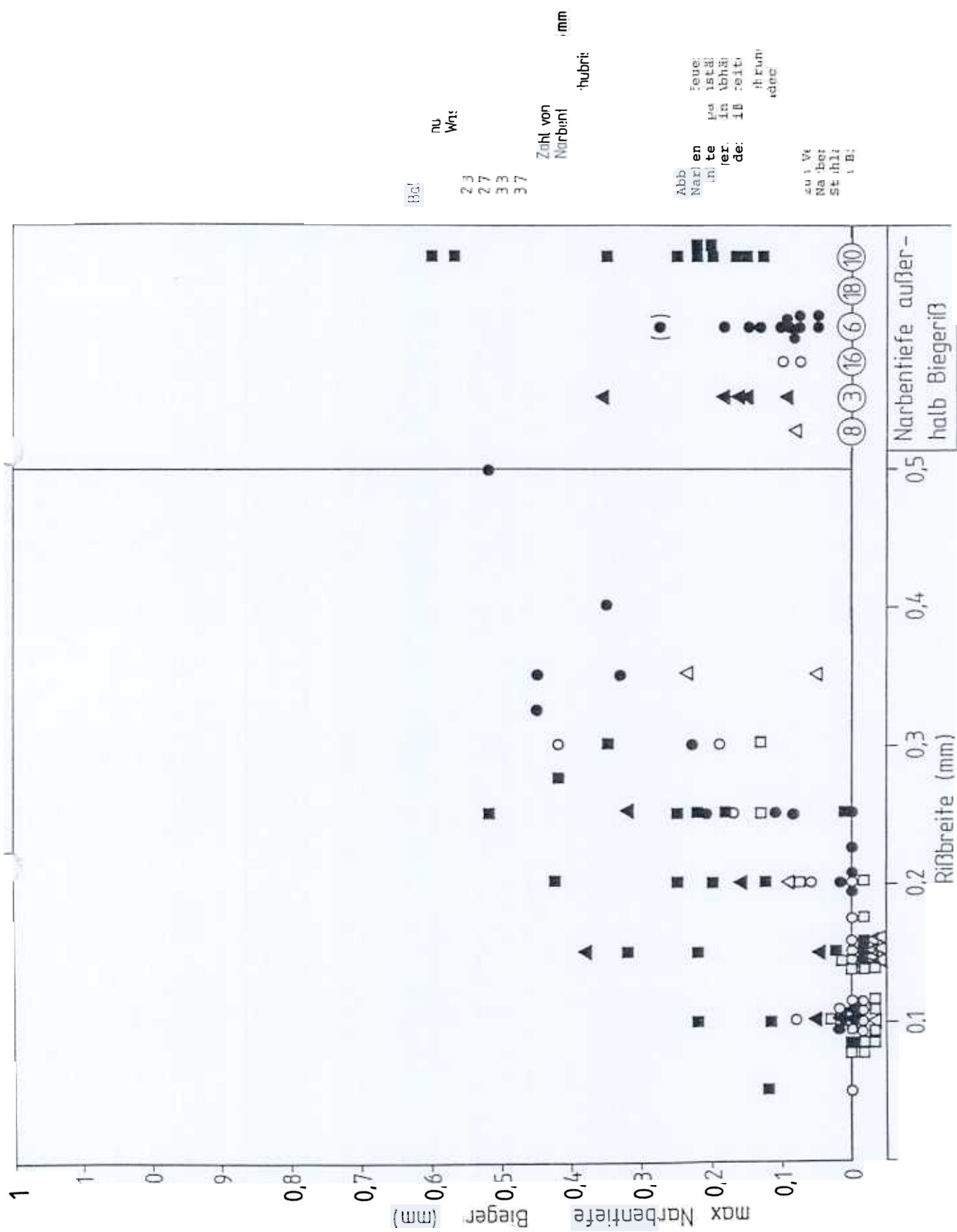


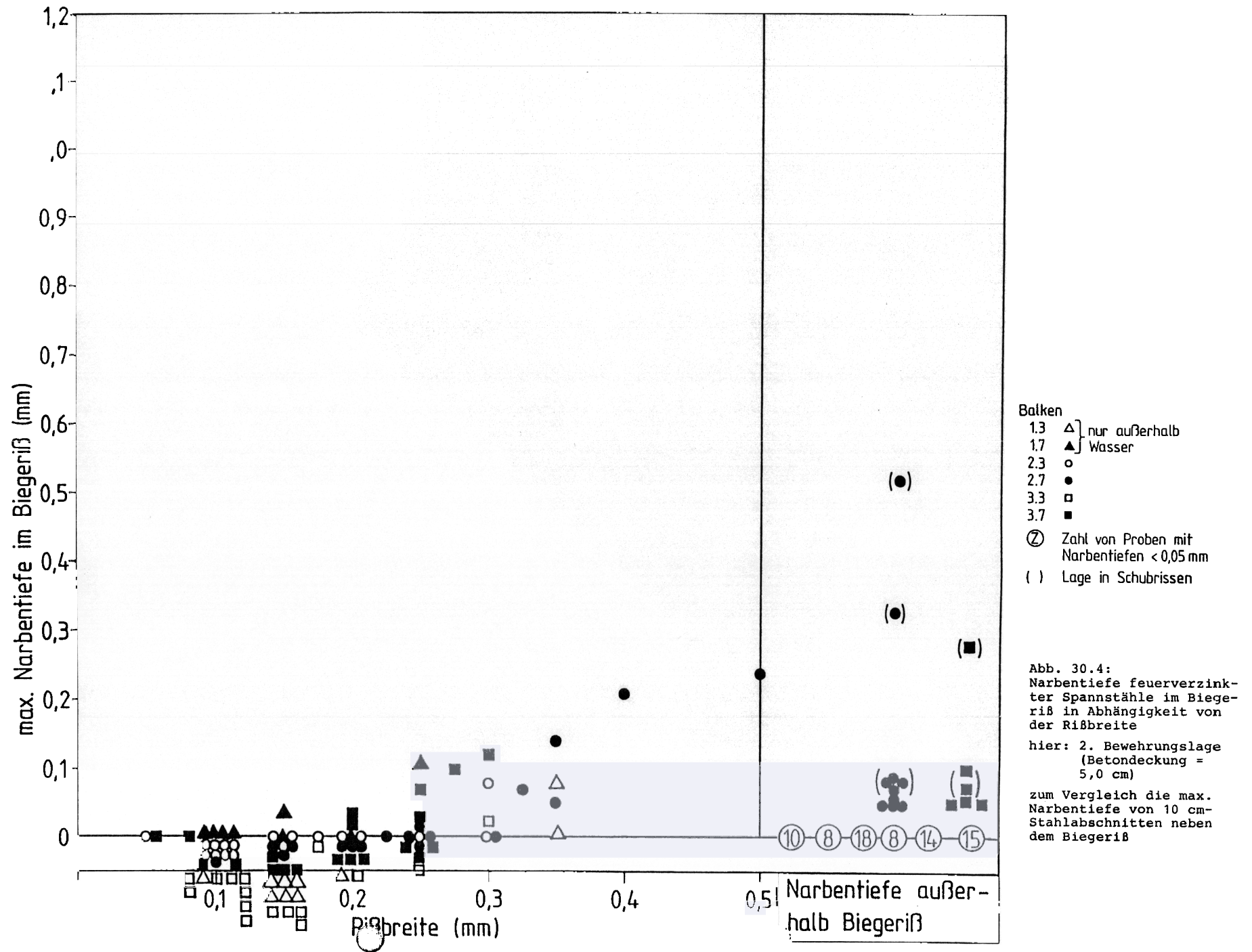
Verteilungsbild von Eisen

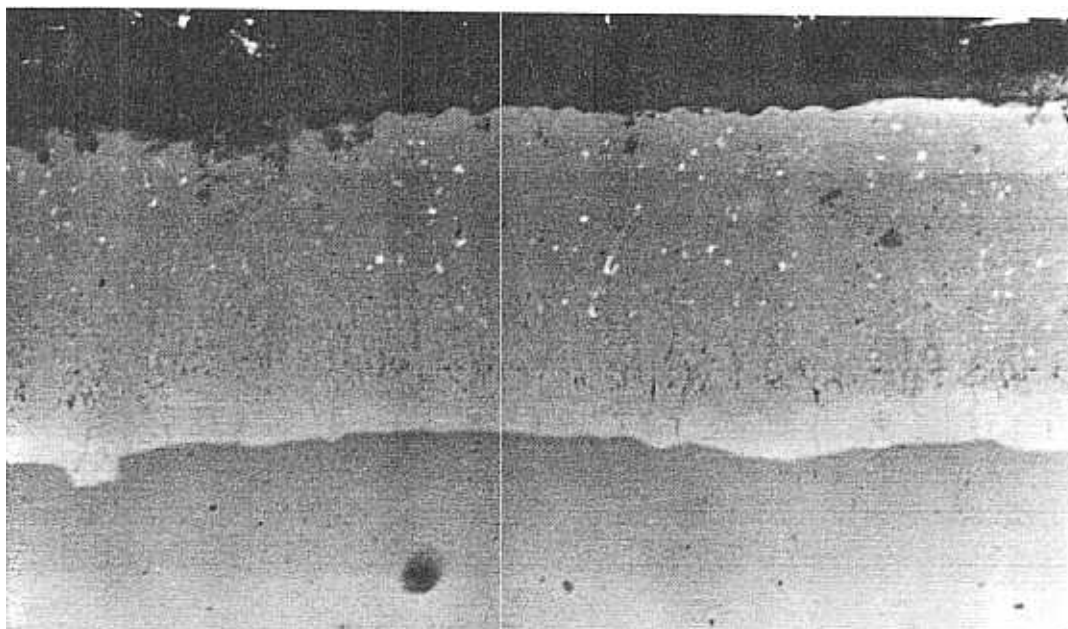
Abb. 29:
Korrosion eines feuerverzinkten Spannstahls im Biegeriß des
Betons (Balken 1.7, $c = 2,5$ cm, $w = 0,25$ mm, Narbentiefe =
0,02 mm)



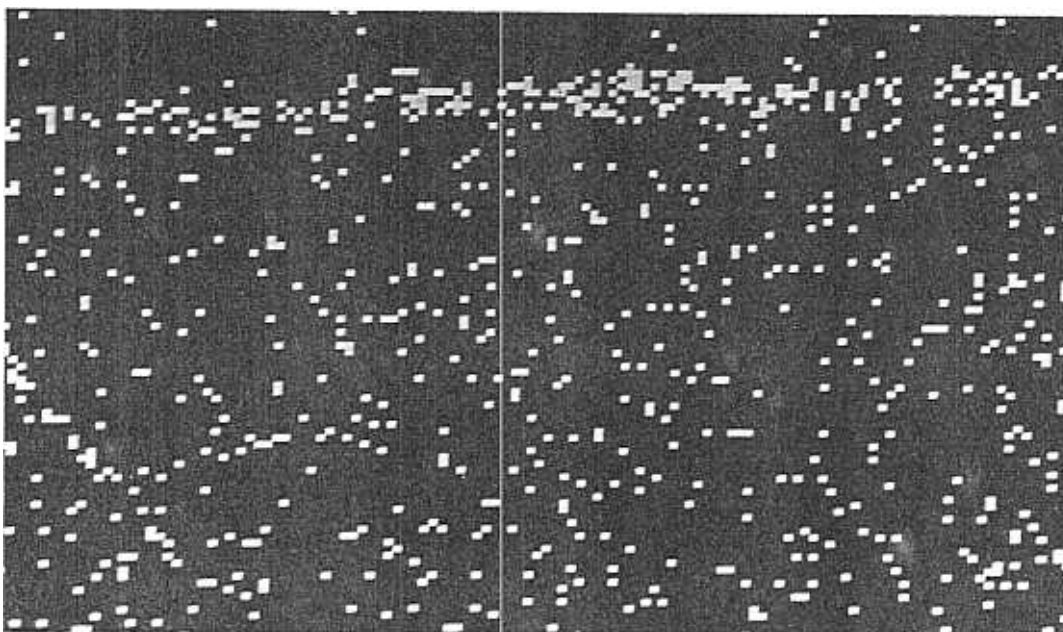








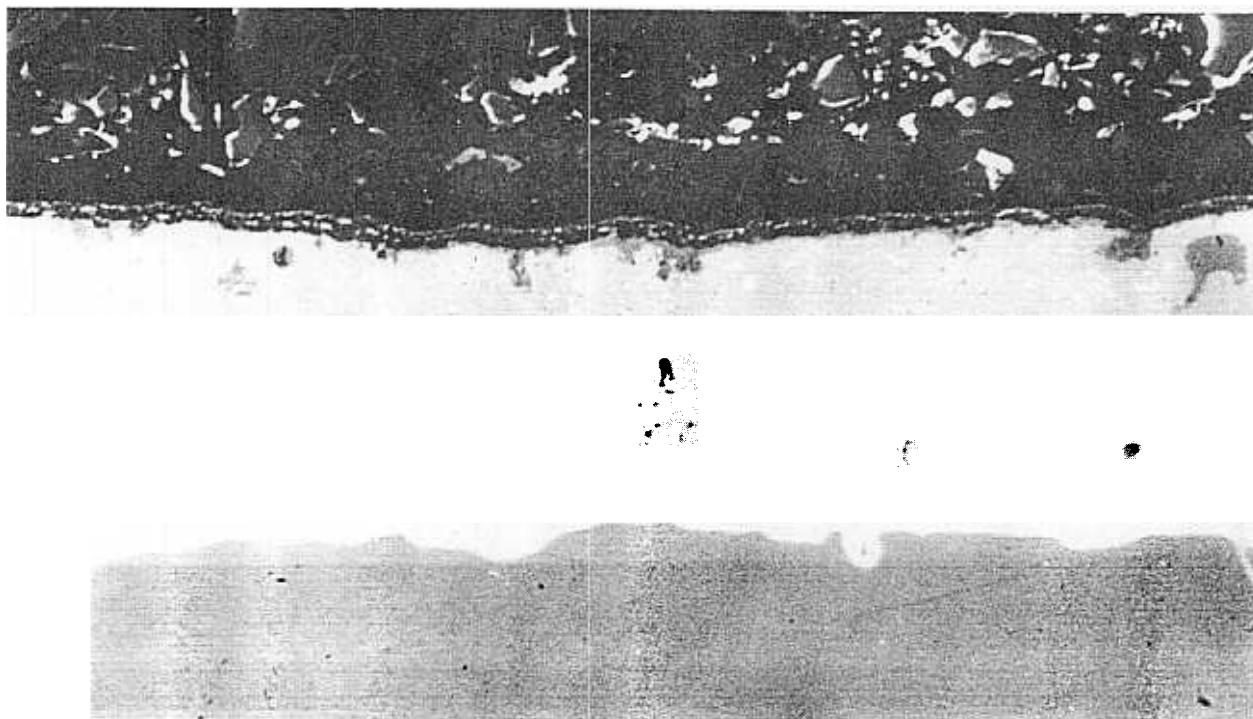
310:1



310:1

Calcium-Verteilung (energiedispersive Röntgen-analyse)

Abb. 31:
Zinkkorrosion als Folge einer Reaktion zwischen Zink
und Calciumhydroxid (Zinkabtrag $\approx 10 \mu\text{m}$)



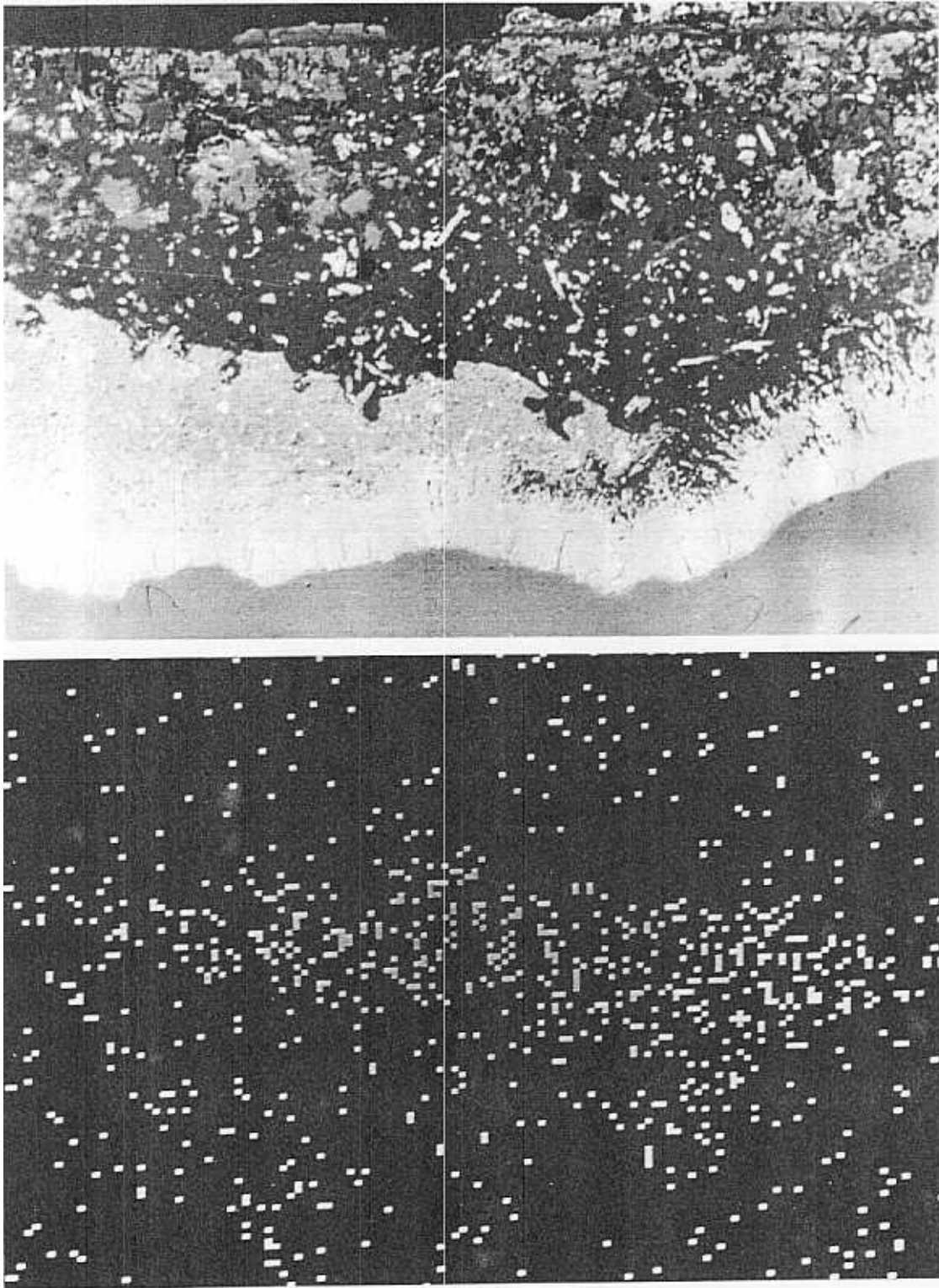
Punktanalysen der Reaktionsschicht (energiedispersive Röntgenanalyse):

Si	=	22,4	-	14,1	-	4,7	-	7,4	} Mass.
Cl	=	0	-	0	-	0	-	0	
Ca	=	37,0	-	26,3	-	9,5	-	24,2	
Fe	=	1,6	-	0	-	0	-	0	
Zn	=	39,0	-	59,6	-	85,8	-	68,4	

ohne Berücksichtigung von Sauerstoff Wasserstoff

Abb. 32:

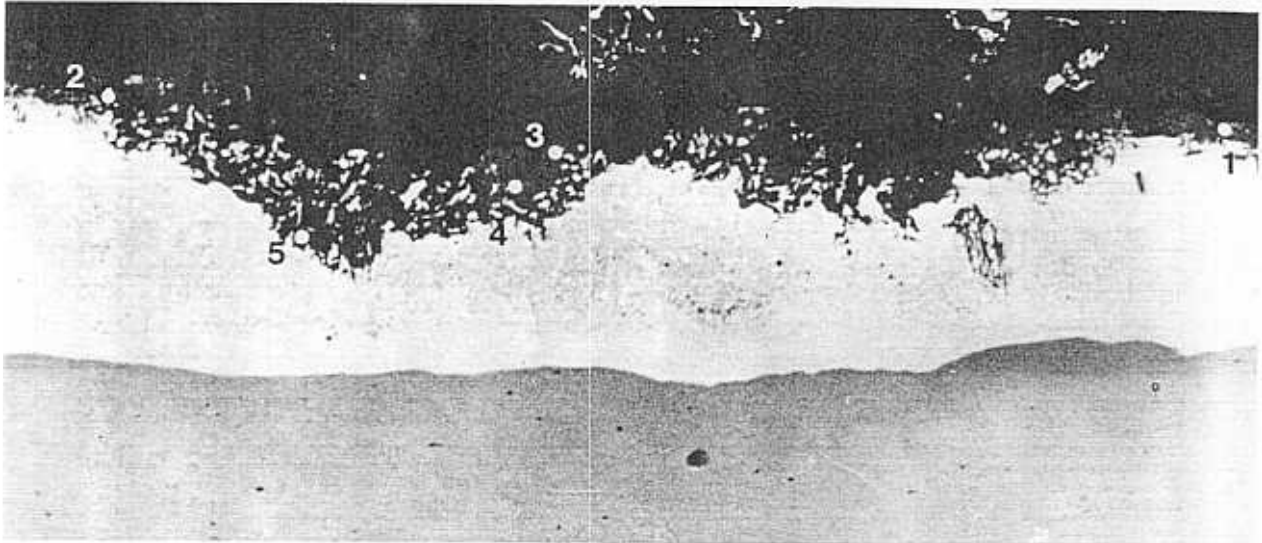
Zinkkorrosion als Folge einer Reaktion zwischen Zink und Calciumhydroxid



Chloridverteilung (energiedispersive Röntgenanalyse)

Abb. 33:

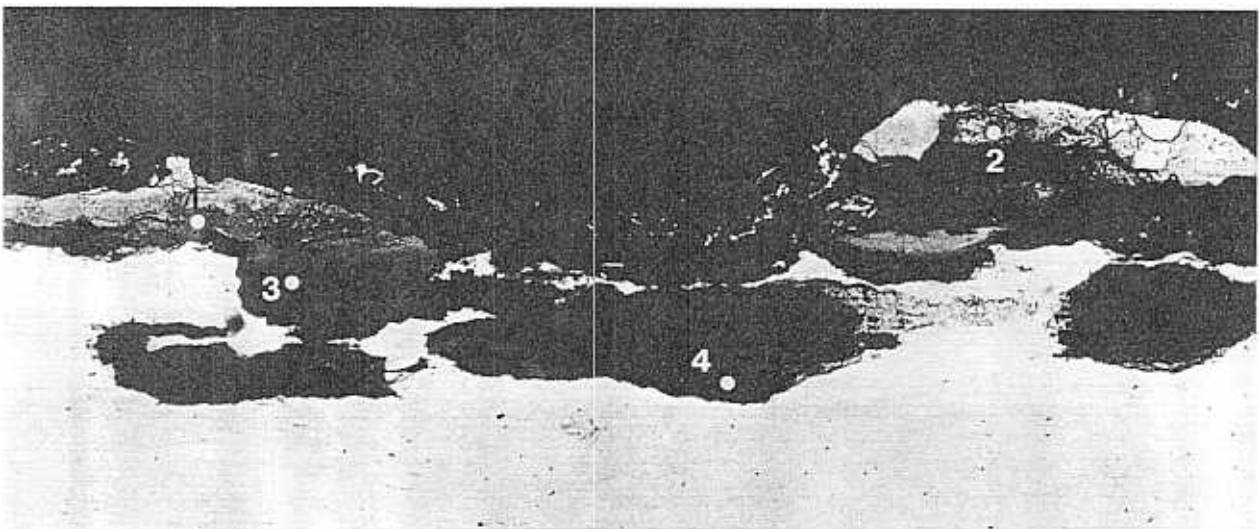
Zinkkorrosion als Folge einer Reaktion zwischen Zink und
chloridhaltigem Beton



Ort	1	2	3	4	5
Cl	0,5	6,4	12,4	14,6	28,4
Ca	26,4	14,3	0,6	1,2	0
Zn	73,1	79,4	87,0	84,2	71,6

Abb. 34:

Analyse der Korrosionsprodukte des Zinks nach Chloridkorrosion
(Angaben in Mass.%)



Ort	1	2	3	4
Cl	33,6	24,6	5,0	14,8
Fe	14,2	7,3	49,7	49,2
Zn	52,2	68,1	45,3	36,0

Abb. 35:

Analyse der Korrosionsprodukte des Zinks und Stahls (Stahlunter-
grund) nach Chloridkorrosion (Angaben in Mass.%)

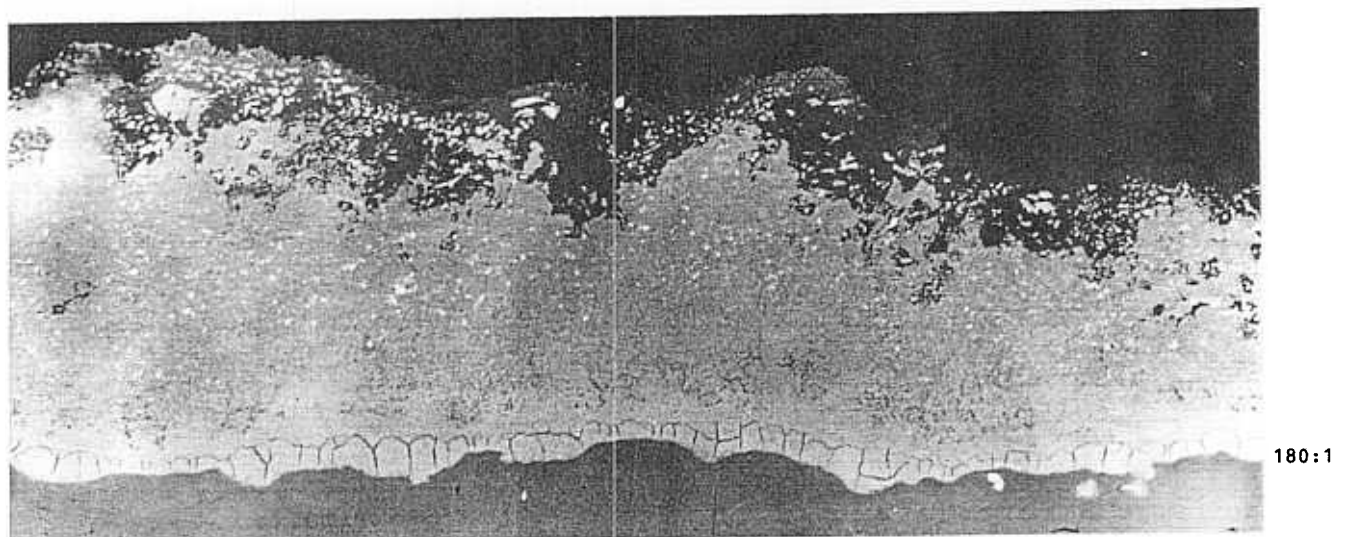
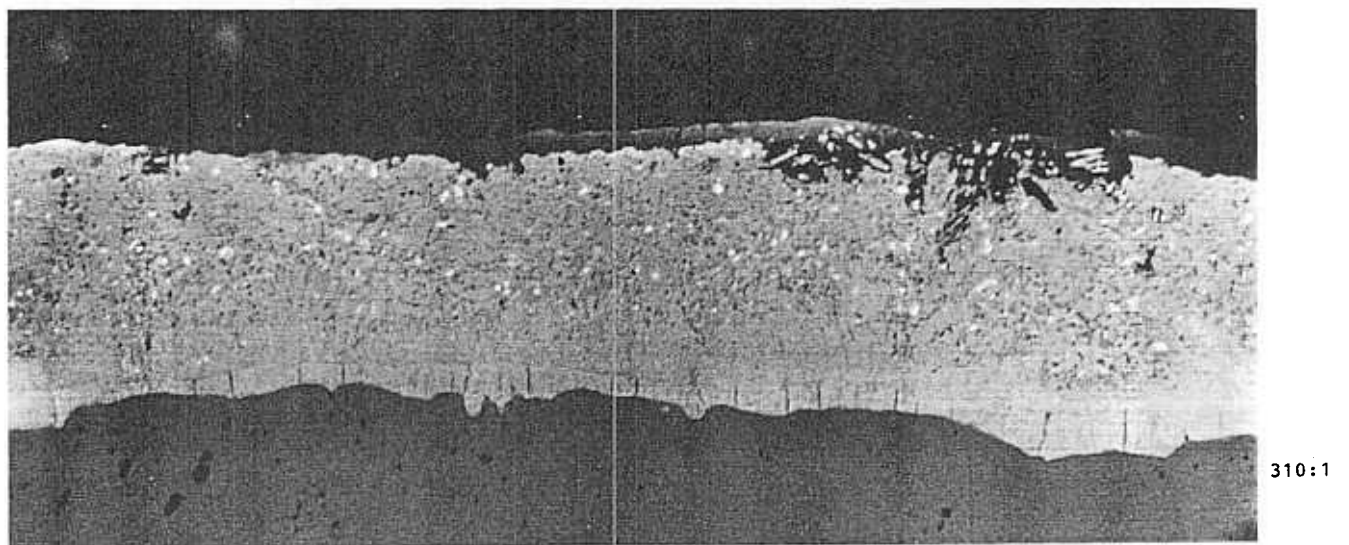
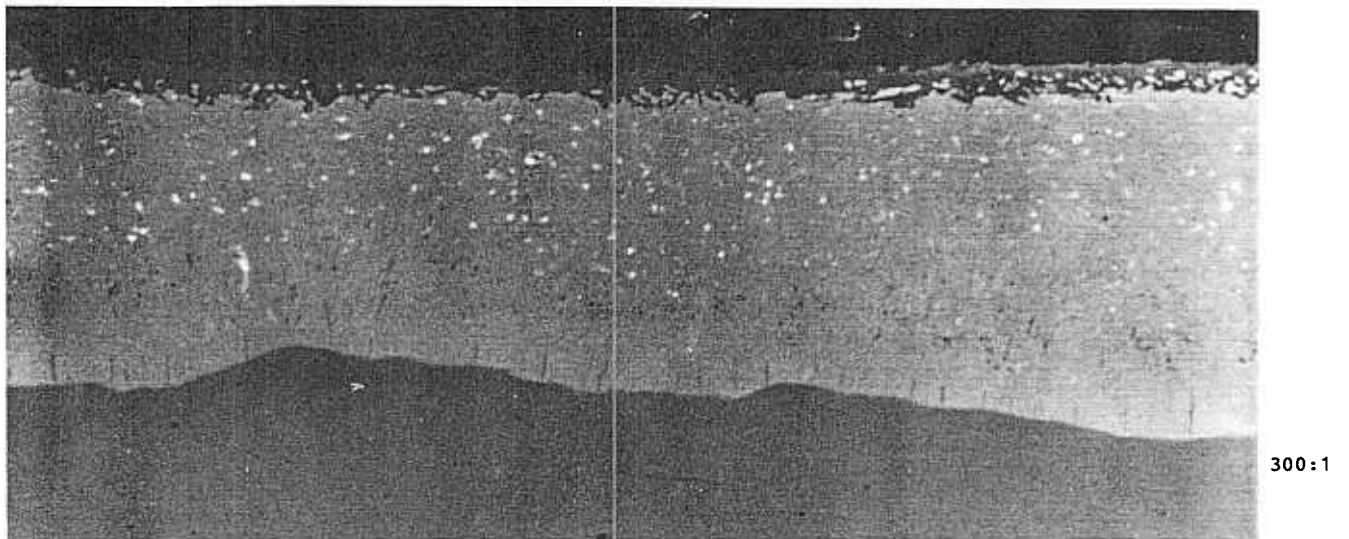
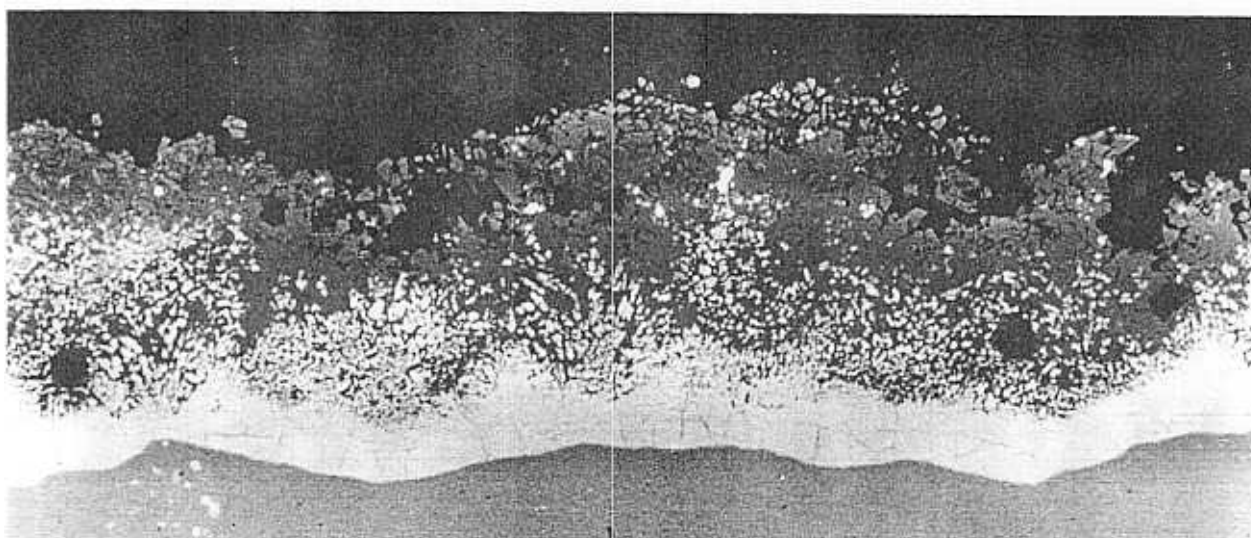
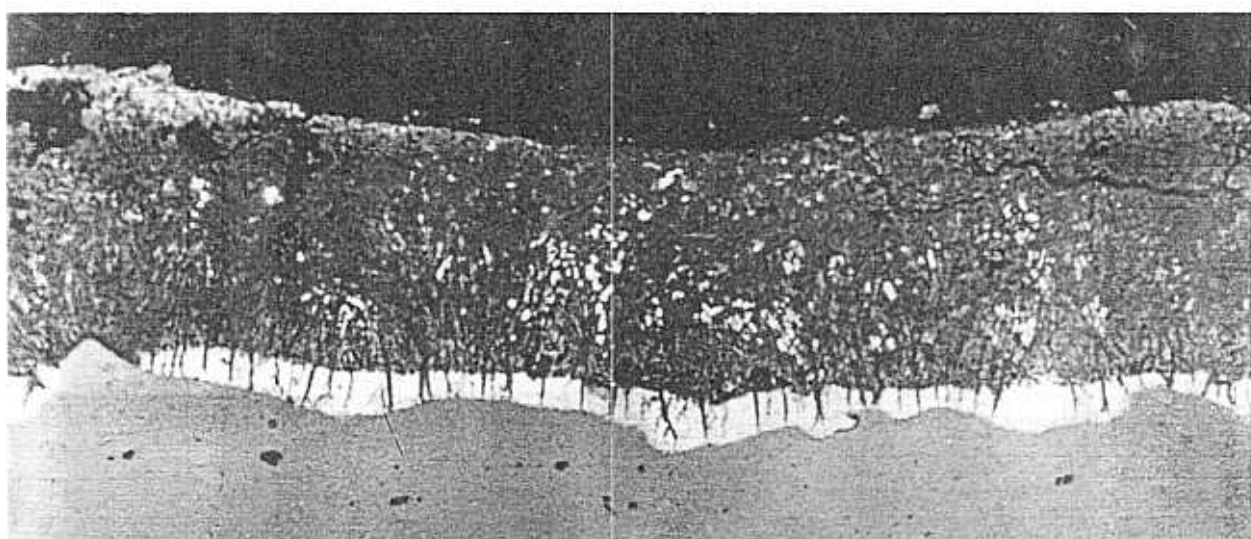


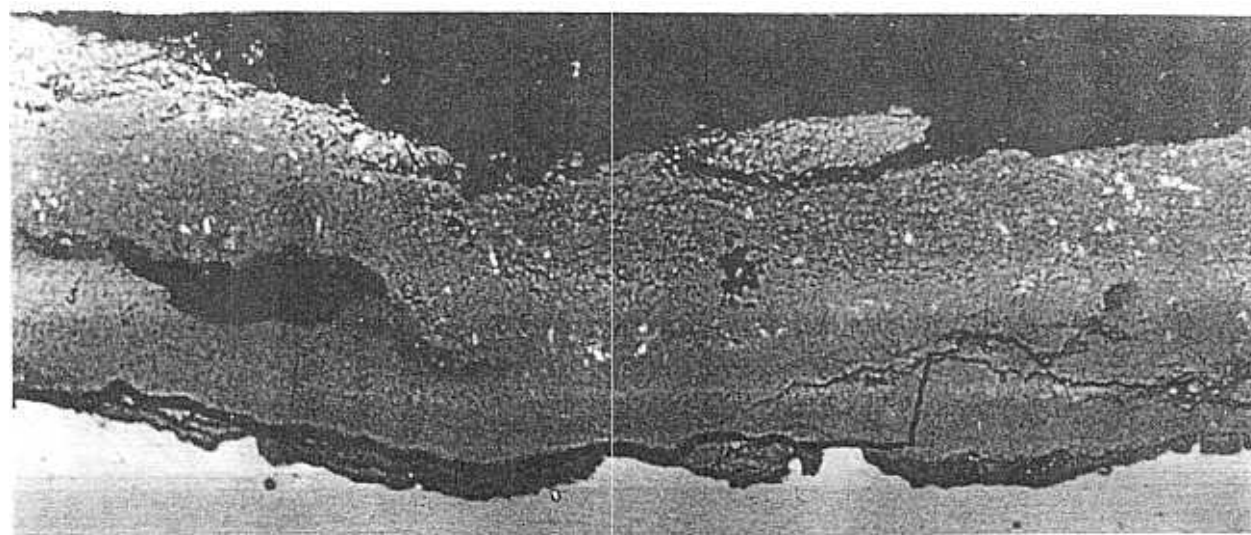
Abb. 36:
Verlauf der Zinkkorrosion in chloridhaltigem Beton



210:1

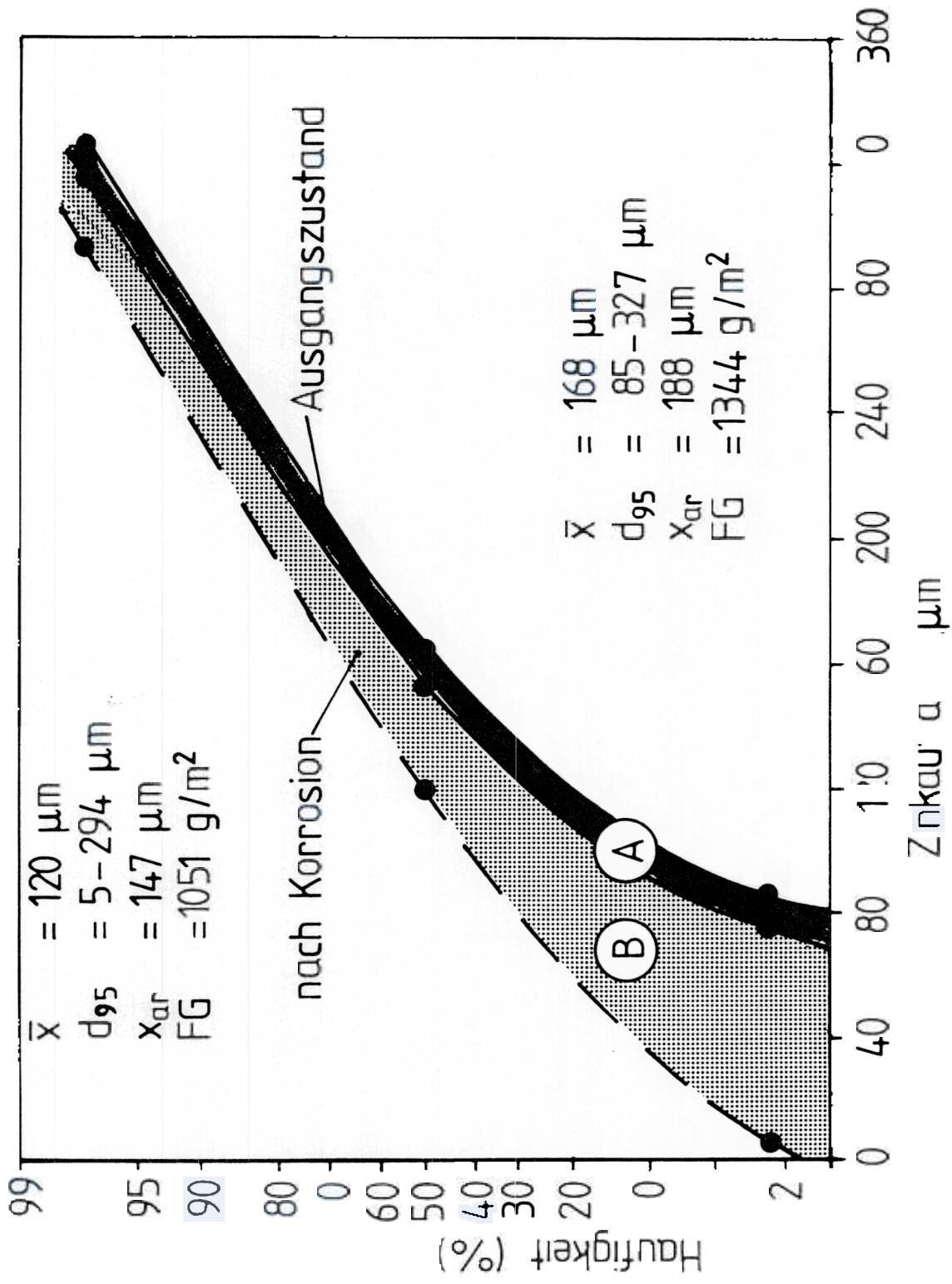


310:1



250:1

Abb. 36: (Fortsetzung)
Verlauf der Zinkkorrosion in chloridhaltigem Beton



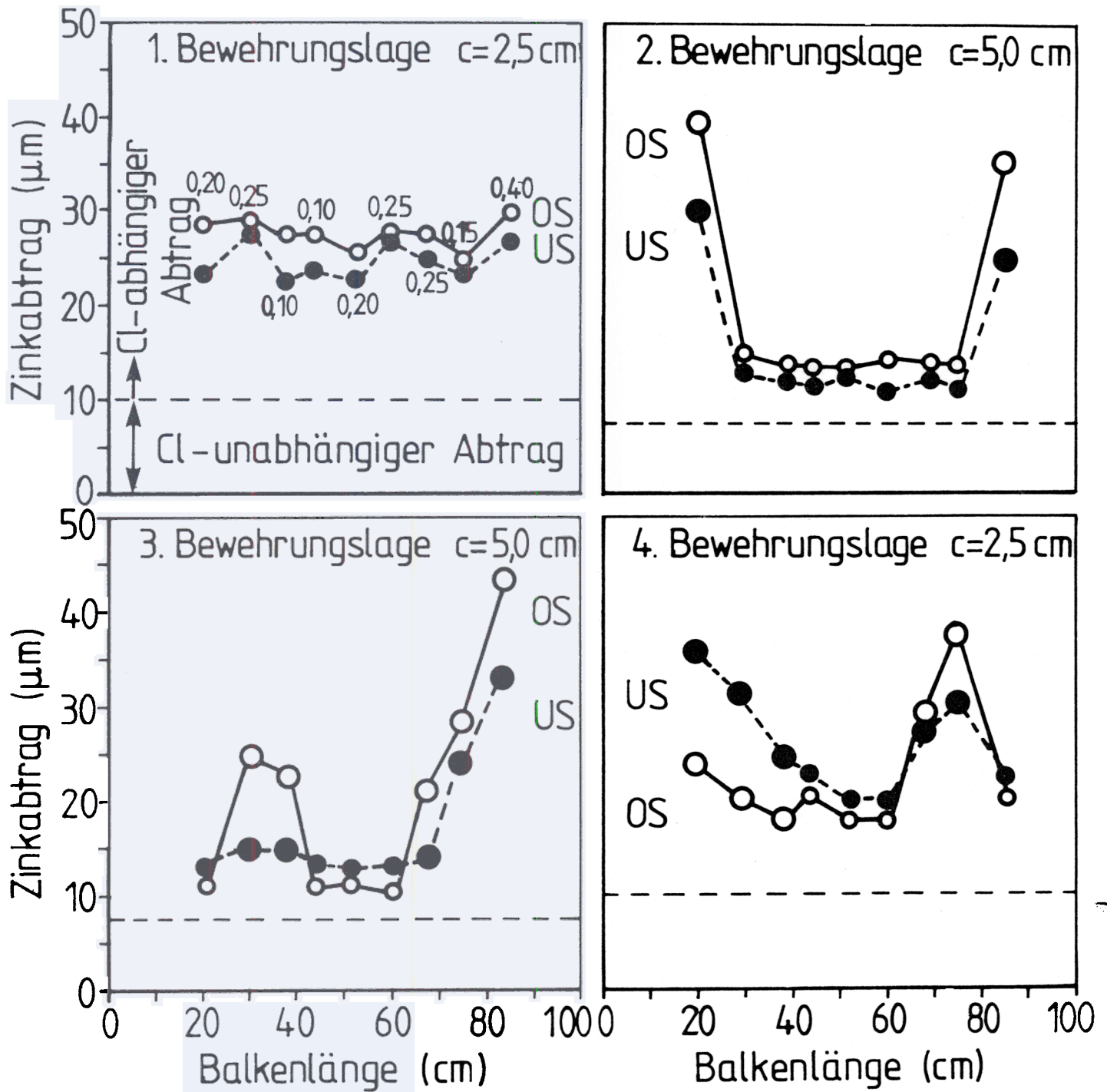


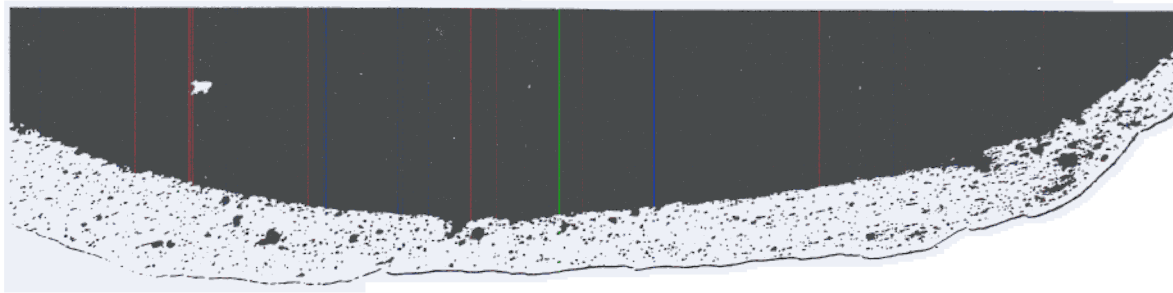
Abb. 38:

Zinkabtrag entlang des feuerverzinkten Betonstahls ca. je 5 cm beidseitig der Biegerisse, getrennt nach Staboberseite (OS) und Stabunterseite (US)

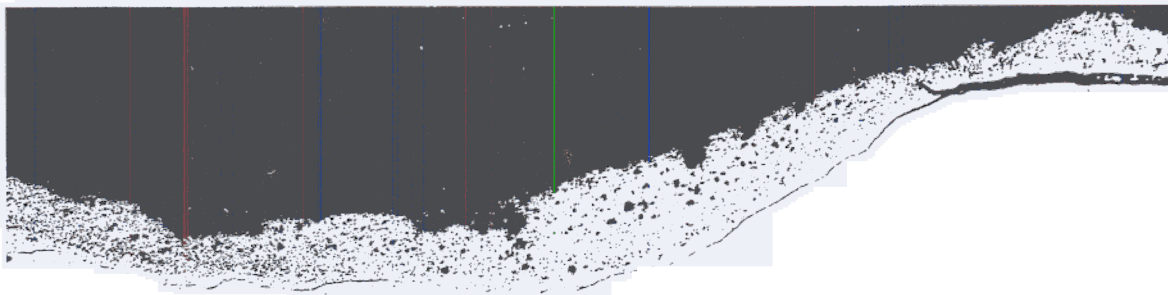
Balken 2.7

innen im Balken liegender Draht c

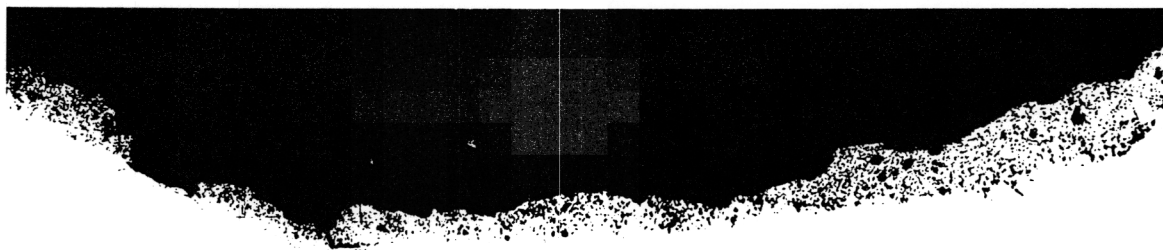
○ ● Stahl nicht in Schubriß
 ○ ● Stahl in Schubriß
 OS = Oberseite
 US = Unterseite
 z.B. 0,25 = Breite der Biegerisse a der Betonoberfläche



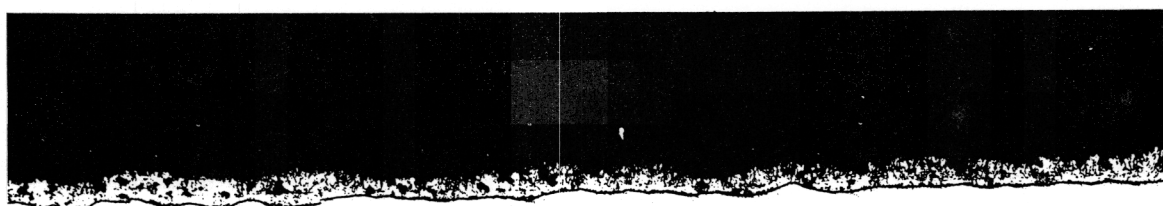
—| —| $w = 0,15 \text{ mm}$



—| —| $w = 0,25 \text{ mm}$



—| —| $w = 0,25 \text{ mm}$



—| —| $w = 0,40 \text{ mm}$

Abb. 39:

Korrosion feuerverzinkter Betonstähle in Biegerissen (Balken
2.7) $c = 2,5 \text{ cm}$

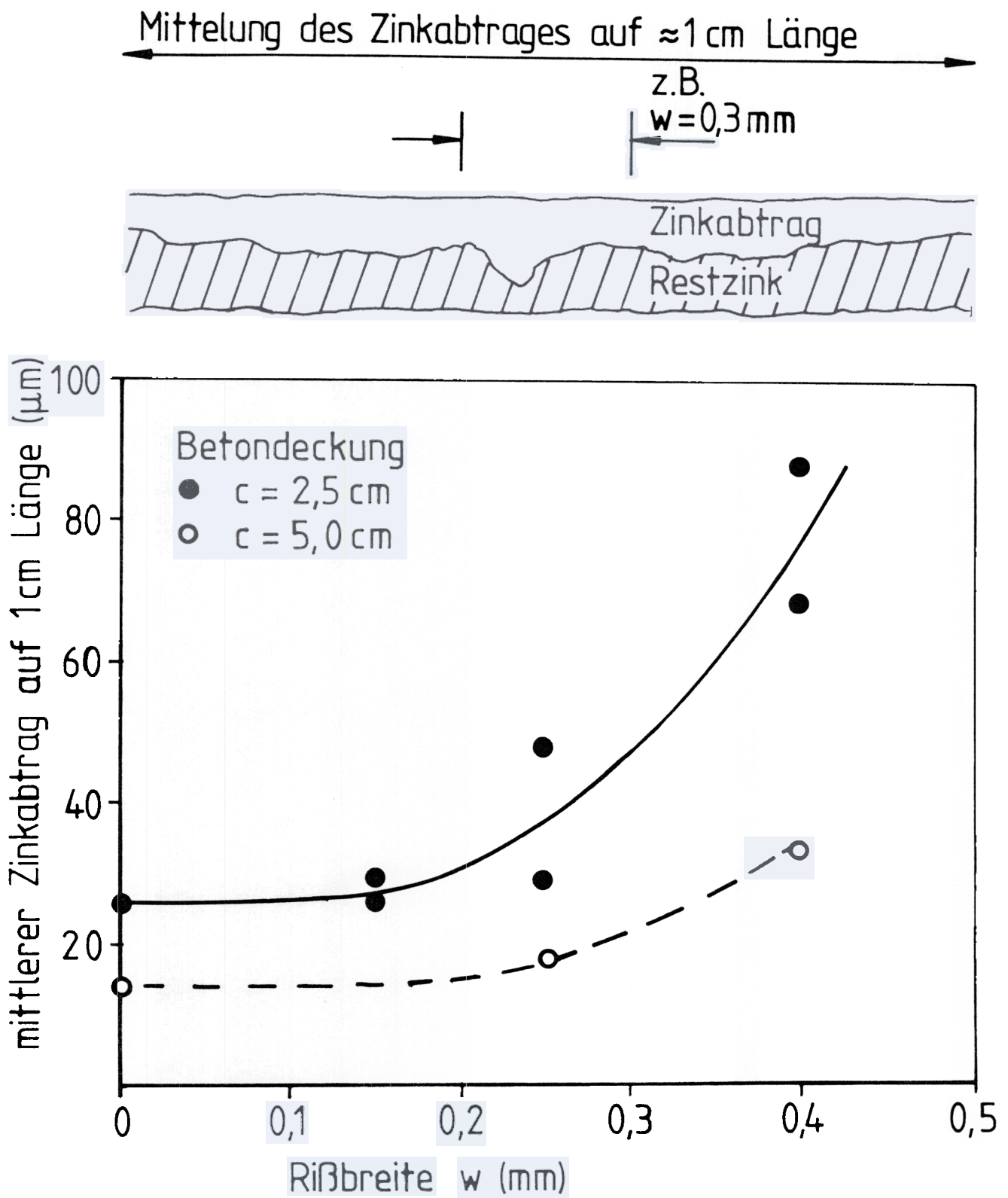


Abb. 40:
Korrosion des feuerverzinkten Betonstahls in Betonrissen
(Balken 2.7, in der Spritzwasserzone)