

Spannungsrisskorrosion auslösende Bedingungen in Spannkanälen von Spannbetonbauteilen vor dem Injizieren

T 1170/1

Bericht Nr. 1:

Baustellenuntersuchungen zur
Ermittlung der für die Korrosion von
Spannstählen relevanten
baupraktischen
Umgebungsbedingungen vor dem
Injizieren

T 1170/1

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

BUNDESANSTALT FÜR MATERIALPRÜFUNG

(BAM)

Fachgruppe 1.3 Korrosion und Metallschutz

1 Berlin 45, 12. Mai 1982

Unter den Eichen 87

Fernruf (030) 8104 X 9013 Dr. Is/sr

Forschungsförderung durch das Institut für Bautechnik (IfBt)

1. Titel der Forschungsarbeit:

Spannungsrißkorrosion auslösende Bedingungen in Spannkälen
von Spannbetonbauteilen vor dem Injizieren

Bericht Nr. 1:

Baustellenuntersuchungen zur Ermittlung der für die Korro-
sion von Spannstählen relevanten baupraktischen Umgebungs-
bedingungen vor dem Injizieren

von B. Isecke und W. Stichel

1. Einführung

2. Grundlagen der Korrosion

2.1 Korrosion ohne mechanische Beanspruchung

2.2 Korrosion mit zusätzlicher mechanischer Beanspruchung

3. Baustellenuntersuchungen

3.1 Messungen in Spannkanälen

3.1.1 Feuchtigkeits- und Temperaturmessungen in Spannkanälen

3.1.2 Messung der Sauerstoffgehalte in Spanngliedern

3.1.3 Untersuchung von Wasserproben aus Spannkanälen

3.2 Vorschädigungen während der Verarbeitung der Spannstähle auf der Baustelle

3.2.1 Transport des Spannstahles zur Baustelle

3.2.2 Lagerung des Spannstahles auf der Baustelle

3.2.3 Einbau der Spannglieder in die Verschalung

3.2.4 Verweilzeit in der Verschalung, unbetoniert und ungespannt

3.2.5 Verweilzeit im Bauwerk, gespannt, aber nicht injiziert

3.2.6 Zeitliche Statistik der Verarbeitungsphasen

4. Zusammenfassung

5. Literatur

6. Abbildungen

Baustellenuntersuchungen zur Ermittlung der für die Korrosion von Spannstählen relevanten baupraktischen Umgebungsbedingungen vor dem Injizieren

1. Einführung:

In den letzten Jahren sind eine Reihe von korrosionsbedingten Schadensfällen an Spannstählen aufgetreten und dokumentiert worden (1). Vielfach ereignete sich das Versagen der Stähle auf der Baustelle zu einem Zeitpunkt, in dem die Spannkanäle noch nicht mit Injektionsmörtel verfüllt waren. Dieser Zeitraum, in dem die Spannstähle besonders gefährdet sind, erstreckt sich von der Anlieferung der Stähle zur Baustelle bis zum endgültigen Verpressen der Spannkanäle. Innerhalb dieses Verarbeitungsabschnittes können sowohl vor dem Einbau des Stahles in das Bauwerk als auch im Bauwerk selbst vielfältige Einflüsse auf den Stahl einwirken und durch korrosive und/oder mechanische Vorschädigungen Keime gebildet werden, die unter Umständen zu einem spannungsrißkorrosionsbedingten Bruch des Stahles nach dem Vorspannen führen können.

Ziel der vorliegenden Untersuchung sollte es deshalb sein, die für die Korrosion von Spannstählen wesentlichen Parameter auf Baustellen vor dem Injizieren zu ermitteln. Dabei sollten vor allem Baustellen einbezogen werden, bei denen die Verarbeitung der Spannstähle den auf Baustellen üblichen Behandlungsformen der Spannstähle entsprach. Die Richtlinien für die Verarbeitung von Spannstählen mit nachträglichem Verbund sind in DIN 4227 (2) und entsprechenden Erläuterungen (3) festgelegt. Unter normalen Verarbeitungsbedingungen fallen deshalb nur diejenigen Baustellen, bei denen sich der Arbeitsablauf nach DIN 4227 vollzog oder zumindest nicht in ungewöhnlichem Maße davon abwich. Dies sollte verhindern, daß durch unsachgemäße Behandlung von Spannstählen bzw. durch deutlichen Verstoß gegen die bestehenden Richtlinien induzierte Schadensfälle einen repräsentativen Charakter annehmen und somit das Ergebnis der Untersuchung verfälschen konnten. Wesentlicher erschien es, zu überprüfen, in-

wieweit die bestehenden Verarbeitungsvorschriften ausreichen, um korrosionsbedingte Schäden zu vermeiden. Des weiteren sollte geklärt werden, ob die vorgegebenen, unabänderlichen Gegebenheiten der Baupraxis stets und in vollem Umfang die Anwendung der Richtlinien zulassen bzw. die Erfahrungen aus den vorliegenden Untersuchungen eine Änderung oder Erweiterung der gültigen Richtlinien erfordern.

Der vorgegebene zeitliche und finanzielle Rahmen erforderte eine Beschränkung des Umfangs der Untersuchungen. Aus diesen Gründen konnten nicht alle zur Zeit angewendeten Spannverfahren bzw. sämtliche vorstellbaren Arten von Bauwerken einbezogen werden.

2. Grundlagen der Korrosion:

Nach DIN 50 900 (4) wird Korrosion als Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung bezeichnet, die eine meßbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einem Korrosionsschaden führen kann. Eine Schädigung durch Korrosion im Sinne dieser Definition liegt dann vor, wenn die Funktion eines metallischen Bauteils durch den Korrosionsangriff beeinträchtigt wird.

Die Arten der Korrosion und deren Erscheinungsformen in der Praxis sind vielfältig. Eine Möglichkeit der Einteilung bietet die Unterscheidung zwischen Korrosion ohne bzw. mit mechanischer Beanspruchung. Insbesondere im Hinblick auf die Verhältnisse beim Spannbeton muß jedoch berücksichtigt werden, daß Vorschädigungen durch Korrosion während des Zeitraumes, in dem der Spannstahl mechanisch nicht belastet wird (Transport, Lagerung, Verweilzeit in der Verschalung und ungespannt im Bauwerk), nach dem Aufbringen der mechanischen Spannung Keime für Spannungsrißkorrosion bilden können, falls im vorgespannten Zustand zusätzliche korrosionsbegünstigende Umstände wirksam werden bzw. der Korrosionsangriff vor dem Vorspannen bereits soweit fortgeschritten ist, daß die vorgegebene mechanische Spannung ausreicht, um zum Versagen des Spannstahles zu führen.

2.1 Korrosion ohne mechanische Beanspruchung:

Wesentliches Merkmal eines Korrosionsvorganges ist eine Phasengrenzreaktion zwischen einem angreifenden Medium (Elektrolyt) und einem Werkstoff. Da es sich zumeist um einen elektrochemischen Vorgang handelt, eignen sich zur Beschreibung des Reaktionsablaufes thermodynamische und kinetische Betrachtungen. Unter dem Gesichtspunkt der Thermodynamik kann erörtert werden, inwieweit in einem gegebenen System Metall/Elektrolyt die Möglichkeit eines Korrosionsangriffs besteht, die Kinetik der Reaktion liefert Hinweise über die Korrosionsgeschwindigkeit.

Von allen denkbaren Angriffsmitteln nimmt das Wasser eine Sonderstellung ein. Das Wassermolekül bildet einen Dipol und besitzt deshalb die Fähigkeit, Ionen aufzunehmen und gelöst zu halten. Dadurch können die bei einem Korrosionsvorgang nach der Reaktion



entstandenen Metallionen gelöst werden. Nach Gleichung (1) werden bei diesem als anodisch bezeichneten Reaktionsschritt Elektronen abgegeben. Die Elektroneutralitätsbedingung fordert, daß diesem Oxidationsvorgang ein Reduktionsvorgang gegenübersteht. Dieser kathodische Teilschritt richtet sich nach der Natur des Elektrolyten. In neutralen, Sauerstoff enthaltenden Elektrolyten tritt als kathodische Reaktion die Sauerstoffreduktion nach



ein. In sauren Lösungen mit hoher Wasserstoffaktivität vollzieht sich die kathodische Teilreaktion nach der Bruttoumsetzung



...

Diese Möglichkeit der Reaktion ist bedeutungsvoll, da sie zur Entwicklung von Wasserstoff führt, der unter bestimmten Umständen in das Metall eindringen kann und dort zur Wasserstoffversprödung führt (siehe Abschnitt 2.2).

Neben den elektrochemischen Betrachtungen erscheint es sinnvoll, Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung nach der Art der Ausbildung des Korrosionsangriffes einzuteilen. Nach DIN 50 900 (4) läßt sich unterscheiden zwischen gleichmäßiger Flächenkorrosion, Muldenkorrosion, Lochkorrosion, Spaltkorrosion, Kontaktkorrosion, Korrosion durch unterschiedliche Belüftung, verschiedene Arten der selektiven Korrosion und Taupunktkorrosion. Diese hier angeführte Aufstellung enthält nur die für den Spannbetonbau wesentlichen Arten der Korrosion. In der Praxis liegen häufig verschiedene Arten der Korrosion in einem System nebeneinander vor, wobei eine Abgrenzung der einzelnen Korrosionsformen (Mulde - Lochfraß) unter Umständen Schwierigkeiten bereitet.

2.2 Korrosion mit zusätzlicher mechanischer Beanspruchung:

Vergleichbar mit anderen Bereichen der Technik unterliegt auch beim Spannbetonbau der Stahl einer mechanischen Belastung. Tritt zusätzlich zu dieser Spannung eine korrosive Beanspruchung auf, so kann unter bestimmten Bedingungen eine Ribbildung im Spannstahl erfolgen, die zu einer kennzeichnenden Schadensart, der Spannungsrißkorrosion, führt. Im Gegensatz zu vielen anderen Korrosionserscheinungen ist das Versagen des Bauteiles durch Ribbildung und -ausbreitung nicht unbedingt an eine vorherige, erkennbare Vorschädigung gebunden. Der abrupt eintretende Bruch beinhaltet somit ein erhöhtes Risiko für das Betriebspersonal und den Betriebsablauf.

In der Literatur (5,6) wird unterschieden zwischen anodischer Spannungsrißkorrosion und kathodischer Spannungsrißkorrosion (Wasserstoffversprödung). Obwohl das äußere

Erscheinungsbild des Schadens in beiden Fällen vielfach Ähnlichkeiten aufweist, sind die Mechanismen, die zum Versagen führen, unterschiedlich.

Das Auftreten von anodischer Spannungsrißkorrosion ist an verschiedene Voraussetzungen gebunden. Zunächst muß durch den Elektrolyten eine spezifische Wirkung auf den Werkstoff gegeben sein, der Werkstoff selbst muß eine Anfälligkeit zur Spannungsrißkorrosion besitzen und die einwirkenden Zugspannungen müssen ausreichend hoch sein. Die Anfälligkeit eines Werkstoffes gegenüber Spannungsrißkorrosion ist also keine Materialeigenschaft vergleichbar der Zugfestigkeit, sondern eine Erscheinung, die der Werkstoff unter bestimmten, definierten Bedingungen zeigt. Es handelt sich um ein Dreikomponentensystem, bestehend aus dem Werkstoffzustand (Festigkeit, Gefüge, Oberflächenzustand), mechanischen Zugspannungen (äußere Spannung, Eigenspannungszustand) und spezifischen Elektrolyten. Eine weitere notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingung für den Eintritt von Spannungsrißkorrosion ist das Vorliegen von schützenden Deckschichten auf der Metalloberfläche. Ausgangspunkte der Rißbildung sind örtliche Zerstörungen dieser Deckschicht, die sowohl durch chemische als auch mechanische Beanspruchung entstehen können. Die Mechanismen der Rißausbreitung lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die eine Gruppe beschreibt Spannungsrißkorrosion als selektive elektrochemische Metallauflösung am Rißgrund, die andere Gruppe sieht die Ursache der Spannungsrißkorrosion in einer Herabsetzung der Bindungskraft der Atome am Rißgrund in Anwesenheit spezifischer Ionen oder Moleküle (6).

Das Erscheinungsbild der Spannungsrißkorrosion gleicht weitgehend dem eines Sprödbruches, der sich unter verringerter Bruchspannung senkrechter Richtung der größten Zugspannung durch ein Material ausbreitet. Die Risse können je nach Werkstoff trans- oder interkristallin oder als Mischform auftreten.

Bei der kathodischen Spannungsrißkorrosion oder Wasserstoffversprödung ist der durch einen Korrosionsvorgang angebotene Wasserstoff für die Versprödung des Werkstoffs verantwortlich. Voraussetzung für das Eindringen des Wasserstoffs in einen Werkstoff ist, daß er in dissoziierter Form vorliegt. Gleichung 3 zeigt die Bruttoumsetzung der kathodischen Teilreaktion. Der Gesamtvorgang läßt sich in Teilreaktionen aufspalten. Zunächst werden die Wasserstoffprotonen zur Phasengrenze transportiert und dort nach der Gleichung



entladen. Erfolgt dort eine Rekombination dieser Wasserstoffatome zum Wasserstoffmolekül, kann das entstehende Wasserstoffmolekül desorbiert werden und in die Atmosphäre entweichen. Bei kinetischer Hemmung der Rekombination kann es durch Aufstauung der adsorbierten Wasserstoffatome vor der Oberfläche zu erheblichen Wasserstoffpartialdrücken kommen, die ein Eindringen des Wasserstoffs in das Metall bewirken.

Wesentlich gefördert und darum von ausschlaggebender Bedeutung für die Wasserstoffversprödung ist die Anwesenheit von Rekombinationsgiften (7), welche die Rekombination zum Wasserstoffmolekül verhindern. Hierzu zählen vor allem Schwefelwasserstoff und andere Sulfide, Verbindungen von Arsen, Selen, Phosphor und die Cyangruppe.

Die Versprödung metallischer Werkstoffe durch Wasserstoff kann durch verschiedene Hypothesen gedeutet werden. Die Drucktheorie, die insbesondere für weiche Stähle Gültigkeit besitzt, geht davon aus, daß der Wasserstoff an inneren Fehlstellen (Einschlüsse, Poren) rekombiniert und dabei hohe innere Drucke erzeugt, die zum Versagen des Werkstoffes führen können. Für hochfeste Stähle, zu denen die Spannstähle gehören, sind andere Hypothesen wahrschein-

licher. Nach der Troiano-Theorie (8) finden die für die Rißausbreitung im Werkstoff wesentlichen Wechselwirkungen des absorbierten Wasserstoffs mit dem Grundmetall nicht in einem vorhandenen Hohlraum oder an dessen Grenzfläche statt, sondern in den Bereichen vor der Rißspitze, in denen sich aufgrund des dreiachsigen Spannungszustandes plastisch verformte Zonen bilden können. In diese Gitterbereiche diffundiert der Wasserstoff bevorzugt und kann dort zu Dekohsionserscheinungen im Gitterbereich führen, die eine Beeinträchtigung der Gitterbindungskrfte hervorrufen.

Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen anodischer und wasserstoffinduzierter Spannungsrißkorrosion besteht in der einleitenden Rißbildung. Während für die anodische Spannungsrißkorrosion das Aufreißen von Deckschichten notwendig ist, erfolgt die Rißbildung bei der Wasserstoffversprödung unter Umständen in oberflchenfernen, inneren Bereichen.

3. Baustellenuntersuchungen:

3.1 Messungen in Spannkanälen:

Bislang lagen keinerlei Messungen der praktischen, für die Korrosion maßgeblichen Hllrohrbedingungen in unverpreßten Spannkanälen vor. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen auf Baustellen gliederten sich in verschiedene Teilbereiche und sollten Aussagen über korrosionsrelevante Parameter im Spannkanal liefern. In einer nachfolgenden Stufe sollten diese Randbedingungen in Laborversuchen reproduziert und in ihrem Einfluß auf das Korrosionsverhalten handelsüblicher Spannstähle analysiert und gekennzeichnet werden.

Um die Korrosionsbedingungen des Spannstahles im Spannkanal zu ermitteln, sind mehrere Messungen auf verschiedenen Bauabschnitten eines Berliner Brückenbauwerks (Spannverfahren SUSPA) durchgeführt worden. Dabei konnten die für das Mikroklima im Spannkanal verantwortlichen Einflußgrößen wie relative Feuchtigkeit, Temperaturen, Sauerstoffgehalt und even-

tuell im Spannkanal vorhandenes Wasser gemessen bzw. analysiert werden. Die Versuche erfolgten in Spanngliedern, die nicht zusätzlich für den Versuch verlegt wurden, sondern entsprechend dem Bauplan im Bauwerk vorhanden waren.

3.1.1 Feuchtigkeits- und Temperaturmessungen in Spannkälen:

Die atmosphärische Luft enthält neben Stickstoff, Sauerstoff sowie einigen Edelgasen auch Wasserdampf. Es handelt sich um ein Zweistoffgemisch bestehend aus einem Gas und einem Dampf. Dieses Wasserdampf-Luft-Gemisch besitzt die Eigenschaft, daß die eine Komponente, das Wasser, den Dampfgesetzen, die andere den Gasgesetzen folgt. Für das Gasgemisch gilt das Dalton'sche Gesetz der Teildrucke. Im Gegensatz zu den Gasgemischen, bei denen jede Komponente jeden Anteil haben kann, ist für den Wasserdampf der Anteil am Gemisch durch den Sattedampfdruck entsprechend der Gemischtemperatur nach oben begrenzt. Der Teildruck des Wasserdampfes kann demnach nur gleich oder kleiner sein als der Sättigungsdruck für die vorhandene Temperatur. Da der Teildruck mit der Temperatur steigt, kann warme feuchte Luft wesentlich mehr Wasserdampf enthalten als kalte.

Feuchte Luft, deren Wasserdampfdruck gleich dem Sattedampfdruck ist, wird als gesättigt bezeichnet. Dieser Zustand tritt z. B. ein, wenn feuchte Luft längere Zeit mit einer Wasseroberfläche in Verbindung steht und beide Phasen die gleiche Temperatur aufweisen.

Wird die Temperatur gesättigter feuchter Luft verringert, so kann die vorhandene Feuchtigkeit nicht mehr dampfförmig existieren, sondern muß sich verflüssigen. Dieser Vorgang wird als Kondensation bezeichnet.

Bei der Erwärmung feuchter Luft ohne gleichzeitige Feuchtigkeitszufuhr entsteht, da der Teildruck des Wasserdampfes unverändert bleibt, ein ungesättigter Zustand. Der Wasserdampf

befindet sich im überhitzten Zustand, da seine Temperatur höher liegt als die seinem Teildruck entsprechende Sattedampftemperatur.

Der Zustand feuchter Luft ist durch die Angabe der Temperatur, des Gesamtdruckes sowie des Teildruckes des Dampfes vollständig bestimmt. Zur Kennzeichnung des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft wird der Begriff der relativen Feuchte als Verhältnis des vorhandenen Wasserdampfdruckes zum Sattedampfdruck definiert. Dieser Wert kann zwischen 0 und 1 bzw. bei der Angabe in Prozent zwischen 0 und 100 Prozent liegen.

Zur Bestimmung der Temperatur und Feuchtigkeitsverhältnisse im Spannkanal stand ein Gerät zur Verfügung, das ermöglichte, über drei Meßfühler die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit einer Atmosphäre nebeneinander kontinuierlich an drei verschiedenen Meßstellen zu ermitteln und zu registrieren. Jede Meßsonde enthielt ein Thermoelement und einen Feuchtigkeitsfühler. Der Meßbereich für die Temperatur lag zwischen -20° und 60° C, die relative Feuchtigkeit konnte im gesamten Feuchtigkeitsspektrum zwischen 0 und 100 % rel. Feuchte gemessen werden. Der Sondendurchmesser betrug 10 mm, seine Länge 35 mm.

Die Funktionsweise des Feuchtigkeitssensors beruht auf einem in Dünnschichttechnik gefertigten Polymerkondensat. Das Polymer ist auf einem Glassubstrat aufgebracht und dient als Dielektrikum. Es besitzt die Eigenschaft, Wassermoleküle aus der umgebenden Atmosphäre innerhalb kürzester Zeit auszutauschen. Die durch die in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte veränderliche Kapazität wird elektronisch als Maß für die relative Feuchte umgeformt. Da die Temperatur der Umgebung die Kapazität des Sensors nicht nennenswert beeinflusst, braucht ihr Einfluß nicht kompensiert zu werden. Kleine Abmessungen (ca. $4 \times 6 \times 0,2$ mm) des Kondensators und eine dünne Isolierschicht halten die Trägheit des Sensors gering; sie beträgt nur 1 sec. für 90 % des Endwertes. Auch eine gelegentliche Betauung schadet dem Sensor nicht.

Bevor mit den Versuchen auf Baustellen begonnen wurde, sollte in einem Vorversuch geklärt werden, welche Atmosphäre sich in einem Kanal ausbildet, dessen Boden mit Wasser gefüllt ist und in dem sich Spannstahl zur Auslagerung befindet. Für diesen Versuch wurde auf dem Dach der BAM ein ca. 12,5 m langer mit Wellen versehener, dünnwandiger Kunststoffschlauch von 50 mm Durchmesser in den Bodenwellen mit Wasser gefüllt und 4 Spannstahlabschnitte (je 2 x St 835/1030 bzw. St 1080/1230, $d = 26$ mm) zur Auslagerung eingelegt. Der Schlauch blieb an den Enden geöffnet, in der Mitte und ca. 30 cm vom Schlauchende entfernt befand sich eine Meßsonde für die Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung. Eine weitere Meßsonde wurde in der freien Atmosphäre angebracht, um einen Vergleich zu den Außenbedingungen zu gewinnen.

Als Ergebnis stellte sich heraus, daß die relative Feuchtigkeit an beiden Meßstellen im Kanal oberhalb des Spannstahles in der gesamten Meßzeit (ca. 3 Wochen) stets 100 % betrug, völlig unabhängig von den klimatischen Bedingungen der Außenatmosphäre. Die Temperatur im Spannkanal entsprach erwartungsgemäß den äußeren Bedingungen. Da die Messungen zu einer Zeit mit relativ großen Tag- und Nachttemperaturschwankungen (Differenzen bis zu 15°C) durchgeführt wurden, stellten sich bereits nach kurzer Zeit aufgrund von Betauung punktförmige Korrosionsangriffe auf der Spannstahloberfläche ein. Auch als das Hüllrohr beidseitig verschlossen und abgedichtet wurde, ergaben sich keine Veränderungen im Feuchtigkeitsgehalt der Kanalatmosphäre.

Der hier geschilderte Fall kann als analog zu Verhältnissen bei Transport, Lagern, Einbau und Verweilen in der Verschalung angesehen werden, wenn der Spannstahl verrohrt zur Baustelle transportiert bzw. eingebaut wird und Wasser, selbst in geringem Umfang, in die Hüllrohre eindringen kann. Die ersten Messungen auf Baustellen beim Lagern bestätigten diesen Sachverhalt. Spannlieder, die kein Wasser enthielten, entsprachen in den Feuchtigkeitsbedingungen der Spannkanalatmosphäre den

äußeren Verhältnissen, sobald Wasser in den Spannkanälen vorlag, betrug die rel. Feuchte stets 100 %.

Die weiteren Untersuchungen auf der Baustelle galten der Frage, inwieweit sich Temperatur und Feuchtigkeit im Spannkanal nach dem Betonieren bis zum Verpressen der Hüllrohre verändern. Dazu wurden an einem Brückenbauwerk (Spannverfahren SUSPA) an einem 30 m langen Längsspannglied beim Verlegen der Spannglieder in die Verschalung von oben in die Hüllrohre an zwei Stellen Löcher gebohrt, die Meßsonden in die Löcher durch zusätzlich angebrachte Entlüftungsrohre in den Spannkanal eingeführt und anschließend luftdicht verschlossen. Abb. 1 zeigt die ungefähre Lage des Spanngliedes und der Meßstellen innerhalb des Brückenelementes. Ein Durchblasen mit Preßluft vor dem Betonieren ergab keine Hinweise auf vorhandenes Wasser im Hüllrohr, rel. Feuchtigkeit und Temperatur im Spannkanal entsprachen vor dem Betonieren den äußeren atmosphärischen Bedingungen.

In den Abb. 2 und 3 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Aus Abb. 2, die den Verlauf der rel. Feuchte in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Betonieren darstellt, wird deutlich, daß bereits 1 Stunde nach Beendigung des Betonierens die relative Feuchtigkeit an beiden Meßpunkten im Spannkanal wesentlich höher lag als in der äußeren Atmosphäre. Dies ließ vermuten, daß beim Betonieren Wasser in die Spannkanäle eingedrungen war. Ein Durchblasen des Spannkanals mit Preßluft vor dem Verpressen bestätigte diese Annahme. Durch den Temperaturanstieg im Spannkanal (Abb. 3) fiel die relative Feuchtigkeit zunächst ein wenig ab, da zur Einstellung des Gleichgewichtes zwischen Luftfeuchte, Wasser und Temperatur im Spannkanal Zeit benötigt wird. Bereits 24 Stunden nach dem Betonieren wurde an beiden Meßstellen ein stationärer Wert von 100 % relativer Feuchte erreicht, der auch nach dem Öffnen des Spannkanals bis zum Injizieren unverändert blieb.

Abb. 3 zeigt, daß auch die Temperaturverläufe im Spannkanal von den atmosphärischen Bedingungen abweichen. Aufgrund der Reaktionswärme, die beim Erhärten des Betons entsteht, steigt die Temperatur an beiden Meßstellen zunächst an und erreicht

nach ca. 160 Stunden die Temperatur der Umgebung. Die unterschiedlichen Temperaturhöhen der beiden Meßstellen im Spannkanaal sind auf die ungleichen Betonüberdeckungen zurückzuführen.

Messungen an anderen Spanngliedern später folgender Bauabschnitte desselben Bauwerks bestätigten ebenso wie Untersuchungen an anderen Bauwerken mit anderen Spannsystemen die oben angeführten Ergebnisse. Die relative Feuchte in den Spannkanaalen erreichte unabhängig von der Lage der Meßsonden nach spätestens 24 Stunden den Wert von 100 % und veränderte sich bis zum Verpressen in keinem Fall. Auch die hier vorgestellten Temperaturverläufe können als charakteristisch angesehen werden, da sie ebenfalls an anderen Bauwerken bestätigt werden konnten. Die Absoluthöhen der Temperatur richteten sich naturgemäß nach der Höhe der Betondeckungen.

3.1.2 Messung der Sauerstoffgehalte in Spanngliedern:

Neben Feuchtigkeit und Temperatur ist der Sauerstoffgehalt der Spannkanaalatmosphäre ein weiterer wichtiger Parameter für den Verlauf von Korrosionsreaktionen. An einem weiteren ca. 30 m langen Längsspannglied des im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Brückenbauwerks wurde deshalb eine Meßsonde zur Ermittlung des Sauerstoffgehaltes in der Spannkanaalatmosphäre installiert. Die Lage der Sonde ist aus Abb. 4 ersichtlich. Der Spannkanaal wurde luftdicht verschlossen.

Abb. 5 zeigt die Veränderung des Sauerstoffgehaltes im Spannkanaal in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch I). Während der Verweilzeit in der unbetonierten Verschalung entspricht der Sauerstoffgehalt des Spannkanaals erwartungsgemäß den atmosphärischen Bedingungen, nach dem Betonieren fällt er jedoch innerhalb von ca. 1,5 Tagen auf einen stationären Wert von 8 % und erreicht nach dem Öffnen des Spannkanaals innerhalb kurzer Zeit durch die einsetzende Konvektion den der Atmosphäre entsprechenden Gehalt.

Für einen weiteren Versuch zur Sauerstoffbestimmung in Spannkanälen standen zwei Sensoren zur Verfügung. Die Lage der Meßstellen im Bauwerk entsprach der Abb. 6. Im Gegensatz zum ersten Versuch, bei dem das Hüllrohr vor dem Betonierbeginn kein Wasser enthielt, wurde in diesem Fall Leitungswasser in das Hüllrohr bis zu einem bestimmten Niveau eingefüllt. Zum einen sollte durch diese Versuchsanordnung ermittelt werden, ob das Wasser als Diffusionssperre für Sauerstoff dient und sich somit im Teil des Spannkanals zwischen Koppelanker und Wasserfüllung ein anderer Sauerstoffgehalt einstellt als im hinteren Bereich zwischen Wasserfüllung und Spannanker. Des weiteren sollte vor dem Verpressen des Spannkanals das Wasser mit Preßluft ausgeblasen und anschließend analysiert werden.

Abb. 7 zeigt den Sauerstoffgehalt im Spannkanal in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch II). Nach dem Betonieren fällt der Sauerstoffgehalt an beiden Meßpunkten gleichzeitig innerhalb von 24 Stunden auf 12 % ab, behält diesen Wert bis zum Öffnen des Spannkanals und steigt dann wieder auf 21 % an. Lediglich beim Öffnen der Spannkanäle ergibt sich zwischen den zwei Bereichen ein leicht unterschiedliches Verhalten, da der Sauerstoffgehalt im hinteren Teil des Spanngliedes nach der Wassersperre verzögert ansteigt.

Um weitergehende Aussagen bezüglich der Veränderung des Sauerstoffgehaltes in Spannkanälen nach dem Betonieren zu gewinnen, wurden noch vier ergänzende Messungen durchgeführt. Die Lage der Spannglieder im Bauwerk entsprach der Abb. 4, die Stellung der Meßsonde und die Betonüberdeckung im Bereich der Messung kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle siehe Seite 14

Tabelle 1

Versuch Nr.	Abstand vom Koppelanker in m	Betonüberdeckung in m
III	4,5	0,60
IV	24	0,50
V	21	0,40
VI		0,65

Bei dem Versuch VI handelte es sich um ein ca. 8 m langes Querspannglied aus einem Querträger, wobei sich der Sensor etwa in der Mitte des Spanngliedes befand.

Die Abb. 8 bis 11 enthalten die Ergebnisse der Messungen der Versuche III bis VI. Die Veränderung des Sauerstoffgehaltes in Abhängigkeit von der Zeit verläuft qualitativ ähnlich den Resultaten der Versuche I und II. Nach dem Betonieren sinkt der Sauerstoffgehalt rasch auf einen stationären Wert und erhöht sich nach dem Öffnen des Spannkanales in kurzer Zeit durch die einsetzende Konvektion wieder auf 21 %. Bei dem Querspannglied (Versuch VI, Abb. 11) wird zum Erreichen des stationären Sauerstoffgehaltes ein längerer Zeitraum als in den Längsspanngliedern benötigt.

Abb. 12 zeigt den stationären Endgehalt des Sauerstoffs aus den Versuchen I bis V in Abhängigkeit von der Lage im Spannglied bzw. vom Abstand zum Koppelanker. Die Messungen entstammen zwar nicht aus einem Spannglied, sind aber vergleichbar, da die Lage der Spannglieder in den einzelnen Bauabschnitten nahezu identisch war. Kennzeichnend für das Sauerstoffprofil in einem Längsspannglied erscheint nach diesen Messungen, daß der Sauerstoffgehalt vom Spananker bis zum Koppelanker nach dem Betonieren leicht abfällt.

...

Die o. g. Messungen der Sauerstoffgehalte in Spannkanälen erfolgten stets an unverpreßten und gut abgedichteten Spanngliedern. Es wurden weitere Messungen an einseitig geöffneten Spanngliedern verschiedener Spannsysteme durchgeführt, die gleichartige Ergebnisse erbrachten. Unabhängig von den Spannverfahren und den Abständen vom geöffneten Spannankerbereich entsprach der Sauerstoffgehalt dieser Spannglieder auch über längere Zeiträume (max. 14 Tage) stets dem Luftsauerstoffgehalt von 21 %. Nach diesen Messungen kann angenommen werden, daß bei geöffneten Spannkanälen keine Abminderung des Sauerstoffgehaltes im Hüllrohr zu erwarten ist.

Bei allen Versuchen wurde neben dem Sensor zur Sauerstoffmessung in unmittelbarer Nachbarschaft ein Feuchtigkeitssensor eingesetzt. Es zeigte sich auch in diesen Fällen das in den Abbildungen 2 und 3 dargestellte Verhalten des Feuchtigkeits- und Temperaturverlaufs nach dem Betonieren.

3.1.3 Untersuchung von Wasserproben aus Spannkanälen:

Wasser kann auf vielfältige Weise in Spannkanäle eindringen. Schon beim Transport, Verlegen und Verweilen der Spannglieder in der unbetonierten Verschalung kann durch schadhafte Hüllrohre oder an freiliegenden, nicht ausreichend abgedichteten Ankerteilen Wasser in Spannglieder eindringen. Nach dem Betonieren besteht ebenfalls die Möglichkeit, daß Restwasser vom Betonieren in die Spannkanäle eindringt.

Vom elektrochemischen Standpunkt entspricht das in Hüllrohren eventuell vorhandene Wasser einem wäßrigen Elektrolyten, dessen Zusammensetzung einen überaus wesentlichen Einfluß auf das Korrosionsverhalten des Spannstahles im Hüllrohr ausübt. Neben der Zusammensetzung dieser im fol-

genden als Hüllrohrwässer bezeichneten Elektrolyten bildet auch deren Verbreitung im Spannkanal einen außerordentlichen Einfluß auf die Gefährdung des Spannstahles durch Korrosion. Besondere Würdigung verdient der Umstand, daß sich, falls Wasser in Spannkanälen angetroffen wird, dieses zumeist nur in einigen, tiefer liegenden Bereichen des Spannglieds den Spannstahl völlig umhüllt. Besonderer Korrosionsgefahr unterliegen die Phasengrenzgebiete, an denen der Spannstahl partiell vom Hüllrohrwasser und andernteils von der Hüllrohratmosphäre umgeben ist.

Die korrosionschemisch relevanten Parameter des Hüllrohr-elektrolyten sind sein pH-Wert, die Gehalte an Fremd-ionen und das Potential des Spannstahles im Hüllrohrelektrolyten. Da die Aussagen über die Zusammensetzung von Hüllrohrwässern eine wesentliche Voraussetzung für praxis-nahe Umgebungsbedingungen in Laborversuchen und die Entwicklung praxiskonformer Prüfverfahren bildeten, wurden auf verschiedenen Baustellen mit unterschiedlichen Spann-systemen durch Ausblasen der Spannkanäle mit Preßluft auf-tretende Hüllrohrwässer aufgefangen und chemisch auf ihren pH-Wert und den Gehalt an Fremdionen untersucht.

Zunächst konnte ermittelt werden, daß bei allen unter-suchten Bauabschnitten aus einer großen Zahl von Spann-gliedern (im Mittel 30 - 50 % aller verlegten Spannglie-der) Wasser in Form von Nebel, Tropfen oder auch ausfließ-endes Wasser nach dem Durchblasen mit Preßluft austrat. Farbe und Trübung des Wassers hatten entweder bräunli-chen, durchsichtigen oder trüben Charakter. Als Extremfall wurde in der oberen Fahrbahnplatte eines Brückenbauwerkes in 80 % der 196, ca. 10 m langen Querspannglieder Wasser-austritt beim Durchblasen beobachtet.

Tabelle 2 enthält die pH-Werte sowie Chlorid- und Sul-fatgehalte der auf verschiedenen Baustellen aufgefangenen und untersuchten Hüllrohrwässer. Neben den Chlorid- und

Tabelle 2: Zusammensetzung von Hüllrohrwässern

Probe Nr.	Lage im Bauwerk	pH-Wert bei 20°C	Chloridgehalt in mg/l	Sulfatgehalt in mg/l
1	Querträger	12,0	181	1584
2	Querspannglied	11,2	63	182
3	Querspannglied	11,2	63	181
4	Querspannglied	11,4	58	180
5	Querspannglied	11,4	58	182
6	Längsspannglied	11,4	81	869
7	Querspannglied	10,9	58	512
8	Fahrbahnplatte	11,5	32	100
9	Längsträger	11,3	145	-
10	Querträger	11,8	220	2830
11	Rahmenstiel	11,9	301	4304
12	Rahmenstiel	7,7	337	4327
13	Rahmenstiel	11,1	284	4881
14	Rahmenstiel	9,0	277	4007
15	Rahmenstiel	7,1	291	3969
16	Rahmenstiel	7,1	267	3933
17	Rahmenstiel	9,7	250	3667
18	Längsspannglied	11,3	4	28
19	Längsspannglied	8,6	8	117
20	Längsspannglied	11,1	2	31
21	Längsspannglied	11,3	2	49
22	Querspannglied	11,3	3	49
23	Querspannglied	10,2	18	260
24*	Längsspannglied	10,3	82	236
25*	Längsspannglied	10,3	82	239
26*	Längsspannglied	10,3	82	194
27	Längsspannglied	11,4	115	475

* Wasser vor dem Betonieren eingefüllt.

...

Sulfatgehalten wurden die Lösungen auch hinsichtlich ihrer Gehalte an Nitrat-, Sulfid- und Rhodanidionen analysiert, meßbare Anteile konnten jedoch bei diesen Ionensorten nicht ermittelt werden. Die Angaben bezüglich des pH-Wertes der Hüllrohrwässer verdeutlichen, daß diese mit Ausnahme der Proben 12, 14 - 17 und 19 in der Mehrzahl im alkalischen Bereich liegen. Ein weiteres übergreifend gültiges Ergebnis bilden die gegenüber Leitungswasser um ein vielfaches erhöhten Gehalte an Chloriden (max. 337 mg/l) bzw. Sulfaten (max. 4881 mg/l), obwohl auch Proben mit geringeren Anteilen (18 - 23) vorgefunden wurden. Sowohl die erhöhten pH-Werte als auch die Gehalte an Chloriden und Sulfaten geben Hinweise, daß es sich mit Ausnahme der Proben 18 - 23 um in die Hüllrohre eingedrungenes Restwasser des Betoniervorgangs handeln muß. Ein vollkommener Schutz der Spannglieder gegen das Eindringen von Wasser durch die metallischen Hüllrohre kann demnach nicht vorausgesetzt werden. Bei den Proben 18 - 23 lassen insbesondere die sehr geringen Chloridgehalte vermuten, daß es sich bei den Hüllrohrwässern um Regenwasser handeln muß, das entweder beim Verlegen bzw. während der Verweilzeit in der Verschalung in die Hüllrohre eindringen konnte. Auch diese Proben zeigen, daß trotz der niedrigen Fremdionengehalte eine Vermischung mit Restwasser vom Betoniervorgang stattgefunden haben muß, da, abgesehen von Probe 19, alle anderen Proben erhöhte pH-Werte aufweisen.

Die Proben 11 - 17 entstammen einer Berliner Baustelle, bei der die Spannglieder senkrecht angeordnet waren und sich das Wasser im unteren Teil der Spannglieder angesammelt hatte. Die Spannstähle enthielten auf der Oberfläche einen temporären Korrosionsschutz (Esso Rustban) und befanden sich ca. 6 Monate betoniert, unverpreßt und nicht gespannt im Bauwerk. Die Chlorid- und Sulfatgehalte sind relativ hoch im Vergleich zu den anderen Messungen aus den Spannkämen kurzfristig injizierter Spannglieder, dies könnte auf einen eventuellen Anreicherungsprozeß der Lö-

sungen durch teilweises Verdampfen im Laufe der Zeit zurückzuführen sein. Die relativ niedrigen pH-Werte dieser Proben sind in der unter diesen Umständen allmählich ablaufenden Carbonatisierung begründet.

Bei den Versuchen 1 bis 23 handelte es sich um Wasser, das eindeutig beim oder nach dem Betonieren in die Spannglieder eindrang. In den Versuchen 24 bis 27 sollte geklärt werden, wie sich Wasser verhält, das sich bereits vor dem Betonieren in Spanngliedern befand. Deshalb wurde in drei Längsspannglieder vor dem Betonieren je 5 l Wasser eingefüllt und vor dem Injizieren nach insgesamt 12 Tagen Aufenthalt im Spannkanal durch Ausblasen wieder entfernt und aufgefangen. Daneben wurde bei demselben Bauabschnitt eine Wasserprobe aus einem anderen Spannglied entnommen (Probe 28), wobei an dieser Stelle vor dem Betonieren kein Wasser ins Hüllrohr eingefüllt bzw. durch andere Einflüsse vorhanden gewesen wären. Die Analysenergebnisse der Proben 24 bis 26 verdeutlichen, daß das vor dem Betonieren eingefüllte Leitungswasser wesentlich höhere Gehalte an Fremdionen bzw. einen höheren pH-Wert aufweist als übliches Leitungswasser. Auch in den Fällen, wenn Wasser vor dem Betonieren in die Spannkanäle eindringt, kann angenommen werden, daß beim oder nach dem Betonieren durch Vermischung mit Restwasser oder Kontakt mit Beton eine Alkalisierung stattfindet. Die Werte der Vergleichsprobe 27 liegen etwas höher und entsprechen weitgehend anderen Proben der Tabelle 2.

Bei den Proben 1 bis 10 und 24 bis 27 wurde als Zement PZ 45 F verwendet. Der Wasser-Zement-Faktor betrug 0,47, als Erstarrungsverzögerer wurde Plastiment (Fa. Sika) und als Betonverflüssiger Sikament (Fa. Sika) zugesetzt. Insgesamt erscheint die Wirkung von Betonzusatzmitteln auf das Auftreten von wäßrigen Phasen im Hüllrohr darin zu liegen, daß die Menge des Hüllrohrwassers aufgrund der größeren Fluidität des Betons bei der Verwendung von Betonzusatzmitteln ansteigt.

Um Aussagen über das sich einstellende Potential am Spannstahl bei Kontakt mit Hüllrohrwasser zu gewinnen, wurde vor der Analyse der Probe 6 das Ruhepotential eines St 1080/1230 in dieser Lösung gegen eine Kalomelelektrode gemessen. Es ergab sich ein Wert von +250 mV. In Leitungswasser betrug der Wert für das Ruhepotential desselben Stahles -382 mV.

Zwei weitere, nicht in Tabelle 2 aufgeführte Wasserproben entstammen Bündelspanngliedern (SUSPA) aus der Fahrbahnplatte einer Brücke. Das Bauwerk mußte ca. 6 Monate nach dem Betonieren abgerissen werden, da die Überdosierung eines Betonzusatzmittels das Erhärten des Betons langfristig verhinderte und auch nach längerer Zeit keine ausreichenden Festigkeiten erreicht wurden. Das Hüllrohrwasser befand sich ca. 6 Monate in den Spannkänen. Beide Wasserproben wiesen einen pH-Wert von 12 auf, die Chloridgehalte betragen 6,75 bzw. 59,28 g/l. Sulfatgehalte konnten aufgrund der geringen Probenmenge nicht ermittelt werden. Die außergewöhnlich hohen Chloridgehalte sind auf die überhöhte Dosierung des Zusatzmittels und die damit verbundene lange Phase des nicht erhärteten Betons zurückzuführen. Ein weiterer Grund könnte durch das Verdampfen von Hüllrohrwasser und das damit verbundene Aufkonzentrieren der Lösung gegeben sein. In den Hüllrohren befanden sich Bündelspannglieder aus kaltgezogenem Spannstahl, die ca. 4 Monate mit 50 % der vollen Vorspannung verspannt waren. Eine optische Oberflächenbeurteilung der Spannstähle nach dem Ausbau ergab, daß trotz der hohen Chloridgehalte des Hüllrohrwassers keine nennenswerten Korrosionsangriffe am Spannstahl vorlagen.

3.2 Vorschädigungen während der Verarbeitung der Spannstähle auf der Baustelle:

Die Phasen, in denen Vorschädigungen auftreten bzw. wirksam werden können, lassen sich folgendermaßen einteilen:

1. Transport des Stahles zur Baustelle,
2. Lagerung des Spannstahtes auf der Baustelle,
3. Einbau der Spannglieder in die Verschalung,
4. Verweilzeit in der Verschalung, unbetoniert und ungespannt,
5. Verweilzeit im Bauwerk, gespannt, aber nicht injiziert.

Herstellungsbedingte Vorschäden sollen in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden.

3.2.1 Transport des Spannstahtes zur Baustelle:

Die Transportbedingungen zur Baustelle wurden durch eine Umfrage unter den Spannstahtverarbeitern und Baustellenbesuche untersucht. Von 13 angeschriebenen Spannstahtverarbeitern im Bundesgebiet haben nur 7 auf unsere Anfrage geantwortet. Aus den eingegangenen Antworten ist ersichtlich, daß je nach Spannverfahren unterschiedliche Bedingungen bezüglich des Transportes und der Verwendung von Korrosionsschutzmitteln vorliegen.

Fertigungsglieder gelangen meist auf offenem LKW zur Baustelle. Abb. 13 zeigt solche Spannglieder nach dem Eintreffen auf der Baustelle. Die Qualität solcher Spannglieder bei Anlieferung auf der Baustelle war auf den besichtigten Baustellen stets gut. Vom nicht zu verhindernden leichten atmosphärischen Anrosten der Hüllrohre abgesehen vermeidet diese Transportart bei kurzen Transportzeiten außerhalb der Wintersaison mit großer Wahrscheinlichkeit Vorschäden mechanischer oder korrosiver Art auf den Spannstahten. Im Winter wäre es unter Umständen denkbar, daß ohne zusätzliche Abdeckung durch Aufspritzen tausalzhaltigen Wassers während des Transports korrosionsbegünstigende Verhältnisse auf den Spanngliedern entstehen könnten.

Unverrohrte Spannstähle sind besonders gefährdet beim Transport. Sie werden stets auf geschlossenem LKW bzw. mit Planen abgedeckt zur Baustelle transportiert. Auf den besuchten Baustellen befanden sich alle unter diesen Transportbedingungen angelieferten Spannstähle in unverletztem metallischen Oberflächenzustand. Nach den Erfahrungen dieser Besuche muß die Möglichkeit einer Vorschädigung durch den Transport der Stähle zur Baustelle als äußerst gering eingeschätzt werden.

Korrosionsschutzmittel werden nur dann verwendet, wenn für Transport, Lagerung auf der Baustelle oder unverpreßte Verweilzeit im Bauwerk außergewöhnlich lange Zeiten erwartet werden. Da sie die Haftung des Injektionsmörtels beeinträchtigen, müssen sie vor dem Verpressen der Spannglieder von der Stahloberfläche entfernt werden. Dies bedeutet zusätzlichen Arbeitsaufwand. Die Verarbeiter, die unsere Anfrage beantworteten, teilten uns mit, daß solche Mittel nur selten verwendet werden. Die Erfahrungen mit Korrosionsschutzmitteln sind unterschiedlich. Es existieren verschiedene Untersuchungen von Firmen oder Forschungsinstituten, die Korrosionsschutzmitteln keinen bzw. einen geringen korrosionshemmenden Einfluß zubilligen. Ein Verarbeiter verweist sogar auf korrosionsfördernde Auswirkungen bei Anwendung eines bestimmten Korrosionsschutzmittels. Nach längerer Verweilzeit im gespannten Zustand rissen bei Verwendung dieses Mittels Spanndrähte im Bauwerk. Die Ursache für das Versagen konnte durch hygroskopische Eigenschaften des "Schutzmittels" nachgewiesen werden. Drähte gleicher Qualität ohne diesen "Oberflächenschutz" erwiesen sich unter gleichen Bedingungen im selben Bauwerk als resistent gegenüber Spannungsrißkorrosion. Im allgemeinen wird von den Spannstahlverarbeitern bemängelt, daß bisher zu wenig bauaufsichtliche Richtlinien für die Verwendung von Korrosionsschutzmitteln vorliegen.

...

3.2.2 Lagerung des Spannstahles auf der Baustelle:

Obwohl jeder Verarbeiter von Spannstahl bestrebt ist, die Zwischenlagerungszeiten auf der Baustelle möglichst kurz zu gestalten, kann es in Einzelfällen durch unvorhersehbare Witterungsänderungen doch zu recht langen Lagerungszeiten von mehreren Wochen, unter besonders ungünstigen Bedingungen sogar Monaten kommen. Optimale Lagerungsverhältnisse setzen einen überdachten, trockenen Raum voraus, dessen Luftfeuchtigkeit kontrolliert werden soll und der unter Umständen zur Gewährleistung einer bestimmten Luftfeuchtigkeit eine Heizung enthalten soll. Bei unverroht auf der Baustelle angelieferten Spannstählen sollte diese Art der Lagerung jederzeit praktiziert werden. Die besuchten Baustellen erfüllten diese Bedingungen nicht in allen Fällen.

Die Abb. 14 und 15 zeigen die Lagerung von Fertigspanngliedern des BBRV-SUSPA-Spannverfahrens auf einer Berliner Baustelle. Die Lagerung und Verarbeitung erfolgte im Herbst. Die längste Lagerzeit vor dem Einbau lag bei 2 Wochen. Der Lagerplatz ist direkt neben einem bereits fertiggestellten Teil des Bauwerks windgeschützt angelegt. Die bodenfreie Lagerung sorgt für eine ausreichende Belüftung. Ein abnehmbares Dach, welches nur bei der Entnahme von Spanngliedern entfernt wird, schützt die Spannglieder gegen das Eindringen von Niederschlägen.

Die Abb. 16 und 17 zeigen einen Lagerplatz von Spanngliedern desselben Verfahrens auf einer anderen Baustelle im norddeutschen Raum. Zum Zeitpunkt der Besichtigung betrug die Lagerzeit erst 2 Tage. Die Abdeckung mit Zeltplanen schützt zwar gegen das Eindringen von Niederschlägen, ruft aber durch Kondenswasserbildung infolge von Temperaturschwankungen einen besonders an den Festankerstellen auftretenden punktförmigen Korrosionsangriff hervor. Abb. 18 demonstriert diesen Sachverhalt. Diese Art der Lagerung

muß insbesondere bei längeren Lagerzeiten mit differierenden Witterungsbedingungen als unzureichend bezeichnet werden. Durch das vielfache Übereinanderschichten der Spannglieder wird zusätzlich die Voraussetzung für mechanische Oberflächenverletzungen der Hüllrohre und auch der freiliegenden Ankerteile geschaffen.

Die folgenden Abb. 19 - 21 zeigen Aufnahmen von Spannstahllitzen, die 2 Wochen im Herbst in einem überdachten Raum ohne Beheizung unverroht in Bündeln gelagert wurden. Die Baustelle befand sich in Schleswig-Holstein. Auf der Oberfläche und besonders an den Berührungsstellen zeichnen sich punktförmige und 2 - 4 cm lange Korrosionsangriffe ab. Die Roststellen ließen sich durch mechanisches Reiben oder Schaben nicht mehr entfernen. Nach eingehender Diskussion zwischen Baubehörde und Verarbeiter und Überprüfung der mechanischen Eigenschaften dieser Drähte erfolgte Einbau ins Bauwerk.

Das Einziehen von Spannstahllitzen ins Hüllrohr konnte nur auf einer Baustelle besichtigt werden (Abb. 22). Der Abrollhaspel befindet sich optimal gegen Niederschläge und Seitenwind geschützt in einem überdachten Bereich. Beim Einziehen der Spannstahllitzen in das Hüllrohr könnte es durch Reibungseinflüsse zu oberflächlichen Gefügeveränderungen (Reibmartensit) am Spannstahl kommen. Diese Möglichkeit ist nur durch sorgfältiges Verarbeiten auf der Baustelle einzuschränken. Unter sehr ungünstigen Umständen sind auch Anrisse auf der Stahloberfläche denkbar. Auf der besichtigten Baustelle konnte dies nicht beobachtet werden.

Auf einer Berliner Baustelle lagerten ca. 100 Spannanker eines Spannstahls St 1080/1230, $d = 36$ mm, gerippt, die als Verpreßanker für vorübergehende Zwecke eingesetzt werden sollten. Die Lagerzeit betrug ungefähr 3 Monate (De-

zember bis März). Die 19 m langen Stäbe waren übereinander gestapelt in Lagen zu rd. 10 Stäben, die unterste Lage befand sich auf dem Untergrund (staubiger Asphalt), die übrigen Lagen waren durch quadratische Kanthölzer getrennt. Die Begrenzung des Lagerplatzes bildete auf der einen Seite eine ausgehobene Baugrube, auf der anderen Seite eine Holzverschalung zur Fahrbahnseite einer stark befahrenen Hauptverkehrsstraße (Abb. 23). Zwei Schichten einer Kunststoffolie bedeckten die Spannstäbe unvollständig, die Lagerseite in Richtung der Fahrbahn war völlig ungeschützt. Alle Stäbe umhüllte im Bereich der späteren freien Ankerlänge auf einer Strecke von ca. 10 m ein PE-Rohr \emptyset 46 x 2, das beidseitig entsprechend der Zulassung mit einer dreilagigen Coroplastbinde abgedichtet war.

Eine optische Begutachtung des Korrosionszustandes ergab, daß alle Stäbe im Bereich der späteren Verpreßstrecke auf einer Länge von ca. 5 m mit einer festhaftenden, gleichmäßigen Rostschicht bedeckt waren (Abb. 24). Den Ankerkopf umgab eine Fettschicht, deren Art und Zusammensetzung nicht ermittelt werden konnte. Die Verrostung war an diesen Stellen deutlich geringer und beschränkte sich im wesentlichen auf leicht zu entfernende, gleichmäßig angeordnete, punktförmige Rostflächen, die sich teilweise auch unter der Coroplastbinde auf der Staboberfläche fortsetzten. Die Art der Verteilung dieser punktförmigen Korrosionsangriffe legte die Vermutung nahe, daß diese bereits vor dem Aufziehen des PE-Rohres, eventuell bei der Lagerung der Stäbe im Werk, entstanden waren.

Die Art der Lagerung muß als völlig unzureichend im Sinne der bestehenden Richtlinien über die langfristige Lagerung von Spannstäben bezeichnet werden. Spannstäbe sollen bis zum Einbau ins Bauwerk bodenfrei und trocken gelagert und vor Berührung mit schädigenden Chemikalien und Feuchtigkeit geschützt werden, Diese Forderungen waren, wie insbesondere durch den Korrosionszustand der

späteren Verpreßstrecke deutlich wurden (Abb.24), keinesfalls erfüllt. Das Abdecken mit Kunststoffolie, im vorliegenden Fall sogar nur unvollständig durchgeführt, fördert aufgrund klimatischer Wechselbedingungen im Tagesverlauf die Betauung der Oberfläche des Spannstahles und kann dadurch ungleichmäßigen, punktförmigen Korrosionsangriff provozieren, der unter Umständen in Verbindung mit Spalten zwischen den gelagerten Stählen bzw. der Folie und Stahloberfläche zu narbenförmigen Korrosionsstellen führt, deren Wirkung unter Last wesentlich gefährlicher einzuschätzen ist als eine gleichmäßige Oberflächenverrostung.

Ein Schutz der Spannstähle in Richtung der Fahrbahnseite fehlte fast völlig, da die Holzverschalung aus Brettern durch Spalte zwischen den Brettern bzw. das Auftreten von Sprühnebel jederzeit das Einwirken von Feuchtigkeit auf den Spannstahl zuließ.

Da der Zeitraum der Lagerung in der Wintersaison lag, war zu befürchten, daß die Spannstähle in Richtung der Fahrbahn auch mit tausalzhaltiger Feuchtigkeit beaufschlagt worden sind. Von drei, an unterschiedlichen Stellen gelagerten Spannstählen, wurden Korrosionsprodukte entfernt und aus dem wasserlöslichen Auszug der Korrosionsprodukte wurde der Chloridgehalt quantitativ bestimmt sowie Sulfat qualitativ nachgewiesen. Zusätzlich wurden die Korrosionsprodukte mit Lackmuspapier auf ihre pH-Reaktion getüpfelt.

Als Ergebnis konnte bei allen drei Proben Sulfat qualitativ deutlich nachgewiesen werden. Dieses Sulfat konnte sich wahrscheinlich aus dem Schwefeldioxid der Abgase vorbeifahrender Autos bilden. Die Lackmusprüfung der Proben ergab eine saure pH-Reaktion, die auf den Sulfat- bzw. Chloridgehalt der Proben zurückzuführen ist. Letz-

...

terer variierte je nach Lage der Probe. Der Chloridgehalt der Probe eines Spannstahls der zur Fahrbahnseite gelagert war betrug 0,042 %, zwei weitere Proben von der Innenseite bzw. aus dem mittleren Bereich der Lagerung zeigten erwartungsgemäß niedrigere Chloridgehalte von je 0,025 %.

Um herauszufinden, ob diese Lagerungsbedingungen die mechanischen Eigenschaften des Spannstahls negativ beeinflussen, wurden von zwei Stäben, die zur Straßenseite gelagert waren, Proben entnommen und im Zugversuch geprüft.

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte

	Probe 1	Probe 2	Gewährleistungswerte
$R_{p_{0,2}}$ in N/mm ²	1116	1111	1080
R_m in N/mm ²	1252	1249	1230
Bruchdehnung A_5 in %	9,9	9,3	--
Bruchdehnung A_{10} in %	8,4	8,3	6,0
Gleichmaßdehnung			
A_g in %	6,9	7,3	4,0

Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, unterscheiden sich die mechanischen Kennwerte der Proben 1 und 2 nur unwesentlich, beide Proben entsprechen in vollem Umfang den Gewährleistungswerten. Der Bruchausgang befand sich bei beiden Proben am Umfang im Bereich des Übergangs zwischen umlaufender Gewinnderippe und glatter Stahloberfläche. Dies entspricht dem üblichen Verhalten dieser Stahlqualität im Zugversuch.

Das Ergebnis dieses Falles der Praxis steht in guter Übereinstimmung zu den Erfahrungen der Laborversuche nach Vor-

korrosion mit ionenhaltigen Medien, die im zweiten Teil des Forschungsberichts diskutiert werden. Auch dort wird deutlich nachgewiesen, dass alleinige Vorkorrosion ohne das Einwirken einer mechanischen Belastung die mechanischen Kennwerte eines Spannstahls der Qualität St 1080/1230 nicht beeinflusst.

3.2.3 Einbau der Spannglieder in die Verschalung:

Das Einlegen der Spannglieder in die Verschalung erfolgt mittels eines Kranes, entweder direkt vom Ablaufhaspel oder unter Zuhilfenahme einer Traverse, Abb. 25. Abb. 26 zeigt einen unsachgemäßen Transport ohne die Verwendung der vorgeschriebenen Traverse. In solch einem Fall muß mit mechanischen Oberflächenverletzungen zumindest der Hüllrohre und einer damit verbundenen Beeinträchtigung beim nachfolgenden Injizieren der Spannglieder gerechnet werden.

Für einen Transport von Stabstählen im Kran ist nur eine bestimmte Zahl von Stäben zulässig. Diese Richtlinie wird auf der Baustelle nach unseren Beobachtungen häufig außer acht gelassen. Die Folge können Knicke und Anrisse an den Hüllrohren sein.

3.2.4 Verweilzeit in der Verschalung, unbetoniert und ungespannt:

Die für Vorschädigungen bedeutendste Phase liegt nach den Erfahrungen der Baustellenbesuche beim Einbau der Spannglieder in die Verschalung bzw. während der Verweilzeit in der Verschalung in unbetoniertem Zustand. In diesem Zeitraum sind die Spannglieder ungeschützt der Atmosphäre ausgesetzt. Abb. 27 und 28 zeigen Längsspannglieder, die 6 Wochen in der Verschalung eingebaut waren.

...

Die Spannglieder sind im Bereich der Festanker auf ca. 0,5 - 0,7 m Länge stark verrostet. Es handelt sich sowohl um großflächigen als auch punktförmigen Korrosionsangriff. Der Rost setzt sich auch im Hüllrohr auf einer Länge von ca. 1 m fort. Dies läßt auf das Eindringen von Regenwasser schließen. Bis zum endgültigen Betonieren vergingen auf dieser Baustelle noch weitere 4 Wochen, so daß die Spannglieder insgesamt 10 Wochen der Atmosphäre ausgesetzt waren.

Abb. 29 zeigt einen der zugehörigen Spannanker der auf dieser Baustelle eingebauten Spannglieder. Die ungenügende Abdichtung zwischen Hüllrohr und Trompete des Spannankers hat zu einer starken punktförmigen Korrosion der freiliegenden Drähte geführt. An den Berührungsstellen zwischen Trompete und Spanndrähten ist der Korrosionsangriff deutlich stärker ausgeprägt.

Aus den Abbildungen 30 und 31 wird deutlich, daß neben Regenwasser auch Leitungswasser für das Eindringen in Spannglieder in Frage kommen kann. Später folgende Bilder werden beweisen, daß Löcher in Hüllrohren häufig anzutreffen sind.

Direktes Aufspritzen von Leitungswasser auf Spannglieder (Abb. 30) bzw. Auftropfen von Wasser aus schadhafte oder ungenügend abgedichteten Schläuchen sollte deshalb vermieden werden (Abb. 31).

In den Abb. 32 - 34 sind unverrohrte bzw. nicht ausreichend verrohrte Koppelstellen von Litzenspanngliedern dargestellt. Das Eindringen von Wasser ist bei diesen Spanngliedern besonders gefährlich, weil sich die Feuchtigkeit und in ihr u. U. enthaltene Schadstoffanreicherungen in den Spalten zwischen den Drähten ansammeln können und sich Spaltkorrosionselemente ausbilden können.

Die Abb. 35 - 39 zeigen Beispiele für Knicke in den Hüllrohren, die entweder beim Transport oder während des Einbaus entstanden sind. Neben den z. B. nach Abb. 39 zu erwartenden Oberflächenbeschädigungen der Spannstähle kann das ordnungsgemäße Verpressen in diesen Bereichen behindert werden.

Eine weitere Vorschädigung kann durch Schweißen in der Nähe von Spanngliedern entstehen. Spannstähle dürfen in keinem Fall geschweißt werden, nach dem Einbau sollte auch in ihrer Umgebung nicht mehr geschweißt werden. Auf den besichtigten Baustellen wurde diese Richtlinie nicht immer angewendet, so daß durch Schweißtropfen entstandene Löcher von 1 - 2 cm Durchmesser in den Hüllrohren gefunden wurden, Abb. 40 - 41. Neben den Löchern kann durch die Wärmeeinwirkung des Schweiß- oder Brennvorganges eine Änderung des oberflächlichen Gefügestandes verursacht werden. Es ist bekannt, daß bereits 0,5 mm tiefe Martensitnarben in der Regel zum mechanischen Versagen des Spannstahls beim Spannen führen.

3.2.5 Verweilzeit im Bauwerk, gespannt, aber nicht injiziert:

Unter gewissen, durch die Konstruktion eines Bauwerks vorgegebenen Bedingungen, können in der Spannbetonpraxis Fälle auftreten, in denen Spannglieder relativ lange (3 bis 6 Monate) unverpreßt und gespannt der Spannkanalatmosphäre ausgesetzt sind. Da im Regelfall diese Spannglieder anschließend injiziert werden, können Informationen über eventuelle korrosionsbedingte Veränderungen oder Schädigungen des Spannstahles in dieser Zeit nur in Sonderfällen gewonnen werden.

Die BAM hatte die Möglichkeit, aus drei Bauwerken Spannstahlproben zu entnehmen und zu prüfen, bei denen Spannstähle unter definierten Lastbedingungen über einen längeren Zeitraum sich unverpreßt im Bauwerk befanden.

Fall I:

Bei einem Brückenbauwerk, das sich u. a. aus Fertigteilträgern zusammensetzte, konnte ein auf der Baustelle hergestellter Fertigteilträger von ca. 35 m Länge nicht verwendet werden, da sich nach dem Erhärten des Betons und dem Vorspannen der Spannglieder eine unzulässige Längsdurchbiegung des Trägers ergeben hatte. Abb. 42 zeigt die Längsseite des T-förmigen Trägers, Abb. 43 seine Vorderseite.

In dem Träger befanden sich 7 Bündelspannglieder des Spanverfahrens SUSPA, St 1470/1670, $d = 7 \text{ mm } \emptyset$, die ca. 4 - 5 Monate mit 55 % der Zugfestigkeit unverpreßt der Spannkanalatmosphäre ausgesetzt waren. Der Festanker war jeweils einbetoniert, der Spannanker in einem Fall nach 3 Monaten geöffnet worden, in den anderen Fällen während des gesamten Zeitraums verschlossen. Der Träger stand in einem Abstand von ca. 50 m neben einem Betrieb zur Stahlerzeugung und war zusätzlich mit einer Zeltplane (Abb. 44) gegen Witterungseinflüsse geschützt.

Um zu ermitteln, welcher Zustand der Spanndrähte unter diesen Bedingungen vorliegt, wurde der Festanker freigestemmt und die aufgestauchten Verankerungsköpfchen der Spanndrähte am Spannanker mittels eines Schneidbrenners abgetrennt, so daß die Drähte aus den Spannkälen herausgezogen werden konnten. Alle Spannkäle wurden mit Preßluft ausgeblasen, Wasser konnte jedoch in keinem Spannkanal gefunden werden.

Der Korrosionszustand der Drähte richtete sich nach der Lage im Spannkanal. Abb. 45 zeigt die Drahtoberfläche in der Nähe des Spannankers, die mit leicht zu entfernendem Flugrost behaftet war. Dasselbe Verhalten zeigt die Stahloberfläche bis zur Mitte des Spanngliedes hin, wobei die inneren Lagen des Bündels zum Teil punktförmigen Oberflächenrost (Abb. 46) und Korrosionselemente mit Narbenbildung auf-

wiesen. In der Mitte der Spannglieder bot der Stahl einen nahezu unversehrten Zustand (Abb. 47). Zwischen Spanngliedmitte und Festanker nahm die punktförmige, durch Betauung hervorgerufene Oberflächenkorrosion zu (Abb. 48), in der Umgebung des Festankers traten auf der Stahloberfläche ebenfalls durch Kondensation entstandene Rostpusteln auf (Abb. 49), unter denen sich zum Teil Korrosionsnarben von ca. 30 - 40 µm Tiefe befanden.

Aus allen Bereichen wurden Proben entnommen, um die mechanischen Kennwerte zu bestimmen. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der mechanischen Kennwerte im Vergleich zu den Werten der Zulassung. Alle Proben zerrissen duktil, auch bei den Proben mit Korrosionsnarben lag der Bruchausgang im Zentrum des Drahtquerschnitts. Die Abweichungen von den Zulassungswerten sind unwesentlich und liegen im Streubereich für diese Stahlqualität.

Tabelle 4

Probenlage	Art der Verrostung	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_{10} %	Z %
Nennwerte der Zulassung	-	1470	1670	6,0	-
Festanker	gleichmäßiger Oberflächenrost	1518	1718	5,7	39
Festanker		1539	1713	6,4	38
Mitte	unverrostet	1505	1679	6,2	38
Mitte		1507	1658	6,0	38
Spannanker	punktförmiger Rost	1455	1633	6,0	37
Spannanker		1483	1661	6,1	35
Spannanker	Korrosionsnarben	1519	1707	6,6	39
Spannanker		1514	1697	6,9	37

Fall II:

Bei einem Brückenbauwerk nach dem Taktschiebeverfahren wurden zur konstruktiven Verstärkung während des Vorbaus in

die untere Bodenplatte (Abb. 50) mehrere nebeneinander angeordnete Längsspannglieder nach dem System SUSPA, St 1470/1670 eingebaut. Die Spannglieder wurden eine Woche nach der Anlieferung bei starkem Regen verlegt, einen Monat später mit 55 % der Zugfestigkeit vorgespannt, 5 Monate im gespannten Zustand belassen, entspannt und nach weiteren 7 Monaten ausgebaut, so daß die Gesamtverweilzeit im Bauwerk im unverpreßten Zustand ca. 13 Monate betrug.

Beim Herausziehen der in einem leichten Bogen nach unten verlegten ca. 16 m langen Spanndrahtbündel aus dem Spannkanaal zeigte es sich, daß die meisten Spannglieder trocken und nur mit leichtem Flugrost behaftet waren. Lediglich ein Spannglied (Abb. 51) war naß. Beim Durchblasen des Spannkanaals floß so viel Wasser aus dem Spannkanaal, daß angenommen werden konnte, ca. 2/3 der Spanngliedlänge war völlig von Wasser umhüllt. Ein Teil des Wassers wurde aufgefangen und analysiert (Tabelle 5).

Tabelle 5

pH-Wert bei 20 °C	11,1
Leitfähigkeit bei 25 °C	249 mS/m
Chloridgehalt	14,8 mg/l
Sulfatgehalt	443,7 mg/l.

Nach Angaben der Bauleitung wurde kein Betonzusatzmittel verwendet. Mehrere Wochen konnte Regenwasser in die Spannkanaäle aufgrund der Bildung von Wasserlachen auf der Bodenplatte eindringen. Dies erklärt auch die große Wassermenge, die aus dem Spannkanaal austrat und den relativ geringen Chloridgehalt der Probe. Das Wasser war, wie der pH-Wert nachweist, wahrscheinlich durch zusätzlich im Spannkanaal vorhandenes Restwasser oder den Kontakt mit dem Beton der Bodenplatte vor dem Eindringen völlig alkalisiert. Das Korrosionsverhalten der Spanndrähte aus diesem Spannkanaal läßt sich anhand der Abb. 52 beschreiben. Im vorderen Teil des Spannkanaals gelegene Drahtbereiche zeigten ebenso wie die Drahtoberflächen aus dem mit Wasser gefüllten Teil des

Spannkanals keinerlei Korrosionsangriff (Abb. 52, links). Die Oberfläche entsprach dem Anlieferungszustand nach dem Walzen. Dies entspricht einer Korrosionsschutzwirkung der in Tabelle 6 angegebenen Lösung. Im hinteren Teil des Spann- gliedes traten in einer Wechseltauchzone kurz vor dem Fest- anker in den Spalten zwischen den Spanndrähten starke Kor- rosionserscheinungen in Form von Rost auf (Abb. 52, rechts), unter denen sich Korrosionsnarben erheblicher Länge (bis zu 10 cm) und Tiefe (50 µm) verbargen.

An den fünf in Abb. 52 dargestellten Proben wurden Zugver- suche durchgeführt. Die Ergebnisse entsprachen in allen Fällen den Werten der Zulassung. Sämtliche Proben rissen duktil, zwischen verrosteten und ungeschädigten Proben be- stand kein Unterschied.

Fall III:

Beim Bau einer Hochbrücke wurde in einem Überbaufeld ein zusätzliches Querspannglied des Typs VSL 5-4 (St 1580/1760) verlegt und nach dem Betonieren mit der Vollspannung von 36,8 Mp vorgespannt. Abb. 53 zeigt den Verlauf der ca. 20 m langen Querspannglieder in der Verschalung des für den Ver- such ausgewählten Vorbauabschnittes. Das Versuchsspannglied enthielt 4 Litzen, 5", deren Länge ca. 20 m betrug. Es wur- de am 12.03.81 in die Verschalung verlegt. Am 17.03.81 wur- de an zwei Stellen das Hüllrohr des Musterspanngliedes ge- öffnet, um einen Eindruck über die Oberfläche der Litzen zu gewinnen. Beide Stellen zeigten, wie aus Abb. 54 hervor- geht, keinerlei Korrosionsangriff. Die Oberfläche entsprach dem nach der Herstellung der Litze vorgegebenen Zustand. Die Hüllrohrinnenfläche war metallisch blank, die Außen- fläche wies leichte punktförmige Anrostungen auf. Um das Eindringen von Feuchtigkeit einzuschränken, war das Hüll- rohr an den überstehenden Enden mit Coroplastbinden ver- schlossen (Abb. 55). Für beide Spanngliedenden wurde ein Spannanker verwendet, um einen späteren Ausbau zu ermög- lichen.

Nach dem Betonieren (17.03.81) wurde ca. 1 Wochen später das Spannglied mit der üblichen Vorspannkraft ($0,55 \cdot R_m$) vorgespannt und in diesem nicht injizierten Zustand ca. 3 Monate bis zum 23.06.81 belassen. Am letztgenannten Termin wurden sämtliche vorgespannten Litzen des Spanngliedes entlastet und aus dem Hüllrohr entnommen. Der Oberflächenzustand der Litzen untereinander unterschied sich nur unwesentlich. Aus einer der eingebauten Litzen (untere Lage im Hüllrohr) wurden 4 ca. 1 m lange Abschnitte herausgetrennt.

Abb. 56 zeigt den Oberflächenzustand der eingebauten Litzen in Bereichen nahe der Mitte des Spanngliedes im Vergleich zum Anlieferungszustand von Proben derselben Charge. Es wird deutlich, daß unter den in dem Musterspannglied herrschenden Umgebungsbedingungen innerhalb der 3 Monate kein visuell erkennbarer Korrosionsangriff an den Litzen eintrat. Das Aussehen der Litzen entsprach dem Zustand beim Einbau, wie ein Vergleich mit Abb. 54 bestätigt.

In Abb. 57 ist ein Vergleich des Korrosionszustandes der Endbereiche des Spanngliedes mit den Anlieferungszustand dargestellt.

Die Proben wurden ca. 50 cm von den jeweiligen Verankerungsbereichen des Spanngliedes entnommen. Beide Bereiche zeigen im Vergleich zum Anlieferungszustand nur unwesentliche, zu meist in den Zwickeln der Litze auftretende Korrosionsercheinungen. Naturgemäß wirken sich äußere klimatische Schwankungen in den Endbereichen der Spannglieder stärker aus als in den entfernteren Zonen des Hüllrohres. Die punktförmigen Anrostungen in den Zwickeln sind deshalb mit größter Wahrscheinlichkeit auf Taupunktunterschreitungen in der Hüllrohratmosphäre zurückzuführen, die ein geringes Feuchtigkeitsangebot auf der Stahloberfläche durch Kondensation bewirken. Der Gesamtzustand der Litzen bezüglich des Korrosionsangriffs unterschied sich kaum vom Anlieferungszustand.

3.2.6 Zeitliche Statistik der Verarbeitungsphasen auf der Baustelle:

Die Korrosion eines Stahles in feuchter Umgebung hängt in starkem Maße von der Zeit ab, in der das Korrosionsmedium mit dem Werkstoff Kontakt hat. Aus diesem Grunde baten wir die Verarbeiter von Spannstahl um Unterlagen, die es uns ermöglichten, eine zeitliche Statistik über die Länge der einzelnen Verarbeitungsphasen auf der Baustelle zu ermitteln. Die gewonnenen Daten sollten als Richtschnur für die Zeiten gelten, in denen der Spannstahl in den praxisnahen Laborversuchen der Vorkorrosion und ihrer Aktivierung unter Last unterworfen ist.

Leider stellte uns lediglich die Firma SUSPA Baustellenprotokolle zur Verfügung, so daß sich die Auswertung auf dieses Spanverfahren beschränken muß. In den Abb. 58 - 61 ist die relative Häufigkeit zwischen den Verarbeitungsphasen in verschiedenen Kategorien für die Jahre 1977 und 1978 dargestellt. Eine Aufteilung zwischen den Jahren oder eine Differenzierung nach Jahreszeiten ergab keinen statistisch relevanten Unterschied bezüglich der Verteilungen. Aus den Abbildungen wird deutlich, daß sich der Median in allen Verarbeitungsphasen jeweils in den unteren Kategorien befindet. Für das Auftreten von Spannungsrißkorrosion sind die Zeiträume wichtig, in denen der Spannstahl unverpreßt unter Teil- bzw. Endvorspannung im Bauwerk belastet wird. Bei diesem Spanverfahren erfolgt das Injizieren der Spannkanäle in fast allen Teilen unmittelbar nach dem Aufbringen der Endspannung. Lediglich in 7 % aller Fälle der letzten zwei Jahre ergaben sich Abweichungen. Der längste Zeitraum zwischen Endspannung und Injizieren lag auf einer Baustelle bei ca. 3 Monaten, bei den übrigen Baustellen zwischen 2 und 3 Wochen.

4. Zusammenfassung:

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden durch Baustellenuntersuchungen die für die Korrosion von Spannstählen relevanten baupraktischen Umgebungsbedingungen vor dem Injizieren ermittelt. Dabei ergaben sich die im folgenden aufgeführten Erkenntnisse.

Die Transportbedingungen zur Baustelle wurden durch eine Umfrage unter den Spannstahlverarbeitern und Baustellenbesuche untersucht. Dabei stellte sich heraus, daß Fertigspannglieder zumeist auf offenem LKw zur Baustelle gelangen und unverrohrte Spannstähle, die während des Transports besonders gefährdet sind, stets auf geschlossenem LKw zur Baustelle transportiert werden. Nach den Erfahrungen der Baustellenbesuche muß die Möglichkeit einer korrosionsbedingten Vorschädigung beim Transport der Spannstähle als äußerst gering angesehen werden. Korrosionsschutzmittel werden nur dann verwendet, wenn für Transport, Lagerung auf der Baustelle oder unverpreßte Verweilzeit im Bauwerk außergewöhnlich lange Zeiten erwartet werden.

Die Lagerung der Spannstähle auf Baustellen erfolgte zumeist in einer normgerechten, korrosionseinschränkenden Weise (s. DIN 4227 bzw. entsprechende Ausführungsbestimmungen). Auf einigen Baustellen wurden jedoch bodennahe Lagerungsplätze und Abdeckungen der Spannstähle mit Zeltplanen oder Plastikbahnen ermittelt, die aufgrund der mikroklimatischen Bedingungen zur Schwitzwasserbildung mit entsprechenden Korrosionsangriffen führen und deshalb zu vermeiden sind.

Auf einer Baustelle wurden während der Wintermonate nur unzureichend geschützte Spannstähle St 1080/1230 neben einer stark befahrenen Straße gelagert. Durch Tausalzeinwirkung wurde eine starke gleichmäßige Verrostung der Spannstahloberfläche mit erhöhten Chloridgehalten auf der Oberfläche der Spannstähle im Bereich der Spritzwassereinwirkung festgestellt. Trotz dieser ungünstigen Verhältnisse konnte keine Veränderung der mechanischen Kennwerte ermittelt werden.

Die für Vorschädigungen bedeutendste Phase besteht beim Einbau der Spannglieder in die Verschalung bzw. während der Verweilzeit in der Verschalung in unbetoniertem Zustand. Ungenügende Verrohrung der Spannglieder und Löcher in den Hüllrohren bieten während dieser Zeit die Möglichkeit des Eindringens von Regen- oder Leitungswasser bzw. schaffen eine Voraussetzung für das Eindringen von Restwasser aus dem Betoniervorgang (s. Abschnitt Hüllrohrwässer). Knicke in den Hüllrohren, die nach unseren Erfahrungen als unvermeidliche Baustellenbedingungen angesehen werden müssen, beeinträchtigen vielfach den späteren Verpreßvorgang.

Eine zeitliche Statistik über einen Zeitraum von zwei Jahren ergab bei einem ausgesuchten Spannverfahren eine mittlere Verarbeitungszeit (Anliefern der Spannglieder bis zum Verpressen) von ca. 45 Tagen. Prüfzeiträume zur Spannstahlkorrosion im Labor von 1000 Stunden erscheinen unter diesem Gesichtspunkt realitätsnah.

Relative Feuchtigkeit und Temperatur wurden in verschiedenen Stadien der Verarbeitung von Spanngliedern auf Baustellen gemessen. Während der Lagerung und Verweilzeit im unbetonierten Zustand kann zwischen zwei möglichen Bedingungen unterschieden werden: in trockenen Hüllrohren herrschen während dieser Zeit die dem äußeren Klima entsprechenden Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse vor, während in Hüllrohren mit selbst geringen Wasseransammlungen stets eine rel. Feuchte von 100 % nachgewiesen wurde, die bei zeitlichen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf mit Taupunktunterschreitungen zu Kondensation von Wasser auf der Stahloberfläche und entsprechenden meist punktförmigen Korrosionsangriffen führen. Nach dem Betonieren entwickeln sich Feuchtigkeit und Temperatur im unverpreßten Hüllrohr völlig unabhängig von den äußeren atmosphärischen Bedingungen. Durch die bei der Erstarrung des Betons freigesetzte Reaktionswärme steigt die Temperatur im Hüllrohr zunächst an, wobei der erreichte Maximalwert von der Höhe der Betondeckung abhängt. Nach Erreichen des Maximalwertes (in unseren

Messungen ca. 60 °C) fällt die Temperatur anschließend kontinuierlich auf den Wert der äußeren Umgebung des Bauwerks ab.

Die relative Feuchte in unverpreßten Spanngliedern erreicht bereits kurzfristig nach dem Betonieren ($t < 20$ h) einen Wert von 100 % und behält diese Höhe bis zum Injizieren. Diese Klimaveränderung im Hüllrohr kann auf während des Betoniervorganges eingedrungene Feuchtigkeit (s. Hüllrohrwässer) zurückgeführt werden. Durch die vorher beschriebene Temperaturabsenkung im Hüllrohr während des Erstarrungsvorgangs des Betons tritt unter diesen Bedingungen Taupunktunterschreitung ein, die ein für die Korrosion notwendiges Feuchtigkeitsangebot liefert.

Neben Feuchtigkeit und Temperatur ist der Sauerstoffgehalt der Spannkanaalatmosphäre ein weiterer wichtiger Parameter für den Ablauf von Korrosionsreaktionen, Messungen an einseitig geöffneten bzw. nicht völlig abgedichteten Spanngliedern ergaben sowohl vor als auch nach dem Betonieren keine Veränderung des atmosphärischen Sauerstoffgehaltes von 21 %.

In längeren (ca. 30 m) Spanngliedern mit ausreichender Abdichtung konnten nach dem Betonieren abgesenkte Sauerstoffgehalte bis zu 8 % gemessen werden. In der Nähe des Spannankers lagen die Sauerstoffgehalte höher als in weiterer Entfernung vom Spannanker. Dies läßt auf einen Konzentrationsgradienten des Sauerstoffgehalts über die Spanngliedlänge schließen.

Wasser kann auf vielfältige Weise in Spannkanaäle eindringen. Schon beim Transport, Verlegen und Verweilen in der Verschalung kann durch schadhafte Hüllrohre oder an freiliegenden Ankerteilen Wasser in Spannglieder eindringen. Nach dem Betonieren besteht ebenfalls die Möglichkeit, daß Restwasser vom Betonieren in die Spannkanaäle gelangt.

Nach unseren Untersuchungen muß die Wahrscheinlichkeit für das Eindringen von Wasser in die Spannglieder beim Betonie-

ren als sehr hoch angesehen werden. Beim Durchblasen mit Preßluft vor dem Betonieren wurde auf mehreren Baustellen an verschiedenen Spannsystemen und Spanngliedern Wasser aufgefangen und analysiert. Die Menge des austretenden Wassers steht in Zusammenhang mit der Verwendung von Betonzusatzmitteln beim Betonieren. Erstarrungsverzögerer erhöhen die Fluidität und führen zu höheren Wassergehalten in den Hüllrohren.

In allen Hüllrohrwässern wurde der Chlorid- und Sulfatgehalt sowie der pH-Wert bestimmt. Dabei konnten zwei Gruppen von Wässern ermittelt werden. Die erste Gruppe enthielt niedrige Chlorid- (4 - 8 mg/l) und Sulfatgehalte (28 - 117 mg/l), der pH-Wert lag jedoch in den meisten Fällen im alkalischen Bereich (10,2 - 11,3). Beide Ergebnisse deuten auf Leitungswasser hin, das jedoch mit geringen Restwasseranteilen vermischt bzw. mit Beton in Kontakt gekommen sein muß.

Bei der zweiten Gruppe der Hüllrohrwässer handelte es sich um Restwasser aus dem Betoniervorgang. Ihre Chloridgehalte schwankten zwischen 60 und 350 mg/l, bei den Sulfaten konnten Gehalte bis zu 5000 mg/l nachgewiesen werden. In der Mehrzahl der Proben wurden höhere pH-Werte (10 - 12) ermittelt, bei Hüllrohrwässern, die sich bereits über einen längeren Zeitraum im Spannkanal befanden (ca. 3 Monate) wurden auch pH-Werte im Neutralbereich gemessen.

Da nach den zur Zeit üblichen Verarbeitungsrichtlinien das Auftreten von Hüllrohrwässern nicht verhindert werden kann und diese bis zum endgültigen Verpressen der Spannglieder im Spannkanal verbleiben, wurde ihr Einfluß auf das Korrosionsverhalten verschiedener Spannstahlsorten in praxisnahen Dauerstandversuchen überprüft (s. Bericht 2). Bei der Entwicklung eines praxisorientierten Prüfverfahrens wurden die Ergebnisse aus den Zusammensetzungen der Hüllrohrwässer ebenfalls berücksichtigt.

Unter gewissen, durch die Konstruktion eines Bauwerks vorgegebenen Bedingungen oder länger anhaltende ungünstige Witte-

rungsverhältnisse, die ein Verpressen der Spannstähle verhindern, können in der Spannbetonpraxis Fälle auftreten, in denen Spannglieder relativ lange (3 - 6 Monate) unverpreßt und mechanisch belastet der Spannkanalatmosphäre ausgesetzt sind. Da im Regelfall diese Spannglieder anschließend injiziert werden, können Informationen über eventuelle korrosionsbedingte Veränderungen oder Schädigungen des Spannstahles in dieser Zeit nur in Sonderfällen gewonnen werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden an drei Bauwerken Spannstahlproben entnommen und geprüft, bei denen Spannstähle unter definierten Lastbedingungen über einen längeren Zeitraum (3 - 13 Monate) unverpreßt im Bauwerk verweilten.

In allen drei Fällen handelte es sich bei dem eingesetzten Spannstahl um kaltgezogenen Stahl, der entweder als Bündelspannglied (St 1470/1670) oder Litze (St 1580/1760) eingesetzt wurde. Die Einzelheiten zum Versuchsablauf sind im Bericht eingehend beschrieben. Bei der Litze traten nach 3 Monaten Einbauzeit nur unbedeutende Korrosionserscheinungen in der Nähe des Ankerbereiches auf, die keinen Einfluß auf die mechanischen Kennwerte des Spannstahles bewirkten. In den anderen Fällen wurden unter ungünstigeren Umgebungsbedingungen zwar Korrosionsnarben bis zu 50 µm ermittelt, die aber auch ohne Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften des Spannstahles blieben.

5. Literatur:

- (1) U. Nürnberger, Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 308, (1980), Bundesminister für Verkehr Bonn-Bad Godesberg
- (2) DIN 4227, Spannbeton Ausgabe 1979
- (3) Erläuterungen DIN 4227, Spannbeton Ausgabe Dezember 1979, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton Heft 320, Berlin 1980
- (4) DIN 50 900 Teil 1 1975
- (5) Rahmel, A. und W. Schwenk, Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen (1977), Verlag Chemie Weinheim
- (6) Kaesche, H., Die Korrosion der Metalle, Berlin, (1979) Springer Verlag
- (7) T. P. Radhakrishman und L. L. Shreir, Electrochim. Acta 11 (1966) 1007
- (8) J. G. Marlet, H. H. Johnson, A. R. Troiano, JSSJ 189 (1958) 37

Meßpunkt 3 frei unterhalb der Brücke

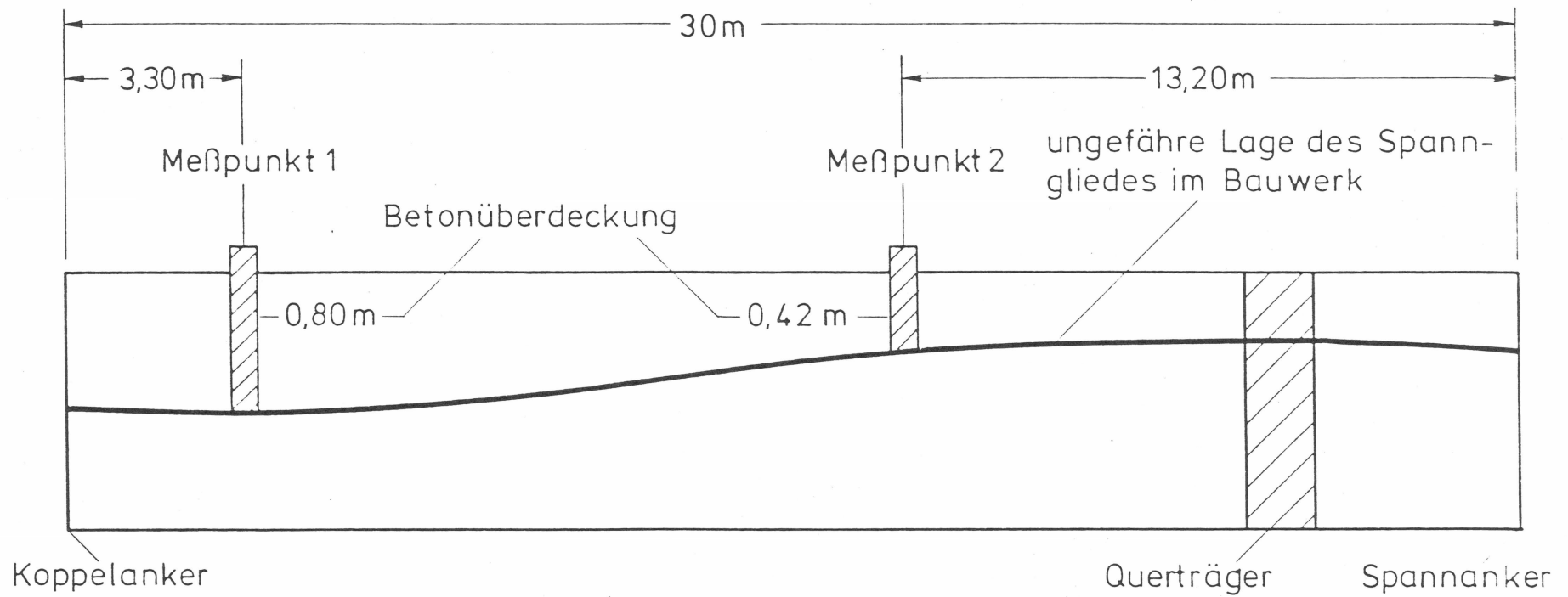


Abb. 1

Lage des Spanngliedes im Bauwerk

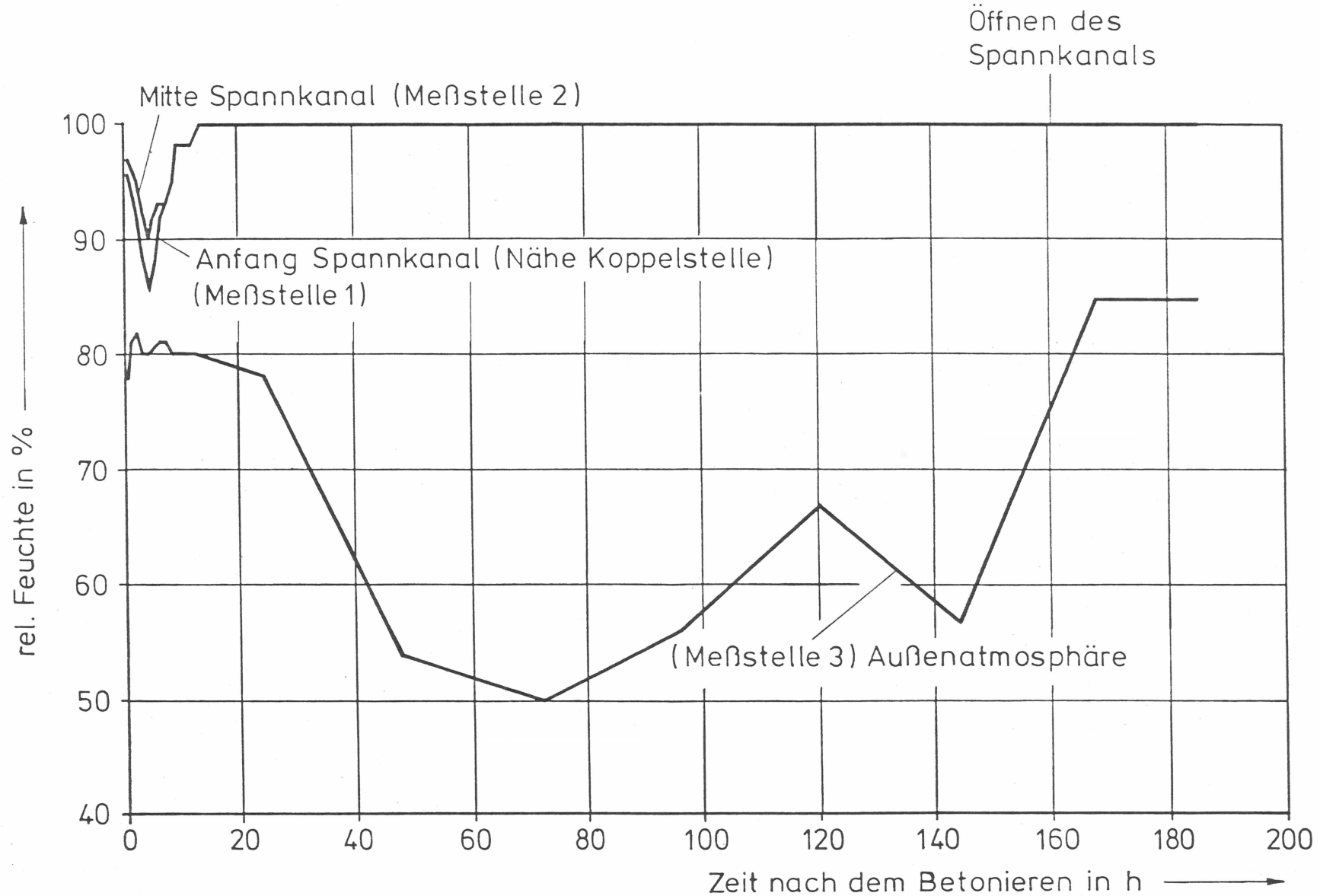


Abb. 2

Relative Feuchte im Spannglied nach dem Betonieren

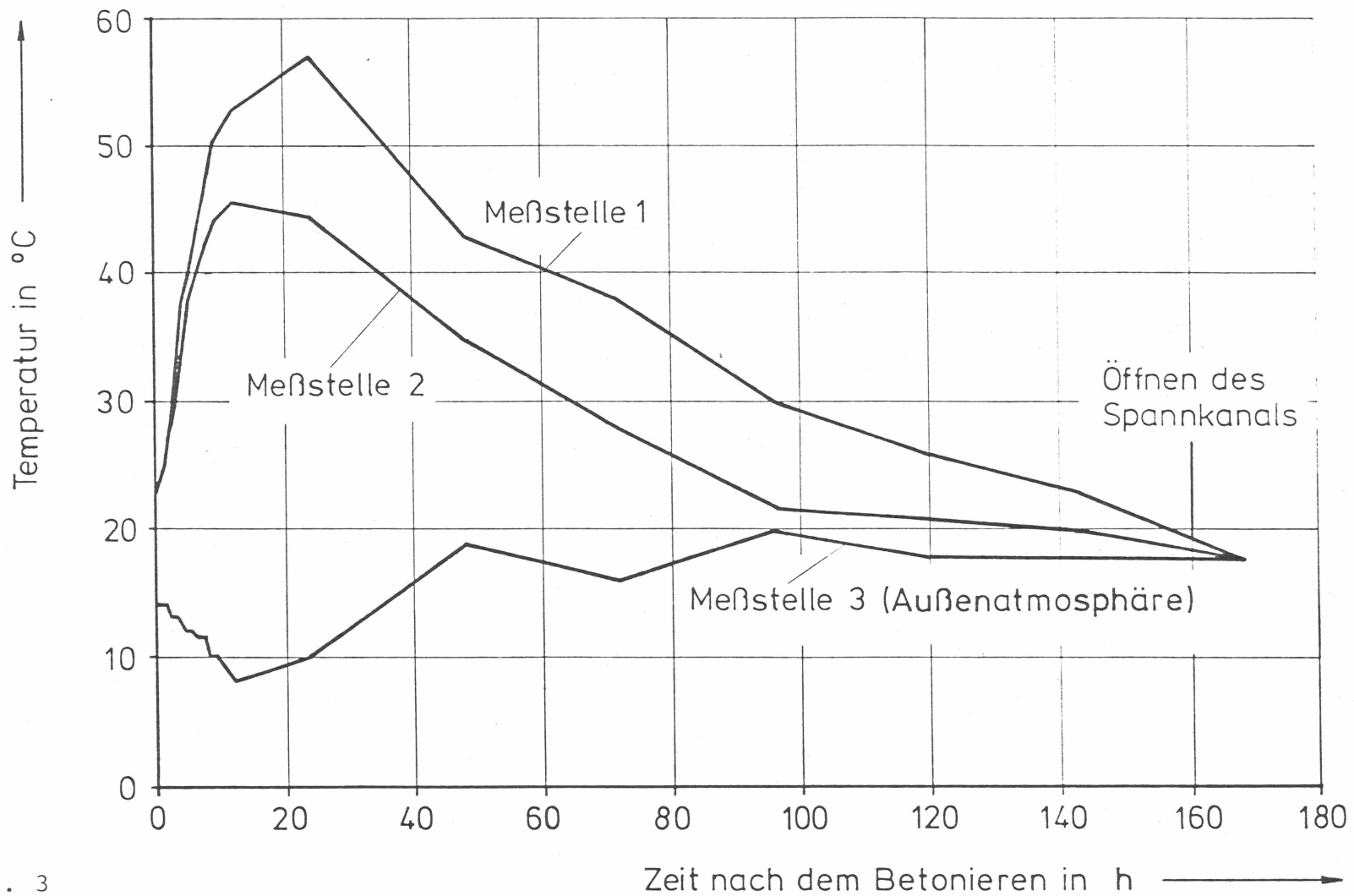


Abb. 3

Temperatur im Spannglied nach dem Betonieren

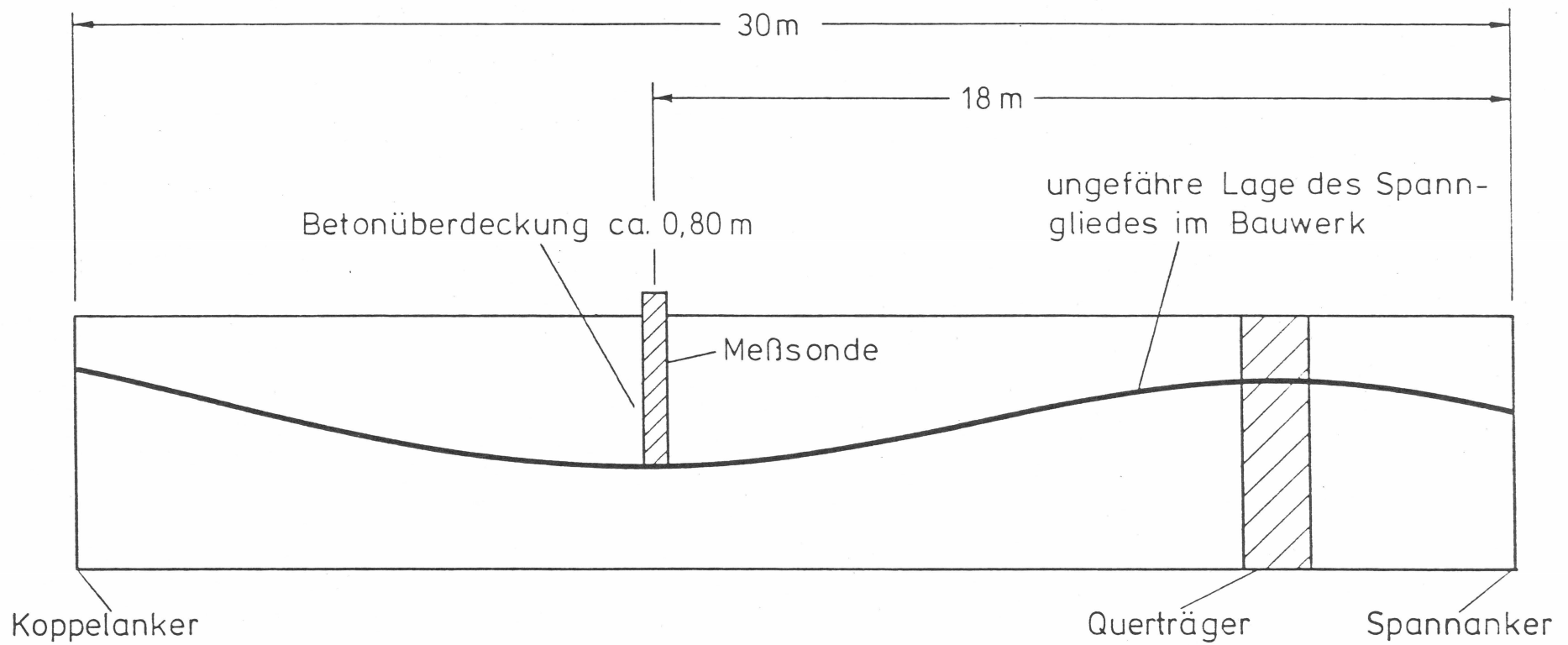


Abb. 4

Lage des Spanngliedes im Bauwerk

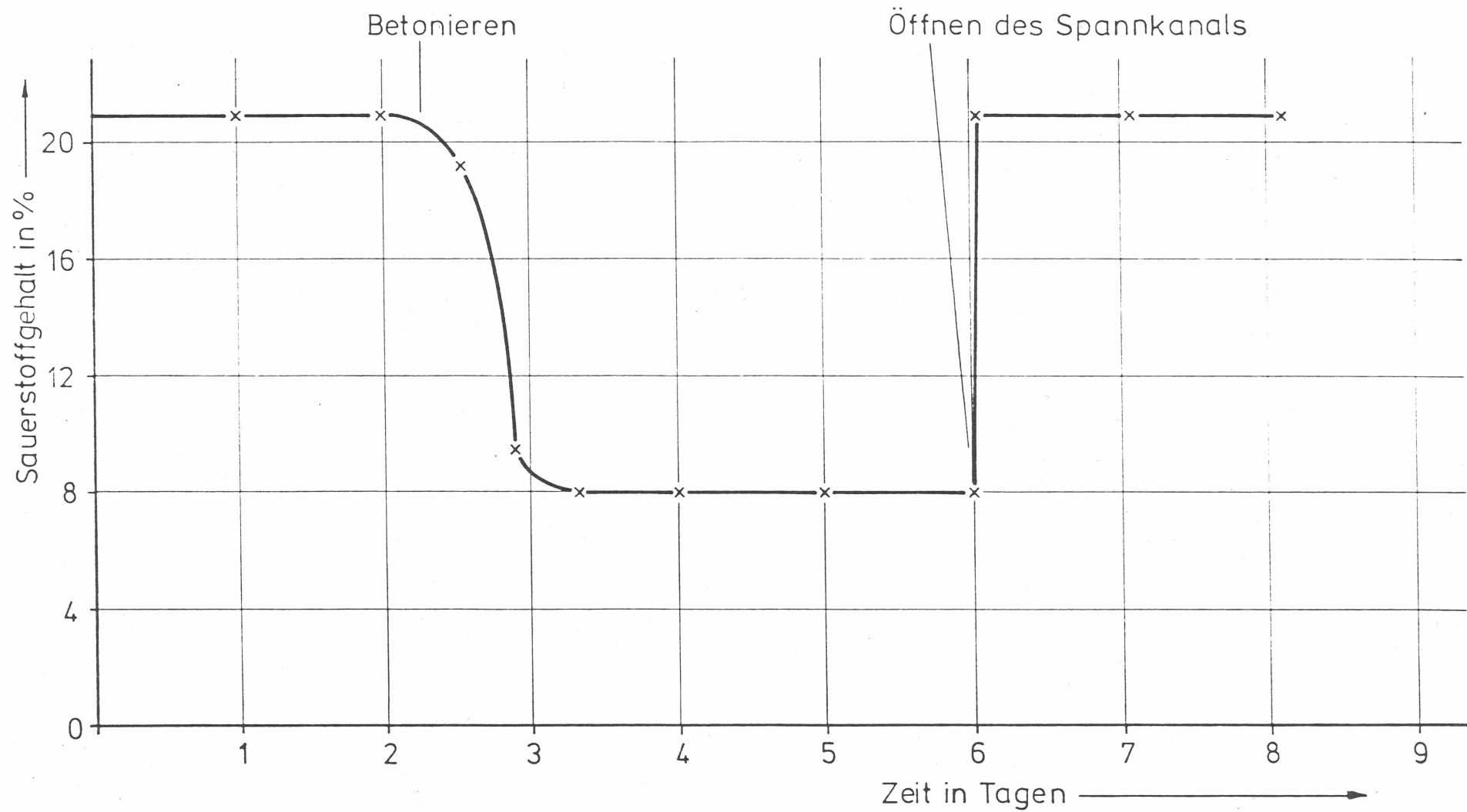


Abb. 5

Sauerstoffgehalt im Spannglied nach dem Betonieren (Versuch I)

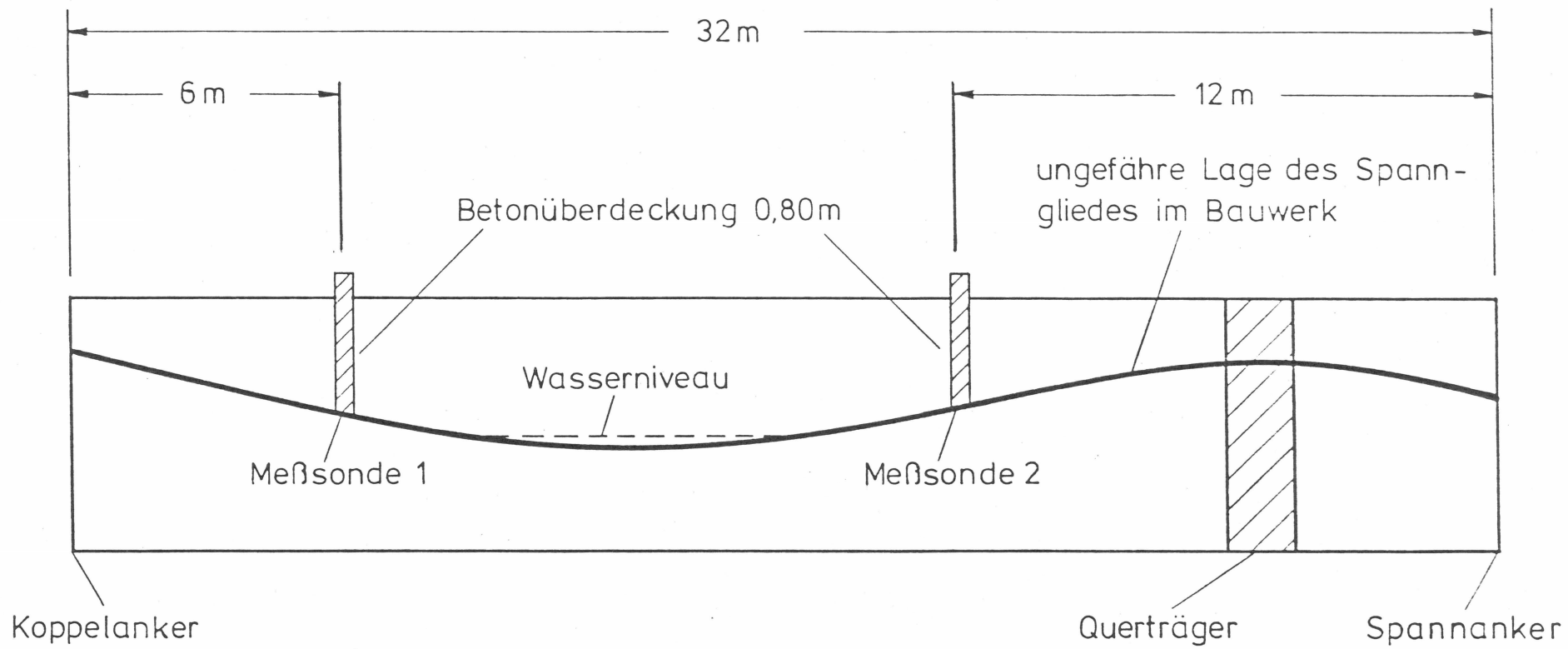


Abb. 6

Lage des Spann- gliedes im Bauwerk

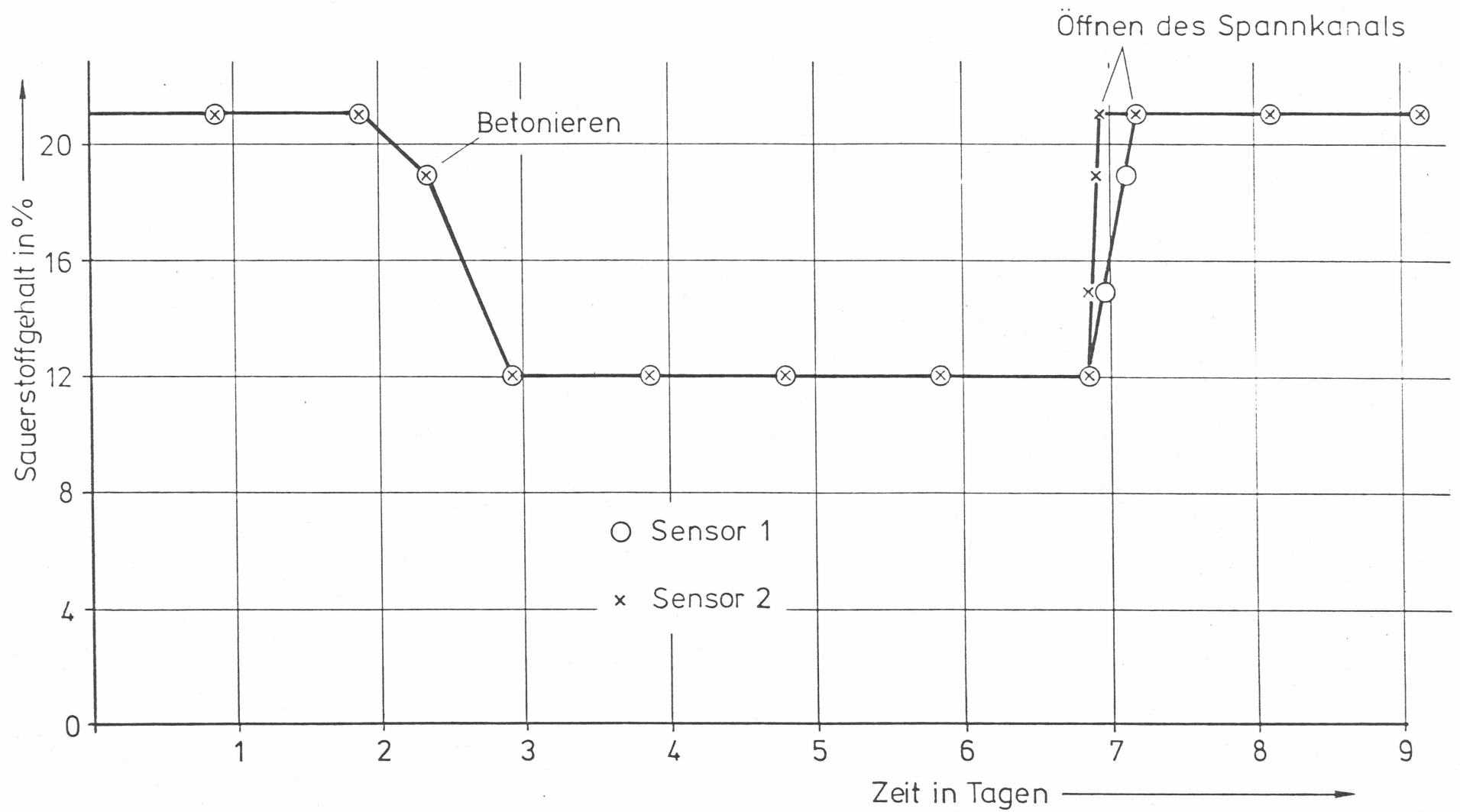


Abb. 7

Sauerstoffgehalt im Spannglied nach dem Betonieren (Versuch II)

Abb.8 : Sauerstoffgehalt im Spannkanal in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch III)

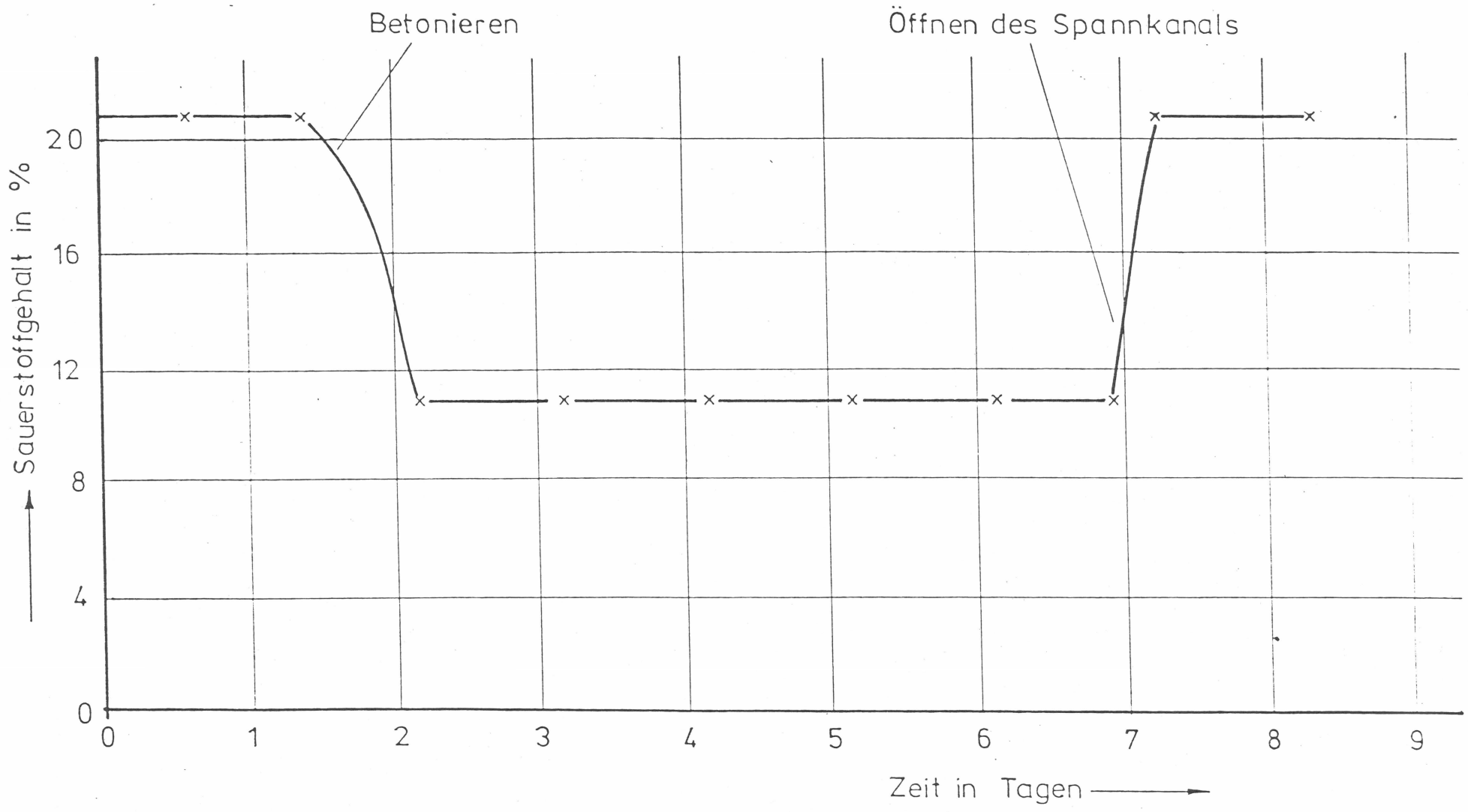


Abb. 9 : Sauerstoffgehalt im Spannkanal in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch IV)

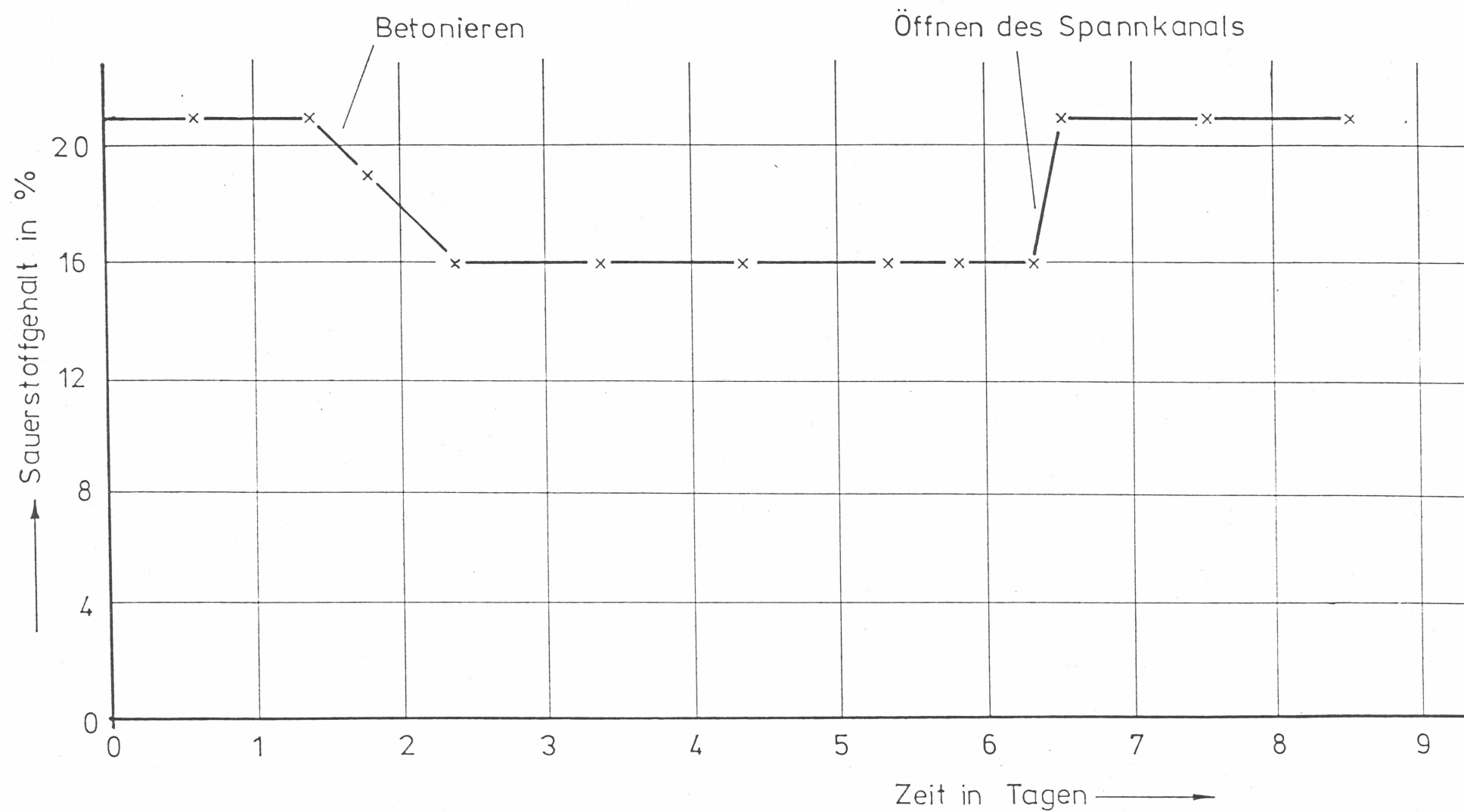


Abb.10: Sauerstoffgehalt im Spannkanal in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch V)

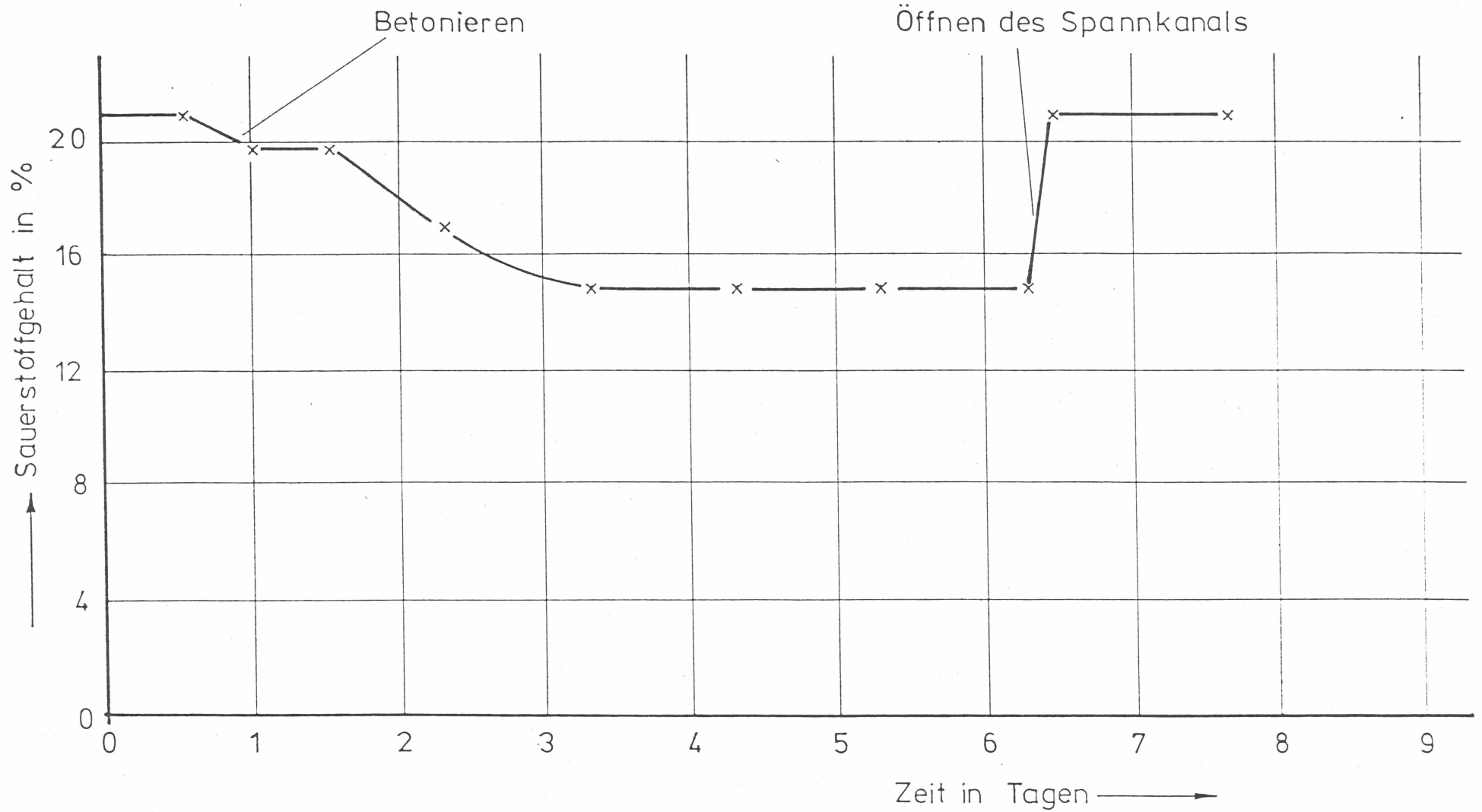
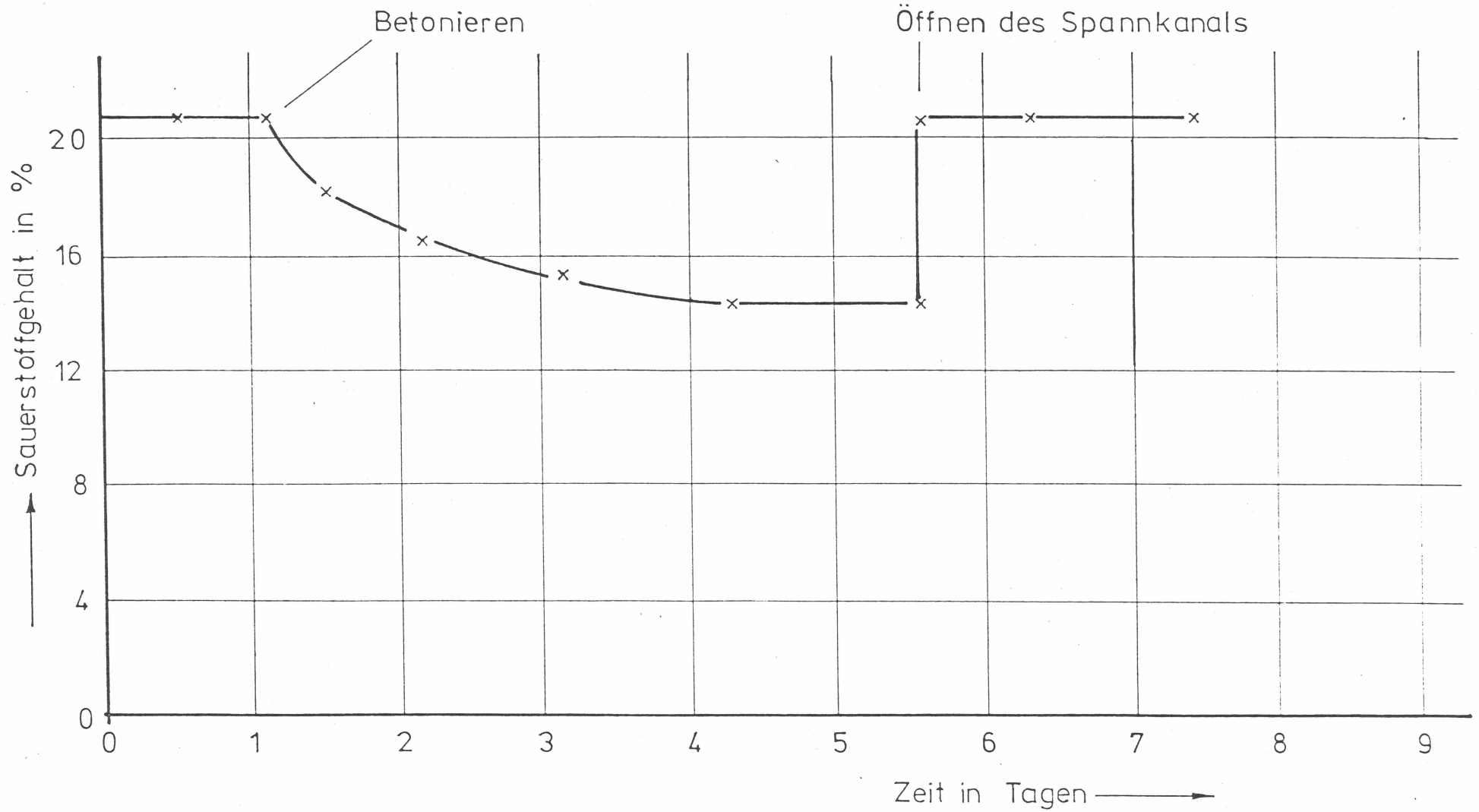


Abb.11: Sauerstoffgehalt im Spannkanal in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch VI)



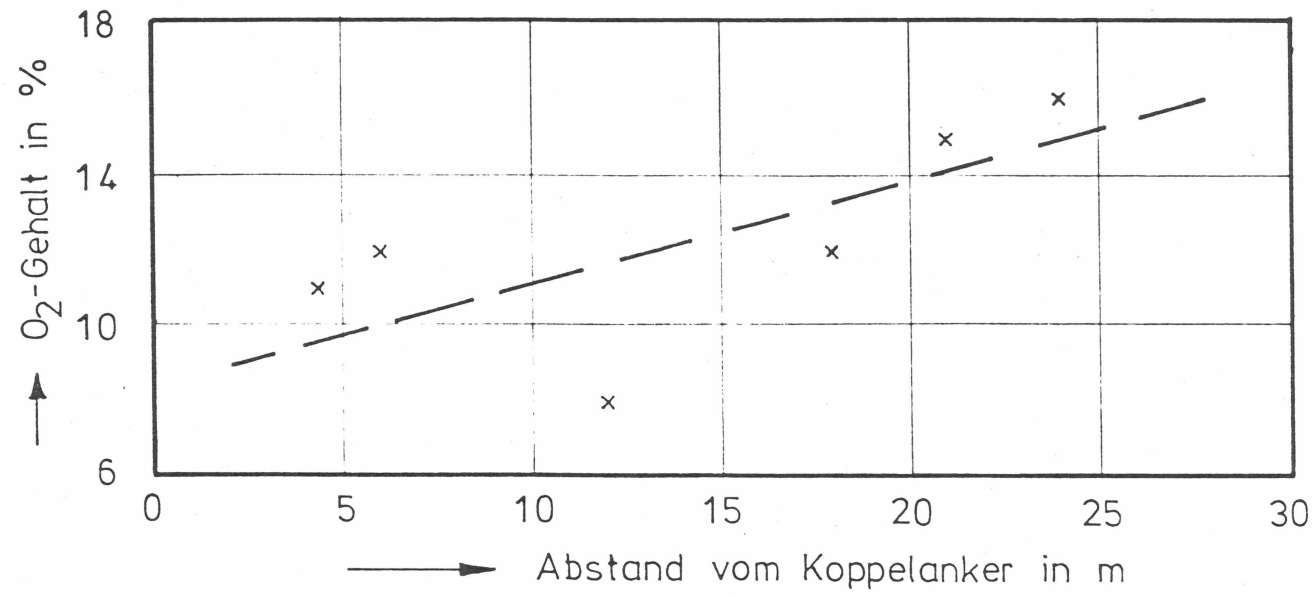


Abb. 12

Sauerstoffgehalt im Spannkanal in Abhängigkeit vom Abstand zum Koppelanker

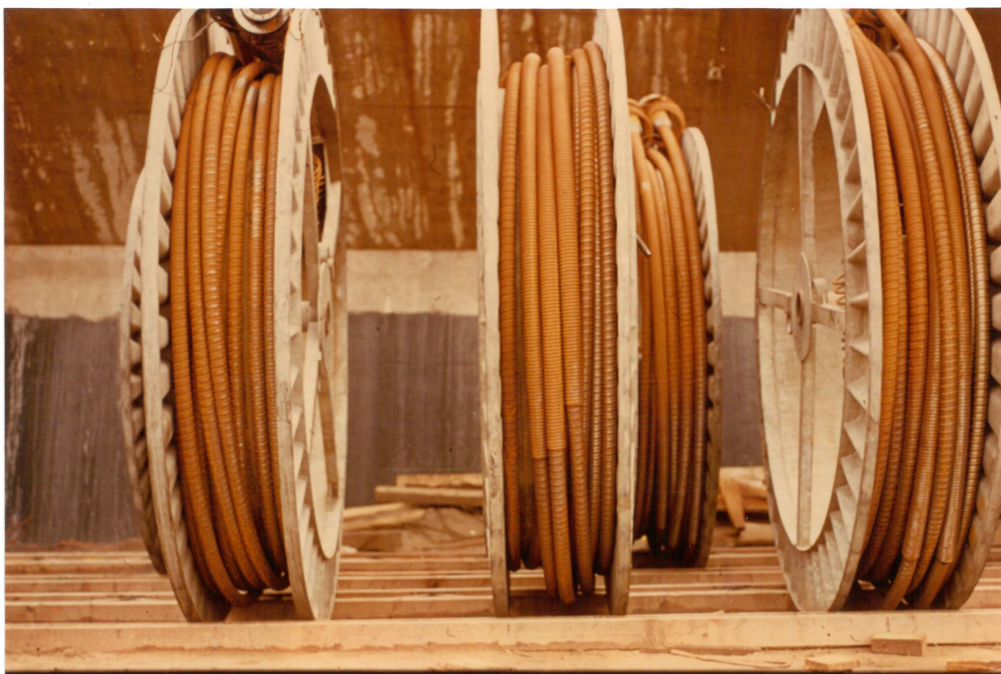


Abb. 13
Verrohrte Spannglieder (SUSPA), Anlieferungszustand



Abb. 14
Lagerung von Spanngliedern (SUSPA) auf der Baustelle



Abb. 15
Lagerung von Spann-
gliedern (SUSPA) auf
der Baustelle



Abb. 16
Ungünstige Lagerung von Spann-
gliedern (SUSPA) auf der
Baustelle



Abb. 17
Ungünstige Lagerung von Spanngliedern (SUSPA) auf der Baustelle



Abb. 18
Punktförmiger Korrosionsangriff durch Kondenswasser an Spanngliedenden



Abb. 19
Korrosion im Zwickelbereich von Litzen



Abb. 20
Korrosion im Zwickelbereich von Litzen



Abb. 21
Korrosion im Zwickelbereich von Litzen



Abb. 22
Einziehen von Spannstahllitzen in Hüllrohre auf der Baustelle



Abb. 23

Ungünstige Lagerung von Spannstählen auf der Baustelle



Abb. 24

Rost auf gelagerten Spannstählen



Abb. 25

Transport von Spanngliedern mittels Krantraverse



Abb. 26

Transport von Spanngliedern ohne Traverse

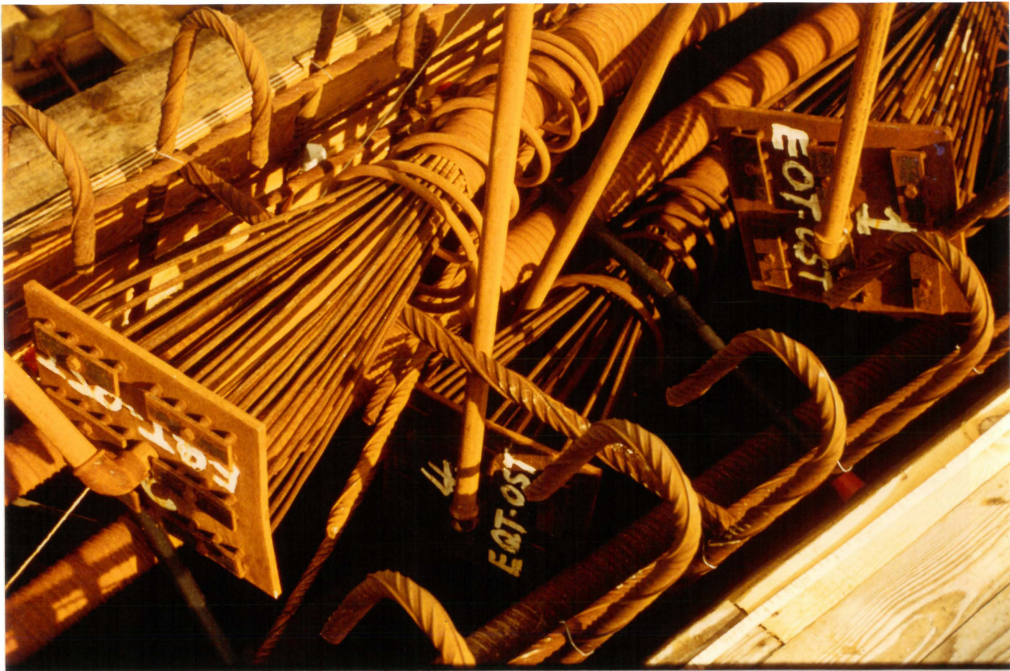


Abb. 27

Flächige Korrosion an freiliegenden Spanngliedenden (Festanker)



Abb. 28

Flächige Korrosion an freiliegenden Spanngliedenden (Festanker)

...



Abb. 29

Korrosion an ungenügend verrohrten Spanngliedern



Abb. 30

Aufspritzen von
Wasser auf Spann-
glieder



Abb. 31
Auftropfen von Wasser aus einem schadhaften Schlauch
auf Spannglieder



Abb. 32
Freiliegende Koppelstellen



Abb. 33
Freiliegende Koppelstellen



Abb. 34
Freiliegende Koppelstellen



Abb. 35
Knick und Loch am Hüllrohr

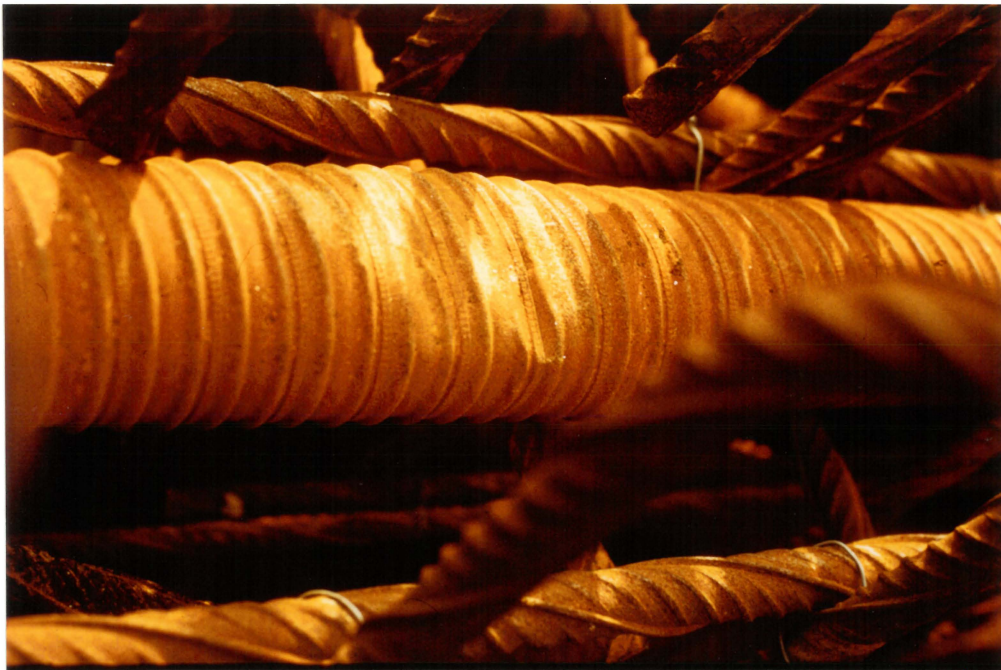


Abb. 36
Knick am Hüllrohr

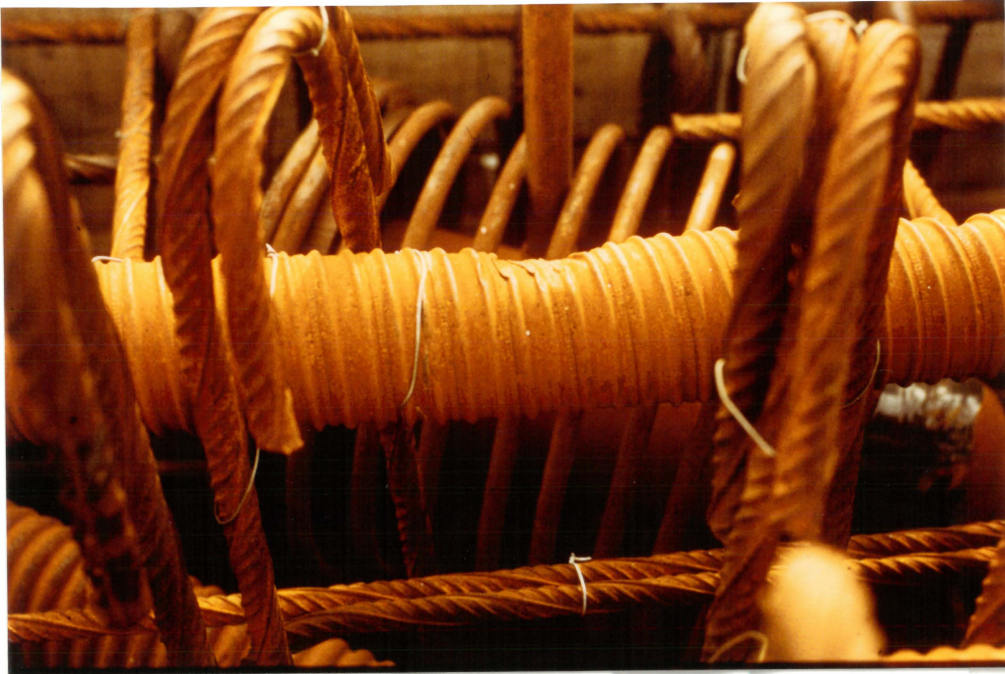


Abb. 37
Knick am Hüllrohr



Abb. 38
Knick am Hüllrohr



Abb. 39
Knick am Hüllrohr

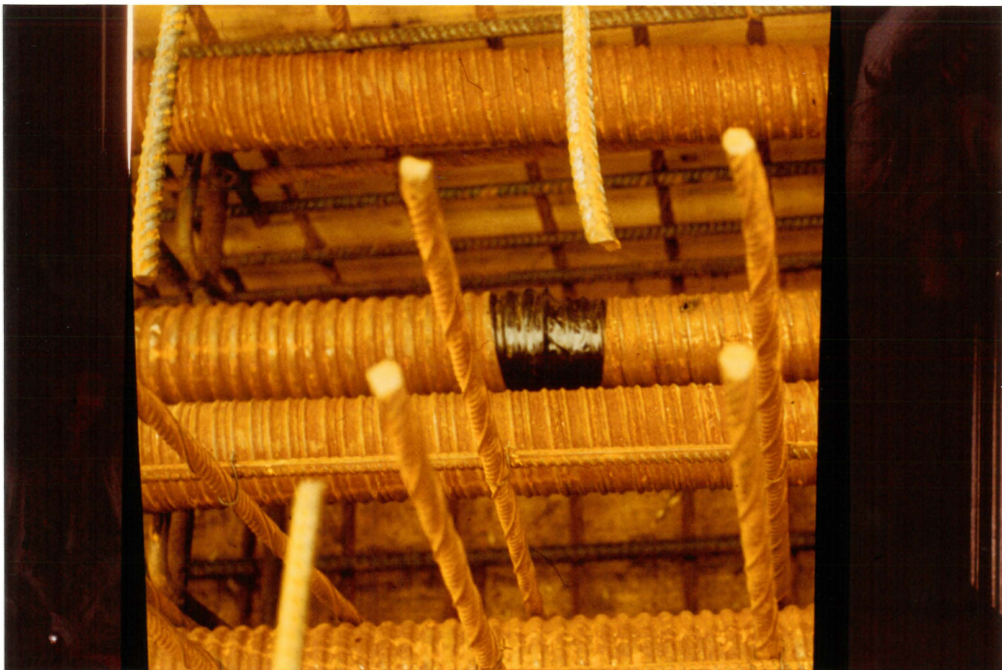


Abb. 40
Loch im Hüllrohr infolge Schweißbeinwirkung

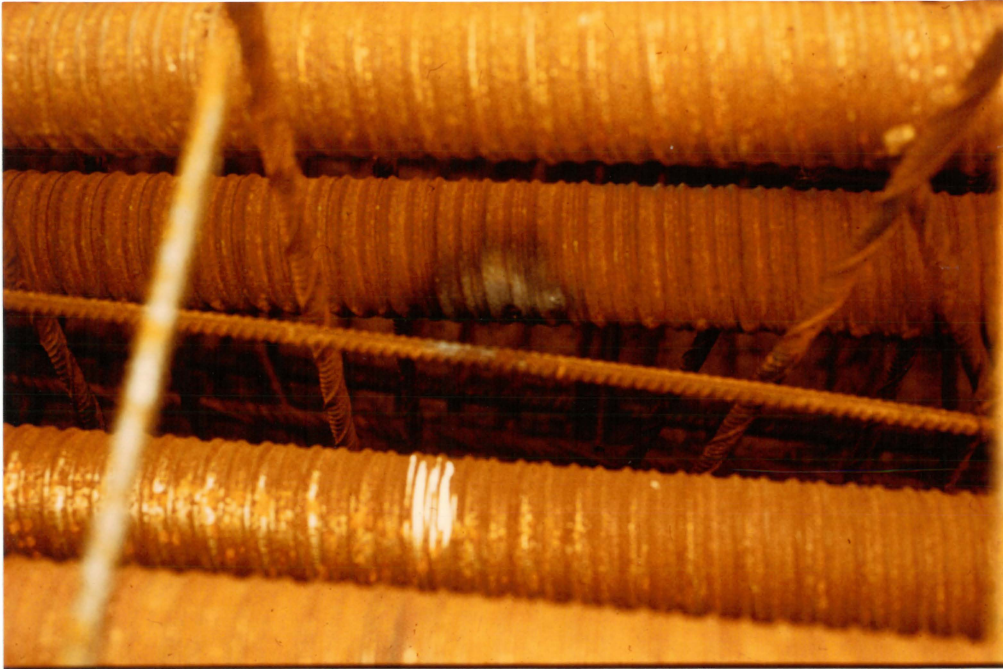


Abb. 41

Loch im Hüllrohr infolge Schweißbeinwirkung



Abb. 42

Fertigteilträger (Längsseite)

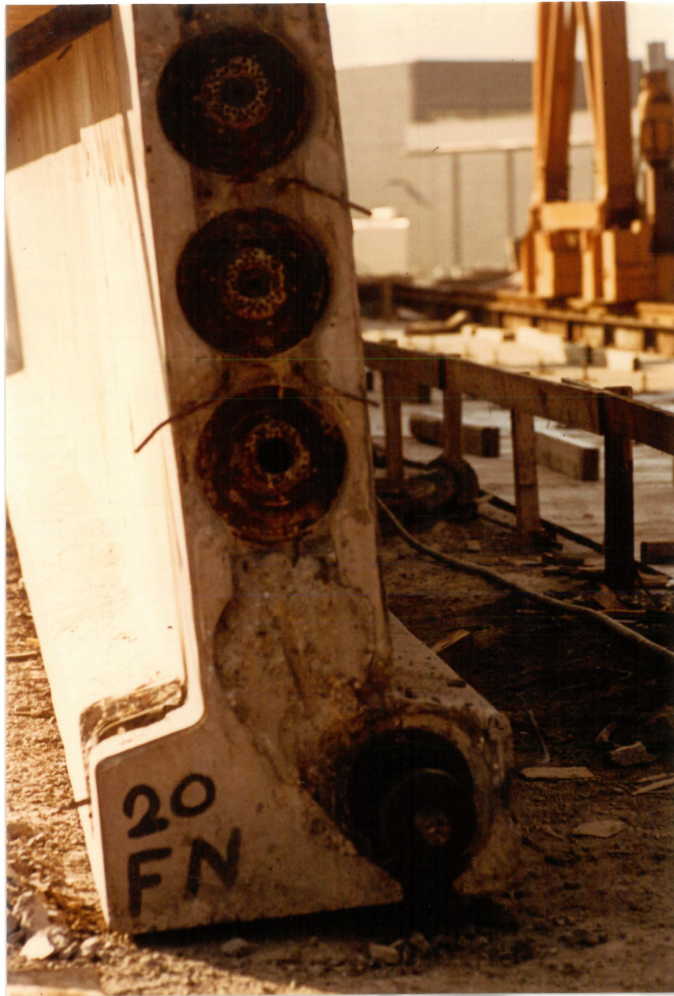


Abb. 43
Fertigteilträger
(Vorderseite)



Abb. 44
Abdeckung des Fertigteilträgers

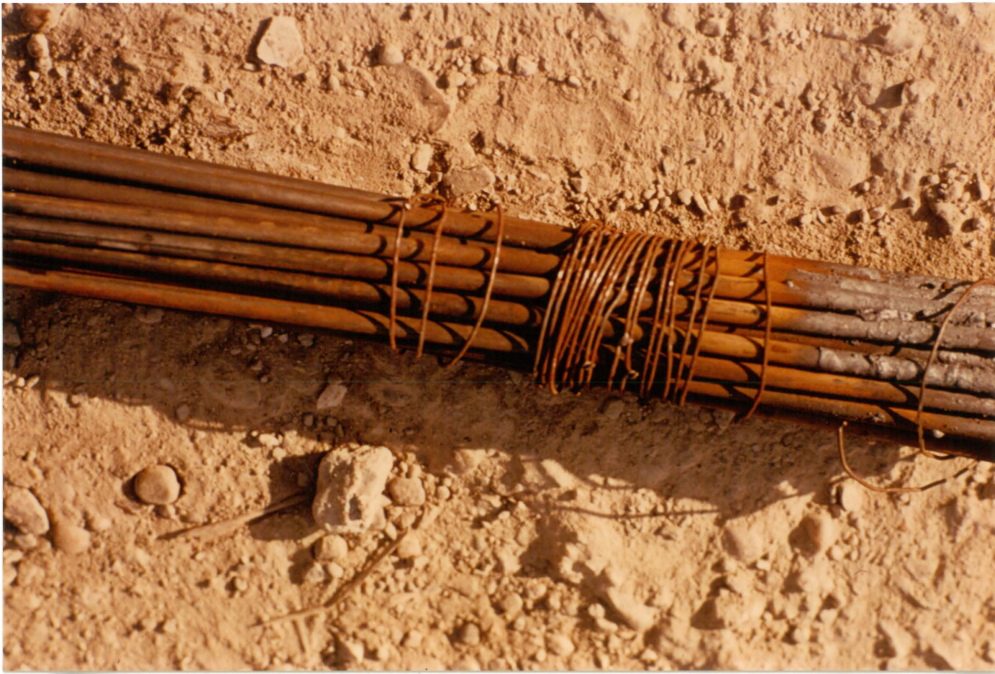


Abb. 45
Korrosionszustand in der Nähe des Spannankers

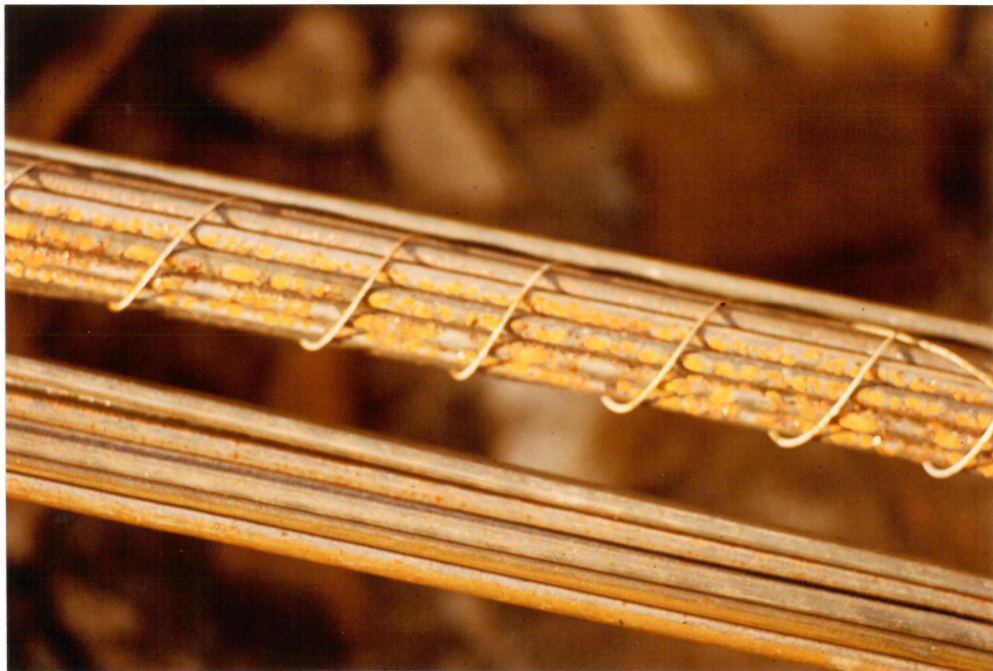


Abb. 46
Punktförmiger Oberflächenrost

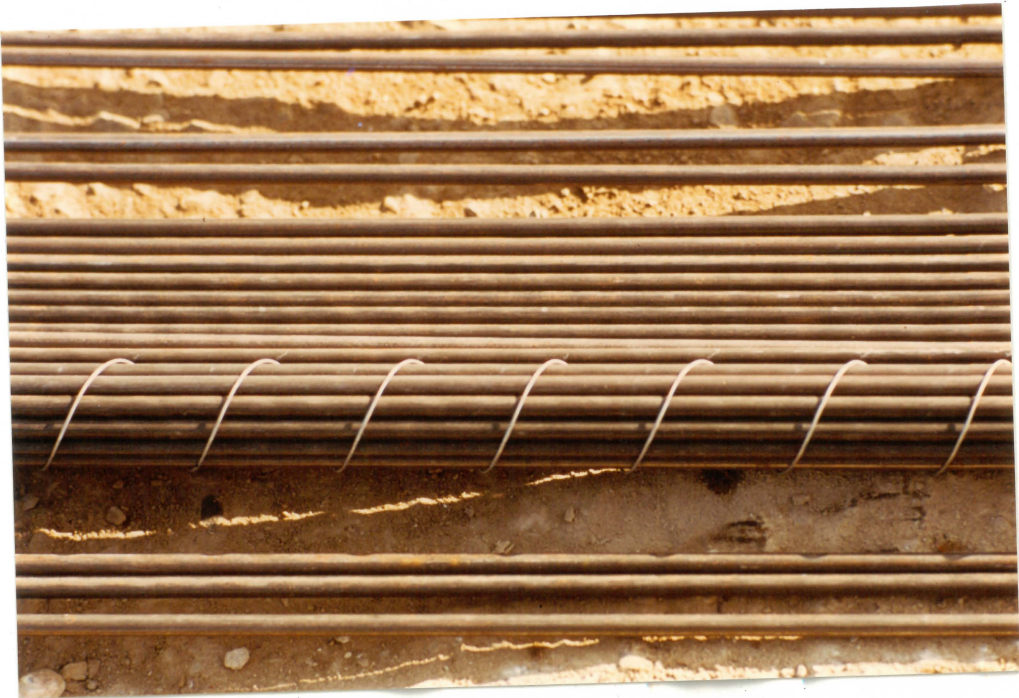


Abb. 47
Spanngliedmitte

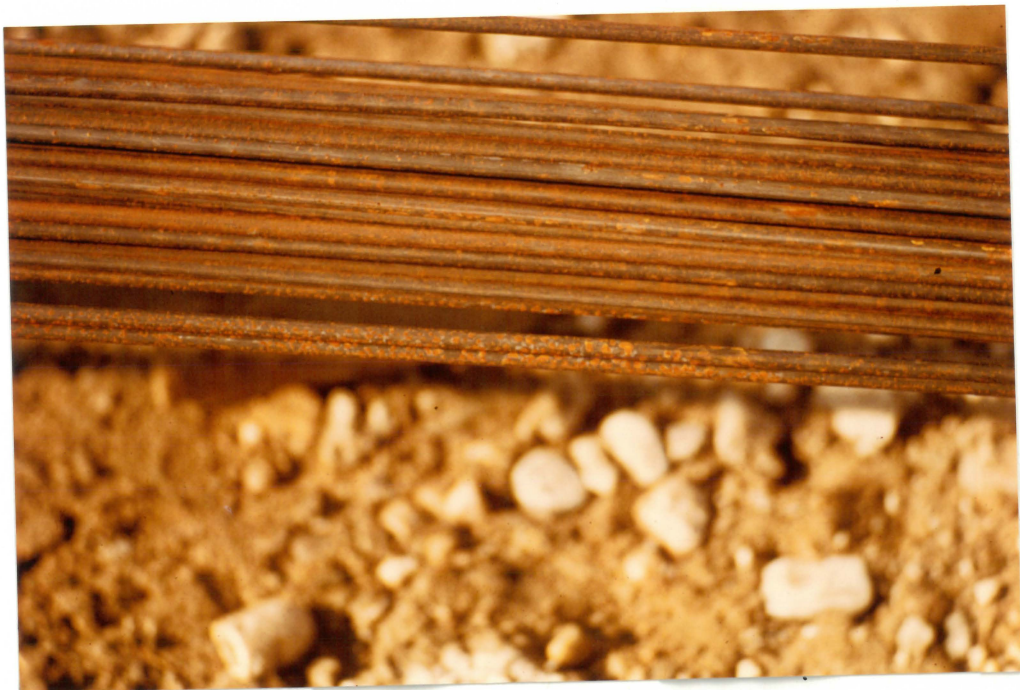


Abb. 48
Korrosionszustand am Festanker

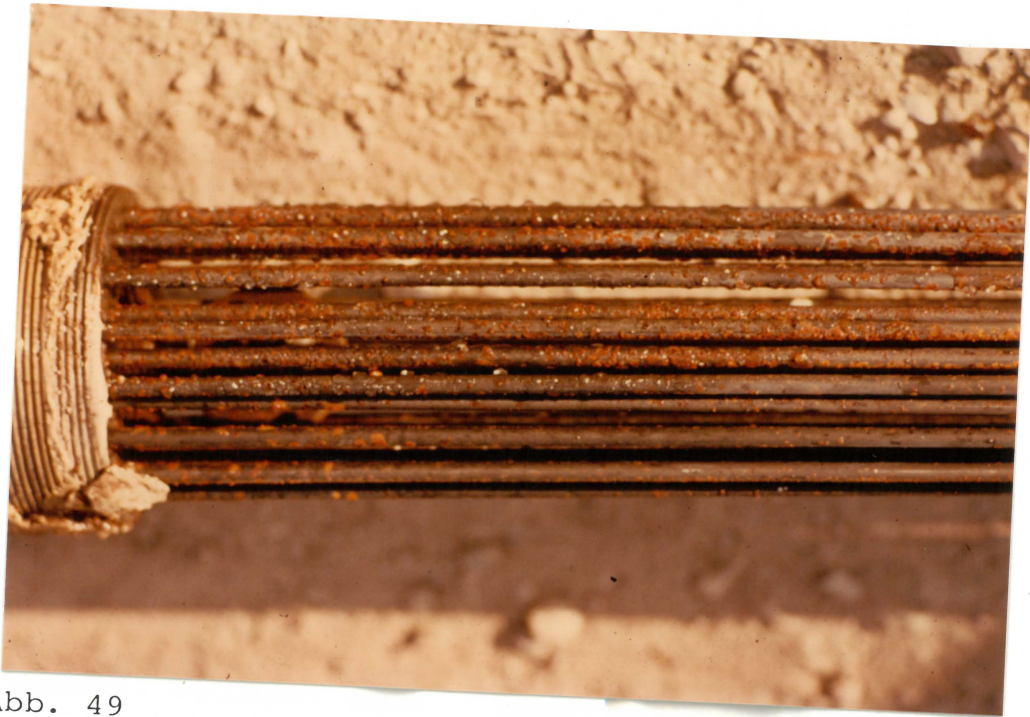


Abb. 49

Durch Betauung entstandene Rostpusteln



Abb. 50

Bauwerk (Fall II)

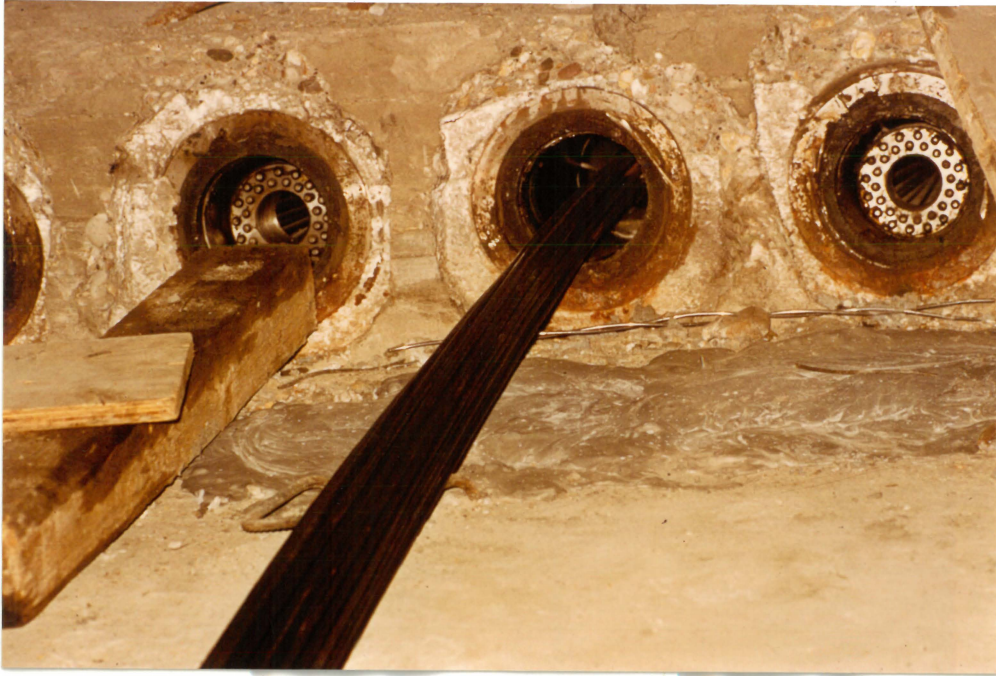


Abb. 51
Entnahme des Spanngliedes



Abb. 52
Korrosionszustand verschiedener Spanndrähte

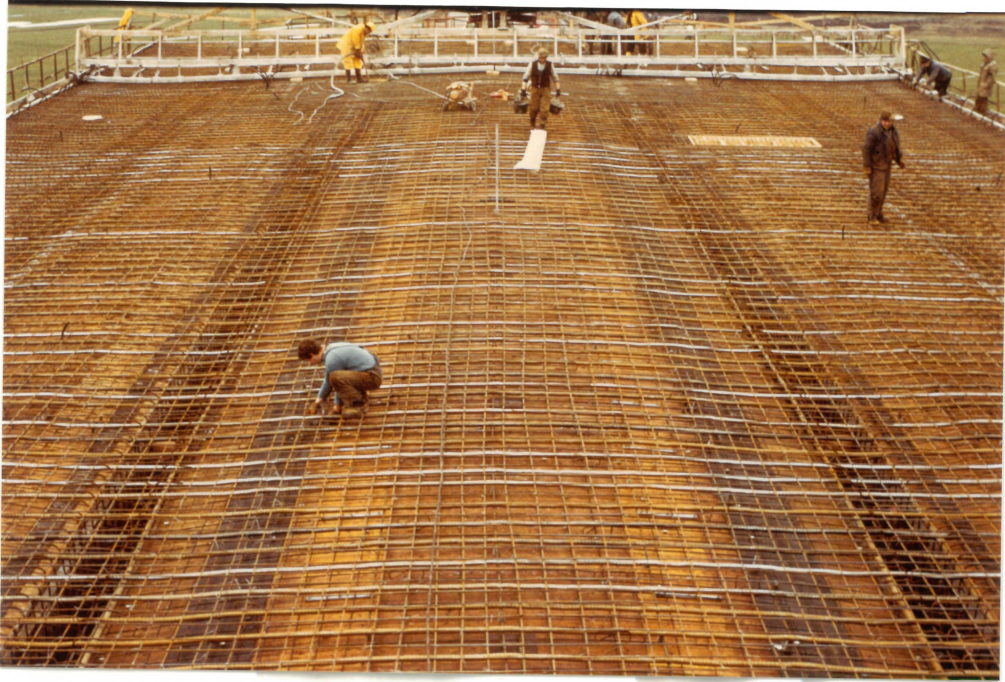


Abb. 53
Bauwerk (Fall III)



Abb. 54
Oberfläche der Litzen beim Verlegen



Abb. 55
Überstehende Enden am Spannanker

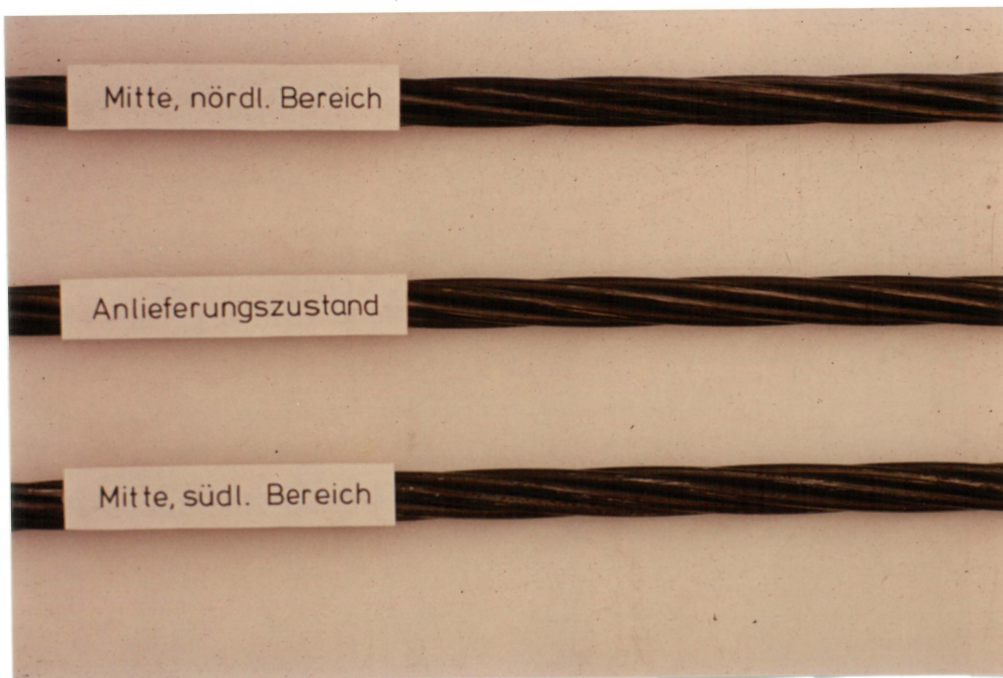


Abb. 56
Oberflächenzustand nach ca. 3 Monaten

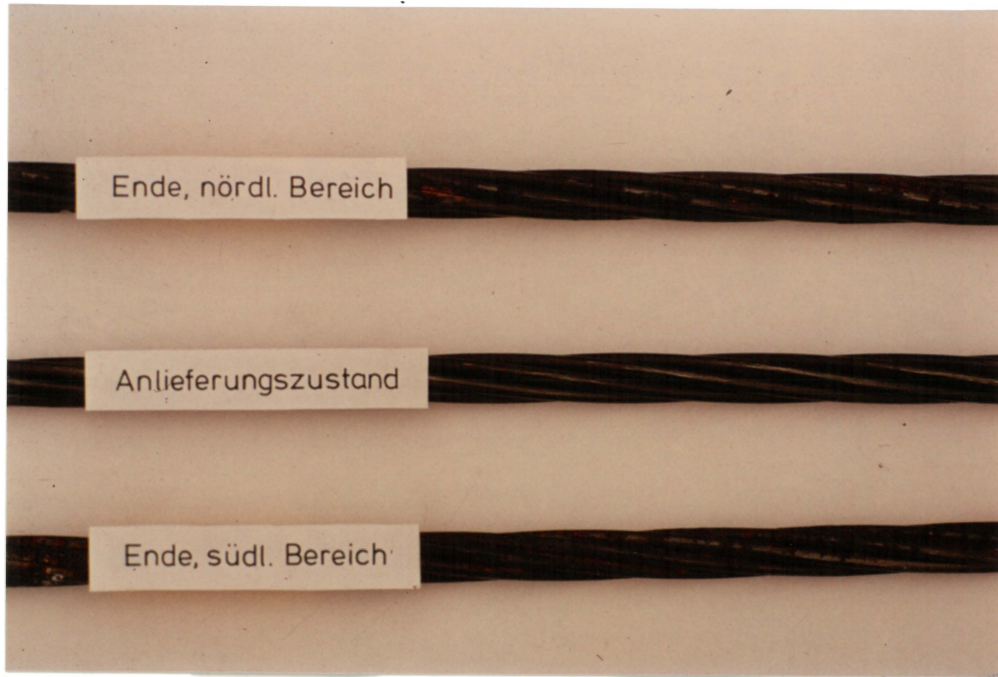
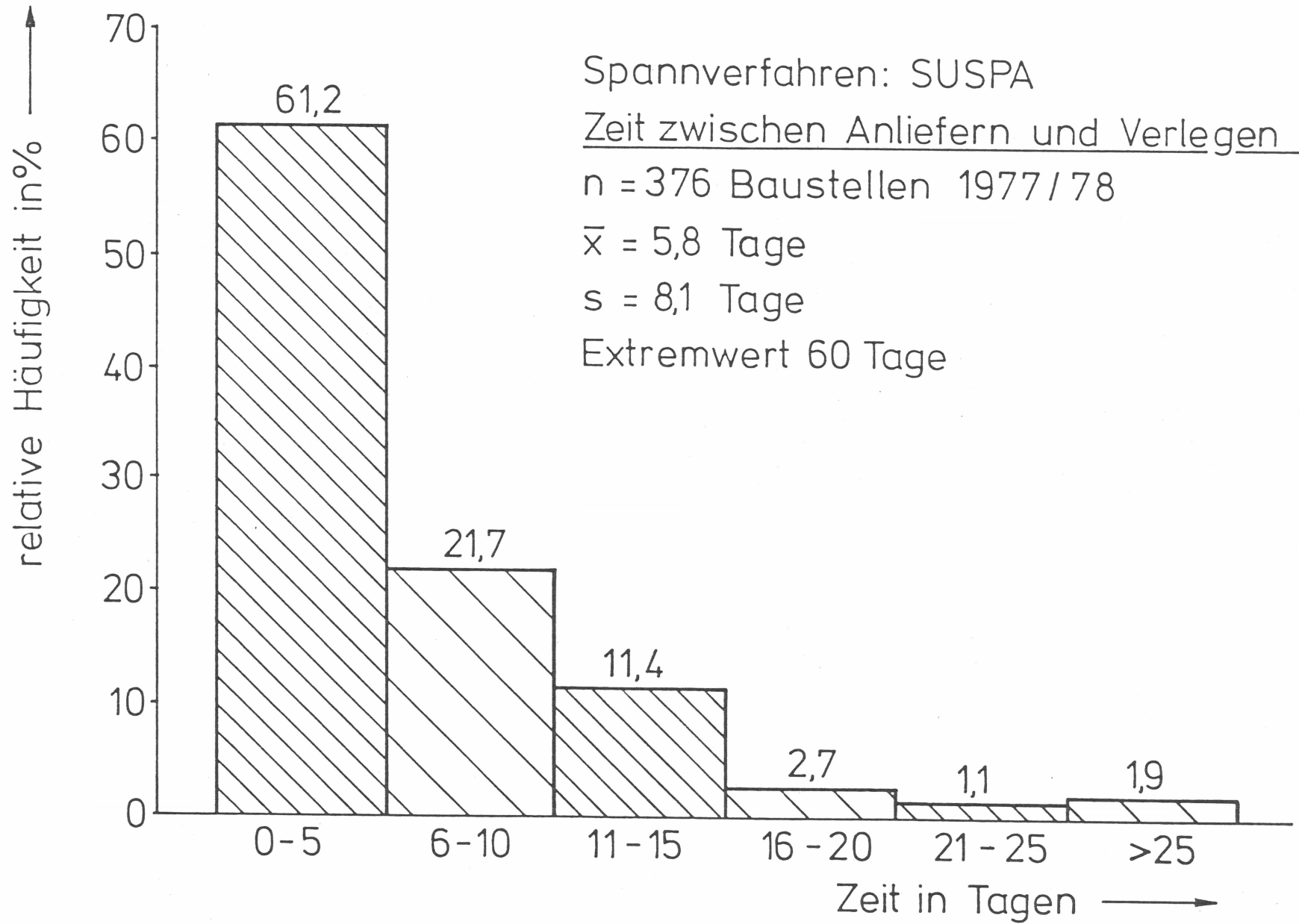


Abb. 57

Oberflächenzustand nach ca. 3 Monaten



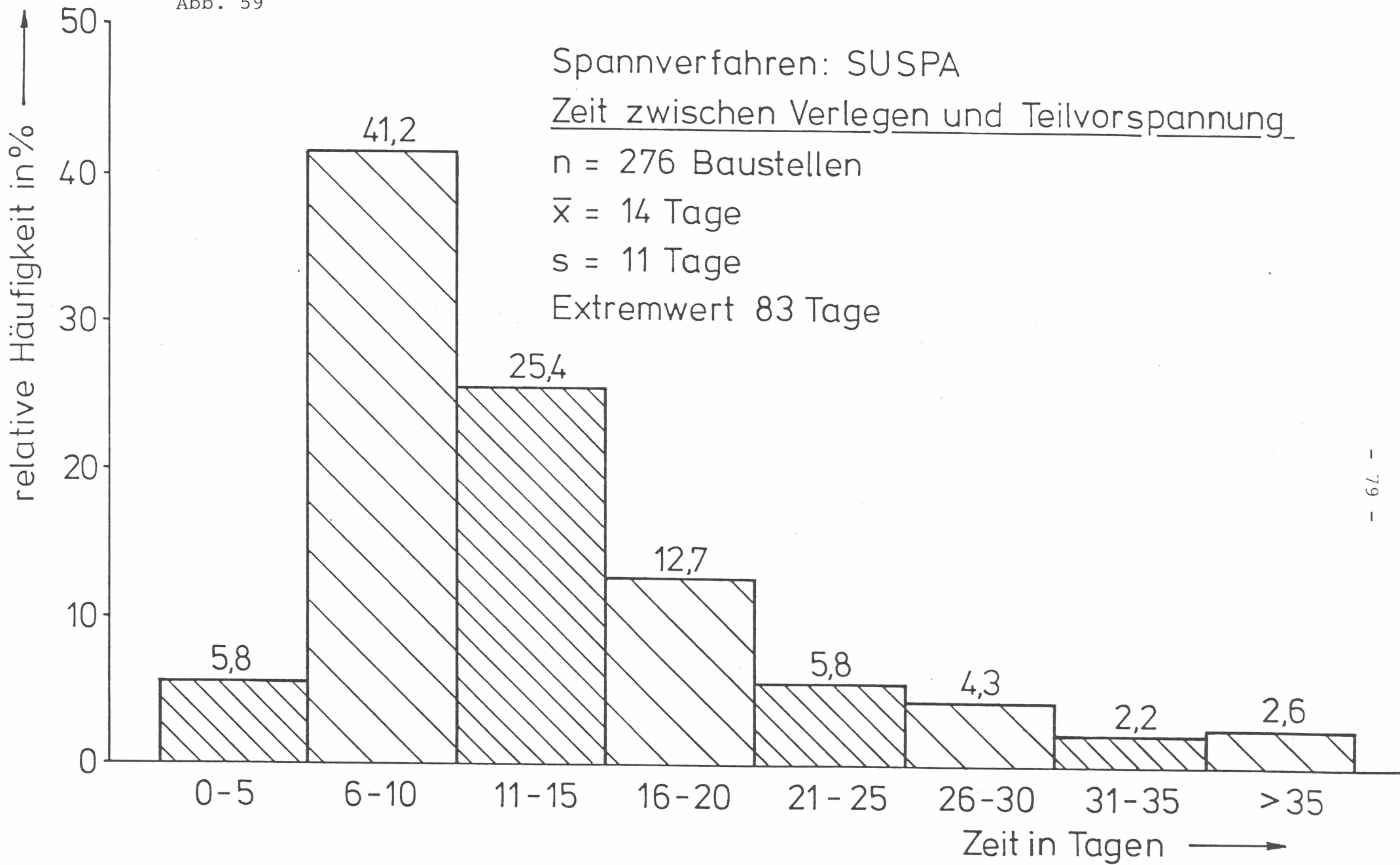


Abb. 60

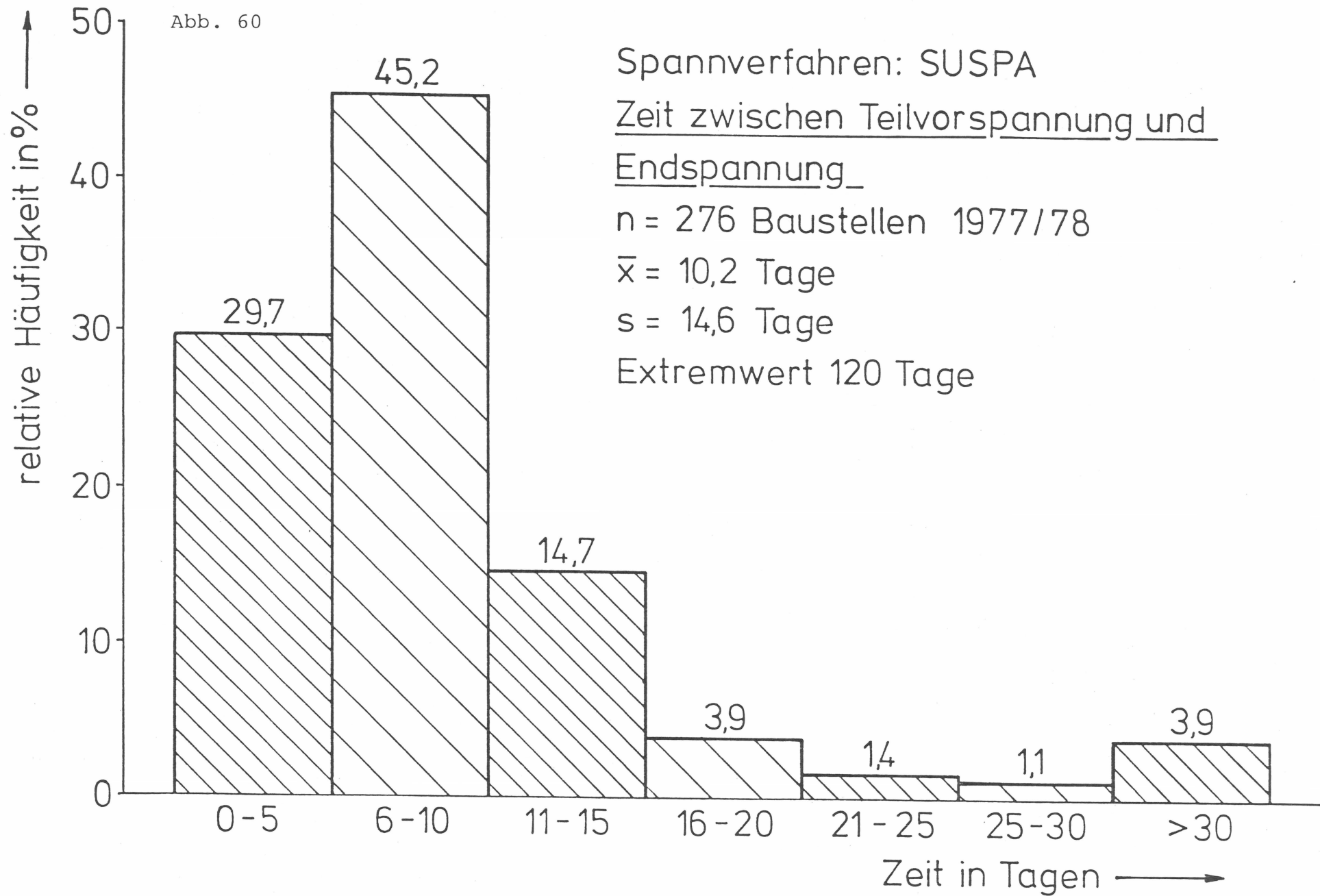


Abb. 61

Spannverfahren: SUSPA

Zeit zwischen Verlegen und Endspannung (ohne TV)

n = 100 Baustellen 1977/78

\bar{x} = 23,4 Tage

s = 21,7 Tage

Extremwert 150 Tage

