

**Prüfverfahren zur Beurteilung der Flugrost-
anfälligkeit von Spannstahloberflächen
unter baupraktischen Bedingungen**

T 2800

T 2800

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1998, ISBN 3-8167-5426-0

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.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

Schlußbericht

(DIBt Az.: IV 1-5-771/95)

Institutsbericht Nr.: 45/97

des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen

Gegenstand: "Prüfverfahren zur Beurteilung der Flugrostanfälligkeit von
Spannstahloberflächen unter baupraktischen Bedingungen"

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik

erstattet von: Prof. Dr.-Ing. Heiner Cordes
Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Dipl.-Ing. Damian Nowak

Aachen den 8. Dezember 1997

Inhaltsverzeichnis

1	VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG	1
2	ZUM STAND DES WISSENS	3
2.1	Vorbemerkung	3
2.2	Zu den Grundlagen der Korrosionsprozesse.....	3
2.3	Korrosionseinflüsse vor dem Vorspannen.....	4
2.4	Beurteilung korrosionsbedingter Reibkrafteerhöhungen	7
2.5	Zusammenfassung	8
3	PRÜFVERFAHREN ZUR BEURTEILUNG DER KORROSIONS- ANFÄLLIGKEIT VON SPANNSTAHL OBERFLÄCHEN	10
3.1	Vorbemerkung	10
3.2	Durchführung der Prüfung.....	11
3.3	Angaben zur Durchführung der Klimabeanspruchung	11
3.4	Reibungsversuch im Kleinmodellprüfstand	13
3.4.1	Versuchsaufbau.....	13
3.4.2	Versuchsdurchführung	19
3.5	Ermittlung der Menge der Korrosionsprodukte (alternativ).....	20
3.6	Grenzwerte der Korrosionsanfälligkeit bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund	22
4	DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN.....	24
4.1	Vorbemerkung	24
4.2	Untersuchte Materialproben	24
4.3	Variation der Prüfbedingungen im Kleinmodellprüfstand	25
4.3.1	Allgemeines	25
4.3.2	Variation der Anpreßkraft A.....	25
4.3.3	Variation der Ziehgeschwindigkeit.....	26
4.3.4	Einfluß der Drehbehinderung bei Spannstahlritzen	27
4.3.5	Einfluß der Vorbehandlung von korrodierten Spannstahloberflächen ...	28
4.4	Versuche mit unterschiedlichen Prüfklimaten.....	30
4.4.1	Allgemeines	30
4.4.2	Konstantklima ohne Kondenswasserbildung (Klima 1).....	31
4.4.3	Konstantklima mit Kondenswasserbildung und Tropfenbeaufschlagung (Klima 2).....	33
4.4.4	Schlußbemerkung	38
4.5	Prüfung der Flugrostanfälligkeit unter den vorgeschlagenen Prüfbedingungen .	39
4.5.1	Allgemeines	39
4.5.2	Klimabeanspruchung mit anschließender Überprüfung des Reibungsverhaltens im Kleinmodellprüfstand.....	39
4.5.3	Ermittlung der Menge der Korrosionsprodukte.....	43

4.5.4	Schlußbemerkung	45
4.6	Untersuchungen zum Einfluß der Schmiermittelrückstände auf das Korrosionsverhalten.....	46
5	ZUSAMMENFASSUNG	50
6	LITERATUR.....	52

1 Veranlassung und Zielsetzung

Die neuesten Erkenntnisse zum Reibungsverhalten von Spannstählen in Hüllrohren /15/ zeigen, daß die in der Praxis gelegentlich auftretenden großen Schwankungen der Reibungsbeiwerte μ im wesentlichen auf ungünstige Oberflächeneigenschaften des Spannstahls zurückzuführen sind. Durch den Einsatz von Spannstählen, die ein günstiges Korrosionsverhalten aufweisen, wird die Sicherheit gegenüber unplanmäßigen Reibkraftherhöhungen bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund erheblich verbessert. Eine besondere Bedeutung erhält diese Problematik bei der Ausnutzung der erhöhten zulässigen Spannstahlspannungen nach Eurocode 2 /14/, da unplanmäßige Reibbehinderungen der Spannlieder aufgrund der erheblich reduzierten Überspannreserven nicht mehr wie bisher durch kurzfristiges Überspannen ausgeglichen werden können.

In den derzeitigen normativen Regelungen wird die Gefahr des Flugrostbefalls an der Spannstahloberfläche in der Zeit zwischen dem Einbau der Spannlieder und dem Vorspannvorgang, die durch die besonderen Klimabedingungen im Inneren von Hüllrohren gegeben ist, nur unzureichend berücksichtigt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll deshalb ein geeignetes Prüfverfahren entwickelt werden, mit dem die Korrosionsempfindlichkeit von Spannstahloberflächen praxisnah beurteilt werden kann. Das Verfahren soll dabei einerseits die Verwendung von ungeeigneten Spannstahlorten bei Spannliedern mit nachträglichem Verbund ausschließen, andererseits den Spannstahlherstellern die Möglichkeit geben, ihre Produkte an die besonderen Anforderungen der Spannbetonpraxis anzupassen. Ferner soll das Prüfverfahren in den normativen Regelungen verankert werden.

In Abschnitt 2 wird ein kurzer Überblick zum Stand des Wissens gegeben, in dem die Grundlagen der Korrosionsprozesse an Spannstahloberflächen sowie die Klimabedingungen im Inneren von metallischen Hüllrohren insbesondere nach dem Betoniervorgang erläutert werden. Darüber hinaus werden einige geeignete Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenkorrosion bei Spannstählen genannt.

In Abschnitt 3 wird das entwickelte Prüfverfahren erläutert, das auf Korrosionsuntersuchungen in Kondenswasserprüfklimateen /11/ basiert. Die zweistufige Untersuchung beinhaltet dabei eine definierte Klimabeanspruchung in einer geeigneten Klimakammer sowie eine anschließende Reibungsüberprüfung in einem speziellen Kleinmodellprüfstand. Alternativ wird ein zweites Beurteilungskriterium über eine genaue Ermittlung der Menge der während der Klimabeanspruchung entstehenden Korrosionsprodukte angegeben. Anschließend werden Anforderungen an Spannstähle zum Einsatz bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund definiert.

In Abschnitt 4 wird über die durchgeführten experimentellen Untersuchungen berichtet. Neben den Überprüfungen des entwickelten Verfahrens werden hier einige Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von Spannstählen vorgestellt.

Das in diesem Forschungsbericht vorgestellte Prüfverfahren zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstahloberflächen wurde im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen entwickelt /24/. Dem Autor der Diplomarbeit sei an dieser Stelle für die engagierte und gründliche Bearbeitung ausdrücklich gedankt.

2 Zum Stand des Wissens

2.1 Vorbemerkung

Das Reibungsverhalten von Spanngliedern in Hüllrohren war in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Arbeiten /8, 9, 15, 27/, in denen die wesentlichen Einflußparameter auf die Spanngliedreibung weitgehend geklärt wurden. Die Untersuchungen in /15/ zeigten dabei eine deutliche Beeinflussung der Reibungsbeiwerte durch den Flugrostbefall an der Spannstahloberfläche, der durch die klimatischen Verhältnisse im Inneren von Hüllrohren hervorgerufen wird und verstärkt bei empfindlichen Spannstahlarten auftritt. Der folgende Abschnitt beschränkt sich auf die Zusammenstellung der wichtigsten Erkenntnisse zu den Ursachen der korrosiven Veränderungen von Spannstahloberflächen vor dem Injizieren sowie zu den baupraktischen Klimabedingungen in metallischen Hüllrohren. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage des entwickelten Prüfverfahrens zur praxisnahen Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen.

2.2 Zu den Grundlagen der Korrosionsprozesse

Der Flugrostbefall von Spannstählen ist überwiegend auf die elektrochemische Korrosion zurückzuführen. Die Voraussetzung hierfür ist der Kontakt mit einem Elektrolyten z.B. in Form von Wasser mit Ionen aus Säuren, Laugen oder Salzen sowie die Entstehung von elektrischen Potentialdifferenzen an der Stahloberfläche. Der Mechanismus der elektrochemischen Korrosion (nach dem Sauerstofftyp), der in /29/ detailliert beschrieben wird, ist in Bild 2-1 schematisch dargestellt. Der Korrosionsvorgang beginnt an den Kontaktstellen zwischen dem Stahl und dem Elektrolyten. In anodischen Bereichen verlassen Metallatome das Kristallgitter und gehen unter Zurücklassung von Elektronen als positive Ionen in die Lösung. Diese reagieren mit den an der Kathode entstehenden OH^- - Ionen und bilden das unlösliche Korrosionsprodukt Eisenhydroxid. Zwischen anodischen und kathodischen Bereichen an der Stahloberfläche entsteht eine Potentialdifferenz, die den Korrosionsprozeß aufrechterhält.

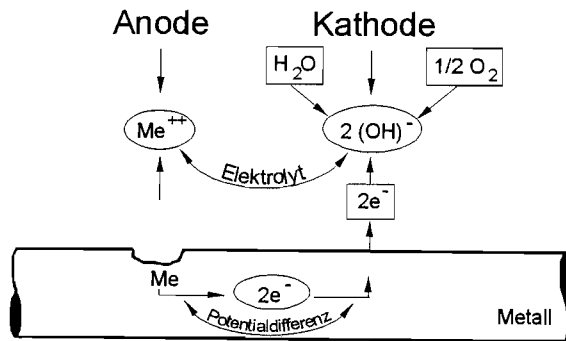


Bild 2-1 Schema der elektrochemischen Korrosion (nach dem Sauerstofftyp) nach /29/

Der Korrosionsprozeß wird maßgeblich durch den Sauerstoffgehalt der umgebenden Luft, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, die chemische Zusammensetzung des den Stahl benetzenden Elektrolyten sowie durch Luftverunreinigungen (Schwefeldioxid und Chloride) beeinflusst.

Mit zunehmender Temperatur werden chemische Reaktionen und damit auch Korrosionsprozesse beschleunigt. Bei einem Temperaturanstieg von 10 K ist nach /26/ näherungsweise von einer Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit auszugehen. Der Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Luft ist maßgebend für die bei Unterschreitung des Taupunktes anfallende Kondenswassermenge. Bei trockenen Umgebungsbedingungen ermöglicht das Ausfallen von Kondenswasser die Entstehung des für die elektrochemische Korrosion notwendigen Elektrolyten und begünstigt damit den Korrosionsvorgang.

Die Spannstähle werden während der Verarbeitung auf der Baustelle unterschiedlichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Im folgenden Abschnitt werden die für den Flugrostbefall kritischen Bauphasen aufgezeigt.

2.3 Korrosionseinflüsse vor dem Vorspannen

Korrosive Veränderungen der Spannstahloberfläche können bereits während des Transports sowie der Lagerung auf der Baustelle entstehen, insbesondere wenn unzureichende Witterungsschutzmaßnahmen getroffen werden. Bei den Begehungen von mehreren Baustellen in /17/ zeigte sich allerdings, daß die Spannglieder in der Regel sachgemäß gelagert werden. Gelegentlich wurden bodennahe Lagerungsverhältnisse und dichte Abdeckungen mit Zeltplanen und Plastikbahnen festgestellt. Bei starken Temperaturschwankungen in den Sommermonaten kann hier eine verstärkte Schwitzwasserbildung auftreten, die u.U. zu einem frühzeitigen Flugrostbefall führen kann.

Die kritische Phase für die Flugrostbildung an der Spannstahloberfläche stellt die Zeit nach dem Einbau der Spannlieder im Bauwerk dar. Ungenügende Verrohrung und Abdichtung sowie Hüllrohrbeschädigungen (z.B. durch Schweißspritzer) ermöglichen vielfach bereits vor dem Betonieren das Eindringen von Regen oder Leitungswasser. Bei Verwendung metallischer Hüllrohre ist der Eintritt von Restwasser aus dem Betoniervorgang, auch bei sorgfältiger Abdichtung der Spannkanäle, häufig nicht zu vermeiden. Bei den Untersuchungen in /17/ wurde beim Ausblasen der Hüllrohre mit Preßluft bei 30 bis 50 % aller verlegten Spannlieder Nebel, Tropfen oder ausfließendes Wasser beobachtet.

Die Analyse der Hüllrohrwässer ergab teilweise erhöhte PH-Werte von 10 bis 13 sowie hohe Chloridgehalte von 60 – 350 mg/l. Der Sulfatgehalt betrug bis zu 5000 mg/l und wies auf ein Eindringen von Restwasser aus dem Betoniervorgang hin. In einigen Fällen wurden geringere PH-Werte (10,2-11,3) sowie Chlorid- (418 mg/l) und Sulfatgehalte (28-117 mg/l) beobachtet, die auf ein durch Restwasseranteile verunreinigtes Leitungs- oder Regenwasser hindeuteten.

Die Klimaverhältnisse in Hüllrohren wurden in /17/ in verschiedenen Phasen der Verarbeitung der Spannlieder auf der Baustelle untersucht. Dabei wurden die relative Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur sowie der Sauerstoffgehalt im Hüllrohrinneren erfaßt. Die Anordnung der Meßstellen ist in Bild 2-2 schematisch dargestellt.

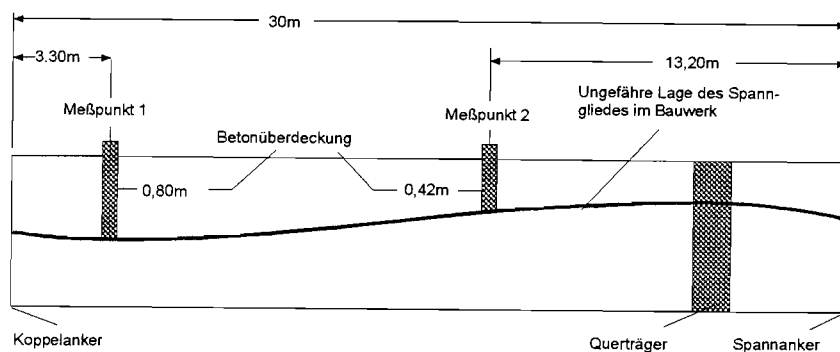


Bild 2-2 Anordnung der Meßstellen zur Erfassung der Klimabedingungen im Hüllrohr bei den Untersuchungen in /17/

In trockenen Hüllrohren entsprachen die Klimabedingungen vor dem Betonieren weitgehend den Bedingungen der Außenluft. Hingegen stellten sich in Spannkanälen, die geringe Wasseransammlungen aufwiesen, bereits innerhalb von wenigen Stunden hohe Luftfeuchtigkeitswerte von etwa 100 % ein, die bei zeitlichen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf zur Bildung von Kondenswasser an der Stahloberfläche und zu einem verstärkten Korrosionsangriff führen können.

Nach dem Betonieren wurden bei allen untersuchten Spannliedern Luftfeuchtigkeitswerte von 100 % gemessen (Bild 2-3). Diese blieben sowohl bei offenen als auch bei geschlossenen Hüllrohren bis zum Verpreßvorgang unverändert. Der Verlauf der

Lufttemperatur im Hüllrohrinneren ist in Bild 2-4 wiedergegeben. Deutlich erkennbar ist der Einfluß der Hydratationswärme in den ersten Stunden nach dem Betoniervorgang. Die Lufttemperatur im Hüllrohr steigt kontinuierlich an und erreicht ihr Maximum nach etwa 18 bis 24 Stunden nach dem Betonieren. Bei der anschließenden Abkühlung kommt es zu einer verstärkten Kondenswasserbildung, die die Korrosionsvorgänge im Spannkanal begünstigt.

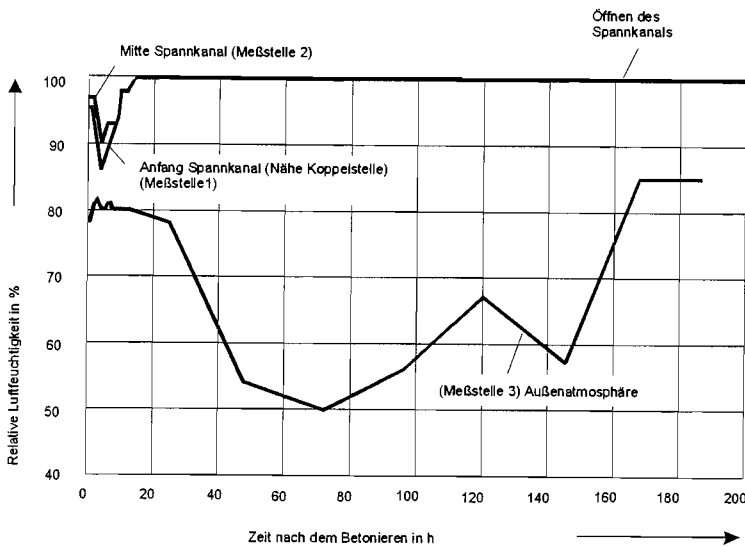


Bild 2-3 Relative Luftfeuchtigkeit im Hüllrohrinneren nach dem Betonieren /17/

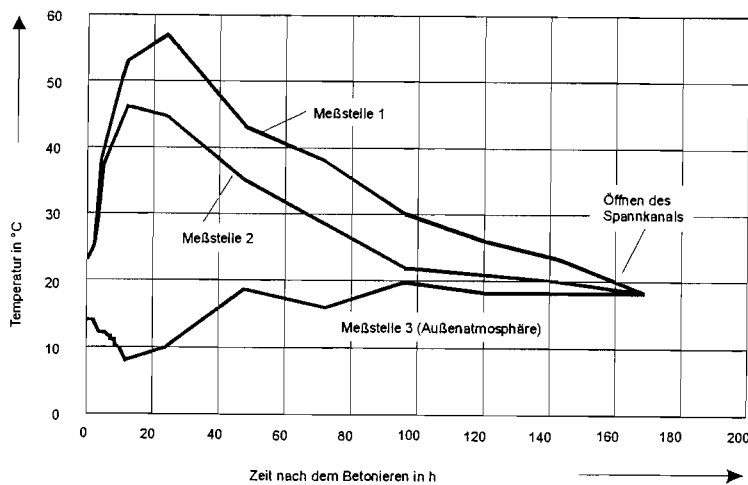


Bild 2-4 Lufttemperatur im Hüllrohrinneren nach dem Betonieren /17/

Insgesamt ist festzustellen, daß bei Verwendung von metallischen Hüllrohren selbst bei einer sorgfältigen Arbeitsweise das Eindringen von Feuchtigkeit in die Spannkanäle nicht verhindert werden kann. Bei unzureichenden Abdichtungen sowie Beschädigungen der Hüllrohre oder der Injektions- und Entlüftungsschläuche kann es darüber hinaus zu einem direkten Eintritt von Restwasser aus dem Betoniervorgang bzw. Nie-

derschlagswasser kommen. Die kritische Phase für die Flugrostbildung entsteht dabei in den ersten Tagen nach dem Betonieren. Hier werden die Korrosionsvorgänge durch die verstärkte Kondenswasserbildung sowie erhöhte Bauteiltemperaturen begünstigt.

Für eine praxisnahe Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen erscheint eine definierte Klimabeanspruchung von Stahlproben mit Nachbildung der korrosionsfördernden Bedingungen (z.B. in einer Klimakammer) zweckmäßig, die sich im Hüllrohrinneren nach dem Betonieren einstellen. Für die Feststellung der noch hinnehmbaren Grade des Flugrostbefalls sind allerdings weitere Verfahren erforderlich. Einige Möglichkeiten der Beurteilung von korrosiven Veränderungen von Spannstahloberflächen und der Ermittlung der resultierenden Reibkrafteerhöhungen werden im nachfolgenden Abschnitt 2.4 kurz umrissen.

2.4 Beurteilung korrosionsbedingter Reibkrafteerhöhungen

Der Einfluß der Klimabeanspruchung von Spannstahloberflächen auf die Spanngliedreibung kann im Labor auf direktem Wege durch Reibungsversuche bestimmt werden /15/. Eine indirekte Bewertung ist durch Ermittlung der Flächenanteile der korrodierten Stahloberfläche oder durch Auswertung der korrosionsbedingten Massenveränderungen /13/ möglich.

Bei Reibungsversuchen kommen grundsätzlich Kleinmodellversuche in Betracht, die sich durch einen relativ geringen Versuchsaufwand auszeichnen. Beschreibungen entsprechender Prüfstände finden sich in /4, 15, 27/. Das Funktionsprinzip des Kleinmodellversuchsstandes ist in Bild 2-5 dargestellt. An eine Spannstahlprobe werden zwei Hüllrohrabschnitte mit einer definierten Kraft A angepreßt. Der Spannvorgang wird dabei durch eine Relativverschiebung der Reibpartner simuliert. Aus den Meßwerten der Anpreßkraft A sowie der Ziehkraft Z kann der Reibungsbeiwert μ unmittelbar bestimmt werden. Die kleinen erforderlichen Längen der Spannstahlproben ermöglichen eine problemlose Unterbringung in geeigneten Klimakammern zur Simulation baupraktischer Klimaverhältnisse. Die Erhöhung der Reibungsbeiwerte wird durch Messungen an werksfrischen sowie korrodierten Proben ermittelt /15/.

Die Kleinmodellversuche werden in der Regel in bestehenden Materialprüfmaschinen durchgeführt, die um zusätzliche Vorrichtungen zum Aufbringen der Anpreßkraft A erweitert werden. Das Versuchsprinzip kann jedoch auch auf kleine Prüfvorrichtungen mit einfachem Aufbau übertragen werden. Der in Abschnitt 3.4 entwickelte transportable Versuchsstand basiert auf diesem Meßprinzip.

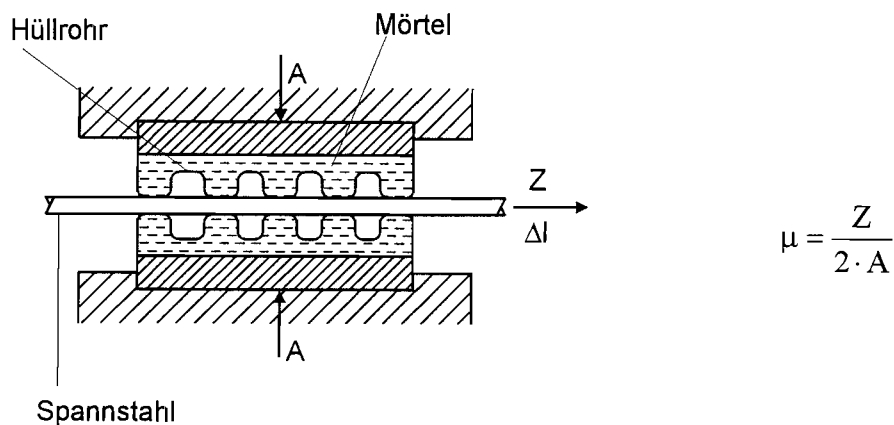


Bild 2-5 Prinzip der Reibungsmessung im Kleinmodellversuch /8/

Die optische Bewertung der Spannstahloberfläche nach einer Klimabeanspruchung ermöglicht Rückschlüsse auf die zu erwartenden Reibkraftherhöhungen. Wie die Untersuchungen von Haveresch /15/ gezeigt haben, besteht zwischen dem Grad der korrosiven Veränderungen der Stahloberfläche und dem Reibungsbeiwert μ ein eindeutiger Zusammenhang. Die quantitative Bewertung kann durch Auszählen der lokalen Korrosionsangriffsstellen nach /13/ erfolgen. Dabei können die gesamte Oberfläche oder nur repräsentative Bereiche der Proben erfaßt werden. Allerdings ist die quantitative Bewertung des Korrosionsgrades bei einer komplexen Struktur der Spannstahloberfläche, wie sie z.B. bei Litzen vorliegt, mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Bei glatten kaltgezogenen Drähten ist hingegen eine optische Beurteilung der korrodierten Flächenanteile durchaus denkbar.

Die korrosiven Veränderungen der Spannstahloberfläche stehen im direkten Zusammenhang mit der Menge der entstehenden Korrosionsprodukte. Werden diese durch eine genaue Wägung der Stahlproben bestimmt, so lassen sich Rückschlüsse auf den Korrosionsgrad und damit auf das Reibungsverhalten ziehen. Entsprechende Verfahren zur Bestimmung von Massenverlusten sind u.a. in /13/ verankert. In Abschnitt 3.5 wird auf dieser Basis ein alternatives Beurteilungskriterium für die Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen angegeben.

2.5 Zusammenfassung

Die Erfahrungen der Spannbetonpraxis wie auch die Ergebnisse der Untersuchungen zum Korrosions- und Reibungsverhalten von Spanngliedern in Hüllrohren lassen die Notwendigkeit einer zuverlässigen Überprüfung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen erkennen, die bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund verwendet werden. Ein entsprechendes Prüfverfahren muß die kritischen Phasen für die Flugrost-

bildung während der Verarbeitung der Spannstähle berücksichtigen. Als zweckmäßig erscheint dabei eine zweistufige Untersuchung, in der zunächst ausgewählte Spannstahlproben einer definierten Klimabeanspruchung unterzogen werden und anschließend die aufgetretenen korrosiven Veränderungen der Stahloberfläche durch einen einfachen Reibungsversuch oder Bestimmung der Menge der entstandenen Korrosionsprodukte beurteilt werden. Eine optische Bewertung des Flugrostbefallgrades erscheint bei den heute überwiegend Anwendung findenden Litzenspanngliedern aufgrund der komplexen Struktur der Litzenoberfläche nicht sinnvoll.

Im nachfolgenden Abschnitt wird ein einfaches Verfahren zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen vorgestellt. Das Prüfverfahren wurde an zwei Spannstahlsorten mit unterschiedlicher Korrosionsneigung kalibriert.

3 Prüfverfahren zur Beurteilung der Korrosionsanfälligkeit von Spannstahloberflächen

3.1 Vorbemerkung

Bei der Entwicklung des Prüfverfahrens zur Beurteilung der Korrosionsempfindlichkeit von Spannstahloberflächen wurde eine praxisnahe Nachbildung der kritischen Klimaverhältnisse im Inneren von Hüllrohren angestrebt. Als Hauptuntersuchung wird deshalb eine definierte Klimabeanspruchung von Spannstahlproben in einer speziellen Klimakammer vorgeschlagen. Zur Beurteilung der korrosiven Veränderungen der Spannstahloberfläche und ihrer Auswirkungen auf die Spanngliedreibung wurden Bewertungsverfahren entwickelt, die einen verhältnismäßig geringen Aufwand erfordern und in gewöhnlichen Materialprüflaboratorien angewendet werden können. Für eine direkte Kontrolle der bei den einzelnen Spannstahlsorten infolge Klimabeanspruchung zu erwartenden Reibkrafteerhöhungen wurde ein einfacher Prüfstand nach dem Kleinmodellprinzip entwickelt. Zusätzlich wird ein alternatives Beurteilungskriterium auf der Grundlage der Ermittlung von korrosionsbedingten Massenverlustaten angegeben. Die Entwicklung des Verfahrens mit einer direkten Reibkraftbestimmung im Kleinmodellprüfstand kann als abgeschlossen angesehen werden. Die Zuverlässigkeit der alternativen Ermittlung von Massenverlustaten ist noch durch weitergehende Untersuchungen zu überprüfen.

Der Abschnitt 3.2 enthält grundsätzliche Angaben zur Vorbereitung der Spannstahlproben und zur Durchführung der Prüfung. Im nachfolgenden Abschnitt 3.3 wird die bei den durchgeführten Untersuchungen verwendete Klimakammer beschrieben sowie die aus Vorversuchen abgeleiteten Prüfbedingungen angegeben. Der Abschnitt 3.4 enthält eine detaillierte Beschreibung des entwickelten Kleinmodellversuchsstandes, der zur Beurteilung der korrosiven Veränderungen der Spannstahloberflächen herangezogen wird. In Abschnitt 3.5 werden Hinweise zur Ermittlung von Massenverlustaten gegeben, die alternativ zu der direkten Überprüfung der Reibungsbeiwerte eingesetzt werden kann. In Abschnitt 3.6 werden schließlich auf der Grundlage der durchgeführten Versuche Grenzwerte für die bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund noch hinnehmbare Flugrostempfindlichkeit angegeben.

3.2 Durchführung der Prüfung

Das entwickelte Prüfverfahren sieht eine zweistufige Untersuchung vor:

1. Eine definierte Klimabeanspruchung in einer Klimakammer und
2. eine direkte Überprüfung der korrosionsbedingten Reibkrafteerhöhung in einem speziellen Kleinmodellversuchsstand.

Die zu untersuchenden Spannstahlproben sollten eine Länge von etwa 60 cm aufweisen. Bei der Bewertung der Flugrostempfindlichkeit nach Abschnitt 3.5 können auch kleinere Längen von ca. 5 cm verwendet werden. Die Spannstahlproben müssen eine einwandfreie Oberfläche aufweisen und werden stichprobenartig aus der laufenden Produktion entnommen. Bei Transport und Lagerung sind trockene Umgebungsbedingungen sicherzustellen, um einen frühzeitigen Korrosionsbefall zu vermeiden.

Die Spannstahlproben werden ohne Vorbehandlung einer Wechselklimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 unterzogen. Die Beanspruchungsdauer beträgt insgesamt 72 Stunden. Anschließend erfolgt eine Überprüfung des Reibungsverhaltens nach Abschnitt 3.4. Die Flugrostempfindlichkeit wird durch Vergleich der Reibungsbeiwerte im werksfrischen Zustand sowie nach der Klimabeanspruchung ermittelt.

3.3 Angaben zur Durchführung der Klimabeanspruchung

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Wärmeschrank der Firma Heraeus mit den Abmessungen 1,60 / 1,05 / 1,00 m verwendet (Bild 3-1). Zur Durchführung der Prüfung eignen sich jedoch auch andere Klimakammern, wenn die im weiteren beschriebenen Klimaverhältnisse sichergestellt werden können.

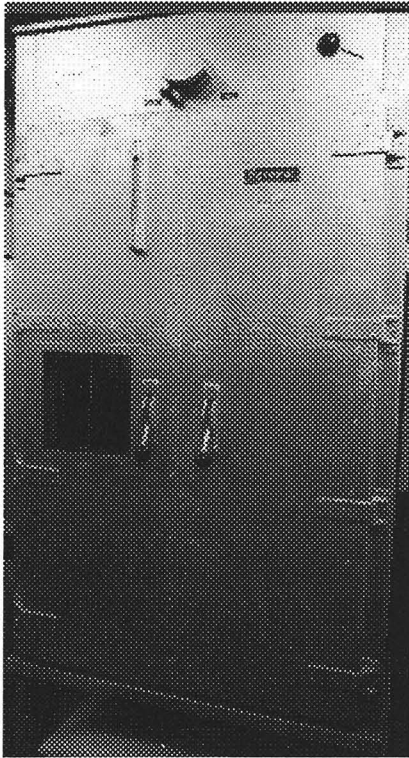


Bild 3-1 Wärmeschrank zur Simulation baupraktischer Klimaverhältnisse

Der Klimaschrank ermöglicht eine stufenlose Regelung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit (Feuchtigkeitsregler der Fa. Carel). Durch eine Luftumwälzungsanlage werden gleichmäßige Klimabedingungen im gesamten Innenraum des Wärmeschrankes sichergestellt. Der durch die Korrosionsprozesse verbrauchte Sauerstoff wird durch begrenzten Luftaustausch mit der Außenatmosphäre ständig ergänzt.

Im Innenraum der Kammer wird über den Spannstahlproben in einem Abstand von ca. 30 cm eine geneigte Plexiglasabdeckung angeordnet, die ein direktes Abtropfen des Kondenswassers von der Kammerdecke verhindert. Hierdurch soll eine mögliche Beeinflussung der Korrosionsprozesse durch Ablagerungen an den Kammerwänden ausgeschlossen sowie ein gleichmäßiger Korrosionsangriff sichergestellt werden.

Die Spannstahlproben werden auf einem korrosionsbeständigen Gitterrost waagrecht gelagert. Der lichte Abstand zwischen den Proben sollte mindestens 20 mm betragen, um eine einwandfreie Luftzirkulation zu gewährleisten.

Die Klimabeanspruchung besteht aus drei Zyklen je 24 Stunden. Das Bild 3-2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit während der gesamten Versuchsdauer. Vor Versuchsbeginn sollte die Temperatur der Spannstahlproben etwa 20 °C betragen. Die Klimakammer wird auf 50 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % vorgewärmt. Durch die Temperaturdifferenz zwischen den Spannstählen und der Kammeratmosphäre wird zu Anfang des ersten Zyklus Kondenswasserbildung an der Probenoberfläche erzwungen.

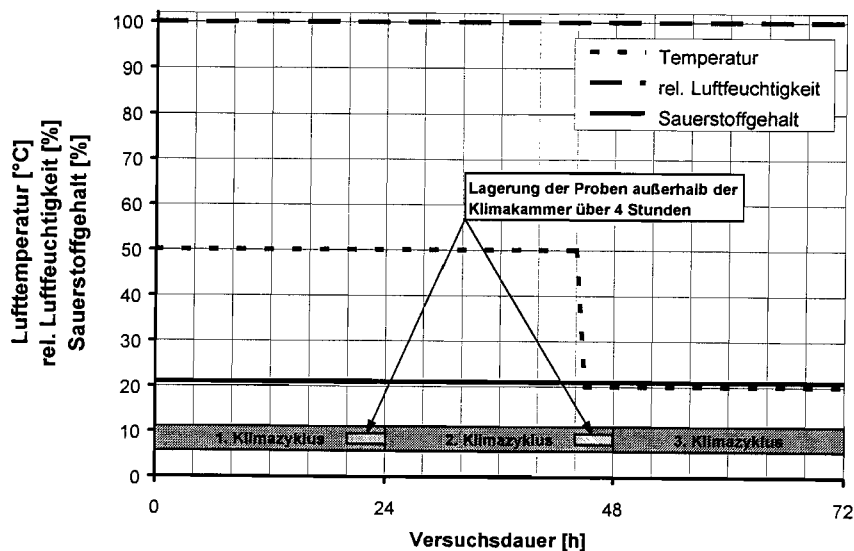


Bild 3-2 Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Sauerstoffgehalt während der Klimabeanspruchung

Nach 20 Stunden Klimabeanspruchung werden die Proben außerhalb der Kammer über 4 Stunden auf 20 °C abgekühlt. Anschließend wird der Klimazyklus bei gleichen Bedingungen wiederholt. Nach 20 Stunden wird die Temperatur der Klimakammer auf 20 °C bei gleichbleibender relativer Luftfeuchtigkeit von 100 % abgesenkt und weitere 24 Stunden aufrechterhalten. Zwischen dem zweiten und dritten Klimazyklus werden die Proben erneut über 4 Stunden außerhalb der Klimakammer bei 20 °C gelagert, so daß beim dritten Klimazyklus keine Kondenswasserbildung an der Spannstahloberfläche mehr auftritt. Der Sauerstoffgehalt bleibt während der gesamten Prüfung auf dem Niveau der Außenluft bei ca. 21 %.

Unmittelbar nach der Klimabeanspruchung wird das Reibungsverhalten der Spannstahlproben im Kleinmodellprüfstand untersucht. Treten zwischen den Prüfungen größere zeitliche Verzögerungen auf, so sind die Proben trocken zwischenzulagern.

3.4 Reibungsversuch im Kleinmodellprüfstand

3.4.1 Versuchsaufbau

In dem im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Versuchsaufbau werden die Reibungsverhältnisse von Spanngliedern in Hüllrohren stark vereinfacht wiedergegeben. Es sei dabei darauf hingewiesen, daß die ermittelten Reibungsbeiwerte lediglich zur Beurteilung von möglichen Reibkrafteerhöhungen durch korrosive Veränderungen

von Spannstahloberflächen dienen und nur begrenzte Rückschlüsse auf die tatsächlich vorhandenen Reibungsbeiwerte im Bauwerk ermöglichen.

Der schematische Aufbau der Prüfvorrichtung ist in Bild 3-3 dargestellt. Eine Detaildarstellung findet sich in Bild 3-4. Die Prüfvorrichtung besteht aus einer Druckeinheit, die eine gleichbleibende Kraft A über spezielle Druckstempel auf die Spannstahlprobe ausübt. Während der Versuchsdurchführung wird die Probe über eine Zugeinheit mit konstanter Geschwindigkeit von ca. 4 mm/s um eine Strecke von 100 mm relativverschoben. Der Verschiebungsweg sowie die Zugkraft Z werden elektronisch erfaßt und kontinuierlich aufgezeichnet.

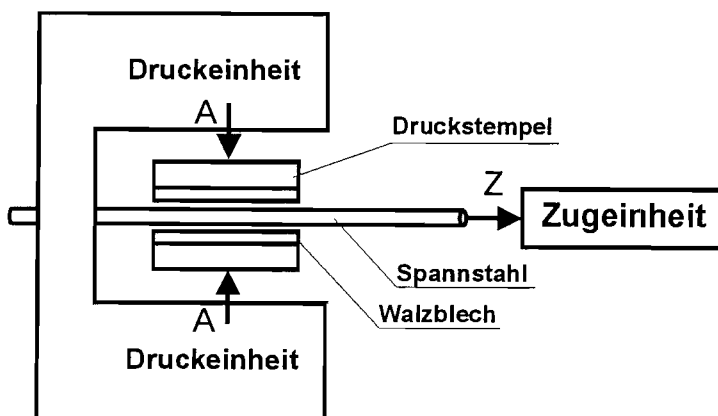


Bild 3-3 Prinzipieller Aufbau des Prüfstandes

Die Druckstempel werden an die Spannstahlprobe über 100 mm lange Prüfblechstreifen angepreßt, die nach jedem Versuch ersetzt werden. Die Bleche bestehen aus kaltgewalztem Bandstahl der Güte St2, der zur Herstellung von gefalzten Blechhüllrohren verwendet wird. Die Blechdicke beträgt 0,4, die Bandbreite 36 mm.

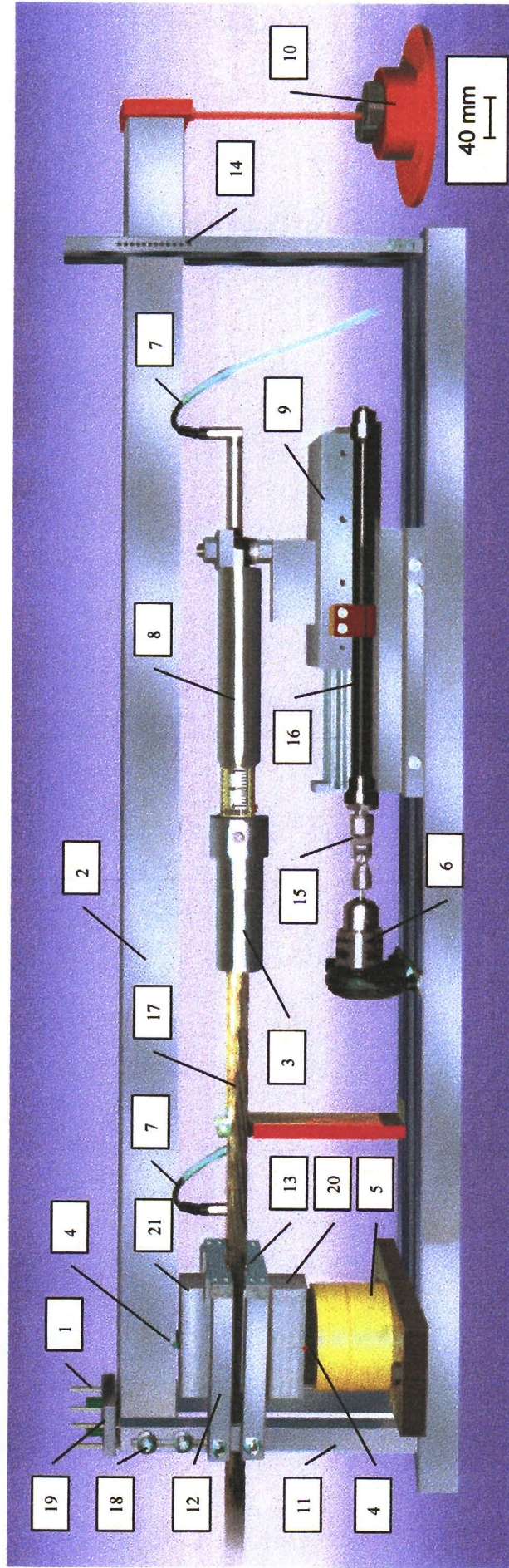
Aus den Meßwerten der Zugkraft Z und der bekannten Anpreßkraft A ergibt sich der Reibungsbeiwert μ zu

$$\mu = \frac{Z}{2 \cdot A} \quad (3.1)$$

Die Anpreßkraft wird konzentriert in die massiven Druckstempel eingeleitet (Bild 3-5). Durch eine gelenkige Lagerung paßt sich die Stempelausrichtung stets der Spannstahloberfläche an. An der Stirnfläche der Druckstempel sind zusätzlich seitenschiebbliche Festhaltungen vorgesehen. Hierdurch wird eine ungleichmäßige Beanspruchung der Spannstahlproben reduziert, die durch den Versatz der Reibfläche gegenüber der gelenkigen Befestigung der Druckstempel entsteht (Bild 3-6).

Bild 3-4 Aufbau des Kleinmodellprüfstandes /24/

- | | | | | | |
|---|--------------------------------|----|---------------------------------------|----|--------------------------------------|
| 1 | Zentrierstangen | 8 | Federwaage (max. 1000N) | 15 | Kardangelenk |
| 2 | Hebelarm (7,85 kg) | 9 | Gleitschlitzen zur Kräfteinleitung | 16 | Antriebswelle |
| 3 | Freilaufmuffe | 10 | Austauschbare Gewichte | 17 | Spannstahl (Litze) |
| 4 | Vertikallager (Schwenkbar) | 11 | Rahmen der Prüfmaschine | 18 | Vert. Justierung der Horizontallager |
| 5 | Widerlager der Antriebskraft A | 12 | Haltevorrichtung des Horizontallagers | 19 | Lagerplatte mit Entnahmeverrichtung |
| 6 | Bohrfutter der Antriebseinheit | 13 | Horizontallager (Drehbar) | 20 | Unterer Druckstempel |
| 7 | Induktiver Wegaufnehmer | 14 | Bolzen zur Sicherung des Hebels | 21 | Oberer Druckstempel |



Bedienungsanleitung in Kurzform

- a) Bolzen (14) in die Bohrvorrichtung schieben. b) Lagerplatte (19) entfernen. c) Hebelarm aus d. Führung ziehen und auf Prüfrahmen (11) plazieren. d) Obere (21) und untere (20) Druckstempel entnehmen und mit passenden Prüflingen bestücken. e) Alle Horizontallager herausdrehen. f) Unteren Druckstempel (20) wieder einfügen (Achtung: Vertikallager (4) beachten) g) Litze (17) von außen in den Rahmen (11) schieben und in d. Freilaufmuffe (3) fixieren.
- h) Oberen Druckstempel (21) wieder einfügen. i) Hebelarm ablassen (Achtung: Vertikallager (4) beachten) j) Lagerplatte (19) montieren. (Achtung: Hebelarm auf Waage bringen) k) Haltevorrichtung des Horizontallagers (12) durch Vertikaljustierung (18) auf Höhe bringen. l) Hebelarm (2) mit Gewichten (10) belasten. m) Alle Horizontallager wieder hineindrehen. (Achtung: Ohne übermäßige Kräfteinwirkung) n) Federwaage (8) durch Regulierung der Antriebseinheit auf Null setzen.

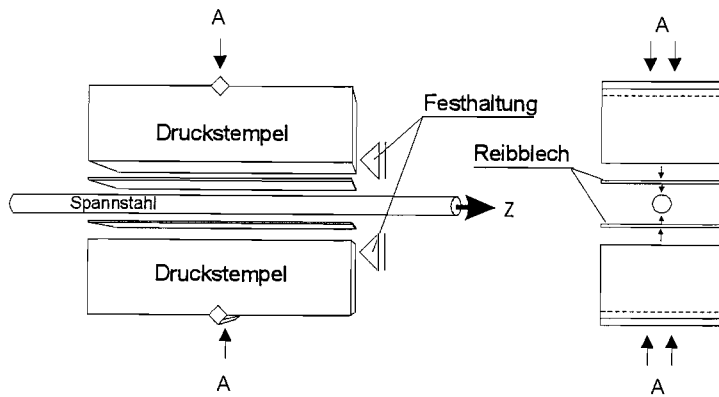


Bild 3-5 Lagerung der Druckstempel und Details der Krafteinleitung

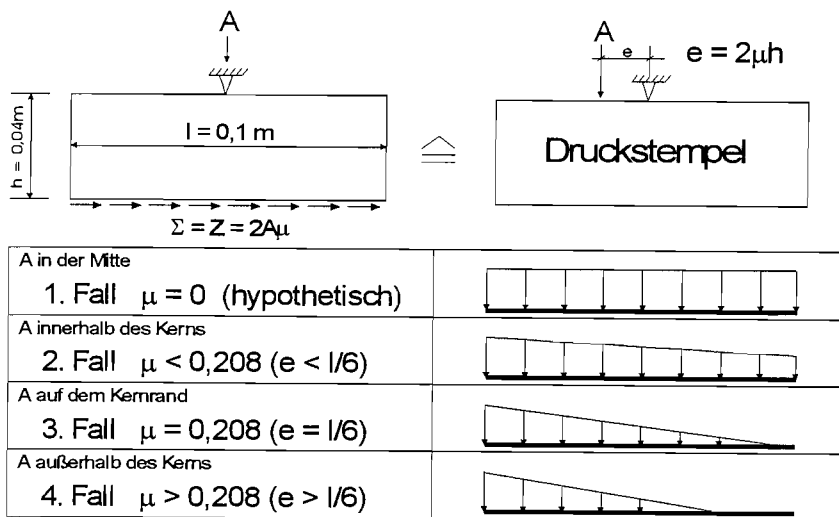


Bild 3-6 Probenbeanspruchung bei einer Einpunkt - Festhaltung des Druckstempels

Druckeinheit

Der prinzipielle Aufbau der Druckeinheit ist in Bild 3-7 dargestellt. Sie besteht aus einem Hebelarm, der mit Gewichten belastet wird. Durch diese Anordnung wird während der gesamten Versuchsdauer ein konstanter Wert der Anpreßkraft A gewährleistet.

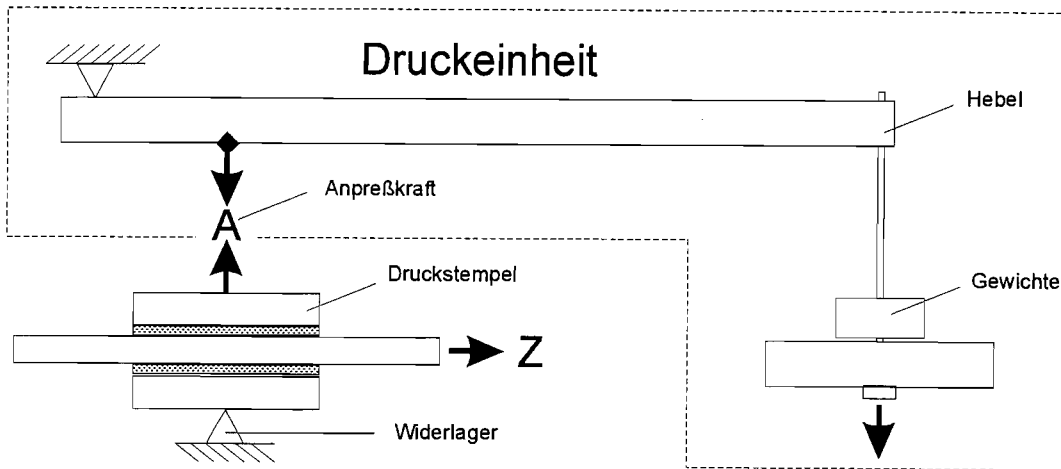


Bild 3-7 Schematische Darstellung der Druckeinheit

Die Höhe der Anpreßkraft wird in Kleinmodellversuchen i.a. in Abhängigkeit von der Größe sowie vom Umlenkradius R der zu simulierenden Spannglieder festgelegt. Für die Prüfung der Flugrostempfindlichkeit wird eine konstante Kraft $A = 1,3 \text{ kN}$ ausgewählt. Diese entspricht bei einer gewöhnlichen Einzellitze 0,6“ St 1570/1770, die mit der maximal zulässigen Spannkraft nach EC2 /14/ von

$$\max F_p = 0,95 \cdot f_{p0,1k} \cdot A_p = 0,95 \cdot 1500 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} = 200 \text{ kN} \quad (3.2)$$

beansprucht wird, einem Umlenkradius R von

$$R = \frac{\max F_p}{A} \cdot l = \frac{200}{1,3} \cdot 0,10 = 15,4 \text{ m} \quad (l = 0,1 \text{ m} = \text{Belastungslänge im Prüfstand}). \quad (3.3)$$

Zu der verhältnismäßig geringen Größe der Anpreßkraft A sei folgendes angemerkt. Bei in Beton gebetteten Hüllrohren bilden sich beim Vorspannen mehr oder weniger stark ausgeprägte Reibspuren aus, wodurch die lokalen Kontaktdrücke zwischen Spannstahl und Hüllrohr begrenzt werden. Bei der gewählten Versuchsanordnung wird die Entstehung breiter Reibspuren durch die starre Lagerung der Prüfbleche in den Druckstempeln unterbunden. Hierdurch entstehen während der Versuchsdurchführung trotz der geringen Anpreßkraft A verhältnismäßig hohe Kontaktdrücke zwischen der Spannstahl- und Prüfblechoberfläche. Diese erreichen durchaus Größenordnungen, die bei stark umgelenkten Bündelspanngliedern mit hohen zulässigen Vorspannkraften auftreten können.

Zugeinheit

Der prinzipielle Aufbau der Zugeinheit ist in Bild 3-8 dargestellt. Sie besteht aus einer Freilaufmuffe, einer Federwaage, einem Gleitschlitten sowie einer elektrischen Antriebseinheit, die die für die Relativverschiebung notwendige Zugkraft Z erzeugt.

Als Antriebseinheit dient ein geeigneter Elektromotor mit einem ausreichenden Drehmoment, der mit dem Gleitschlitten über eine Antriebswelle verbunden wird. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde für den Antrieb eine Bohrmaschine mit einer Leistung von 500 W genutzt. Durch die Drehzahlsteuerung konnte die Geschwindigkeit der Relativverschiebung in einem weiten Bereich zwischen 2,6 und 12 mm/s eingestellt werden.

Die Federwaage dient der Erfassung der Zugkraft Z . Die Zugkraft wird über einen Kalibrierungsfaktor aus dem Federweg bestimmt, der mit einem elektronischen Wegaufnehmer erfaßt und kontinuierlich über die Ziehweglänge aufgezeichnet wird. Durch die Zwischenschaltung der Federwaage werden außerdem unerwünschte Schwankungen der Reibungskraft herausgefiltert, die durch den bekannten slip – stick – Effekt hervorgerufen werden und die Ablesung der Zugkraft Z bzw. des zugehörigen Reibungsbeiwertes μ beeinträchtigen.

Beim Anbringen einer geeichten Zahlenskala lassen sich die momentanen Reibungsbeiwerte während der Versuchsdurchführung unmittelbar ablesen. Die visuelle Ableseung ist jedoch bedingt durch unvermeidbare Schwankungen der Reibungskräfte mit größeren Unsicherheiten behaftet. Sie kann jedoch insbesondere dann angewendet werden, wenn zusätzliche Reibungsüberprüfungen unter Baustellenbedingungen vorgenommen werden.

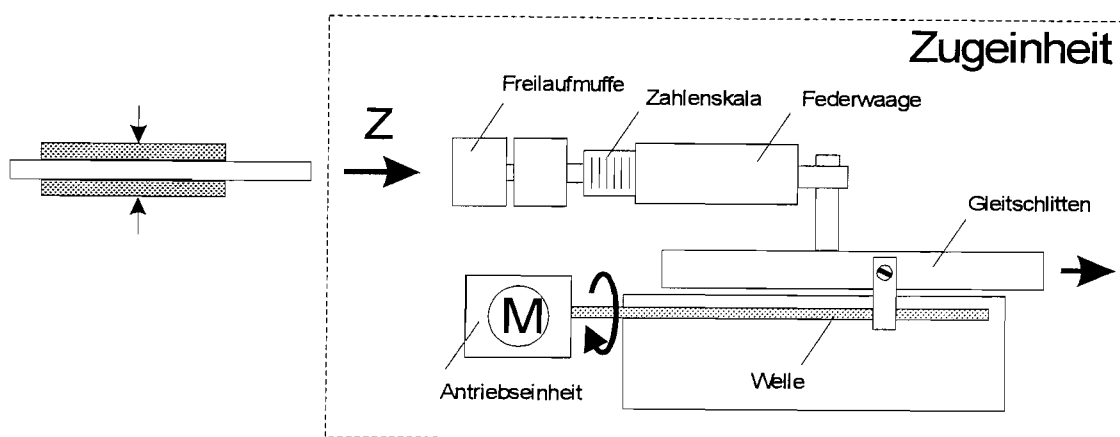


Bild 3-8 Prinzipieller Aufbau der Zugeinheit

Die Verankerung der Spannstahlproben erfolgt durch eine Klemmvorrichtung in der Freilaufmuffe, die eine freie Verdrehung der Proben während der Versuchsdurchführung ermöglicht. Dies ist insbesondere bei Untersuchungen an Spannstahlilitzen von Bedeutung, die bei einer drehsteifen Befestigung starke Schwankungen der momentanen Reibungsbeiwerte zeigen /8, 15/ und eine manuelle Ablesung ohne kontinuierliche Meßwertaufzeichnung ausschließen.

Wird eine freie Verdrehung der Litzenproben gewährleistet, so treten nach Überwindung der Ruhereibung deutlich kleinere Schwankungen der Reibkraft auf /15/. Die Tatsache, daß die Reibungsbeiwerte gleichzeitig gegenüber einem Versuch mit einer drehsteifen Einspannung deutlich abnehmen, ist bei der Beurteilung von relativen Reibkrafterhöhungen durch korrosive Veränderungen der Spannstahloberfläche von untergeordneter Bedeutung.

Der entwickelte Kleinmodellprüfstand ermöglicht eine schnelle und wenig aufwendige Beurteilung des Grades des Flugrostbefalls an der Spannstahloberfläche, der sich bei empfindlichen Spannstahlorten nach der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 einstellt. Darüber hinaus kann der Reibungsstand zu direkten Überprüfungen des Reibungsverhaltens von Spannstählen unter Baustellenbedingungen herangezogen werden. Im nachfolgenden Abschnitt werden einige Hinweise zur Durchführung der Reibungsuntersuchung gegeben.

3.4.2 Versuchsdurchführung

Der Reibungsüberprüfung im Kleinmodellversuchsstand werden Spannstahlproben im werksfrischen Zustand sowie nach der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 unterzogen. Die werksfrischen Proben werden vor der Untersuchung mit einem trockenen Tuch von eventuellen leichten Verunreinigungen befreit. Eine Reinigung mit Brennspiritus oder anderen Lösungsmitteln ist unzulässig.

Bei den Spannstahlproben nach der Klimabeanspruchung werden leicht lösbare Korrosionsprodukte mit einer Kunststoffbürste entfernt. Anschließend wird die Spannstahloberfläche mit einem trockenen Tuch abgerieben.

Die Prüfbleche sollten eine einwandfreie Oberfläche aufweisen. Eventuelle Verunreinigungen werden mit einem trockenen Tuch entfernt. Die Blechstreifen sind nach jeder Versuchsdurchführung zu ersetzen.

Die Proben werden zwischen den Druckstempeln angebracht und in der Klemmvorrichtung der Freilaufmuffe befestigt. Bei Untersuchungen an Litzen ist vor Versuchsbeginn die Drehfreiheit der Muffe sicherzustellen. Detaillierte Hinweise zum Einbau der Proben finden sich in der Bedienungsanweisung in Bild 3.4. Der Versuch erfolgt

mit einer konstanten Ziehgeschwindigkeit von 4 mm/s über eine Ziehweglänge von 100 mm.

Für die Bewertung der Flugrostempfindlichkeit werden die mittleren Reibungsbeiwerte herangezogen, die sich nach Überwindung der Ruhereibung zwischen dem Ziehweg von 20 und 100 mm einstellen. Die Reibungsbeiwerte im werksfrischen Zustand sowie im Zustand nach der Klimabeanspruchung sind jeweils an mindestens fünf Spannstahlproben zu ermitteln.

3.5 Ermittlung der Menge der Korrosionsprodukte (alternativ)

Das Verfahren mit Ermittlung der korrosionsbedingten Massenveränderungen kann alternativ zum direkten Reibungsversuch nach Abschnitt 3.4 zur Beurteilung des Grades des Flugrostbefalls nach der Klimabeanspruchung herangezogen werden. Seine Anwendung ist auf Spannstähle mit glatter Oberfläche begrenzt.

Die Spannstahlproben, die eine Länge von mindestens 50 mm aufweisen sollten, werden vor der Klimabeanspruchung auf 0,0001 g genau gewogen (m_1). Die korrosionsbelastete Oberfläche A_k wird durch Ausmessen im nicht korrodierten Zustand bestimmt. Bei Spannstahlilitzen werden die Proben in einzelne Drähte aufgelöst. Für die Untersuchung werden lediglich die Außendrähte verwendet.

Nach der Klimabeanspruchung werden die Korrosionsprodukte einschließlich der Schmiermittelreste aus dem Ziehvorgang durch Beizen in einem Ultraschallbad entfernt. Hierzu wird eine 10 – prozentige Salzsäurelösung mit einem Inhibitor zum Schutz des Spannstahlgrundmaterials (Hexametylentetramin 10 g/l) verwendet. Nach dem Beizvorgang folgt eine Spülung mit destilliertem Wasser. Verbleibende Salzsäurereste werden mit verdünnter Natronlauge in einem Ultraschallbad neutralisiert. Anschließend werden die Proben erneut mit destilliertem Wasser gespült, mit Brennspiritus gereinigt und gewogen (m_2). Der Anteil der Schmiermittelreste aus dem Ziehvorgang wird nach dem gleichen Verfahren an werksfrischen Proben bestimmt (m_s) und auf die jeweilige Probenoberfläche (A_s) bezogen. Die einzelnen Behandlungsschritte sind im Flußdiagramm in Bild 3-9 wiedergegeben.

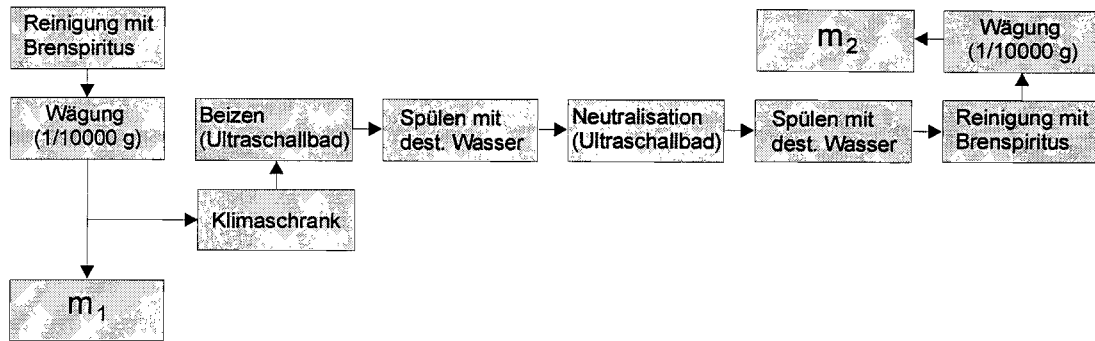


Bild 3-9 Ermittlung der korrosionsbedingten Massenänderungen

Die Massenänderungen Δm infolge Oberflächenkorrosion werden auf die korrosionsbelastete Oberfläche A_k bezogen. Sie ergeben sich aus der Differenz zwischen der Probenmasse vor und nach der Klimabeanspruchung (nach dem Beizvorgang) m_1 und m_2 sowie dem Anteil der Schmiermittelreste m_s / A_s zu

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{A_k} - \frac{m_s}{A_s} \quad [\text{g}/\text{m}^2]. \quad (3.4)$$

Das beschriebene Verfahren wird üblicherweise bei Korrosionsuntersuchungen an metallischen Oberflächen angewendet. Die erforderlichen Geräte sowie Chemikalien sind vielfach Bestandteil der Grundausrüstung von chemischen Laboratorien.

Die durchgeführten Überprüfungen zeigten einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Grad der korrosiven Veränderungen der Spannstahloberfläche und der Menge der entstehenden Korrosionsprodukte (vgl. Abschnitt 4.5.3). Allerdings lassen sich aufgrund der kleinen Anzahl der durchgeführten Versuche nur begrenzte Rückschlüsse auf die bei bestimmten Massenverlusten zu erwartenden Reibungsbeiwerte μ ziehen. Für die Formulierung von zulässigen Grenzen der korrosionsbedingten Massenveränderungen sind weitergehende Untersuchungen mit unterschiedlichen Spannstahlsorten erforderlich.

3.6 Grenzwerte der Korrosionsanfälligkeit bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund

Für die Bewertung der Flugrostempfindlichkeit der Spannstähle bei einer direkten Überprüfung des Reibungsverhaltens von werksfrischen und klimabeanspruchten Proben werden Empfindlichkeitsklassen EK1 bis EK10 eingeführt. Die Zuordnung zu den einzelnen Klassen erfolgt nach der prozentualen Erhöhung der Reibungsbeiwerte v

$$v = \frac{\mu_{\text{Kl}} - \mu_{\text{wf}}}{\mu_{\text{wf}}} \cdot 100. \quad (3.5)$$

Hierbei bedeuten:

- μ_{wf} mittlerer Reibungsbeiwert im werksfrischen Zustand
- μ_{Kl} mittlerer Reibungsbeiwert nach Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3

Die Definition der Empfindlichkeitsklassen enthält die Tabelle 3-1.

Klasse	EK1	EK2	EK3	EK4	EK5	EK6	EK7	EK8	EK9	EK10
v [%]	0	11	21	31	41	51	61	71	81	über
	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	91
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	

Tab 3-1 Definition der Spannstahlempfindlichkeitsklassen

Die Gefahr der Flugrostbildung bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund ist insbesondere dann gegeben, wenn die Spannstähle sich bereits während des Betoniervorgangs in den Hüllrohren befinden. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Flugrostbefall steigt darüber hinaus mit längeren Standzeiten in den Spannkanälen. Werden die Spannstähle erst mehrere Tage nach dem Betonieren in die Hüllrohre eingezogen und kurzfristig vorgespannt, so sind unzulässige Reibkrafteerhöhungen beim Vorspannen auch bei empfindlichen Spannstahlsorten unwahrscheinlich. Hingegen ist bei Spannstählen, die den ungünstigen Klimabedingungen in Hüllrohren in den ersten Tagen nach dem Betonieren ausgesetzt werden, von einer akuten Korrosionsgefahr auszugehen. Hier sind ausschließlich Spannstähle mit geringer Korrosionsneigung zu verwenden.

Auf der Grundlage der durchgeführten Reibungsuntersuchungen an Spannstählen mit unterschiedlicher Flugrostempfindlichkeit (vgl. Abschnitt 4) sowie der vorliegenden zahlreichen Versuchsergebnisse von Haveresch /15/ erscheinen folgende Anwendungsgrenzen für Spannstähle in metallischen Hüllrohren sinnvoll:

- Bei Empfindlichkeitsklassen EK1 bis EK3 – Anwendung bei allen Spanngliedern unabhängig von der Einbauart,
- bei Empfindlichkeitsklassen EK4 bis EK7 – Anwendung ausschließlich bei Spanngliedern, die nach dem Betonieren eingezogen und kurzfristig vorgespannt werden.

Die vorgeschlagenen Anwendungsgrenzen stützen sich auf Laborversuche und sind für die Anwendung des Prüfverfahrens in der Spannbetonpraxis anhand von Baustellenuntersuchungen sowie praktischen Erfahrungen der Spannverfahreninhaber genauer festzulegen.

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Vorbemerkung

Bei den durchgeführten Untersuchungen stand die Entwicklung und Überprüfung des in Abschnitt 3 beschriebenen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstahloberflächen im Vordergrund. Hierzu wurden unterschiedliche Varianten der Klimabeanspruchung sowie der Durchführung der Reibungsuntersuchungen in dem entwickelten Kleinmodellprüfstand getestet. Darüber hinaus wurden Grundsatzuntersuchungen zu den Ursachen der Flugrostbildung bei Spannstählen durchgeführt.

Der nachfolgende Abschnitt 4.2 enthält Angaben zu den untersuchten Materialproben. In Abschnitt 4.3 werden einige Grundsatzuntersuchungen im Kleinmodellprüfstand mit Variation der Prüfbedingungen vorgestellt. Der Abschnitt 4.4 faßt die Ergebnisse zum Einfluß unterschiedlicher Prüfklimate auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen zusammen. Anschließend werden in Abschnitt 4.5 durchgeführte Überprüfungen des entwickelten Prüfverfahrens zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstahloberflächen beschrieben. Der abschließende Abschnitt 4.6 enthält Untersuchungsergebnisse zum Einfluß der Schmiermittelrückstände auf die Korrosionsneigung.

4.2 Untersuchte Materialproben

Bei den Versuchen wurden Spannstahlilitzen 0,6“ St 1570/1770 zweier europäischer Hersteller mit deutscher Zulassung (LI und LII) verwendet, die bei vorangegangenen Untersuchungen in /15/ unterschiedliche Anfälligkeit gegenüber Flugrostbildung gezeigt hatten. Die Spannstähle wurden aus der laufenden Produktion entnommen und wiesen bei der Anlieferung einen einwandfreien Zustand der Oberfläche auf. Die Proben wurden bis zur Untersuchung in einem geschlossenen, staubgeschützten Raum bei einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 60 % aufbewahrt.

Die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Spannstähle sind in der Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Spannstahlart			Siebendrähtige Litze
Probenlänge	l	m	0,60
Nenndurchmesser	d_{St}	mm	15,3 (0,6 Zoll)
Querschnittsfläche	A_p	mm ²	139
Streckgrenze	β_s	N/mm ²	1570
Zugfestigkeit	β_R		1770
Drahtprofilierung		-	keine
Schlaglänge		cm	ca. 23

Tab. 4-1 Eigenschaften der untersuchten Spannstahlproben (LI und LII)

Bei den Reibungsversuchen in dem entwickelten Kleinmodellprüfstand wurde als Reibpartner kaltgewalzter Bandstahl der Firma SIEGFRIED BOECKER der Güte St2 eingesetzt. Die Dicke der glatten Bleche betrug 0,4 mm. Der Bandstahl wird üblicherweise zur Herstellung von gefalzten Blechhüllrohren verwendet.

4.3 Variation der Prüfbedingungen im Kleinmodellprüfstand

4.3.1 Allgemeines

Das Ziel der Untersuchungen war die Festlegung geeigneter Prüfbedingungen in dem entwickelten Kleinmodellversuchsstand. In Versuchen mit Litzen im werksfrischen Zustand wurde dabei der Einfluß der Anpreßkraft A (Abschnitt 4.3.2), der Ziehgeschwindigkeit (Abschnitt 4.3.3) und der Drehbehinderung der Proben (Abschnitt 4.3.4) auf die Meßergebnisse ermittelt. Bei Spannstählen, die zuvor einer Klimabeanspruchung unterzogen wurden, wurden darüber hinaus unterschiedliche Varianten der Vorbehandlung der korrodierten Oberfläche getestet (Abschnitt 4.3.5). Die Untersuchungen ermöglichen tiefere Einblicke in die Funktionsweise des entwickelten Prüfstandes und geben Aufschlüsse darüber, inwiefern die Prüfergebnisse durch abweichende Prüfbedingungen beeinflusst werden können.

4.3.2 Variation der Anpreßkraft A

Der Reibungsbeiwert μ zwischen Spannstahl und Hüllrohr ist i.a. abhängig von der einwirkenden Querpressung /8, 15/. Bei Spannstahllitzen und kaltgezogenen glatten Drähten nimmt der Reibwiderstand bei kleinen Anpreßkräften mit ansteigendem Querdruck deutlich zu und erreicht dann bei Pressungen oberhalb von 20 – 40 kN/m ein weitgehend konstantes Niveau. Zur Klärung der Frage, inwiefern die Meßergebnisse im Kleinmodellprüfstand durch die Wahl der Anpreßkraft A beeinflusst werden, wurden Versuche mit unterschiedlichen Querpressungen durchgeführt.

Das Bild 4-1 zeigt die mittleren Reibungsbeiwerte μ in Abhängigkeit von der Anpreßkraft A , die bei Versuchen mit Spannstahllitzen (LI) im werksfrischen Zustand (ohne Drehbehinderung) ermittelt wurden. Man erkennt einen leichten Anstieg der Reibungsbeiwerte mit ansteigender Anpreßkraft.

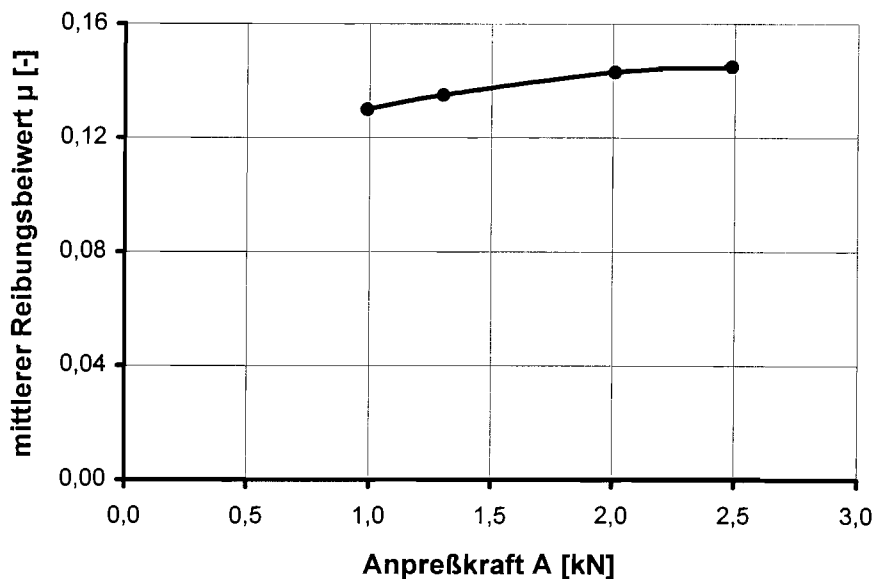


Bild 4-1 Mittlere Reibungsbeiwerte μ der Litze LI in Abhängigkeit von der Anpreßkraft A (werksfrischer Zustand)

Trotz der geringen Pressungen von 10 bis 25 kN/m (Beanspruchungslänge 100 mm) wird hier bereits das annähernd konstante Reibkraftniveau erreicht. Dies ist auf die starre Bettung der Prüfbleche zurückzuführen, die schon bei kleinen Anpreßkräften zu hohen Kontaktdrücken zwischen den Reibpartnern führt.

Bei der Bewertung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen über eine direkte Überprüfung der Reibungsbeiwerte im Kleinmodellprüfstand ist davon auszugehen, daß geringe Abweichungen von der in Abschnitt 3.4 vorgeschlagenen Prüfkraft $A = 1,3$ kN ohne Auswirkungen auf die Meßergebnisse bleiben.

4.3.3 Variation der Ziehgeschwindigkeit

Die Ergebnisse der Reibungsversuche mit unterschiedlicher Ziehgeschwindigkeit sind in Bild 4-2 dargestellt. Die Versuche erfolgten mit Spannstahllitzen LI im werksfrischen Zustand. Man erkennt eine schwach ausgeprägte Zunahme der mittleren Reibungsbeiwerte μ mit wachsender Geschwindigkeit der Relativverschiebung. Eine signifikante Beeinflussung der Meßwerte durch Abweichungen von dem für die Prüfung vorgeschlagenen Wert 4 mm/s ist aufgrund der Meßergebnisse auszuschließen.

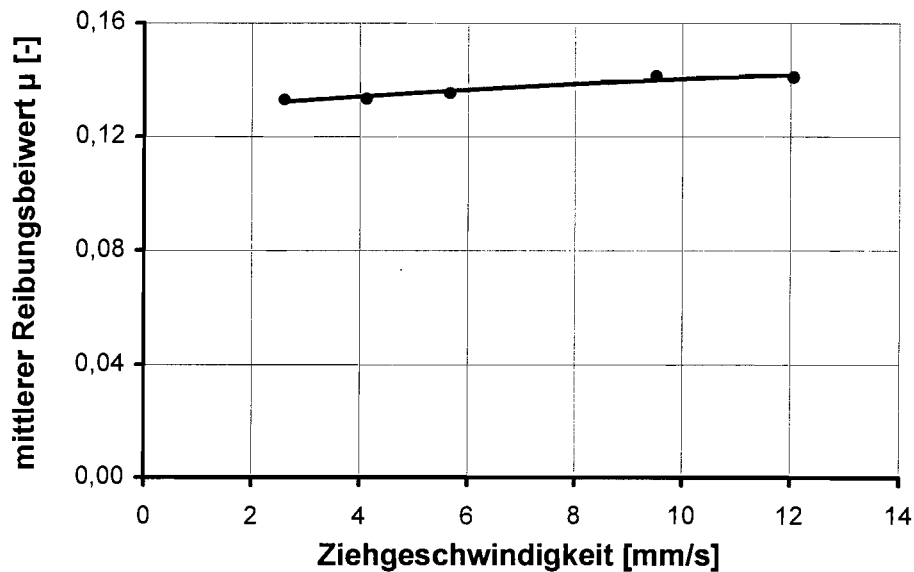


Bild 4-2 Mittlere Reibungsbeiwerte μ bei unterschiedlichen Ziehgeschwindigkeiten; Litze LI, werksfrischer Zustand

Bei der Versuchsdurchführung kann allerdings bedingt durch die zwischengeschaltete Feder die momentane Geschwindigkeit der Relativverschiebung, insbesondere wenn hohe Reibwiderstände (z.B. bei stark korrodierten Proben) auftreten, starken Schwankungen unterliegen. Nähere Hinweise zu den Auswirkungen der gewählten Versuchsanordnung auf die gemessenen Reibungsbeiwerte finden sich in Abschnitt 4.3.5.

4.3.4 Einfluß der Drehbehinderung bei Spannstrahlitzen

Die Erfahrungen mit Kleinmodellversuchen zur Ermittlung des Reibungsverhaltens von Spannstrahlitzen /4, 8, 15/ zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit der gemessenen Reibungsbeiwerte vom Grad der Behinderung der Litzenverdrehung, die sich während der Reibbeanspruchung durch die Verseilung der Außendrähte einstellt. Zur Beantwortung der Frage, inwiefern bei der gewählten Versuchsanordnung die Meßergebnisse durch eine behinderte Litzenverdrehung beeinflusst werden können, wurden Versuche mit einer fixierten Freilaufmuffe durchgeführt.

In Bild 4-3 sind die Reibungsbeiwerte μ über die Ziehweglänge bei einer Versuchsdurchführung mit und ohne Drehbehinderung aufgetragen. Man erkennt einen deutlichen Einfluß der Versuchsart auf den Verlauf des Reibungsdiagramms. Während sich beim Versuch ohne Drehbehinderung nach Überwindung der Ruhereibung ein weitgehend gleichmäßiger Verlauf der Reibungsbeiwerte einstellt, tritt bei einer festgesetzten Freilaufmuffe bei Ziehwegen zwischen rund 50 und 100 mm eine deutliche Erhöhung

des Reibwiderstandes auf. Die in Reibungsversuchen mit profilierten Hüllrohrproben festgestellten periodischen Schwankungen der Reibungsbeiwerte /8, 15/ sind hier allerdings bedingt durch die glatte Prüfblechoberfläche sowie die kleine Ziehweglänge nicht zu beobachten.

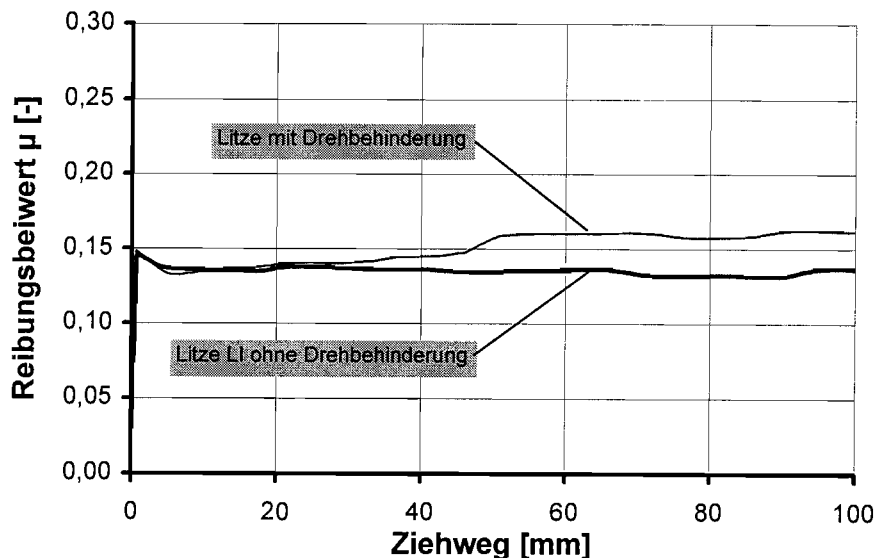


Bild 4-3 Reibungscharakteristik werksfrischer Litzen LI mit und ohne Drehbehinderung

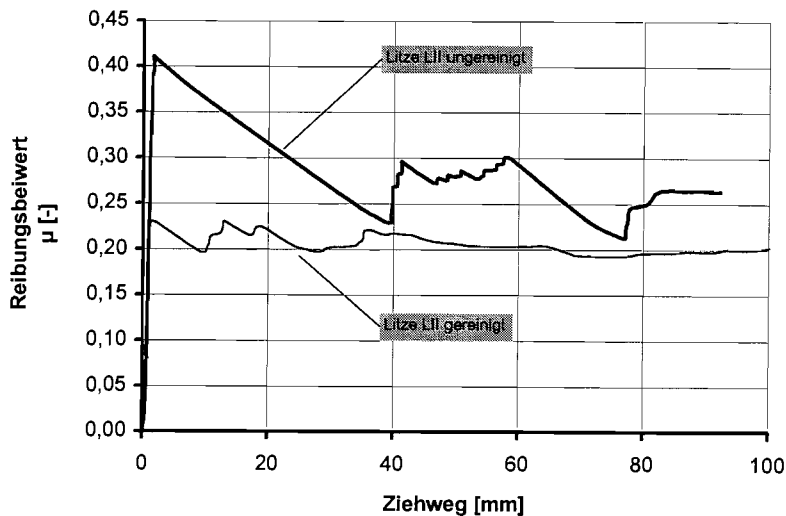
Bei der Bewertung des Korrosionsverhaltens von Spannstahllitzen durch direkte Überprüfung der Reibungsbeiwerte in dem entwickelten Kleinmodellprüfstand ist angesichts der möglichen Schwankungen der Reibungsbeiwerte die Gängigkeit der Freilaufmuffe stets zu kontrollieren.

4.3.5 Einfluß der Vorbehandlung von korrodierten Spannstahloberflächen

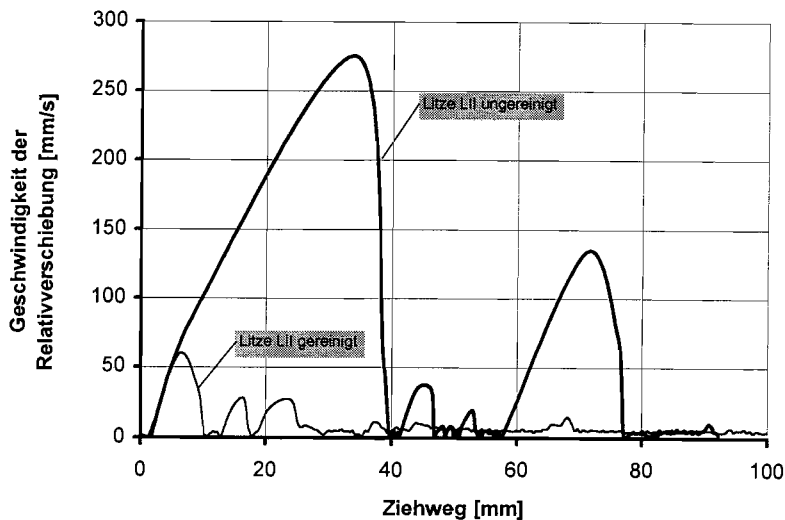
Reibkrafteerhöhungen infolge von korrosiven Veränderungen der Spannstahloberfläche sind auf zwei miteinander gekoppelte Effekte zurückzuführen: Einerseits wird die Oberflächenschicht aus vercrackten Ziehmitteln, die das Reibungsverhalten günstig beeinflusst, an den Stellen des Korrosionsangriffs verletzt. Hierdurch wird die Rauigkeit der Spannstahloberfläche deutlich erhöht /15/. Andererseits gelangen die entstehenden losen Korrosionspartikel während der Reibbeanspruchung zwischen die Reibpartner und erhöhen zusätzlich den Reibwiderstand.

Untersuchungen des Reibungsverhaltens von korrodierten Spannstählen in dem entwickelten Kleinmodellprüfstand zeigten einen deutlichen Abfall der Reibungsbeiwerte, wenn die losen Korrosionsprodukte von der Spannstahloberfläche durch Bürsten entfernt wurden. Darüber hinaus zeigte sich, daß die gewählte Versuchsanordnung mit

einer zwischengeschalteten Federwaage bei hohen Reibkräften starke Meßwertschwankungen verursachen und zu Fehleinschätzungen des Reibungsverhaltens führen kann. Das Bild 4-4a zeigt exemplarisch die Reibungsdiagramme zweier Litzenproben nach Klimabeanspruchung. Eine der Litzen wurde vor der Versuchsdurchführung mit einer Kunststoffbürste gereinigt und anschließend mit einem trockenen Tuch abgerieben. Die zweite Probe mit gleichem Korrosionsbefall wurde ohne jegliche Vorbehandlung untersucht.



a) Reibungsbeiwert μ



b) Geschwindigkeit der Relativverschiebung

Bild 4-4 Verlauf der gemessenen Reibungsbeiwerte sowie der momentanen Geschwindigkeit der Relativverschiebung über die Ziehweglänge bei einer gereinigten und ungerinigten Litze nach Klimabeanspruchung (Spannstahl LII)

Man erkennt den deutlich unterschiedlichen Reibwiderstand der beiden Proben. Auffällig sind dabei die hohen Schwankungen der momentanen Reibungsbeiwerte bei der

ungereinigten Litze, die auf die Nachgiebigkeit der zwischengeschalteten Federwaage zurückzuführen sind. Der Einfluß der Federwaage wird in Bild 4-4b deutlich, das den zugehörigen Verlauf der momentanen Geschwindigkeit der Relativverschiebung in beiden Versuchen darstellt. Man erkennt, daß insbesondere im Fall der ungereinigten Spannstahlprobe erhebliche Schwankungen der Ziehgeschwindigkeit mit ausgeprägten Gleit- und Stillstandsphasen auftreten. Die letzten werden durch den Abfall der Federkraft bei schneller Probenbewegung verursacht, wodurch die Gleitbewegung zum Teil nicht aufrechterhalten werden kann.

Für die Durchführung von Reibungsversuchen in dem entwickelten Kleinmodellprüfstand ergeben sich aus den Untersuchungen folgende Schlußfolgerungen:

1. Die löslichen Korrosionsprodukte an der Spannstahloberfläche nach der Klimabeanspruchung müssen vor der Versuchsdurchführung durch Bürsten und Abreiben mit einem trockenen Tuch entfernt werden.
2. Auf die Reinigung der korrodierten Spannstahloberfläche kann verzichtet werden, wenn die Federwaage durch eine Kraftmeßzelle mit einem geringen Federweg ersetzt wird.

Die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellten Versuche mit korrodierten Spannstahlproben haben gezeigt, daß Spannstähle mit unterschiedlicher Flugrostempfindlichkeit auch nach Entfernen der losen Korrosionsprodukte deutliche Unterschiede im Reibungsverhalten aufweisen. Die gewählte Versuchsanordnung mit einer zwischengeschalteten Federwaage, die u.a. Messungen ohne aufwendige Meßelektronik z.B. auf der Baustelle ermöglicht, erscheint deshalb für die Beurteilung der korrosiven Veränderungen der Spannstahloberflächen durchaus geeignet.

4.4 Versuche mit unterschiedlichen Prüfklimaten

4.4.1 Allgemeines

Das Hauptziel der Versuche war die Ermittlung geeigneter Prüfklimate für Korrosionsuntersuchungen an Spannstählen. Darüber hinaus sollten Erkenntnisse zu den Ursachen der Flugrostbildung bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund gewonnen werden. Die Prüfbedingungen wurden nach folgenden Gesichtspunkten festgelegt:

1. Die Klimabeanspruchung sollte möglichst wirklichkeitsnah die kritischen Klimaverhältnisse nachbilden, wie sie im Inneren von Hüllrohren nach dem Betonieren beobachtet werden.

- Bei Spannstählen mit unterschiedlicher Korrosionsneigung sollten innerhalb einer möglichst kurzen Versuchsdauer deutlich feststellbare Unterschiede im Korrosionsverhalten auftreten.

Es wurden zwei Varianten der Klimabeanspruchung getestet:

- Klima 1: Konstantklima ohne Kondenswasserbildung
- Klima 2: Konstantklima mit Kondenswasserbildung und Tropfenbeaufschlagung

Die Untersuchungen erfolgten in der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Klimakammer. Die Versuchsergebnisse werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

4.4.2 Konstantklima ohne Kondenswasserbildung (Klima 1)

In Bild 4-5 sind die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Sauerstoffgehalt in der Klimakammer über die Versuchsdauer von 72 Stunden dargestellt. Die Kondenswasserbildung an der Spannstahloberfläche wurde durch Vorwärmen der Proben auf die Kammertemperatur von 50 °C unterbunden. Das von den Kammerwänden herabtropfende Kondenswasser wurde durch eine über den Proben angebrachte schräge Plexiglasplatte abgeführt.

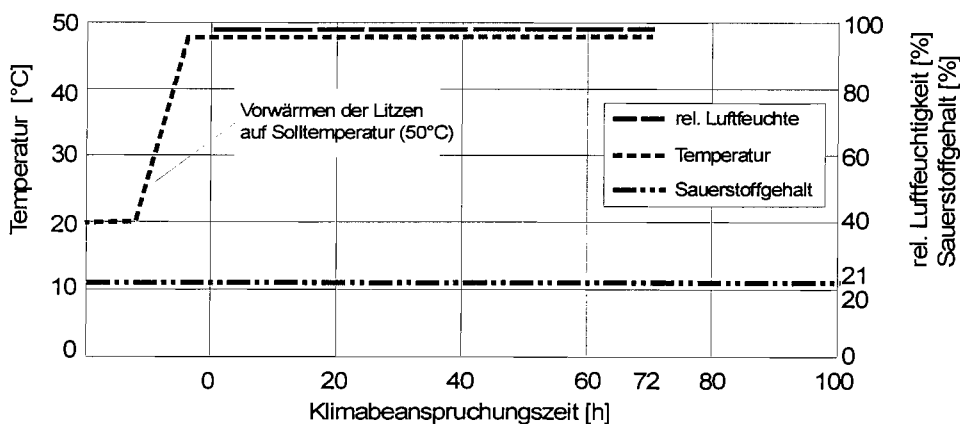


Bild 4-5 Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Sauerstoffgehalt während der Prüfung beim Konstantklima ohne Kondenswasserbildung (Klima 1)

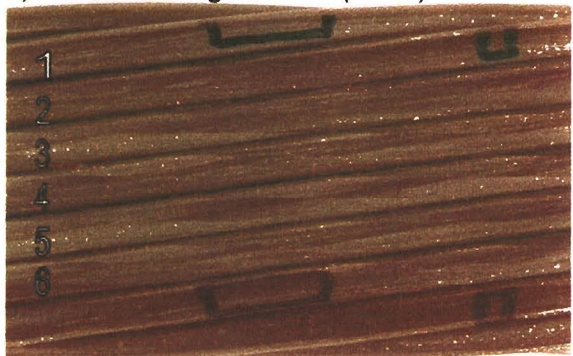
Die Bilder 4-6 und 4-7 zeigen den Oberflächenzustand der Litzen LI (geringe Flugrostempfindlichkeit) und LII (hohe Flugrostempfindlichkeit) nach der Klimabeanspruchung.



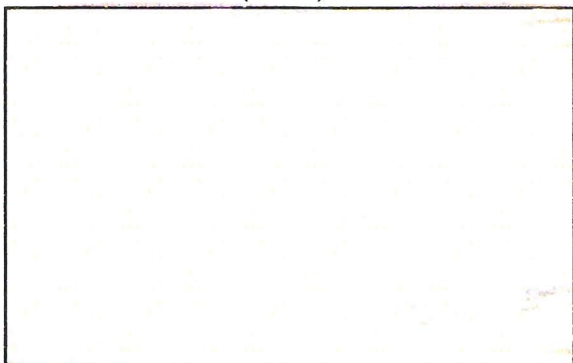
a) Litzenabschnitt (M 1:1)



b) Fotoabwicklung der Litze (M 1:1)



c) Darstellung der nahezu unversehrten Litzenoberfläche (M 1:1)



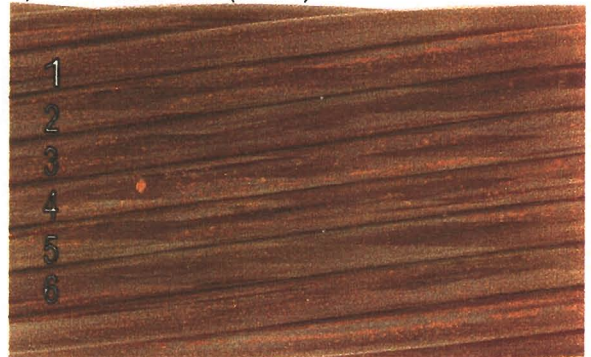
d) Qualitative Korrosionsverteilung (M 1:1)



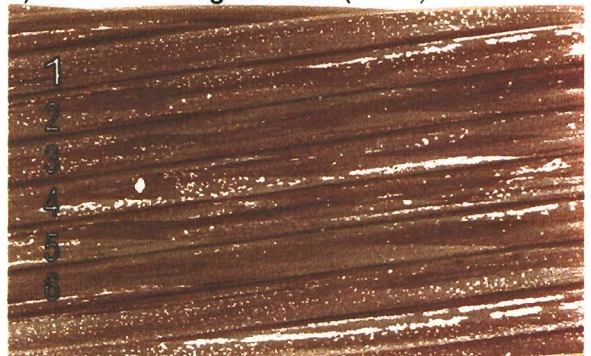
e) Detailvergrößerung (M 3:1)



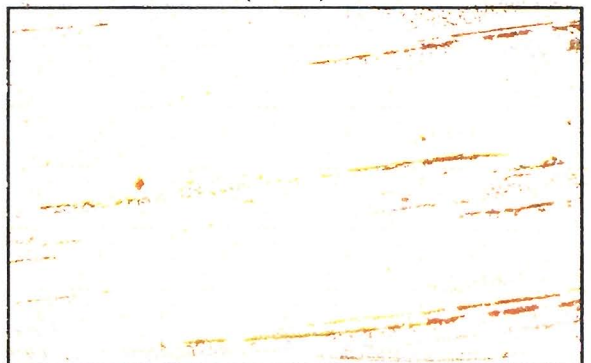
a) Litzenabschnitt (M 1:1)



b) Fotoabwicklung der Litze (M 1:1)



c) Darstellung der nahezu unversehrten Litzenoberfläche (M 1:1)



d) Qualitative Korrosionsverteilung (M 1:1)



e) Detailvergrößerung (M 3:1)

Bild 4-6 Oberflächenzustand der Litze LI nach Klimabeanspruchung (Klima 1) /24/

Bild 4-7 Oberflächenzustand der Litze LII nach Klimabeanspruchung (Klima 1) /24/

Bei beiden Spannstahlsorten sind über die gesamte Oberfläche gleichmäßig verteilte feine Korrosionspartikel festzustellen (Bilder 4-6d und 4-7d). Nach augenscheinlicher Betrachtung läßt sich bei Litze LII ein dichter verteiltes Korrosionsbild erkennen (Bild 4-7e). Der mittlere Größe der Korrosionsstellen liegt bei ca. 0,2 mm.

In Bild 4-8 sind die Ergebnisse einer anschließenden Überprüfung des Reibungsverhaltens der Proben im Kleinmodellprüfstand dargestellt. Die löslichen Korrosionsprodukte an der Spannstahloberfläche wurden dabei abweichend von Abschnitt 3.4 vor der Untersuchung nicht entfernt.

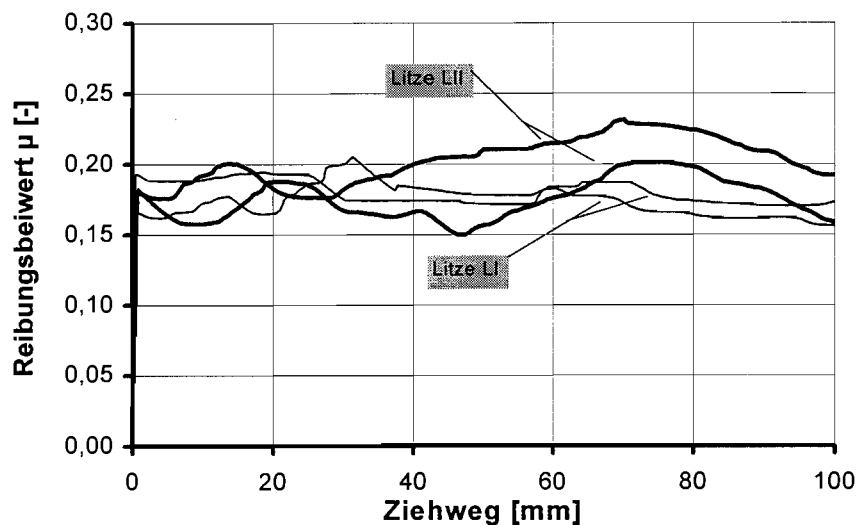


Bild 4-8 Reibungsbeiwerte μ in Abhängigkeit des Ziehweges bei den Spannstählen LI und LII nach der Klimabeanspruchung; Konstantklima ohne Kondenswasserbildung

Man erkennt bei beiden Spannstahltypen erhöhte Reibungsbeiwerte μ mit momentanen Werten zwischen 0,16 und 0,23. Bedingt durch die ähnlichen korrosiven Veränderungen der Spannstahloberflächen sind signifikante Unterschiede der mittleren Reibungsbeiwerte jedoch kaum vorhanden.

4.4.3 Konstantklima mit Kondenswasserbildung und Tropfenbeaufschlagung (Klima 2)

Bei dem Prüfklima 2 mit Kondenswasserbildung und Tropfenbeaufschlagung liegen gegenüber dem Klima 1 deutlich schärfere Prüfbedingungen vor. Durch den ständigen Kontakt der Spannstahlproben mit Kondenswasser werden Voraussetzungen für einen verstärkten elektrochemischen Korrosionsangriff geschaffen.

Das Bild 4-9 zeigt den Verlauf der Klimaparameter über die Versuchsdauer von 72 Stunden.

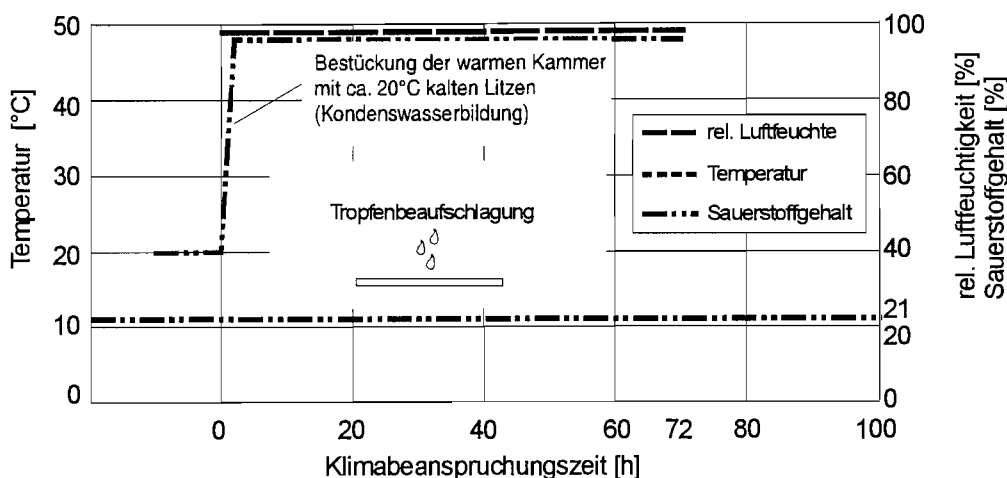


Bild 4-9 Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Sauerstoffgehalt während der Prüfung beim Konstantklima mit Kondenswasserbildung und Tropfenbeaufschlagung (Klima 2)

Die Spannstahlproben mit einer Temperatur von ca. 20°C werden in den zuvor auf 50°C temperierten Klimaschrank gelegt. Bedingt durch die anfängliche Temperaturdifferenz und den hohen Feuchtigkeitsgehalt der Kammerluft kommt es auf der gesamten Spannstahloberfläche zur verstärkten Schwitzwasserbildung. Zusätzlich sorgt das von der Kammerdecke herabtropfende Kondenswasser für eine kontinuierliche Befeuchtung der Proben, die allerdings bereichsweise stark unterschiedlich sein kann. So entstehen bei den waagrecht gelagerten Spannstählen die in Bild 4-10 schematisch dargestellten Korrosionsbereiche mit (Bereich 1) und ohne Tropfenbeaufschlagung (Bereich 2), die lokal zu einem stark unterschiedlichen Korrosionsangriff führen.

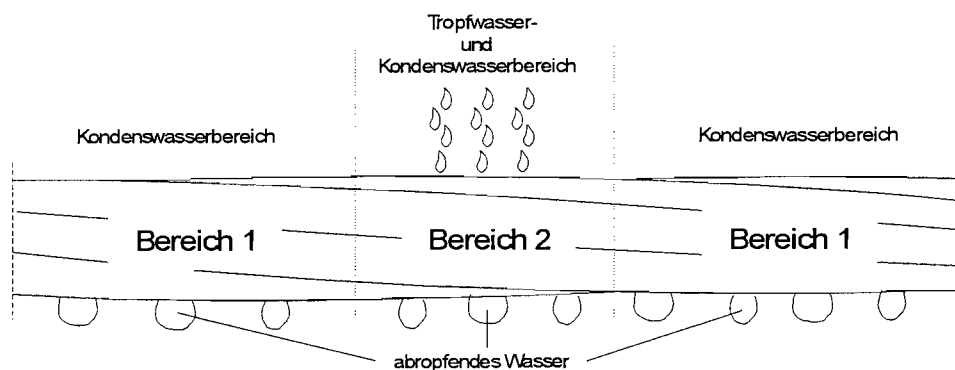


Bild 4-10 Korrosionsbereiche der Litzen bei Klimabeanspruchung 2

Die nachfolgenden Bilder dokumentieren den Oberflächenzustand der Litzen LI und LII nach der Klimabeanspruchung, wobei die Bilder 4-11 und 4-12 für den Korrosionsbereich 1 und die Bilder 4-13 und 4-14 für den Korrosionsbereich 2 gelten.



a) Litzenabschnitt (M 1:1)



b) Fotoabwicklung der Litze (M 1:1)



c) Darstellung der nahezu unversehrten Litzenoberfläche (M 1:1)



d) Qualitative Korrosionsverteilung (M 1:1)

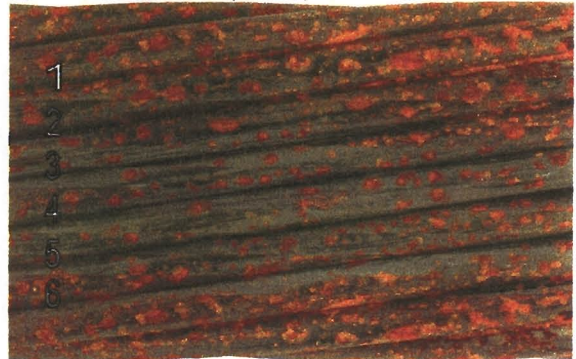


e) Detailvergrößerung (M 3:1)

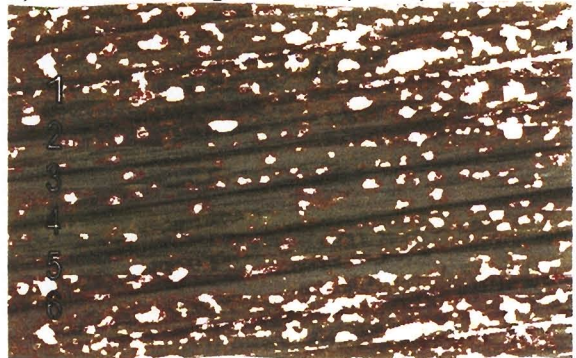
Bild 4-11 Oberflächenzustand der Litze LI nach Klimabeanspruchung (Klima 2, Korrosionsbereich 1) /24/



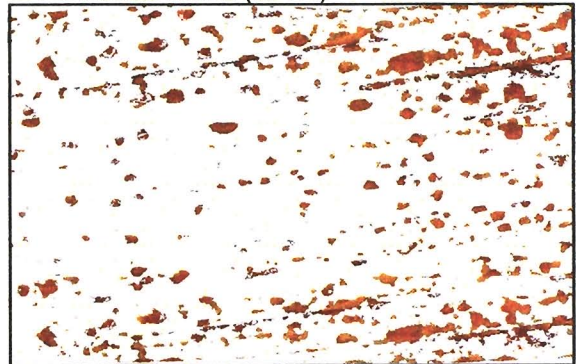
a) Litzenabschnitt (M 1:1)



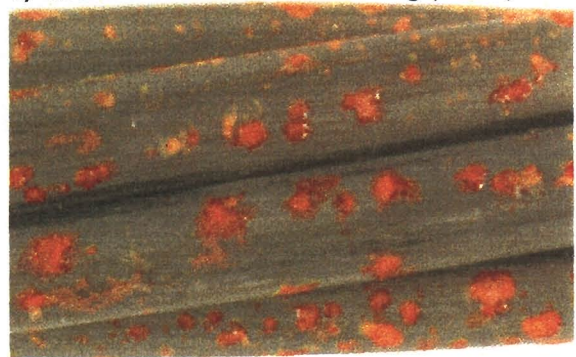
b) Fotoabwicklung der Litze (M 1:1)



c) Darstellung der nahezu unversehrten Litzenoberfläche (M 1:1)



d) Qualitative Korrosionsverteilung (M 1:1)

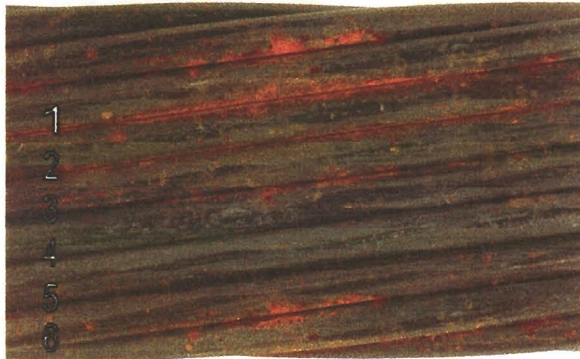


e) Detailvergrößerung (M 3:1)

Bild 4-12 Oberflächenzustand der Litze LII nach Klimabeanspruchung (Klima 2, Korrosionsbereich 1) /24/



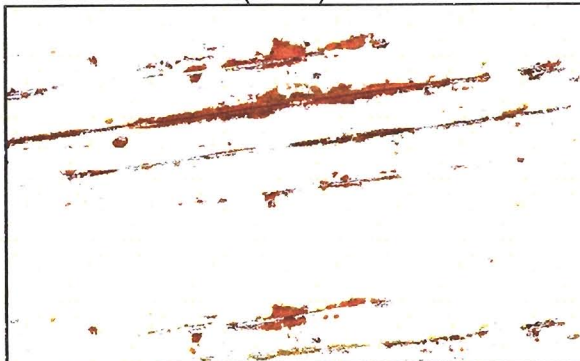
a) Litzenabschnitt (M 1:1)



b) Fotoabwicklung der Litze (M 1:1)



c) Darstellung der nahezu unversehrten Litzenoberfläche (M 1:1)



d) Qualitative Korrosionsverteilung (M 1:1)

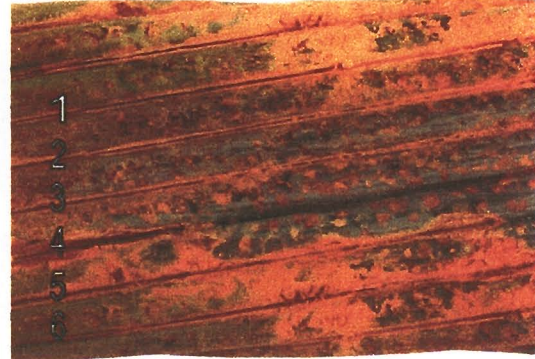


e) Detailvergrößerung (M 3:1)

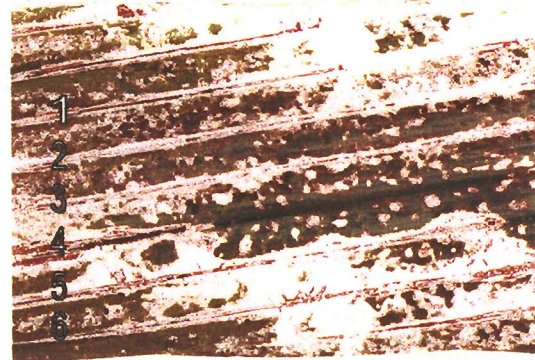
Bild 4-13 Oberflächenzustand der Litze LI nach Klimabeanspruchung (Klima 2, Korrosionsbereich 2)
/24/



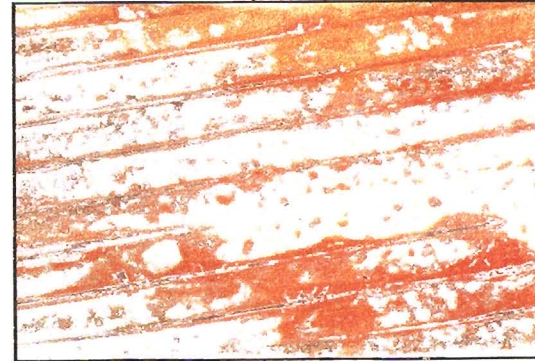
a) Litzenabschnitt (M 1:1)



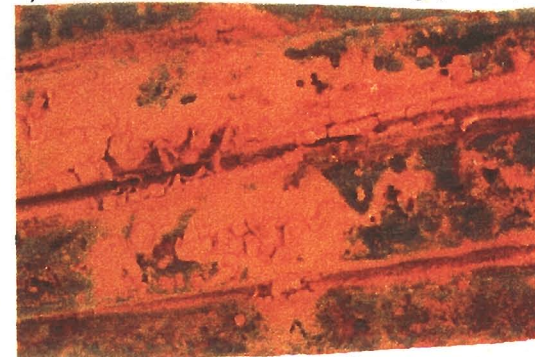
b) Fotoabwicklung der Litze (M 1:1)



c) Darstellung der nahezu unversehrten Litzenoberfläche (M 1:1)



d) Qualitative Korrosionsverteilung (M 1:1)



e) Detailvergrößerung (M 3:1)

Bild 4-14 Oberflächenzustand der Litze LII nach Klimabeanspruchung (Klima 2, Korrosionsbereich 2)
/24/

Im Bereich 1 der Spannstähle sind 1 bis 2 mm große kreisförmige Korrosionsflecken erkennbar (Bild 4-11d und 4-12d). Die runde Form der Korrosionsstellen deutet auf eine Tropfenbildung hin. Sie ist zum einen auf die wasserabweisende Wirkung der Litzenoberfläche, zum anderen auf das abtropfende Wasser an der Probenunterseite zurückzuführen, wo auch ein verstärkter Korrosionsangriff zu beobachten ist (Bild 4-12b und c). Zwischen den Litzen LI und LII sind augenscheinlich deutliche Unterschiede im Korrosionsverhalten festzustellen.

Der Bereich 2 der Spannstahloberflächen ist durch einen großflächigen Korrosionsangriff gekennzeichnet (Bild 4-13e und 4-14e). Punktförmige Korrosionsstellen sind nur vereinzelt erkennbar (Bild 4-13d und 4-14d). Infolge der kontinuierlichen Durchfeuchtung der Freiräume zwischen den Litzenstrahlen bilden sich in den Zwickeln zusammenhängende Korrosionsflecken. Auch hier zeigen die beiden Spannstahlsorten eine deutlich unterschiedliche Korrosionsneigung.

Das Bild 4-15 zeigt die Ergebnisse der Überprüfung des Reibungsverhaltens der Litzen LI und LII nach der Klimabeanspruchung. Die losen Korrosionsprodukte an der Spannstahloberfläche wurden vor dem Reibungsversuch mit einer Kunststoffbürste entfernt. Die Proben wurden anschließend mit einem trockenen Tuch abgerieben. Durch das Entfernen der Korrosionsprodukte werden die gemessenen Reibungsbeiwerte, wie in Abschnitt 4.3.5 bereits erläutert, verringert.

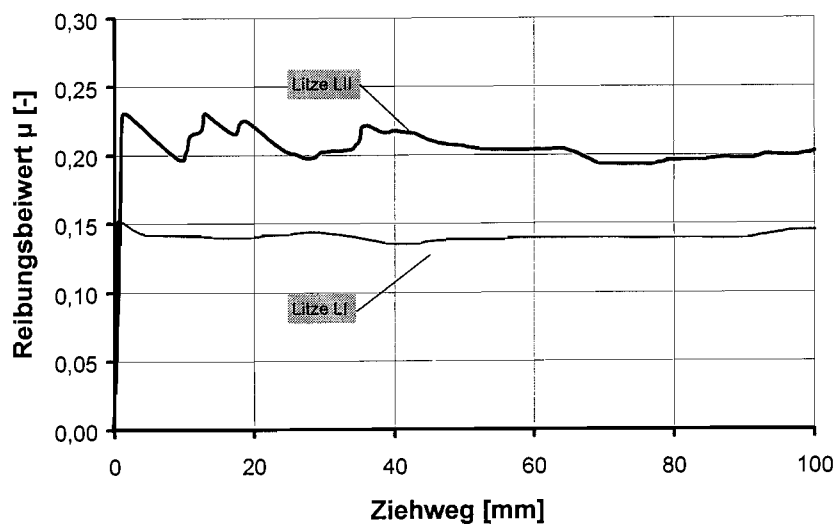


Bild 4-15 Reibungsbeiwerte in Abhängigkeit des Ziehweges bei den Spannstählen LI und LII nach der Klimabeanspruchung; Konstantklima mit Kondenswasserbildung und Tropfenbeaufschlagung

Der Einfluß des unterschiedlichen Korrosionsverhaltens auf den Reibwiderstand ist bei den beiden Spannstahlsorten deutlich erkennbar. Während bei der Litze LI nach Überwindung der Ruhereibung ein mittlerer Reibungsbeiwert von rund 0,14 auftritt, stellt

sich bei der Litze LII ein Wert von ca. 0,20 ein. Gegenüber dem gleichen Versuch im werksfrischen Zustand, wo bei beiden Litzen ein mittlerer Reibungsbeiwert von rund 0,13 ermittelt wurde, entspricht dies einer Reibungserhöhung von etwa 8 und 54 %. Ein derartig ausgeprägter Unterschied im Reibungsverhalten nach der Klimabeanspruchung ermöglicht eine eindeutige Beurteilung der Korrosionsneigung der beiden Spannstähle. Allerdings ist dabei darauf hinzuweisen, daß unterschiedliche Korrosionsgrade entlang der Probenlänge (Korrosionsbereiche 1 und 2) die Messungen im Kleinmodellprüfstand ungünstig beeinflussen können. Zur Vermeidung von größeren Meßwertstreuungen muß deshalb eine gleichmäßige Befeuchtung der Proben sichergestellt werden.

4.4.4 Schlußbemerkung

Die Versuche mit unterschiedlichen Prüfklimaten geben Aufschluß über die Ursachen des Flugrostbefalls von Spannstählen in Hüllrohren. Das unterschiedliche Verhalten bei den Klimaten 1 und 2 zeigt, daß die für erhöhte Dehnbehinderungen bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund verantwortliche Oberflächenkorrosion der Spannstähle im wesentlichen auf elektrochemische Korrosionsprozesse zurückzuführen ist. Treten die Spannstähle nicht unmittelbar in Kontakt mit Restwasser aus dem Betoniervorgang und ist die Bildung von Kondenswasser nicht möglich, so ist der Korrosionsbefall auch bei ungünstigen Klimabedingungen nur schwach ausgeprägt.

Für Untersuchungen der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen ergeben sich aus den Versuchsergebnissen folgende Schlußfolgerungen:

1. Das Prüfklima muß eine definierte Kondenswasserbildung an der Spannstahloberfläche gewährleisten.
2. Zur Vermeidung übermäßiger Meßwertstreuungen ist ein unkontrolliertes Abtropfen des Kondenswassers von der Kammerwänden auf die zu untersuchenden Proben auszuschließen.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde das in Abschnitt 3.3 angegebene Prüfklima entwickelt. Nachfolgend werden Versuche unter den für die Untersuchung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen vorgeschlagenen Prüfbedingungen (vgl. Abschnitt 3) vorgestellt.

4.5 Prüfung der Flugrostanfälligkeit unter den vorgeschlagenen Prüfbedingungen

4.5.1 Allgemeines

Die Versuche wurden an Spannstahlproben mit unterschiedlicher Korrosionsneigung durchgeführt. Die Auswahl der Spannstähle (LI und LII, vgl. Abschnitt 4.2) erfolgte in Anlehnung an die Untersuchungen von Haveresch /15/, in denen die beiden Spannstahlsorten eine stark unterschiedliche Flugrostempfindlichkeit gezeigt hatten.

Die Prüfbedingungen in der Klimakammer sowie in dem entwickelten Kleinmodellprüfstand entsprachen den Angaben in Abschnitt 3. Um nähere Aufschlüsse über die zeitliche Entwicklung der korrosiven Prozesse an der Spannstahloberfläche zu gewinnen, wurden nach den einzelnen Phasen der dreistufigen Klimabeanspruchung zusätzliche Überprüfungen des Reibungsverhaltens sowie der entstehenden Menge der Korrosionsprodukte vorgenommen. Es sei dabei darauf hingewiesen, daß bei einer praktischen Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstahloberflächen nach dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verfahren ausschließlich Überprüfungen nach Abschluß der gesamten Klimabeanspruchung erforderlich sind.

4.5.2 Klimabeanspruchung mit anschließender Überprüfung des Reibungsverhaltens im Kleinmodellprüfstand

Der Oberflächenzustand der untersuchten Spannstähle LI (geringe Korrosionsneigung) und LII (hohe Korrosionsneigung) während der einzelnen Phasen der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 ist in Bild 4-16 dokumentiert. Da die Spannstähle jeweils einer Überprüfung des Reibungsverhaltens im Kleinmodellprüfstand unterzogen wurden, zeigt die Darstellung unterschiedliche Proben der jeweiligen Spannstahlsorten.

Die Oberflächen der Spannstähle LI und LII weisen scharf abgegrenzte runde Korrosionsflecken auf, die auf Tropfenbildung des ausfallenden Kondenswassers an der wasserabweisenden Spannstahloberfläche zurückzuführen sind. Man erkennt dabei ein deutlich unterschiedliches Korrosionsverhalten der beiden Spannstahlsorten. Während beim Spannstahl LI der anfängliche Flugrostbefall nur leicht über die Dauer der Klimabeanspruchung zunimmt, zeigt sich beim Spannstahl LII eine kontinuierliche Entwicklung der korrosiven Veränderungen an der Stahloberfläche.

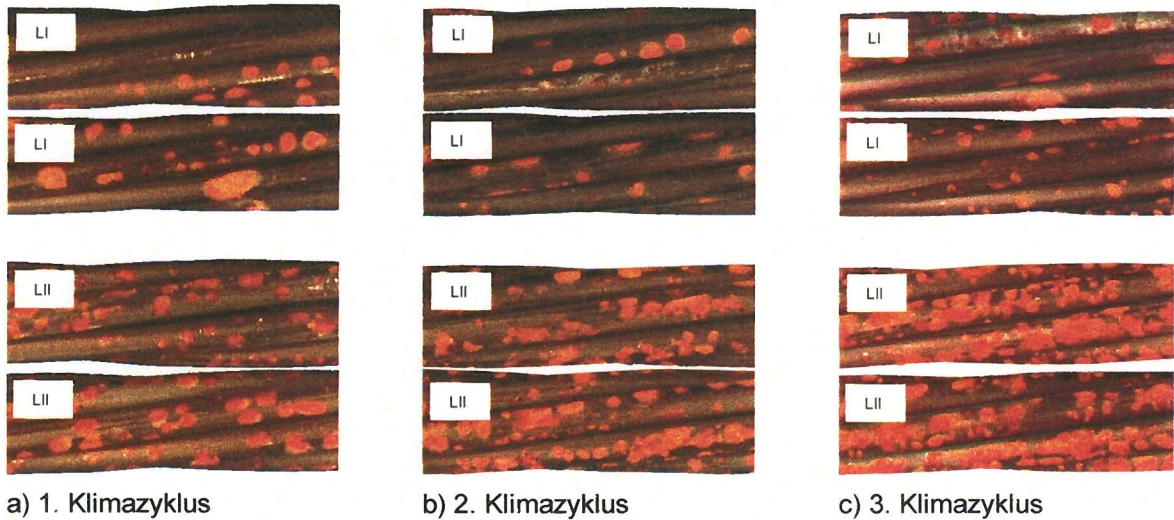


Bild 4-16 Oberflächenzustand der Litzen LI (geringe Korrosionsneigung) und LII (hohe Korrosionsneigung) in den einzelnen Phasen der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 nach /24/

Bei der anschließenden Überprüfung des Reibungsverhaltens der Spannstähle im Kleinmodellprüfstand wurden entsprechend Abschnitt 3.4 die losen Korrosionsprodukte von der Stahloberfläche mit einer Kunststoffbürste entfernt. Anschließend wurden die Proben mit einem trockenen Tuch abgerieben. Die Bilder 4-17 und 4-18 zeigen exemplarisch die Spannstähle LI und LII nach der ersten Phase der Klimabeanspruchung (0 – 24h) vor und nach dem Entfernen der Korrosionsprodukte. Man erkennt, daß trotz der intensiven Reinigung bei beiden Proben der rauhe Korrosionsgrund erhalten bleibt.



a) Oberfläche von losen Korrosionsprodukten nicht befreit



b) Oberfläche befreit von losen Korrosionsprodukten

Bild 4-17 Oberflächenzustand des Spannstahls LI nach dem 1. Klimazyklus vor und nach Entfernen der losen Korrosionsprodukte /24/



a) Oberfläche von losen Korrosionsprodukten nicht befreit



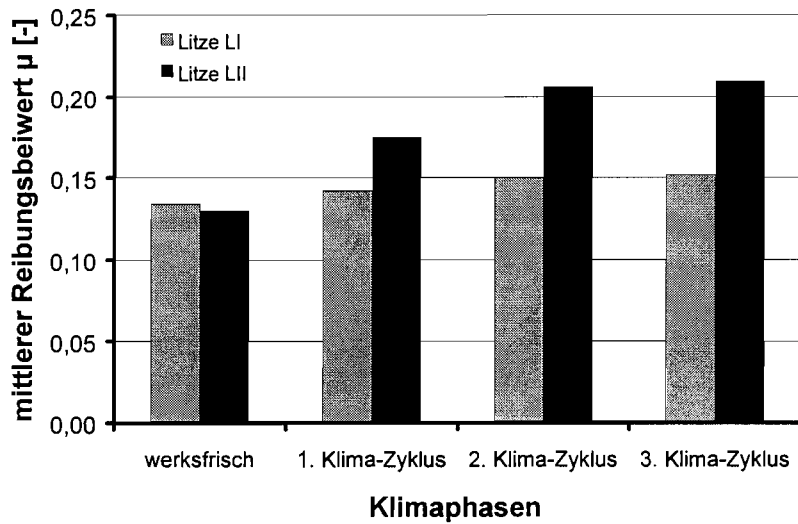
b) Oberfläche befreit von losen Korrosionsprodukten

Bild 4-18 Oberflächenzustand des Spannstahls LII nach dem 1. Klimazyklus vor und nach Entfernen der losen Korrosionsprodukte /24/

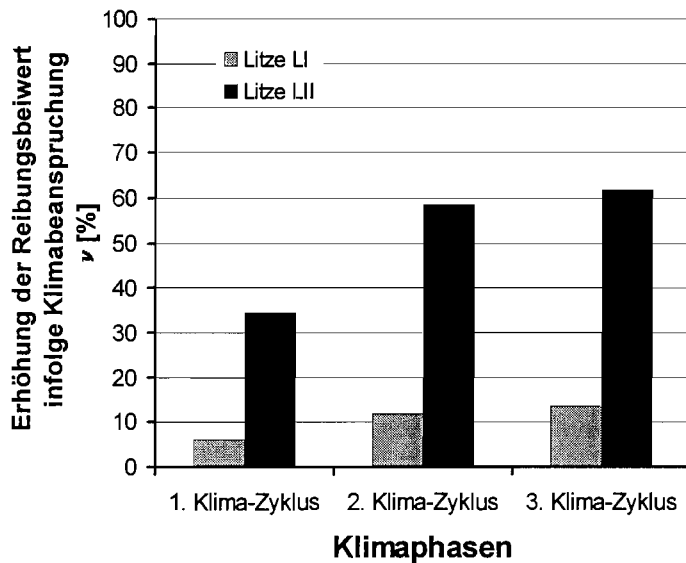
Die Ergebnisse der Überprüfung des Reibungsverhaltens der Spannstahlproben im Kleinmodellprüfstand sind in Bild 4-19 dargestellt. Das Bildteil a zeigt dabei die mittleren gemessenen Reibungsbeiwerte μ im werksfrischen Zustand und in den einzelnen Phasen der Klimabeanspruchung. Das Bildteil b enthält die zugehörigen Erhöhungen der Reibungsbeiwerte gegenüber dem Zustand vor der Klimabelastung.

Die beiden Spannstahlsorten zeigen ein deutlich unterschiedliches Reibungsverhalten nach der Beanspruchung in der Klimakammer. In beiden Fällen ist jedoch eine kontinuierliche Entwicklung der Reibungsbeiwerte μ mit zunehmender Beanspruchungsdauer zu erkennen. In der letzten Klimaphase mit einer geringeren Lufttemperatur von 20 °C (vgl. Abschnitt 3.3) tritt dabei nur eine geringfügige Zunahme der Reibungsbeiwerte auf.

Nach den in Abschnitt 3.6 definierten Klassen der Flugrostempfindlichkeit ist der Spannstahl LI der Klasse EK2 zuzuordnen ($10 \leq v \leq 19 \%$) und kann uneingeschränkt bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund verwendet werden. Für den Spannstahl LII ergibt sich hingegen die Empfindlichkeitsklasse EK7 ($60 \leq v \leq 69 \%$). Diese Spannstahlsorte sollte bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund nur dann verwendet werden, wenn die Einbaubedingungen auf der Baustelle einen übermäßigen Flugrostbefall ausschließen (z.B. nach dem Betonieren eingezogene Spannglieder, die kurzfristig vorgespannt werden) oder erhöhte Dehnbehinderungen problemlos durch Überspannen ausgeglichen werden können (z.B. bei kurzen Spanngliedlänge und geringen Umlenkungen).



a) mittlere Reibungsbeiwerte μ



b) Erhöhung der Reibungsbeiwerte gegenüber dem werksfrischen Zustand

Bild 4-19 Entwicklung der mittleren Reibungsbeiwerte μ über die Dauer der Klimabeanspruchung bei den Spannstählen LI und LII

4.5.3 Ermittlung der Menge der Korrosionsprodukte

Der Grad der korrosiven Veränderungen an der Spannstahloberfläche steht in einem funktionalen Zusammenhang mit der Menge der entstehenden Korrosionsprodukte. Zur Klärung der Frage, inwiefern dieser Zusammenhang zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstählen herangezogen werden kann, wurden die korrosionsbedingten Massenänderungen an ca. 50 mm langen Spannstahlproben untersucht. Verwendet wurden dabei einzelne Außendrähte der Litzen LI und LII, die gemeinsam mit den 60 cm langen Proben für Reibungsuntersuchungen der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 unterzogen wurden.

Die Ermittlung der Massenänderungen erfolgte nach dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen Verfahren. Da bei der Untersuchung die gesamte Oberflächenschicht der Spannstähle einschließlich der Schmiermittelreste aus dem Ziehvorgang abgetragen wird, wurde auch der Anteil der Rückstände der Ziehsmiermittel an einzelnen Proben im werksfrischen Zustand bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen in Bild 4-20 zeigen, daß beide Spannstahlsorten in etwa gleiche Schmiermittelrückstände aus dem Ziehvorgang aufweisen.

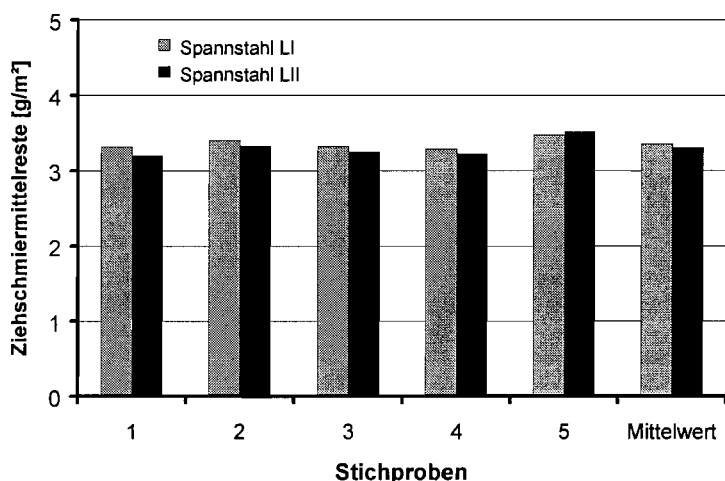


Bild 4-20 Ziehsmiermittelrückstände an Spannstahlproben LI und LII im werksfrischen Zustand

Die Menge der in den einzelnen Phasen der Klimabeanspruchung entstehenden Korrosionsprodukte (mit Abzug der Schmiermittelreste) ist in Bild 4-21 dargestellt.

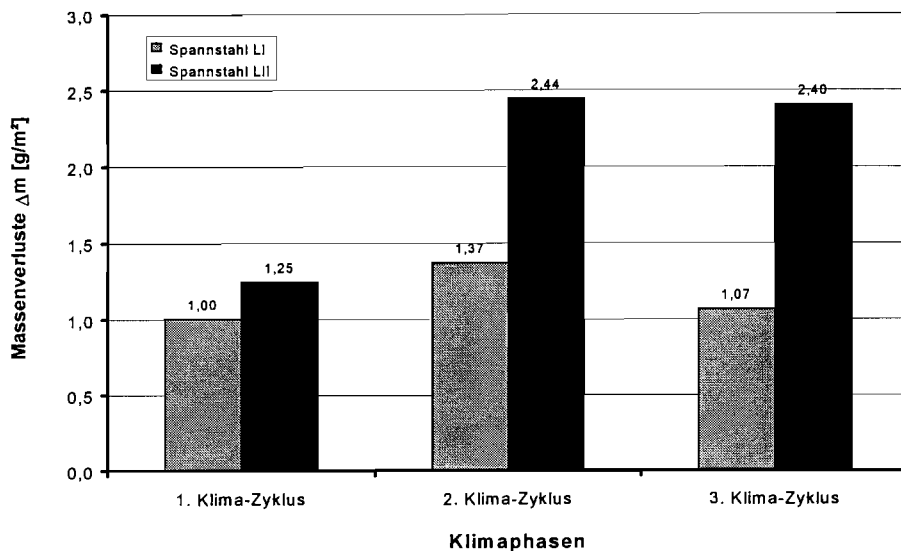


Bild 4-21 Menge der Korrosionsprodukte Δm in den einzelnen Phasen der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3

Die Meßergebnisse weisen bedingt durch die kurze Probenlänge größere Streuungen auf, lassen jedoch bei beiden Spannstahlsorten ein deutlich unterschiedliches Verhalten erkennen. Beim Spannstahl LI mit einer geringen Korrosionsneigung nimmt die Menge der entstehenden Korrosionsprodukte über die Dauer der Beanspruchung in der Klimakammer nur geringfügig zu. Auch längere Beanspruchungszeiten (vgl. Bild 4-22) ergaben hier keinen wesentlichen Anstieg der Massenänderungen. Beim Spannstahl LII werden gegenüber LI bereits in der ersten Klimaphase mehr Korrosionsprodukte gebildet. Der erhöhte Wert wird dann nach dem zweiten Klimazyklus nahezu verdoppelt. Insgesamt ist festzustellen, daß die Meßergebnisse den augenscheinlich erkennbaren Korrosionsbefall gut widerspiegeln.

In Bild 4-22 sind die nach den einzelnen Klimaphasen (Zyklen 1 bis 3 nach Abschnitt 3.3) gemessenen Mengen der Korrosionsprodukte den Reibungsbeiwerten μ gegenübergestellt, die jeweils an gleich beanspruchten 60 cm langen Proben im Kleinmodellprüfstand ermittelt wurden. In der Darstellung wurden zusätzlich die Massenänderungen und die zugehörigen Reibungsbeiwerte nach einer verlängerten Klimabeanspruchung mit einem zusätzlichen Klimazyklus (Zyklus 4) eingearbeitet. Er beinhaltete eine weitere Lagerung der Proben in der Kammer über die Klimaphasen 1 bis 3 hinaus über 24 h bei 20 °C und über weitere 20 h bei 50 °C. Die relative Luftfeuchtigkeit blieb in dieser Phase weiterhin konstant bei 100 %. Vor der Erhöhung der Kammer-temperatur von 20 auf 50 °C wurden die Spannstahlproben herausgenommen und erst nach Erreichen der Zieltemperatur in die Kammer zurückgelegt. Bedingt durch die anfängliche Temperaturdifferenz wurde hierdurch erneut Kondenswasserbildung an der Spannstahloberfläche erzwungen.

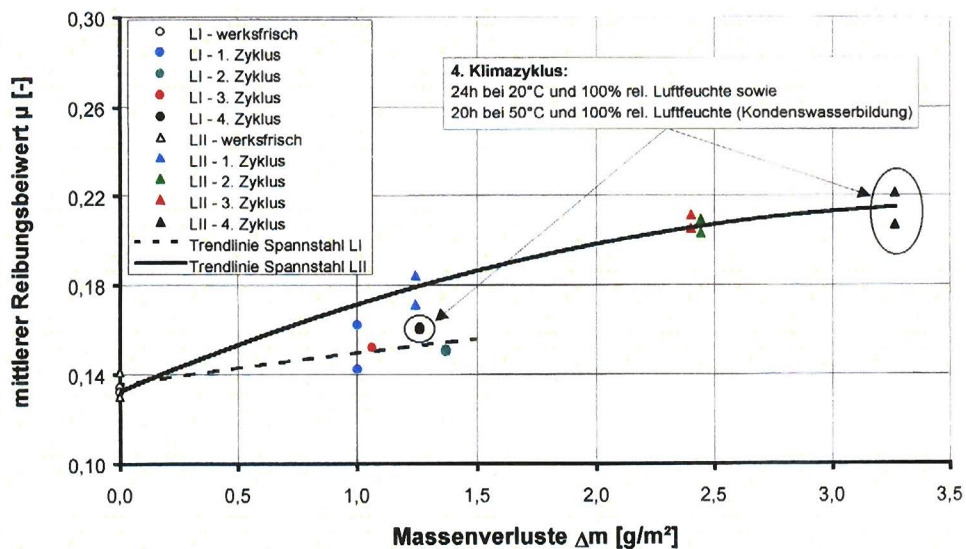


Bild 4-22 Reibungsbeiwert μ in Abhängigkeit der Massenverluste Δm bei den Spannstählen LI und LII in verschiedenen Phasen der Klimabeanspruchung

Bei beiden Spannstahlsorten ist ein Anstieg der Reibungsbeiwerte μ mit zunehmender Entstehung von Rostpartikeln erkennbar. Allerdings zeigen die Litzen LI und LII bei gleicher Menge der entstandenen Korrosionsprodukte unterschiedliches Reibungsverhalten. Der Korrosionsprozeß führt bei beiden Stählen offensichtlich zur unterschiedlichen Aufrauung der Oberfläche.

Die Versuchsergebnisse lassen erkennen, daß der Grad der korrosiven Veränderungen von Spannstahloberflächen durch die Menge der entstehenden Korrosionsprodukte gut beschrieben werden kann. Das Verfahren, das in etwa mit der Ermittlung der Flächen des örtlichen Korrosionsangriffs nach /13/ gleichzusetzen ist, eignet sich durchaus für die Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit. Allerdings ist dabei anzumerken, daß die Menge der entstehenden Korrosionsprodukte nur bedingte Rückschlüsse auf die zu erwartenden Reibungserhöhungen zuläßt.

4.5.4 Schlußbemerkung

Das entwickelte Prüfverfahren zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstahloberflächen hat sich in den durchgeführten Versuchen durchaus bewährt. Durch die vorgeschlagene Klimabeanspruchung werden die kritischen Klimaverhältnisse im Inneren von Hüllrohren nach dem Betonieren praxisnah nachgebildet. Dabei ist eine deutliche Unterscheidung zwischen Spannstählen mit unterschiedlicher Korrosionsneigung möglich.

Der entwickelte Kleinmodellprüfstand ermöglicht eine einfache und zuverlässige Beurteilung der korrosiven Veränderungen an der Spannstahloberfläche und deren Auswirkungen auf das Reibungsverhalten von Spanngliedern. Mit den vorgeschlagenen Grenzwerten für zulässige Erhöhungen der Reibungsbeiwerte μ ist es möglich die Anwendung ungeeigneter Spannstahlsorten bei erhöhter Korrosionsgefahr im Bauwerk auszuschließen.

Die alternative Überprüfung der Menge der Korrosionsprodukte, die an der Spannstahloberfläche infolge Klimabeanspruchung entstehen, erscheint für die Beurteilung des Grades des Flugrostbefalls durchaus geeignet. Für die Festlegung zulässiger Grenzen der korrosionsbedingten Massenänderungen sind jedoch weitere Untersuchungen an unterschiedlichen Spannstählen erforderlich.

4.6 Untersuchungen zum Einfluß der Schmiermittelrückstände auf das Korrosionsverhalten

Kaltgezogene Spannstähle, die bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund zur Zeit fast ausschließlich Anwendung finden, weisen an der Oberfläche eine mehr oder weniger dichte Schmiermittelschicht aus dem Ziehvorgang auf /5, 24/. Wie die Untersuchungen in /8/ und /15/ gezeigt haben, beeinflußt diese Schicht im werksfrischen Zustand maßgeblich das Reibungsverhalten zwischen Spannglied und Hüllrohr. Die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen sollen Aufschlüsse darüber geben, inwiefern das Korrosionsverhalten von Spannstählen durch die Schmiermittelschicht und inwiefern durch die Schmelzrezeptur der Spannstähle selbst beeinflußt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierzu die Massenänderungen infolge Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3 an Proben der beiden Spannstähle LI und LII untersucht, bei denen im werksfrischen Zustand die Schmiermittelschicht nach dem Verfahren in Abschnitt 3.5 abgetragen wurde.

Die Zusammensetzung der Spannstähle LI und LII ist in der Tabelle 4-2 wiedergegeben. Nach Herstellerangaben wurden beim Ziehvorgang bei beiden Spannstahlsorten pulverförmige Ziehseifen ohne zusätzliche Korrosionsschutzmittel verwendet. Das Haftvermögen an der Ziehgutoberfläche wurde dabei durch phosphathaltige Schmiermittelträger gewährleistet.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	V	Mo	Sn	Al	As	Ti	B	N
LI	0,83	0,20	0,77	0,009	0,008	0,03	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LII	0,80	0,24	0,74	0,006	0,003	0,08	0,020	0,03	0,061	0,01	0,013	0,040	0,004	0,002	0,0003	0,004

Tab. 4-2 Schmelzanalyse der Spannstähle LI und LII (Herstellerangaben)

Das Bild 4-23 zeigt die korrosionsbedingten Massenänderungen in den einzelnen Phasen der Klimabeanspruchung.

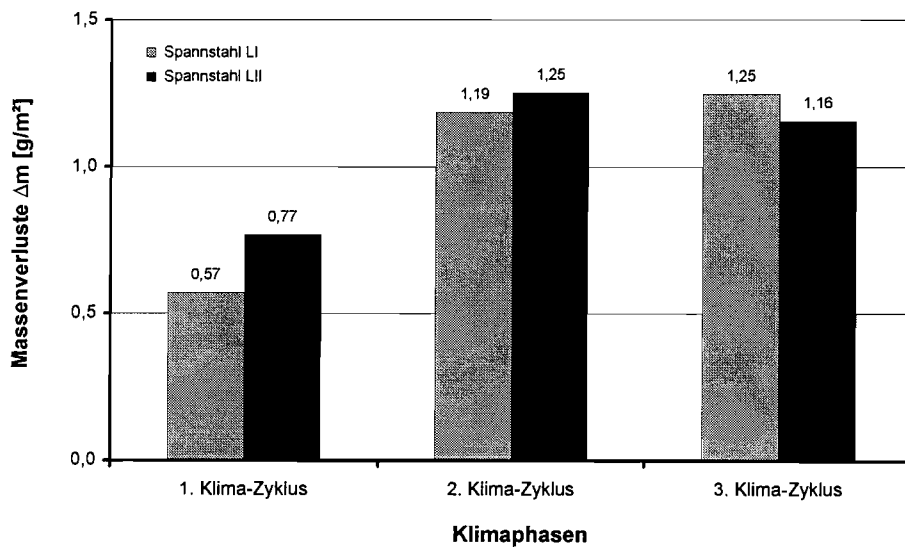
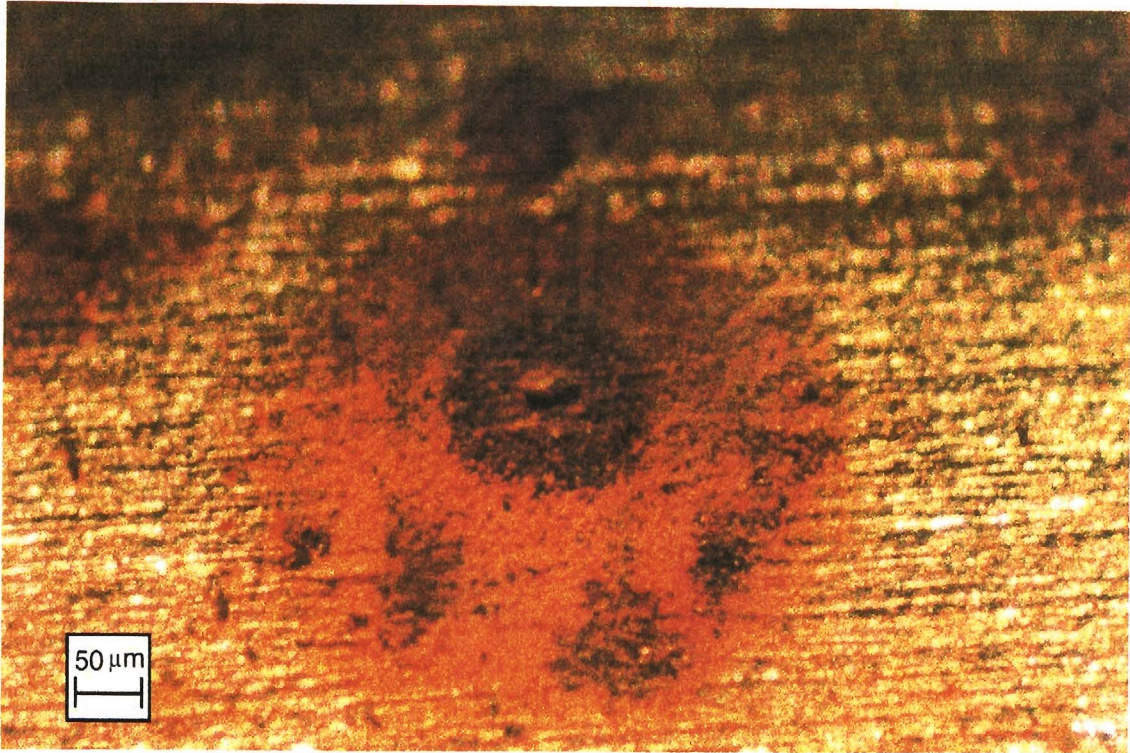


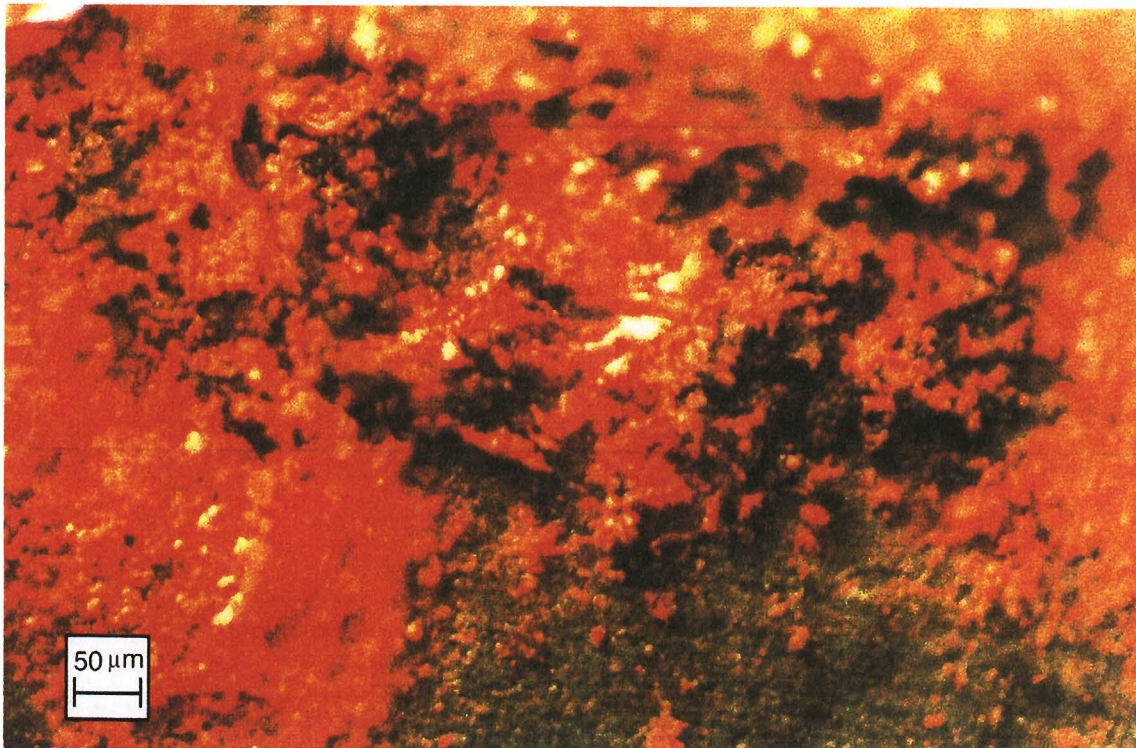
Bild 4-23 Massenverluste der gebeizten Spannstähle über die Dauer der Klimabeanspruchung nach Abschnitt 3.3

Zwischen dem ersten und zweiten Klimazyklus, in denen an der Spannstahloberfläche gezielt Kondenswasserbildung erzwungen wird, ist ein deutlicher Anstieg der Menge der entstehenden Korrosionsprodukte zu erkennen. Auffallend ist allerdings, daß beide Spannstahlsorten in etwa ein ähnliches Korrosionsverhalten aufweisen. Dies deutet darauf hin, daß die in Abschnitt 4.5 festgestellte unterschiedliche Flugrostempfindlichkeit nicht auf die Zusammensetzung der Spannstähle sondern vielmehr auf die Oberflächenschicht aus verbrannten Ziehsmiermitteln zurückzuführen ist.

Die makroskopische Betrachtung der Korrosionsprodukte einer gebeizten Spannstahlprobe und einer Probe mit Schmiermittelrückständen in Bild 4-24 läßt deutliche Unterschiede im Korrosionsbild erkennen. Während bei der gebeizten Probe die Korrosionsprodukte radial um eine Korrosionsnarbe angeordnet sind (Bildteil a), ist bei der unbehandelten Litze an der Stelle des Korrosionsangriffs eine geschlossene Korrosionsdecke festzustellen (Bildteil b). Die Ausdehnung der korrosiven Veränderungen ist an der Spannstahloberfläche ohne Schmiermittelrückstände deutlich geringer. Die hier nicht wiedergegebenen Untersuchungen an Proben, deren Korrosionsprodukte nach der Klimabeanspruchung durch Beizen entfernt wurden, verdichteten die Hinweise auf die Beeinflussung der Korrosionsneigung durch die Ziehsmiermittelschicht. Die Spannstähle zeigten hier gegenüber den Proben, bei denen die Schmiermittelrückstände bereits vor der Klimabeanspruchung entfernt wurden, eine deutlich dichtere Vernarbung der Oberfläche.



a) gebeizte Probe (ohne Schmiermittelrückstände)



b) Probe mit einer Ziehschmiermittelschicht

Bild 4-24 Korrosionsprodukte nach Klimabeanspruchung bei einer gebeizten Probe und einer Probe mit Schmiermittelrückständen aus dem Ziehvorgang /24/

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit war es leider nicht möglich, das Reibungsverhalten von Spannstählen nach Entfernen der Ziehschmiermittelrückstände zu untersuchen. Zur Klärung der offenen Fragen der unterschiedlichen Korrosionsneigung sowie der Auswirkungen von korrosiven Veränderungen der Spannstahloberflächen auf den Reibungsbeiwert zwischen Spannglied und Hüllrohr erscheinen jedoch entsprechende Grundsatzversuche durchaus sinnvoll.

Insgesamt ist festzuhalten, daß die nach dem Ziehvorgang an der Spannstahloberfläche verbleibenden Rückstände verbrannter Schmiermittel das Korrosionsverhalten offensichtlich maßgeblich beeinflussen. Durch eine geeignete Wahl der Schmiermittel bei der Spannstahlherstellung erscheint eine Steuerung der Flugrostempfindlichkeit sowie gezielte Anpassung der Oberflächeneigenschaften der Spannstähle an die Anforderungen der Spannbetonpraxis möglich. Für weitergehende Aufschlüsse über den Einfluß der Ziehschmiermittel auf das Korrosionsverhalten von Spannstahloberflächen erscheinen künftig genauere Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Industrie zweckmäßig.

5 Zusammenfassung

Die Spannkrafteintragung bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund stellt besondere Anforderungen an die Unempfindlichkeit der verwendeten Spannstähle gegenüber Oberflächenkorrosion. Um unplanmäßigen Reibkrafteerhöhungen infolge Flugrostbefall vorzubeugen und eine einwandfreie Eintragung der planmäßigen Vorspannung insbesondere bei verringerten Überspannreserven nach Eurocode 2 zu gewährleisten, sollten bei erhöhter Korrosionsgefahr ausschließlich Spannstähle mit einer geringen Flugrostempfindlichkeit verwendet werden. Das in diesem Bericht vorgestellte Prüfverfahren ermöglicht eine praxisnahe Beurteilung der Korrosionsneigung von Spannstahloberflächen. Ungeeignete Spannstahlsorten können so frühzeitig erkannt und von der Anwendung bei Spanngliedern ausgeschlossen werden, die zwischen dem Einbau und dem Vorspannen einem verstärkten Korrosionsangriff ausgesetzt sind. Die entwickelte Prüfvorrichtung ist unabhängig von stationären Prüfmaschinen und kann sowohl in Materiallaboratorien als auch auf Baustellen verwendet werden.

Der Bericht beginnt mit einer kurzen Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund (Abschnitt 2). Als Hauptursache der korrosiven Veränderungen an Spannstahloberflächen vor dem Injizieren ist die elektrochemische Korrosion bei feuchten Umgebungsbedingungen anzusehen. Die kritische Phase für die Flugrostbildung entsteht dabei in den ersten Tagen nach dem Betonieren, wo die frei werdende Hydratationswärme sowie hohe relative Luftfeuchtigkeit im Hüllrohrinneren besonders günstige Voraussetzungen für den Korrosionsangriff schaffen.

In Abschnitt 3 werden Hinweise zur Durchführung der Prüfung der Flugrostempfindlichkeit nach dem entwickelten Verfahren gegeben. Dabei werden die notwendigen Prüfgeräte sowie die jeweiligen Prüfbedingungen ausführlich beschrieben. Das Prüfverfahren besteht aus einer zweistufigen Untersuchung: Einer Klimabeanspruchung über 72 Stunden und einer anschließenden Überprüfung des Reibungsverhaltens in einem speziellen Kleinmodellprüfstand. Bei dem vorgeschlagenen Prüfklima wird eine definierte Kondenswasserbildung an der Spannstahloberfläche gewährleistet. Die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Sauerstoffgehalt in der Klimakammer entsprechen näherungsweise den kritischen Bedingungen im Inneren von Hüllrohren. Der entwickelte Kleinmodellprüfstand ermöglicht eine einfache Beurteilung der korrosiven Veränderungen von Spannstahloberflächen hinsichtlich der wahrscheinlichen Reibkrafteerhöhungen beim Vorspannen. Auf der Grundlage der Reibungsüberprüfung im Zustand vor und nach der Klimabeanspruchung werden für Spannstähle Flugrostempfindlichkeitsklassen definiert sowie Anwendungsgrenzen bei unterschiedlicher Korrosionsneigung angegeben. Alternativ zur direkten Überprüfung des Reibungsverhaltens im Kleinmodellprüfstand wird eine weitere Möglichkeit der Bewertung von korrosiven Veränderungen von Spannstahloberflächen über eine genaue Ermittlung der Menge der entstehenden Korrosionsprodukte aufgezeigt. Allerdings las-

sen sich hier zur Zeit aufgrund der wenigen vorliegenden Erfahrungen keine endgültigen Grenzwerte für zulässige Massenänderungen festlegen.

In Abschnitt 4 wird über experimentelle Untersuchungen berichtet, die die Entwicklung des beschriebenen Prüfverfahrens begleiteten. Die Funktionsüberprüfungen des Kleinmodellprüfstandes mit Variation der einzelnen Versuchsparameter geben wichtige Hinweise zur Handhabung sowie zu den Anwendungsgrenzen der Prüfvorrichtung. Die anschließenden Versuche mit unterschiedlichen Prüfklimaten geben Aufschlüsse über das Korrosionsverhalten von Spannstählen. Dabei wird der elektrochemische Korrosionsangriff als Hauptursache für die Flugrostbildung an Spannstahloberflächen bestätigt. Ergänzende Untersuchungen in Abschnitt 4.6 deuten darauf hin, daß die Korrosionsneigung merklich durch die Schmiermittelrückstände aus dem Ziehvorgang beeinflußt wird.

Das vorgeschlagene Prüfverfahren zur Beurteilung der Flugrostempfindlichkeit von Spannstahloberflächen hat sich bei den an zwei Spannstahlsorten mit unterschiedlicher Korrosionsneigung vorgenommenen Überprüfungen durchaus bewährt. Sowohl bei der direkten Kontrolle des Reibungsverhaltens von klimabeanspruchten Proben im Kleinmodellprüfstand als auch bei der alternativen Ermittlung der Menge der entstehenden Korrosionsprodukte traten deutliche Unterschiede zwischen den Spannstählen zum Vorschein. Für die Anwendung des Verfahrens in der Praxis sowie genauere Festlegung von zulässigen Grenzen der Korrosionsneigung für Spannglieder mit nachträglichem Verbund sind jedoch ausführlichere Untersuchungen an Produkten unterschiedlicher Spannstahlhersteller notwendig. Ferner erscheinen Überprüfungen des Korrosionsverhaltens von Spannstählen unter reellen Baustellenbedingungen zweckmäßig.

6 Literatur

- /1/ Bach, H.W., Feil, H.A.: Umweltbedingungen Umweltprüfungen; Klimatische Umwelteinflüsse und Simulationsverfahren für die Erprobung technischer Produkte, Verlag Siemens Aktiengesellschaft, Berlin – München 1979
- /2/ Barton, K.: Schutz gegen atmosphärische Korrosion, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr, 1973
- /3/ Baumann, K.: Korrosionsschutz für Metalle; Anleitung und Auswahl, Aufl. 2, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig - Stuttgart 1993
- /4/ Bökamp, H., Cordes, H., Trost, H.: Weiterentwicklung eines Prüfverfahrens für Reibungsuntersuchungen mit Spannstahlilitzen, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, Institutsbericht 29/88
- /5/ Boor, U.: Gesichtspunkte für den Einsatz von Ziehschmiermitteln, DRAHT-WELT, Düsseldorf, 59 (1973) Nr. 9, S.385-391
- /6/ Bowden, F.P., Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper, Springer Verlag, Berlin – Göttingen – Heidelberg 1959
- /7/ Cordes, H., Haveresch, K.-H.: Recent Research on Friction Behaviour and Force-Elongation-Relationship of Post-Tensioned Tendons, XII International Congress of FIP 1994 at Washington
- /8/ Cordes, H., Hegger, J., Nowak, D.: Einfluß unterschiedlicher Hüllrohre auf die Spanngliedreibung, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, Institutsbericht 38/96
- /9/ Cordes, H., Schütt, K., Trost, H.: Großmodellversuche zur Spanngliedreibung, DAfStb Heft 325, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin - München 1981
- /10/ DIN 4227, Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Ausgabe 1988
- /11/ DIN 50017, Kondenswasser - Prüfkimate, Ausgabe 1982
- /12/ DIN 50323 T.1 bis 3, Tribologie, Ausgabe 1988/1995/1993
- /13/ DIN 50905, T.1 bis 3: Korrosion der Metalle; Korrosionsuntersuchungen, 1987
- /14/ Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Ausgabe Juni 1992
Teil 2: Betonbrücken, Ausgabe Mai 1995
- /15/ Haveresch, K.-H.: Zuverlässigkeit der planmäßigen Spannkrafteintragung unter besonderer Berücksichtigung baupraktischer Klimabeanspruchungen, Dissertation, RWTH Aachen 1994
- /16/ Hömig, H.E.: Metall + Wasser; Eine Einführung in die Korrosionskunde, Aufl. 5, Vulkan-Verlag, Essen 1991

- /17/ Isecke, B., Stichel, W.: Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren, Forschungsbericht 1987, Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin
- /18/ Kutzelnigg, A., Ergang, R.: Atmosphärische Korrosion der Metalle, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr., 1965
- /19/ Meckelburg, E.: Korrosionsverhalten von Werkstoffen, Verlag Chemie GmbH, Düsseldorf 1990
- /20/ Müller, K.: Lehrbuch der Metallkorrosion, Aufl. 2, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau 1975
- /21/ Nürnberger, U.: Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn - Bad Godesberg 1980
- /22/ Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz der Bewehrung im Massivbau; Neuere Forschungsergebnisse - Folgerung für die Praxis - Hinweise für das Regelwerk, DAfStb Heft 405, Berlin -Köln 1990
- /23/ pr EN 10138, T.1 bis 5, Spannstähle, Ausgabe 1994
- /24/ Rabahieh, R.: Prüfverfahren zur Beurteilung der Flugrostanfälligkeit von Spannstahloberflächen unter baupraktischen Bedingungen, Diplomarbeit am Institut für Massivbau der RWTH Aachen, 1997, unveröffentlicht
- /25/ Schießl, P.: Umdruck Vertiefer, 7. Semester, Institut für Bauforschung, RWTH Aachen, 1995
- /26/ Schmid, E.V.: Wetter- und Korrosionsschutz, Vincentz Verlag, Hannover 1983
- /27/ Walter, R., Utescher, G., Schreck, D.: Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dehnungsbehinderung, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 282, Berlin 1977
- /28/ Weingraber, H.V., Abou-Aly, M.: Handbuch Technische Oberflächen; Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten, Vieweg Verlag, Braunschweig - Wiesbaden 1989
- /29/ Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Teil 3, Stahl – Aluminium, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1985