Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
Band: 57/1/57/2 (1989)

Artikel: Dauerhaftigkeit hochfester Stangen und Drähte mit Zugbeanspruchung
Autor: Morf, Ulrich
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-44212

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.09.2025

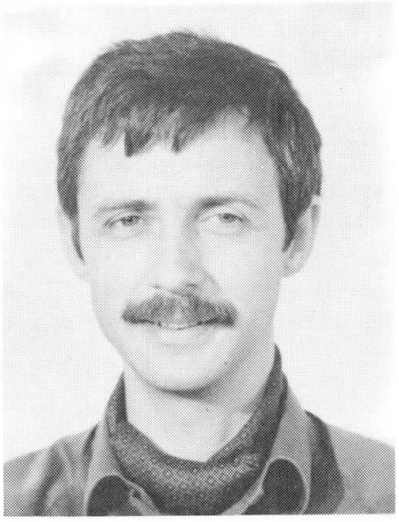
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Dauerhaftigkeit hochfester Stangen und Drähte mit Zugbeanspruchung

Durability of High Strength Bars and Wires in Tension

Durabilité des barres et fils à haute résistance en tension

Ulrich MORF
Dr. sc. techn.
EMPA
Dübendorf, Schweiz



Ulrich Morf, geboren 1942, promovierte als Bauingenieur an der Eidg. Technischen Hochschule in Zürich. Er befasste sich zuerst drei Jahre als Konstrukteur mit Stahlbau und Druckleitungsbau. Seit 1971 ist er Abteilungsleiter an der EMPA (Abt. Metalltechnologie und Konstruktionen) und bearbeitet Prüfaufträge, Forschungsprojekte und Gutachten im Gebiet Metalltechnologie, Bruchmechanik, Tragverhalten und Schweisstechnik.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Dauerhaftigkeit von Stählen in Bauwerken kann mit modernen Erkenntnissen über das Bruchverhalten und die Risszähigkeit von Materialien auch baupraktisch besser definiert werden. Dazu werden hier eine Prüfsystematik und ein erweitertes Sicherheitskonzept für Spannstähle und Schrauben als Zugglieder vorgestellt.

SUMMARY

The durability of steels in structures can be defined for practical application by utilizing current knowledge of fracture behavior and fracture toughness. In this paper testing methodology and an extended safety plan are presented for prestressing steels and bolts as tensile elements.

RÉSUMÉ

Les connaissances actuelles pratiques sur le comportement à la ruine et la mécanique de rupture permettent de mieux définir la durabilité des aciers dans les constructions. Dans ce but des méthodes d'essai et un plan de sécurité complémentaire sont présentés pour des aciers de précontrainte et des boulons agissant comme éléments tendus.

1. DERZEITIGER STAND UND ENTWICKLUNG VON STÄHLEN

1.1 Dauerhaftigkeit von Spannstählen, Stangen und Drähten

Durch langjährige Entwicklung von gezogenen Drähten, gewalzten Stangen und Schraubenwerkstoffen zu Zug-Bauteilen konnte bei diesen ein hoher Grad an Zuverlässigkeit erreicht werden. Rückschläge sind oft dann entstanden, wenn Materialeigenschaften und Bauelemente nicht als Ganzes entwickelt wurden. Schädigende Einwirkungen können bereits vom unsachgemässen Transport, von der Lagerung und von der Montage stammen. Bei den Langzeiteigenschaften haben natürlich der Korrosionsschutz, versprödende Betriebseinwirkungen oder dynamische Beanspruchung eine grosse Bedeutung.

In verschiedenen Schaden- und Laboruntersuchungen wurde bereits gezeigt, dass Vorschädigungen und Kerben eine grosse Rolle spielen (Nürnberger [1], der Verfasser [2], S. 10 und 18, 161 bis 164), dass aber auch bei vergüteten Stählen und Stählen mit Überfestigkeiten ein erhöhtes Bruchrisiko auftritt besonders an Spanngliedern mit Lücken im Korrosionsschutz (SRK.-Bericht [3] und Hampeijs [4] sowie Morf u. Mitarbeiter [5].

Viele aktuelle Problemstellungen der Dauerhaftigkeit können heute zahlenmässig am besten mit der hier zusammengefassten bruchmechanischen Methodik untersucht werden (vgl. [2], S. 53).

1.2 Erweiterte Prüfsystematik und Sicherheitskonzept

Für die Anwendung der Bruchmechanik mit entsprechender Relativierung für das Bauwesen werden in dieser Arbeit eine angepasste Prüfsystematik und ein entsprechendes Sicherheitskonzept vorgestellt. Sie sind speziell für Spannstahl und Schrauben ausgelegt.

Prüfsystematik für hochfeste Stähle mit Risszähigkeitsprüfung

Die Art der hochfesten Stähle und die Langzeitanwendungen im Bauwesen führen dazu, dass eine Bruchzähigkeitsprüfung die Oberflächenzone (ca. 5% des Durchmessers) erfassen muss, die oft andere Eigenschaften aufweist als der Kern. Weiter müssen versprödende Einflüsse wie Dehngeschwindigkeit und Temperatur superponiert geprüft werden; für die Voraussage des Langzeitverhaltens, z.B. Korrosion, hat dies in Überlagerung mit geeigneten Medien zu geschehen. Aus Sicherheitsgründen ist oft der Nachweis unter extremen Bedingungen (Langzeit oder Stoss) die massgebende Kontrolle (vgl. Figur 1).

Sicherheitskonzept mit zusätzlicher Bewertung des Bruchverhaltens

Der Tragfähigkeitsnachweis im Bauwesen stützt sich im Fall der Anwendung plastischer Berechnungsmethoden auf die zusätzliche Hypothese, dass plastische Verformbarkeit vorhanden ist. Bei Gebrauchslasten darf bis zum Betriebsende kein Sprödbruch auftreten. Deshalb muss vor allem beim Einsatz hochfester Spannstähle ein materialtechnologischer Nachweis für genügende Duktilität (bei gekerbten Bauteilen: Risszähigkeit) erbracht werden. Im Flussdiagramm in Figur 2 ist ein dreigliedriger Nachweis dargestellt: Auf dem mittleren Block im Flussdiagramm dürfte im Normalfall ein "Bruchnachweis unter vereinfachten Bedingungen" genügen; bei Langzeitextrapolationen auf das Betriebsende von kritischen Bauteilen muss aber auch der dritte Block mit einem "Bruchnachweis mit bekannten Fehlergrössen unter extremen Bedingungen" überprüft werden. Vor allem diese letzte Prüfung für Langzeitextrapolationen wird für die Dauerstandeigenschaften wie Relaxation seit langem angewandt. Sie müsste nur noch mit definiert angerissenen oder/und "bewitterten" K_{ISCC}-Proben durchgeführt werden, um nachzuweisen, dass während der Betriebsdauer keine Brüche oder instabilen Risse auftreten.

2. STAHLEIGENSCHAFTEN UND ANGEPASSTE ZÄHIGKEITSPRÜFVERFAHREN

2.1 Aktuelle Spannstahlprüfung

Die bekannten Festigkeitsprüfverfahren und technologischen Oberflächenprüfverfahren weisen eine Neigung zu Anrissen und zu sprödem Verhalten nur ungenügend nach. Die in Euronorm 138 [7] für Spannstähle gesetzten Grenzen für minimale Biegeradien, Bruchdehnung bzw. Standzeiten für SCC-Versuche in FIP-Richtlinien [6] sind nur brauchbar für Normalfälle.

Die für Schraubenprüfung üblichen Kerbschlagversuche mit innenliegenden Proben nach Norm ASTM A540 sind zur Kennzeichnung des Anrissverhaltens von Spannstangen nicht anzuwenden (vgl. Kap. 3 Prüfprogramm).

Die zusätzlich interessierenden Stahleigenschaften bei extrem beanspruchten Stählen sind aufgrund der erwähnten Arbeit [2] die folgenden:

- Die **Anrisseigenschaften** von Stangen und Drähten sind anisotrop, variabel über die Anrisstiefe und teils auch temperaturabhängig ([2], S. 110).
- Für die Dauerhaftigkeit ist auch die **Rissgeschwindigkeit** zu beachten ([2], S. 29).
- Die Versuche mit den in Kap. 2.2 eingeführten **Scharfkerben** zeigen auch typische Unterschiede zwischen gezogenen Drähten und Stangen. Die dabei abgeschätzten dynamischen **Bruchzähigkeitswerte** K_{ID} liegen im günstigen Fall für Drähte bei 2'000 bis 3'000 $Nmm^{-3/2}$, bei Stangen an der Oberfläche bei 1'500 und und am Fuss von tiefen Konstruktionskerben bei 2'000 $Nmm^{-3/2}$.
- Die typischen **Dehngeschwindigkeiten** entsprechen Stosswirkungen von $d\varepsilon/dt = 5 \cdot 10^{-3}$ bis 1/s, **ähnlich wie sie bei Bauwerken auch auftreten** (= "low blow"-Schlagbiegeversuch).

2.2 Scharfkerbenprüfungen mit guter Korrelation zur Bruchzähigkeit

Zur Bestimmung der kritischen Bruchzähigkeit (Figur 1) eines anrissgefährdeten Bauteils ist die spezifische Anrissenergie, bestimmt mit der J-Integraltechnik nach Norm ASTM E813, oder die Bruchzähigkeit nach ASTM E399 zu ermitteln. Für hochfeste Stangen des Bauwesens wurden hier als Ersatz für die ASTM-Normen verschiedenartige seitengekerbte Rundproben zur Abschätzung der Bruchzähigkeit entwickelt, welche sich für Stossprüfung und Langzeitversuche eignen (Figur 3).

Dank einer progressiv zunehmenden Rissfrontbreite ist mit den neuen Kerbformen eine Risszähigkeitsbestimmung in der Oberflächenzone möglich (Figur 3). Die zugehörigen Spannungsintensitätskorrekturfaktoren Y' für Dreipunktbiegeproben sind als Kurven dargestellt für die speziell geeigneten Sichelkerbprobenformen (SSK, Sichel) und andere Formen. Die Versuchsresultate mit den heiklen Drahtproben zeigen, dass die Versuchstechnik für Stangen und Drähte im "low blow"-Versuch trotz der auftretenden Schwingungen funktioniert. Diese Methode ist für instrumentiere Kerbschlagprüfhämmer bereits Stand der Technik (vgl. [2], S. 174). In diesem Versuch wird die Biegekraft F in Funktion der Zeit aufgenommen, an einer 3-Pkt-Biegeprobe mit wirksamem Hebelarm ℓ.

3. PRAKTISCHE ANWENDUNGEN IN FORM VON PRÜFSPEZIFIKATIONEN

Die vorgeschlagene Prüfsystematik führt bei konsequenter Anwendung des dreigliedrigen Sicherheitsnachweises (Figur 2) zu Prüfspezifikationen mit Einbezug der Risszähigkeit. Für eine Sonderanwendung, bei der der Zeiteinfluss eine Rolle spielt, mit ungünstiger Superposition der Einwirkungen, ist hier eine typische Prüfspezifikation zusammengestellt.

Stabmaterial für Stossbelastung bei Tieftemperatureinsatz

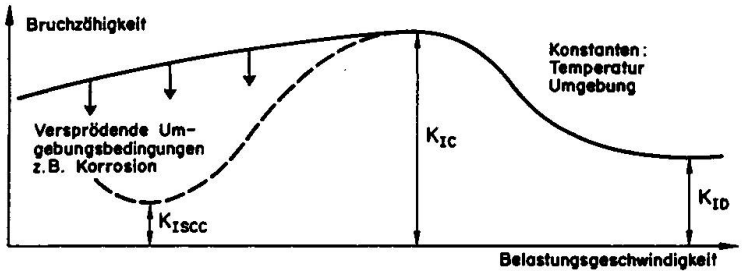
Rohmaterial: Zugstange (Dmr.26) mit gewalztem/gerolltem Gewinde.
Einbauzustand: Ab Werk geschützt, eingebaut und auf Baustelle gegen Korrosion geschützt, im Betrieb kontrollierbar und austauschbar.
Prüfbedingung: Kurzzeitprüfung mit betriebsähnlicher Belastungsgeschwindigkeit und superponierter minimaler Temperatur.
Prüfprogramm: Zugversuch (Dehnung, Einschnürung), Biegeversuch im Baustellenzustand, SSK-Schlagbiegeversuch (ev. Kerbschlagversuch mit Kerbe an der Oberfläche), instrumentiert für "low blow"-Technik zur Ermittlung des K_{ID}-Wertes.
Qualitätssicherung: Aus dem garantierten K_{ID}-Wert des Herstellers kann mit der Beziehung in Figur 3 der zulässige Oberflächenfehler für die Kontrollen festgelegt werden. Die Probeentnahme aus einer Gewindestange ist in Figur 4 dargestellt.

Das Beispiel zeigt eine typische Anwendung des Bauwesens, bei der die statische Betrachtungsweise ohne Untersuchung des Risszähigkeitsverhaltens nicht statthaft ist. Dauerhaftigkeitsnachweise sind mit Vorteil an "repräsentativ geschädigten" Bauteilen durchzuführen.

4. BEZEICHNUNGEN

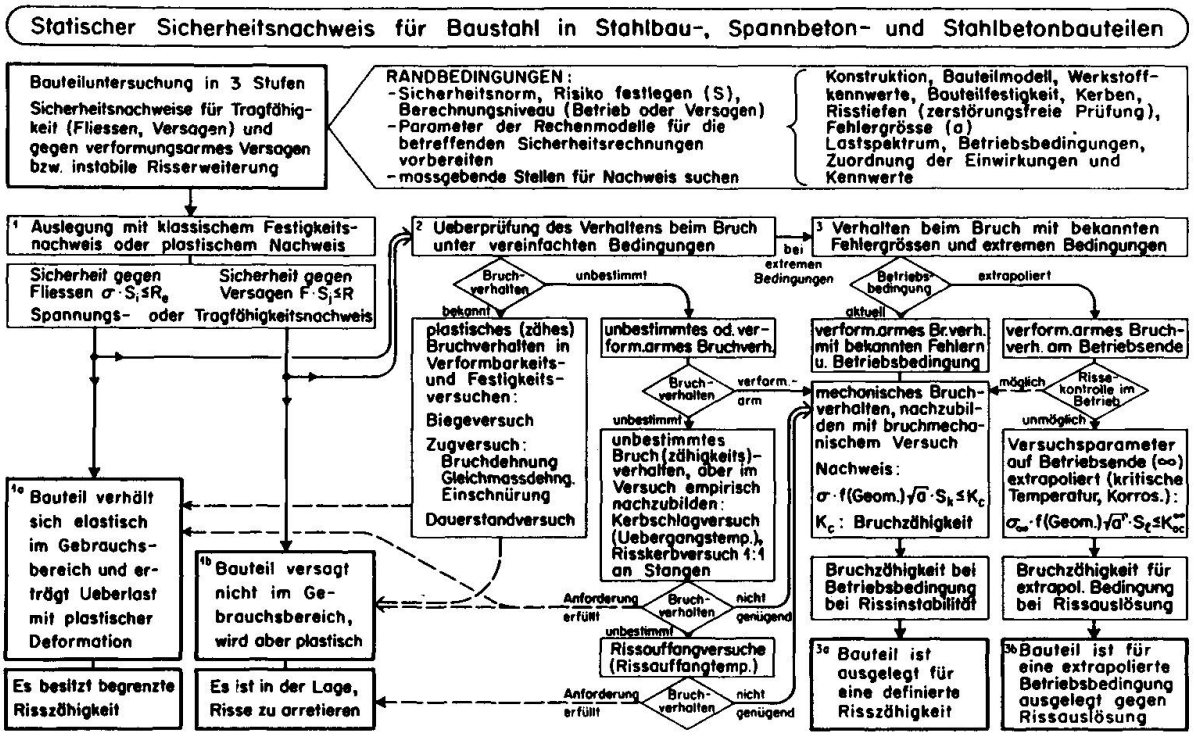
a	Risstiefe, Kerbtiefe	R_e, R	Streckgrenze, Festigkeit
D	Durchmesser der Probe	Y'	Spannungsintensitätskorr.faktor $= (K_I/\sigma\sqrt{a})(32\sqrt{a/D}/\pi)$
F	Kraft auf Biegeprobe	$d\varepsilon/dt$	Dehngeschwindigkeit
ℓ	Hebelarm der Biegeprobe	σ	mechanische Spannung
K_{IC}, K_{ID}	stat., dyn. Bruchzähigkeit		
K_{ISCC}	K_{IC} (Spannungsrisskorrosion)		

5. ILLUSTRATIONEN

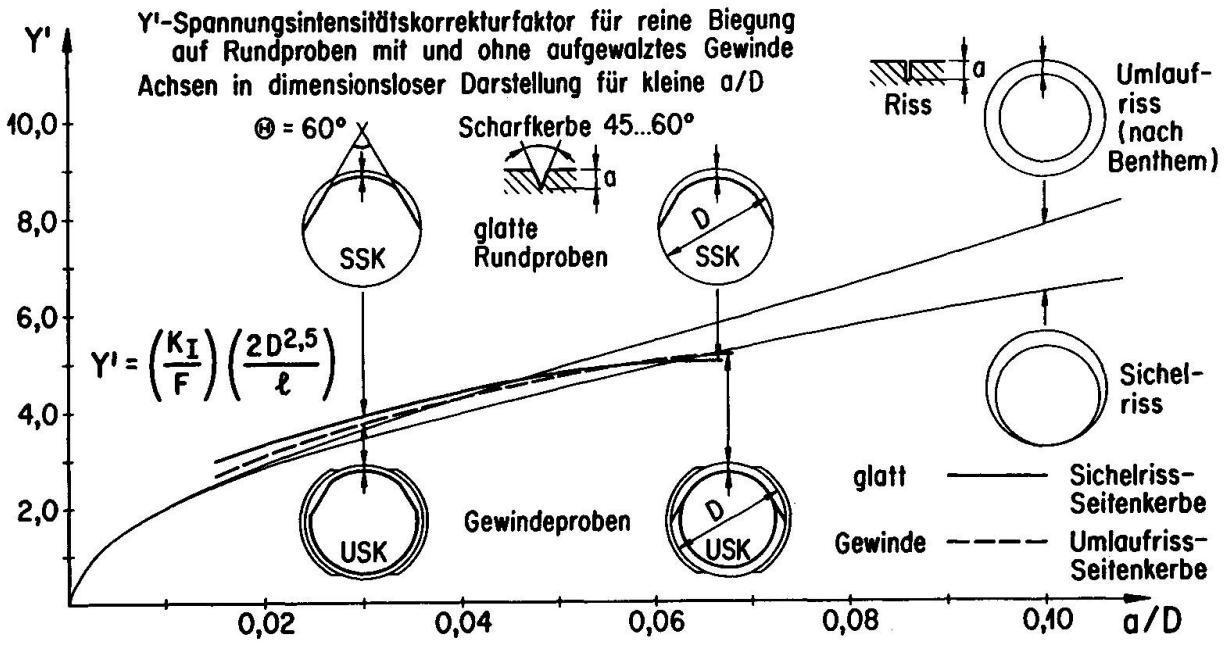


Langzeitgebiet	Quasistatisch	Dynamisch (Stoss)
$d\varepsilon/dt < 10^{-7}/s$	$d\varepsilon/dt \sim 10^{-5}/s$	$d\varepsilon/dt > 10^{-3}/s$
Bauteil oder Probe:		
vorgeschädigte, korrodierte, gekerbte Zugprobe oder Biegeprobe	angerissene oder gekerbte Zug- (Bauteil-) oder Biegeprobe	gekerbte, evtl. angerissene Schlagbiegeprobe, evtl. Zugprobe
Einrichtung:		
Dauerstandversuch - Kriechversuch oder Zugversuch, $\dot{\varepsilon}$ = konstant - Relaxationsversuch	Zugprüfmaschine - elektromechanisch oder - servohydraulisch geregelt	Schlagwerk instrumentiert - Pendel - Fallwerk
Umgebungseinfluss (Konditionierung):		
- Medium, Temperatur	- Temperatur	- Temperatur

Figur 1: Bruchzähigkeit als Funktion der Belastungsgeschwindigkeit



Figur 2: Statischer Sicherheitsnachweis mit Überprüfung des Verhaltens beim Bruch



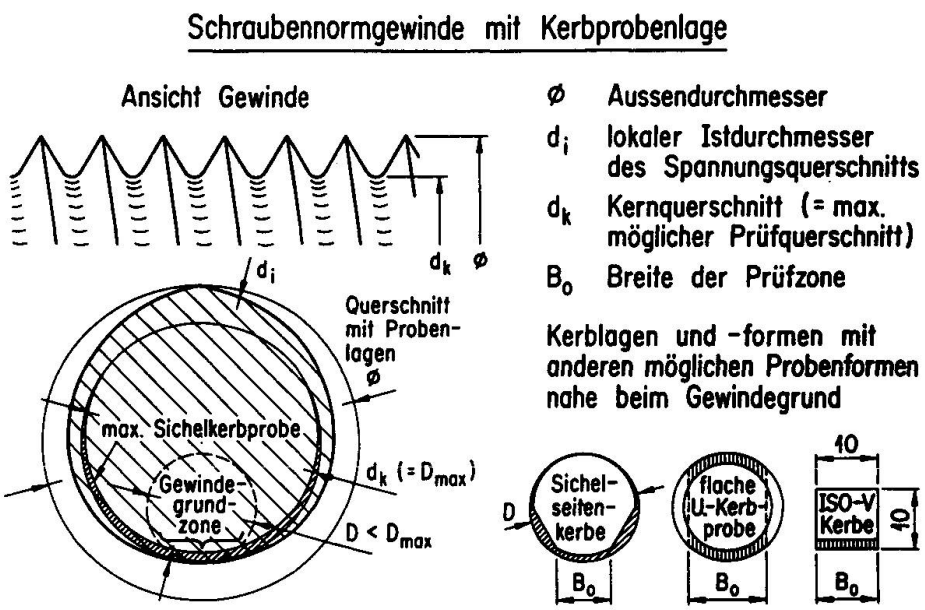
Figur 3: Funktionen für Bereich a/D von 0.02–0.07

$Y' = 250x - 6'426x^2 + 93'400x^3 - 536'000x^4$ für USK-Gewinde

$Y' = 271x - 7'186x^2 + 102'900x^3 - 589'000x^4$ für SSK-Sichel

$Y' = 0.018 + 181.9x - 2'407x^2 + 14'590x^3$ für Umlaufriss

$Y' = 0.023 + 177.5x - 2'463x^2 + 14'300x^3$ für Sichelriss



Figur 4: Anordnung von gekerbten Rund- und ISO-V-Proben in Gewindestange

6. LITERATURVERZEICHNIS

[1] U. NÜRNBERGER, "Analyse und Auswertung von Schadensfällen bei Spannstählen". Forschung, Strassenbau BVM BRD 308 (1980).

[2] U. MORF, "Zähigkeitsverfahren für Draht und Stangenmaterial am Stahl". Diss. ETHZ Nr. 8492/EMPA-Publ. Nr. 216 (1988).

[3] VERSCH. AUTOREN, "Spannungsrisskorrosion in Spannbetonbauwerken". Stahleisen mbH, Düsseldorf (1983).

[4] G. HAMPEIJS, "Spannungsrisskorrosion von Spannstählen...". X. Kongress der FIP, New Delhi (1986).

[5] U. MORF UND MITARBEITER, "Korrosionsinduzierte Sprödbrüche an Stangenmaterial". SIA (SVMT) Doku. 98 (1985).

[6] FIP-Report on Prestressing steel Nr. 5, "Stresscorrosion cracking resistance test...". 5/7 (1980).

[7] Euronorm 138-79 "Spannstähle"