

Langzeitversuche mit dynamischen Belastungen zu den Auswirkungen von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Spanngliedern bei teilweiser Vorspannung

T 2287

T 2287

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

B e r i c h t Nr.: 30/89

Langzeitversuche mit dynamischen Belastungen zu den Auswirkungen von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Spanngliedern bei teilweiser Vorspannung.

IfBt - Forschungsvorhaben IV 1-5-437/85

7.95

- A B S C H L U S S B E R I C H T -

erstattet von: Dipl.-Ing. Heinz B Ö K A M P

Priv.Doiz. Dr.-Ing. Heiner C O R D E S

Professor Dr.-Ing. Dr.h.c. Heinrich T R O S T

Dieser Bericht umfaßt: 102 Seiten Text

30 Seiten Zahlentafeln

45 Seiten Bilder

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

Seite

1. Veranlassung und Zielsetzung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung	3
2. Überblick zum Stand der Kenntnisse und Diskussion	4
2.1 Allgemeines und Definitionen	4
2.2 Wirkungsmechanismus der Reibermüdung	6
2.3 Interaktion zwischen Reibermüdung und Reibkorrosion	13
2.4 Einflußfaktoren und ihre Wirkung auf die Reibermüdung	15
2.5 Methodik und Diskussion verschiedener Untersuchungsverfahren zur Reibermüdung	22
3. Beanspruchungs- und Spannungsverhältnisse bei teilweiser Vorspannung im Bereich gerissener Betonquerschnitte	28
3.1 Grundsätzliche Erläuterungen	28
3.2 Einflußgrößen und Imperfektionen bei der Spannungsermittlung in teilweise vorgespannten Bauteilen	30
3.3 Beanspruchung gekrümmter Spannglieder im Bereich gerissener Betonquerschnitte	35
4. Diskussion eigener Versuche	42
4.1 Versuchsprogramm und Begründung	42
4.2 Beschreibung der Versuche	44
4.2.1 Abmessungen der Versuchskörper	44
4.2.2 Baustoffe	
4.2.3 Herstellung und Lagerung der Versuchskörper	47
4.2.4 Versuchseinrichtung	49
4.2.5 Meßverfahren und Meßwerterfassung	49

4.2.6	Versuchsphasen und Belastungsgeschichte	53
4.3	Zusatzversuche für die Hüllrohrauswahl	55
4.3.1	Begründung	
4.3.2	Versuchskörper und Versuchseinrichtung	
4.3.3	Versuchsprogramm	
4.3.4	Versuchsergebnisse	
4.4	Zusatzversuche - Spannbettbinder	58
4.4.1	Begründung der Zusatzversuche	
4.4.2	Versuchskörper und Belastungsgeschichte	
4.4.3	Versuchsergebnisse	
5.	Versuchsergebnisse	61
5.1	Allgemeines	61
5.2	Ermüdungsverhalten der teilweise vorgespannten Biegeträger	62
5.3	Formänderungs- und Rißverhalten der dynamisch belasteten Versuchsbalken	67
5.4	Schadensanalyse und Werkstoffuntersuchung	71
5.4.1	Allgemeines	71
5.4.2	Makroskopische Bruchuntersuchung	72
5.4.3	Mikroskopische Bruchuntersuchung	77
6.	Rechnerische Auswertung und Empfehlungen für die Bemessung	82
6.1	Konkrete Auswertung der Versuchsergebnisse unter Beachtung des Betriebsfestigkeitskonzeptes	82
6.2	Empfehlungen für die Bemessung zur Erfassung der Reibdauerbeanspruchung	85
7.	Zusammenfassung	90
8.	Literatur	93

1. Veranlassung und Zielsetzung

1.1 Veranlassung

Die teilweise Vorspannung hat sich in ihrer Anwendung bei verschiedenen Bauaufgaben bewährt.

Im Eurocode 2 -Design of Concrete Structures- kommt der teilweisen Vorspannung durch die Zusammenfassung der Bereiche Stahlbeton und Spannbeton als "Konstruktionsbeton" oder "Structural Concrete" eine besondere Bindegliedfunktion zu. Mit ihr können die Anwendungsmöglichkeiten der Stahlbetonbauweise erheblich erweitert und verschiedene Vorteile in wirtschaftlicher und auch konstruktiver Hinsicht erzielt werden.

Zur Zeit unterliegt die teilweise Vorspannung nach DIN 4227 Teil 2, Abschnitt 10, in ihrer Anwendung bei Bauteilen im Freien gewissen Einschränkungen. Bei Bauteilen mit Umweltbedingungen nach DIN 1045, Tabelle 10, Zeile 3, und bei Bauteilen, die weniger als 10m über oder unter Straßen, die mit Tausalzen behandelt werden, liegen müssen die Spannglieder unter dem dauernd wirkenden Lastanteil (bei Brücken unter Einschluß der halben Verkehrslast) mit ihrem vollen Querschnitt im überdrückten Bereich des nach Zustand II gerechneten Querschnittes liegen.

Als sinnvolle Erweiterung wird eine Zulassung der Lage der Spannglieder im gerissenen Bereich auch bei Bauteilen im Freien diskutiert. Dazu ist eine grundsätzliche Untersuchung teilweise vorgespannter Konstruktionen in Bezug auf die damit verbundenen Fragestellungen notwendig.

Die planmäßig auftretende Ribbildung in teilweise vorgespannten Querschnitten erfordert eine sorgfältige Untersuchung der den Rib kreuzenden Spannglieder. Dabei stellt die Ermüdung des Spannstahts neben einem langfristigen Korrosionsschutz eine maßgebende Einflußgröße für sein dauerhaftes und funktionsfähiges Verhalten im Spann-

betonbauwerk dar. Die Ermüdungsuntersuchung hat durch die steigende Ausnutzung des Materials und eine wachsende Belastungsintensität an Bedeutung gewonnen. Hinzu kommt, daß die höheren Schlankheiten neuerer Konstruktionen mit einem Anstieg des Verhältnisses von Verkehrslasten zu Eigengewichtslasten verbunden sind. Hieraus resultiert bei nicht ruhender Belastung ein Anstieg der Dauerschwingbeanspruchung für den Spannstahl.

Im Vergleich mit der vollen bzw. beschränkten Vorspannung führt die planmäßige Ribbildung in teilweise vorgespannten Querschnitten zu einer verstärkten Beanspruchung des Spannstahls. In Verbindung mit nicht ruhenden Belastungen treten im Ribbereich des Betonquerschnittes zwischen Spannstahl und Hüllrohr Reibdauerbeanspruchungen auf. Ihre Ursache liegt in der gleichzeitigen Wirkung hoher Querverpressungen und kleiner Relativverschiebungen in der Kontaktfläche zwischen Spannstahl und Hüllrohr.

Kurzzeituntersuchungen an den Massivbauinstituten in Aachen und München sowie am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich haben ergeben, daß die Dauerfestigkeit des Spannstahls unabhängig von der Spanngliedart, durch die Wirkung von Reibdauerbeanspruchungen erheblich beeinträchtigt wird. Die zu beobachtenden Reibvorgänge können zu einem frühzeitigen Ermüdungsversagen des Spannstahles führen. Gestützt auf Untersuchungen aus dem Bereich der Materialkunde kann ein deutlicher Einfluß der Einwirkungsdauer der Reibdauerbeanspruchung auf die ertragbare Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Die bekannten Ergebnisse aus Kurzzeituntersuchungen können daher nicht ohne weiteres auf Langzeitvorgänge übertragen werden.

Ergänzend zu den Auswirkungen des Zeiteinflusses muß der im Bauwerk auftretende Wechsel zwischen Ruhe- und Belastungsphasen beachtet werden. Dabei spielt das an der Reibstelle vorliegende Angebot an Sauerstoff und Luftfeuchtigkeit eine besondere Rolle.

1.2 Zielsetzung

Ausgehend von den bekannten Ermüdungsuntersuchungen unter Einschluß von Reibdauerbeanspruchungen soll die ertragbare Ermüdungsbeanspruchung des Spannstahls bestimmt werden. Die geplante Untersuchung wird exemplarisch für Litzenspannglieder durchgeführt.

Die Bestimmung der Dauerschwingfestigkeit der Litzenspannglieder unter den Bedingungen der teilweisen Vorspannung soll mittels einbetonierter Proben mit Hilfe geeigneter Balkenversuche durchgeführt werden.

Durch wirklichkeitsnahe Anpassung der Versuchsbedingungen an die Bauwerksverhältnisse soll eine sichere Aussage zur ertragbaren Spannungsamplitude für den Spannstahl erzielt werden. Im einzelnen werden die folgenden in Bild 1 zusammengestellten Fragenkomplexe untersucht und diskutiert.

- Welche Faktoren die Wirkung der Reibdauerbeanspruchung in teilweise vorgespannten Bauteilen beeinflussen,
- Wo, wann und in welcher Form Reibdauerbeanspruchungen in diesen Bauteilen auftreten,
- Welche Randbedingungen und Beanspruchungsverhältnisse an der Kontaktstelle zwischen Spannstahl und Hüllrohr bzw. zwischen den einzelnen Spannstählen im Spannglied vorliegen,
- Wie sich die Dauerschwingfestigkeit des Spannstahls durch Reibdauerbeanspruchungen verringert unter Berücksichtigung
 - von Langzeitvorgängen mit sich abwechselnden Belastungs- und Ruhephasen,
 - von hohen Lastwechselzahlen,
 - eines wechselnden Sauerstoff- und Feuchteangebotes und
- Worin Ursache und Wirkungsmechanismus der Reiber-müdungsschäden begründet sind.

2. Überblick zum Stand der Kenntnisse und Diskussion

2.1 Allgemeines und Definitionen

Die Untersuchung der Ermüdung des Spannstahls in teilweise vorgespannten Bauteilen erfordert, bedingt durch die auftretende Reibdauerbeanspruchung, eine Erweiterung der üblichen Betrachtungsweise von Materialermüdungsvorgängen.

Die Reibdauerbeanspruchung des Spannstahls führt in den Kontaktzonen zwischen Spannstahl und Hüllrohr bzw. den Spannstahloberflächen selbst zu tribochemischen Reaktionen. Hiermit werden Verschleißvorgänge bezeichnet, die in der äußeren Grenzschicht der metallischen Reibpartner ablaufen und zu einer Änderung der physikalisch-chemischen und mechanischen Eigenschaften der beteiligten Oberflächen führen. Als Bezeichnung für diese Schädigungsvorgänge werden in der Literatur die Begriffe "Reibermüdung" und "Reibkorrosion" verwendet. Die angelsächsische Literatur verwendet synonym dazu die Begriffe "fretting fatigue" und "fretting corrosion".

Die Reibermüdung stellt für den Spannstahl eine Schädigung des oberflächennahen Bereiches mit der möglichen Folge eines Ermüdungsbruches infolge dynamisch wirkender Kräfte dar. Voraussetzung hierfür ist die Berührung zweier metallischer Reibpartner unter hoher Querpressung bei gleichzeitig auftretender oszillierender Relativverschiebung der Kontaktflächen. Diese Voraussetzung ist für den gekrümmt geführten Spannstahl im Rißquerschnitt teilweise vorgespannter Bauteile erfüllt.

Als Reibkorrosion wird nach DIN 50900 eine "örtlich durch Reibung ohne äußere Wärmeeinwirkung stattfindende Korrosion an Metalloberflächen" bezeichnet.

Ausgangspunkt der Ermüdungsuntersuchung des Spannstahls ist eine Prüfung der Spannstahlprobe im freischwingenden Zu-

stand. Die hierbei ausschließlich durch dynamische Längsbelastung der Probe erzielten Ergebnisse eignen sich nur als Materialkennwert für die Güteüberwachung.

Die notwendige Berücksichtigung der Reibdauerbeanspruchung macht eine Erweiterung dieses Untersuchungsverfahrens erforderlich. Hierzu wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Möglichkeiten entwickelt, die im einzelnen in Abschnitt 2.5 vorgestellt werden.

Da der Beanspruchung und Schädigung durch Reibermüdung und Reibkorrosion nach Bild 1 ein komplexer Schädigungsvorgang zugrunde liegt, wird zunächst in Abschnitt 2 eine Beschreibung der Grundlagen und Anwendungen aus der Materialkunde vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Übertragung der Erkenntnisse und Folgerungen auf den Spannstahl.

2.2 Wirkungsmechanismus der Reiberermüdung

Der Begriff Reiberermüdung beschreibt eine kombinierte Schädigung unter gleichzeitiger Wirkung von Verschleiß- und Ermüdungsvorgängen.

Die Grundlagenforschung nimmt deshalb in der Beschreibung der Reiberermüdung eine Aufteilung in zwei Schadensarten vor.

Als erstes tritt eine durch den Reibvorgang verursachte Schädigung des oberflächennahen Bereiches der betrachteten Reibflächen auf und bildet eine dem Verschleiß ähnliche Schadensart. Diese Schädigung wird von einer verstärkten Bildung von Korrosionsprodukten begleitet, wodurch das Auftreten der Reibkorrosion gekennzeichnet ist.

Als nachfolgende zweite Schadensart wird davon der eigentliche Ermüdungsvorgang des betrachteten Materials mit der möglichen Folge eines Dauerbruches unterschieden. Die Ermüdung des Materials stellt eine Folge der vorangegangenen Oberflächenschädigung dar und wird im wesentlichen durch die im Material vorhandenen Spannungsverhältnisse bestimmt, was für den Spannstahl in Abschnitt 3.3 erläutert wird.

An dieser Stelle folgt eine nähere Beschreibung der als erstes genannten Verschleißschädigung des oberflächennahen Werkstoffbereiches.

Verantwortlich für den Beginn der Oberflächenschädigung ist die infolge dynamischer Belastung ausgelöste Relativverschiebung der Kontaktflächen. Hierdurch werden in den Berührungspunkten durch die an der Materialoberfläche vorhandenen Mikro-Unebenheiten Reibkräfte geweckt. Diese Kräfte sind neben dem Oberflächenangriff auch für die nachfolgende Einleitung eines Ermüdungsrisses verantwortlich. Da der zu beschreibende Schadensvorgang stark durch Reibinflüsse bestimmt wird, erscheint eine Erläuterung der mit der Reibung verbundenen Zusammenhänge sinnvoll.

Nach den während des Reibvorganges vorliegenden Randbedingungen bei Reibermüdungsvorgängen handelt es sich hier eindeutig um den Vorgang der Festkörperreibung. Von der zu Beginn des Reibvorganges auftretenden Ruhereibung kann im weiteren die sich anschließende Gleitreibung unterschieden werden.

Die Größe der auftretenden Reibkräfte kann mit Hilfe eines Reibungskennwertes $\mu = F_t/F_n$ beschrieben werden. Dieser Wert μ beschreibt das Verhältnis der durch den Reibvorgang geweckten Reibkraft F_t zur senkrecht dazu wirkenden Normalkraft F_n in der Kontaktfläche. Als einfachste Annahme kann von einem konstanten μ -Wert ausgegangen werden. Verschiedene Untersuchungen weisen jedoch auf eine Abhängigkeit des Reibungskennwertes von verschiedenen Faktoren hin.

In der Materialkunde wird die Entstehung einer Reibkraft im allgemeinen auf folgende Ursachen zurückgeführt:

- Anheben einzelner Reibpartner durch Übereinandergleiten der Rauigkeitsspitzen,
- elastische und plastische Verformung der Rauigkeitsspitzen,
- Verschweißung einzelner Berührungsstellen,
- Abscheren der verschweißten Berührungsstellen,
- Werkstoffzerstörung durch Eindringen der Rauigkeitsspitzen des härteren Werkstoffes im weicheren.

Arbeiten aus der Grundlagenforschung haben gezeigt, daß während des Reibvorganges bei kraftschlüssig gepaarten Oberflächen nur eine punktweise Berührung stattfindet. Das Verhältnis zwischen tatsächlicher und scheinbarer Berührungsfläche für zwei feinpolierte metallische Oberflächen ist in Bild 2 /10/ dargestellt.

Der Reibvorgang wird begleitet von kontinuierlich ablaufenden Austauschvorgängen in der atomaren Metallstruktur.

Schematisch ist dieser Vorgang für eine Kontaktstelle in Bild 3 /85/ dargestellt. Durch die Begrenzung der maximal möglichen Pressung ergibt sich im Bereich der Spitzen einzelner Mikrohügel eine kurzzeitige Überführung des Materials in einen plastisch verformbaren Zustand. Untersuchungen von Kloos /54/ ergaben eine Abhängigkeit der in den Berührungspunkten wirkenden Flächenpressung von dem Keilwinkel des Rauheitsprofils, von der absoluten Probengröße und vom Oberflächenumformungsgrad. Mit zunehmender Punktbelastung nimmt nach diesen Erkenntnissen die wahre Flächenpressung ab. Hiermit ist eine Änderung der entstehenden Reibungskräfte verbunden.

Die zu beobachtenden Austauschvorgänge in der Metallstruktur werden begleitet von Verschiebungen innerhalb der Energiebilanz des Gesamtsystems. Physikalisch wird bei jedem Reibvorgang Bewegungsenergie in andere Energieformen umgewandelt. Die von den Reibflächen aufgenommene Energie kann zu einer Temperaturerhöhung und einer mechanisch-chemischen Aktivierung der Kontaktflächen führen. In diesen Bereichen tritt ein verstärktes Bestreben nach tribochemischer Reaktion mit den flüssigen oder gasförmigen Bestandteilen der Umgebung auf. Dieser Vorgang ist mit einer Veränderung der physikalisch-chemischen und mechanischen Eigenschaften der beteiligten Oberflächenbereiche verbunden.

Für die Beschreibung dieser in den Oberflächenbereichen des Werkstoffes zu beobachtenden Materialveränderungen ist eine Trennung zwischen Werkstoffeigenschaften und Grenzschichteigenschaften sinnvoll. Beide können trotz ursprünglich gleichen Werkstoffes erheblich voneinander abweichen. In der Materialkunde unterscheidet man grundsätzlich die in Bild 4 /91/ dargestellte Aufteilung in eine äußere und innere Grenzschicht. Die äußere Grenzschicht in einer Dicke von 10^{-5} mm setzt sich dabei aus einer Reaktionsschicht (Metalloxide) und einer Adsorptionsschicht zusammen. Die innere Grenzschicht unterscheidet sich durch Eigenspannun-

gen, Textur, chemischer Zusammensetzung und den mechanischen Eigenschaften vom Grundwerkstoff.

Die während eines Reibvorganges ermittelten Reibungskennwerte können mit mittleren Werten angesetzt werden, wenn durch den Reibvorgang nur eine geringe Beschädigung der äußeren Grenzschicht eintritt. Dies ist dann gewährleistet, wenn die Festigkeit einzelner Schichten mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche größer wird. Sind die Kontaktflächen fester als tiefer liegende Schichten so wird die innere Grenzschicht zerstört und es folgt ein starker Anstieg der Reibungskennwerte /58/. Versuche von Campell /18/ mit Stahlproben im Vakuum ergaben bei vorheriger Entfernung der Metalloxidschicht einen erheblichen Anstieg der Reibungskennwerte und der damit zusammenhängenden Reibkräfte.

Zusammenfassend kann aus den Erkenntnissen der Grundlagenforschung und ihrer Anwendung folgende Feststellung getroffen werden:

Das Phänomen der Reiberermüdung findet ihren Ursprung in Strukturveränderungen des oberflächennahen Werkstoffbereiches die durch Verschleißvorgänge ausgelöst werden. Diese Veränderungen der Oberflächenstruktur entsprechen nach /105/ den Strukturveränderungen der Werkstoffermüdung des Grundmaterials, weisen aber infolge der Art der Kräfteinleitung, der Einwirkung des Umgebungsmediums und der Oberflächennähe Besonderheiten auf. Das gleichzeitige Auftreten der Reibkorrosion stellt dabei einen zusätzlichen Angriff auf die Werkstoffoberfläche dar.

Im Spannbeton wird bei gekrümmter Führung der Spannglieder durch die Wirkung von Umlenkkraften ebenfalls eine hohe Querpressung an den Kontaktstellen zwischen Spann Stahl und Hüllrohr sowie zwischen den einzelnen Spannstählen erzeugt. Zusätzliche Reibkräfte treten an diesen Stellen bereits während des Vorspannvorganges auf.

Eine Diskussion des Phänomens der Reibermüdung des Spannstahls wird jedoch erst seit Anwendung der teilweisen Vorspannung geführt. Die für den Reibermüdungsvorgang notwendigen Reibkräfte mit stets wechselndem Vorzeichen werden auch hier durch Relativverschiebungen der Kontaktflächen geweckt. Diese Verschiebungen treten im Reißquerschnitt teilweise vorgespannter Bauteile durch ein fortlaufendes Öffnen und Schließen der Betonrisse infolge dynamischer Belastung auf.

Reibungsmessungen /11,24/ während des Vorspannvorganges gekrümmt verlegter Spannglieder ergaben Reibungskennwerte von $\mu = 0,15-0,30$. Diese Werte können jedoch nach Untersuchungen von Oertle /69/ durch Reibdauerbeanspruchungen der beiden Reibflächen auf $\mu = 1,0$ ansteigen. Durch diese Reibkräfte entstehen im oberflächennahen Bereich des Spannstahls Schubspannungen, die bei einem dynamischen Belastungsvorgang in jedem Lastspiel den Richtungssinn wechseln. Eine Überlagerung dieser Schubspannungen mit den gleichzeitig wirkenden Zugspannungen im Spannstahl führt zu einer Spannungskonzentration im oberflächennahen Bereich und liefert die Voraussetzung für das Auftreten eines Reibermüdungsbruches.

Eine Betrachtung des Hauptspannungsverlaufes zeigt bei gleichzeitiger Wirkung von Schubspannungen und Zugspannungen im Längsschnitt des Spannstahls eine unter $30-45^\circ$ geneigte Hauptspannungsrichtung. Mit zunehmendem Abstand von der Materialoberfläche nimmt der Einfluß der Schubbeanspruchung auf die Hauptspannung ab. Gleichzeitig steigt der Einfluß der Zugbeanspruchung aus äußerer Belastung und Vorspannung. Diese Wirkung läßt sich an dem parallel zur Oberfläche ausgerichteten Verlauf der Hauptspannungen verdeutlichen. Die Kenntnis des im Material vorliegenden Spannungszustandes stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Beurteilung des Reibermüdungsvorganges dar. In Abschnitt 3 wird deshalb der vorliegende Spannungszustand näher dargestellt.

Die Schädigung des Spannstahls infolge Reiberermüdung und Reibkorrosion findet ihren Ursprung in der Oberflächenzerrüttung der beiden Reibflächen. Die während des Reibvorganges im Oberflächenbereich auftretenden Abschervorgänge und plastischen Verformungen führen einer Auflockerung der Gefügestruktur des Grundmaterials. Zusätzlich entstehen durch die hohen örtlich wirkenden Querpressungen Umlagerungen in der Gefügestruktur des Materials. Die hohe Beanspruchung des oberflächennahen Bereiches durch Zug- und Schubkräfte hat eine große Zahl von Mikroanrissen des Spannstahlmaterials zur Folge. Diese lassen sich durch eine mikroskopische Untersuchung entsprechender Längsschliffe nachweisen.

Nach Bild 5 /102/ lassen sich beim Reiberermüdungsbruch des Spannstahles im Ablauf zwei Schädigungsstufen feststellen. Beginnend mit einer ersten Phase der Rißeinleitung folgt danach eine zweite Phase der Rißfortpflanzung.

Im einzelnen ermöglicht die Zerstörung der reibungsmindernden äußeren Grenzsicht und der darunter liegenden Oxid- und Reaktionsschicht durch den Reibvorgang einen Angriff auf die innere, arteigene Grenzsicht. In Einzelfällen tritt dabei die Bildung von Reibschweißstellen zusammen mit einem starken Anstieg der Reibkräfte auf.

Der folgende Abschervorgang führt dann zu ersten Anrissen.

Bei einer Beanspruchung unterhalb der Reibdauerhaltbarkeit des Spannstahls kommt die Rißentwicklung in einer vom Material abhängigen Entfernung von der Oberfläche zum Stillstand. Bei höherer Beanspruchung wächst der Anriß aus dem Wirkungsbereich der Reibdauerbeanspruchung heraus. Das weitere Rißwachstum wird nun durch die Größe der dynamischen Zugbeanspruchung bestimmt. Der Bruch des Spannstahls verläuft ab hier ähnlich wie bei der freischwingend geprüften Probe. Für die Rißtiefe, von der ab der weitere Rißfortschritt im wesentlichen durch die Dauerschwingbe-

lastung bestimmt wird, wird in der Literatur/8/ der Begriff "kritische Rißtiefe" verwendet.

Im Ergebnis führt die Reibermüdungsbeanspruchung beim Spannstahl im Vergleich zur frei schwingenden Belastung zu einem zeitlich früheren Auftreten der Ermüdungsbrüche.

Der Vorgang der Spannstahlschädigung durch Reibermüdung ist zusammenfassend an eine oszillierende Relativverschiebung der Kontaktflächen geknüpft, wobei gleichzeitig in normalen Spanngliedern mit üblicher Spanngliedführung eine hohe Zugbeanspruchung des Spannstahls und die Wirkung einer hohen Querpressung in einzelnen Berührungspunkten vorliegt.

2.3 Interaktion zwischen Reibermüdung und Reibkorrosion

Die Schädigung des Spannstahls infolge Reibdauerbeanspruchung wird durch die gleichzeitige Wirkung von Ermüdungs- und Korrosionsvorgängen ausgelöst. In der Untersuchung dieser Schädigungsvorgänge kommt der Wechselwirkung zwischen Reibermüdung und Reibkorrosion eine besondere Bedeutung zu.

Die Materialkunde ordnet die Reibermüdung unter Beteiligung der Reibkorrosion in der Obergruppe Verschleiß zum sogenannten Schwingungsverschleiß ein. Hierbei sind verschiedene Erscheinungsformen bekannt. Typisch für diesen Vorgang ist die Rotfärbung der metallischen Verschleiß- bzw. Reibflächen. Diese wird verursacht durch die Oxidation des Eisens zu $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Die Farbschattierung ist dabei abhängig von der Teilchengröße der entstehenden Oxide. Dieser Vorgang der Reibkorrosion findet in den frischen Reibflächen, infolge der dort stattfindenden plastischen Verformungs- und Abschervorgänge, außerordentlich chemisch aktive Oberflächen vor. Dies gilt gleichermaßen für die Einwirkung von flüssigen wie auch gasförmigen Stoffen.

Schon unter Raumtemperatur wurden hier Sorptionsprozesse mit O_2 und H_2 beobachtet, die zur Oxidation führten. Eine Erhöhung der Temperatur ergab einen den Prozeß beschleunigenden Charakter. Als Endprodukte dieser Oxidation konnte $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Hämatit) und teilweise $\alpha\text{-FeO(OH)}$ (Goethit) bei erhöhter Feuchtigkeit ermittelt werden.

Die Kontaktstellen besitzen durch mechanischen Verschleiß einzelner Oberflächenbereiche und daraus resultierender ungesättigter Bindungskräfte das Bestreben, mit der Umgebung zu reagieren. Diese Eigenschaft führt zu einer deutlichen Steigerung der Korrosionsgeschwindigkeit dieser Bereiche der Metalloberfläche.

Bei ausreichendem Feuchtigkeitsangebot kann durch Spalteffekte eine zusätzliche Beschleunigung des Korrosionsvorganges auftreten. Aus der Korrosionsforschung ist bekannt, daß es unter solchen Spaltbedingungen infolge Hydrolyse der entstehenden Korrosionsprodukte zu einem Absinken des pH-Wertes der Umgebung kommen kann, mit der Folge einer größeren Korrosionsgefährdung des Stahls.

Durch die örtlich begrenzten Kontaktflächen kommt es in Einzelbereichen zu einer Lokalisierung des Korrosionsvorganges. Dies fördert die Bildung von ersten Mikroanrissen. Diese Mikrorisse vergrößern sich mit einer von den Umgebungsbedingungen und der Belastung abhängigen Wachstumsgeschwindigkeit.

Aufbauend auf die allgemeinen Untersuchungen der Materialkunde läßt sich eine Übertragung der Erkenntnisse auf den Spannstahl vornehmen. Dabei kann die Interaktion zwischen Reibermüdung und Reibkorrosion sinnvoll in Form eines Kreislaufes erläutert werden (Bild 6). Ausgangspunkt ist die Kontaktstelle zwischen Spannstahl und Hüllrohr unter der Einwirkung von Querpressungen und Schwingungen. Über die auftretenden Deformationen kommt es zu Adhäsions- bzw. Zerrüttungsvorgängen an der Oberfläche. Neben der beginnenden Reibkorrosion treten an den Kontaktstellen Änderungen der örtlichen Spannungsverteilung auf. Unterstützt durch die Wirkung einer dynamischen Zugbelastung verursachen diese Vorgänge die ersten Ermüdungsanrisse. Der Kreislauf schließt sich an dieser Stelle und es beginnt ein neuer Umlauf. Dieser Vorgang wiederholt sich in gleicher Weise bis ein Ermüdungsversagen des Spannstahls eintritt.

2.4 Einflußfaktoren und ihre Wirkung auf die Reibermüdung

Der für die Reibermüdung verantwortliche Reibvorgang gehört zu den tribologischen Systemvorgängen, wobei der Begriff Tribologie allgemein die Erforschung von Reibungsvorgängen kennzeichnet.

Das Ausmaß der zu beobachtenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Vorgängen wird bestimmt durch die vorhandenen Randbedingungen des tribologischen Systems.

Der Einfluß und die Wirkung der einzelnen Parameter wird nachfolgend unter Verwendung bekannter Untersuchungsergebnisse dargestellt und diskutiert.

Hauptparameter für den Reibermüdungsvorgang stellen wie in Abschnitt 2.2 erläutert die in der Kontaktfläche wirkende Querpressung und die zu beobachtende Relativverschiebung der beiden Reibflächen dar.

Untersuchungen von Funk /41/ mit konstant gehaltener Relativverschiebung ergaben den in Bild 7 gezeigten Abfall der ertragbaren Ermüdungsbeanspruchung mit steigender Querpressung. Dabei nimmt der Einfluß der Querpressung auf die ertragbare Spannungsamplitude unterproportional mit ihrer Größe ab.

Die Querpressung steht in direkter Beziehung zu den im Material ausgelösten Hauptspannungen. Ein Anstieg der Querpressung führt zusammen mit einer Vergrößerung der Reibdauerbeanspruchung zu einem Anstieg der schiefen Hauptspannungen. Dabei verursachen die vergrößerten Hauptzugspannungen einen Anstieg der Reißempfindlichkeit des Werkstoffes im oberflächennahen Bereich.

Heinemann bestätigt dieses Ergebnis in /46/ in Form eines ansteigenden Grenzflächenverschleißes bei zunehmender Querpressung.

Die Erfassung des Einflusses der Relativverschiebung der Kontaktflächen auf die Reibermüdung wurde bislang nur in wenigen Beispielen durchgeführt. Verantwortlich sind hierfür die Schwierigkeiten in der Durchführung einer zuverlässigen Messung der auftretenden Relativverformungen. Diese ergeben sich aus der örtlichen Begrenzung der Verformung und ihrer ungleichmäßigen Verteilung innerhalb der Kontaktfläche.

Der Einfluß der Relativverschiebung auf die Ermüdungsbeanspruchung ist in Bild 8 /41/ als Ergebnis der Untersuchungen von Funk abgebildet. Unter den dort gewählten Randbedingungen stellte sich ein Abfall der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Relativverformung ein. Dabei konnte bereits bei kleinen Verschiebungen ein deutlicher Abfall der Ermüdungsfestigkeit beobachtet werden.

In verschiedenen theoretischen Arbeiten (z. Bp. /102/) wird der Versuch unternommen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode die Verteilung der Relativverformung innerhalb der Kontaktzonen zu ermitteln. Im Ergebnis zeigt sich ein Anstieg der Relativverschiebung vom Zentrum zum äußeren Rand der einzelnen Kontaktfläche. Im Zentrum der Kontaktzone wird hier nur eine geringe Verschiebung der beiden Reibflächen gegeneinander festgestellt. Parallel zum Anstieg der Relativverformungen ergibt sich auch bei den Hauptspannungen ein Anstieg vom Zentrum der Kontaktfläche zum Rand dieser Fläche.

Die absolute Größe der auftretenden Relativverschiebung ist direkt von der eingeleiteten dynamischen Zugbeanspruchung abhängig. Eine Vergrößerung der Spannungsamplitude führt zu einem Anstieg der relativen Dehnung beider Reibpartner und damit zu einem Anstieg der Relativverschiebung. Eine Vergrößerung der Querpressung erzeugt dagegen über den Anstieg der Reibkräfte eine Verringerung der meßbaren Relativverschiebung. Aus dem direkten Zusammenhang zwischen Querpressung und Relativverschiebung folgt, daß nur Versuchser-

gebnisse mit entweder konstant gehaltener Flächenpressung oder konstant gehaltener Relativverformung zum gegenseitigen Vergleich herangezogen werden können.

Da Reibermüdungsschäden ihren Ausgang stets an der Oberfläche des Werkstoffes haben, kommt als nächstem Parameter der Oberflächenstruktur des Werkstoffes eine wichtige Bedeutung zu.

Zur Beschreibung einer Oberfläche in einem tribologischen System sind im wesentlichen zwei Angaben erforderlich. Zu Beginn ist eine Aussage über die Mikrogeometrie der Fläche notwendig. Hierzu liegen eine Vielzahl von Untersuchungen und daraus abgeleitete Verfahren vor. Mit ihrer Hilfe können die geometrischen Kenngrößen der Oberflächen bestimmt werden.

Aufwendiger ist es, als zweite Kenngröße eine Aussage über das elastische Verhalten des oberflächennahen Bereiches zu gewinnen. Diese Kenngröße ist im allgemeinen abhängig von der Art der vorhandenen Wechselwirkungen.

Die Beschreibung der Oberflächeneigenschaften wird zusätzlich erschwert durch die im Materialgefüge vorhandenen Eigenspannungen. Dabei sind insbesondere die Umwandlungseigenspannungen durch inhomogene bzw. ungleichmäßige Gefügeumwandlung zu nennen, die im Herstellprozeß des Stahles infolge chemisch-thermischer Behandlung entstehen.

Naturgemäß wird jeder Reibprozeß auch stark durch die vorhandene Werkstoffkombination bestimmt. Versuche mit Reibpartnern aus unterschiedlichen Werkstoffen wurden bislang nur in geringer Zahl durchgeführt. Fischer beschreibt in /38/ das Verhalten einer Stahl-Guß Reibpaarung im Vergleich mit einer Stahl-Stahl Reibpaarung. Im Hinblick auf die Schwingfestigkeit ergab sich eine Verbesserung bei einer Kombination der Reibpaarung aus einem harten mit einem weicheren Reibpartner.

Der Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Schwingfestigkeit stellt die Grundlage der Untersuchungen von Kreitner /58/ dar. Bei den gewählten Randbedingungen konnte kein ausgeprägter Einfluß auf die Schwingfestigkeit festgestellt werden. Als Erklärung wird dort eine sich während des Reibvorganges einstellende maximale Rauigkeit angenommen, die unabhängig von der Ausgangsrauhtiefe ist.

Ergänzend zur Betrachtung des Einflusses der Oberflächeneigenschaften wurde von Julius /52/ die Wirkung unterschiedlicher Zwischenstoffe (z. Bp. Schmiermittel) in der Reibfläche auf die Schwingfestigkeit untersucht. Dabei konnte in beschränktem Umfang durch Aufbringen eines Schmierfilmes auf die Reibflächen eine Steigerung der Bruchlastspielzahl erzielt werden. Als Begründung kann die durch den Schmierfilm ausgelöste Entlastung der einzelnen Berührungspunkte der Reibflächen dienen. Dieser Effekt kommt durch die herbeigeführte Beteiligung von Nachbarzonen der Kontaktbereiche an der Übertragung von Druck- und Schubbeanspruchungen zustande. Außerdem wurden bei den unter Beteiligung von Schmiermitteln durchgeführten Reibversuchen kaum Abriebprodukte festgestellt. Dies kann als weiterer Hinweis für eine Verringerung der Reibbeanspruchung angesehen werden.

Neben den direkt mit den Werkstoffen zusammenhängenden Einflüssen kommt der Atmosphäre in der unmittelbaren Umgebung der Reibstelle eine wichtige Bedeutung zu.

Reibermüdungsversuche im Vakuum bzw. in sauerstofffreier Atmosphäre /102/ ergaben im Vergleich zu Versuchen in normaler Atmosphäre eine um bis zu 40% höhere Schwingfestigkeit. Hierbei konnte ein späteres Auftreten der Ermüdungsrisse und eine kleinere Rißfortschrittsgeschwindigkeit als Ursache ermittelt werden. Die Umgebungsbedingungen nehmen außerdem in starkem Maße Einfluß auf die in Zusammenhang mit den Reibvorgängen entstehenden Abriebprodukte und die damit verbundene Reibkorrosion. Der Vorgang der Reibkorrosion wurde von Waterhouse selbst bei

Reibermüdungsversuchen im Vakuum bzw. sauerstofffreier Umgebung beobachtet.

Die während der Reibdauerbeanspruchung vorliegenden äußeren Umgebungsbedingungen sind im wesentlichen verantwortlich für die Zusammensetzung der infolge Reibkorrosion entstehenden Reiboxide. Dies hat in /27/ verschiedene Reiboxide untersucht. Dabei konnten erhebliche Mengen von an Eisen gebundenen Sauerstoff festgestellt werden. Da diese Abriebprodukte in loser Form als Schleifmittel dienen, ist für die Beurteilung ihrer Wirkung insbesondere die Härte der Oxide wichtig. In /14/ wird festgestellt, daß in trockener Atmosphäre eine erhebliche Härtesteigerung auftritt und dadurch spröde Oxidschichten entstehen. Bei Zusatz von Feuchtigkeit bilden sich plastische Deckschichten aus, die zu einer Verminderung der Reibwirkung beitragen und damit den Verschleiß infolge Reibermüdung verringern. Dieses Ergebnis wird auch durch die Untersuchungen von Heinemann /46/ bestätigt. Nach Schroelkamp /83/ und Krause /57/ lassen sich bei der Reiboxidation in trockener Luft metallische Einschlüsse in der Oxidschicht nachweisen, die nicht vom Grundwerkstoff getrennt sind. Dies hat eine Verstärkung der Reibermüdungsbeanspruchung zur Folge. Übereinstimmend wird in verschiedenen Veröffentlichungen festgestellt, daß die bei der Reibkorrosion entstehenden Oxidschichten in ihrem Aufbau im wesentlichen aus $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ mit Anteilen aus Fe_3O_4 mit eingelagerten metallischen Einschlüssen bestehen.

Die beschriebenen Ergebnisse aus der Materialkunde lassen sich nur eingeschränkt auf die Verhältnisse des Spannstahls unter Reibdauerbeanspruchung übertragen.

Vielmehr treten zusätzliche Einflußgrößen auf, die in die Beurteilung der Reibermüdungsbeanspruchung mit einzubeziehen sind. Bild 9 zeigt die wesentlichen Parameter zur Beschreibung der Reibermüdung für den Spannstahl unter den Bedingungen der teilweisen Vorspannung.

Die zwischen Spannstahl und Hüllrohr auftretende Querverpressung wird durch die geometrische Führung sowie durch die Größe des Spanngliedes bestimmt. An den Kontaktstellen zwischen den Reibpartnern sind hier nur relativ kleine Reibflächen zu beobachten. Dies wirkt sich deutlich auf die ausgelösten Spannungsverhältnisse in diesen Bereichen aus.

Infolge der örtlich begrenzten Kontaktstellen führt eine Erhöhung der dynamischen Belastung zu einer vergrößerten relativen Dehnung des Spannstahls gegenüber dem Hüllrohr. Damit ist eine Ausdehnung der lokalen Reibflächen verbunden.

Der Verlauf und das Ausmaß der an diesen Kontaktstellen zu beobachtende Reibkorrosion hängt wesentlich von den atmosphärischen Randbedingungen ab.

In /73/ und eigenen Reibversuchen /11/ an Spannstählen konnte eine starke Abhängigkeit der Reibkräfte von den atmosphärischen Bedingungen in unmittelbarer Nähe der Reibstelle ermittelt werden. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit und gleichzeitiger Einwirkung einer erhöhten Temperatur wurde ein Anstieg der Reibkräfte gemessen. Neben dem Anstieg der Reibkräfte ist für die Reibermüdungsbeanspruchung des Spannstahls die Art und Beschaffenheit der entstehenden Korrosionsprodukte von besonderer Bedeutung, was in Abschnitt 5 näher erläutert wird.

Die Relativverschiebung der einzelnen Reibflächen zwischen Spannstahl und Hüllrohr wird wesentlich durch das im Bauteil vorhandene Rißbild bestimmt. Entscheidend ist die während jedes Lastspieles auftretende Rißbreitenänderung im Betonquerschnitt infolge der dynamischen Beanspruchung. Die Rißbreitenänderung besitzt eine direkte Verbindung mit dem vorliegenden Rißabstand und der Zusammensetzung der rißsteuernden Bewehrung.

Ausgelöst durch das unterschiedliche Verbundverhalten von Spannstahl und Betonstahl tritt ergänzend eine Spannungsum-

lagerung vom Spannstahl zum Betonstahl auf. Dieser Umlagerungsvorgang nimmt neben der Spannungsänderung Einfluß auf die Größe der Relativverschiebungen.

Abschließend sind als weitere Einflußgrößen in der Untersuchung von Reibermüdvorgängen im Spannbetonbau die gewählten Prüfbedingungen zu nennen. Die Prüfung teilweise vorgespannter Bauteile verlangt zur weitgehenden Anpassung an die im Bauteil vorliegenden Bedingungen eine Erweiterung der sonst üblichen Untersuchungsmethoden. Unter anderem kommt der Übereinstimmung des zeitlichen Belastungsablaufes im Versuch mit den im Bauwerk anzutreffenden Belastungsbedingungen eine wichtige Rolle zu. Insbesondere ist zu prüfen, ob Unterbrechungen im Versuchsablauf und Änderungen des Belastungsniveaus zu Abweichungen im Ergebnis führen können.

In direktem Zusammenhang damit steht der Einfluß der bei der Versuchsdurchführung gewählten Belastungsfrequenz und Belastungsintensität. Wie in /35/ bereits festgestellt (Bild 10), muß im Spannbeton grundsätzlich mit einem Abfall der ertragbaren Spannungsamplitude bei Verringerung der Belastungsfrequenz gerechnet werden. Oertle /69/ kommt dagegen in der Untersuchung von Kleinkörperversuchen zu dem Ergebnis, daß eine Vernachlässigung des Einflusses der Belastungsfrequenz in einem Bereich von 3 bis 8 Hz möglich ist.

2.5 Methodik und Diskussion verschiedener Untersuchungsverfahren zur Reiber müdung

Aufgabe der Ermüdungsuntersuchung ist die Bestimmung des Werkstoffwiderstandes gegenüber einwirkenden dynamischen Beanspruchungen. Eine wirklichkeitsnahe Bestimmung der ertragbaren Spannungsamplitude erfordert eine weitgehende Anpassung der Versuchsbedingungen an die Verhältnisse im Bauteil.

Ermüdungsuntersuchungen unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen der teilweisen Vorspannung erfordern eine Erweiterung der üblicherweise angewandten Verfahren.

Neben der dynamischen Zugbelastung sind hier die im Bauwerk auftretenden Reibdauerbeanspruchungen des Spannstahls mit zu erfassen.

Für die Ermüdungsuntersuchung des Spannstahls unter Beachtung der Bedingungen der teilweisen Vorspannung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich im Zeit- und Kostenaufwand während der Versuchsdurchführung sowie dem erzielbaren Ausgabewert des Ergebnisses.

Zur Beschreibung der einzelnen Verfahren ist es sinnvoll, eine Unterscheidung nach verwendetem Versuchsmodell und angewandtem Versuchsverfahren vorzunehmen. In Bild 11 ist eine sich daraus ergebende Gliederung dargestellt.

Zu Beginn der Ermüdungsuntersuchung von Spannstählen wurde die bereits längere Zeit mit Erfolg eingesetzte Prüfung mittels freischwingender Proben übernommen. Die an einem kurzen geraden Spanngliedabschnitt gewonnenen Ergebnisse sind jedoch nur eingeschränkt auf die Verhältnisse im Bauwerk übertragbar. Es fehlen die aus der Reibdauerbeanspruchung resultierenden Einflüsse infolge Querpressung und Relativverschiebung. Die ermittelte ertragbare Spannungsam-

plitude kann somit nur als Baustoffkenngröße in der Materialüberwachung verwendet werden, die Auswirkungen einer Reibdauerbeanspruchung sind dagegen besonders zu untersuchen.

Deshalb wurde von Cordes /22/ und Lapp-Emden eine erweiterte Versuchseinrichtung entwickelt, die in Bild 12 dargestellt und in /23/ ausführlich beschrieben wird.

Die Wirkung einer veränderlichen Schwingbreite wird hierbei in gleicher Weise erfaßt, wie bei der freischwingend geprüften Probe ohne Zusatzeinrichtung. Die Zusatzeinrichtung erlaubt die Erfassung von Querpressung und Reibkräften. Durch die Möglichkeit einer variablen Staffelung läßt sich eine Steigerung der Querpressung infolge Klemm- und Keilwirkung bei Großspanngliedern berücksichtigen. Eine einfache Veränderung der Prüfeinrichtung gestattet es ferner, die Verschiebung in den Reibflächen für unterschiedliche Spannungshorizonte konstant zu halten. Diese mögliche getrennte Untersuchung einzelner Parameter stellt einen Vorteil gegenüber den später zu beschreibenden Großmodellversuchen dar. Diese Versuchsmethode lieferte eine wesentliche Aussage (Bild 13) zum Einfluß von Reibdauerbeanspruchungen auf das Ermüdungsverhalten von Spannstählen.

Darauf aufbauend soll geprüft werden, ob und wie sich eine zusätzliche Berücksichtigung der Biegespannung infolge Spanngliedkrümmung und die Wirkung der Verbundkräfte zwischen Stahl und Beton auswirkt.

Die im Bauteil beidseitig des Betonrißquerschnittes vorliegende Verbundspannungsverteilung unterliegt einer Änderung durch den dynamischen Belastungsvorgang in Abhängigkeit von der Lastspielzahl. Dabei ist insbesondere der Einfluß einer vorhandenen gemischten Bewehrung mit unterschiedlichen Verbundeigenschaften zu beachten. Eine Ermüdungsuntersuchung des Spannstahls unter Einschluß realer Verbundverhältnisse erfordert eine Prüfung des Spannstahls im einbetonierten Zustand.

Bei Prüfung von einbetonierter Proben läßt sich eine Untersuchung am Kleinmodell im Vergleich zu einer am Großmodell mit Balkenversuchen unterscheiden.

Entsprechende Kleinmodellversuche (Bild 14) wurden von Oertle /68/ an der ETH Zürich durchgeführt, bei denen aus Gründen einer sicheren Spannungsermittlung nur Spannstähle eingebaut wurden. Die Einflüsse einer Betonstahlbewehrung auf die Dauerschwingfestigkeit der Spannstähle konnten somit nicht erfaßt werden.

Zur möglichst weitgehenden Erfassung der im Bauteil wirkenden Einflüsse auf das Reibermüdungsverhalten von Spannstählen ist eine Prüfung mit Großmodellversuchen unumgänglich.

Untersuchungen dieser Art wurden unter Verwendung von Versuchsbalken mit gekrümmter Spanngliedführung an der ETH Zürich /78/ und der TU München /63/ durchgeführt. An der TU München wurden mit den Versuchsbalken gemeinsam mit dem Aachener Massivbauinstitut beschaffte gerippte und glatte Spannstähle sowie Litzen untersucht. Als Ergebnis ergab sich ein Abfall der Ermüdungsfestigkeit von Spanngliedern in einbetoniertem, gekrümmt geführtem Zustand gegenüber den im freien Zustand geprüften Stählen bei glatten Drähten auf 45% und bei Litzen auf 70%. Nachteilig stellte sich bei diesen Versuchen die Wahl eines Rechteckquerschnittes für den Versuchsbalken heraus. Eintretende Drahtbrüche führten zusammen mit der dynamischen Belastung bei den Prüfkörpern mit Litzenpanngliedern zu einem Versagen der Betondruckzone. In /63/ wird davon ausgegangen, daß der Zeitpunkt aller Drahtbrüche mit dem Zeitpunkt des Versagens der Betondruckzone zusammenfällt. Die Ergebnisse der in Aachen und Zürich durchgeführten Versuche lassen es jedoch als wahrscheinlich erscheinen, daß bereits vor dem Versagen der Betondruckzone erste Ermüdungsbrüche in der Litze vorhanden waren.

Die an der ETH Zürich verwendeten Versuchskörper waren im Querschnitt als Plattenbalken ausgebildet. Hierdurch konnte

ein frühzeitiges Versagen der Betondruckzone verhindert werden. Die früher von Rigon /78/ durchgeführten Balkenversuche wurden anschließend von Oertle /69/ durch weitere Versuche mit gleichem Prüfkörper ergänzt. Den Zusatzversuchen waren Schwierigkeiten bei der Auswertung der ersten Versuche vorausgegangen, die sich aus dem in jedem Lastspiel notwendigen Durchfahren des Dekompressionsniveaus ergaben. Infolge der vorliegenden Abhängigkeit der Spannungsamplitude im Spann Stahl von der vorhandenen Vorspannkraft war eine sichere Bestimmung der einwirkenden Spannungsamplitude nicht möglich. Bei den anschließenden Balkenversuchen wurden die Lastgrenzen so gewählt, daß sowohl Ober- als auch Unterlast oberhalb des Dekompressionsniveaus lagen.

Die Versuchsbalken waren in Feldmitte mit einer geradlinigen Spanngliedführung versehen, die in den Drittelpunkten in einem Radius von 3,50 m gekrümmt zum Schwerpunkt hochgeführt wurde. Damit erstreckte sich der gekrümmte Spanngliedbereich über eine Strecke von 0,45 m. Die Reibdauerbeanspruchung des Spann Stahls lag konzentriert in diesem Bereich vor. Die Auswertung ergab in einem Betonquerschnitt den Bruch von bis zu 14 von insgesamt 28 Litzendrähten. Diese Konzentration der Ermüdungsbrüche hat Unsicherheiten in der Beurteilung der Ergebnisse zur Folge.

Jeder einzelne Drahtbruch führt zu einer Veränderung der im Spannglied vorhandenen Spannung. Neben der Änderung der Oberspannung findet auch ein sprunghafter Anstieg der Spannungsamplitude statt. Die Größe dieses Anstiegs hängt vom Verhältnis des gebrochenen Stahlquerschnittes zum Gesamtspannstahlquerschnitt ab. Im diesem Versuch mit insgesamt 28 Spanndrähten wirkt sich ein einzelner Drahtbruch wesentlich stärker aus als dies im Bauwerk bei vielen Spanndrähten der Fall ist. Diese Tatsache ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Bei den in dieser Arbeit vorzustellenden Untersuchungen kommen ebenfalls Versuchskörper mit Plattenbalkenquer-

schnitt (Bild 28) zur Anwendung. In Abweichung zu den Züricher Versuchen wurden die Spannglieder über die gesamte Trägerlänge gleichmäßig gekrümmt eingebaut. Hiermit wurde eine Konzentration der Reibdauerbeanspruchung auf einzelne Bereiche vermieden.

Die gewählte Belastung der Träger durch eine Einzellast in Feldmitte liefert im Spannstahl eine über die Trägerlänge veränderliche Spannungsamplitude. Die hierdurch gewonnene Erweiterung des Versuchsprogramms und die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 5 erläutert.

Anschließend sollen einige Gesichtspunkte zur unterschiedlichen Versuchsdurchführung in Zürich und Aachen erläutert werden.

Bei einem Vergleich der Aachener Versuche mit den Züricher Versuchen ist ein Unterschied in der Reaktion auf einen Drahtbruch festzustellen.

In Zürich erfolgte nach jedem Drahtbruch eine Reduktion der Kraftgrenzen. Damit sollte durch Festsetzung neuer Kraftgrenzen im Spannstahl ein konstantes Spannungsniveau bei konstanter Spannungsschwingbreite während der gesamten Versuchsdauer gehalten werden. Bei diesem Vorgehen ergibt sich eine zu günstige Beurteilung der Dauerschwingfestigkeit des Spannstahls.

Im Bauwerk muß aufgrund des dort konstant vorhandenen Lastniveaus ebenfalls mit einem Anstieg der Spannungen im Spannstahl bei einem Drahtbruch gerechnet werden, jedoch wird die Änderung bei den üblicherweise vielen Spannstählen nur gering sein. Eine geplante Veränderung der Lastgrenzen nach jedem Drahtbruch setzt zusätzlich die genaue Bestimmung von Zeitpunkt und Ort des Bruches voraus. Dies stößt insbesondere bei der Untersuchung von Litzenspanngliedern auf Schwierigkeiten. Hier kann es in einem von den Verbundeigenschaften abhängigen Abstand von der Bruchstelle zu einer erneuten Mitwirkung des gebrochenen Drahtes kommen.

Diese teilweise Mitwirkung gebrochener Drähte reduziert den infolge Drahtbruch zu erwartenden Anstieg der meßbaren Durchbiegung bzw. Dehnung des Trägers. Für die Überwachung des Trägers während der Versuchsdurchführung müssen deshalb zusätzliche Maßnahmen getroffen werden, die den Versuchsaufwand zum Teil erheblich erhöhen.

Die Aachener Versuche wurden über die gesamte Versuchsdauer mit konstanter Einzellast in Feldmitte durchgeführt. Diese Versuchsdurchführung mit konstantem Lastniveau war unabhängig von der zeitlich sicheren Erfassung der auftretenden Ermüdungsbrüche.

Diese Darstellungen lassen zusammenfassend erkennen, wie komplex die Durchführung und Auswertung von Reibermüdungsversuchen ist. Für eine sichere Übertragung auf die Verhältnisse in teilweise vorgespannten Bauteilen kann auf die Anwendung großformatiger Versuchskörper nicht verzichtet werden.

3. Beanspruchungs- und Spannungsverhältnisse bei teilweiser Vorspannung im Bereich gerissener Betonquerschnitte

3.1 Grundsätzliche Erläuterungen

Die Widerstandsseite wird im wesentlichen durch die Eigenschaften der beteiligten Materialien bestimmt, wie es ausführlich in Abschnitt 2.2 und 2.3 erläutert wurde.

Auf der Einwirkungsseite stellen die auftretenden Beanspruchungs- und Spannungsverhältnisse die maßgebenden Einflußgrößen dar.

Als Kenngröße für die Beschreibung der Ermüdungsbeanspruchung des Spannstahls dient die Spannungsschwingbreite. Sie stellt die eingeleitete Spannungsschwankung zwischen Ober- und Unterlast infolge einer dynamischen Belastung dar. Bei der Bauteilbemessung ist nachzuweisen, daß die auftretende Schwingbreite kleiner als die Dauerschwingfestigkeit des verwendeten Spannstahls ist.

Für die Durchführung dieses Nachweises kommt der realistischen Ermittlung der wirkenden Spannungen eine besondere Bedeutung zu. Die erzielbare Genauigkeit der einzelnen Rechenverfahren hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab.

Die Ermittlung der Spannungen im Spannstahl ist bei teilweise vorgespannten Bauteilen unter der Annahme eines gerissenen Querschnittes, also im Zustand II, durchzuführen. Hierbei wird die gesamte Zugkraft allein den Stahleinlagen zugewiesen, und die Betonzugfestigkeit bleibt unberücksichtigt. Die Berechnung der Spannungen darf bei Anwendung der Elastizitätstheorie unter der Voraussetzung eines linear-elastischen Werkstoffverhaltens erfolgen.

Wenn außer kurzzeitigen Belastungen auch längerfristige Belastungsvorgänge vorliegen, sind zusätzliche Überlegungen erforderlich. Solche andauernden Belastungen führen infolge

des zeitabhängigen Betonverhaltens zu Spannungsumlagerungen im Querschnitt, die erhebliche Spannungsänderungen im Beton und Stahl zur Folge haben.

Neben diesen Spannungsänderungen infolge des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens kommt bei dynamischen Belastungsvorgängen als weiterer Einfluß die Änderung der Verbundeigenschaften zum Tragen. Eine wiederholte Belastung verursacht im Bereich beidseitig des Betonrisses eine Lockerung des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Bei ungleichen Verbundeigenschaften der Bewehrung führt dies zu einer Kräfteumlagerung zwischen den unterschiedlichen Stahlsorten. Die Größe der eintretenden Verbundlockerung ist abhängig von der Art und Dauer der Belastung, den Verbundeigenschaften des Bewehrungsstahls und der von der Betonsorte abhängigen Verbundgüte des Spannstahls.

Ergänzend zu den Spannungsverhältnissen in Längsrichtung des Spannstahls ist auch die Querverpressung für die Wirkung der Reibermüdung von besonderer Bedeutung. Solche Beanspruchungen senkrecht zum Spannstahl treten in den Kontaktflächen mit dem benachbarten Material auf und resultieren aus den durch die gekrümmte Spanngliedführung geweckten Umlenkkraften.

Die Beurteilung der Reibermüdungsvorgänge setzt die wirklichkeitsnahe Erfassung der Beanspruchung des Spannstahls in Längs- und Querrichtung voraus. Die rechnerische Untersuchung des Spannstahls kann nur unter Beachtung verschiedener bei der Spannungsermittlung auftretender Imperfektionen realistisch durchgeführt werden, deren Auswirkung im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

3.2 Einflußgrößen und Imperfektionen bei der Spannungsermittlung in teilweise vorgespannten Bauteilen

Die Spannungsermittlung des Spannstahls bzw. des Betonstahls in teilweise vorgespannten Betonquerschnitten ist im Vergleich mit homogenen Querschnitten relativ schwieriger. Der heterogene Aufbau des Spannbetonquerschnittes macht die Festlegung verschiedener Annahmen für die rechnerische Untersuchung erforderlich.

Grundlage ist hier neben der Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen die Beachtung der für jeden Querschnitt geltenden Verträglichkeitsbedingungen. Im Gebrauchslastbereich wird ein Ebenbleiben der Querschnitte unterstellt und somit treten in dem Verbundquerschnitt keine Verschiebungen zwischen den einzelnen Querschnittsteilen auf. Aus der Annahme eines vollkommenden Verbundes folgt, daß Querschnittselemente aus Stahl und Beton, die in Fasern mit gleichem Abstand von der Dehnungsnulldlinie liegen, gleiche Dehnungen erfahren.

Die Bestimmung der aus den Dehnungen resultierenden Spannungen erfolgt über das Hooke'sche Gesetz, wonach eine lineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung angesetzt werden kann.

Mit diesen Festlegungen können die Beton- und Stahlspannungen für den Zustand I unter Kurzzeitbelastung auf der Grundlage der linearen Elastizitätstheorie ermittelt werden.

Eine Erweiterung der genannten Voraussetzungen ist erforderlich bei längerfristiger Lasteinwirkung zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Betonverhaltens. Hierdurch kommt es im Querschnitt zu Spannungsumlagerungen zwischen Beton und Stahl, die vor allem bei vorgespannten Bauteilen zu erheblichen Änderungen in den Spannungsverhältnissen führen. Berechnungsgrundlagen zur Spannungsermittlung unter Berücksichtigung zeitabhängiger Vorgänge sind in /40/ zusammengestellt und erläutert.

Von entscheidender Bedeutung für die Stahlspannung ist der Übergang des Betonquerschnittes vom Zustand I in den Zustand II. Dieser Zustand II tritt nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit zusammen mit der beginnenden Rißbildung ein. Dabei ergibt sich nach Bild 15 ein deutlicher Spannungsanstieg im Stahl. Die Größe des Spannungsanstieges ist abhängig von der maximal aufnehmbaren Betonzugspannung und dem vorhandenen Bewehrungsgrad.

Für die Bestimmung der Stahlspannung im Zustand II ist es sinnvoll, die Verringerung der Dehnungen infolge der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen zu berücksichtigen. Die daraus resultierende Verringerung der Stahlspannung ist abhängig von der Höhe der Belastung und der Zahl der durchgeführten Lastspiele. Die Einwirkungen langzeitiger dynamischer Belastungen im Bereich der zulässigen Gebrauchslast führen zu einer Annäherung der Spannungswerte an die Werte des "reinen Zustandes II", womit eine Berechnung ohne Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen gekennzeichnet ist.

Während die Spannungsberechnung des Bewehrungsstahls im Zustand II für Stahlbetonquerschnitte unter Biegebeanspruchung mit einer Gleichung zweiten Grades möglich ist, ergeben zusätzliche Längskräfte aus äußerer Belastung bzw. Vorspannung eine kubische Bestimmungsgleichung für die Lage der Dehnungsnulldlinie. Die Herleitung dieser Beziehung wurde von Rickenstorf in /77/ dargestellt. Hochreither stellt in /47/ eine Erweiterung dieser Zusammenhänge zur Berücksichtigung unterschiedlicher Nutzhöhen von Betonstahl und Spannstahl vor. Durch die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse in Diagrammform steht für ausgewählte Querschnitte ein geeignetes Hilfsmittel zur Spannungsermittlung im Zustand II zur Verfügung.

Weitere Hilfsmittel insbesondere zur Erfassung des Einflusses verschiedener Stahl- und Betonquerschnittsparameter

wurden in /60/ zusammengestellt. Zusätzlich wird dort die Wirkung einer Langzeitbelastung auf die Spannungsermittlung untersucht, wobei die Umlagerungen infolge des zeitabhängigen Betonverhaltens berücksichtigt werden. Hierbei ist die Spannungsermittlung des gerissenen Betonquerschnitts nicht mehr in geschlossener Form möglich, weil der Hebelarm der inneren Kräfte und die Druckzonenhöhe auf iterativem Wege zu bestimmen sind.

Neben den Einflüssen aus unterschiedlichen Rechenannahmen sind die Spannungsverhältnisse von Form und Größe des Betonquerschnitts sowie von Art und Größe des Stahlquerschnitts und der Vorspannkraft abhängig.

Der Einfluß der Beton- und Stahlquerschnittswerte auf die Spannungen im Zustand II wurde in /60/ ausführlich untersucht. Dabei zeigt sich, daß die Variation der Querschnittsparameter im wesentlichen durch Änderung des inneren Hebelarmes z zu einer Veränderung der Spannungsverhältnisse führt.

Neben dem inneren Hebelarm wird die Stahlspannung durch die Größe der wirkenden Vorspannkraft bestimmt. Bei der teilweisen Vorspannung wird die Höhe der Vorspannung durch den Begriff des Vorspanngrades beschrieben. Der Vorspanngrad ergibt sich im Fall der reinen Biegung aus dem Verhältnis des Dekompressionsmomentes zum größten Moment aus äußerer Belastung. Das Dekompressionsmoment ist so definiert, daß nach Erreichen dieses Momentes die resultierenden Spannungen am betrachteten Querschnittsrand Null ergeben.

Eine Erhöhung der Vorspannkraft zeichnet sich bei unveränderter äußerer Belastung durch einen Anstieg des Dekompressionsniveaus aus. Die Auswirkung einer Veränderung der Vorspannkraft auf den Spannungszuwachs im Spannstahl ist als Ergebnis eigener Vergleichsrechnungen in Bild 16 dargestellt. Deutlich ist die durch den Anstieg des Dekompres-

sionsmomentes ausgelöste Verringerung des Spannungszuwachses zu erkennen.

Die Aussagegenauigkeit der Rechenverfahren zur Spannungsermittlung im Spannstahl bzw. Betonstahl findet ihre Grenzen in der nur unvollständigen Erfassung der bekannten Imperfektionen bei der Bestimmung der im Querschnitt wirkenden Vorspannkraft, deren Größe und Wirkung durch folgende Faktoren bestimmt wird:

- Vorspannverluste infolge Reibung;
- Unplanmäßige Eintragung der Vorspannung durch fehlerhafte Dehnwegmessung, Querschnittsabweichungen und unterschiedlichem E-Modul;
- Unsichere Bestimmung des ungewollten Umlenk winkels;
- Auftretende Kräfteumlagerungen zwischen Spannstahl und Betonstahl.

Im Ergebnis beeinflussen diese Faktoren die im Spannstahl auftretende Oberspannung, die für die Beurteilung der Ermüdungsbeanspruchung nur eine nachrangige Bedeutung hat. Primär ist hier die Größe der durch die dynamische Belastung hervorgerufenen Spannungsamplitude von entscheidender Bedeutung, die durch die Veränderung der Oberspannung nur geringfügig beeinflußt wird, wenn gleichzeitig auch eine Änderung der Unterspannung stattfindet. Dies ist dann der Fall, wenn sowohl Unter- als auch Oberlast oberhalb des Dekompressionsniveaus liegen. Wird während der dynamischen Belastung das Dekompressionsniveau durchfahren, ergibt sich eine starke Abhängigkeit der Spannungsamplitude von der Vorspannkraft (Bild 17) und eine sichere Ermittlung der auftretenden Spannungsamplitude ist in diesem Fall sehr schwierig.

Bei der Durchführung von Ermüdungsversuchen sollten deshalb Versuchskörper und Versuchsprogramm so aufeinander abgestimmt werden, daß die gesamte dynamische Belastung ober-

halb des Dekompressionsniveaus angreift. Dies wurde in dem hier durchgeführten Versuchsprogramm berücksichtigt.

3.3 Beanspruchung gekrümmter Spannglieder im Bereich gerissenen Betonquerschnitte

Reibermüdungsversagen im Spannstahl setzt eine örtliche Überbeanspruchung des geschädigten Materials voraus. Neben der aus der Bemessung bekannten Beanspruchung sind für die Entstehung eines Reibdauerbruches die lokal wirkenden Beanspruchungs- und Spannungsverhältnisse zwischen Spannstahl und Hüllrohr verantwortlich.

An diesen Kontaktstellen findet eine Überlagerung der dynamischen Zugbeanspruchung mit den senkrecht zur Spannstahloberfläche wirkenden Beanspruchungen statt. Die Untersuchung dieses örtlich in einem eng begrenzten Raum wirkenden Spannungszustandes ist meßtechnisch kaum möglich. In neuerer Zeit wird die experimentelle Untersuchung vermehrt durch eine theoretische Betrachtung mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode ergänzt.

Die im Betonrißquerschnitt eines teilweise vorgespannten Bauteiles auf die Spannstahloberfläche einwirkenden Kräfte sind in Bild 18 schematisch dargestellt. Dabei wird die gleichzeitige Wirkung einer dynamischen äußeren Belastung vorausgesetzt.

Der komplexe Spannungszustand im Oberflächenbereich des Spannstahles setzt sich aus der Überlagerung mehrerer Lastanteile zusammen. Als Einzelwirkungen treten dabei im Spannstahl auf:

- Zugspannungen infolge Vorspannung,
- Biegespannungen bei Spanngliedkrümmung,
- dynamische Zugbeanspruchung infolge äußerer Last,
- Querpressung durch die Wirkung von Umlenkkräften und
- Schubspannungen infolge Relativbewegung zwischen den Reibpartnern.

Im Hinblick auf den beobachteten Bruchausgang an der Krümmungsinneseite des Spannstahls ist der Einfluß der Biegespannung von nur geringer Bedeutung. Sie führt zu einer Verringerung der im Spannstahl an der Krümmungsinneseite auftretenden Längsspannung. Zusätzlich ist durch die Begrenzung der minimalen Krümmungsradien eine Beschränkung dieser Biegespannung vorgegeben.

Von stärkerer Bedeutung für die Spannungen des Spannstahls ist die dynamische Zugbeanspruchung infolge äußerer Belastung. Die hierdurch erzeugte Spannungsamplitude ist maßgeblich für die Entstehung eines Ermüdungsbruches verantwortlich. Die in Abschnitt 3.1 genannten Grundlagen zur Spannungsermittlung in der Bewehrung sind nur im eigentlichen Rißquerschnitt gültig. Im Bereich zwischen den Rissen tritt dagegen eine Verringerung der Spannungsamplitude auf. Ursache hierfür ist die Verbundwirkung und die Wirkung der Reibung zwischen Stahl und Beton. Nach den Untersuchungen von Oertle /68/ (Bild 19) stellt sich infolge Reibung zwischen Spannstahl und Hüllrohr ein deutlicher Abfall der Spannungsamplitude ein. Die Größenordnung ist abhängig vom Abstand der betrachteten Stelle vom Betonriß und der aufgetragenen Lastspielzahl. Als Ursache wird hierfür der sogenannte Haftreibeffekt bzw. die Hysterese genannt.

Untersuchungen zum Verbundverhalten der vorgespannten Bewehrung unter dynamischer Belastung wurden in neuerer Zeit in /42/ veröffentlicht. Durch die dynamische Beanspruchung der Verbundfuge kommt es zu einer Auflockerung und damit Verringerung des Verbundes. Die Auswirkungen auf die Stahlspannungsverteilung sind in Bild 20 qualitativ dargestellt, wonach im rißnahen Bereich eine Umlagerung der Betonspannungen auf die Stahlspannungen erfolgt. Im Hinblick auf die Spannungsamplitude tritt in diesem Bereich keine Veränderung auf, da die Umlagerungen sowohl die Spannungen unter Oberlast als auch unter Unterlast gleichmäßig verändern.

Für den Fall eines Bewehrungsquerschnittes mit ungleichen Verbundeigenschaften (gemischte Bewehrung) stellt sich im Hinblick auf die Spannungsamplitude ein vergleichbares Verhalten ein. Die im Vergleich zum Betonstahl schlechteren Verbundeigenschaften des Spannstahls führen zu Kräfteumlagerungen vom Spannstahl zum Betonstahl. Aus den in Bild 21 gezeigten qualitativen Spannungsverhältnissen resultiert eine Änderung der jeweiligen Spannung des entsprechenden Stahls. Da sowohl unter Oberlast als auch unter Unterlast eine Änderung der Stahlspannung auftritt, wird die Spannungsamplitude nur geringfügig verändert. Die Umlagerungen erreichen im sogenannten Erstrißzustand ihren Maximalwert und verringern sich bis zum Erreichen des abgeschlossenen Ribbildes. Der Einfluß der dynamischen Belastung auf die Umlagerungsvorgänge wurde bislang experimentell nicht untersucht. Theoretische Überlegungen lassen zu Beginn der dynamischen Belastung eine Verstärkung der Umlagerungen erwarten. Mit zunehmender Lastspielzahl kann ein teilweiser Ausgleich der unterschiedlichen Spannungen auftreten. Dafür ist die ungleiche Wirkung von Haftverbund und Reibverbund bei gerade geführtem Betonstahl und gekrümmt geführtem Spannstahl verantwortlich.

Eine Zunahme der Spannungen im Betonstahl konnte im Versuch durch das Auftreten von Ermüdungsbrüchen bestätigt werden. Für den im Hinblick auf ein Ermüdungsversagen empfindlicheren Spannstahl ergibt sich durch den Umlagerungsvorgang eine Entlastung. Hiermit ist eine zusätzliche Sicherheitsspanne gegenüber Ermüdungsversagen gegeben. Für den Betonstahl muß durch Wahl eines nicht zu großen A_v/A_s - Verhältnisses ein Überschreiten der Streckgrenze verhindert werden.

Zur Beschreibung des an den einzelnen Kontaktstellen vorliegenden Beanspruchungszustandes sind Größe und Verteilung der senkrecht zum Spannstahl wirkenden Spannungen zu bestimmen. Dabei ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwi-

schen Größe und Form der Kontaktfläche und der auftretenden Spannungsverteilung.

Im Spannbeton wird die maßgebende Kontaktfläche zwischen Spannstahl und Hüllrohr stark beeinflusst durch die Hüllrohrprofilierung und die Querschnittsform des Spanngliedes (Einzelspannglied/Litze). Zur Beschreibung der Kontaktzone lassen sich Ergebnisse einer Untersuchung gekrümmter Seildrähte /72/ teilweise verwenden.

Bei Litzenspanngliedern ergibt sich gegenüber einzeln geführten Spanndrähten eine Besonderheit in bezug auf die Anordnung der Kontaktstellen. Die wendelartige Führung der Außendrähte um den Innendraht führt zu einem periodischen Wechsel der am Hüllrohr anliegenden Drähte. Die äußeren Litzendrähte folgen im Verlauf einer Schraubenlinie, die mathematisch als "Torusspirale" bezeichnet wird. Eine Kontaktstelle zwischen Draht und Hüllrohr tritt jeweils am Beginn und Ende einer Schlaglänge auf, also eines vollständigen Umlaufes des äußeren Drahtes um den inneren Draht. Da sowohl der Litzendraht als auch das Hüllrohr eine gekrümmte Oberfläche aufweisen, ist eine ellipsenförmige Berührungsstelle zu beobachten. In der Literatur /72/ wird dafür die Bezeichnung "Preßellipse" benutzt.

Eine erste analytische Erfassung des Spannungszustandes zwischen zwei gepreßten und gekrümmten Oberflächen wurde bereits 1895 von Hertz veröffentlicht. In der theoretischen Untersuchung wird von einem räumlichen Kontaktproblem ausgegangen. Dabei wird rein elastisches Materialverhalten vorausgesetzt, die plastischen Abplattungen im Kontaktbereich werden vernachlässigt. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß Veränderungen in der Probengeometrie, insbesondere in Umfangsrichtung, von entscheidender Bedeutung für den Spannungszustand in der Kontaktzone sind. Plastische Deformationen können zu einer Veränderung der Hauptkrümmungsradien des gepreßten Bereiches führen und damit eine Änderung der Krafteinleitungsrichtung bewirken. In

/72/ wird durch geeignete Modellbildung versucht, die Auswirkungen dieser plastischen Verformung zu bestimmen. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Größe der Kontaktfläche und der wirkenden Beanspruchung. In Bild 22 ist die Spannungsverteilung einer Kontaktstelle zwischen Litzendraht und Hüllrohrwelle dargestellt.

Für die Form der Spannungsverteilung und auch für die Größe der Kontaktfläche ist im wesentlichen die auf die Kontaktfläche einwirkende äußere Beanspruchung verantwortlich. Im Spannbeton resultiert diese Beanspruchung aus den Umlenkkraften. Während sich für ein Einzelspannglied die Größe der Kontaktkraft direkt bestimmen läßt, muß für ein Bündelspannglied die Abstützwirkung weiterer Spannglieder auf das am Hüllrohr anliegende Spannglied beachtet werden. Hierzu werden in /24/ Vergrößerungsfaktoren $\alpha = \sigma_{ui} / \sigma_{pan}$ angegeben, mit denen die Erhöhung der Kontaktpressung durch zusätzliche Spannglieder bestimmt werden kann. Die Bündelung von Spanngliedern führt zu einer wesentlichen Erhöhung der Werte bei Einzelspanngliedern. Dieser Effekt wiederholt sich -bedingt durch den mehrdrähtigen Aufbau- innerhalb eines Litzenquerschnittes, weshalb die Kontaktpressung des am Hüllrohr anliegenden Drahtes durch die Umlenkkräfte der anderen Drähte erhöht wird.

Untersuchungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode lassen den Kraftverlauf und die Konzentration der Spannungen an einzelnen Berührungstellen deutlich erkennen. In den Bildern 23 und 24 ist das für die eigenen Untersuchungen eines Litzenquerschnittes verwendete Elementraster und der Hauptspannungsverlauf unter der Wirkung von Umlenkkraften dargestellt. Die maximale Kontaktpressung zwischen Hüllrohr und Litze tritt für den Fall auf, daß nur ein Litzendraht Kontakt mit dem Hüllrohr besitzt. Jede weitere Berührungsstelle vermindert die auftretenden Pressungen erheblich.

Eine Entlastung tritt auch durch Bruch eines einzelnen anliegenden Drahtes auf, da nach Ausfall dieses Drahtes die

beiden benachbarten Drähte die Kraftabtragung übernehmen und somit eine Abtragung der Last auf zwei Kontaktflächen erfolgt. Mit den Ergebnissen der theoretischen Untersuchung kann gezeigt werden, daß die Pressung in der Kontaktfuge Litze/Hüllrohr stets größere Werte als in der Fuge zwischen Innendraht und Außendraht besitzt. In der Kontaktzone zwischen Innendraht und Außendraht ist die Verringerung der Pressung eine Folge der linienförmigen Abstützung des Außendrahtes auf den Innendraht. Die sich aus den theoretischen Betrachtungen ergebende größere Wahrscheinlichkeit für den Beginn eines Reibdauerbruches in der Berührungszone zwischen Spannstahl und Hüllrohr wurde auch in den Versuchen bestätigt.

Bei teilweise vorgespannten Bauteilen resultiert die für die Reibkräfte erforderliche Relativverschiebung der Reibpartner aus der Rißuferbewegung infolge dynamischer Belastung. Dabei sind insbesondere kleine Rißuferbewegungen bereits in der Lage, hohe Reibkräfte zu erzeugen. Die meßtechnische Erfassung der auftretenden Relativverschiebungen ist nur an leicht zugänglichen Reibstellen möglich. Bei den Reibstellen innerhalb teilweise vorgespannter Bauteile ist eine direkte Messung nicht möglich. Als Meßgröße steht hier nur die an der Bauteilaußenseite zu beobachtende Rißbreitenänderung zur Verfügung. Innerhalb des Betonquerschnittes konnte bei Versuchen /90/ eine Verringerung der Rißbreite zum Bewehrungsstahl festgestellt werden, was mit einer Aufspaltung des Einzelrisses in sich verzweigende Risse erklärt wird. Damit verbunden ist eine Verringerung der in jedem Lastspiel entstehenden Relativbewegung zwischen Spannstahl und Hüllrohr.

Im Ergebnis ergibt die gleichzeitige Wirkung örtlicher Kontaktpressungen und Relativverschiebungen eine Beanspruchung der Spannstahloberfläche durch Querpressung und Schubspannungen. Die gekrümmte Oberfläche hat einen räumlichen Spannungszustand in diesem Bereich zur Folge. Näherungsweise kann eine Untersuchung jedoch nach Patzak

/73/ an einem ebenen System durchgeführt werden, da die hier zu betrachtenden Reibdauerbeanspruchungen im wesentlichen in einem ebenen System wirken.

Die Berechnungen in /73/ wurden durch eigene Finite-Elemente Berechnungen ergänzt. In Bild 25 ist als Ergebnis der Verlauf der Hauptspannungen im Längsschnitt des Litzen-drahtes bei örtlicher Beanspruchung durch Querpressung und Reibung dargestellt. Die Auswertung liefert die größte Hauptzugspannung im Bereich der Oberfläche am Rand der Lasteinleitungsstelle. Ihre Neigung zur Oberfläche wird durch das Verhältnis von Normal- und Schubspannungen bestimmt. Diese Feststellung stimmt mit den in den Versuchen beobachteten Bruchverläufen überein.

Aus der Darstellung der Hauptspannungen ergibt sich im wesentlichen eine Beanspruchung des oberflächennahen Bereiches. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche verliert die Reibdauerbeanspruchung an Wirkung. Gleichzeitig steigt damit der Einfluß der zentrischen Zugbeanspruchung aus Vorspannung bzw. äußerer Last. Dies spiegelt sich im parallelen Verlauf der Hauptspannungen zur Oberfläche wieder. Im später erläuterten Bruchbild zeichnet sich dieser Bereich durch die Charakteristik eines Schwingungsbruches aus.

4. Diskussion eigener Versuche

4.1 Versuchsplanung und Durchführung

4.1.1 Versuchsprogramm und Begründung

Zur gezielten Untersuchung der Reibermüdungsvorgänge in teilweise vorgespannten Bauteilen wurde ein geeignetes Versuchsprogramm aufgestellt. Dabei sollten insbesondere die Langzeiteinflüsse in Verbindung mit einer Reibdauerbeanspruchung erfaßt werden, wobei eine möglichst weitgehende Anpassung der Versuchsbedingungen an Bauwerksverhältnisse angestrebt war.

Unter diesen Voraussetzungen wurden 3 Serien mit jeweils 3 Versuchskörpern mit gemischter Bewehrung aus Spannstahl und Betonstahl hergestellt. Als Versuchskörper dienten dabei statisch bestimmt gelagerte Träger mit Plattenbalkenquerschnitt gemäß Bild 28, die mit jeweils einem Bündelspannglied aus 3 Einzellitzen vorgespannt waren. In Tafel 4.1 und 4.2 sind die wesentlichen Angaben zur Bewehrung und Höhe der Belastung durch äußere Lasten und Vorspannung zusammengefaßt.

Die dynamische Belastung erfolgte in Feldmitte durch einen pulsierenden Einzelprüfzylinder nach Bild 26. Dieser äußeren Belastung wirkte eine Vorspannung entgegen, die durch ein parabelförmig geführtes, mit dem Mindestradius $R = 4.80$ m nach Zulassung verlegtes Spannglied erzeugt wurde.

Im Hinblick auf die Erfassung von Langzeiteinflüssen wurde ein Versuchszeitraum von mehr als 2 Jahren gewählt.

In diesem Versuchszeitraum wurden die Träger abwechselnd einer Belastungsphase und einer sich anschließenden mehrwöchigen Ruhephase unterworfen. Während der Lastpause wurde ein Teil der Träger bei geöffneten Rissen einer künstlichen

Bewitterung unterzogen. Hiermit konnte ein wechselndes Feuchtigkeits- und Sauerstoffangebot für den Bereich der Kontaktstellen zwischen Spannstahl und Hüllrohr hergestellt werden.

Unter Beachtung der geplanten Anhebung der zulässigen Spannstahlspannung im Gebrauchszustand wurden die Träger der Serie III unter einer Oberspannung von $0,65\beta_2$ anstelle von $0,55\beta_2$ bei Serie I und II geprüft. Ausgehend von diesen Oberspannungen im Spannstahl erfolgte die dynamische Belastung der Träger mit sinnvoll abgestuften Spannungsamplituden. Belastung und Auslegung der Versuchsträger wurden so aufeinander abgestimmt, daß die dynamische Belastung oberhalb des Dekompressionsniveaus wirkt. Hiermit konnten Unsicherheiten in der rechnerischen Bestimmung der Spannungsamplitude möglichst gering gehalten werden. Im Hinblick auf die Bauwerksverhältnisse resultiert auch dort der wesentliche Anteil der Spannungsamplitude aus den Spannungsanteilen im Zustand II.

In Bild 27 ist das Versuchsprogramm in einer Gesamtübersicht zusammengestellt.

4.2 Beschreibung der Versuche

4.2.1 Abmessungen der Versuchskörper

Die Abmessungen der Versuchskörper mußten unter Beachtung der zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtung gewählt werden und sind in Bild 28 dargestellt. Mit einer Querschnittshöhe von $D = 0,50$ m und einer Trägerlänge von $L = 3,60$ m konnte eine Spanngliedführung in dem zugelassenen Mindestradius von $R = 4,80$ m erzielt werden. Eine größere Trägerlänge hätte zu Schwierigkeiten bei der Aufnahme der dynamischen Verformungen in der zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtung geführt. Ein Auftreten eventueller Resonanzschwingungen im Versuchsstand mußte sicher verhindert werden.

Die Wahl des Plattenbalkenquerschnittes erleichterte die Absicherung der Druckzone gegenüber Ermüdungsversagen. Zusätzlich konnte mit dieser Querschnittsform das gewünschte Rißbild besser kontrolliert werden. Die beim Plattenbalkenquerschnitt im Vergleich zum Rechteckquerschnitt geringere Veränderung des inneren Hebelarmes beim Übergang in den Zustand II führte zu einem frühzeitig abgeschlossenen Rißbild. Die Dimensionierung des Querschnittes war so ausgelegt, daß sich die Rißbildung auf den Stegbereich beschränkte.

4.2.2 Baustoffe

- Betonstahl

Die nicht vorgespannte Betonstahlbewehrung bestand aus kaltverformtem BSt 500 S für die Längsstäbe und die Bügel. An jeweils 3 Proben wurde mittels Wägung der Durchmesser bestimmt sowie die Festigkeitseigenschaften nach DIN 50145 Ausgabe 5.79~~4~~ ermittelt. Eine Zusammenstellung der gemessenen Werte enthält Tafel 4.3. Die in getrennten Versuchen

ermittelte Spannungsdehnungslinie ist in Bild 29 dargestellt.

- Spannstahl

Der für die Versuche gewählte Spannstahl bestand aus siebendräftigen kaltgezogenen glatten Litzen St 1570/1770 mit einem Durchmesser von 0,6" . Jeweils drei Litzen wurden entsprechend dem Zulassungsbescheid für das LH Spannverfahren der Firma Philipp Holzmann zu einem Bündelspannglied zusammengefaßt und gemeinsam verankert. Die Querschnitts- und Festigkeitskennwerte wurden ebenfalls an 3 Proben ermittelt, sind in Tafel 4.4 zusammengefaßt und um die nach Zulassung geltenden Soll-Werte ergänzt. Die ermittelte Spannungs-Dehnungslinie ist in Bild 30 aufgezeichnet.

- Hüllrohre

Die Wahl der Hüllrohre erfolgte nach den in Abschnitt 4.1.4 noch vorzustellenden Zusatzuntersuchungen. Bei der Mehrzahl der Versuchskörper wurden längsgeschweißte Hüllrohre der Firma Witzenmann GmbH/Pforzheim gemäß Bild 31a mit schmaler Innensicke eingesetzt, wodurch an den Kontaktstellen zwischen Spannstahl und Hüllrohr maximale Kontaktpressungen auftraten. Die durchgeführten Zusatzversuche ergaben sowohl bei den längsgeschweißten Hüllrohren als auch bei den spiralgefalteten Hüllrohren Rißbildungen infolge dynamischer Belastung.

Zum späteren Vergleich wurden in drei Versuchsbalken spiralgefaltete Hüllrohre deren Profilierung und Abmessungen in Bild 31b dargestellt sind eingesetzt. Hiermit sollten die in den Zusatzversuchen ermittelten Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten der unterschiedlichen Hüllrohre bestätigt werden.

- Beton

Für alle neun Versuchsbalken wurde ein Beton der Festigkeitsklasse B 55 verwendet. Die Herstellung erfolgte für die Balken 1 bis 6 mit einem Zement HOZ 45 L, für Balken 7 bis 9 mit einem Zement PZ 45 F. Der Größtkorndurchmesser der Zuschlagstoffe wurde auf 16 mm begrenzt. Die Sieblinie des Zuschlaggemisches ist in Bild 32 dargestellt und liegt nach DIN 1045, Abschnitt 6.2.2.2 /28/ zwischen den Regelsieblinien A und B im günstigen Bereich. Außer einem Erhärtungsverzögerer für einen Zeitraum von 2 Stunden wurden weitere Zusatzmittel nicht eingesetzt.

Aus arbeitstechnischen Gründen mußte die Herstellung der 9 Träger in 3 Serien mit je 3 Trägern aufgeteilt werden. Die Ergebnisse der beim Betonieren durchgeführten Frischbetonprüfungen sind in Tafel 4.5 zusammengefaßt.

Zur eindeutigen Bestimmung der Festbetoneigenschaften wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Güte- und Erhärtungsprüfungen nach DIN 1048 durchgeführt. Für jeden Betonierabschnitt erfolgte die Herstellung von zwölf Betonwürfeln mit 20 cm Kantenlänge. Für die Güteprüfung wurden drei Würfel entsprechend DIN 1048, Teil 1 /30/ gelagert. Die Güteprüfung erfolgte jeweils 28 Tage nach dem Betonieren. Die weiteren Probekörper wurden unter den gleichen Lagerungsbedingungen wie die Versuchsträger gelagert. Ihre Prüfung fand zum Zeitpunkt des Vorspannens bzw. zum Beginn der dynamischen Belastung und nach Erreichen einer Lastspielzahl von 10^6 Lastwechseln statt. Zu den gleichen Zeitpunkten wurde ebenfalls die Prüfung der Biegezugfestigkeit an Probekörpern ($a/b/h=10/15/70\text{cm}$) durchgeführt. Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgte an Betonprismen gemäß DIN 1048, Teil 1. Die Betonstauchungen wurden dabei an den vier Außenseiten des Probekörpers mit einem Setzdehnungsmesser (Bauart Pfender) auf einer Meßlänge von 300 mm bestimmt. Die in den einzelnen Versuchsstadien ermittelten Festigkeitswerte sind in Tafel 4.6 aufgeführt. Die Ergebnisse der

Elastizitätsmodulprüfung, sowie der Bestimmung der Biege- und Zugfestigkeitsprüfung sind in Tafel 4.7 aufgeführt.

- Einpreßmörtel

Die Eigenschaften des Einpreßmörtels wurden in Anlehnung an baustellenübliche Verhältnisse gewählt. Der Einpreßmörtel bestand aus PZ 45 F (Hersteller: Bonner Zementwerke AG, Marke Bonner Pfeil) mit einem Wasserzementwert von $W/Z=0,44$ unter Zusatz von 0,5% Tricosal H 181 bezogen auf das Zementgewicht. Die Verarbeitung erfolgte entsprechend den bauaufsichtlich eingeführten Regelungen für die Anwendung von Einpreßmörtel.

Zur Kontrolle der Festigkeitsentwicklung des Einpreßmörtels wurde eine Überwachung des Einpreßmörtels durch Güte- und Eignungsprüfung durchgeführt. Die Ergebnisse der Prüfungen enthält Tafel 4.8 und 4.9. Alle Prüfungen erfolgten nach den Festlegungen in DIN 4227, Teil 5.

4.2.3 Herstellung und Lagerung der Versuchskörper

Mit der im Hinblick auf ein sinnvolles Ribbild gewählten Betonstahlbewehrung für die Längs- und Querrichtung wurde ein üblicher Bewehrungskorb hergestellt. Anschließend erfolgte der Einbau des Hüllrohres im geplanten Verlauf mit Hilfe zusätzlicher Traversen. Bei allen Hüllrohren fand vor dem Einbau eine gründliche Untersuchung der Oberfläche auf Materialfehler bzw. Korrosionsansätze statt. Zum Einbau gelangten nur Hüllrohre in einwandfreiem Zustand.

Der Betoniervorgang erfolgte für die einzelnen Versuchskörper ohne Unterbrechung in mehreren Lagen. Gleichzeitig wurden zur Absicherung der gewünschten Betonqualität die nach DIN 4227, Teil 1 geforderten Frischbetonprüfungen vorgenommen und die notwendigen Probekörper für die Güte-

und Erhärtungsprüfung hergestellt. Alle Versuchskörper erhielten nach dem Ausschalen über einen angemessenen Zeitraum eine der Norm entsprechende Nachbehandlung. Die sich anschließende Lagerung fand bei einer Luftfeuchtigkeit von 35-45% und einer Raumtemperatur von im Mittel 20°C statt.

Die planmäßige Eintragung der gewünschten Vorspannkraft erforderte aufgrund der geringen Dehnwege zusätzliche Maßnahmen beim Vorspannvorgang.

Als Hilfsmittel diente hierfür die in Bild 33 gezeigte eigens dafür entwickelte Schraubvorrichtung. Mit ihr konnten Verluste aus Keilschlupf in den Verankerungsbereichen weitgehend kompensiert werden. Während des Vorspannvorganges war es damit möglich, durch kontrolliertes Überspannen und gleichzeitiges Nachstellen der Arretierungsvorrichtung den gewünschten Dehnweg genau aufzubringen. Gleichzeitig mit der Dehnwegmessung wurde die Kraft mittels Kraftmeßdose kontrolliert.

Um bei gleichen Querschnittswerten sowie gleichem Verhältnis A_v/A_s unter Oberlast eine Spannung von $0,55B_z$ bzw. $0,65B_z$ im Spannstahl zu erreichen waren unterschiedliche Vorspanngrade erforderlich. Als Vorspanngrad wurde für Balken 1 bis 6 ein Wert α von 0,45 gewählt, bei den Balken 7 bis 9 betrug der Vorspanngrad $\alpha = 0,55$. Die nach DIN 4227 Teil 2 zulässigen Spannungen des Spannstahls beim Vorspannen wurden damit nicht ausgenutzt.

Die Vorspannung wurde in einem Alter des Prüfkörpers von 60 Tagen aufgebracht. Die zu erwartenden Spannkraftverluste infolge Reibung bzw. Kriechen und Schwinden wurden nach DIN 4227 bestimmt und entsprechend berücksichtigt.

Direkt im Anschluß an den Vorspannvorgang erfolgte das Verpressen der Spannglieder. Für den Verpreßvorgang wurde eine elektrische Schneckenpumpe (Firma F. Seeberger GmbH) eingesetzt, die mit einem Druck von 1,5 bar arbeitete. Bei dem Ausbau der Spannglieder nach Versuchsende konnte eine ein-

wandfreie Vermörtelung der Spannglieder festgestellt werden.

4.2.4 Versuchseinrichtung

Die für das Versuchsprogramm verwendete Prüfeinrichtung ist in Bild 34 schematisch dargestellt. Aus versuchstechnischen Gründen war es notwendig, die einzelnen Prüfkörper in umgedrehter Lage von unten nach oben zu belasten. Die in Feldmitte eingetragene Einzellast wurde durch einen Einzelprüfzylinder (Hersteller MFL, max P dynamisch=240 kN), der mit einem hydraulischen 200 cm³ Pulser gekoppelt war, erzeugt. Der Prüfzylinder wurde am Lasteintragungspunkt mit Hilfe von Kugelkalotten gelenkig geführt. Die Lagerung der Balken selbst erfolgte an beiden Trägerenden gelenkig mit Rollslagern. Hiermit wurde das Auftreten möglicher Zwängungen während des dynamischen Belastungsvorganges verhindert.

In Bild 35 ist die Vorrichtung zur Lagerung der Balken in den Ruhephasen dargestellt. Hierbei erhielten die Träger zur Öffnung der Risse eine statische Vorbelastung durch übliche Zylinderpressen.

4.2.5 Meßverfahren und Meßwerterfassung

Zur Erfassung des Ermüdungsverhaltens der geprüften teilweise vorgespannten Prüfkörper war eine kontinuierliche meßtechnische Überwachung erforderlich. Dies konnte durch Einbau eines umfangreichen Meßprogrammes in den Versuchsablauf erzielt werden.

Zur Ermittlung der auftretenden Betonverformungen, wurde ein Setzdehnungsmesser (Typ: BAM-Setzdehnungsmesser Bauart Pfender) mit einer Meßbasis von 200 mm eingesetzt. Die gesamte Trägerlänge wurde hierzu in 18 Meßabschnitte unterteilt. Mit dieser Meßstrecke wurde die Vorder- und Rück-

seite des Trägers jeweils am oberen und unteren Rand versehen. Die Aufteilung und Bezeichnung der Meßstrecken ist in Bild 36 dargestellt.

Zur Berücksichtigung von Temperatur- und Schwindeinflüssen über den gesamten Versuchszeitraum wurde eine Kompensationsmessung mit Hilfe eines Altbetonkörpers und eines gleichzeitig mit den Versuchskörpern hergestellten Kompensationskörpers durchgeführt. Die weitgehende Ausschaltung von Fehlern in der Meßwertablesung konnte durch dreimalige Wiederholung jeder Messung erreicht werden.

Zur Kontrolle bzw. Beobachtung der Durchbiegung der Versuchsträger stand ein induktiver Wegaufnehmer zur Verfügung. Als Meßgröße diente die Durchbiegung in Feldmitte der Träger. Gemessen wurde jeweils die Gesamtdurchbiegung zum betrachteten Zeitpunkt unter Eigengewicht des Trägers (=Nullast) und unter den festgelegten Laststufen. Für die Auswertung des Verformungsverhaltens der einzelnen Träger bzw. bei der Bestimmung der Bruchzeitpunkte wurde die jeweilige Durchbiegungsdifferenz zwischen Nullast und betrachteter Laststufe verwendet. Damit konnten plastische Verformungsanteile, die sich während der Ruhephasen einstellten, weitgehend erfaßt werden.

Die Kontrolle und Überwachung der aufgebrachten äußeren Belastung erfolgte über eine zwischen Druckzylinder und Prüfkörper eingebaute Druckkraftmeßdose (Typ C2M, 50MP, Hersteller HBM). Die Meßwerte wurden mit Hilfe üblicher Digitalvoltmeter angezeigt.

Neben den Verformungsmessungen wurde für die spätere Auswertung das Ribbild der einzelnen Träger nach jeder Belastungsphase aufgenommen.

Die Ribbreitenmessung erfolgte in Höhe der oberen Dehnungsmeißkette mit einem Meßmikroskop (Ablesegenauigkeit 0,025mm, Hersteller: Leitz, Wetzlar). Die Ribbildaufnahme wurde sowohl für die Vorderseite als auch für die Rückseite durchgeführt. Dabei erhielt die sich in einzelnen Laststu-

fen einstellende Rißwurzel eine Kennzeichnung für die erreichte Laststufe und Lastspielzahl. Anschließend wurde das Rißbild mit Tusche nachgezeichnet und für eine fotografische Dokumentation vorbereitet.

Die beschriebenen Messungen erfolgten jeweils zu Beginn der Versuche und nach 100.000 Lastwechseln. Die einzelnen Laststufen wurden dabei jeweils statisch angefahren. Während jeder Meßserie fand zu Beginn und zum Abschluß als Ergänzung die Aufzeichnung der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit statt.

Für die Auswertung des Ermüdungsverhaltens der teilweise vorgespannten Prüfkörper ist der Zeitpunkt des Auftretens der einzelnen Ermüdungsbrüche von besonderer Bedeutung. Dies setzte eine kontinuierliche bzw. in kleinen Intervallen durchgeführte Überwachung der Prüfkörper voraus.

Für das hier erläuterte Versuchsprogramm kamen folgende Kontrollmöglichkeiten zur Anwendung:

- Regelmäßige Messung der Durchbiegung in Feldmitte der Träger;
- Regelmäßige Messung der oberen und unteren Randdehnung der Versuchskörper;
- Kontinuierliche akustische Überwachung der Versuchsanlage mittels Mikrofon und Rollenschreiber;
- Zeitweise Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Spanngliedüberwachung.

Während die ersten drei Möglichkeiten über den gesamten Versuchszeitraum genutzt wurden, mußte die Anwendung der Schallemissionsanalyse aus Kostengründen zeitlich eingeschränkt werden.

Die Auswertung ergab, daß die Ermittlung der Bruchzeitpunkte allein aus der Durchbiegungsmessung nicht möglich ist, weil die nach einem Drahtbruch auftretende

Druchbiegungsänderung stark von der weiteren Mitwirkung des gebrochenen Drahtes an der Lastaufnahme abhängt. Eine Mitwirkung in einem bestimmten Abstand von der Bruchstelle kann durch vorhandene Reib- und Verbundkräfte nach dem Drahtbruch insbesondere bei Litzen auftreten.

Eine verwertbare Aussage zum Zeitpunkt des Brucheintritts konnte nur im Zusammenhang mit der Dehnungs- und Reißbreitenmessung erzielt werden. Als sinnvolle Ergänzung stellte sich die akustische Überwachung mit Hilfe einer Mikrofonanlage und kontinuierlicher Aufzeichnung der Schallimpulse auf einem x-y-Rollenschreiber dar. Für eine möglichst weitgehende Elimination von Störgeräuschen erfolgte eine räumliche Abschirmung des verwendeten Schallaufnehmers.

Das nur zeitweise eingesetzte Verfahren der Schallemissionsanalyse bestätigte die Wirksamkeit der zuvor genannten Überwachungsverfahren. In ihrer Anwendung stellte sich die Schallemissionsanalyse als ein zuverlässiges Instrument für eine zeitlich beschränkte Überwachung von Spanngliedern heraus. Auf Grund des mit diesem Verfahren erzielten positiven Ergebnisses und einer sich daraus ergebenden sinnvollen Anwendung in der Bauüberwachung soll das Verfahren kurz beschrieben werden.

Die Durchführung der Schallemissionsanalyse erfolgte in Zusammenarbeit mit dem TÜV-Rheinland-Abteilung: Zerstörungsfreie Prüfverfahren; Projektleiter Dr. Runow.

Ziel bei Anwendung dieses Verfahrens war es durch Messung der Schallemission beim Auftreten eines Drahtbruches Ort und Zeitpunkt dieses Drahtbruches zu bestimmen.

Dazu wurde jede Spannstahllitze an beiden zugänglichen Enden mit je einem Schallemissions-Aufnehmer bestückt. Die hiermit erzielte lineare Ortungstechnik zwischen den beiden Spanngliedern wurde durch eine planare Ortungseinheit in Feldmitte ergänzt. Dazu wurden 4 Schallaufnehmer in Form

eines gleichseitigen Dreiecks mit einer Kantenlänge von 40 cm angeordnet, wobei der vierte Aufnehmer im Mittelpunkt des Dreiecks befestigt wurde. Die während der Messung durchzuführende Signalverarbeitung und Ergebnisdarstellung leistete ein Vielkanal-SE-Meßsystem, welches von jedem einzelnen Emissionsereignis mehrere Signalparameter ermittelte und die digitalen Meßgrößen zusammen mit der Ereignis-Nummer speicherte. Zusätzlich wurden die Werte externer Parameter, (z.B. der Belastungsverlauf) in Korrelation zu den SE-Meßgrößen erfaßt und gespeichert. Aufbau und Funktionsweise des Meßsystems werden durch das Bild 37 veranschaulicht. Die Ergebnisdarstellung erfolgte während der Messung auf dem Bildschirm des Meßsystems. Es stellte sich heraus, daß insbesondere durch die planare Ortung Drahtbrüche detektiert und lokalisiert werden konnten.

Die infolge Drahtbruch freigesetzte hohe Energie stellte die meßtechnischen Voraussetzungen für die Anwendung dieses Verfahrens dar. Eine sichere Überwachung eines dynamisch beanspruchten Bauwerkes kann bei geeigneter Weiterentwicklung als möglich angesehen werden.

4.2.6 Versuchsphasen und Belastungsgeschichte

Zu Beginn der Versuche erfolgte eine statische Belastung in gleichmäßigen Laststufen bis zur festgesetzten Oberlast. Jeweils nach Erreichen der einzelnen Laststufe fand die beschriebene Meßreihe statt. Anschließend wurde die dynamische Belastung ausgehend von einer zwischen Ober- und Unterlast liegenden Mittellast langsam aufgebracht. Die dynamische Belastung erhielt eine Frequenz von 2,8 Hertz. Damit konnten in einer täglichen 10-stündigen Belastungsphase 100.000 Lastspiele erreicht werden, wonach in der Belastungspause eine erneute Meßreihe erfolgte. Direkt im Anschluß wurden jeweils weitere 100.000 Lastwechsel aufgebracht. Nach einer abschließenden Meßserie erfolgte der Ausbau des Trägers aus der Versuchseinrichtung und die

Lagerung in einer Ruhepause von mehrwöchiger Dauer. Dieser Vorgang wiederholte sich für die weiteren Versuchskörper in gleicher Form bis zum Versuchsende. In Bild 38 sind die erläuterten Versuchsphasen für den Träger Nr.II/1 dargestellt.

Die Versuche wurden abgebrochen nach Überschreitung einer Durchbiegungsdifferenz zwischen Nulllast und Oberlast von 12 mm. Bis zu diesem Zeitpunkt lag ein Ermüdungsversagen von bis zu 50% der vorhandenen Drähte bzw. ein Betonstahlversagen vor.

Die Lagerung der Versuchsträger in den längeren Ruhephasen erfolgte in unmittelbarer Nähe des Versuchsfeldes. Die statische Vorbelastung der Träger wurde so gewählt, daß sich eine gewünschte Rißbreite von 0,20-0,25 mm einstellte. Diese Belastung wurde über die gesamte Ruhephase konstant gehalten. Die für diese Träger im Versuchsprogramm vorgesehene Feuchthaltung erfolgte durch regelmäßiges Besprühen mit normalem Leitungswasser und anschließendem Abdecken mit feuchten Tüchern. Die Kontrolle der relativen Luftfeuchtigkeit ergab Werte bis zu 90% relativer Luftfeuchtigkeit. In regelmäßigen Abständen wurden zur Schaffung eines Wechselklimas Austrocknungsphasen zwischengeschaltet.

4.3 Zusatzversuche für die Hüllrohrauswahl

4.3.1 Begründung

Für die Sicherung der Dauerhaftigkeit und dabei speziell des Korrosionsschutzes im Spannbetonbau ist das Hüllrohr von besonderer Bedeutung. Ein wichtiges Kriterium hierbei ist die Gewährleistung der Dichtigkeit des Hüllrohres unter den auftretenden Beanspruchungen. Die Rissefreiheit der Hüllrohre aus Stahlblech bei dynamischer Belastung ist bislang nur unzureichend betrachtet worden. Erste Untersuchungen lassen eine Schädigung des Hüllrohres im Rißbereich teilweise vorgespannter Bauteile als wahrscheinlich erscheinen. Vor Beginn der Reibermüdungsversuche erschien es daher sinnvoll, Kleinmodellversuche zum Vergleich unterschiedlicher Hüllrohrtypen im Hinblick auf ihre Rissebeständigkeit unter dynamischen Belastungen durchzuführen. Verlauf und Ergebnisse dieser Versuche sollen im folgenden dargestellt werden.

4.3.2 Versuchskörper und Versuchseinrichtung

Als Versuchsmodell diente das in Bild 39 dargestellte Betonprisma mit den Abmessungen $a/b/l = 15/15/50$ cm. Die zu untersuchende Hüllrohrprobe mit einem Außendurchmesser von 48 mm wurde zentrisch in das Betonprisma einbetoniert. Die Einleitung der dynamischen Schwellbelastung erfolgte über einen mittig arretierten Betonstabstahl Durchmesser 16 mm in der Stahlgüte Bst 500 S. Die Übertragung der Verbundkräfte vom Betonstahl auf den Betonkörper wurde durch Verpressen des Hüllrohres mit Zementmörtel sichergestellt. Die Herstellung erfolgte mit Portlandzement PZ 45 F unter Einhaltung eines W/Z-Wertes von 0,44. Die Betonfestigkeitsklasse betrug B 45, die Konsistenz beim Einbau entsprach der Gruppe KR.

Die überprüfte Festigkeitsentwicklung des Betons und des Mörtels entsprach in den durchgeführten Erhärtungsprüfungen den in den Normen geforderten Werten.

Eine Steuerung des Rißabstandes erfolgte mittels Rißvorgabe durch Dreikantleisten in einem Abstand von je 150 mm.

Die Ausführung der Versuche erfolgte mit einer Universalprüfmaschine (Typ UPD 60 mit elektrischem Regelteil, Hersteller: Mohr-Federhaff-Losenhausen) mit angeschlossenem 200 cm³ Pulsor.

4.3.3 Versuchsprogramm

Insgesamt wurden 7 Versuchskörper für das Versuchsprogramm hergestellt. In Bild 45 ist in einer Übersicht das Versuchsprogramm dargestellt.

Im Versuchsablauf wurden zu Beginn die Prüfkörper unter statischer Belastung langsam bis zum Aufreißen des Betonquerschnittes belastet. Die Belastung wurde soweit gesteigert bis sich eine Rißbreite von 0,2 mm einstellte. Die an dieser Stelle vorhandene Last stellte für die nachfolgende dynamische Belastung die Oberlast dar. Die Unterlast wurde so gewählt, daß sich in jedem Lastspiel eine Rißbreitenänderung von 0,1 mm ergab. Als maximal mögliche Frequenz für die Versuchsdurchführung standen 6 Hertz zur Verfügung.

Nach jeweils 100.000 Lastwechseln wurde unter statischer Belastung die sich ergebende Rißbreitenänderung zwischen Ober- und Unterlast kontrolliert. Eine infolge der zeitabhängigen Lockerung des Verbundes sich ergebende Vergrößerung der Rißbreite wurde durch Änderung der Unterlast korrigiert.

4.3.4 Versuchsergebnisse

Nach Beendigung der Versuche erfolgte das Freilegen der Hüllrohre durch Aufspalten der Betonprismen. Zur leichteren Untersuchung der Hüllrohroberflächen wurde die Probe unter eine geringe Zugbeanspruchung gesetzt. Mit Hilfe der Meßlupe konnten so aufgetretene Risse verfolgt und markiert werden. In den Bildern 41 und 42 ist als Beispiel das Ergebnis für den Versuch Nr. 1 mit einem längsgeschweißtem Hüllrohr wiedergegeben. Deutlich ist als Rißausgang die durch den Schweißvorgang erzeugte Störungsstelle im Querschnitt zu erkennen. Hier bestätigte sich, daß gerade die Randbereiche von Schweißstellen infolge des gestörten Metallgefüges als Rißausgangsstelle dienen. Da bei allen 3 Versuchskörpern mit längsgeschweißtem Hüllrohr nach 2 Millionen Lastwechseln ein umlaufender Trennriß festgestellt wurde, erfolgte die anschließende Untersuchung der gefalzten Hüllrohre auch mit geringeren Lastspielzahlen. Dabei wurden die 4 Lastspielbereiche 0,1; 0,5; 1,0 und 2×10^6 Lastwechsel untersucht. Der Beginn der Rißbildung wurde nach Überschreiten von 500.000 Lastwechseln festgestellt. Bei den gefalzten Hüllrohren konnte als Rißausgangsstelle die durch die Deformation beim Falzvorgang stärker beanspruchte Falznaht beobachtet werden.

4.4 Zusatzversuche - Spannbettbinder

4.4.1 Begründung

Reibermüdungsschäden sind neben der dynamischen Beanspruchung an die gleichzeitige Wirkung hoher Kontaktpressungen in den Reibflächen gekoppelt die in der Regel aus der gekrümmten Führung der Spannglieder resultieren. Bei der Spannbettvorspannung mit in der Regel gerader Führung treten große Umlenkkräfte nicht auf. Zusätzlich entfallen hier die bei Reibdauerbeanspruchung als Reibpartner dienenden Hüllrohre. Als Ergänzung zu den in diesem Bericht vorgestellten Versuchen mit nachträglichem Verbund und gekrümmter Spanngliedführung sollten Spannbettbinder auf eventuell doch auftretende Reibermüdungs- bzw Reibkorrosionvorgänge hin überprüft werden. Hierzu wurden zusätzlich zu den im Reißbereich vorhandenen Reibstellen mit dem Beton weitere Kontaktstellen zwischen Spannstaahl und Bügelbewehrung planmäßig geschaffen und untersucht.

Forschungsarbeiten zur Spannbettvorspannung wurden bislang vor allem im englischen Sprachraum durchgeführt. Hierbei kamen im wesentlichen Litzenspannglieder zur Anwendung. Aus diesen Arbeiten ist bereits erkennbar, daß die Dauerfestigkeit einbetonierter Litzen bei Vorspannung mit sofortigem Verbund nur geringfügig unter den entsprechenden Werten für die freischwingend geprüfte Litze liegt. Dieses Ergebnis sollte in den Ergänzungsversuchen für gerippte bzw. profilierte Spannstähle überprüft werden.

4.4.2 Versuchskörper und Belastungsgeschichte

In Bild 43 sind die Abmessungen sowie die Bewehrung der geprüften Versuchskörper dargestellt. Es wurden 3 Versuchskörper mit der Bezeichnung DA01, DA02 und DA03 in einer Länge von 5,00 m und gegliedertem Querschnitt ($b/d = 20/40$ cm) hergestellt.

Die Aufbringung der Vorspannkkräfte erfolgte über vergütete Spannstähle St 1420/1570 mit einem Durchmesser von 7,2 mm.

Die Betonsorte entsprach der Betongüteklasse B 45.

Der Versuchsaufbau ist in Bild 44 skizziert. Die Lagerung erfolgte zwängungsfrei auf beweglichen Rollenlagern. Zur Belastung wurde die bereits beschriebene Pulsoranlage verwendet. Die Eintragung der Belastungen erfolgte über eine Traverse in den Drittelpunkten des Prüfkörpers. Die Versuche begannen mit einer stufenweisen statischen Laststeigerung bis zur Oberlast. Die Belastung wurde so gewählt, daß sowohl bei Oberlast als auch bei Unterlast planmäßig der Zustand II vorlag. Die Schwingbreite wurde ausgehend von kleinen Werten jeweils nach 2×10^6 Lastwechseln stufenweise erhöht bis zum Versagen der Träger.

Zur Erfassung des Dehnungsverhaltens wurden am oberen und unteren Rand Meßstrecken mit einer Basislänge von 500 mm vorgesehen. Die Dehnungsmessungen und die Messung der Durchbiegung in Feldmitte erfolgte im statischen Belastungsvorgang nach Erreichen festgelegter Laststufen in regelmäßigen Abständen. Gleichzeitig erfolgte die Aufnahme und Registrierung des Rißbildes.

4.4.3 Versuchsergebnisse

Für die Auswertung der Versuche sollen hier nur die Ergebnisse für den Betonstahl bzw. den Spannstahl wiedergegeben werden. Die Auswertung von Rechnung und Messung der ertragbaren bzw. zum Bruch führenden Spannungsamplituden ist in Bild 45 zusammengefaßt. Hierin sind auch die im Versuch betrachteten Spannungsamplituden erkennbar, außerdem ist eingetragen die Wöhlerlinie für den Spannstahl. Als wesentliches Ergebnis läßt sich nur eine geringfügige Abweichung der ertragbaren Schwingbreite von den im freischwingend geprüften Zustand erreichten Werten feststellen. Außerdem

konnte kein wesentlicher Einfluß von Reibkorrosionsvorgängen an den künstlich geschaffenen Reibstellen zwischen Spannstahl und Betonstahl festgestellt werden. Als Grenzlastspielzahl lag den Versuchen die übliche Annahme von $n = 2 \times 10^6$ Lastwechsel zugrunde. Die Tatsache, daß bei vorhandenen Reibkorrosioneinflüssen Drahtbrüche auch noch bei höheren Lastspielzahlen auftreten können, ist durch die beim Träger DA03 insgesamt aufgebrauchte Lastspielzahl von $n = 6,8 \times 10^6$ Lastwechseln im Ansatz erfaßt worden.

Alle Dauerbrüche traten stets im Betonrißquerschnitt auf, wobei die Betonrisse mit wenigen Ausnahmen vom Bügel ausgingen.

Zusätzlich zu den festgestellten Dauerbrüchen im Spannstahl wurden in allen Trägern an verschiedenen Stellen auch Dauerbrüche im Betonstahl festgestellt. Zur Klärung der Ursache der Betonstahlbrüche wurde die Dauerschwingfestigkeit des Betonstahls zusätzlich im freischwingenden Zustand untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 46 eingetragen. Aus den Ergebnissen ist zu schließen, daß eine eventuelle Vorschädigung der Betonstähle nicht vorlag. Als Hauptursache für das Versagen der Betonstähle ist zum einen die hohe vorliegende Dauerschwingbeanspruchung in der letzten Versuchsphase, sowie als zweite Ursache eine Umlagerung der Spannungen vom Spannstahl zum Betonstahl zu nennen. Die Größe der Umlagerung ist abhängig vom Verhältnis der aufnehmbaren Verbundspannungen von Beton- und Spannstahl sowie vom Verhältnis A_v/A_s . Hierdurch erreichte der Betonstahl bereits die Grenze der ertragbaren Dauerschwingfestigkeit. Im übrigen können die im Rißbereich auftretenden Reibbewegungen zu zusätzlichen Beanspruchungen für den Betonstahl geführt haben. Als Ergebnis kann festgestellt werden, daß Reiberermüdungs- bzw. Reibkorrosionsvorgänge bei Anwendung der Spannbettvorspannung mit gerader Spanngliedführung nicht zu einer nennenswerten Abminderung der ertragbaren Dauerschwingfestigkeit führen.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Allgemeines

Die im gesamten Versuchszeitraum ermittelten Meßwerte wurden überwiegend auf Datenträger institutseigener PC-Computer abgespeichert. Diese Werte lieferten die Grundlage für die weiteren Auswertungen und zeichnerischen Darstellungen.

Für die Darstellung und Diskussion der ermittelten Ergebnisse wird eine Unterteilung in drei Themengebiete gewählt.

Zunächst wird das Ermüdungsverhalten der neun Versuchsträger im Abschnitt 5.2 erläutert.

Im Abschnitt 5.3 erfolgt eine Beschreibung des beobachteten Reiß- und Formänderungsverhaltens der dynamisch belasteten Bauteile.

Den dritten Teil bildet eine detaillierte Schadensanalyse und Werkstoffuntersuchung der durch die Ermüdungsbeanspruchung geschädigten Baustoffe im Abschnitt 5.4..

5.2 Ermüdungsverhalten der teilweise vorgespannten Biegeträger

Erwartungsgemäß war für das Ermüdungsverhalten der einzelnen Versuchsbalken das Verhalten des Spannstahls und Betonstahls maßgebend. Ein Ermüdungsversagen der Betondruckzone trat in keinem Versuchsbalken auf.

Während ein Ermüdungsversagen des Betonstahls stets von einer deutlichen Vergrößerung der Rißbreite begleitet wurde, bewirkte das Ermüdungsversagen einzelner Litzendrähte nur kaum feststellbare Formänderungen des Prüfkörpers. Für die Ermittlung der Bruchzeitpunkte der Litzendrähte war deshalb die in Abschnitt 4 erläuterte aufwendige Überwachung der Versuchskörper während des gesamten Versuchszeitraumes erforderlich.

Das Ergebnis dieser kontinuierlichen Überwachung ist in Tafel 5.1 aufgelistet. Dort sind die erreichten Lastspielzahlen der beobachteten Ermüdungsbrüche in den Litzendrähten zusammengestellt. In der Aufteilung der einzelnen Drahtbrüche auf die vorhandenen 3 Litzen stellte sich fast ausschließlich eine Gefährdung der zwei am Hüllrohr anliegenden Litzen heraus, was aus Bild 47 eindeutig zu entnehmen ist. In der nicht anliegenden Litze 3 ist nur ein einziger Ermüdungsbruch aufgetreten, wobei als Reibflächen die Berührungsstellen zwischen den einzelnen Drähten wirkten.

In den fünf Träger II/2 bis III/3 trat zusätzlich das Versagen eines einzelnen Betonstahles auf. Hierbei konnte ebenfalls Ermüdung als Versagensursache festgestellt werden. Der Bruch des Betonstahls war eine Folge bereits vorhandener Dauerbrüche des Spannstahls im gleichen Querschnitt. Auslöser für den Betonstahlbruch war im wesentlichen die durch das Versagen einzelner Litzendrähte eintretende Spannungserhöhung im restlichen Stahlquerschnitt. Diese Vergrößerung trat sowohl in der absoluten

Höhe der Spannung als auch in der Höhe der Spannungsamplitude ein. Die Spannungserhöhung im Betonstahl wurde verstärkt durch auftretende Kräfteumlagerungen zwischen Spann Stahl und Betonstahl, die aus dem ungleichen Verbundverhalten der Litze im Vergleich zum verwendeten Betonstahl resultierten.

Infolge der gleichbleibenden Krümmung des Spanngliedes lag keine konzentrierte Reibdauerbeanspruchung für einzelne Trägerquerschnitte vor, vielmehr konnte hierdurch ein größerer Bereich mit konstanter Reibdauerbeanspruchung geprüft werden. Die Beanspruchung für die einzelnen Trägerquerschnitte unterschied sich nur durch die über die Trägerlänge veränderliche Spannungsamplitude, die aus der Belastung der Träger durch die mittige Einzellast resultierte. Als Folge dieser Beanspruchungsverhältnisse traten die Ermüdungsbrüche nicht konzentriert in einzelnen Trägerquerschnitten auf, sondern verteilt über einen größeren Trägerabschnitt. In Bild 48 ist die Lage der Dauerbrüche in den Spanndrähten innerhalb der Trägerlänge dargestellt. Dabei ist insbesondere bei den Trägern 1 und 2, die mit niedriger Spannungsamplitude geprüft wurden, eine gleichmäßige Verteilung der Drahtbrüche zu erkennen. Ein Auftreten mehrerer Drahtbrüche in einem Querschnitt konnte nur bei mittleren bzw. hohen Spannungsamplituden beobachtet werden. Die einzelnen Drahtbrüche traten stets im Reißquerschnitt des Betons bzw. in unmittelbarer Nähe hierzu auf. Die im Reißbild feststellbare Korrelation zum verwendeten Bügelabstand von 12,5 cm findet sich daher auch in der Darstellung der Lage der Dauerbrüche wieder.

Für die Beschreibung der ertragbaren Ermüdungsbeanspruchung wird im allgemeinen der Zusammenhang zwischen eingeleiteter Spannungsamplitude und ertragener Lastspielzahl verwendet.

Untersuchungen von Oertle haben ergeben, daß die rechnerisch ermittelte Spannungsamplitude nicht gleichmäßig über den Litzenquerschnitt wirkt, sondern infolge einer Span-

nungsumlagerung eine von der Lage des betrachteten Litzen-
drahtes abhängige Änderung der Spannungsamplitude auftritt.
Als Ursache wird die Wirkung von Reibungskräften zwischen
den einzelnen Kontaktflächen genannt.

Neben diesen Umlagerungen im Querschnitt der Litze wird die
Spannungsamplitude durch die eintretenden Ermüdungsbrüche
beeinflusst, da jeder Drahtbruch mit einem gewissen sprung-
haften Anstieg der im Restquerschnitt wirkenden Span-
nungsamplitude verbunden ist. Die mit einem Drahtbruch
freigesetzte Energie führt zu einem teilweisen Ausfall des
Verbundes dieses gerissenen Einzeldrahtes. Damit ist eine
nur noch eingeschränkte Beteiligung des Drahtes an der
Lastaufnahme im übrigen Bereich des Trägers verbunden. Die
Folge ist ein Anstieg der Spannungsamplitude im benachbar-
ten Bereich. Zusätzlich tritt durch den Drahtbruch in
diesem Bereich eine geringfügige Verringerung der vorhan-
denen Vorspannkraft auf. Unter Beachtung dieser Einflüsse
sind in den Bildern 49 bis 57 die Ergebnisse der Ermüdungs-
untersuchung der neun Versuchsträger zusammengestellt.

Für alle Träger sind die festgestellten Ermüdungsbrüche in
den Litzen aufgetragen, gekennzeichnet durch die erreichte
Lastspielzahl zum Bruchzeitpunkt und die zu diesem
Zeitpunkt wirkende Spannungsamplitude im Spannstahl. Aus
den Darstellungen sind gleichzeitig die Zahlenwerte der in
Trägermitte ($x=1,80\text{m}$) jeweils wirkenden Spannungsam-
plitude zu entnehmen.

In der Veränderung der Spannungsamplituden zeigt sich der
jeweils sprunghafte Anstieg nach Eintritt eines Draht-
bruches. Diese höheren Spannungsamplituden wurden - wie an
den Treppenkurven in den Darstellungen zu erkennen - durch
den verbleibenden Restquerschnitt über einen längeren Zeit-
raum ohne weiteren Drahtbruch aufgenommen. Die Begründung
hierfür liegt in einer mit dem Drahtbruch eintretenden
Verringerung der Reibdauerbeanspruchung des entsprechenden
Querschnittes. An die Stelle des ausfallenden Einzeldrahtes

tritt dort eine Lastabtragung über die beiden benachbarten Drähte ein, womit eine deutliche Reduzierung der Reibdauerbeanspruchung verbunden ist. Die Verringerung der Reibdauerbeanspruchung in diesem Trägerquerschnitt ist mit einer Verlagerung der maximalen Reibermüdungsbeanspruchung in benachbarte Trägerquerschnitte verbunden. Erst zu einem späteren Zeitpunkt kommt es an diesen Stellen dann zu weiteren Ermüdungsbrüchen. Maßgebend für den folgenden Ermüdungsbruch ist die Trägerstelle x mit der ungünstigsten Kombination aus dynamischer Schwingbelastung und Reibdauerbeanspruchung.

In der Übertragung auf Bauwerksverhältnisse ergibt sich daraus die wichtige Erkenntnis, daß ein Ausfall einzelner Litzendrähte nicht zu einer wesentlichen Verringerung der ertragbaren Ermüdungsbeanspruchung des gesamten Spanngliedes führt. Ein unter Umständen zu erwartender "Reißverschlußeffekt" kann aufgrund der Versuchsergebnisse eindeutig ausgeschlossen werden. Das beschriebene Verhalten der Litzenspannglieder ist in bestimmten Punkten vergleichbar mit dem Ermüdungsverhalten großformatiger Tragseile. Auch dort tritt ein Versagen einzelner Drähte auf, ohne daß dadurch die Tragfähigkeit des gesamten Seiles wesentlich beeinträchtigt wird.

Neben der eigentlichen Ermüdungsuntersuchung der teilweise vorgespannten Versuchsbalken war die Überprüfung des Einflusses eines erhöhten Feuchtigkeitsangebotes auf die Reibermüdung Bestandteil des Untersuchungsprogrammes. Wie in Abschnitt 4 erläutert, wurde hierfür ein Teil der Träger einer regelmäßigen künstlichen Bewitterung ausgesetzt.

In der Auswertung ergab sich ein stärkerer Abfall der Dauerschwingfestigkeit für den unter trockenen Bedingungen geprüften Spannstahl. Die trockene Reibung erzeugt im Vergleich zur feuchten Reibung die stärkere Reibdauerbeanspruchung.

Als Ursache tritt eine Verbesserung der in den Kontaktflächen vorliegenden Gleitbedingungen auf.

Eine weitere Ursache liegt darin, daß die in den Kontaktflächen gebildeten Oxide unter Feuchtigkeitzufuhr eine geringere Härte aufweisen als bei "trockener Oxidbildung". Die unter trockenen Randbedingungen entstehenden härteren Oxidpartikel führen während des Reibvorganges zu einem verschärften Angriff der beteiligten Oberflächenbereiche. Die Folge ist ein Anstieg des Verschleißes in diesen Kontaktzonen mit dem Ergebnis früher einsetzender Ermüdungsrisse.

5.3 Formänderungs- und Rißverhalten der dynamisch belasteten Versuchsbalken

Die Beschreibung des Formänderungsverhaltens der Versuchsbalken erfolgt mit Hilfe der in Trägermitte gemessenen Durchbiegungen, die in den Tafel 5.2 bis 5.10 für die jeweils gemessenen Laststufen zusammengestellt sind. Die angegebenen Werte stellen dabei die Gesamtdurchbiegung einschließlich auftretender plastischer Verformungsanteile dar. Als Nulllast für die Messungen diente die Laststufe $P = 15 \text{ kN}$; die weiteren Messungen erfolgten in regelmäßigen Laststufen bis zum Erreichen der Oberlast.

Für den Balken I/2 ist das Ergebnis der Durchbiegungsmessungen in Bild 58 graphisch dargestellt. Dabei ist exemplarisch für die einzelnen Laststufen die Entwicklung der Durchbiegung bei steigender Lastspielzahl aufgezeichnet.

In der Darstellung ist die zu Beginn des Versuches vorliegende höhere Biegesteifigkeit zu erkennen. Danach ergibt sich eine von der Lastspielzahl und eintretenden Drahtbrüchen abhängige fortlaufende Verringerung der Biegesteifigkeit. Während zu Beginn der Versuche die eintretende Rißbildung für die Vergrößerung der Durchbiegung verantwortlich ist, führen in der dynamischen Belastungsphase die Lockerung des Verbundes und eintretende Ermüdungsbrüche zu einem weiteren Anstieg der Durchbiegung. Diese Tendenz wird verstärkt durch die bei dynamischer Belastung auftretende Verringerung des Elastizitätsmoduls des Betons.

Die Feststellung, daß gebrochene Litzendrähte sich infolge Reib- und Verbundwirkung in einem bestimmten Abstand von der Bruchstelle wieder an der Lastaufnahme beteiligen, erklärt die zunächst überraschende Beobachtung, daß sich Drahtbrüche nur unwesentlich in den Durchbiegungsordinaten bemerkbar machen.

Die Auswertung der Dehnungsmessungen am oberen und unteren Rand in Trägermitte bestätigten das zuvor beschriebene Verformungsverhalten der Prüfkörper. Die Ergebnisse der regelmäßigen Dehnungsmessungen sind in den Tabellen 5.11 bis 5.19 zusammengestellt. Dabei sind exemplarisch nur die Werte für die mittleren Meßstrecken jeweils unter Unterlast P_u und Oberlast P_o aufgeführt. Die mit Hilfe der Setzdehnungsmessung ermittelten Längenänderungen wurden in den Tabellen bereits in entsprechende Dehnungswerte umgerechnet.

Sämtliche weiteren Meßergebnisse sind am Institut für Massivbau archiviert und werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht mit aufgeführt.

In Bild 59 sind die Dehnungen für den Versuchskörper I/1 unter Belastung mit der für den dynamischen Versuch gewählten Unterlast dargestellt. Deutlich ist auch für die Dehnungen ein Anstieg der Werte mit steigender Lastspielzahl festzustellen. Die Wirkung der dynamischen Beanspruchung auf die Dehnungsänderung schwächt sich im Bereich hoher Lastspielzahlen ab.

Aus diesen an den Betonoberflächen gemessenen Dehnungen kann nicht direkt auf die im Stahl vorhandenen Spannungen geschlossen werden, da diese Werte die mittlere Dehnung der 200 mm langen Meßstrecken angeben. Für die Ermittlung der maximalen Stahlspannungen sind die im Rißquerschnitt auftretenden maximalen Stahldehnungen maßgebend. Die mit steigender Lastspielzahl eintretende Änderung der Verbundspannungsverteilung im näheren Rißbereich ist mit einer Änderung der Dehnungsverteilung in Längsrichtung des Bewehrungsstabes verbunden.

Eine direkte Messung der Stahldehnungen konnte aus meßtechnischen Gründen nicht erfolgreich durchgeführt werden. Für die Dehnungsmessungen in Litzenspanngliedern unter dynamischer Belastung haben sich die bislang verwendeten Verfah-

ren (z.B. mit Dehnungsmeßstreifen) als nicht anwendbar erwiesen.

Als Ergänzung zur gemessenen Durchbiegung und Dehnung der einzelnen Versuchsbalken wurde im gesamten Versuchszeitraum die Rißentwicklung und das sich ergebende Rißbild beobachtet. Dies erfolgte durch sorgfältige Rißbreitenmessung und Markierung des zeitlichen und räumlichen Rißverlaufes. In den Bildern 60 und 61 ist das bei Versuchsende vorliegende Rißbild dargestellt. Durch das in den Versuchen gewählte Bewehrungsverhältnis von $A_V/A_S = 1,85$ konnte eine ausreichende Rißbreitenbeschränkung erzielt werden. Das Ziel, während der Versuche die Rißbreiten auf Größen zwischen 0,20 bis 0,25 mm weitgehend einzuschränken konnte für die Anfangsphase der Versuche damit erreicht werden. Die dynamische Belastung führte jedoch zusammen mit eintretenden Drahtbrüchen zu einem weiteren Anwachsen der Rißbreiten. In der Tafel 5.20 sind die Ergebnisse der Rißbreitenmessung exemplarisch für den Träger I/1 unter Oberlast zusammengestellt. Mit zunehmender Entfernung von der Feldmitte nahmen diese Werte in Abhängigkeit von der eingetragenen äußeren Momentenbeanspruchung stark ab. Die beobachteten Rißabstände entsprachen im wesentlichen dem Bügelabstand von 12,5 cm. Die während der dynamischen Belastung eintretende Verbundlockerung konnte auch hier durch einen Anstieg der Rißbreiten bestätigt werden. Die Vergrößerung der Rißbreiten war verbunden mit einem Anstieg der Rißlänge. Nach entsprechender dynamischer Belastung erreichte die Rißwurzel den Plattenanschnitt. Die an dieser Stelle vorhandene Querschnittsaufweitung ergab im weiteren Versuchsverlauf nur noch eine geringfügige Vergrößerung der Rißlänge.

Ein erheblicher Anstieg der Rißbreite konnte stets in Verbindung mit dem Versagen einzelner Betonstähle beobachtet werden, während Ermüdungsbrüche der Litzendrähte nur vereinzelt zu einem deutlichen Anwachsen der Rißbreite führten. Hier beschränkte sich der Anstieg der Rißbreite nicht auf den Rißquerschnitt, in dem auch der Stahlbruch auftrat,

vielmehr konnte eine Verteilung auf mehrere RiBquerschnitte festgestellt werden.

Die Beobachtung und Auswertung des RiBverhaltens aller Versuchsträger bestätigten die für das RiBverhalten von teilweise vorgespannten Bauteilen erwarteten Abhängigkeiten.

Danach können als wichtigste Einflußgrößen auf die RiBentwicklung und RiBbreite folgende Faktoren genannt werden:

- Stahlspannung oberhalb der Dekompression;
- Oberflächenausbildung der Bewehrung;
- Verbundgüte zwischen Stahl und Beton;
- Größe der Betonzugzone;
- Zusammensetzung der Bewehrung, Verhältnis A_V/A_S ;
- Betonzugfestigkeit;
- Vorspanngrad;
- Belastungsgeschichte (statisch/dynamisch).

Unter Beachtung dieser Einflußgrößen in der rechnerischen Untersuchung des RiBbildes kann eine wirklichkeitsnahe Vorhersage der RiBbreiten erreicht werden.

5.4 Schadensanalyse und Werkstoffuntersuchung

5.4.1 Allgemeines

Die Analyse der Schädigungsvorgänge als Folge der Reibermüdungsbeanspruchung setzt eine eingehende Untersuchung der einzelnen Schadensstellen unter Einschluß der näheren Umgebung voraus.

Als Grundlage für die Herleitung eines Schädigungsablaufes dient die nachfolgende makroskopische Bruchuntersuchung.

Wesentliche Hinweise für die Versagensursache insbesondere der Litzendrähte ergibt die sich anschließende makroskopische Bruchuntersuchung.

5.4.2 Makroskopische Bruchuntersuchung

In der folgenden Darstellung der makroskopischen Bruchuntersuchung werden die Ergebnisse getrennt nach den Einzelbestandteilen Hüllrohr, Spannstahl und Betonstahl wiedergegeben.

Bei der Untersuchung der Hüllrohre konnten an verschiedenen Stellen Ermüdungsrisse festgestellt werden. Die Risse traten jeweils im Bereich des Betonrißquerschnittes auf und sind eine Folge der während der Versuche erzeugten dynamischen Rißbreitenänderung. Im Vergleich der spiralgefalteten Hüllrohre mit den längsgeschweißten Hüllrohren ergab sich kein wesentlicher Unterschied. Beide Hüllrohrtypen bestätigten das Ergebnis der Zusatzversuche, wonach bei beiden Typen mit einzelnen Ermüdungsrisen unter dynamischer Belastung und gerissenem Betonquerschnitt gerechnet werden mußte. Im Hinblick auf den Korrosionsschutz ist die Wirkung des Hüllrohres daher zurückhaltend zu beurteilen.

Als Schwachstelle für den Ermüdungsanriß stellte sich bei den längsgeschweißten Hüllrohren der Bereich der Schweißstelle dar. Die durch den Schweißvorgang ausgelöste Aufhärtung des Gefüges kann als Ursache für ein spröderes Bruchverhalten in diesem Bereich angesehen werden. Die Randbereiche der durch den Schweißprozeß im Gefüge veränderten Zonen stellen bekanntlich ermüdungsgefährdete Bereiche dar.

In den spiralgefalteten Hüllrohrtypen kann ein ähnlicher Schädigungsvorgang beobachtet werden. Hier trat als Ausgangspunkt für den Ermüdungsriß der Falzbereich auf. An dieser Stelle kann die plastische Verformung, welche durch den Herstellprozeß bedingt ist, für die Schwachstelle im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit verantwortlich gemacht werden.

Zusätzlich zu den genannten Ermüdungsschäden konnten am Hüllrohr im Bereich der Betonrisse unterschiedlich ausge-

prägte Korrosionserscheinungen festgestellt werden (Bild 62 und 63). Diese Korrosionsansätze standen in Zusammenhang mit der Wechsellagerung einzelner Versuchskörper. Bei den trocken gelagerten Versuchskörpern konnten diese Korrosionserscheinungen nicht festgestellt werden. Die betroffenen Zonen der Hüllrohraußenseiten erstreckten sich zum Teil über den gesamten Umfang des Hüllrohres. Die beobachtete Ausbreitung der mit Korrosionsprodukten behafteten Oberflächenbereiche in Längsrichtung des Hüllrohres lassen eine Ablösung des Hüllrohres vom Beton erkennen. Die Ausdehnung dieser geschädigten Bereiche war von der Höhe der aufgetragenen Spannungsamplitude abhängig. Durch die dynamische Belastung wird der Transport der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit in den vorhandenen Spalt gefördert. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit einem sogenannten "Pumpeffekt", bei dem durch dynamische Vorgänge Feuchtigkeit in Hohlräumen weiter transportiert wird.

An den Innenseiten der Hüllrohre konnte nur vereinzelt geringe Korrosionsansätze festgestellt werden.

Neben diesem im wesentlichen durch die Wechsellagerung erzeugten Angriff der Hüllrohroberflächen konnte an den Reibstellen zwischen Spannstahl und Hüllrohr das typische Auftreten von Reibkorrosionsprodukten festgestellt werden. Reibkorrosion trat nur örtlich begrenzt im Kontaktbereich beider Reibflächen auf. Auf die beobachtete Reibkorrosion wird im nächsten Abschnitt noch ausführlicher eingegangen.

An dieser Stelle soll nachfolgend das Bruchverhalten der Spannstahlritzen näher beschrieben werden. Eine Aufteilung der Dauerbrüche in den Litzen nach dem Ort des Bruchausganges ergab, daß die Mehrzahl der Dauerbrüche von den Berührungsstellen Hüllrohr/Litze ausgingen. Die Ursache liegt in einer größeren Relativverschiebung in diesen Reibflächen sowie in einer nur punktförmigen Ausdehnung der Kontaktflächen im Gegensatz zur linienförmigen Ausbreitung an den Berührungsstellen zwischen Außen- und Innendraht der

Litze. Bild 64 ist ein Beispiel für einen typischen Bruchausgang in der Kontaktzone Litze/Hüllrohr. Als Ergänzung werden in den Bildern 65 und 66 Dauerbrüche der noch im Einpreßmörtel befindlichen Litze gezeigt. In diesen Aufnahmen sind zusätzlich weitere Reibstellen an der Spannstahl-Litze zu erkennen, die jedoch nicht zum Bruch des Litzendrahtes geführt haben.

Alle Bruchstellen zeigen das in Abschnitt 5.4.3 noch näher zu erläuternde Auftreten der sogenannten "Bruchnase". Diese markiert mit ihrem geneigten Verlauf die Bruchausgangsstelle und deutet durch den Verlauf bereits auf ein typisches Versagen durch gleichzeitige Wirkung von Zug- und Schubspannungen hin. Im Oberflächenbereich der Bruchnase war stets ein Angriff durch Reibkorrosion zu beobachten. Diese Reibkorrosionserscheinung findet sich an gleicher Stelle im Hüllrohr wieder. Im Vergleich der unter trockenen Bedingungen bzw. feuchten Bedingungen geprüften Träger läßt sich, wie in den Bildern 67 und 68 zu sehen, eine stärkere Ansammlung von Korrosionsprodukten bei den der Bewitterung ausgesetzten Versuchsbalken feststellen. Die gleiche Erscheinung kann auch an den Kontaktstellen der Litzendrähte untereinander festgestellt werden mit dem Unterschied, daß dort die Kontaktzonen linienförmig ausgebildet sind. Die verstärkte Ansammlung von Korrosionsprodukten ist deutlich zu erkennen. Die verstärkte Ausbildung der Korrosionsprodukte kann als Hinweis dafür angesehen werden, daß die im Betonrißquerschnitt eingedrungene Feuchtigkeit als Folge der zyklischen Relativbewegung der einzelnen Drähte in Längsrichtung in die Litze eindringt. Überschüssige Feuchtigkeit aus dem Verpreßvorgang kann als Ursache ausgeschlossen werden, da die genannten verstärkten Korrosionserscheinungen in trocken geprüften Probekörpern nicht auftraten.

Als weiteres Indiz für die im Innern der Litze ablaufende Reibkorrosion können die rötlich-braunen pulverförmigen Ablagerungen im Bereich der Reibspur angesehen werden. Sie

werden in der Literatur als Reibrost bezeichnet. Die Zusammensetzung dieses Reibrostes wird im nächsten Abschnitt näher erläutert. Diese Reibkorrosionsvorgänge konnten in allen Kontaktpunkten zwischen Spannstahl und Hüllrohr nachgewiesen werden, in denen zyklische Relativbewegungen der Kontaktflächen auftraten.

Das Ausmaß des Reibkorrosionsangriffes verstärkt sich mit der Länge der Versuchsdauer, wie ein Vergleich unterschiedlicher Proben beweist.

Hervorzuheben ist an dieser Stelle, daß eine Schädigung der Spannstahloberfläche durch Reibkorrosion nicht nur im direkten Betonrißquerschnitt beobachtet wurde, sondern auch in Bereichen seitlich des Betonrisses (Bild 69). Die Beanspruchung führte hier jedoch nicht zu einem Ermüdungsversagen des Spannstahls. Das Auftreten von Reibkorrosion in den Bereichen zwischen den Rissen ist ein Zeichen dafür, daß auch dort eine Relativbewegung zwischen Spannstahl und Hüllrohr stattgefunden hat. Diese Bewegung kann jedoch nur bei teilweiser Lockerung des Verbundes auftreten, womit der in Abschnitt 5.2 für die Spannungsermittlung angesetzte teilweise Verlust des Verbundes bestätigt werden kann.

Die Untersuchung der Betonstahlbewehrung bestätigte das aus der Rißentwicklung des Prüfkörpers abgeleitete Ergebnis eines Ermüdungsbruches in einzelnen Betonstählen bei den Versuchsbalken II/2 bis III/3. Der Ausgangspunkt der Betonstahlbrüche lag stets im Bereich der maximalen Momentenbeanspruchung im Rißbereich des Betonquerschnittes. Als Bruchursache war auch hier ein Versagen infolge Ermüdung erkennbar (Bild 70 und 71). Der Ermüdungsbruch des Betonstahls war eine Folge bereits eingetretener Dauerbrüche in der Litze. Die hiermit verbundene Erhöhung der Spannungsamplitude und der Oberspannung im Stahlquerschnitt führte zu einer Überbeanspruchung des Betonstahls.

Ausgangspunkt des Dauerbruches im Betonstahl stellten, wie auch in /101/ beschrieben, Kerbwirkungen an der Oberfläche

des Betonstahls dar. Die Ursache dieser Kerbwirkungen liegt im Herstellverfahren begründet. Dort werden durch die beim Walzvorgang entstehenden Oberflächenkerben bzw. durch die aufgewalzte Profilierung Kerbwirkungen geschaffen.

Für den Betonstahl konnte keine Schädigung infolge Reibdauerbeanspruchung und Reibkorrosion festgestellt werden.

Während in ungerissenen Querschnittsbereichen des Betons die Bedingungen für einen ausreichenden Korrosionsschutz infolge Passivierung der Stahloberfläche in der Regel erfüllt sind, müssen in gerissenen Querschnittsbereichen zusätzliche Überlegungen angestellt werden. In /53,79/ wurden bereits Untersuchungen veröffentlicht, die sich mit der Karbonatisierung und Dauerhaftigkeit speziell im Ribbereich eines Betontragwerkes beschäftigen.

Bei den hier vorgestellten Balkenversuchen ist die Korrosion infolge atmosphärischer Einwirkung nur von sekundärer Bedeutung. Primär ist hier die davon zu unterscheidende Reibkorrosion für den Schädigungsprozeß verantwortlich.

Bei den Balkenversuchen wurde an ausgewählten Rissen der Verlauf der Karbonatisierung im Ribbereich untersucht. Dabei konnte eine teilweise Karbonatisierung der Ribflanken festgestellt werden. Dieses Ergebnis wird durch die Untersuchungen in /79/ bestätigt.

In der unmittelbaren Umgebung des Spannstahles konnte im dort vorliegenden Einpreßmörtel eine Verzweigung der Betonrisse in mehrere kleine Risse beobachtet werden. Die Indikatorprüfung des Einpreßmörtels ergab eine ungestörte Alkalität im Bereich des Einpreßmörtels. Diese Beobachtung steht im Einklang mit dem aus der Untersuchung des Spannstahls ermittelten Ergebnis, nach dem die Spannstahloberfläche nur durch Reibkorrosion beeinträchtigt wurde.

5.4.3 Mikroskopische Bruchuntersuchung

Im Anschluß an die makroskopische Bruchuntersuchung erfolgte eine detaillierte Betrachtung der Spannstahlbrüche unter Anwendung der Rasterelektronenmikroskopie.

Hiermit konnte eine Aussage zur Reißursache und eine Analyse des Bruchverlaufes erzielt werden.

Die Ausführung der Rasteraufnahmen erfolgte unter Mitwirkung des Gemeinschaftslabors für Rasterelektronenmikroskopie der RWTH Aachen.

Die für die Untersuchung ausgewählten Proben wurden in der Zeit direkt nach ihrem Ausbau aus dem Versuchsträger bis zur Untersuchung in einem Exsikkator aufbewahrt. Hiermit wurde ein weiterer Angriff der Proben durch atmosphärische Einflüsse vermieden.

In der Betrachtung der Bruchstellen war die punktförmige Reibfläche zwischen Litze und Hüllrohr stets deutlich zu erkennen (Bild 72). Diese Berührungsstellen waren in diesen Bereichen stets ellipsenförmig bzw. kreisrund ausgeprägt, während in den Bereichen zwischen den einzelnen Litzendrähten eine linienförmige Berührungsfläche zu erkennen war. Die ellipsenförmigen Kontaktflächen hatten eine Ausdehnung von 1,5 bis 2,5 mm. Auf den Rasteraufnahmen dieser Bereiche (Bild 73 und 74) sind deutlich die infolge der dynamischen Relativverschiebung entstandenen und in Reibrichtung orientierten Reibspuren zu erkennen. Die in einzelnen Bereichen auftretenden Abplattungen sind eine Folge der kombinierten Beanspruchung aus großer Flächenpressung und oszillierender Reibbewegung. Diese Beanspruchung stellt auch die Ursache für die zu beobachtende Oberflächenzerrüttung dar. Während des Reibvorganges tritt eine verstärkte Bildung metallischer Verschleißpartikel auf. Dieser Vorgang wird unterstützt durch die Ausbildung einzelner Reibschweißstellen in den Kontaktzonen, die in dem nachfolgenden Reibvorgang für

eine weitere Materialablösung und Fortsetzung der Kraterbildung verantwortlich sind.

Diese aus der Metalloberfläche gelösten Partikel besitzen bekanntlich die Eigenschaft, chemisch besonders aktiv zu sein. Sie reagieren somit schnell mit dem umgebenden Medium. Da die einzelnen Reaktionsprodukte sich nur schwer bzw. gar nicht aus dem Kontaktspace entfernen können, ergibt sich durch den Reibvorgang lediglich eine Verkleinerung dieser Oxidteile. Für den weiteren Angriff der Stahloberfläche stehen sie jedoch weiter zur Verfügung. Die Größe der auftretenden Oxidteile ist somit auch einer starken Streuung unterworfen. Der fortlaufende Vorgang der Abrasion bzw. des Materialübergangs vom weicheren zum härteren Material sorgt ständig für die Bildung neuer Reibkorrosionsprodukte. Der größte Teil dieser Reaktionsprodukte lagert sich im Randbereich der Kontaktstelle ab. Innerhalb der Reibfläche sind nur mit der Oberfläche verbundene Reaktionsschichten und nur geringe Mengen freier Reaktionspartikel (Bild 75 bis 76) feststellbar.

Als Ausgangspunkt für den Ermüdungsriß konnte in den festgestellten Schadensflächen der Rand der jeweiligen Reibstellen beobachtet werden. Dies bestätigt auch die theoretischen Überlegungen in Abschnitt 3. An dieser Stelle liegt die maximale Hauptzugspannung in Verbindung mit der größten Relativverschiebung vor. Das Versagen des Spannstahls am Rand der Kontaktzone kann als ein Zeichen dafür angesehen werden, daß die durch den Verschleiß- bzw. Korrosionsvorgang auftretende Querschnittsverminderung nur von sekundärer Bedeutung für den Ermüdungsbruch ist.

Neben dem zum Versagen führenden Ermüdungsriß lassen sich seitlich davon weitere Ermüdungsrisse im Oberflächenbereich erkennen (Bild 77).

Während der Hauptriß in der Regel unter einem Winkel von ca. 30 bis 45° zur Oberfläche begann, wurden bei den weite-

ren Anrissen auch stärkere Neigungen bis zu 90° zur Oberfläche festgestellt. Dies resultiert aus der veränderlichen Schubspannung bzw. den unterschiedlichen Reibkennwerten in den Kontaktpunkten.

Mit Hilfe der Bruchuntersuchung lassen sich die in Bild 78 dargestellten charakteristischen Merkmale eines Bruchverlaufes infolge Reibdauerbeanspruchung nachweisen. Der Dauerbruch findet seinen Ursprung in der Bildung einer unter 45° geneigten Bruchnase (Bild 79). Anschließend ändert der Rißverlauf seine Richtung und verläuft von nun ab senkrecht zur Probenoberfläche als normaler Schwingungsriß. In diesem Bereich konnten auch die aus anderen Untersuchungen eines Schwingungsbruches bekannten Nebenrisse festgestellt werden (Bild 80), deren Verlauf senkrecht zur Rißwachstumsrichtung ausgerichtet ist.

Die in Dauerbruchflächen normalerweise erkennbaren Schwingungsstreifen konnten in den untersuchten Proben nicht eindeutig identifiziert werden. Dies hatte seine Ursache darin, daß größere Bereiche der Bruchfläche mit Ablagerungen und Korrosionsprodukten aus der zum Teil mehr als zweijährigen Versuchszeit bedeckt waren. Der Versuch einer Ablösung dieser Schichten führte nicht zu einem befriedigenden Ergebnis.

Anstelle der Schwingungsstreifen konnten jedoch sogenannte Rastlinien beobachtet werden. Sie resultieren aus den infolge der Belastungs- und Ruhephasen in zeitlichem Abstand sich bildenden oxidischen Deckschichten. Durch ihren Verlauf kann in der Rasteraufnahme die senkrecht dazu verlaufende Rißausbreitungsrichtung ermittelt werden. Im Anschluß an die eigentliche Dauerbruchfläche war stets ein unregelmäßig ausgebildeter Gewaltbruch zu erkennen. Beispiele hierfür sind in den Bildern 81 und 82 dargestellt. Die Größe bzw. der Umfang der sich einstellenden Restbruchfläche ist im wesentlichen abhängig von der aufgebrachten dynamischen Zugbeanspruchung. Mit steigender Zug-

spannung ist eine Vergrößerung dieser Restbruchfläche verbunden.

Wie bereits in Abschnitt 3 erläutert wurde, sind für die Entwicklung eines Reibermüdungsbruches im Spannstahl im wesentlichen die in Längsrichtung des Stahles vorliegenden Spannungs- und Materialverhältnisse verantwortlich. Nachfolgend sollen daher die Ergebnisse einer Gefügeuntersuchung in Längsrichtung des Spannstahls unter Betrachtung von Längsschliffen dargestellt werden. Dies erfolgte ebenfalls unter Einsatz des Rasterelektronenmikroskopes.

Im Bereich der durch den Reibvorgang stark zerklüfteten Oberfläche konnten im Längsschliff mehrere Anrisse festgestellt werden (Bild 83), die nicht zum Ermüdungsbruch geführt haben. Nur bei ausreichender Höhe der dynamischen Zugbeanspruchung gingen die Anrisse in einen Ermüdungsriß über. Als besonders gefährdeter Bereich für das Ermüdungsversagen stellte sich die Randzone der Reib- bzw. Kontaktflächen heraus. Dieser Bereich zeichnet sich im Längsschliff als Übergangszone zwischen unbeeinflusstem Grundgefüge und des infolge der Reibdauerbeanspruchung veränderten Gefüges aus. Die Bilder 85 und 86 lassen deutlich die veränderte Gefügestruktur im Oberflächenbereich der Reibstelle erkennen. Deutlich kann hiervon der unbeeinflusste Bereich des Grundwerkstoffes unterschieden werden. Dort ist die während der Kaltverformung im Herstellprozeß eingeprägte längsstreifige Gefügestruktur erhalten geblieben. Dieser unbeeinflusste Bereich setzt sich bis zum gegenüberliegenden Rand der Reibstelle unverändert fort, wie eine Betrachtung im Rasterelektronenmikroskop bestätigte.

Die an den Reibstellen festgestellte Gefügeveränderung ist in ihrer Struktur vergleichbar mit der Struktur sogenannter "weißer Schichten", über die in /8/ berichtet wird. Dort wird ihre Entstehung auf die während eines Gleitvorganges auftretenden hohen Temperaturen in Verbindung mit einer

nachfolgenden Abschreckung durch Wärmeleitung zurückgeführt. Als Ergebnis wird eine Gefügeumwandlung von Martensit in Reibmartensit angegeben. Dieser Reibmartensit konnte aufgrund seiner Gefügestruktur nicht eindeutig identifiziert werden, daher auch die Bezeichnung "weiße Schicht". Aus der Metallphysik ist bekannt, daß die Bildung von Reibmartensit unter Normalbedingungen das Erreichen einer Temperatur von 810° voraussetzt. Unter gleichzeitiger Wirkung von Druckspannungen ist die Umwandlung jedoch auch bei niedrigeren Temperaturen möglich. Nach Untersuchungen in /8/ ist ein erheblicher Anstieg der in den Reibflächen wirkenden Temperaturen möglich, da durch die Aufrauung der Oberfläche die wahre Berührungsfläche abnimmt und damit die Flächenpressung zunimmt.

Die festgestellte Gefügeumwandlung zeichnet sich neben der optisch erkennbaren feinen Gefügestruktur durch eine deutliche Aufhärtung des Werkstoffes aus. In Bild 86 ist das Ergebnis der im Längsschliff der Litze durchgeführten Härtemessung dargestellt. Die Härte des umgewandelten Gefüges betrug im Mittel $760 \text{ HV}_{0,4}$; die Härte des Grundgefüges dagegen $535 \text{ HV}_{0,4}$. Dieser nachgewiesene Härteunterschied kann als eine Ursache für die verstärkte Rißneigung des Spannstahls in diesem Bereich angesehen werden. Diese Rißneigung wird verstärkt durch parallel zur Gefügeumwandlung entstehende Zusatzspannungen bzw. Lockerungen im Metallgitter in diesem Bereich. Zusätzlich resultiert aus diesen Vorgängen im Metallgitter eine größere Rißwachstumsgeschwindigkeit.

6. Rechnerische Auswertung und Empfehlung für die Bemessung

6.1 Konkrete Auswertung der Versuchsergebnisse unter Beachtung des Betriebsfestigkeitskonzeptes

Die Auswertung der durchgeführten Balkenversuche ermöglicht die Beschreibung des Ermüdungsverhaltens teilweise vorgespannter Bauteile mit Litzenspanngliedern unter dynamischer Belastung.

Das beobachtete Bruchverhalten der Litzendrähte war gekennzeichnet durch eine annähernd gleichmäßige Verteilung der einzelnen Drahtbrüche über einen längeren Spanngliedabschnitt. Ein einzelner Drahtbruch führte trotz daraus resultierender höherer Spannungsamplitude nicht zu einem Versagen der übrigen 20 Litzendrähte des Spannstahlquerschnittes. Eine Folge weiterer Drahtbrüche ausgelöst durch den ersten Drahtbruch kann somit ausgeschlossen werden.

Für die Übertragung der Versuchsergebnisse in geeignete Bemessungsansätze ist eine rechnerische Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erforderlich. Hierzu können die aus dem Nachweis der Betriebsfestigkeit bekannten Ansätze verwendet werden. Ziel ist die wirtschaftliche Ermüdungsbeurteilung unter Beachtung des Zusammenhangs zwischen Lebensdauer und Größe der Schwingbeanspruchung. Die Betrachtungsweise der Betriebsfestigkeit schließt die bislang bekannten Betrachtungen zur Dauerfestigkeit bzw. Zeitfestigkeit mit ein. Sie zeichnet sich durch eine wirklichkeitsnahe Erfassung der zumeist zufallsartig in unterschiedlicher Größe und Häufigkeit auftretenden Beanspruchungen aus. Zweck der Betriebsfestigkeitsuntersuchung ist die Beschreibung der Schwingfestigkeit des untersuchten Baustoffes durch eine Wöhler- bzw. Lebensdauerlinie.

Die Wahl einer annähernd gleichbleibenden Amplitude in den ausgeführten Balkenversuchen ermöglicht eine näherungsweise

Darstellung der Ergebnisse durch Wöhlerlinien. Dabei wird der Anstieg der Spannungsamplitude infolge Drahtbruch vernachlässigt, um die Bedingungen für die Auswertung als Wöhlerversuch zu erfüllen. Der oder Einstufen-Versuch nach Wöhler stellt die elementarste Form eines Betriebsfestigkeitsversuches dar. Als Versuchsergebnis ergibt sich die bis zum Ermüdungsbruch ertragene Lastspielzahl N zusammen mit der den Bruch auslösenden Spannungsamplitude. Für die Ermittlung der Wöhlerlinie sind mehrere Versuche auf unterschiedlichem Beanspruchungsniveau notwendig. Die Auftragung der Wöhlerlinie erfolgt im einfach bzw. doppelt-logarithmischen Maßstab. Die Wöhlerlinie ist gekennzeichnet durch eine Abgrenzung des Bereiches der Dauerfestigkeit von dem Bereich der Zeitfestigkeit. Die bei gegebener Mittelspannung existierende Spannungsamplitude, die "unendlich oft" ertragen werden kann, wird als Dauerfestigkeit bezeichnet. Bei Ermüdungsversuchen unter korrosiven Randbedingungen tritt -wie auch am Ergebnis der Balkenversuche zu erkennen ist- im Bereich sehr hoher Lastspielzahlen noch ein gewisser Abfall der ertragbaren Spannungsamplitude auf. Eine Beschreibung der Ergebnisse in diesem Bereich erfolgt zweckmäßig durch eine im logarithmischen Maßstab geneigte Zeitfestigkeitsgerade.

In Bild 87 ist das Ergebnis der neun Balkenversuche in Form eines Wöhlerdiagrammes dargestellt. In der Darstellung wird eine teilweise Mitwirkung der gebrochenen Drähte an der weiteren Lastaufnahme berücksichtigt. Dies erscheint im Hinblick auf das beobachtete Verhalten der Versuchsbalken als richtig. Ergänzend zu den Ergebnissen der Langzeitversuche wurden teilweise die in /22/ veröffentlichten Ergebnisse aus Kurzzeituntersuchungen in die Darstellung mit aufgenommen.

Die eingetragene Zeitfestigkeitslinie beschreibt den in Abschnitt 6.2 erläuterten Bemessungsvorschlag für die Ermüdungsbemessung von Litzenspanngliedern.

Für die statistische Belegung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich hat sich die Anwendung des Gaußschen Wahrscheinlichkeitsnetzes als zweckmäßig erwiesen. Jeder Versuchswert erhält dabei zur Auftragung im Wahrscheinlichkeitsnetz einen Wert der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}$ unter Anwendung der von Rossow ausgewerteten Wahrscheinlichkeitsbeziehungen. Die Lebensdauerwerte $P_{\ddot{u}}$ können anschließend in ein nach dem Gaußschen Integral geteiltes Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Teilung eingetragen und durch eine Gerade (log. Normalverteilung) angenähert werden. Die für die Ermittlung des Streumaßes erforderlichen Lebensdauerwerte bei $P_{\ddot{u}} = 10, 50$ und 90% können dieser Darstellung dann direkt entnommen werden.

Das Resultat einer entsprechenden Auswertung für die Langzeitversuche ist in Bild 88 dargestellt. Die Überlebenswahrscheinlichkeit wurde dabei für eine Lastspielzahl von $N = 10^6$ ermittelt. Bei den unter trockenen Bedingungen geprüften Balken ergab sich für eine Überlebenswahrscheinlichkeit N_{90} eine Schwingbreite von $\Delta\sigma = 150 \text{ MN/m}^2$, im Vergleich zu den unter feuchten Bedingungen geprüften Balken von $\Delta\sigma = 165 \text{ MN/m}^2$. Dabei ist zu beachten, daß die statistische Auswertung nur die gebrochenen Litzendrähte berücksichtigt wurden. Die überwiegende Zahl der nicht gebrochenen Drähte wurde in der genannten Lebensdauerberechnung nicht erfaßt. Dem dargestellten Ergebnis der statistischen Auswertung liegen somit nur die am stärksten gefährdeten Litzendrähte zugrunde, die sich in der Regel durch Kontaktstellen mit dem Hüllrohr auszeichnen.

6.2 Empfehlungen für die Bemessung zur Erfassung der Reibdauerbeanspruchung

Die Ermüdungsbemessung wird in der zur Zeit gültigen DIN 4227 über den Nachweis der Dauerfestigkeit des Spannstahls geführt. Als maßgebender Bemessungswert liegt diesem Nachweis die ertragbare Schwingbreite $\Delta\sigma$ zugrunde. Sie wird in Wöhlerversuchen mit einer Grenzlastspielzahl von $N = 2 \times 10^6$ ermittelt und ist Bestandteil der Spannstahlzulassungen. Da die Ermittlung dieses Wertes an freischwingenden Proben erfolgt, ist eine Korrektur für den einbetonierten Zustand erforderlich. Für die teilweise Vorspannung wurde daher die zulässige Schwingbreite in der Vornorm zu DIN 4227 Teil 2 zu 40% (maximal 140 N/mm^2) der in der Spannstahlzulassung angegebenen Dauerschwingfestigkeit festgelegt. Zwischenzeitliche Untersuchungen zur Reiber-müdung führten zu einer weiteren Verringerung für Litzen und glatte Drähte auf einen Wert von 110 N/mm^2 .

In neueren Überlegungen insbesondere im Zusammenhang mit dem Entwurf des Model Code 90 /21/ wird die Ermüdungs-bemessung unter Berücksichtigung von Zeitfestigkeits- bzw. Betriebsfestigkeitsüberlegungen diskutiert. Der Begriff Zeitfestigkeit beschreibt dabei den unter einer Neigung k verlaufenden Abschnitt der Wöhlerlinie bei doppeltlogarith-mischer Darstellung. In diesem Bereich führt eine endliche Zahl von Lastspielen mit konstanter Amplitude zum Bruch, wobei der Bruch umso eher eintritt, je höher die Bean-spruchung ist. Von dieser genannten Zeitfestigkeit unter-scheidet sich die Betriebsfestigkeit durch zusätzliche Berücksichtigung einer mehr oder weniger zufallsartigen Folge unterschiedlicher Amplituden. Betriebsfestigkeitsver-suche werden deshalb unter Simulation des zufallsartigen Beanspruchungsverlaufs durchgeführt.

Die im Entwurf des Model Code 90 vorgesehene Annäherung der für die Ermüdungs-bemessung des Spannstahl anzuwendenden Zeitfestigkeitslinie durch 2 Geraden in doppeltlogarith-mischen Maßstab kann grundsätzlich als sinnvoller Ansatz

bestätigt werden. Allgemein kann die charakteristische Funktion für die Ermüdungsfestigkeit des Spannstahls in der Form $\Delta\sigma_s^k \cdot N = \text{const.}$ beschrieben werden. Durch Umstellung erhält die Beziehung die Form $k \cdot \log\Delta\sigma_s + \log N = \text{constant.}$ Bei einer Darstellung im doppeltlogarithmischen Maßstab ergeben sich hieraus Geraden, die durch den jeweiligen Wert der Konstanten und ihre Neigung k bestimmt werden. Für die Beschreibung der Ermüdungsfestigkeit des Spannstahls ist die Anwendung der daraus abgeleiteten bilinearen Zeitfestigkeitslinie (Bild 89) sinnvoll. Damit ist eine getrennte Darstellung der Ermüdungsfestigkeit für den Bereich der Kurzzeitfestigkeit und der Langzeitfestigkeit möglich. Als Übergangsbereich wird im MC 90 eine Lastspielzahl von $N = 10^6$ vorgeschlagen, die als sinnvoll angesehen werden kann.

Die für den Schnittpunkt der beiden Geraden im Model Code 90 vorgesehene zulässige Schwingbreite für Litzen unter Reibdauerbeanspruchung von $\Delta\sigma = 0.4 \times 200 = 80 \text{ N/mm}^2$ bei $N = 10^6$ Lastwechsel und $\Delta\sigma = 0.4 \times 100 = 40 \text{ N/mm}^2$ bei $N = 10^8$ Lastwechsel ist im Vergleich mit den gewonnenen Versuchsergebnissen eindeutig eine zu starke Abminderung.

Aufgrund der Versuche kann für die Ermüdungsbemessung von Litzenspanngliedern eine wirklichkeitsnähere Zeitfestigkeitslinie vorgeschlagen werden (Bild 89). Sie ist gekennzeichnet durch eine zulässige Schwingbreite von $\Delta\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ bei $N = 10^6$ Lastwechsel und einer Steigung von $k = 3,0$ für $N < 10^6$ und $k = 7,0$ für $N > 10^6$ Lastwechsel. Die Beziehung erfaßt die zur Zeit in DIN 4227 Teil 2 festgelegte zulässige Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$ bei $N = 2 \times 10^6$ Lastwechsel.

Die vorgeschlagene Funktion kann durch Gleichungen in der Form $\log N = B + C \cdot \log \Delta\sigma$ angenähert werden, wobei C die Steigung der Geraden und B den Schnittpunkt mit der Abszisse beschreibt:

$$\log N = 12.25 - 3.0 \log \Delta\sigma \quad \text{für } 10^5 \leq N \leq 10^6$$

$$\text{und } \log N = 20.5 - 7.0 \log \Delta\sigma \quad \text{für } 10^6 \leq N \leq 10^8.$$

Die für die Versuche durchgeführte statistische Auswertung der Ergebnisse in Bild 88 läßt erkennen, daß die vorgeschlagene Beziehung die gewonnenen Versuchsergebnisse mit ausreichender Sicherheit erfaßt. Für den maßgebenden Fall der unter trockenen Bedingungen ermittelten Ergebnisse und einer gewählten Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{u}} = 90 \%$ ergibt sich für $N = 10^6$ ein globaler Sicherheitsfaktor von $\gamma = 150/120 = 1,25$. Berücksichtigt man ferner, daß die eingetretenen Ermüdungsbrüche unter ungünstigen Randbedingungen auftraten, kann der Sicherheitsabstand als ausreichend angesehen werden. Eine besondere Gefährdung der Litzendrähte liegt wie in Abschnitt 5 beschrieben im wesentlichen im Kontaktbereich zwischen Litze und Hüllrohr vor. Die an diesen Stellen zu beobachtende punktförmige Konzentration der Reibermüdungsbeanspruchung stellt die Ursache für einen Reibermüdungsbruch bevorzugt an diesen Stellen dar. Bei den im Versuchsträger vorhandenen übrigen 20 Drähten führte erst eine erhöhte Spannungsamplitude im Bereich hoher Lastspielzahlen zu weiteren Ermüdungsbrüchen. Mit diesem Verhalten der Spannstahllitzen ist eine Vergrößerung der vorhandenen Ermüdungssicherheit verbunden.

Der Ermüdungsnachweis mit Hilfe der Zeitfestigkeitslinie setzt neben der Höhe der Belastung die Kenntnis der zu erwartenden Lastspielzahl voraus. Entsprechende Werte sind durch Auswertung des Verkehrsaufkommens für unterschiedliche Verkehrswege zu ermitteln und festzulegen. Mit der für den Ermüdungsnachweis des entsprechenden Bauwerkes anzusetzenden Lastspielzahl ist aus der Zeitfestigkeitslinie eine zulässige Schwingbreite zu ermitteln. Die Ermüdungssicherheit kann als nachgewiesen angesehen werden, wenn die vorhandene Schwingbreite kleiner oder gleich der zulässigen Schwingbreite ist.

Unabhängig von der Art des Nachweisverfahrens ist die Ermittlung der infolge äußerer Last verursachten Schwingbreite eine komplexe Aufgabe. Die Berechnung ist für einen teilweise vorgespannten Querschnitt mit gemischter Bewehrung nur näherungsweise möglich.

Zur genaueren Bestimmung der eintretenden Spannungsamplituden fehlen zur Zeit ausreichende Angaben zur Größe der Spannungsumlagerungen bei gemischter Bewehrung. Die den Spannstahl entlastende Wirkung der Umlagerung erlaubt eine Vernachlässigung dieses Einflusses bei der Ermittlung der zu berücksichtigenden Spannungsamplitude. Bei der Festlegung der anzuordnenden Beton-stahlbewehrung sollte der Einfluß insbesondere bei kleinem A_S/A_V - Verhältnis jedoch erfaßt werden. Dies kann näherungsweise erfolgen durch Anwendung der nachfolgenden im CEB-FIP Model Code 1990 vorgeschlagenen Beziehung für den Spannungszuwachs im Betonstahl.

$$\eta = \frac{1 + \frac{A_V}{A_S}}{\left[1 + \frac{A_V}{A_S} \cdot \sqrt{\zeta \cdot \frac{d_S}{d_V}} \right]}$$

Dabei ist :

- A_S = Betonstahlquerschnitt
- A_V = Spannstahlquerschnitt
- d_S, d_V = Durchmesser der Betonstahl- bzw. Spannstahlbewehrung. Bei Spanngliedern entspricht der äquivalente Durchmesser dem Wert $1,6 \cdot \sqrt[3]{A_V}$
- ζ = Verhältnis der mittleren Verbundspannung $\frac{\tau_{V(0,1mm)}}{\tau_{S(0,1mm)}}$

Das unterschiedliche Verbundverhalten von Betonstahl und Spannstahl mit der Folge einer Spannungsumlagerung wird dadurch berücksichtigt, indem die für den Betonstahl ohne Berücksichtigung der Umlagerung ermittelte Stahlspannung mit dem Wert η multipliziert wird.

Auf die Größe der einwirkenden Spannungsamplitude wirkt sich auch die Lage des Dekompressionsniveaus aus. Für den Fall einer dynamischen Belastung mit Lastgrenzen beidseitig des Dekompressionsniveaus ist eine genaue Bestimmung der Spannungsamplitude nur eingeschränkt möglich, da die Spannstahlspannung im Zustand I im wesentlichen von der Größe der Vorspannkraft abhängt. In einer Bemessung mit ertragbaren Spannungsamplituden ist diese Unsicherheit zu berücksichtigen.

Eine Möglichkeit wäre die Anwendung getrennter Sicherheitsfaktoren für die Bestimmung der zulässigen Spannungsamplitude im Zustand I und II. Aufgrund der sich ergebenden geringen Werte für $\Delta\sigma$ im Zustand I kann die Bemessung näherungsweise mit einer nur im Zustand II ermittelten Schwingbreite durchgeführt werden.

Aufgrund der Bedeutung der Ermüdungssicherheit für die Gebrauchsfähigkeit und Bruchsicherheit eines teilweise vorgespannten Bauteiles sind entsprechende Bemessungsansätze für andere Spanngliedarten durch ergänzende Forschungsarbeiten zu entwickeln und abzusichern.

7. Zusammenfassung

Bedingt durch die Einführung der teilweisen Vorspannung sowie durch den Anstieg des Verhältnisses von Verkehrslasten zu Eigengewichtslasten ist die Frage der ertragbaren Ermüdungsbeanspruchung des Spannstahls von zunehmender Bedeutung. In teilweise vorgespannten Bauteilen ist der Spannstahl einer zusätzlichen Reibdauerbeanspruchung ausgesetzt. Sie ergibt sich bei nicht ruhender Belastung aus der gleichzeitigen Wirkung von hohen Querpressungen und kleinen Relativverschiebungen in den Kontaktflächen zwischen Spannstahl und Hüllrohr bzw. zwischen den einzelnen Spannstählen.

Voraussetzung für eine Abschätzung der ertragbaren Schwingbreite der teilweisen Vorspannung ist eine zutreffende Erfassung des Ermüdungsverhaltens der Spannglieder.

Gestützt auf neuere Untersuchungen /22/, /69/ wurden am Institut für Massivbau der RWTH Aachen Ermüdungsuntersuchungen an 9 Versuchsbalken durchgeführt, die jeweils mit 3 siebendräftigen Spannstahllitzen vorgespannt waren.

Untersuchungsschwerpunkt war dabei die Auswirkung von Langzeiteinflüssen auf die Reibermüdung von Spannstahllitzen. Durch regelmäßigen Wechsel von Belastungs- und Ruhephasen und zusätzlicher künstlicher Bewitterung einzelner Versuchsträger wurden die wesentlichen Einflußgrößen in das Versuchsprogramm aufgenommen. Das Ermüdungsverhalten der Spannstahllitzen konnte mit Hilfe eines umfangreichen Meßprogrammes erfaßt werden.

Als wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung kann festgestellt werden, daß ein plötzliches Ermüdungsversagen des gesamten Spanngliedes nicht eintritt. Vielmehr erfolgte nach dem Ermüdungsbruch eines Einzeldrahtes eine Verlagerung der maximalen Reibdauerbeanspruchung in benachbarte Trägerbereiche. In dem verbleibenden Spannstahl-

querschnitt mit $21-1 = 20$ Drähten konnten einzelne weitere Ermüdungsbrüche bei vergrößerter Spannungsamplitude nur im Bereich höherer Lastspielzahlen ermittelt werden.

Die künstliche Bewitterung führte bei gleicher Spannungsamplitude zu zeitlich später erfolgenden Ermüdungsbrüchen. Die Prüfung unter trockenen Randbedingungen stellte sich als maßgebend für die Ermittlung der ertragbaren Schwingbreite heraus. Hier ergaben sich bei einer Schwingbreite von $\Delta\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ vereinzelte Drahtbrüche erst nach Überschreiten einer Lastspielzahl von $N = 2,0 \times 10^6$ Lastwechseln. Ein Ermüdungsversagen des gesamten Spanngliedes trat auch bis zum Versuchsende bei $N = 5,0 \times 10^6$ Lastwechseln hierbei nicht ein.

Die überwiegende Mehrzahl der festgestellten Ermüdungsbrüche nahm ihren Ausgang in der Kontaktfläche des Spannstahls mit dem Hüllrohr. Als Ursache konnte die an diesen Stellen vorhandene punktförmig konzentrierte Reibdauerbeanspruchung ermittelt werden. Wie die raster-elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Bruchstelle ergaben, tritt in diesen Kontaktzonen neben der Oberflächenzerrüttung eine Aufhärtung des oberflächennahen Bereiches auf. Beide Vorgänge sind zusammen mit der dynamischen Belastung für die Entstehung eines Ermüdungsrissses verantwortlich.

In den Versuchen mit hoher Spannungsamplitude konnte nach dem Auftreten mehrerer Spannstahlbrüche auch ein Ermüdungsbruch einzelner Betonstähle festgestellt werden. Die Ursache hierfür lag in der sich einstellenden hohen Beanspruchung des Betonstahls. Ein Einfluß der Reiber-müdung auf den Betonstahl wurde nicht beobachtet.

Auf der Basis der ermittelten Erkenntnisse erfolgt eine Diskussion und Bewertung des vorhandenen Konzeptes zur Ermüdungsbemessung teilweise vorgespannter Bauteile.

Aufgrund der ermittelten Versuchsergebnisse wird ein Bemessungsvorschlag für Litzenspannglieder erarbeitet. Dabei wird in Anlehnung an den Model Code 90 eine bilineare $\log\Delta\sigma/\log N$ - Beziehung verwendet. Gegenüber der zu starken Abminderung im Model Code für den Reibermüdungseinfluß wird eine wirklichkeitsnähere Beziehung für die Bemessung von Litzenspanngliedern vorgeschlagen. Sie ist gekennzeichnet durch eine zulässige Schwingbreite von $\Delta\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ bei 10^6 Lastwechsel und einer Steigung von $k = 3,0$ für $N < 10^6$ und $k = 7$ für $N > 10^6$ Lastwechsel. Die Beziehung erfaßt die zur Zeit in DIN 4227, Teil 2 festgelegte zulässige Schwingbreite von $\Delta\sigma = 110 \text{ N/mm}^2$ bei $N = 2 \times 10^6$ Lastwechsel. Der Bemessungsvorschlag kann durch folgende Funktionen beschrieben werden:

$$\log N = 12.25 - 3.0 \log \Delta\sigma \quad \text{für } 10^5 \leq N \leq 10^6$$

und $\log N = 20.50 - 7.0 \log \Delta\sigma \quad \text{für } 10^6 \leq N \leq 10^8.$

Mit diesem Bemessungsansatz kann die Ermüdungssicherheit für Litzen in teilweise vorgespannten Bauteilen zuverlässig nachgewiesen werden.

Dabei muß darauf hingewiesen werden, daß aufgrund der geringen Anzahl von Versuchen und der alleinigen Betrachtung von Litzenspanngliedern weitere Versuche zur Absicherung entsprechender Ansätze für andere Spanngliedarten erforderlich sind.

8. Literatur

- /1/ ABELES P.W., BROWN E.J. and HU C.H., "Fatigue resistance of underreinforced prestressed beams subjected to different stress ranges", Miners hypothesis, ACI-Publication, Sp. 41-11. 1974, pp 237-277.
- /2/ ABELES P.W., BROWN E.J. and HU C.H., "Behaviour of underreinforced prestressed concrete beams subjected to different stress ranges", ACI-Publication, Sp. 41-12, 1974, pp 279-300.
- /3/ BACHMANN H., "Teilweise Vorspannung - Erfahrungen in der Schweiz und Fragen der Bemessung, Vorträge Betontag 1979", Deutscher Betonverein, S. 160-173.
- /4/ BARGEL H.J. und SCHULZE G., "Werkstoffkunde" VDI-Verlag, Düsseldorf, 4. Auflage, 1987.
- /5/ BASTIAN C., "Ein Beitrag zur Untersuchung und Darstellung der Spanngliedbeanspruchung infolge Querverpressung", Diplomarbeit am Institut für Massivbau RWTH Aachen, Okt. 1989, unveröffentlicht.
- /6/ BERTRAM D., "Erläuterungen zu DIN 4227 Spannbeton" Heft 320, DAfStb, Beuth Verlag Berlin 1989.
- /7/ BIRKENMAIER M. und JACOBSON W., "Das Verhalten von Spannbetonquerschnitten zwischen Reißlast und Bruchlast", Schweizerische Bauzeitung, Heft 15, 1959, Seiten 218-227.
- /8/ BLUMENAUER H. und PUSCH G., "Technische Bruchmechanik", Springer Verlag 1. Auflage 1982.
- /9/ BOESE U. und WERNER D., "Verhalten der Stähle beim Schweißen", DVS Verlag Düsseldorf, 3. Auflage 1984.
- /10/ BOWDEN F.P., TABOR O., "Reibung und Schmierung fester Körper", Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1959.
- /11/ BÖKAMP H., CORDES H., TROST H., "Weiterentwicklung eines Prüfverfahrens für Reibungsuntersuchungen mit Spannstahtlitzten", Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Bericht Nr. 29/88.

- /12/ BROSZEIT E. und ZWIRLEIN O. und ADELMANN J.,
"Werkstoffanstrengung im Hertz'schen Kontakt-Einfluß
von Reibung und Eigenspannungen", Z.f. Werkstoff-
technik 13(1982), S.423-429.
- /13/ BROSZEIT E. und KLOOS K.H. und SCHWEIGHÖFER B.O.,
"Schwingverschleißprüfung im Reibkufenversuch -
Zweidimensionale Spannungsanalyse und Reibweg-
amplituden", Z.f. Werkstofftechnik 16 (1982),
S. 187 - 193
- /14/ BUGARCIC H., "Einfluß der Feuchtigkeit auf
mechanisch chemische Vorgänge bei Reibungsbean-
spruchung von Armco Eisen, Einsatz- und Radreifen-
stahl unter Verwendung einer neu konstruierten
Reibungsprüfmaschine", Dissertation,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen,
1965.
- /15/ BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN, "Schutzwirkung des
Brückenbetons gegen Bewehrungskorrosion, insbe-
sondere bei Tausalzeinwirkung", Bergisch-Gladbach im
Januar 1988.
- /16/ BURCHARD W.G., KRAUSE H., CHRIST E., CHEN F.-S.,
"Über die Struktur sogenannter "weißer Schichten" -
entstanden in den Laufflächenbereichen von Eisen-
bahnrädern", 7. Sitzung des Arbeitskreises Raster-
mikroskopie, 1975.
- /17/ BUXBAUM O., "Betriebsfestigkeit, sichere und wirt-
schaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bau-
teile", Verlag Stahleisen, 1. Auflage 1988.
- /18/ CAMPBELL E.W., "The current status of fretting
corrosion", ASTM Spec. Techn. Publ. No. 144, 1952.
- /19/ CASTILLO E., FERNANDEZ-CANTELI A., ESSLINGER V. und
THÜRLIMANN B. "Statistical Model for Fatigue
Analysis of Wires, Strands and Cables", IABSE
Periodica Zürich 1, 1985.
- /20/ CEB "Fatigue of Concrete Structures - State of the
Art Report", Bulletin D'Information No.188,
September 1988.
- /21/ CEB-FIP MODEL CODE 1990, First Draft September 1990.

- /22/ CORDES H., "Dauerhaftigkeit von Spanngliedern unter zyklischen Beanspruchungen", Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 370, Berlin 1986.
- /23/ CORDES H. und LAPP-EMDEN M., "Untersuchung zur Dauerfestigkeit von Spanngliedern für die besonderen Bedingungen der teilweisen Vorspannung", Institut für Massivbau, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Bericht Nr. 18/84, Juni 1984.
- /24/ CORDES H., SCHÜTT K., TROST H., "Großmodellversuche zur Spanngliedreibung", Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 325, Berlin 1981.
- /25/ CORDES H., HAGEN H., "Langzeitverhalten des Verbundes von Spanngliedern unter dynamischer und statischer Belastung" Bericht Nr. 28/88 Institut für Massivbau, RWTH Aachen.
- /26/ DERFLINGER F. und MÜLLER H.H., "Auslagerungsversuche mit teilweise vorgespannten Balken", Lehrstuhl für Massivbau Technische Universität München, Bericht Nr. 1297, 1983.
- /27/ DIES K., "Die Reiboxydation als chemisch-mechanischer Vorgang", Archiv für das Eisenhüttenwesen, 16 (1943), S. 389-407.
- /28/ DIN 1045, "Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung".
- /29/ DIN 4227, Teil 2 "Spannbeton, Bauteile mit teilweiser Belastung".
- /30/ DIN 1048, "Prüfverfahren für Beton".
- /31/ DIN 50900 "Korrosion der Metalle".
- /32/ DOMKE W., "Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung", Verlag Cornelsen, Düsseldorf, 10. Auflage 1986.
- /33/ EIBL J., und KOBARG J., "Das Verbundverhalten von Stahl und Beton unter besonderer Berücksichtigung der lokalen Stahlspannung", Technische Universität Karlsruhe, Festschrift Prof. Rehm, 1987.
- /34/ ELIGEHAUSEN R. und KRELLER H., "Querschnittsbericht zur Rißbildung in Stahl- und Spannbetonbauwerken", Heft 393 DAfStb, Beuth Verlag 1988.

- /35/ ENDO K., GOTO H., NAKAMURA T., "Effects of cycle frequency on fretting fatigue life of carbon steel", Bulletin of ISME Band 12, No. 54, 1969
- /36/ ENGEL L., "Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden", Gerling Institut für Schadenforschung, 2. Auflage 1982.
- /37/ FERNANDEZ-CANTELI A., ESSLINGER V. THÜRLIMANN B., "Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8002-1, 1984, Birkhäuser Verlag Basel.
- /38/ FISCHER G., "Zum Einfluß der Reibkorrosion auf das Festigkeitsverhalten von Stahl und Stahlguß unter sinusförmiger und zufallsartiger Belastung", Dissertation, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt 1987.
- /39/ FRANKE L., "Einfluß der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen)", Heft 268 DAFStb, 1976.
- /40/ FREY J., TROST H., "Zur Berechnung von teilweise vorgespannten Betontragwerken im Gebrauchszustand" Beton- und Stahlbetonbau 78, 1983.
- /41/ FUNK W., "Der Einfluß der Reibkorrosion auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenelemente", Technische Hochschule Darmstadt, Dissertation D 17, 1968.
- /42/ HAGEN K.J., "Ein Beitrag zum Verbundverhalten von Spanngliedern in Hüllrohren unter besonderer Berücksichtigung der Sprengwirkung", Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1984.
- /43/ HAIBACH E., "Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung", VDI Verlag Düsseldorf 1989.
- /44/ HANSON J.M., HULSBOS C.L. und VAN DHORN D.A., "Fatigue Tests on Prestressed Concrete I-Beams", ASCE Proceedings, Vol. 96, No ST 11, November 1970.
- /45/ HAVERESCH K.H., "Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Untersuchung von Reibungsvorgängen an Spann-

- stählen", Diplomarbeit am Institut für Massivbau RWTH Aachen, 1987 unveröffentlicht.
- /46/ HEINEMANN R.W., "Untersuchungen über tribomechanisch angeregte Festkörperreaktionen - Reibkorrosion", Technische Hochschule Hannover, Dissertation, 1967.
- /47/ HOCHREITHER H., "Bemessungsregeln für teilweise vorgespannte, biegebeanspruchte Betonkonstruktionen", Dissertation, Technische Universität München, 1982.
- /48/ HOLZMANN LH Spanngliedzulassung
- /49/ Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH) "Ermüdungsverhalten von Stahl- und Betonbauten", Kolloquium, Lausanne 1982.
- /50/ ISECKE B., STICHEL W., "Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren", Forschungsbericht Nr. 87 der BAM Berlin 1982.
- /51/ JANOVIĆ K., MÜLLER H.H. und KUPFER H., "Bericht über Versuche an Dehnkörpern zur Bestimmung des Verlaufs der Rissbreite im Einpreßmörtel und in der Umgebung des Spanngliedes", Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, Bericht Nr. 1330, 1977.
- /52/ JULIUS A., "Zum Mechanismus des Reibdauerbruchs", Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, Mai 1972.
- /53/ KÄSER M., MENN C., "Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken: Auswirkungen der Rissbildung", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1988.
- /54/ KLOOS K.H., "Werkstoff-Paarungseigenschaften in ihrem Einfluß auf das Gleitverhalten in Fertigung und Konstruktion", Fortschrittbericht d. VDI-Z., Reihe 2 Nr. 25, 1972.
- /55/ KÖNIG G., MAURER R. und ZICHNER T., "Spannbeton: Bewehrung im Brückenbau", Springer Verlag 1986.
- /56/ Kragelski I. W. "Reibung und Verschleiß" Carl Hanser Verlag München 1971.

- /57/ KRAUSE H., "Zum Phänomen der Reiboxidation"
Glaser Annalen 91, 1967.
- /58/ KREITNER L., "Die Auswirkung der Reibkorrosion und
von Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit
zusammengesetzter Maschinenteile", Technische
Hochschule Darmstadt, Dissertation, 1976
- /59/ KUPFER H., "Vorschläge für die Bemessung bei
teilweiser Vorspannung", Deutscher Betontag 1977.
- /60/ LÜCKEN A., "Beitrag zur Ermittlung von Spannungen
und Verformungen bei teilweiser Vorspannung",
Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen, 1985.
- /61/ MAGNEL G., "Theorie und Praxis des Spannbetons",
3. Auflage, Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1956.
- /62/ MINER M.A., "Cumulative Damage in Fatigue", Journal
of Applied Mechanics", Vol.12, No.3 1945.
- /63/ MÜLLER H.H., "Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben
"Prüfverfahren für die Dauerschwingfestigkeit von
Spannstählen", Institut für Bauingenieurwesen III,
Technische Universität München, Nr. 1111, Mai 1985
- /64/ NEUMANN P., "Untersuchungen zum Einfluß
tribologischer Beanspruchung auf die Drahtseil-
schädigung, insbesondere Abnutzung, unter Berück-
sichtigung hüttenwerksspezifischer Einsatzbe-
dingungen", Dissertation, RWTH Aachen, 1987.-
- /65/ NOAKOWSKI P., "Nachweisverfahren für Verankerung,
Verformung, Zwangsbeanspruchung und Reißbreite", Heft
394 DAfStb,
Beuth Verlag 1988.
- /66/ NÜRNBERGER U., "Analyse und Auswertung von Schadens-
fällen an Spannstählen", Heft 308 Forschung Straßen-
bau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für
Verkehr 1980.
- /67/ NÜRNBERGER U., MENZEL K., LÖHR A. und FREY R.,
"Korrosion von Stahl in Beton - einschließlich
Spannbeton", Heft 393 DAfStb, Beuth Verlag 1988
- /68/ OERTLE J., THÜRLIMANN B., "Reibermüdung einbetonier-
ter Spannkabel", Schweizer Ingenieur und Architekt

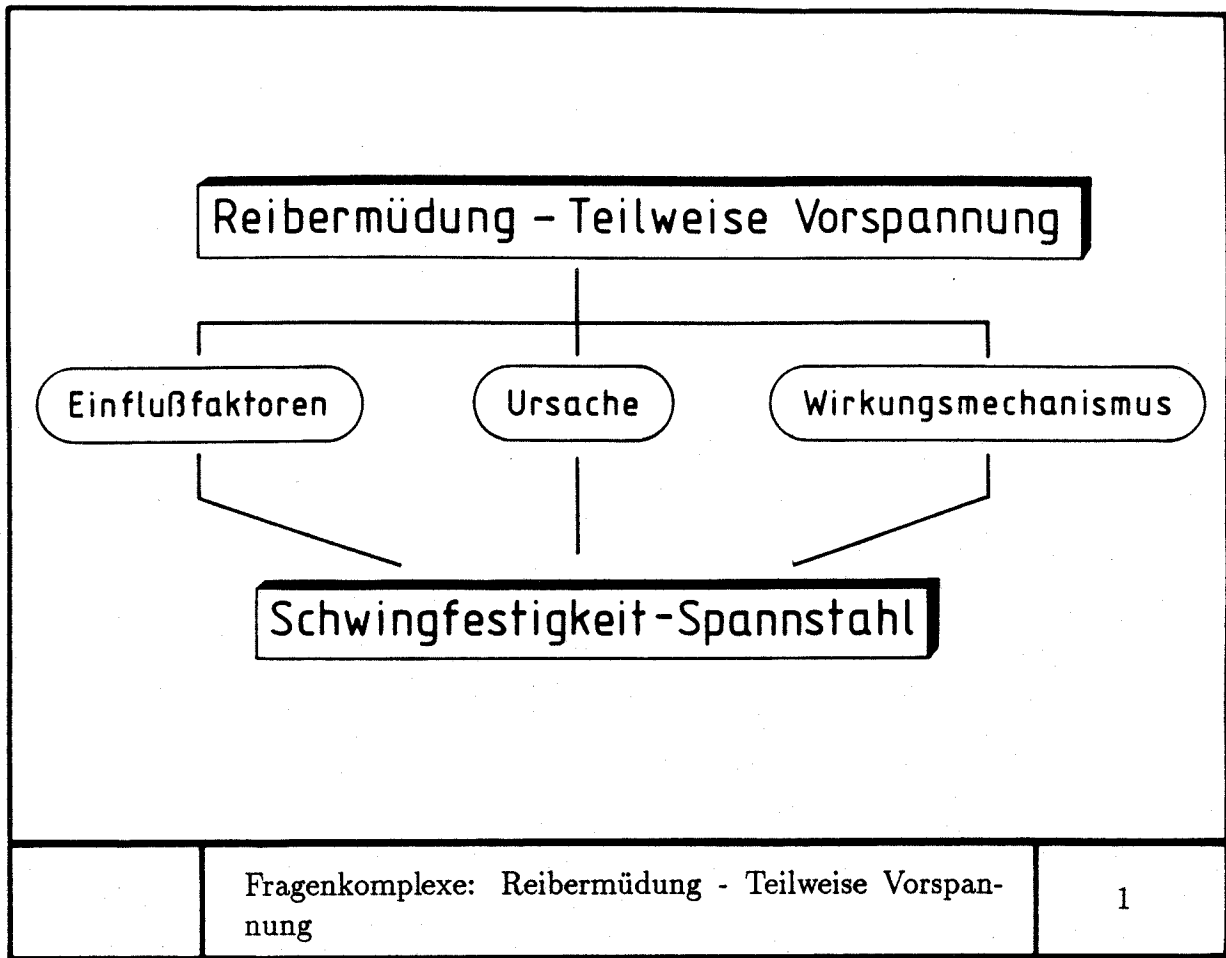
- 12, März 1987.
- /69/ OERTLE J., "Reibermüdung einbetonierter Spannkabel", Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich 1988.
- /70/ OERTLE J., Thürlimann B., Esslinger V., "Versuche zur Reibermüdung einbetonierter Spannkabel", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8101-2, Oktober 1987, Birkhäuser Verlag Basel.
- /71/ PALMGREN A., "Die Lebensdauer von Kugellagern", VDI-Zeitschrift 1924 S 339 - 341.
- /72/ PANTUCEK P., "Pressung von Seildraht unter statischer und dynamischer Beanspruchung", Technische Universität Karlsruhe, Dissertation, 1977.
- /73/ PATZAK M., "Die Bedeutung der Reibkorrosion für nicht ruhend belastete Verankerungen und Verbindungen metallischer Bauteile des konstruktiven Ingenieurbaus", Universität Stuttgart, Mitteilungen 53 des Sonderforschungsbereichs 64, 1978.
- /74/ POLZER G., MEISSNER F., "Grundlagen zu Reibung und Verschleiß", VEB Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1982.
- /75/ RAHMEL A., SCHWENK W., "Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen", Verlag Chemie Weinheim 1977.
- /76/ REHM G., "Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138, 1961.
- /77/ RICKENSDORF G., GERSTNER H., "Rißsicherung im Spannbeton", Bauplanung-Bautechnik, 15.Jg., Heft 12, 1961, S. 595 - 599.
- /78/ RIGON C., THÜRLIMANN B., "Fatigue Tests on Post-Tensioned Concrete Beams", Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr.:8101-1, August 1985.
- /79/ SCHIESSL P., "Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau

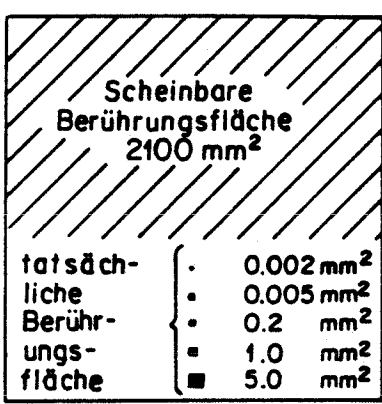
- unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierungstiefe des Betons", Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 255, Berlin 1976.
- /80/ SCHIESSL P., "Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rißbreite", Heft 400 DAfStb, Beuth Verlag 1989.
- /81/ SCHIESSL P., "Das besondere Problem der Risse im Beton", VDI Bericht Nr. 653 - Korrosionsschutz im Ingenieurbau - 1988.
- /82/ SCHMITT-THOMAS G. "Statusseminar Reibkorrosion", Technische Universität München, Lehrstuhl für Metallurgie und Metallkunde, Berichtsband zur Tagung vom 28.4.1988.
- /83/ SCHROELKAMP C., "Einfluß tribochemischer Reaktionen auf das Verschleißverhalten von Eisenwerkstoffen bei technisch trockener Wälzreibung", Dissertation, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1984.
- /84/ TÄUBERT P., "Metallphysik", Verlag Harri Deutsch 1964.
- /85/ THIESSEN P.A., "Physikalisch chemische Untersuchungen tribochemischer Vorgänge", Abhandlung der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1967.
- /86/ THORMÄHLEN U., "Zum Einfluss von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund auf Rissbildung und Rissbreitenbeschränkung bei teilweise vorgespannten Konstruktionen", RWTH Aachen, Institut für Massivbau, Dissertation 1978.
- /87/ THÜRLIMANN B., CAFLISCH R., "Teilweise vorgespannter Beton", Vorträge Betontag 1969, S. 142-168.
- /88/ TROST H., CORDES H., THORMÄHLEN U., HAGEN H., "Teilweise Vorspannung - Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rissbildung und Rißbreitenbeschränkung", Deutscher Ausschuß für Stahlbeton Heft 310 , Berlin 1980
- /89/ TROST H., "Teilweise Vorspannung: Generalbericht und Allgemeine Probleme", Vortrag Betontag 1979.

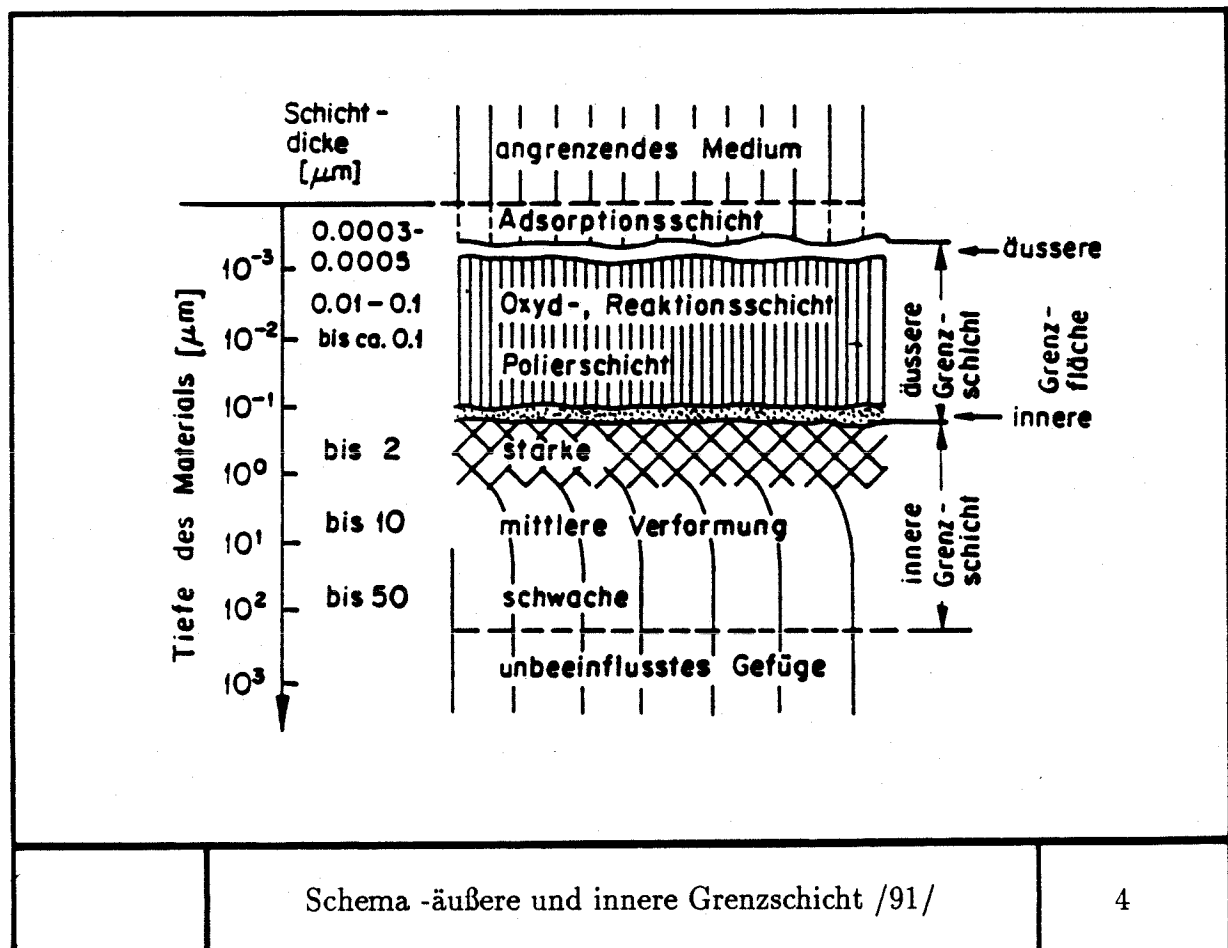
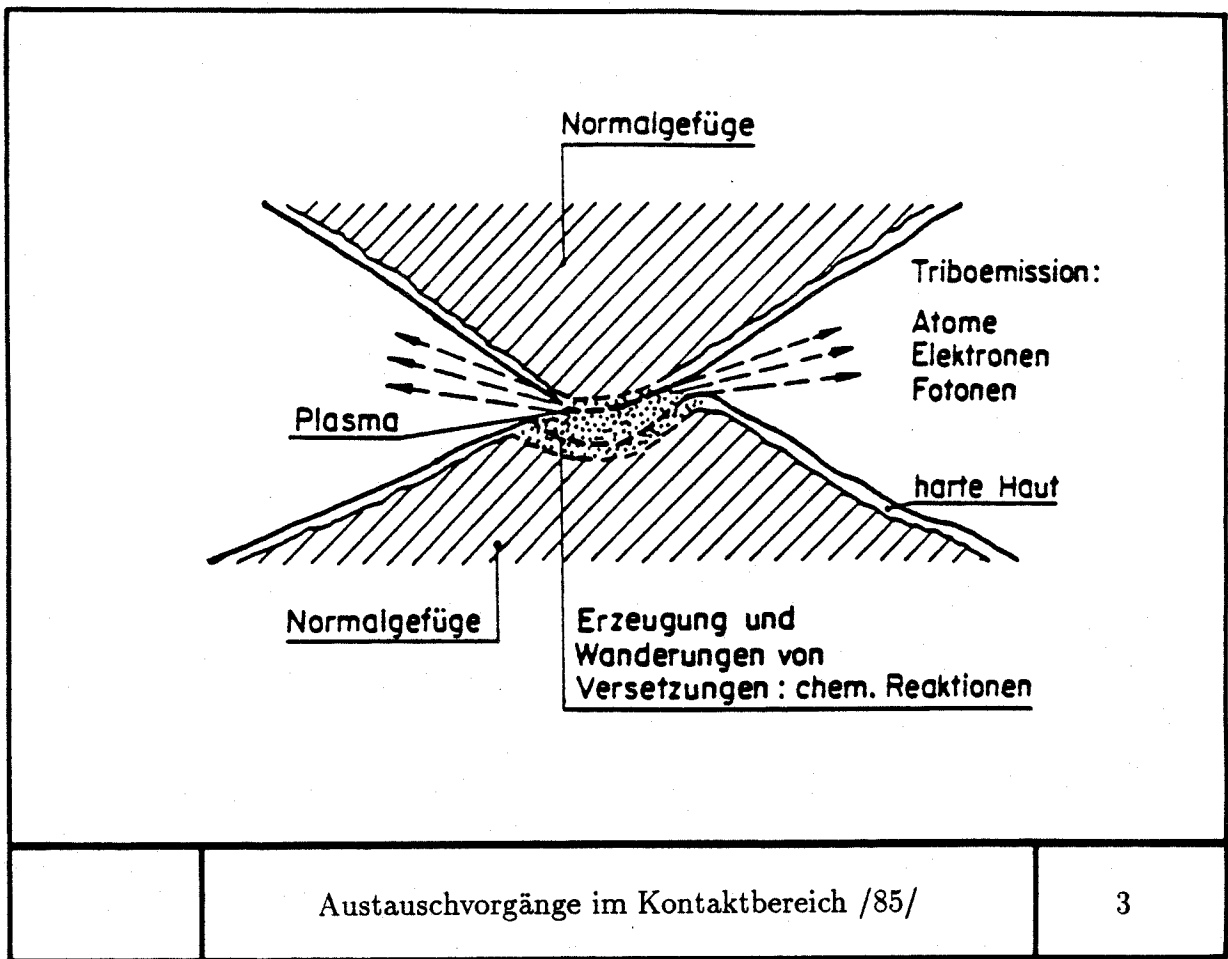
- /90/ TROST H., CORDES H., HAGEN H., "Untersuchung der inneren Rißbildung im Einpreßmörtel und deren Auswirkung auf Verbundmechanismus und Verbundfestigkeit", Bericht Nr. 16/83, Institut für Massivbau RWTH Aachen.
- /91/ UETZ H., "Grunderkenntnisse auf dem Verschleißgebiet, vor allem im Hinblick auf die Verschleißprüfung", Metalloberfläche 23, 1969.
- /92/ UTESCHER G., "Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dehnungsbehinderung", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 282 Berlin 1977.
- /93/ VDI Berichte Nr. 235, "Das Verhalten mechanisch beanspruchter Werkstoffe und Bauteile unter Korrosionseinwirkung" VDI Tagung Lindau am Bodensee 1975.
- /94/ VENUTI W.J., "A statistical approach to the analysis of fatigue failure of prestressed concrete beams", ACI- Journal, November 1965, pp. 1375-1393.
- /95/ VEREIN DEUTSCHER HÜTTENLEUTE, "Spannungsrißkorrosion in Spannbetonbauwerken - Neue Forschungsergebnisse", Verlag Stahleisen Düsseldorf 1983.
- /96/ VEREIN DEUTSCHER HÜTTENLEUTE, "??????"
- /97/ VISMANN U., "Ermüdungsbemessung teilweise vorgespannter Bauteile", Diplomarbeit am Institut für Massivbau RWTH Aachen, 1990 unveröffentlicht.
- /98/ WALTHER R., BHAL N.S., "Teilweise Vorspannung, Übersicht und Beurteilung der bisherigen Entwicklung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 223 Berlin 1979.
- /99/ WARNER R.F., HULSBOS C.L., "Fatigue properties of prestressing strand", PCI Journal, 1966, S. 32-52.
- /100/ WARNER R.F., HULSBOS C.L., Probable fatigue life of prestressed concrete beams, PCI Journal, 1966 S. 16-39.
- /101/ WASCHIEDT H., "Dauerschwingfestigkeit von Betonstählen im einbetonierten Zustand", Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 200, Berlin 1968.
- /102/ WATERHOUSE R.B., "Fretting Fatigue", Applied

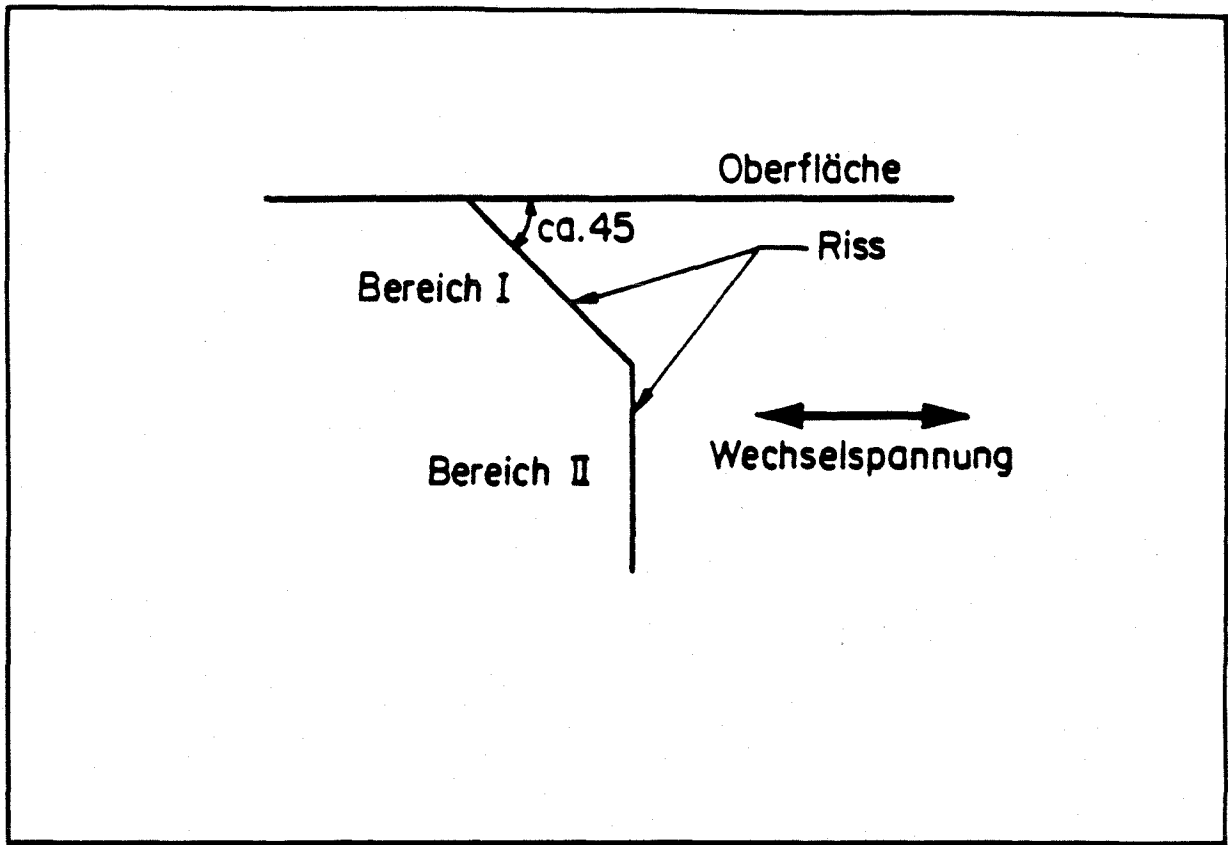
Publishers Ltd., London 1981

- /103/ WATERHOUSE R.B., "Fretting Corrosion", Pergamon Press, Oxford 1972.
- /104/ WOODTLI-FOLPRECHT J., FICHTER R., "Fraktographie von Brüchen an Seildrähten aus Stahl", Draht 26 (1975) 5, S. 211-215.
- /105/ WUTTKE W., "Tribophysik: Reibung und Verschleiss von Metallen, Hanser Verlag, 1987.



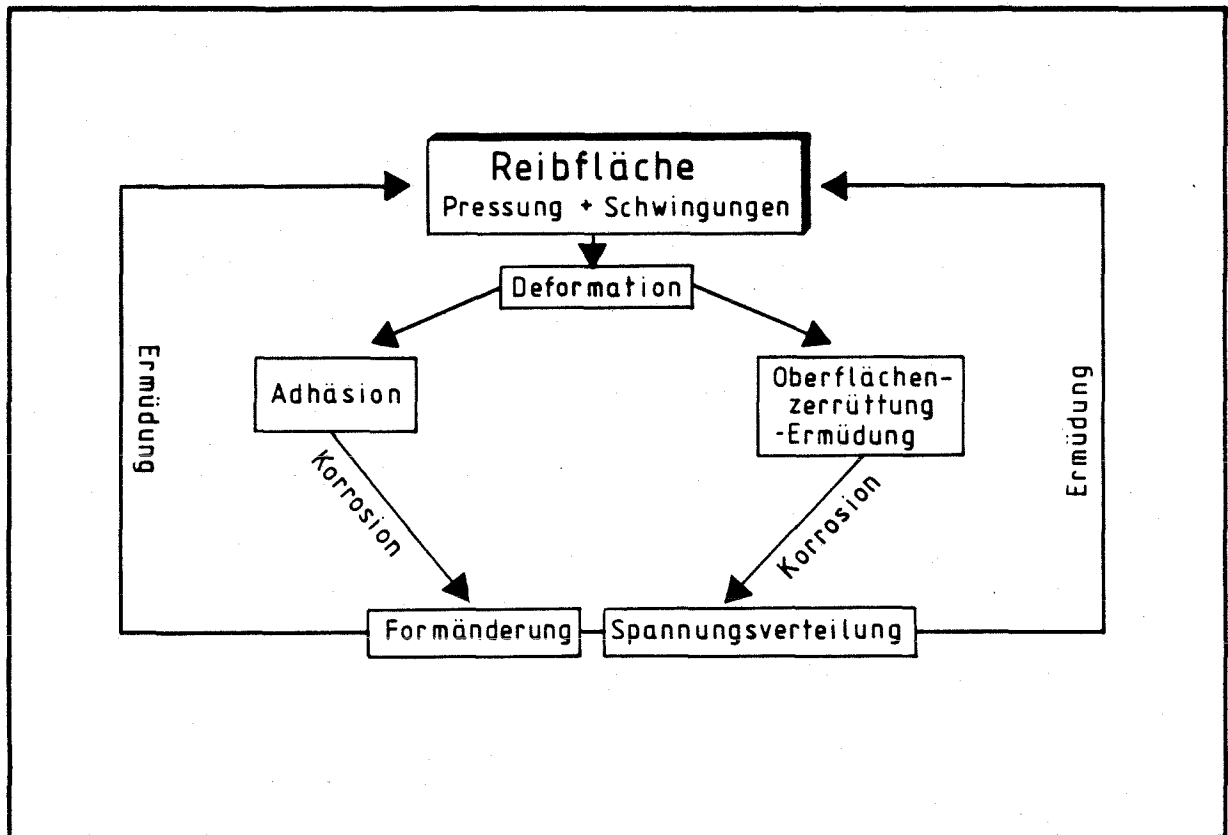
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Belastung</th> <th colspan="2">Flächendruck</th> <th rowspan="2">Von Gesamtfläche in tatsächlicher Berührung [%]</th> </tr> <tr> <th>theoretisch</th> <th>tatsächlich</th> </tr> <tr> <th>[N]</th> <th>[N/mm²]</th> <th>[N/mm²]</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20</td> <td>0.0095</td> <td>1000</td> <td>0.001</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>0.238</td> <td>1000</td> <td>0.0025</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>0.095</td> <td>1000</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>0.476</td> <td>1000</td> <td>0.05</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>0.238</td> <td>1000</td> <td>0.25</td> </tr> </tbody> </table>	Belastung	Flächendruck		Von Gesamtfläche in tatsächlicher Berührung [%]	theoretisch	tatsächlich	[N]	[N/mm²]	[N/mm²]		20	0.0095	1000	0.001	50	0.238	1000	0.0025	200	0.095	1000	0.01	1000	0.476	1000	0.05	5000	0.238	1000	0.25
Belastung	Flächendruck		Von Gesamtfläche in tatsächlicher Berührung [%]																												
	theoretisch	tatsächlich																													
[N]	[N/mm²]	[N/mm²]																													
20	0.0095	1000	0.001																												
50	0.238	1000	0.0025																												
200	0.095	1000	0.01																												
1000	0.476	1000	0.05																												
5000	0.238	1000	0.25																												
	Tatsächliche und scheinbare Berührungsfläche /10/	2																													





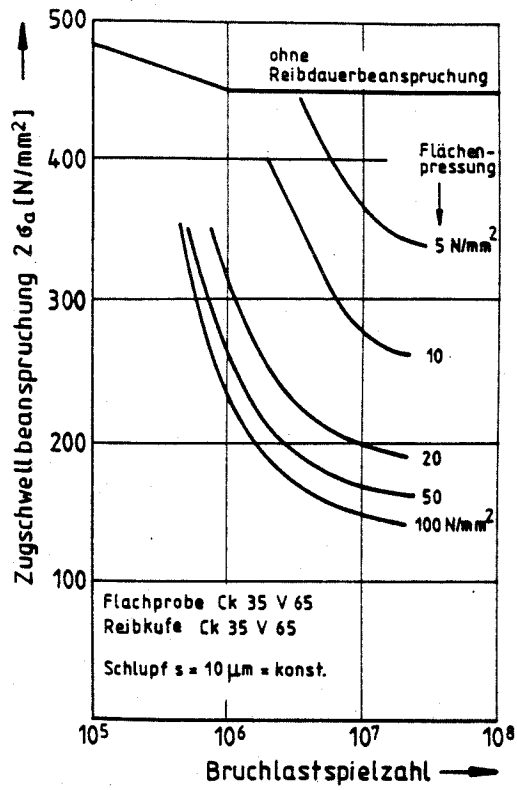
Rißausbreitung infolge Reibdauerbeanspruchung /102/

5

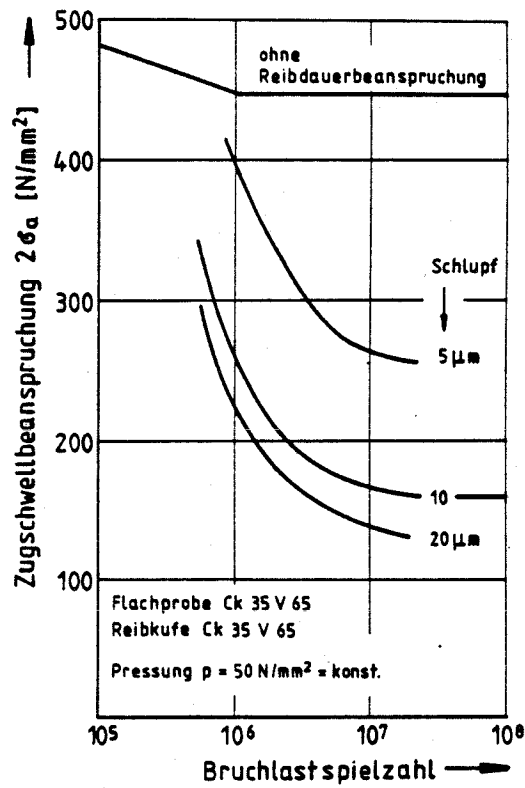


Interaktion: Reibermüdung - Reibkorrosion

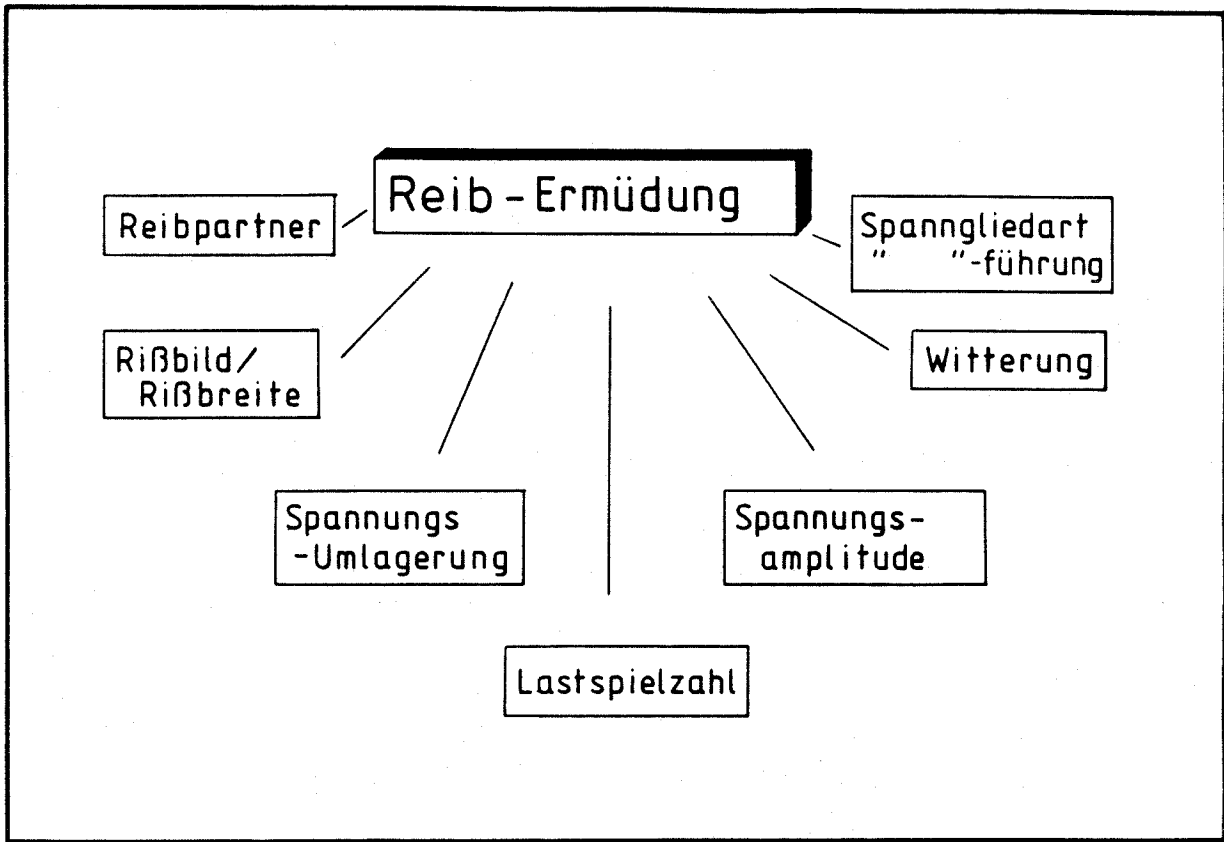
6



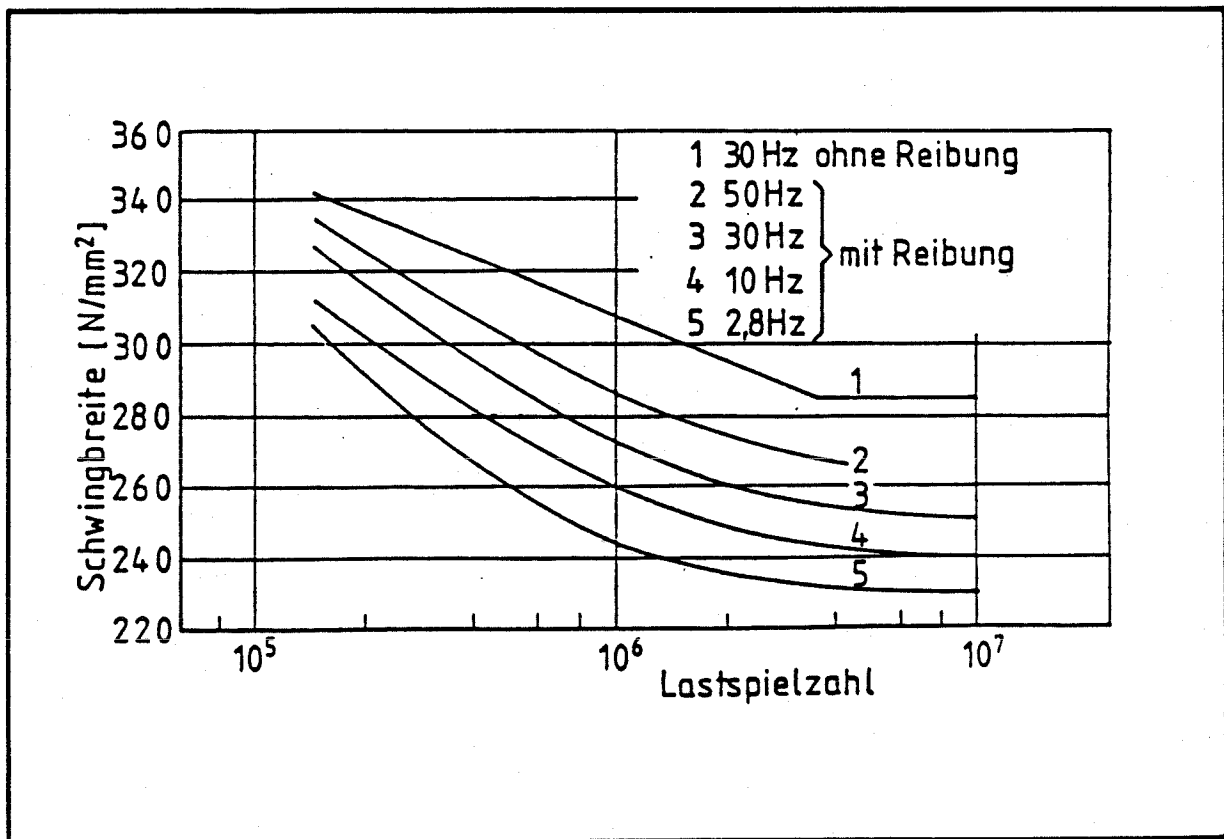
Einfluß der Kontaktpressung /41/



Einfluß der Relativverschiebung /41/

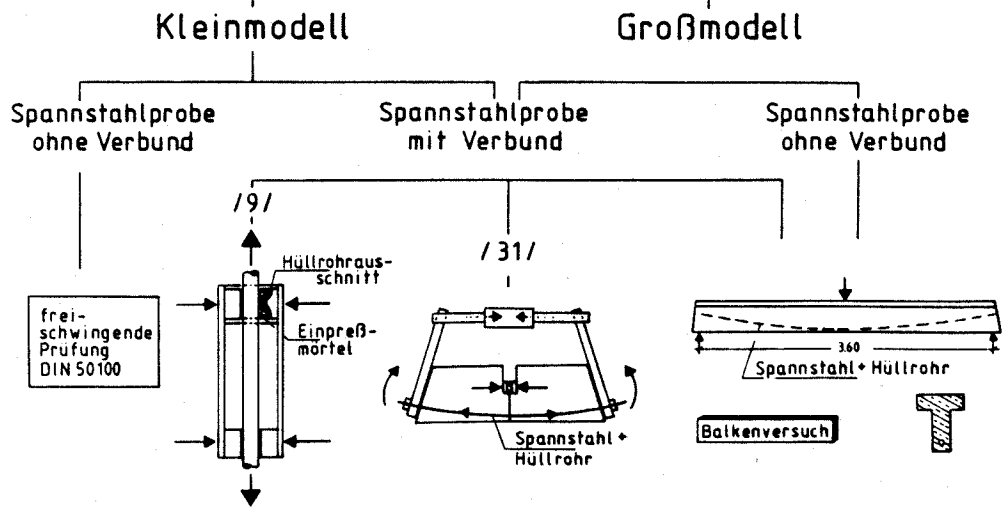


	Parameter - Reibermüdung Spannstahl	9
--	-------------------------------------	---



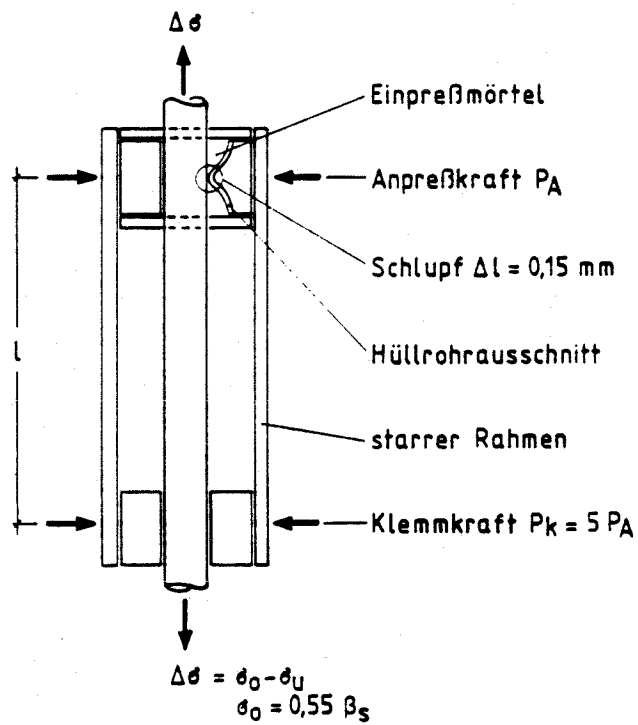
	Einfluß der Belastungsfrequenz /35/	10
--	-------------------------------------	----

Prüfsysteme: Reiberermüdung



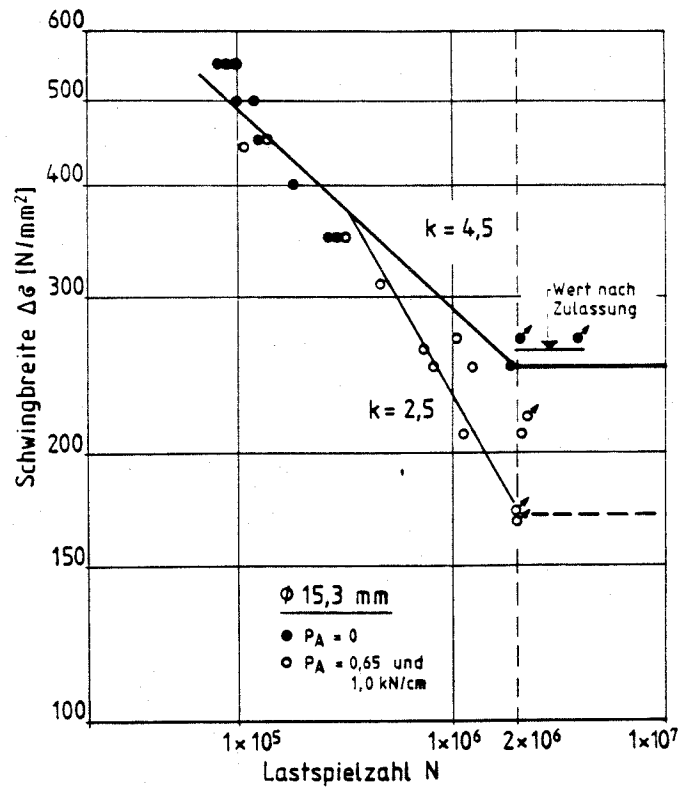
Untersuchungsverfahren - Ermüdung Spannstahl

11



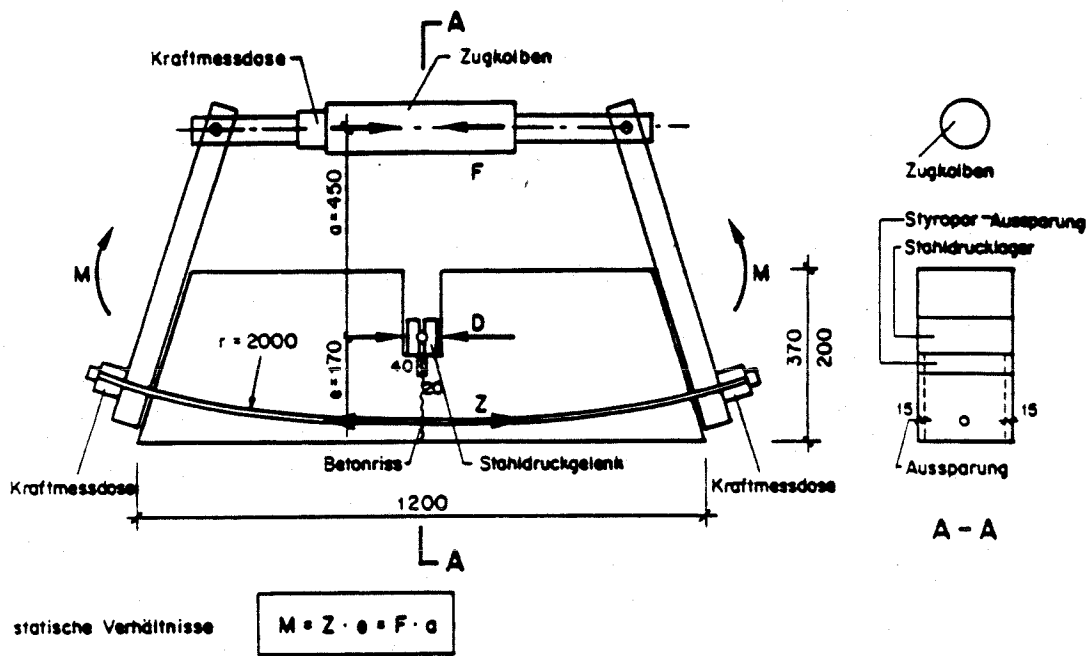
Elementares Prüfverfahren /23/

12



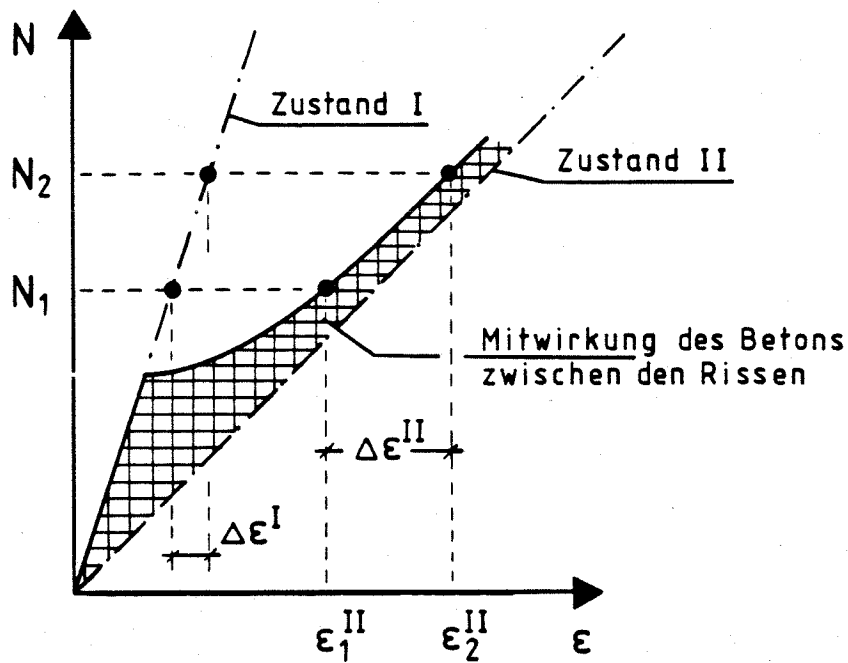
Dauerschwingfestigkeit - Spannstahlritze /22/

13

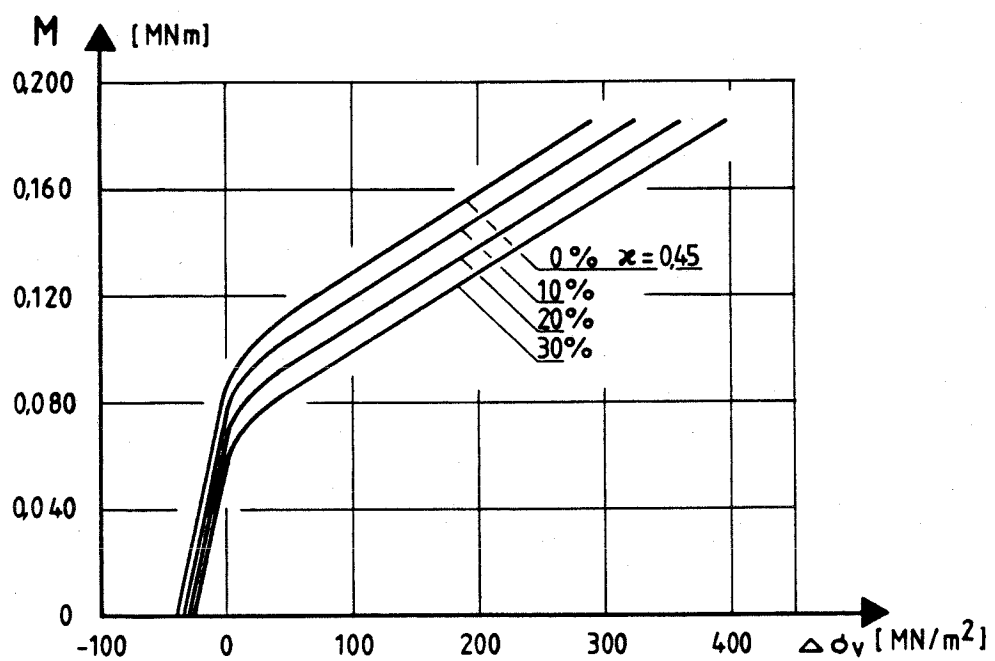


Kleinmodellversuch - Reibermüdung /68/

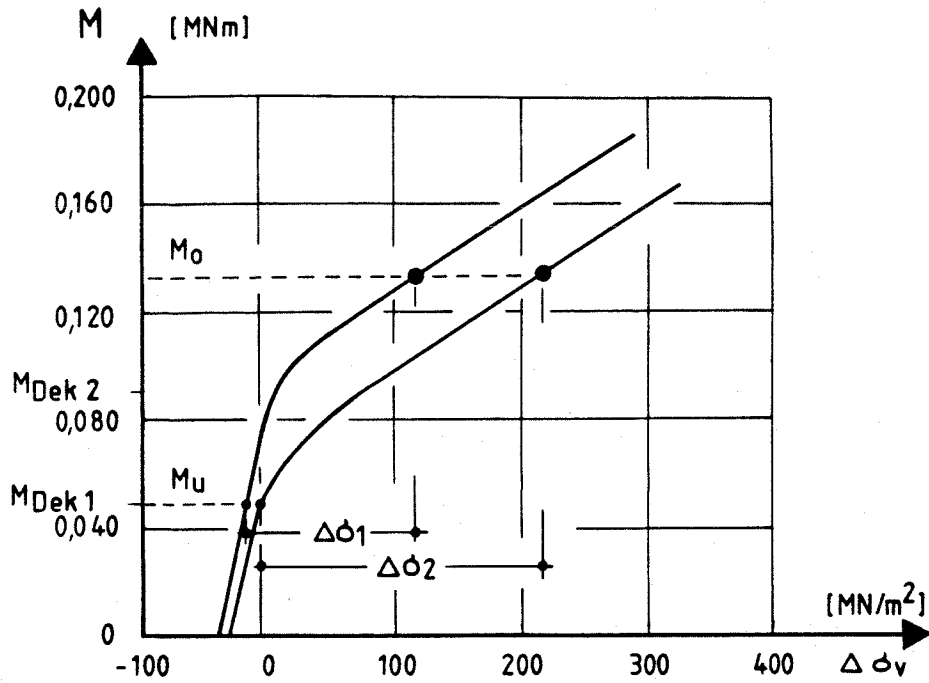
14



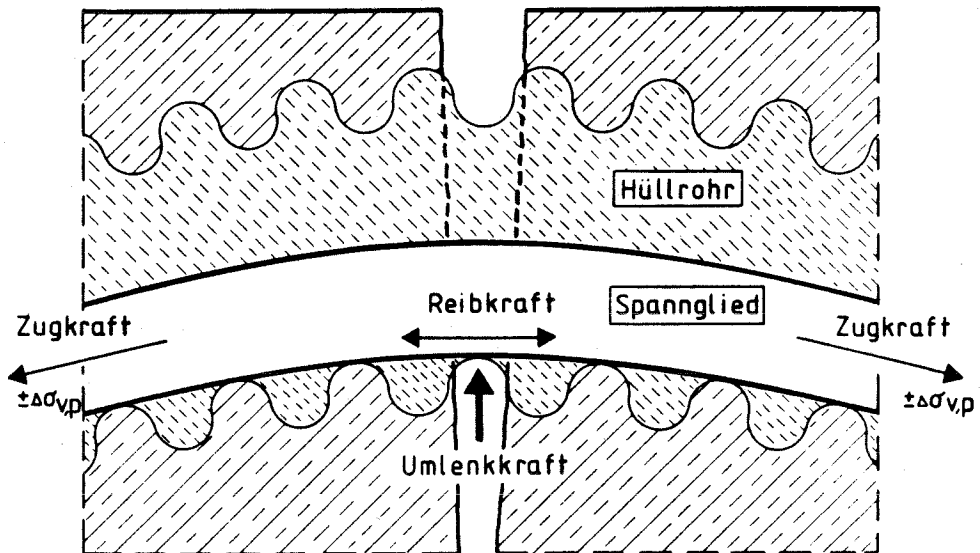
Übergang Zustand I - Zustand II



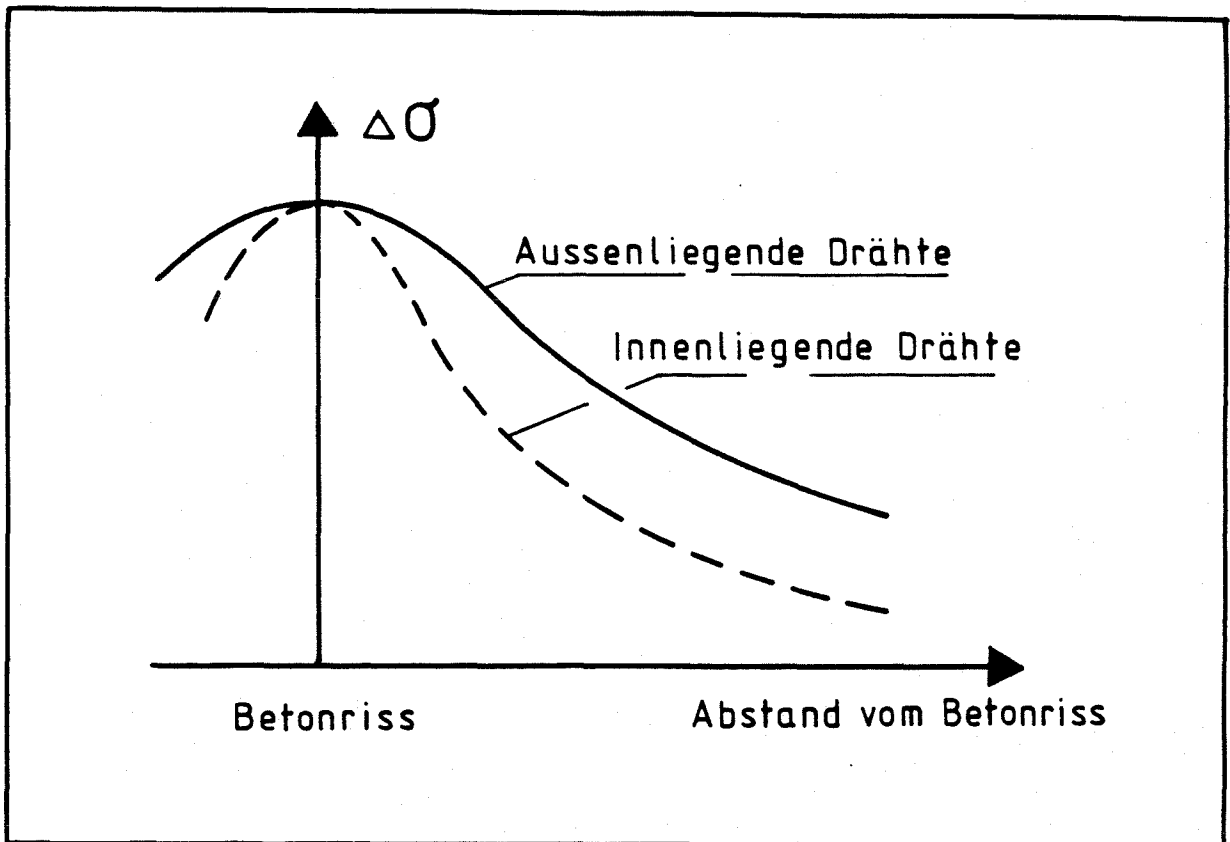
Einfluß von Schwankungen in der Vorspannkraft



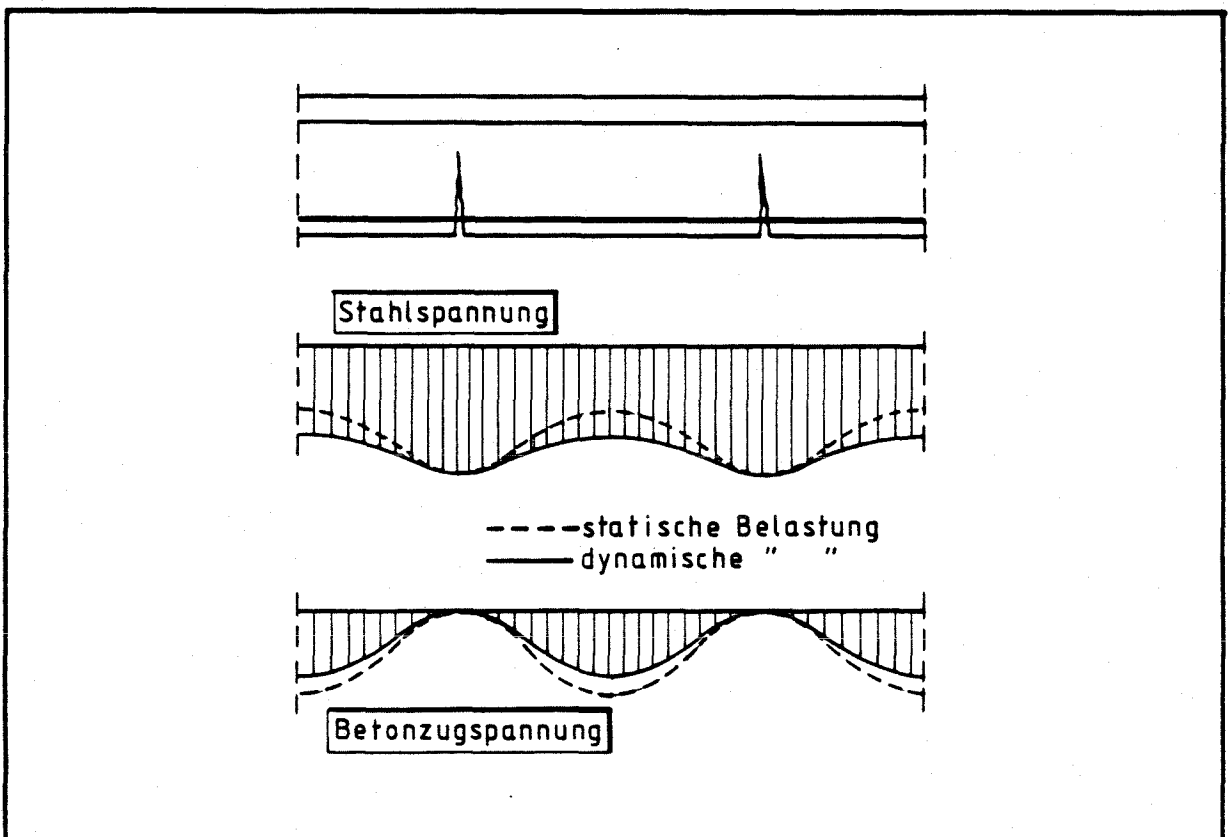
Einfluß - Dekompression - Spannungsamplitude



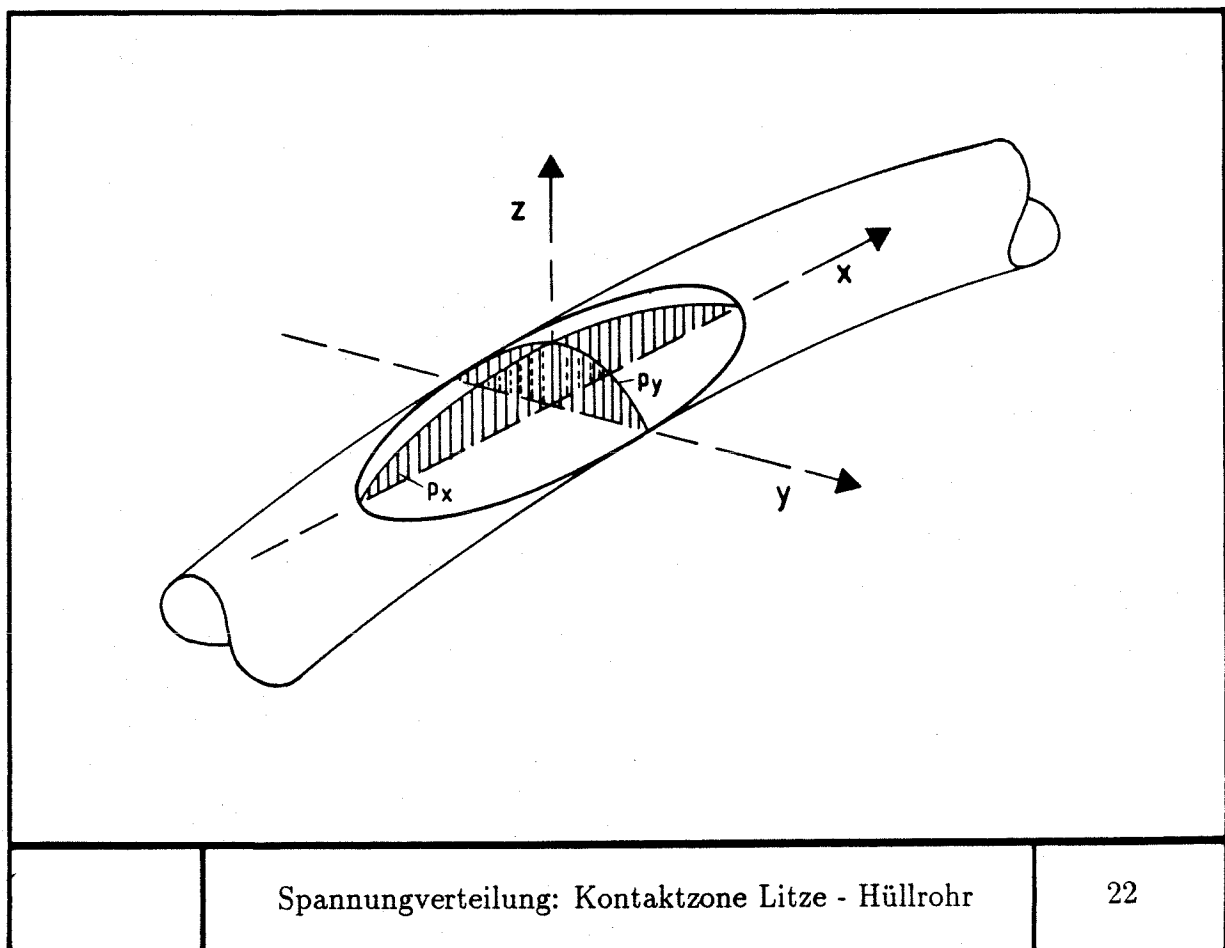
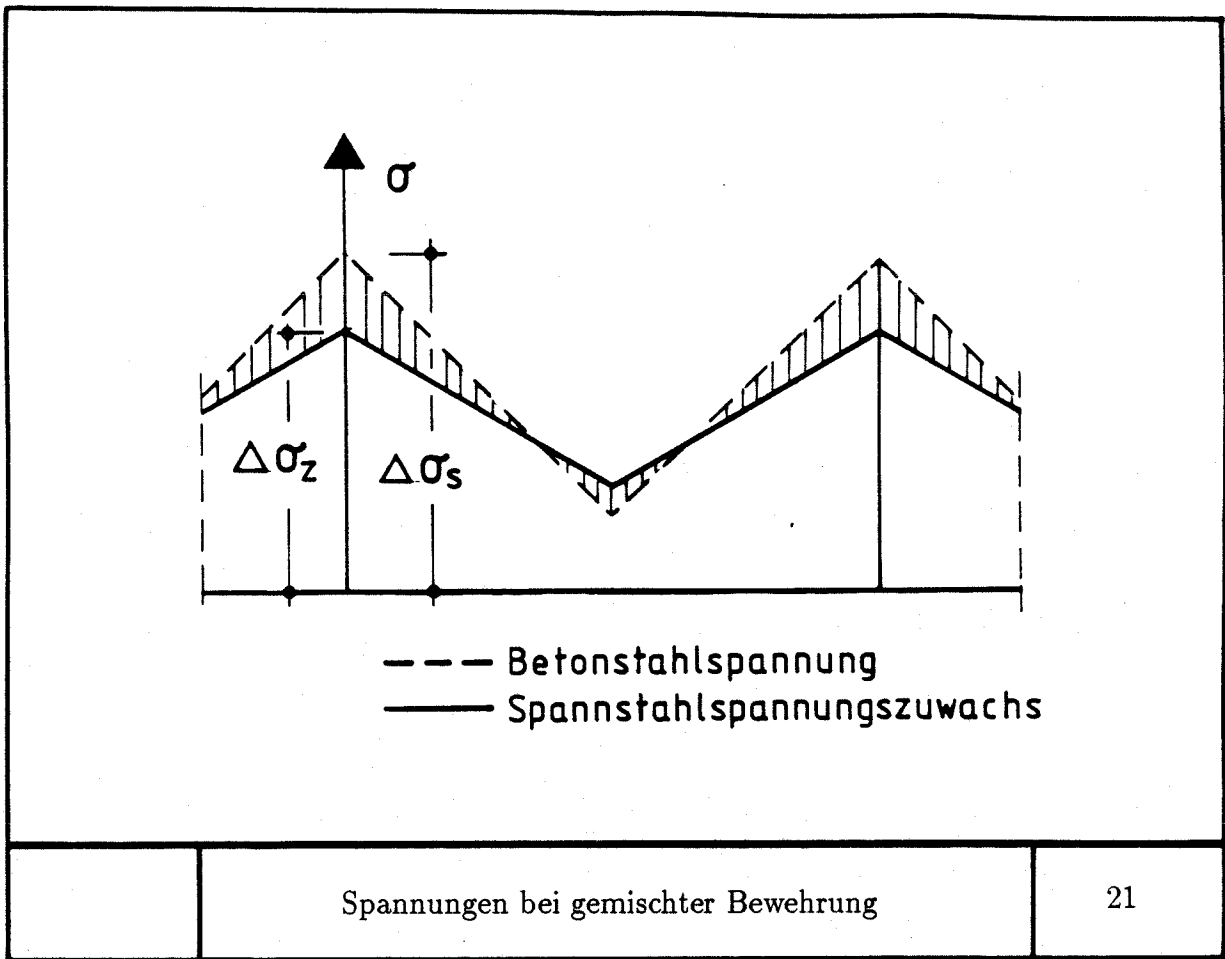
Auftretende Kräfte in der Kontaktzone

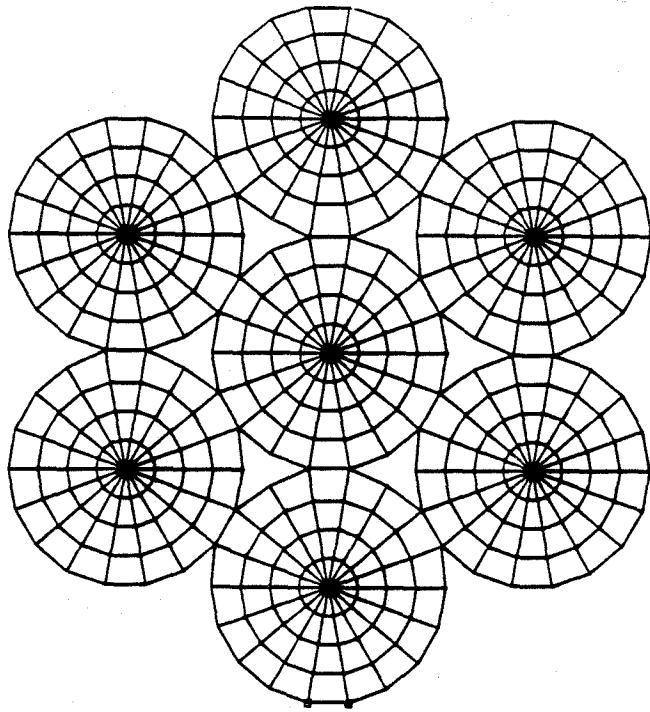


	Spannungsamplitude im Ribbereich /68/	19
--	---------------------------------------	----



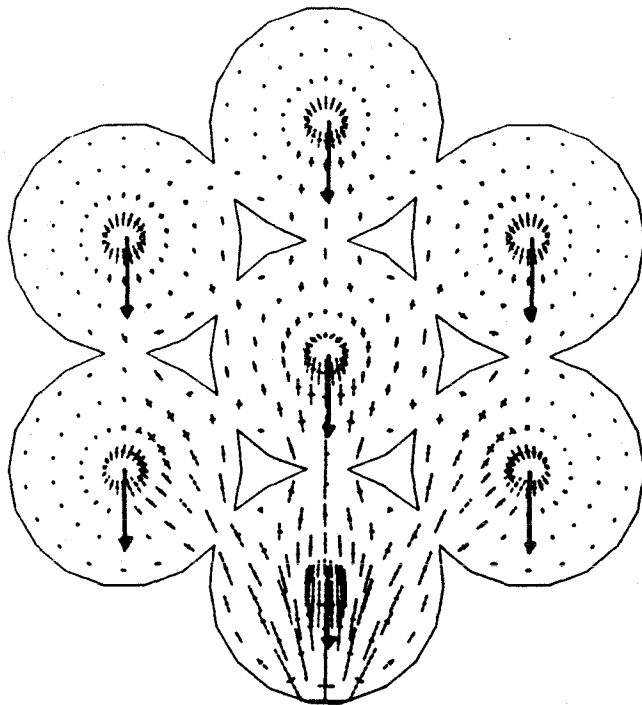
	Spannungsverhältnisse - Dynamische Belastung	20
--	--	----





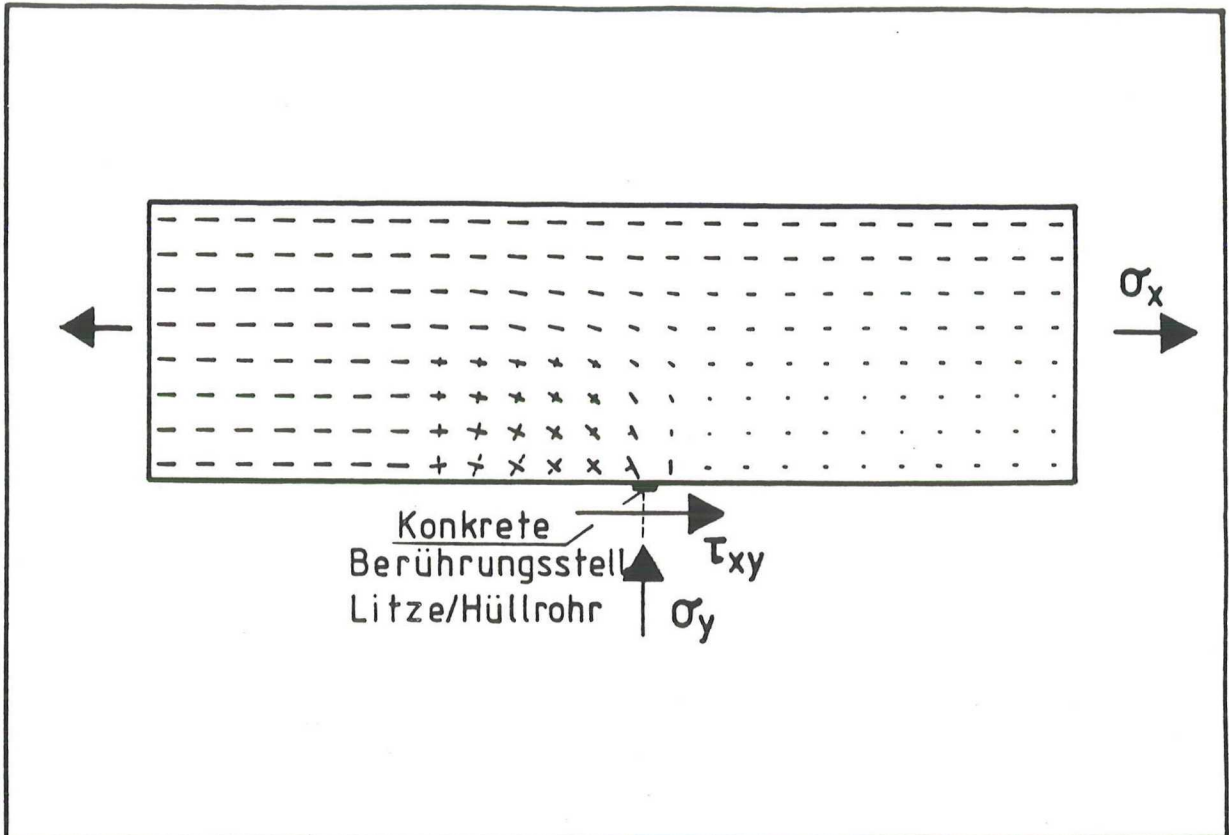
Finite Elemente Raster für Litzenquerschnitt

23



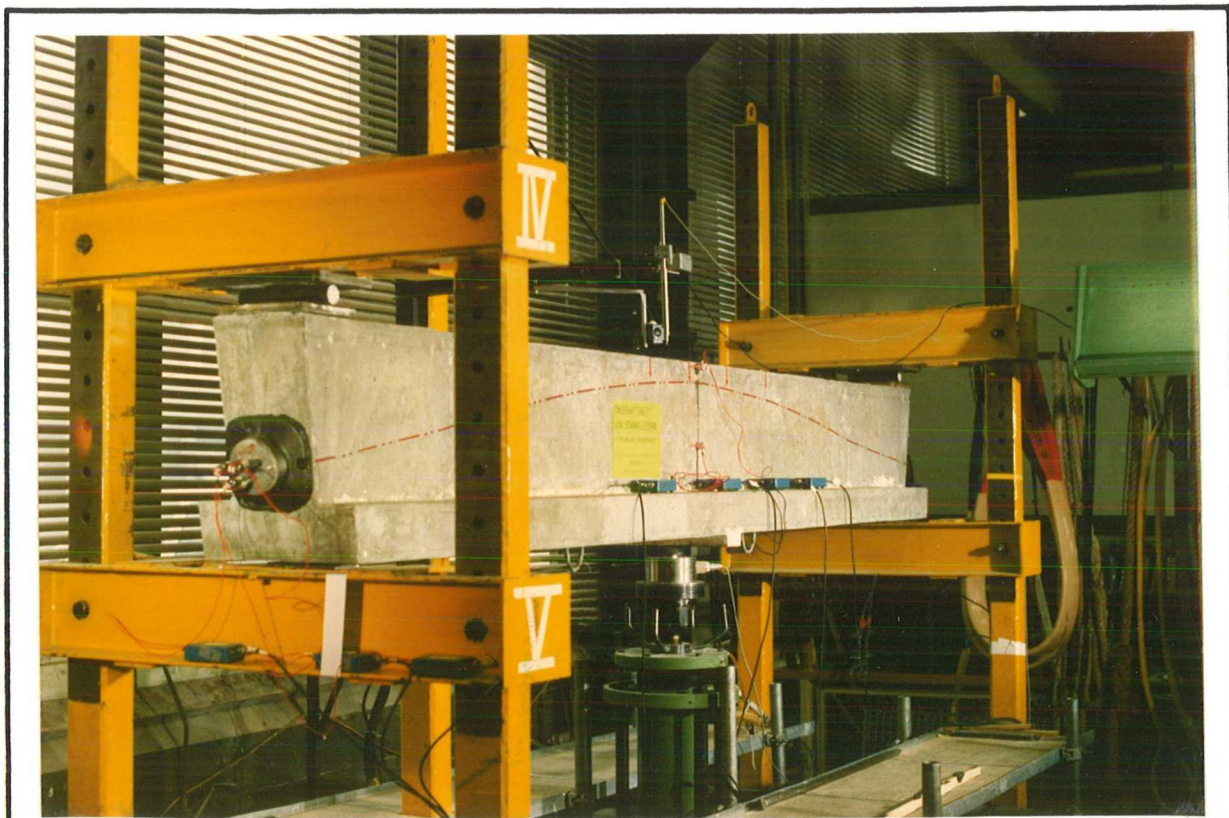
Hauptspannungsverlauf: Lastfall Umlenkkraft

24



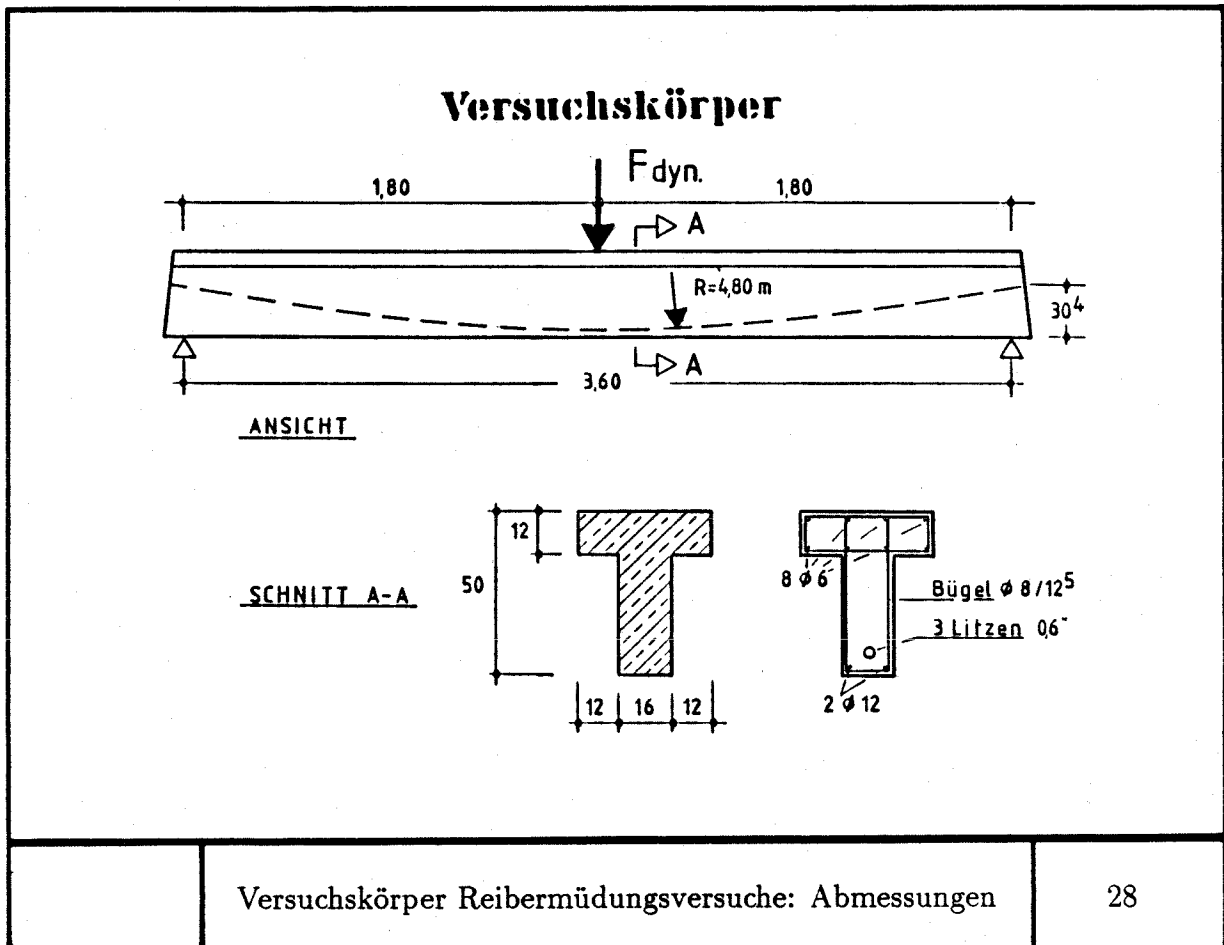
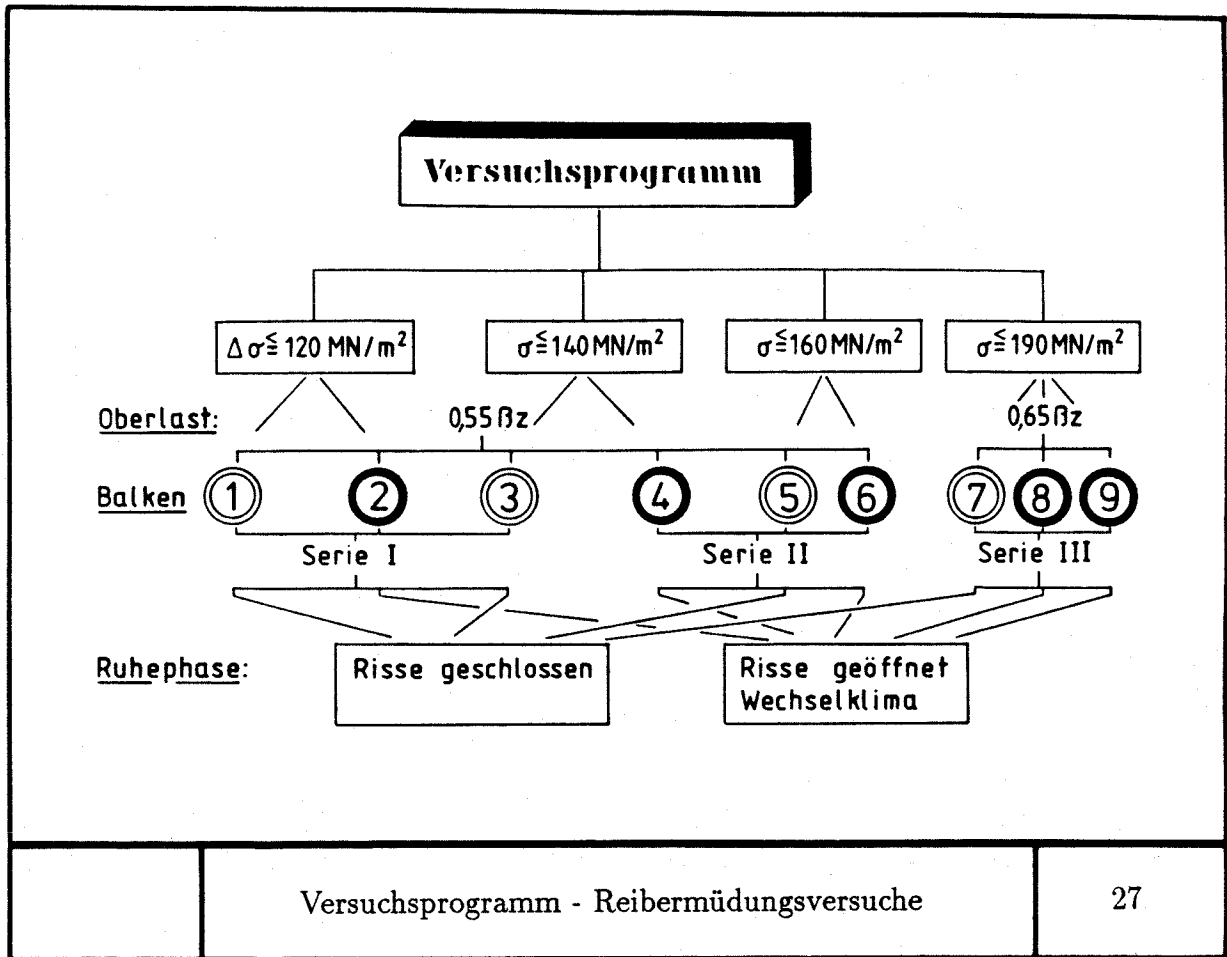
Hauptspannungsverlauf im Längsschnitt der Litze

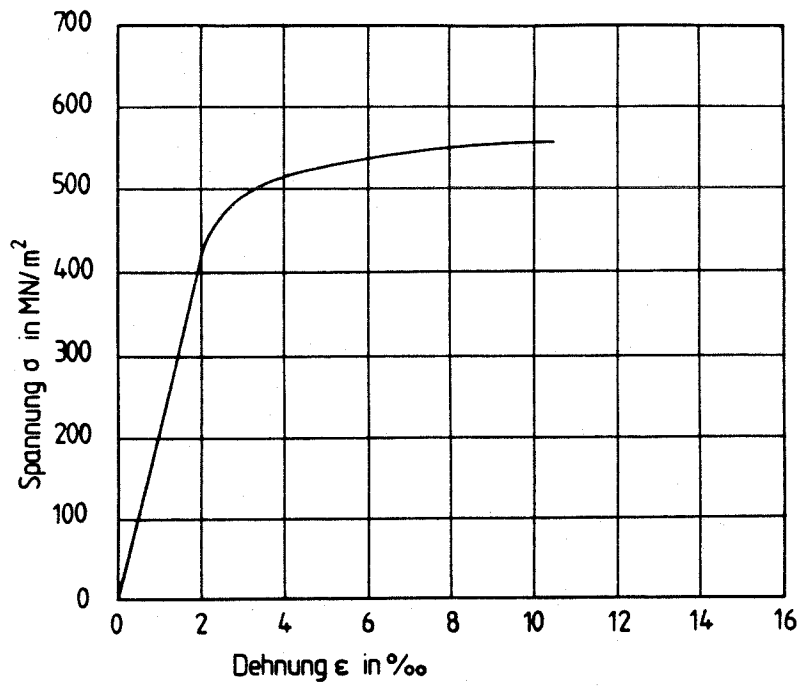
25



Versuchseinrichtung - Reiberermüdungsversuche

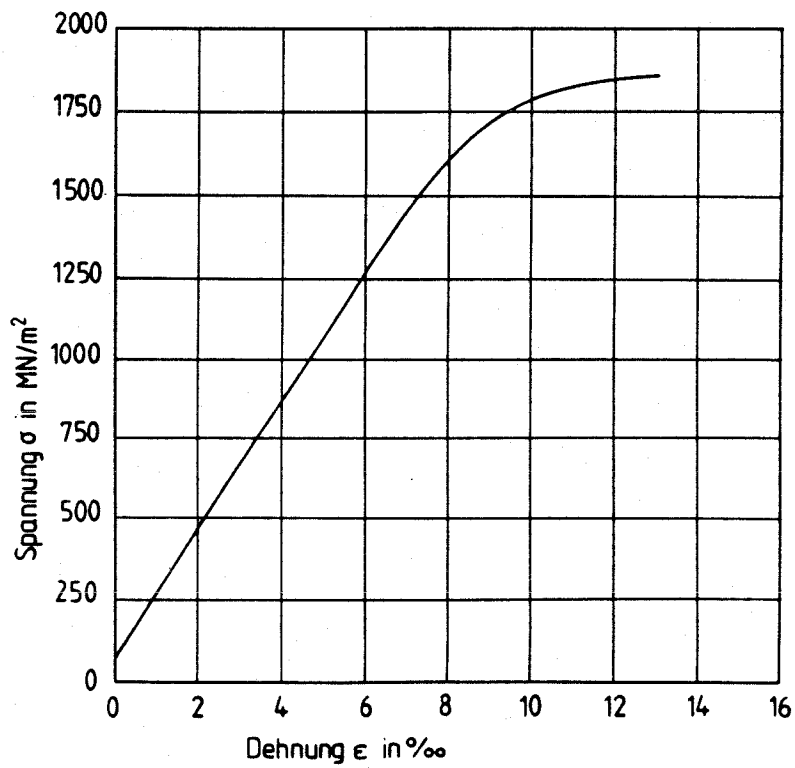
26





Spannungsdehnungslinie Betonstahl BST 500 S

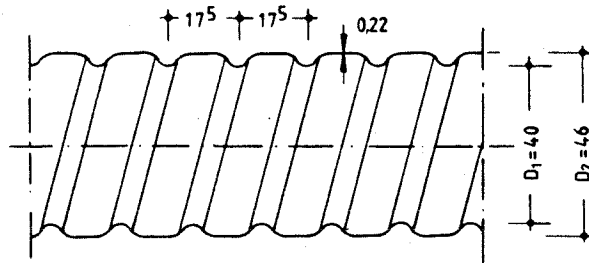
29



Spannungsdehnungslinie Spannstahl

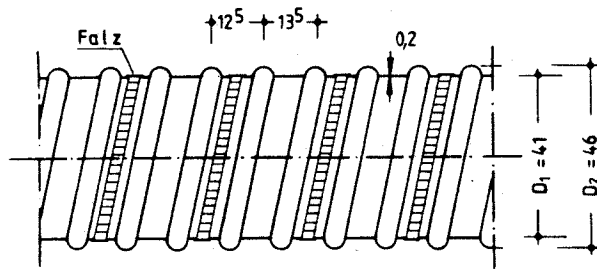
30

31a
längsgeschweißt



Typ: HW 7121, Hersteller: Metallschlauchfabrik Pforzheim
Werkstoff: Stahl blank

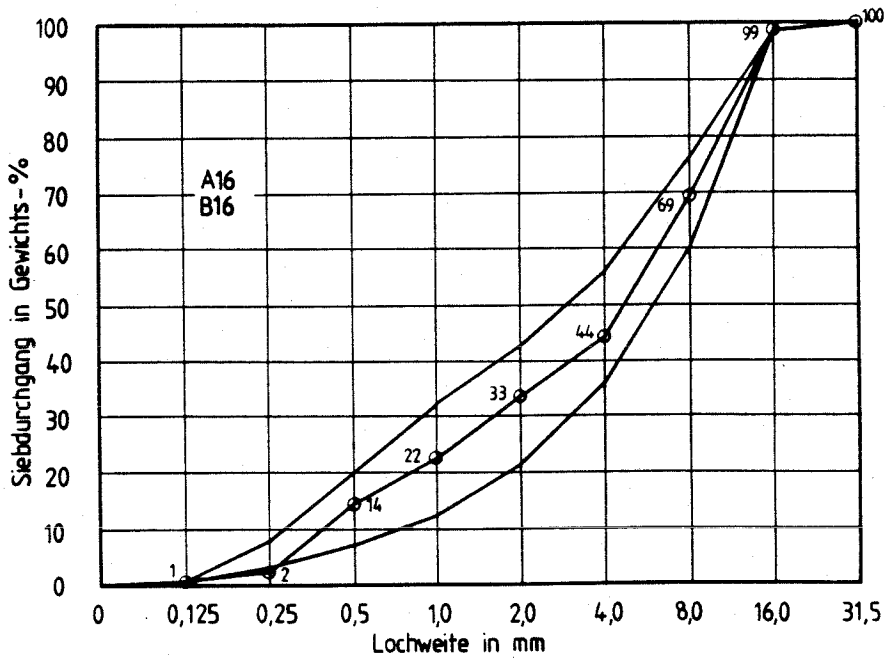
31b
spiralfalzt



Hersteller: Rainer Isolierrohrfabrik Max Drossbach
Werkstoff: Stahl blank

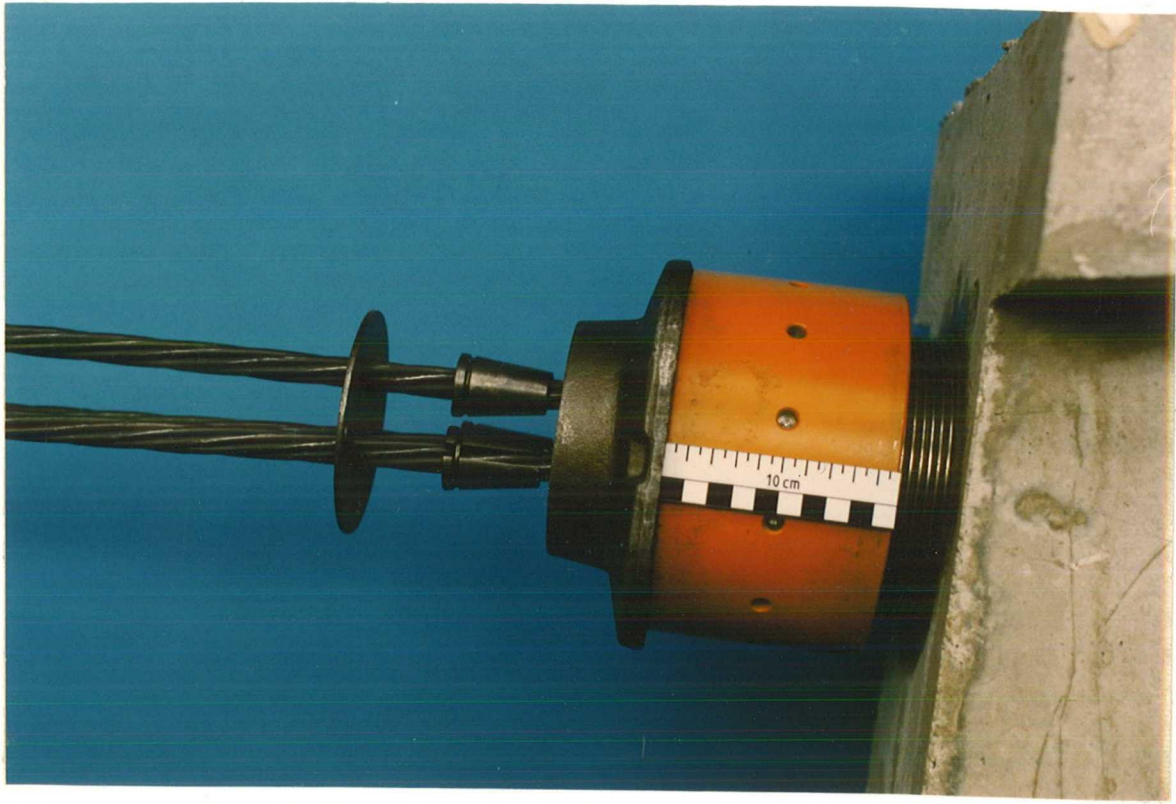
Hüllrohrlängsschnitte

31

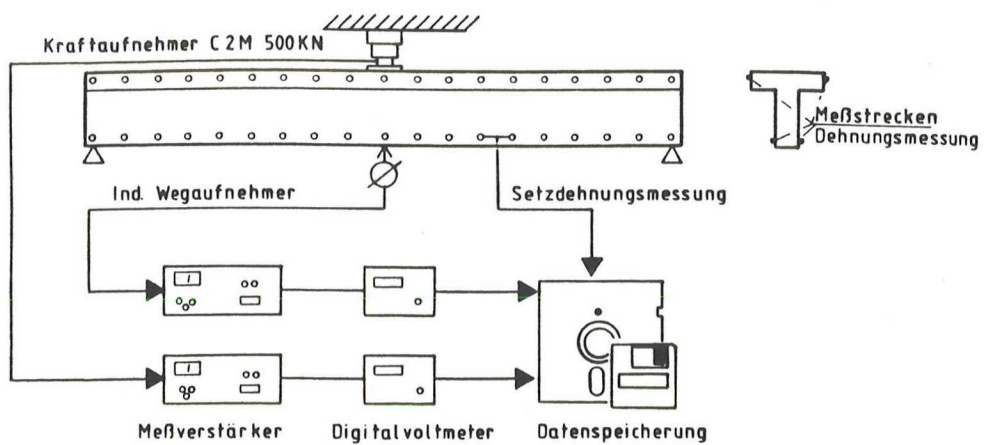


Sieblinie - Betonrezeptur

32



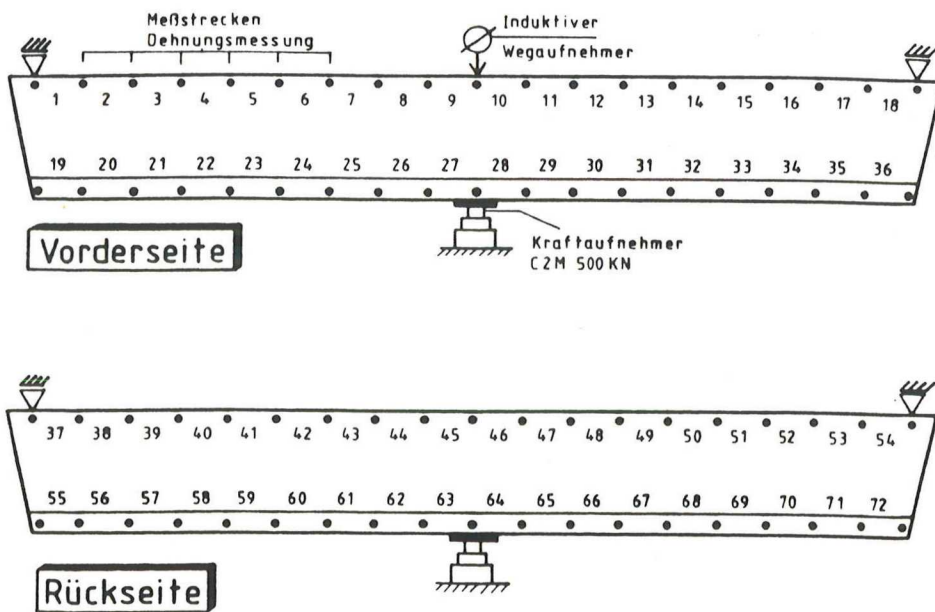
Detail - Spanngliederarretierung



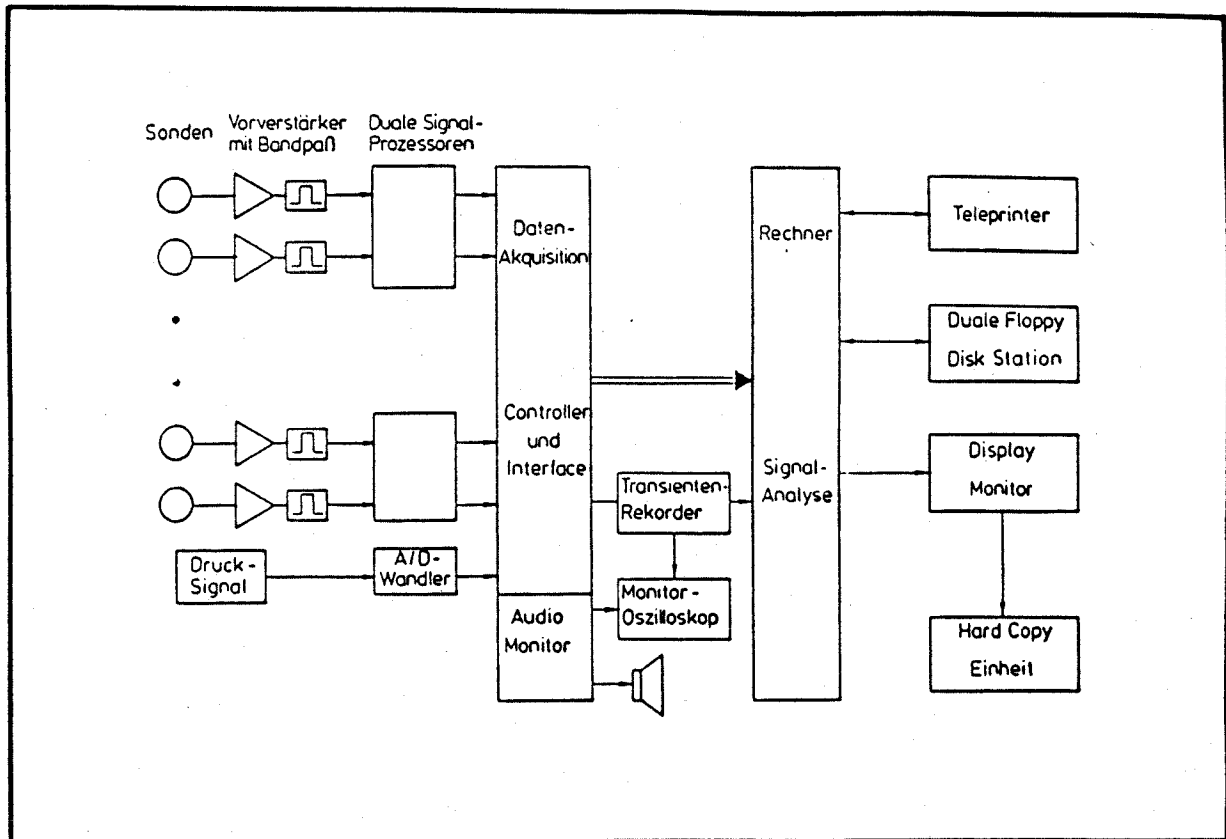
Versuchsaufbau - Reibermüdungsversuche



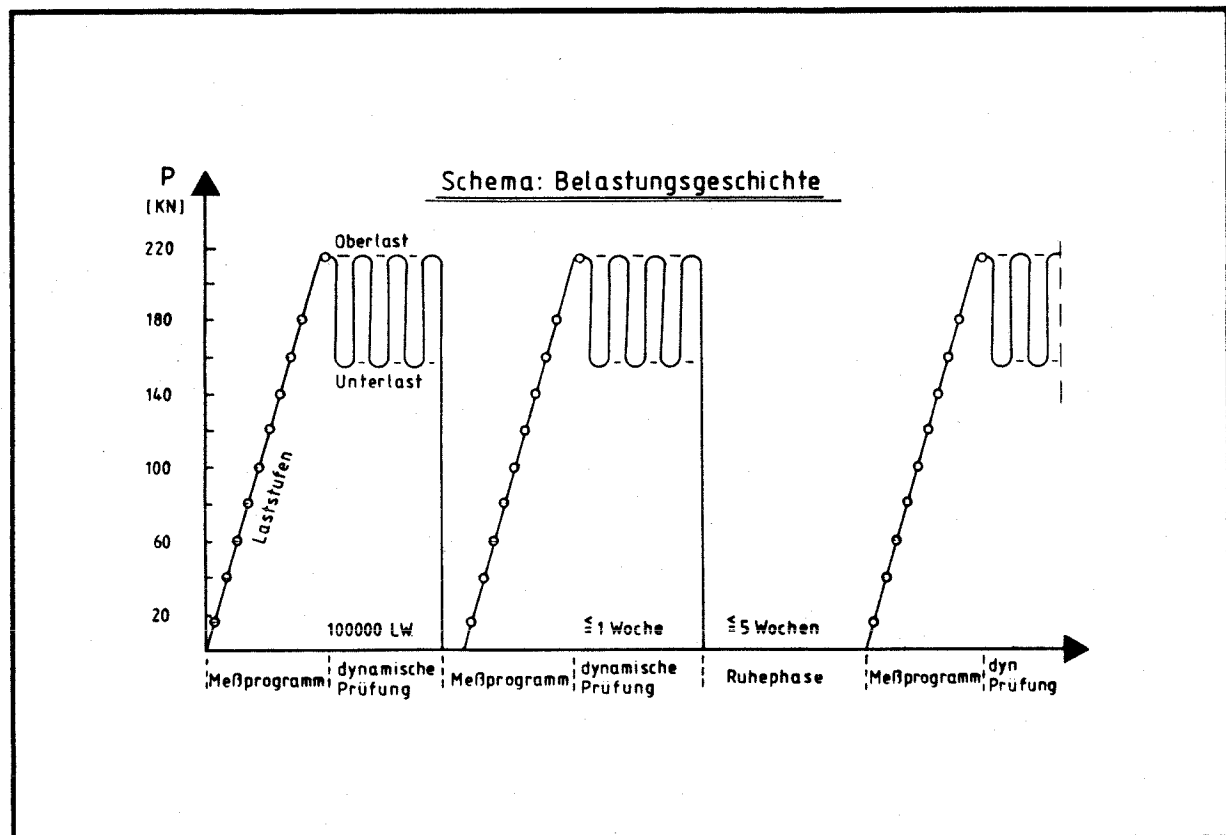
Zwischenlagerung der Versuchskörper - Ruhephasen



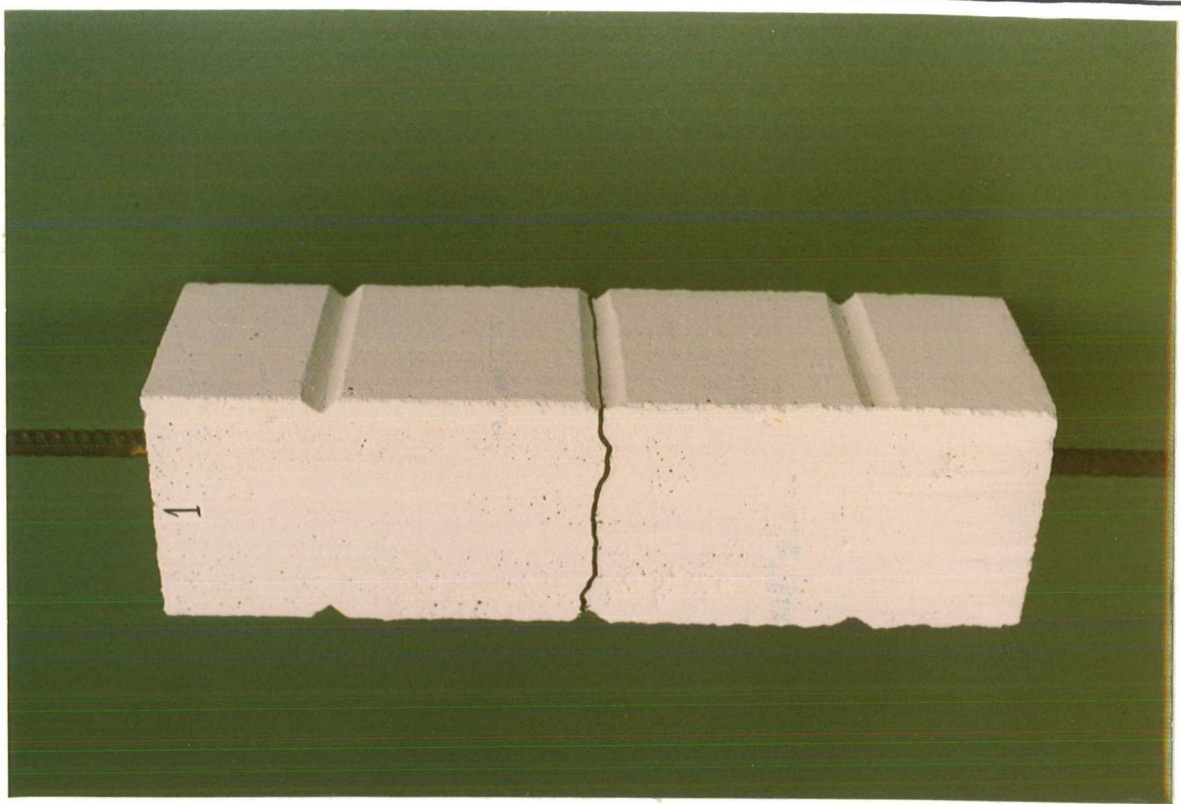
Meßstreckenaufteilung



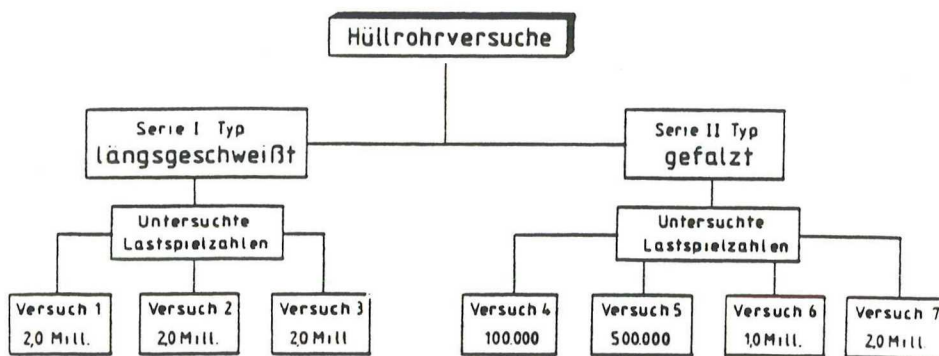
Überwachungssystem - Schallemissionsanalyse



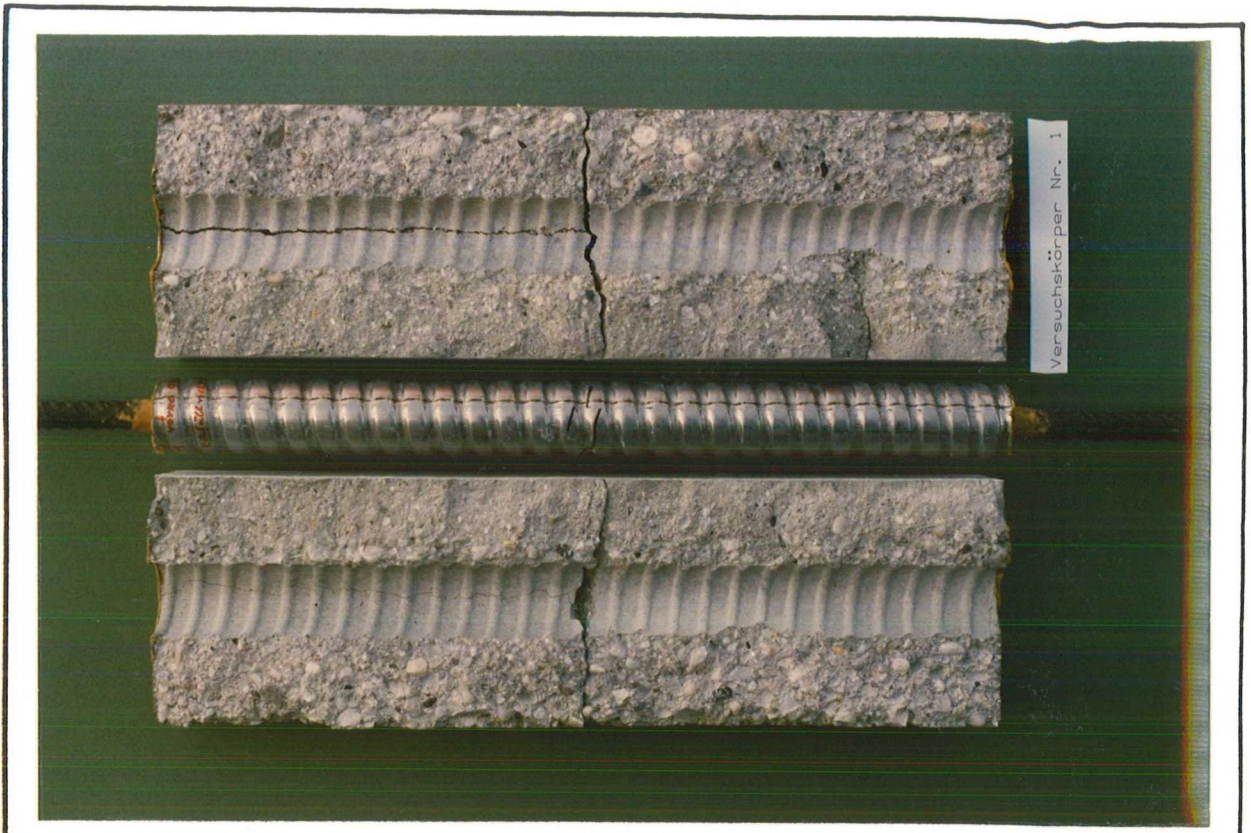
Belastungsgeschichte Versuchsbalken 2



Versuchskörper Hüllrohrversuche



Versuchsprogramm Hüllrohrversuche



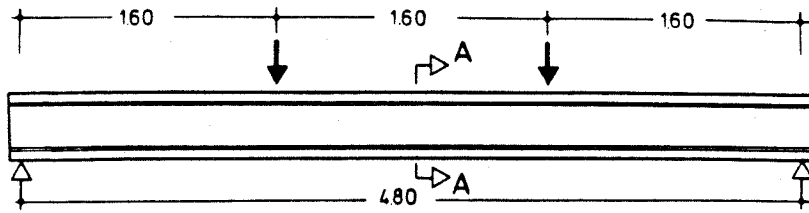
Aufgetrennter Versuchskörper

41



Ermüdungsriß: Hüllrohr - längsgeschweißt

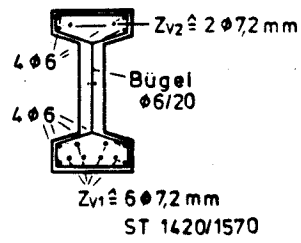
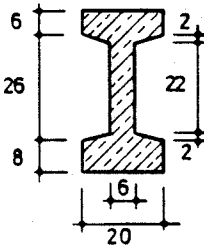
42



ANSICHT M 1:25

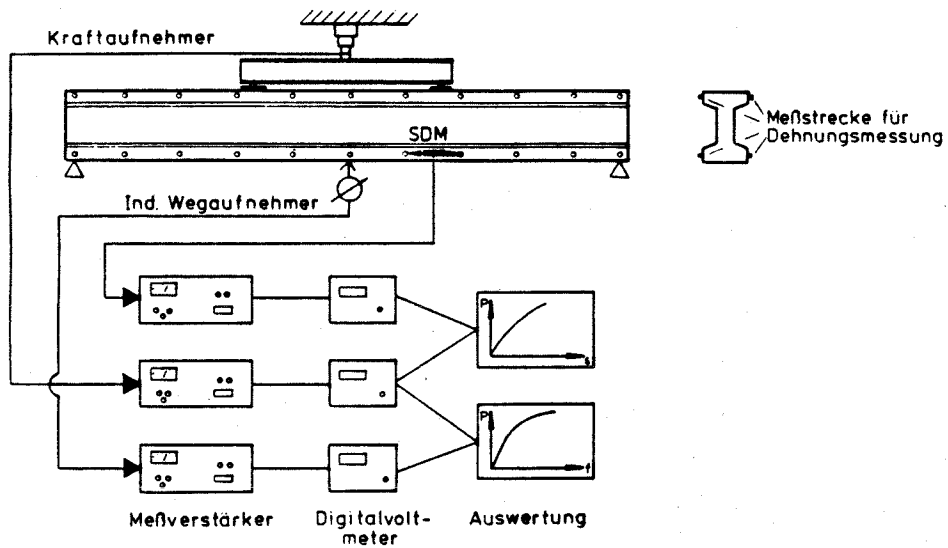
SCHNITT A-A M 1:15

Spannbettbinder
M 1:25



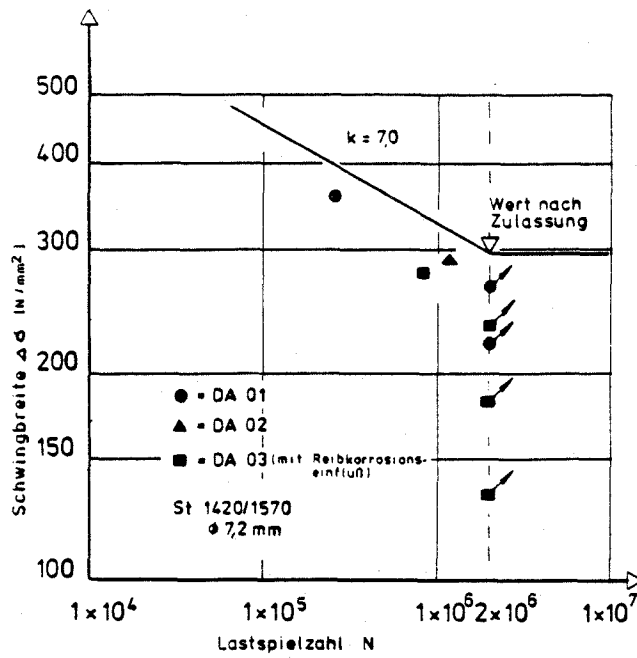
Versuchskörper Spannbettbinder

43

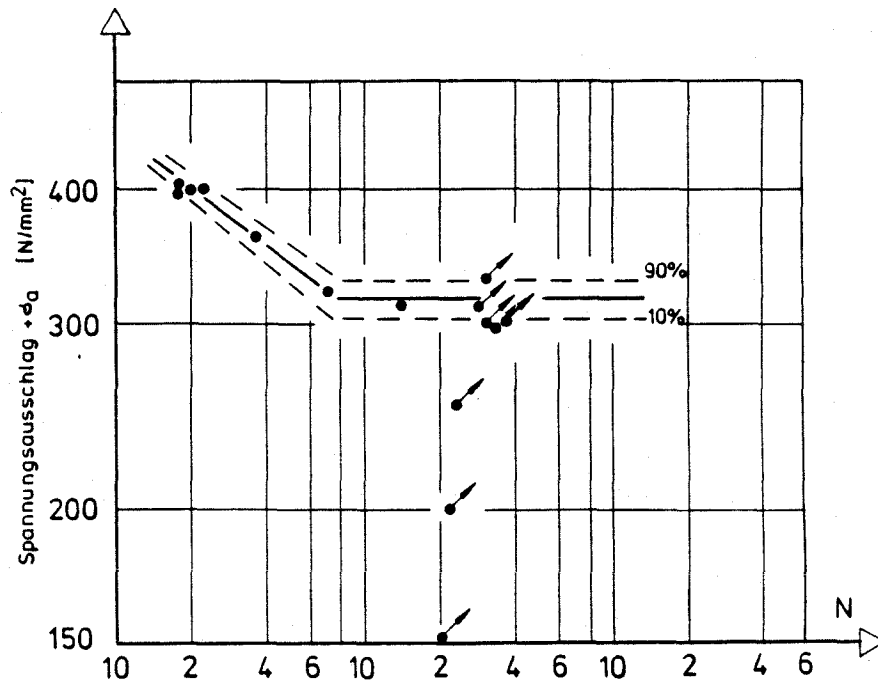


Versuchsaufbau - Spannbettbinder

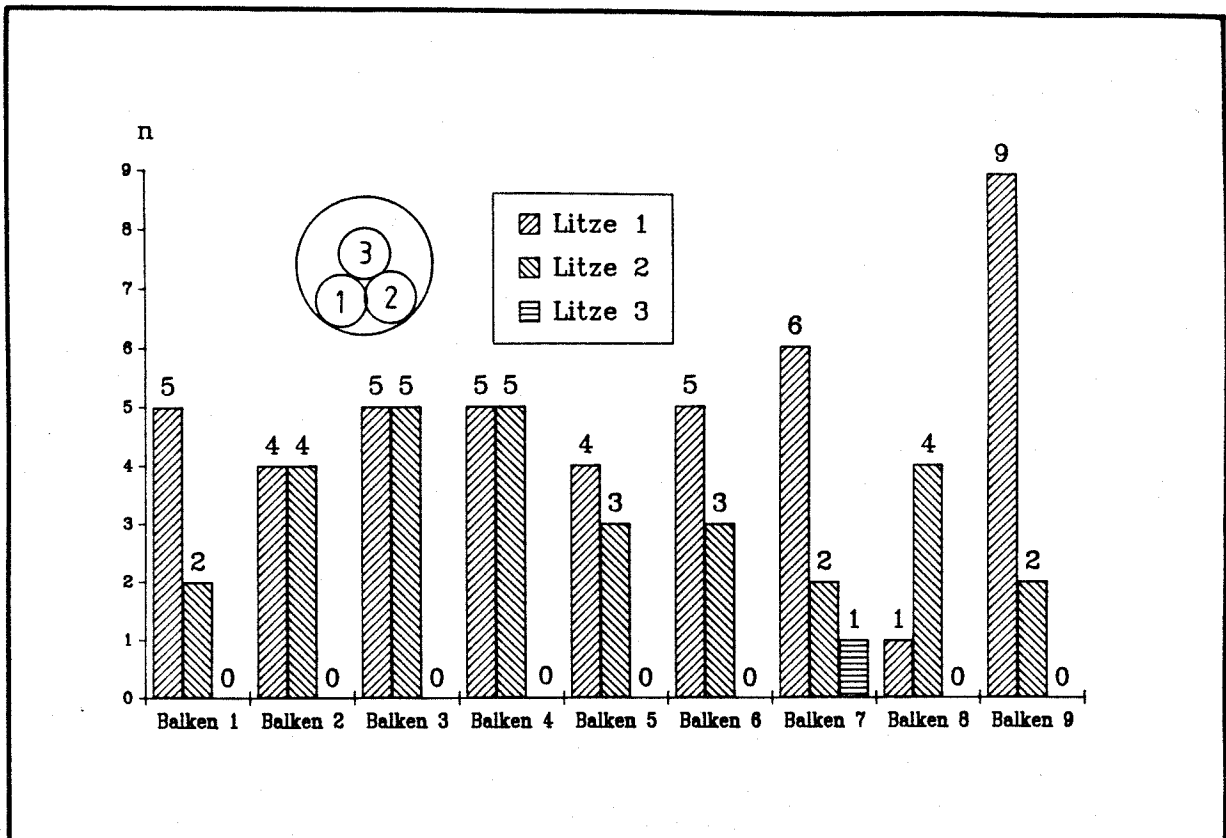
44



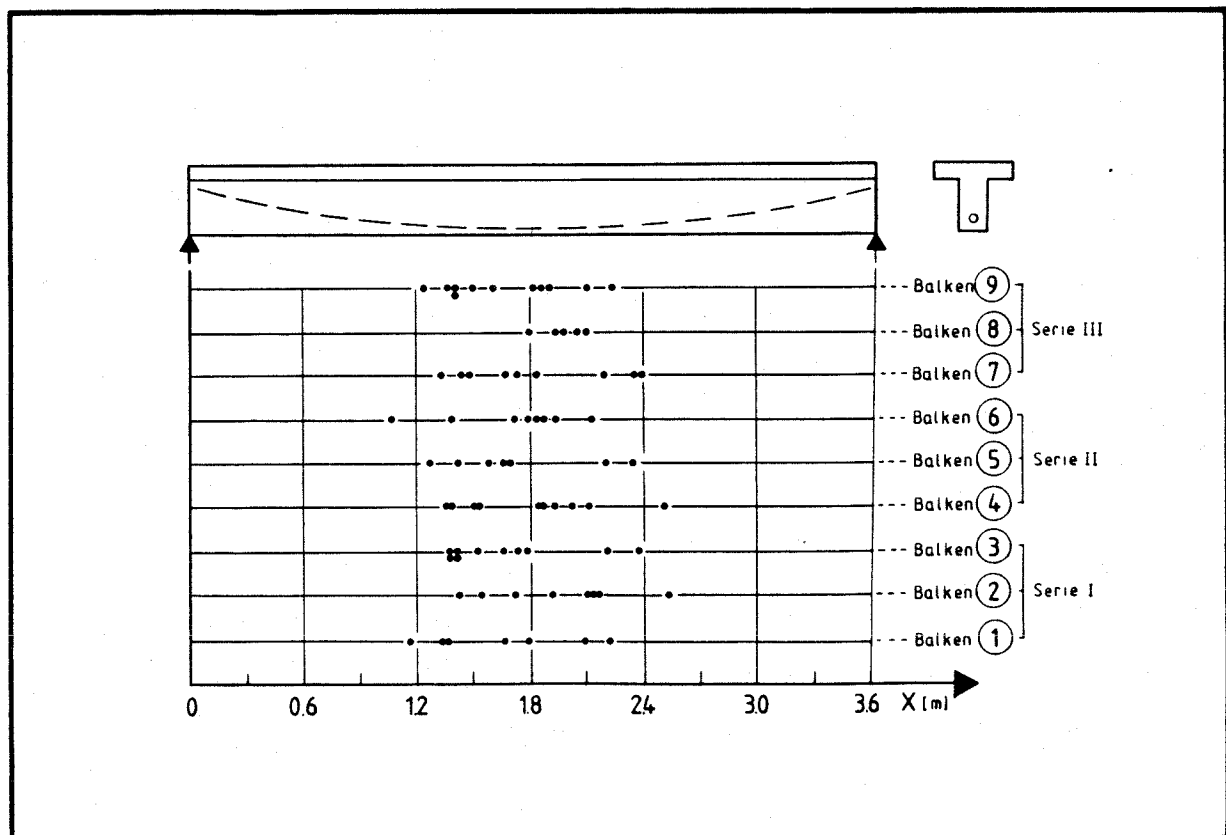
Dauerschwingfestigkeit Spannstähle - Spannbett



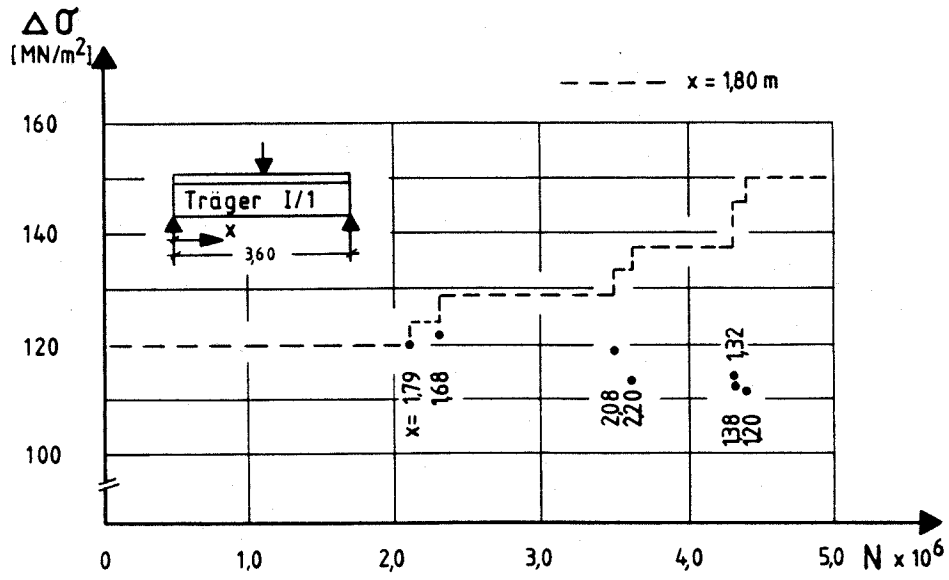
Dauerschwingfestigkeit Betonstahl ϕ 6 mm



Übersicht festgestellte Dauerbrüche in den Litzen

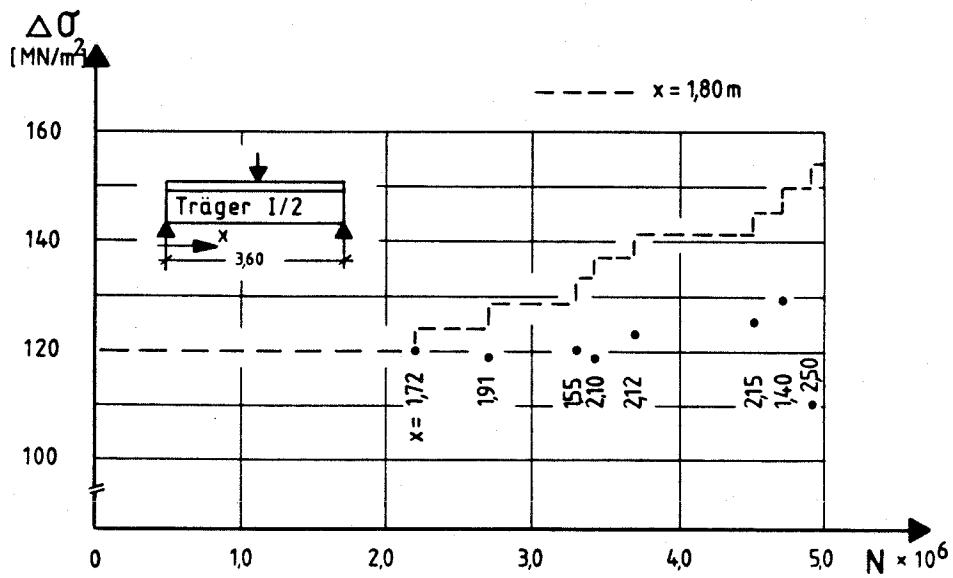


Lage der Dauerbrüche



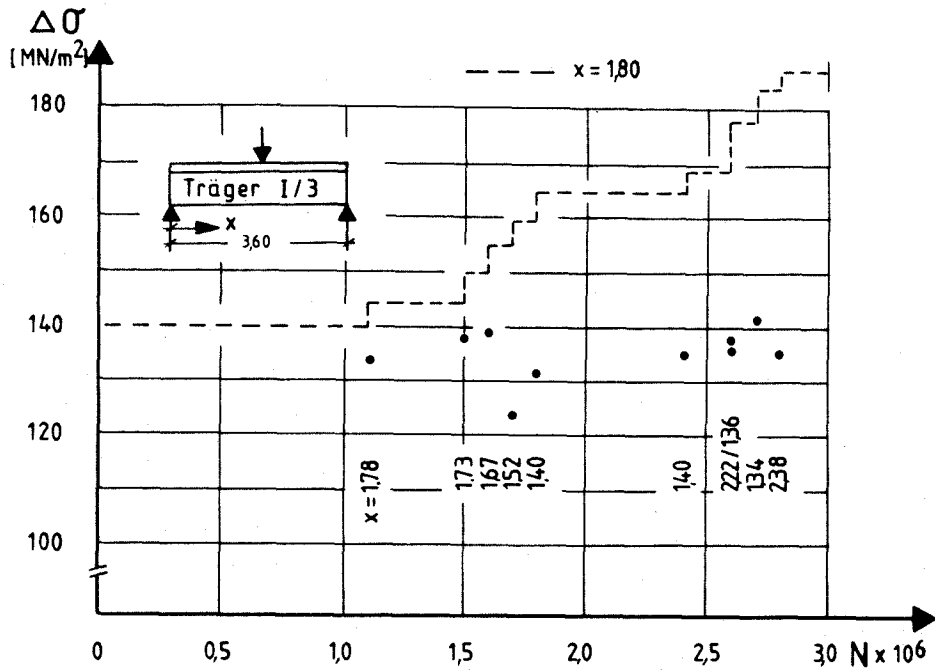
Ertragene Spannungsamplituden für Balken 1

49



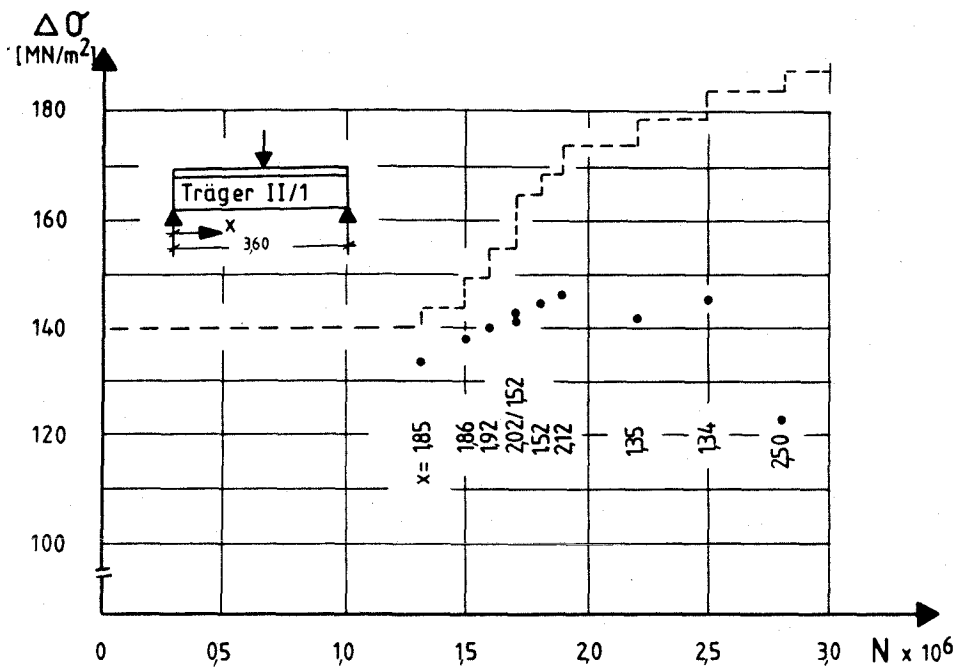
Ertragene Spannungsamplituden für Balken 2

50



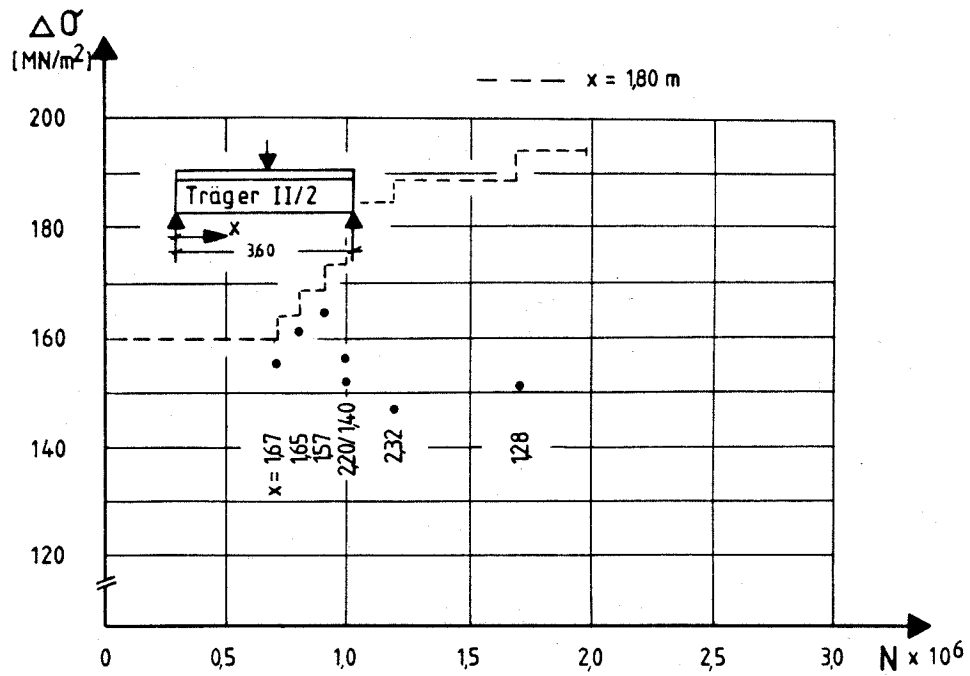
Ertragene Spannungsamplituden für Balken 3

51

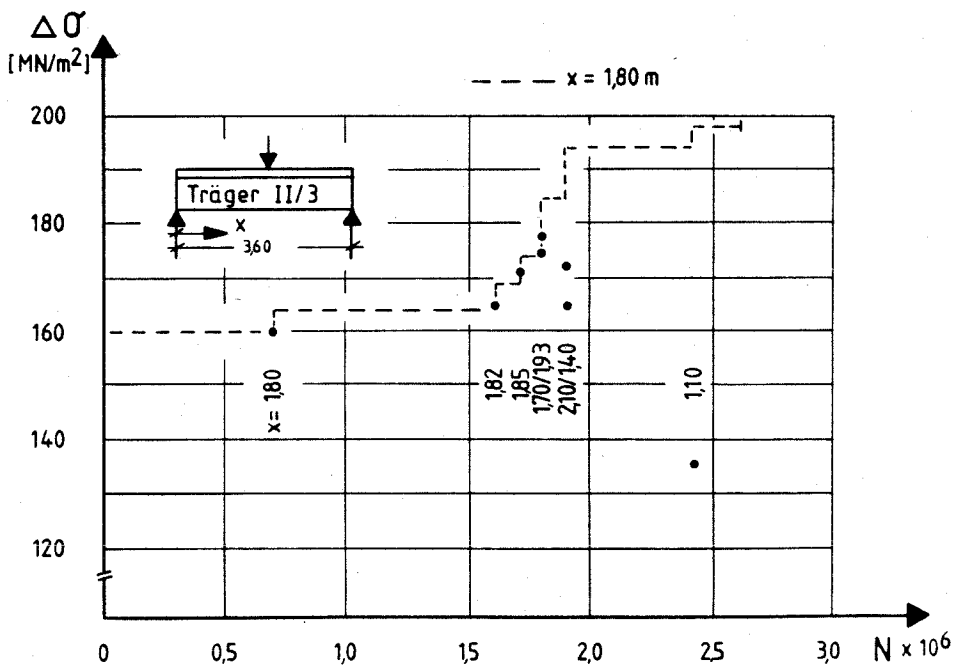


Ertragene Spannungsamplituden für Balken 4

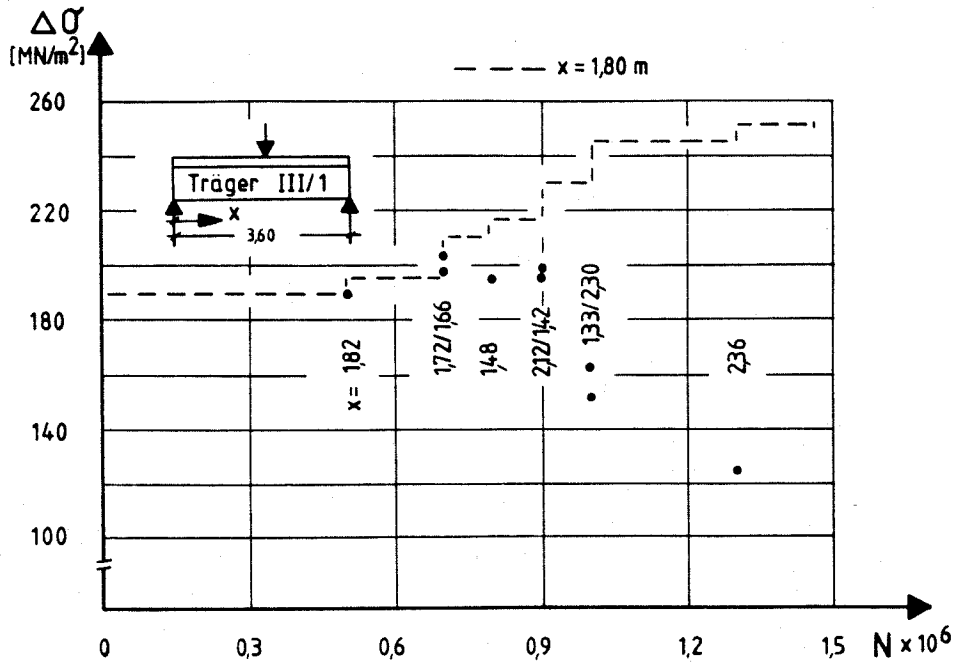
52



Ertragene Spannungsamplituden für Balken 5

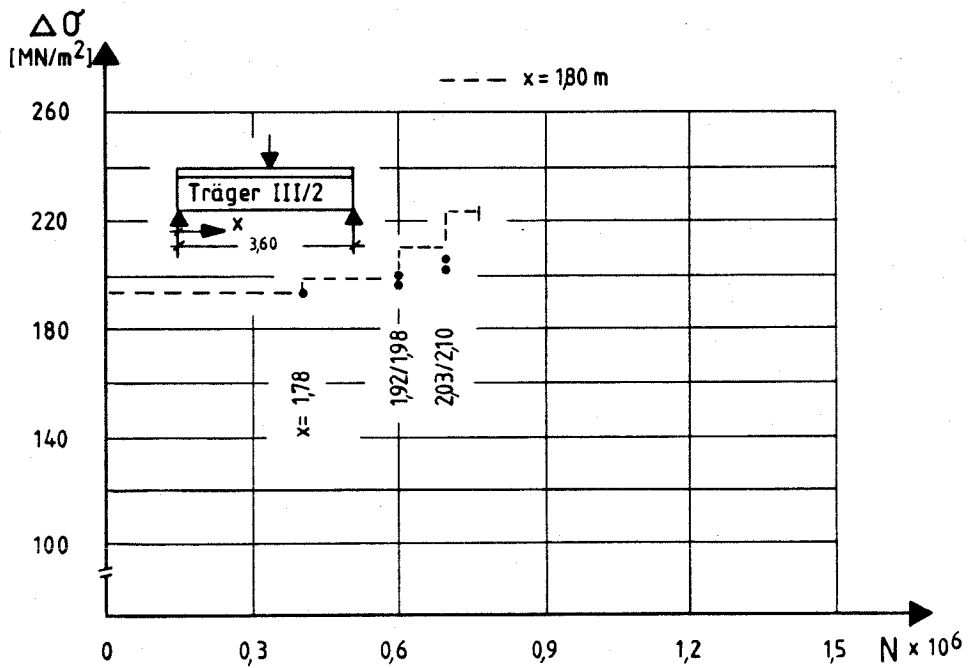


Ertragene Spannungsamplituden für Balken 6



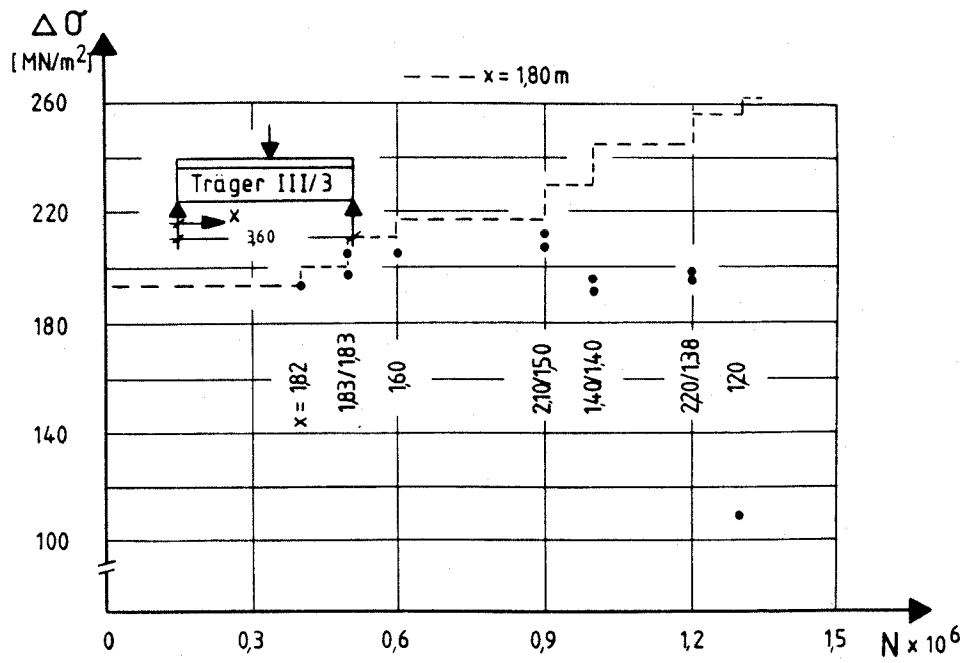
Ertragene Spannungsamplituden für Balken 7

55



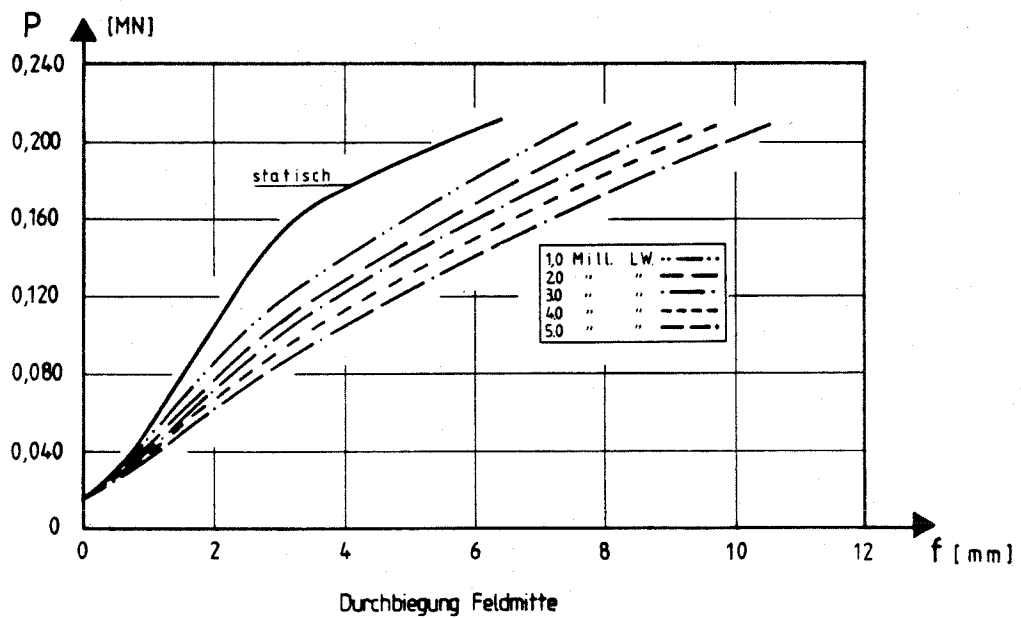
Ertragene Spannungsamplituden für Balken 8

56



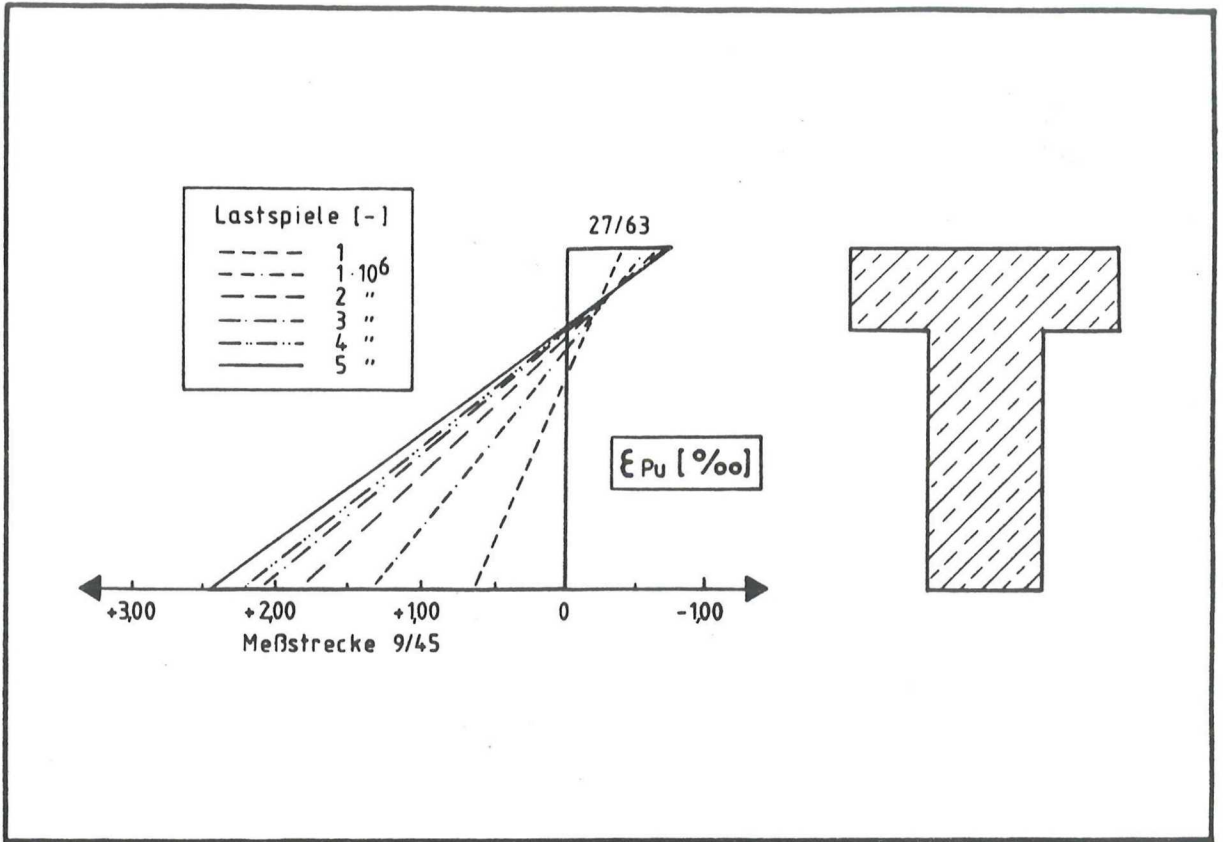
Ertragene Spannungsamplituden für Balken 9

57

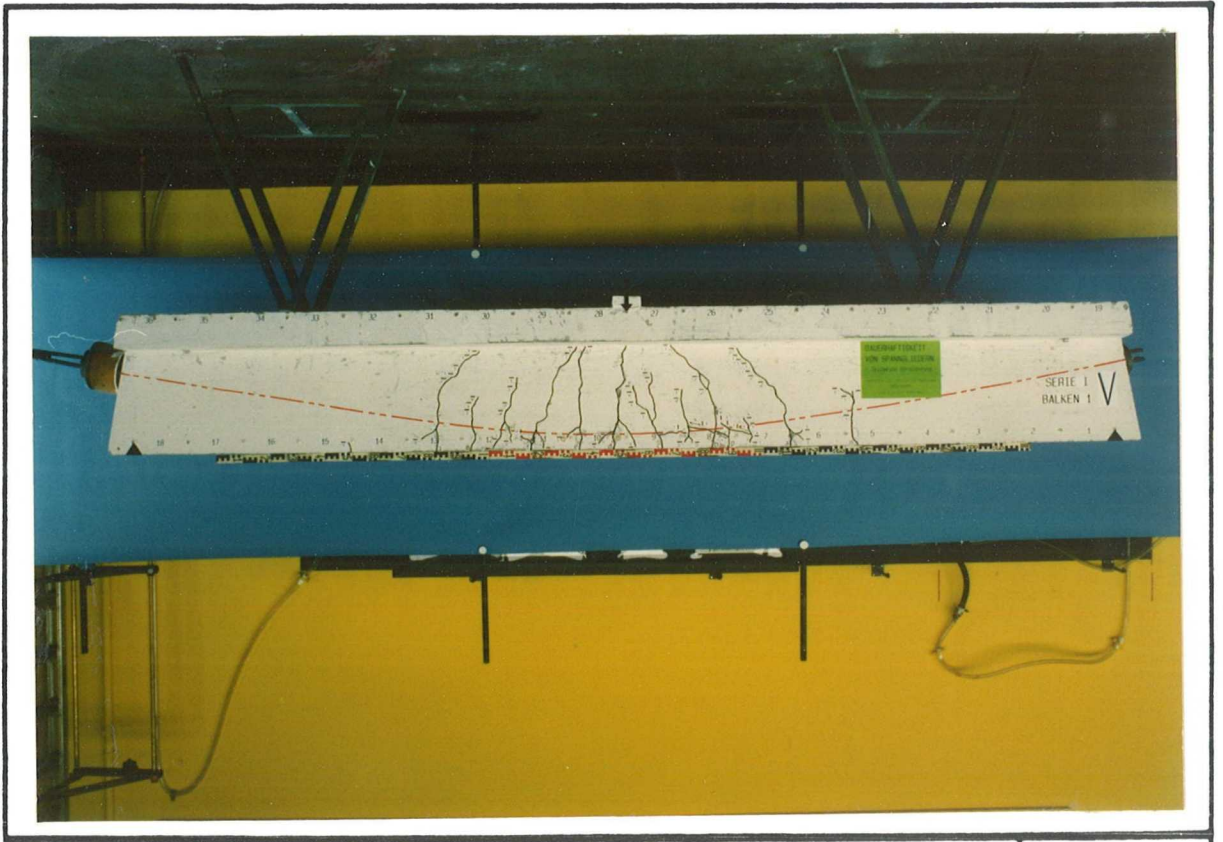


Verhalten der Durchbiegung bei steigender Lastspielzahl

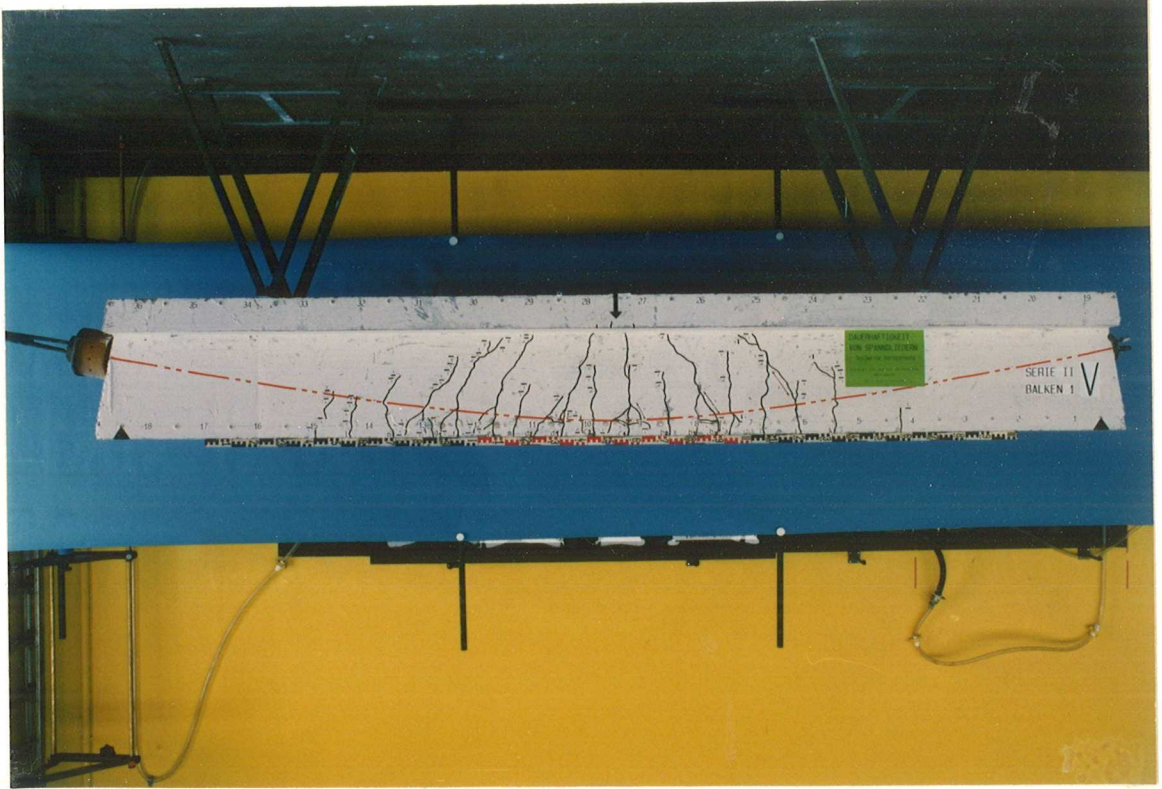
58



	Verhalten der Dehnung bei steigender Lastspielzahl	59
--	--	----



	Versuchsbalken 1/I - Rißbild	60
--	------------------------------	----



Versuchsbalken 2/I - Rißbild

61



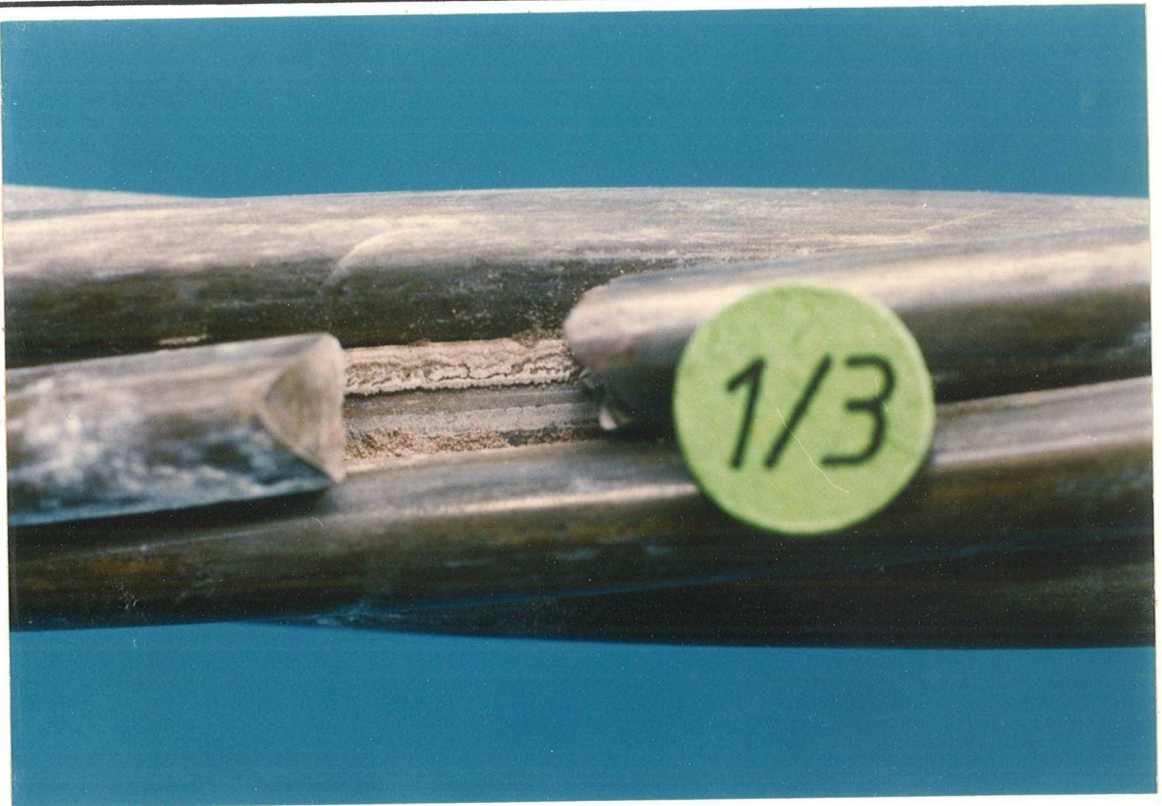
Korrosionsprodukte an der Hüllrohroberfläche

62



Korrosionsprodukte an der Hüllrohroberfläche

63



Bruchausgang Kontaktstelle Litze / Hüllrohr

64



Reibdauerbrüche in der Litze

65



Reibstellen in der Kontaktzone Litze / Hüllrohr

66





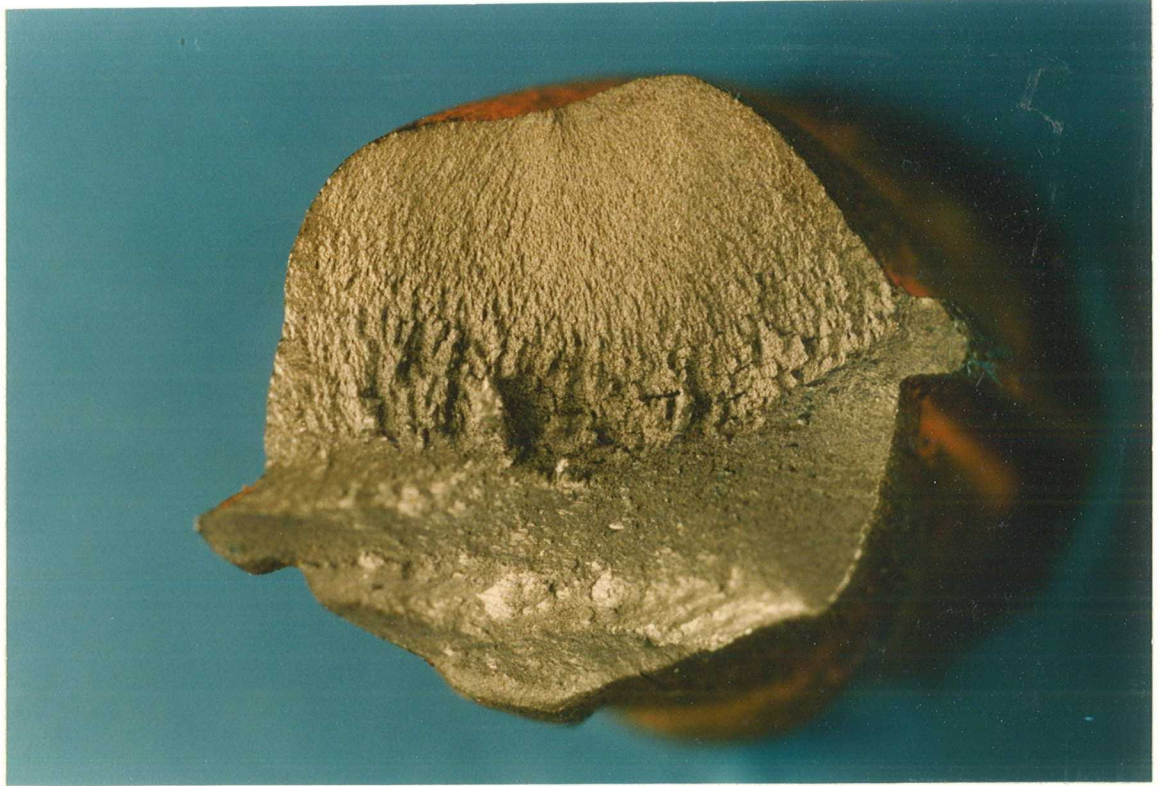
Reibkorrosion im Bereich zwischen den Betonrissen

69



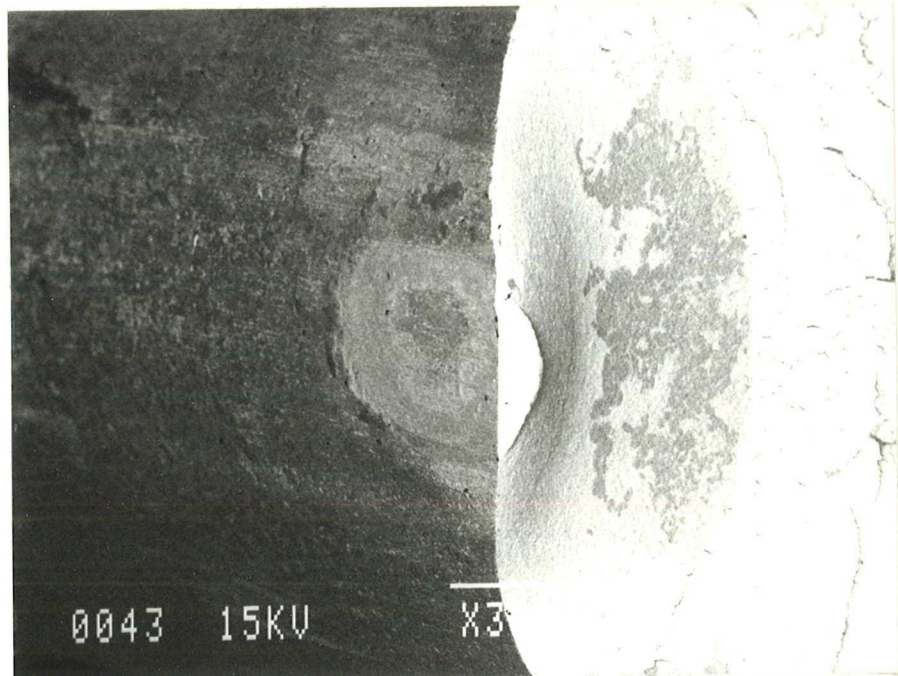
Ermüdungsbruch - Betonstahl

70



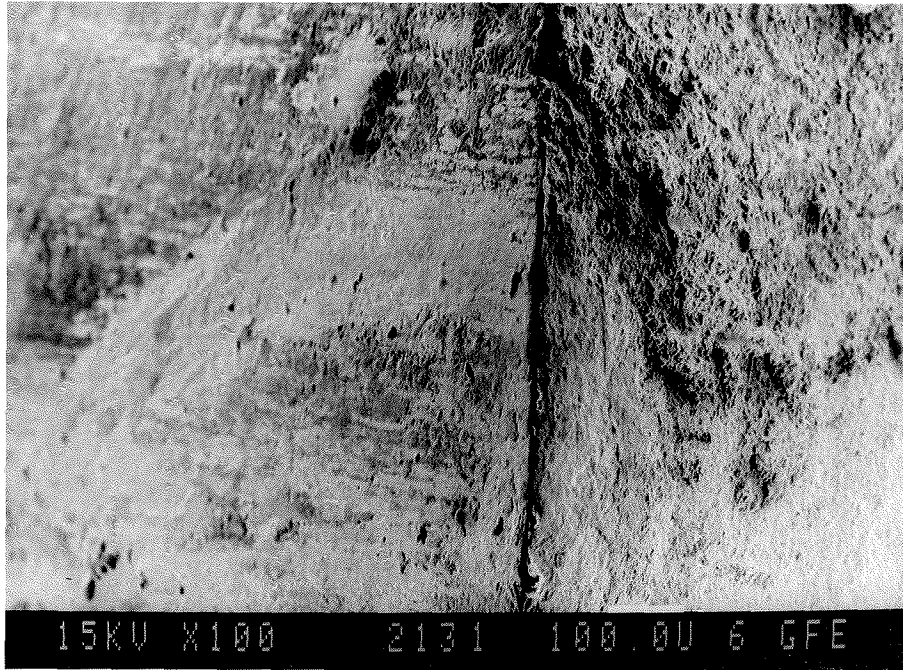
Ermüdungsbruch - Betonstahl

71



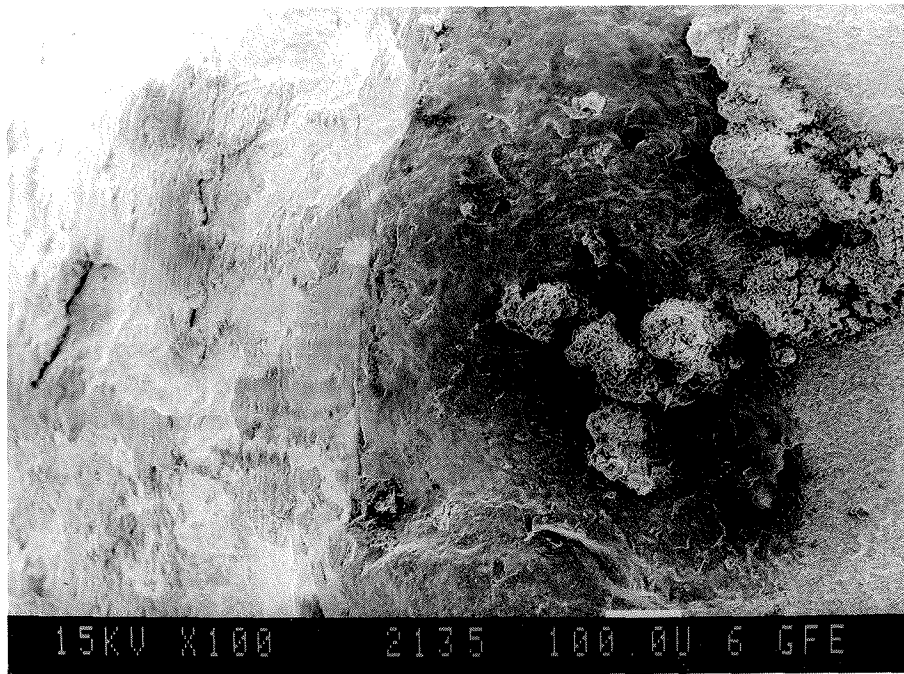
REM - Aufnahme Kontaktfläche

72



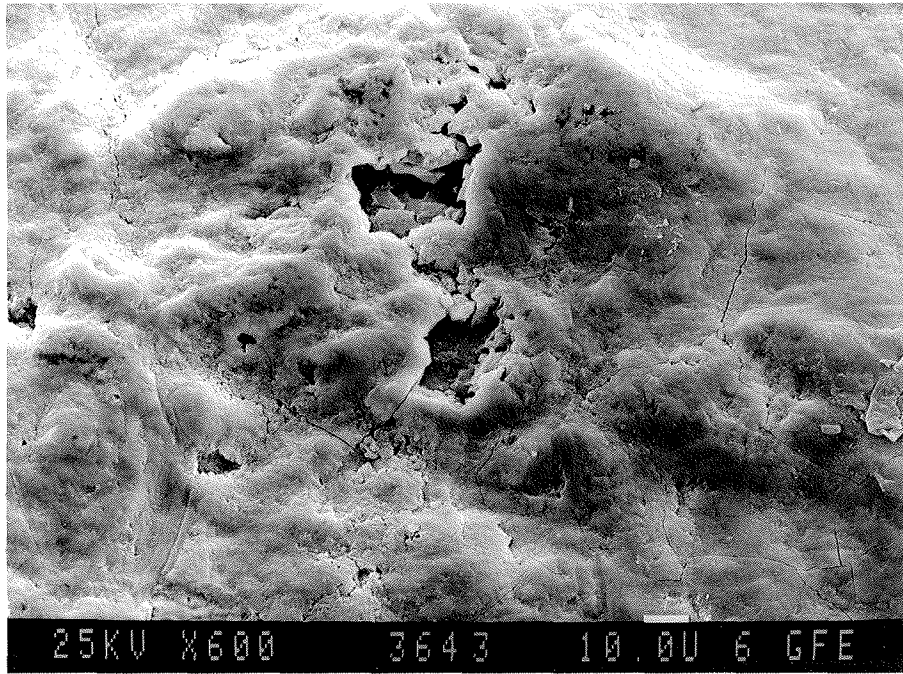
REM - Reibspuren auf der Litzenoberfläche

73



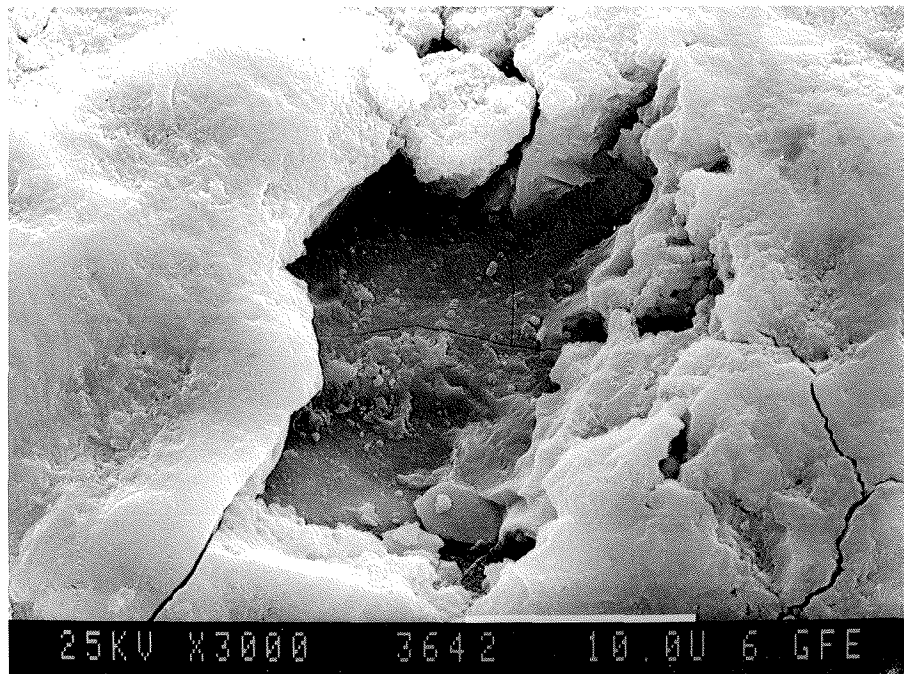
REM - Reibspuren auf der Litzenoberfläche

74



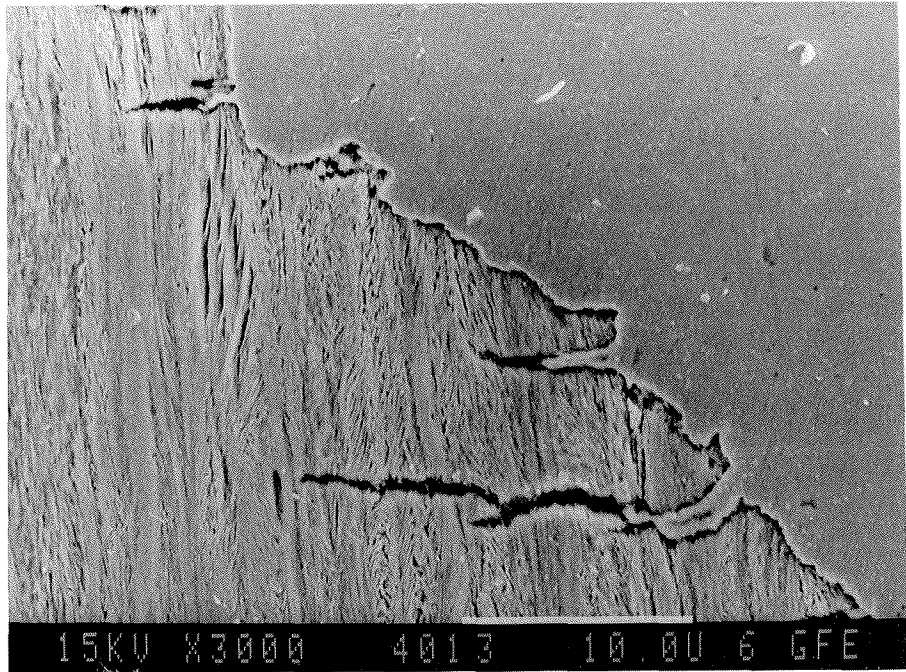
REM - Korrosionsprodukte auf der Litzenoberfläche

75



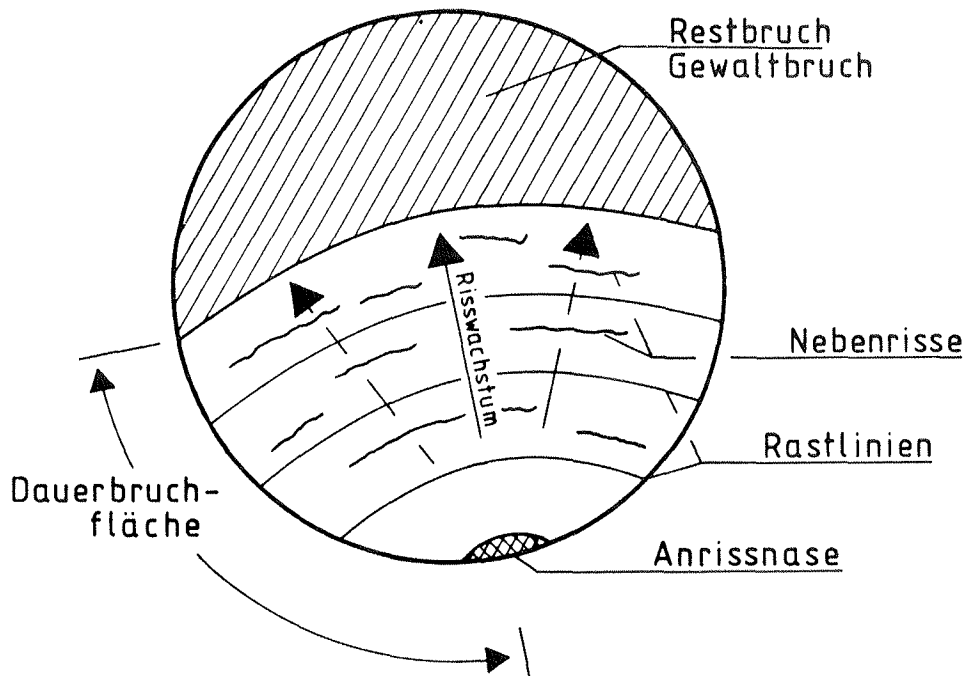
REM - Reib- und Verschleißpartikel

76



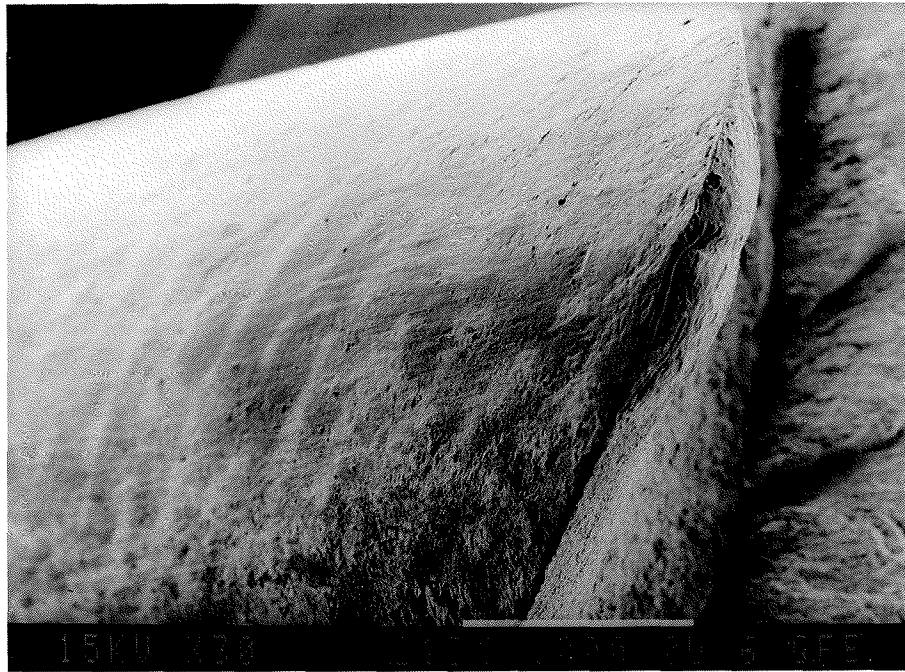
REM - Zusätzliche Ermüdungsanrisse

77



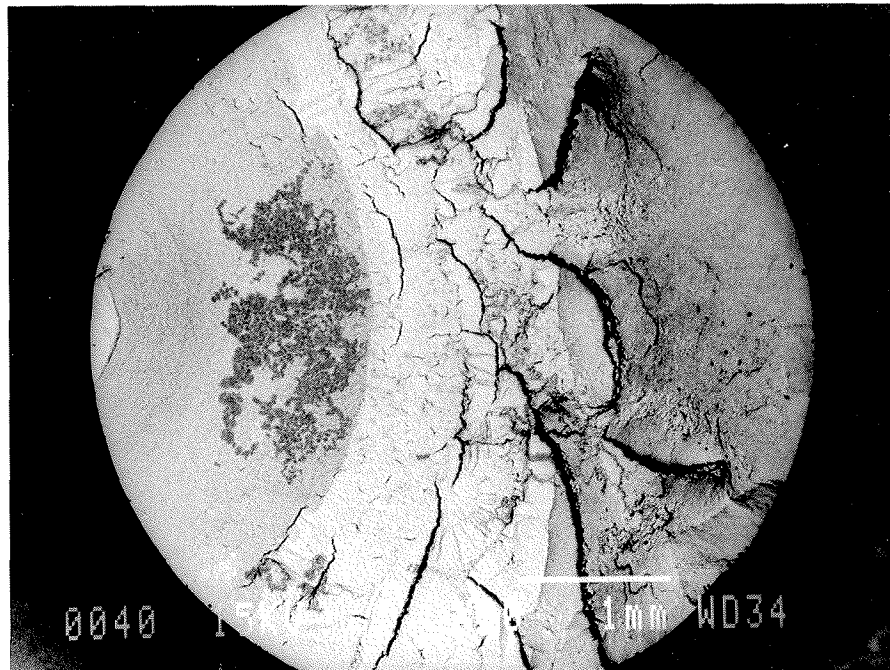
Merkmale eines Reibdauerbruches

78



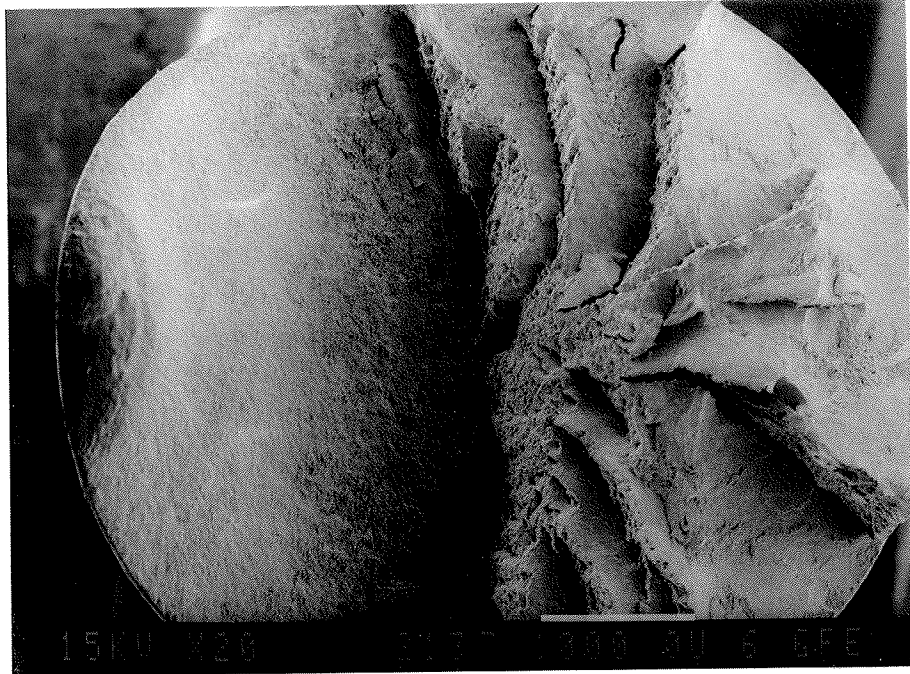
Bruchnahe bei Reibermüdungsschaden

79



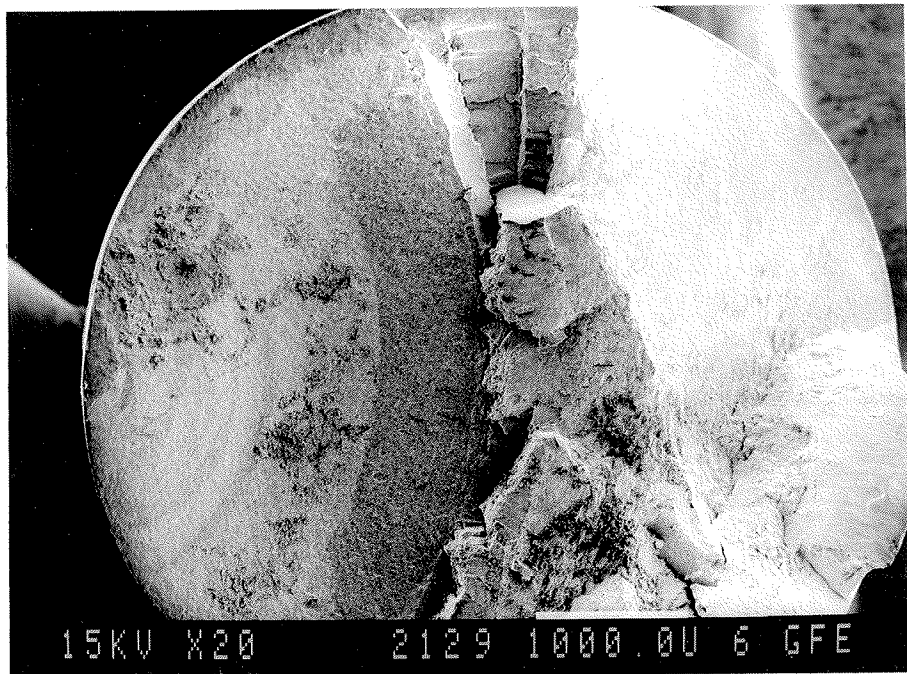
REM - Nebenrisse in der Bruchfläche

80



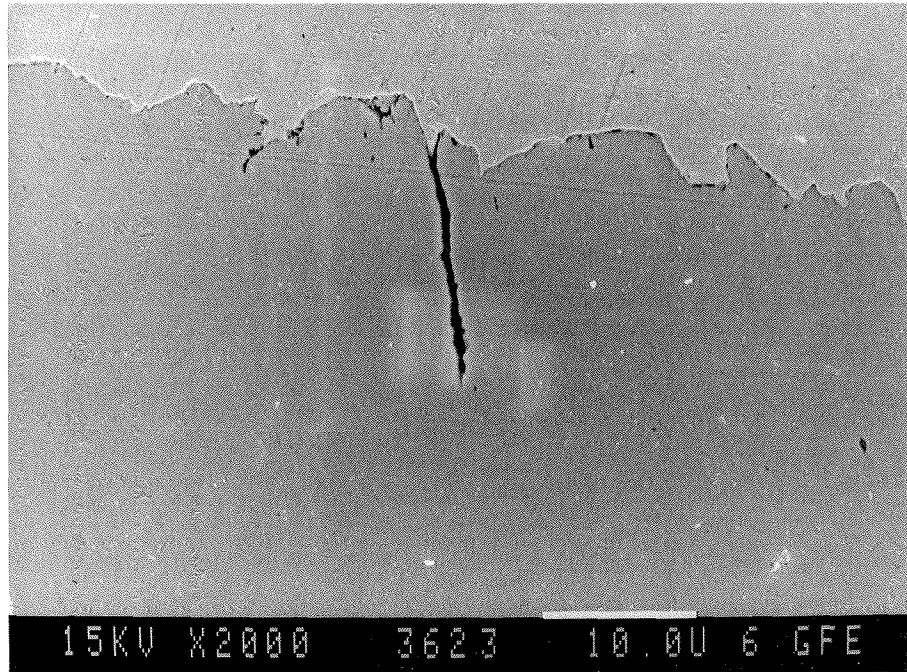
Bruchfläche Reibdauerbruch

81



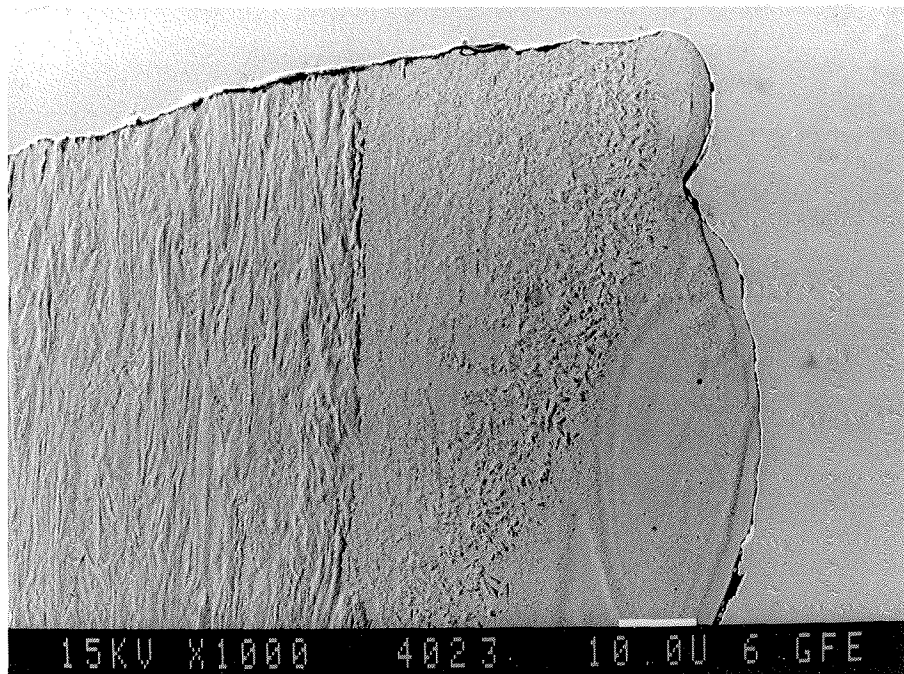
Bruchfläche Reibdauerbruch

82



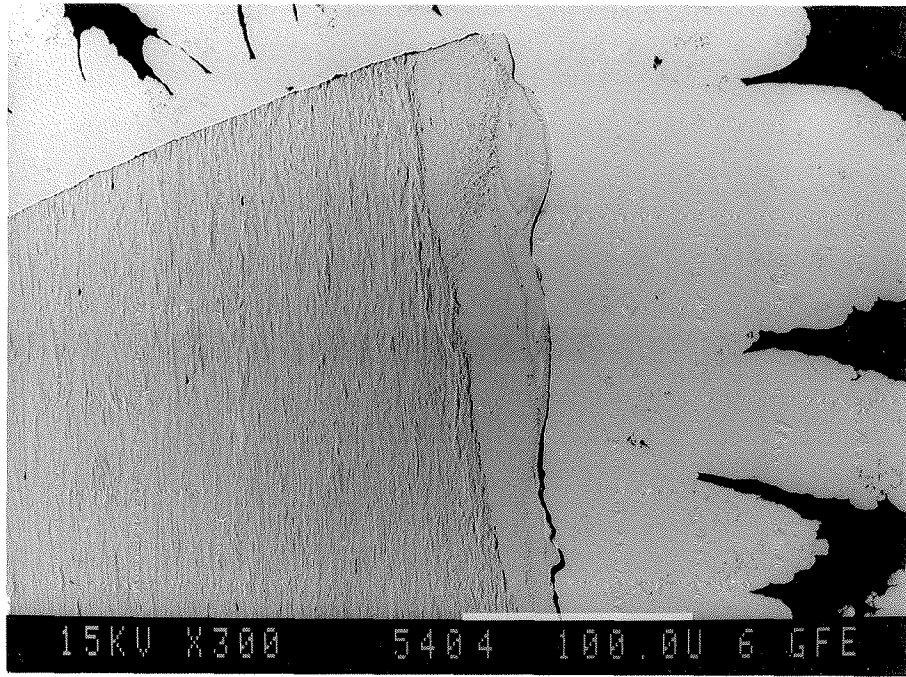
Zusätzliche Ermüdungsanrisse

83



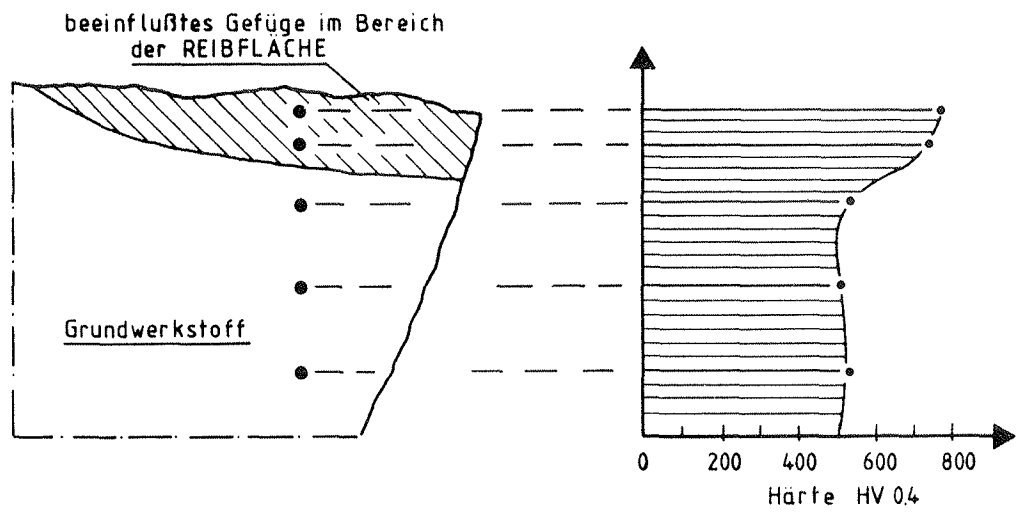
Gefügeveränderung an der Reibstelle

84



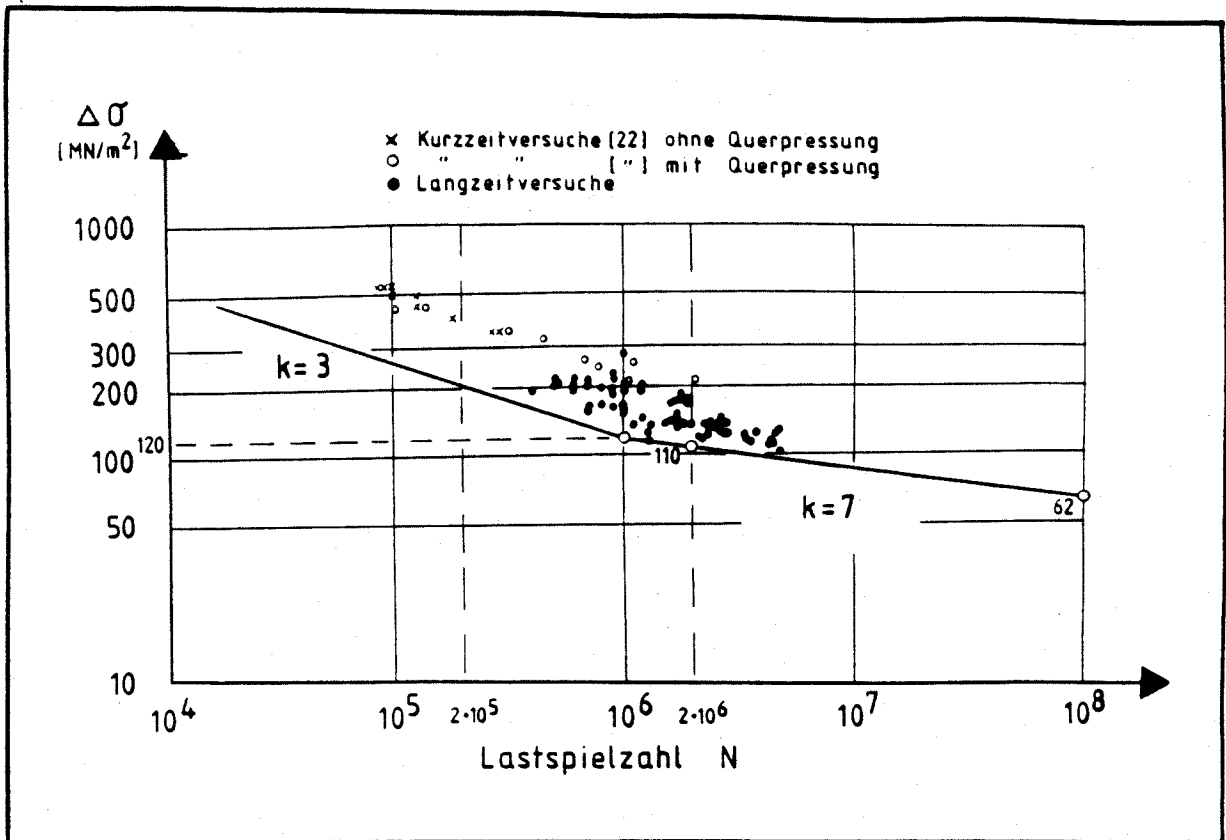
Gefügeveränderung an der Reibstelle

85



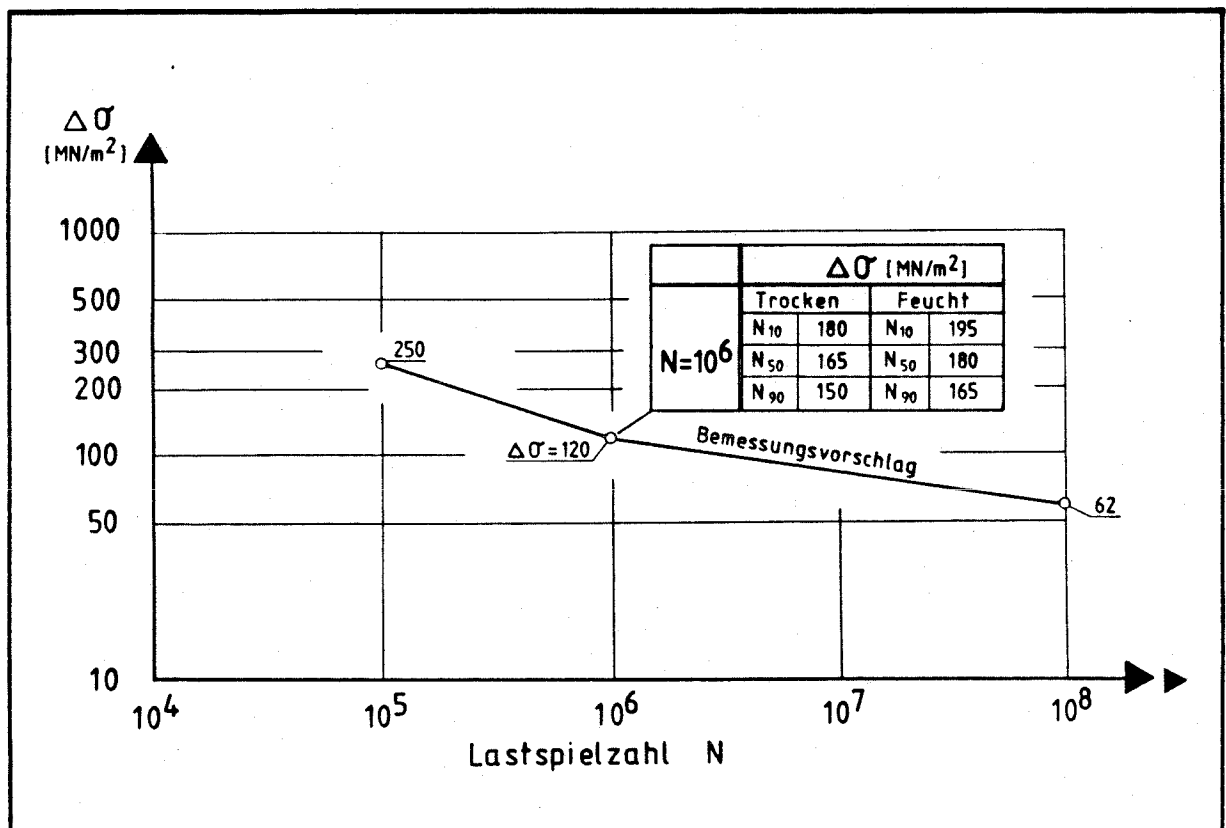
Gefügehärte - Reibstelle der Litze - Längsschliff

86



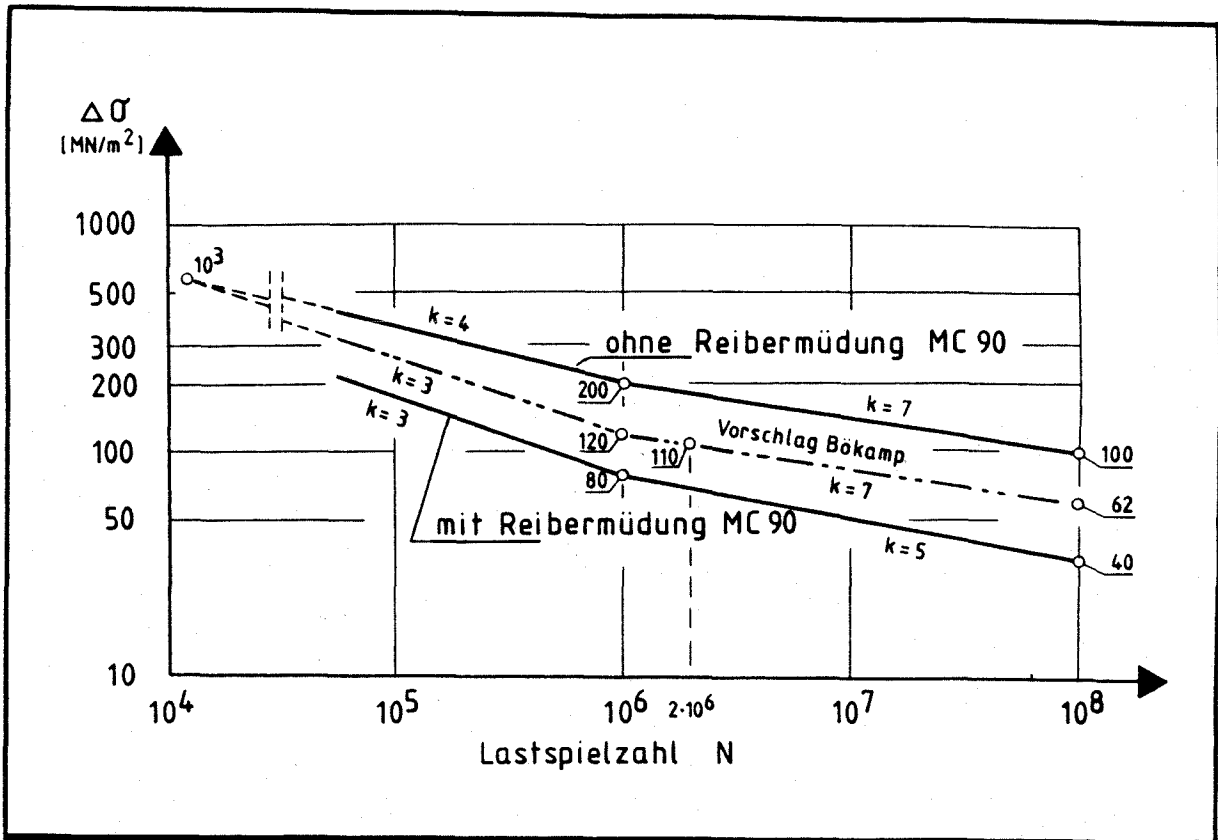
Ertragene Lastspielzahlen der Litzendrähte

87



Lebensdauerberechnung der untersuchten Litzen

88



	Bemessungsvorschlag - Ermüdungsbemessung	89
--	--	----

--	--	--

Prüfkörper	Bewehrung		Querschnitt A_b m^2	Vorspannung Z_V KN	σ_y unter Oberlast MN/m^2
	A_V cm^2	A_S cm^2			
1/I = Balken 1	4,20	2,26	0,1088	270	0,558 _z
2/I = Balken 2	4,20	2,26	0,1088	270	0,558 _z
3/I = Balken 3	4,20	2,26	0,1088	270	0,558 _z
1/II = Balken 4	4,20	2,26	0,1088	270	0,558 _z
2/II = Balken 5	4,20	2,26	0,1088	270	0,558 _z
3/II = Balken 6	4,20	2,26	0,1088	270	0,558 _z
1/III = Balken 7	4,20	2,26	0,1088	359	0,658 _z
2/III = Balken 8	4,20	2,26	0,1088	359	0,658 _z
3/III = Balken 9	4,20	2,26	0,1088	359	0,658 _z

Tafel 4.1 : Vorspannung - Versuchsbalcken

Prüfkörper	z_v^0	Oberlast	Unterlast	$\Delta \sigma$ Spannstahl
	[MN]	[MN]	[MN]	[MN/m ²]
1/I	0,270	0,210	0,175	120
2/I	0,270	0,210	0,175	120
3/I	0,270	0,210	0,168	140
1/II	0,270	0,210	0,168	140
2/II	0,270	0,210	0,160	160
3/II	0,270	0,210	0,160	160
1/III	0,359	0,225	0,160	190
2/III	0,359	0,225	0,160	190
3/III	0,359	0,225	0,160	190

Tafel 4.2 : Spannungsamplituden - Versuchsbalcken

Betonstahl	Probe	Durchmesser ¹⁾	Querschnitt ¹⁾	Streckgrenze ²⁾	Zugfestig- ²⁾ keit	Bruchdehnung
		d_s	A_s	$R_{p\ 0,2}$	R_m	
		[mm]	[mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
BST 500 S ∅ 12	1	12.14	115.75	502.8	604.8	18.5
	2	12.14	115.75	486.9	601.6	19.5
	3	12.13	115.56	514.3	615.4	17.3
Mittelwert	-	12.14	115.69	501.3	607.2	18.4
BST 500 S ∅ 8	1	8.20	52.81	553.3	640.8	12.4
	2	8.18	52.55	536.2	621.8	12.3
	3	8.17	52.42	543.8	631.3	12.0
Mittelwert	-	8.18	52.69	544.4	631.3	12.2

- 1) Durch Wägung ermittelt
2) Bezogen auf den Nennquerschnitt

Tafel 4.3 : Betonstahleigenschaften

Spannstahl	Probe	Aussendraht	Innendraht	Querschnitt	Streckgrenze	Zugfestigkeit	E - Modul
	-	d_s [mm]	d_s [mm]	A_s [mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	E [N/mm ²]
ST 1570/ 1770 ∅ 0,6''	1	5.04	5.25	140.9	1788.5	1902.1	197150
	2	5.03	5.26	140.9	1783.2	1909.9	198790
	3	5.03	5.26	140.9	1800.9	1897.8	199610
Mittelwert	-	5.03	5.26	140.9	1790.9	1903.3	198517
Sollwerte		5.00	1.02-1.04 d	140	1570	1770	195000

Tafel 4.4 : Spannstahleigenschaften

Versuchsserie / Prüfkörper	Anteil je m ³ Frischbeton			w/z	Rohdichte	Verdich- tungsmaß	Ausbreit- maß
	Zuschlag	Zement	Wasser				
	kg	kg	kg	-	kg/dm ³	-	cm
I/1	1755	440	174	0.4	2.36	1.03	51.0
2	1755	440	174	0.4	2.34	1.04	47.5
3	1755	440	174	0.4	2.33	1.04	47.0
II/1	1755	440	174	0.4	2.34	1.03	53.0
2	1755	440	174	0.4	2.30	1.03	53.5
3	1755	440	174	0.4	2.46	1.03	50.0
III/1	1766	440	174	0.4	2.36	1.04	51.0
2	1766	440	174	0.4	2.35	1.06	49.0
3	1766	440	174	0.4	2.35	1.05	49.5

Tafel 4.5 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen

Versuchsserie /Prüfkörper	Güteprüfung	Erhärtungsprüfung		
	f_{w28}	Vorspann- zeitpunkt	Beginn Dyn- amische Bel.	10 E6 Lastspiele
	Mittelwerte	Mittelwerte	Mittelwerte	Mittelwerte
	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²
I/1	59.10	58.12	61.07	58.86
2	60.77	58.62	64.01	59.35
3	60.63	64.01	64.99	67.69
II/1	61.06	68.18	74.07	75.54
2	62.27	70.63	70.14	76.52
3	60.54	65.48	71.38	67.20
III/1	57.84	64.24	68.18	65.24
2	58.52	61.32	63.03	68.43
3	55.99	66.24	68.43	70.14

Tafel 4.6 : Würfeldruckfestigkeit des Betons

Versuchsserie /Prüfkörper	zu Beginn der dynamischen Belastung			1.000.000 Lastspiele		
	Spaltzug- festigkeit	Biegezug- festigkeit	Elastizitäts- modul	Spaltzug- festigkeit	Biegezug- festigkeit	Elastizitäts- modul
	β_{sz}	β_{Bz}	E_b	β_{sz}	β_{Bz}	E_b
	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²
1/1	4.46	6.27	32632	3.32	6.77	31605
2	3.91	6.09	37785	2.82	6.82	33629
11/1	3.54	6.27	34257	2.65	6.98	32739
2	3.57	6.59	34706	3.29	6.85	33006
111/1	3.49	5.03	33336	3.64	6.48	33494
2	4.47	6.39	32746	3.32	6.59	33948

Tafel 4.7 : Spaltzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul

Versuchsserie /Prüfkörper	Zement	Einpreß- hilfe	Wasser	Zement	Wasser	Mörtel	W/Z	Tauchzeit		24 h Absetz- maß
	kg	kg	kg	°C	°C	°C	-	t = 0 s	t = 30 s	%
I/1	43.7	0.218	19	21	18	26.5	0.44	48	87	1.40
2	43.7	0.218	19	21	18	26.5	0.44	50	92	1.32
3	43.7	0.218	19	21	18	26.5	0.44	50	85	1.48
II/III/1	87.4	0.463	38	21	17	26.0	0.44	45	79	1.53
2	87.4	0.463	38	21	17	26.0	0.44	46	79	1.72
3	87.4	0.463	38	21	17	26.0	0.44	49	75	1.40

Tafel 4.8 : Zusammensetzung und Eigenschaften des frischen Einpreßmörtels

Versuchsserie /Prüfkörper	Erhärtungsprüfung		Elastizitäts- modul E
	R_{28}	R_{1Jahr}	
	MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²
I/1	42.3	46.1	13318
2	61.2	59.7	13171
3	52.8	59.4	13421
II/III/1	45.9	53.3	14732
2	44.9	57.6	14822
3	52.9	58.7	14222

Tafel 4.9 : Festigkeitsprüfung des Einpreßmörtels

Bruchlastspielzahlen (x 10 ⁶)											
Bruch Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Balken											
1	2,1	2,3	3,5	3,6	4,3	4,3	4,4	-	-	-	-
2	2,2	2,7	3,3	3,4	3,7	4,5	4,7	4,8	-	-	-
3	1,1	1,5	1,6	1,7	1,8	2,4	2,6	2,6	2,7	2,8	-
4	1,3	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	2,2	2,5	2,8	-
5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	1,2	1,7	-	-	-	-
6	0,7	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,4	-	-	-
7	0,5	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,3	-	-
8	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	-	-	-	-	-	-
9	0,4	0,5	0,5	0,6	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,3

Tafel 5.1 : Lastspielzahlen der einzelnen Drahtbrüche

Serie I Balken I		Delta-Sigma = 120 MN/m ²											DURCHBIEGUNGEN in Trägermitte [mm]		Blatt 1/2
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	175,00	180,00	200,00	210,00		
Lastspiele															
1	0,00	0,15	0,62	1,08	1,47	1,93	2,49	3,23	4,07	4,70	4,89	5,69	6,08		
100000										4,87			6,31		
200000	0,00	0,17	0,70	1,22	1,65	2,17	2,80	3,64	4,58	5,30	5,51	6,41	6,85		
300000	0,00	0,20	0,78	1,26	1,72	2,23	2,84	3,71	4,67	5,38	5,63	6,52	6,95		
400000	0,00	0,18	0,74	1,24	1,69	2,22	2,88	3,75	4,72	5,46	5,73	6,63	7,04		
500000	0,00	0,17	0,73	1,23	1,71	2,25	2,97	3,94	4,93	5,69	5,96	6,89	7,38		
600000	0,00	0,15	0,69	1,20	1,69	2,24	2,96	3,95	4,93	5,69	5,96	6,90	7,35		
700000	0,00	0,14	0,68	1,18	1,68	2,23	2,94	3,90	4,94	5,70	5,96	6,90	7,35		
800000	0,00	0,12	0,68	1,19	1,69	2,24	2,99	3,95	5,01	5,76	6,03	6,95	7,41		
901000	0,00	0,17	0,78	1,32	1,82	2,37	3,13	4,08	5,11	5,87	6,19	7,14	7,59		
1001000	0,00	0,17	0,79	1,30	1,79	2,35	3,06	4,02	5,08	5,81	6,12	7,07	7,52		
1106000	0,00	0,15	0,77	1,32	1,82	2,40	3,20	4,24	5,27	6,05	6,33	7,29	7,76		
1205000	0,00	0,17	0,80	1,34	1,86	2,47	3,32	4,37	5,40	6,17	6,47	7,41	7,88		
1305000	0,00	0,27	0,96	1,54	2,13	2,81	3,69	4,74	5,80	6,61	6,91	7,88	8,36		
1400000	0,00	0,24	0,87	1,45	2,06	2,76	3,70	4,76	5,83	6,61	6,90	7,88	8,36		
1507000	0,00	0,16	0,73	1,34	1,96	2,73	3,65	4,72	5,81	6,61	6,90	7,93	8,41		
1600000	0,00	0,16	0,76	1,33	1,96	2,72	3,69	4,73	5,84	6,66	6,96	7,97	8,48		
1696000	0,00	0,18	0,83	1,46	2,10	2,86	3,81	4,90	6,00	6,83	7,12	8,14	8,67		
1800000	0,00	0,18	0,85	1,45	2,09	2,86	3,82	4,90	6,01	6,84	7,14	8,19	8,68		
1922000	0,00	0,22	0,98	1,61	2,28	3,08	4,07	5,17	6,33	7,17	7,53	8,56	9,09		
2000000	0,00	0,25	0,94	1,56	2,23	3,04	4,04	5,16	6,31	7,17	7,50	8,60	9,10		
2100000	0,00	0,15	0,85	1,45	2,18	3,04	4,11	5,23	6,42	7,26	7,58	8,67	9,21		
2200000	0,00	0,18	0,84	1,48	2,22	3,13	4,25	5,41	6,57	7,45	7,78	9,06	9,57		
2300000	0,00	0,20	0,87	1,55	2,29	3,21	4,42	5,55	6,74	7,62	7,97	9,29	9,80		
2400000	0,00	0,19	0,90	1,58	2,32	3,32	4,52	5,62	6,89	7,79	8,10	9,35	9,90		
2500000	0,00	0,21	0,91	1,60	2,42	3,40	4,58	5,76	7,01	7,89	8,23	9,42	9,94		

Tafel 5.2: Durchbiegungen Träger 1

Serie I	Balken I	Delta-Sigma = 120 MN/m ²											D U R C H B I E G U N G E N in Trägermitte [mm]		Blatt 2/2
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	175,00	180,00	200,00	210,00		
Lastspiele															
2600000	0,00	0,25	1,02	1,71	2,54	3,51	4,65	5,87	7,11	8,02	8,35	9,51	9,94		
2701000	0,00	0,22	0,93	1,64	2,36	3,34	4,49	5,74	6,93	7,86	8,16	9,36	9,93		
2800000	0,00	0,14	0,92	1,62	2,43	3,39	4,55	5,76	7,00	7,93	8,24	9,40	10,01		
2900000	0,00	0,21	0,89	1,63	2,40	3,41	4,53	5,79	7,02	7,98	8,31	9,55	10,07		
3000000	0,00	0,20	0,84	1,59	2,37	3,34	4,46	5,74	6,97	7,97	8,31	9,54	10,12		
3100000	0,00	0,20	0,89	1,62	2,39	3,40	4,53	5,84	7,05	8,01	8,35	9,56	10,13		
3200000	0,00	0,16	0,92	1,59	2,44	3,41	4,56	5,75	7,07	8,01	8,32	9,59	10,16		
3300000	0,00	0,19	0,90	1,66	2,45	3,44	4,67	5,86	7,09	8,06	8,46	9,67	10,18		
3400000	0,00	0,21	0,92	1,60	2,43	3,38	4,60	5,81	7,11	8,03	8,42	9,63	10,17		
3500000	0,00	0,20	0,83	1,61	2,37	3,41	4,58	5,88	7,11	8,13	8,48	9,69	10,27		
3600000	0,00	0,15	0,86	1,58	2,41	3,42	4,66	5,99	7,23	8,19	8,53	9,78	10,37		
3700000	0,00	0,22	0,89	1,65	2,46	3,47	4,63	5,94	7,24	8,26	8,61	9,83	10,42		
3805000	0,00	0,13	0,90	1,59	2,44	3,45	4,67	5,93	7,25	8,24	8,62	9,86	10,45		
3905000	0,00	0,23	0,93	1,68	2,48	3,51	4,71	6,08	7,26	8,27	8,63	9,91	10,47		
4000000	0,00	0,14	0,83	1,55	2,38	3,39	4,59	5,88	7,19	8,20	8,51	9,79	10,37		
4100000	0,00	0,19	0,91	1,63	2,43	3,47	4,68	5,96	7,25	8,25	8,62	9,86	10,43		
4200000	0,00	0,15	0,88	1,58	2,43	3,46	4,66	5,96	7,26	8,27	8,60	9,85	10,43		
4300000	0,00	0,22	0,92	1,74	2,59	3,70	4,91	6,27	7,57	8,56	8,88	10,18	10,78		
4400000	0,00	0,21	0,99	1,75	2,66	3,74	5,03	6,29	7,67	8,66	9,01	10,31	10,89		
4500000	0,00	0,20	0,95	1,75	2,62	3,73	4,97	6,32	7,67	8,71	9,01	10,33	10,92		
4600000	0,00	0,20	0,98	1,76	2,70	3,76	5,06	6,34	7,73	8,77	9,16	10,41	11,04		
4700000	0,00	0,17	0,88	1,70	2,58	3,72	4,95	6,32	7,67	8,72	9,06	10,40	10,99		
4800000	0,00	0,16	0,93	1,70	2,63	3,74	5,02	6,35	7,75	8,77	9,11	10,44	11,03		
4900000	0,00	0,20	0,93	1,72	2,64	3,73	4,96	6,34	7,71	8,75	9,09	10,40	11,01		
5000000	0,00	0,14	0,89	1,64	2,58	3,65	4,94	6,27	7,70	8,71	9,06	10,40	11,01		

Serie I Balken 2		Delta-Sigma = 120 MN/m ²											D U R C H B I E G U N G E N in Trägermitte [mm]		Blatt 1/2	
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	175,00	180,00	200,00	210,00			
Lastspiele																
1	0,00	0,15	0,73	1,13	1,52	1,91	2,29	2,66	3,21	3,94	4,19	5,59	6,45			
100000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,03	-	-	6,19			
200000	0,00	0,15	0,64	1,11	1,52	1,99	2,55	3,27	4,13	4,87	5,19	6,09	6,55			
300000	0,00	0,13	0,63	1,10	1,54	2,00	2,56	3,31	4,21	4,94	5,19	6,11	6,56			
400000	0,00	0,14	0,74	1,20	1,65	2,12	2,71	3,44	4,35	5,08	5,37	6,28	6,72			
500000	0,00	0,14	0,77	1,30	1,77	2,27	2,89	3,68	4,63	5,37	5,62	6,55	6,98			
617000	0,00	0,15	0,79	1,32	1,81	2,32	2,94	3,74	4,67	5,41	5,69	6,63	7,06			
702000	0,00	0,14	0,79	1,35	1,83	2,35	2,96	3,75	4,70	5,54	5,70	6,64	7,07			
800000	0,00	0,16	0,81	1,37	1,87	2,36	2,99	3,77	4,71	5,46	5,76	6,66	7,10			
900000	0,00	0,17	0,80	1,33	1,79	2,31	2,94	3,75	4,69	5,46	5,72	6,73	7,21			
1000000	0,00	0,19	0,81	1,32	1,82	2,39	3,09	3,98	4,98	5,77	6,09	7,09	7,56			
1100000	0,00	0,17	0,80	1,33	1,87	2,47	3,19	4,09	5,11	5,88	6,19	7,18	7,68			
1200000	0,00	0,20	0,82	1,37	1,90	2,51	3,28	4,22	5,25	6,04	6,34	7,36	7,86			
1291000	0,00	0,20	0,83	1,42	1,96	2,54	3,26	4,15	5,18	5,91	6,26	7,28	7,81			
1398000	0,00	0,17	0,83	1,40	2,10	2,59	3,38	4,28	5,39	6,22	6,51	7,54	8,05			
1500000	0,00	0,23	0,97	1,58	2,14	2,81	3,61	4,59	5,66	6,47	6,79	7,84	8,36			
1600000	0,00	0,22	0,97	1,58	2,16	2,80	3,65	4,62	5,69	6,54	6,86	7,93	8,45			
1700000	0,00	0,17	0,85	1,46	2,04	2,69	3,45	4,37	5,43	6,27	6,59	7,86	8,20			
1800000	0,00	0,16	0,88	1,45	2,05	2,69	3,48	4,41	5,52	6,35	6,68	7,77	8,29			
1899000	0,00	0,23	0,95	1,65	2,21	2,95	3,74	4,77	5,87	6,77	7,09	8,24	8,81			
2000000	0,00	0,13	0,92	1,55	2,20	2,86	3,73	4,71	5,86	6,72	7,04	8,19	8,77			
2100000	0,00	0,19	0,85	1,52	2,09	2,80	3,58	4,55	5,62	6,52	6,83	7,94	8,52			
2200000	0,00	0,15	0,91	1,49	2,11	2,77	3,59	4,55	5,68	6,55	6,88	8,03	8,69			
2300000	0,00	0,21	0,82	1,54	2,13	2,85	3,57	4,57	5,60	6,50	6,81	7,93	8,50			
2400000	0,00	0,18	0,93	1,57	2,22	2,89	3,70	4,66	5,76	6,64	6,93	8,08	8,63			
2530000	0,00	0,15	0,85	1,54	2,18	2,86	3,62	4,55	5,60	6,50	6,80	7,97	8,52			

Tafel 5.3 : Durchbiegungen Träger 2

Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	175,00	180,00	200,00	210,00
Lastspiele													
2600000	0,00	0,16	0,90	1,54	2,23	2,90	3,68	4,60	5,71	6,59	6,94	8,07	8,65
2700000	0,00	0,20	0,89	1,60	2,20	2,89	3,62	4,55	5,60	6,46	6,78	7,93	8,64
2800000	0,00	0,28	1,07	1,77	2,45	3,12	3,94	4,87	6,04	6,86	7,16	8,36	8,93
2900000	0,00	0,21	0,88	1,59	2,22	2,96	3,75	4,73	5,80	6,71	7,06	8,21	8,75
3000000	0,00	0,14	0,87	1,54	2,21	2,90	3,73	4,70	5,85	6,72	6,99	8,20	8,76
3100000	0,00	0,21	0,90	1,64	2,27	3,01	3,80	4,84	5,92	6,85	7,16	8,34	8,88
3200000	0,00	0,14	0,91	1,59	2,30	2,98	3,84	4,84	5,98	6,85	7,18	8,37	8,93
3300000	0,00	0,24	0,95	1,72	2,38	3,17	4,05	5,12	6,25	7,21	7,45	8,67	9,23
3400000	0,00	0,15	0,96	1,64	2,37	3,12	4,05	5,12	6,29	7,19	7,52	8,70	9,27
3500000	0,00	0,23	1,03	1,81	2,44	3,27	4,13	5,24	6,40	7,33	7,67	8,87	9,43
3602000	0,00	0,16	1,03	1,72	2,48	3,23	4,19	5,26	6,46	7,38	7,73	8,94	9,53
3700000	0,00	0,24	1,00	1,82	2,53	3,32	4,28	5,35	6,52	7,47	7,82	9,05	9,59
3800000	0,00	0,21	1,09	1,83	2,60	3,36	4,37	5,47	6,70	7,66	8,01	9,26	9,85
3905000	0,00	0,22	1,02	1,78	2,51	3,34	4,30	5,48	6,70	7,64	7,97	9,21	9,81
4000000	0,00	0,19	1,04	1,72	2,51	3,30	4,34	5,44	6,69	7,62	7,95	9,23	9,79
4100000	0,00	0,26	1,09	1,86	2,60	3,43	4,43	5,61	6,83	7,79	8,15	9,40	9,89
4200000	0,00	0,23	1,10	1,83	2,61	3,46	4,48	5,61	6,85	7,81	8,12	9,42	9,99
4300000	0,00	0,26	1,04	1,78	2,47	3,31	4,23	5,39	6,57	7,57	7,88	9,16	9,74
4404000	0,00	0,27	1,07	1,78	2,57	3,34	4,33	5,47	6,70	7,62	7,96	9,25	9,84
4507000	0,00	0,24	1,02	1,82	2,51	3,39	4,31	5,52	6,71	8,02	8,29	9,53	10,10
4600000	0,00	0,21	1,10	1,73	2,62	3,46	4,50	5,66	6,92	7,90	8,20	9,49	10,09
4700000	0,00	0,21	1,05	1,82	2,57	3,49	4,51	5,73	6,94	7,92	8,25	9,54	10,12
4804000	0,00	0,22	1,07	1,83	2,65	3,53	4,62	5,81	7,10	8,06	8,38	9,68	10,28
4910000	0,00	0,25	1,08	1,90	2,66	3,61	4,65	5,88	7,12	8,14	8,46	9,75	10,33
5000000	0,00	0,21	1,12	1,89	2,74	3,64	4,77	5,95	7,30	8,23	8,62	9,91	10,53

Serie I Balken 3		Delta-Sigma = 140 MN/m ²										DURCHBIEGUNGEN in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1	
Kraft [KN]	15	20	40	60	80	100	120	140	160	170	180	200	210		
Lastspiele															
1	0,00	0,16	0,64	1,11	1,53	1,95	2,36	2,82	3,65	4,21		6,25	6,72		
1000	0,00									4,35		6,30	6,82		
200000	0,00		0,60	1,00	1,47	2,00	2,63	3,55	4,61	4,36	5,61	6,60	6,84		
300000	0,00	0,08	0,55	0,98	1,44	1,91	2,52	3,33	4,36	4,90	5,46	6,49	7,00		
400000	0,00	0,11	0,66	1,08	1,53	2,03	2,64	3,50	4,53	5,12	5,65	6,69	7,18		
501000	0,00	0,14	0,67	1,20	1,72	2,32	3,08	4,10	5,25	5,80	6,38	7,42	7,91		
601000	0,00	0,12	0,65	1,17	1,69	2,28	3,05	4,03	5,17	5,73	6,30	7,34	7,84		
701000	0,00	0,14	0,67	1,20	1,75	2,35	3,16	4,22	5,34	5,89	6,46	7,52	8,02		
801000	0,00	0,13	0,68	1,20	1,75	2,36	3,15	4,19	5,36	5,92	6,49	7,53	8,06		
902000	0,00	0,20	0,94	1,50	2,05	2,66	3,43	4,43	5,55	6,13	6,73	7,78	8,31		
1000000	0,00	0,19	0,95	1,53	2,12	2,76	3,62	4,66	5,82	6,39	6,98	8,06	8,60		
1099000	0,00	0,16	0,72	1,27	1,89	2,67	3,60	4,73	5,88	6,52	7,11	8,25	8,79		
1200000	0,00	0,15	0,75	1,30	1,94	2,74	3,76	4,91	6,11	6,72	7,37	8,52	9,11		
1300000	0,00	0,17	0,79	1,38	2,03	2,82	3,78	4,90	6,13	6,75	7,38	8,57	9,17		
1400000	0,00	0,14	0,76	1,35	2,00	2,78	3,78	4,91	6,15	6,82	7,44	8,62	9,22		
1490000	0,00	0,17	0,77	1,39	2,04	2,83	3,79	4,95	6,18	6,87	7,49	8,71	9,30		
1600000	0,00	0,19	0,88	1,61	2,43	3,50	4,69	5,92	7,20	7,85	8,51	9,74	10,36		
1700000	0,00	0,26	1,36	2,35	3,36	4,47	5,71	7,03	8,40	9,09	9,80	11,16	11,85		
1800000	0,00	0,17	1,32	2,23	3,28	4,25	5,64	7,05	8,41	9,12	9,72	11,21	11,90		
1907000	0,00	0,17	1,10	1,99	3,01	4,13	5,46	6,83	8,23	8,91	9,67	11,06	11,81		
2000000	0,00	0,17	1,06	1,97	3,03	4,16	5,48	6,86	8,29	9,05	9,79	11,23	11,94		
2100000	0,00	0,19	1,06	1,89	2,83	3,90	5,12	6,47	7,87	8,65	9,38	10,83	11,48		
2200000	0,00	0,20	1,06	1,91	2,87	3,94	5,23	6,56	8,01	8,76	9,54	10,96	11,71		
2315000	0,00	0,26	0,99	1,93	2,82	3,94	5,08	6,46	7,87	8,61	9,36	10,73	11,47		
2409000	0,00	0,17	1,02	1,86	2,81	3,84	5,09	6,41	7,86	8,59	9,32	10,82	12,16		
2501000	0,00	0,19	1,06	1,97	3,01	4,16	5,52	6,95	8,49	9,24	10,05	11,55	12,30		
2600000	0,00	0,16	1,07	1,99	3,06	4,15	5,55	7,00	8,56	9,33	10,09	11,65	12,49		
2700000	0,00	0,25	1,12	2,07	3,08	4,32	5,67	7,21	8,75	9,56	10,25	12,43	13,14		
2800000	0,00	0,27	1,14	2,16	3,26	4,50	5,86	7,41	8,94	9,75	10,54	12,11	12,94		
2900000	0,00	0,27	1,16	2,16	3,24	4,52	5,94	7,44	9,02	9,84	10,65	12,16	12,99		
3000000	0,00	0,30	1,22	2,25	3,36	4,64	6,09	7,71	9,25	10,07	10,93	12,51	13,28		
3100000	0,00	0,31	1,36	2,35	3,48	4,77	6,22	7,83	9,41	10,20	11,03	12,65	13,49		

Tafel 5.4 : Durchbiegungen Träger 3

Serie II Balken 1		Delta-Sigma = 140 MN/m ²											DURCHBIEGUNGEN in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	170,00	180,00	200,00	210,00		
Lastspiele															
1	0,00	0,12	0,68	1,11	1,51	1,89	2,29	2,76	3,47	3,89	4,53	5,41	6,28		
1000										4,52			6,90		
200000	0,00	0,12	0,58	1,00	1,42	1,88	2,47	3,42	4,42	4,78	5,26	6,16	6,60		
300000	0,00	0,12	0,58	1,03	1,49	2,01	2,75	3,74	4,75	5,25	5,77	6,73	7,19		
400000	0,00	0,14	0,61	1,07	1,50	2,03	2,77	3,75	4,79	5,31	5,84	6,80	7,28		
500000	0,00	0,14	0,64	1,08	1,53	2,06	2,83	3,87	4,93	5,45	6,01	6,98	7,47		
600000	0,00	0,13	0,62	1,06	1,52	2,03	2,79	3,79	4,87	5,41	5,95	6,93	7,41		
700000	0,00	0,14	0,63	1,08	1,53	2,06	2,80	3,82	4,90	5,45	5,97	6,95	7,43		
800000	0,00	0,12	0,63	1,06	1,52	2,06	2,81	3,81	4,91	5,48	5,97	6,96	7,43		
900000	0,00	0,12	0,58	1,04	1,50	2,09	2,91	3,97	5,05	5,60	6,05	7,18	7,65		
1000000	0,00	0,09	0,57	1,02	1,49	2,07	2,87	3,91	4,99	5,53	6,09	7,10	7,63		
1096000	0,00	0,13	0,61	1,09	1,57	2,14	2,96	4,00	5,09	5,67	6,22	7,23	7,73		
1200000	0,00	0,15	0,65	1,13	1,60	2,16	2,98	4,01	5,13	5,68	6,24	7,26	7,74		
1307000	0,00	0,14	0,61	1,09	1,56	2,15	2,96	4,04	5,12	5,71	6,26	7,42	7,91		
1409000	0,00	0,15	0,63	1,13	1,62	2,26	3,14	4,25	5,36	5,93	6,46	7,61	8,11		
1500000	0,00	0,17	0,67	1,17	1,74	2,50	3,51	4,62	5,73	6,27	6,84	7,89	8,44		
1600000	0,00	0,14	0,63	1,16	1,76	2,59	3,63	4,73	5,85	6,41	7,00	8,04	8,57		
1700000	0,00	0,19	0,74	1,32	1,95	2,86	3,91	5,05	6,21	6,79	7,36	8,50	9,04		
1800000	0,00	0,18	0,79	1,40	2,20	3,18	4,29	5,46	6,65	7,25	7,87	9,02	9,57		
1901000	0,00	0,21	0,88	1,66	2,54	3,63	4,78	6,01	7,22	7,86	8,50	9,74	10,33		
2004000	0,00	0,14	0,85	1,59	2,54	3,59	4,82	6,07	7,26	7,92	8,61	9,85	10,47		
2105000	0,00	0,18	0,77	1,57	2,47	3,57	4,76	6,04	7,30	7,97	8,62	9,92	10,56		
2205000	0,00	0,15	0,81	1,54	2,51	3,58	4,85	6,10	7,40	8,09	8,75	10,04	10,68		
2314800	0,00	0,17	0,85	1,65	2,55	3,67	4,86	6,24	7,47	8,20	8,80	10,14	10,71		
2400000	0,00	0,28	1,01	1,85	2,76	3,91	5,13	6,43	7,74	8,44	9,10	10,44	11,08		
2500000	0,00	0,16	0,90	1,70	2,68	3,83	5,13	6,47	7,83	8,50	9,17	10,54	11,19		
2600000	0,00	0,17	0,95	1,72	2,74	3,90	5,22	6,57	7,96	8,64	9,38	10,71	11,36		
2700000	0,00	0,22	0,94	1,83	2,80	4,06	5,33	6,77	8,12	8,85	9,57	10,97	11,65		
2800000	0,00	0,15	0,92	1,77	2,78	3,96	5,35	6,69	8,17	8,93	9,60	11,00	12,22		

Tafel 5.5 : Durchbiegungen Träger 4

Serie II Balken 2		Delta-Sigma = 160 MN/m ²											D U R C H B I E G U N G E N in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	170,00	180,00	200,00	210,00		
Lastspiele															
1	0,00	0,20	0,85	1,31	1,71	2,09	2,47	2,94	3,75	4,62	4,86	5,72	6,12		
1000	0,00	0,18	0,70	1,20	1,62	2,10	2,54	3,22	3,91	4,71	5,02	5,91	6,42		
10000	0,00	0,17	0,75	1,22	1,65	2,11	2,68	3,44	4,36	4,82	5,30	6,19	6,62		
100000	0,00	0,12	0,71	1,18	1,63	2,11	2,71	3,49	4,48	5,02	5,51	6,45	6,91		
200000	0,00	0,19	0,83	1,33	1,78	2,26	2,88	3,71	4,72	5,27	5,75	6,70	7,16		
300000	0,00	0,13	0,65	1,12	1,59	2,14	2,88	3,85	4,92	5,46	5,99	6,98	7,45		
400000	0,00	0,14	0,67	1,16	1,64	2,19	2,92	3,88	4,97	5,51	6,05	7,05	7,54		
503000	0,00	0,14	0,62	1,09	1,57	2,14	2,91	3,93	5,02	5,54	6,16	7,16	7,66		
605000	0,00	0,13	0,62	1,08	1,58	2,17	2,94	3,93	5,03	5,60	6,14	7,19	7,69		
702000	0,00	0,13	0,64	1,15	1,66	2,28	3,12	4,12	5,23	5,77	6,31	7,34	7,84		
800000	0,00	0,15	0,68	1,18	1,71	2,37	3,25	4,30	5,41	5,96	6,51	7,56	8,08		
910000	0,00	0,14	0,65	1,15	1,74	2,79	3,41	4,47	5,60	6,16	6,72	7,88	8,41		
1005000	0,00	0,14	0,66	1,21	1,88	2,72	3,73	4,83	5,99	6,56	7,14	8,24	8,78		
1113000	0,00	0,16	0,77	1,42	2,13	3,00	4,02	5,16	6,34	6,93	7,52	8,66	9,23		
1213000	0,00	0,14	0,77	1,41	2,15	3,02	4,08	5,24	6,42	7,03	7,64	8,83	9,39		
1310000	0,00	0,16	0,75	1,39	2,12	3,00	4,04	5,21	6,44	7,01	7,67	8,83	9,40		
1400000	0,00	0,15	0,77	1,43	2,16	3,04	4,09	5,25	6,47	7,08	7,70	8,90	9,50		
1500000	0,00	0,14	0,73	1,36	2,08	2,98	4,05	5,23	6,48	7,12	7,75	8,95	9,53		
1599000	0,00	0,12	0,71	1,31	2,04	2,92	3,98	5,17	6,42	7,05	7,67	8,89	9,48		
1715000	0,00	0,14	0,76	1,40	2,14	3,02	4,10	5,29	6,57	7,21	7,85	9,09	9,69		
1800000	0,00	0,13	0,76	1,41	2,15	3,03	4,11	5,33	6,59	7,23	7,87	9,14	9,77		
1905000	0,00	0,14	0,78	1,46	2,28	3,25	4,47	5,80	7,20	7,92	8,63	10,14	10,87		

Tafel 5.6 Durchbiegungen Träger 5

Serie II Balken 3		Delta-Sigma = 160 MN/m ²											D U R C H B I E G U N G E N in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1	
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	170,00	180,00	200,00	210,00			
Lastspiele																
1	0,00	0,14	0,64	1,06	1,43	1,82	2,21	2,65	3,41	3,86	4,48	5,72	6,01			
1000	0,00	0,11	0,59	1,02	1,42	1,85	2,38	3,10	4,00	4,44	4,90	5,75	6,17			
10000	0,00	0,15	0,61	1,03	1,43	1,86	2,38	3,14	4,08	4,55	5,01	5,91	6,33			
100000	0,00	0,15	0,66	1,11	1,59	2,00	2,59	3,41	4,41	4,90	5,40	6,34	6,79			
200000	0,00	0,14	0,64	1,09	1,52	1,99	2,61	3,47	4,49	5,03	5,55	6,52	6,99			
300000	0,00	0,12	0,59	1,06	1,48	1,94	2,46	3,18	4,12	4,62	5,13	6,10	6,58			
400000	0,00	0,08	0,56	1,01	1,44	1,90	2,44	3,17	4,13	4,65	5,16	6,14	6,63			
500000	0,00	0,14	0,63	1,13	1,61	2,12	2,79	3,70	4,72	5,25	5,78	6,82	7,26			
600000	0,00	0,13	0,64	1,15	1,64	2,21	2,94	3,86	4,90	5,43	5,96	7,02	7,49			
701000	0,00	0,12	0,64	1,15	1,69	2,31	3,11	4,11	5,22	5,78	6,34	7,39	7,90			
800000	0,00	0,13	0,66	1,20	1,76	2,47	3,36	4,39	5,49	6,07	6,64	7,71	8,23			
880000	0,00	0,14	0,68	1,23	1,78	2,48	3,37	4,41	5,59	6,18	6,76	7,87	8,41			
1000000	0,00	0,15	0,71	1,26	1,80	2,54	3,43	4,49	5,66	6,27	6,88	8,00	8,58			
1100000	0,00	0,15	0,68	1,24	1,81	2,49	3,35	4,41	5,54	6,13	6,73	7,89	8,47			
1189000	0,00	0,13	0,74	1,26	1,82	2,50	3,37	4,42	5,60	6,21	6,82	7,98	8,56			
1290000	0,00	0,16	0,87	1,16	1,71	2,39	3,24	4,28	5,52	6,14	6,76	7,95	8,55			
1400000	0,00	0,16	0,69	1,25	1,82	2,50	3,38	4,45	5,63	6,28	6,93	8,11	8,71			
1504400	0,00	0,15	0,68	1,23	1,79	2,46	3,33	4,39	5,56	6,21	6,85	8,07	8,65			
1600000	0,00	0,16	0,71	1,19	1,79	2,46	3,35	4,40	5,65	6,28	6,92	8,11	8,76			
1705000	0,00	0,18	0,88	1,50	2,18	2,97	3,90	5,03	6,23	6,85	7,47	8,68	9,26			
1800000	0,00	0,17	0,97	1,61	2,33	3,15	4,15	5,29	6,56	7,18	7,80	9,29	9,88			
1907000	0,00	0,14	0,80	1,46	2,26	3,11	4,15	5,34	6,59	7,22	7,84	9,06	9,69			
2002000	0,00	0,16	0,85	1,62	2,50	3,45	4,62	5,85	7,22	7,87	8,51	9,81	10,46			
2100000	0,00	0,19	0,85	1,65	2,50	3,51	4,78	5,95	7,20	7,89	8,59	9,88	10,54			
2200000	0,00	0,18	0,98	1,81	2,72	3,72	4,94	6,23	7,59	8,28	8,97	10,33	10,98			
2302000	0,00	0,18	0,90	1,68	2,63	3,63	4,84	6,13	7,48	8,15	8,82	10,18	10,87			
2400000	0,00	0,23	0,97	1,71	2,61	3,62	4,85	6,22	7,70	8,44	9,17	10,62	11,37			
2502000	0,00	0,19	0,82	1,63	2,50	3,56	4,72	6,10	7,51	8,31	9,11	10,54	11,30			
2600000	0,00	0,16	0,91	1,63	2,55	3,52	4,78	6,08	7,62	8,35	9,08	10,63	11,36			
2695000	0,00	0,25	0,93	1,76	2,63	3,76	5,04	6,50	8,01	8,82	9,63	11,21	11,95			

Tafel 5.7 : Durchbiegungen Träger 6

Serie III Balken 1		Delta-Sigma = 190 MN/m ²											DURCHBIEGUNGEN in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	220,00	230,00		
Lastspiele															
1	0,00	0,12	0,60	1,02	1,42	1,83	2,20	2,64	3,04	3,72	4,57	5,32	5,92		
1000	0,00	0,15	0,68	1,15	1,53	1,92	2,31	2,78	3,40	4,24	5,07	5,88	6,27		
10000	0,00	0,16	0,72	1,21	1,63	2,03	2,45	2,95	3,59	4,46	5,35	6,24	6,65		
100000	0,00	0,16	0,78	1,27	1,72	2,13	2,56	3,09	3,81	4,69	5,61	6,55	6,98		
200000	0,00	0,18	0,84	1,39	1,85	2,26	2,74	3,26	3,98	4,90	5,84	6,79	7,24		
300000	0,00	0,21	0,89	1,46	1,91	2,36	2,84	3,38	4,09	5,03	5,96	6,94	7,38		
400000	0,00	0,15	0,84	1,42	1,90	2,36	2,86	3,46	4,29	5,23	6,18	7,12	7,59		
500000	0,00	0,18	0,85	1,36	1,81	2,27	2,79	3,46	4,34	5,36	6,38	7,40	7,82		
600000	0,00	0,10	0,72	1,20	1,63	2,11	2,68	3,41	4,33	5,38	6,42	7,47	7,93		
700000	0,00	0,16	0,72	1,20	1,67	2,18	2,83	3,71	4,71	5,85	6,97	8,11	8,85		
800000	0,00	0,13	0,65	1,17	1,69	2,33	3,15	4,16	5,27	6,48	7,67	8,84	9,59		
907000	0,00	0,17	0,74	1,34	2,02	2,83	3,82	4,96	6,14	7,44	8,65	9,97	10,52		
1013000	0,00	0,19	0,88	1,57	2,38	3,32	4,47	5,66	6,98	8,35	9,73	11,08	11,78		
1100000	0,00	0,20	0,93	1,60	2,46	3,44	4,55	5,81	7,18	8,57	9,95	11,41	12,03		
1200000	0,00	0,22	0,91	1,59	2,45	3,38	4,54	5,80	7,16	8,56	10,03	11,49	12,12		
1300000	0,00	0,18	0,88	1,62	2,41	3,38	4,46	5,78	7,08	8,50	9,91	11,37	12,10		

Tafel 5.8 : Durchbiegungen Träger 7

Serie III	Balken 2	Delta-Sigma = 190 MN/m ²										DURCHBIEGUNGEN in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1
Kraft [KN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	220,00	230,00	
Lastspiele														
1	0,00	0,12	0,47	0,84	1,22	1,60	2,30	2,56	2,94	3,54	4,49	5,74	6,21	
1000	0,00	0,18	0,51	0,92	1,24	1,62	2,16	2,51	3,04	3,90	4,83	6,02	6,37	
10000	0,00	0,14	0,52	0,93	1,32	1,75	2,30	2,64	3,15	4,13	5,10	6,12	6,42	
100000	0,00	0,13	0,58	0,97	1,39	1,78	2,22	2,71	3,39	4,26	5,19	6,12	6,56	
205000	0,00	0,10	0,53	0,98	1,35	1,79	2,21	2,73	3,40	4,30	5,23	6,18	6,63	
300000	0,00	0,11	0,59	1,03	1,44	1,86	2,30	2,82	3,51	4,40	5,37	6,31	6,79	
400000	0,00	0,10	0,60	1,05	1,46	1,89	2,36	2,93	3,70	4,63	5,60	6,56	6,98	
500000	0,00	0,13	0,61	1,09	1,52	1,96	2,46	3,08	3,98	4,98	5,99	6,98	7,46	
602000	0,00	0,15	0,71	1,18	1,63	2,09	2,59	3,26	4,14	5,16	6,19	7,22	7,72	
700000	0,00	0,10	0,66	1,12	1,66	2,13	2,78	3,63	4,70	5,83	7,01	8,21	9,46	

Tafel 5.9 : Durchbiegungen Träger 8

Serie III Balken 3		Delta-Sigma = 190 MN/m ²											D U R C H B I E G U N G E N in Trägermitte [mm]		Blatt 1/1
Kraft [kN]	15,00	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	220,00	230,00		
Lastspiele															
1	0,00	0,19	0,52	0,94	1,34	1,72	2,05	2,44	2,83	3,29	4,24	5,28	5,84		
1000	0,00	0,15	0,63	1,08	1,46	1,85	2,28	2,72	3,37	4,19	5,04	5,89	6,28		
10000	0,00	0,12	0,61	1,04	1,44	1,83	2,25	2,73	3,36	4,22	5,11	5,98	6,38		
100000	0,00	0,11	0,59	0,99	1,38	1,78	2,22	2,69	3,34	4,25	5,17	6,07	6,50		
206000	0,00	0,15	0,65	1,11	1,51	1,92	2,34	2,86	3,51	4,40	5,35	6,25	6,68		
300000	0,00	0,17	0,69	1,10	1,56	1,94	2,39	2,89	3,56	4,46	5,39	6,33	6,74		
400000	0,00	0,17	0,73	1,18	1,59	1,99	2,46	2,95	3,66	4,56	5,48	6,42	6,86		
500000	0,00	0,19	0,65	1,10	1,54	1,98	2,51	3,19	4,11	5,13	6,14	7,11	7,98		
600000	0,00	0,13	0,64	1,12	1,57	2,05	2,65	3,47	4,45	5,55	6,58	7,60	8,09		
700000	0,00	0,15	0,71	1,21	1,68	2,17	2,79	3,59	4,58	5,70	6,77	7,79	8,27		
800000	0,00	0,19	0,81	1,29	1,78	2,28	2,91	3,75	4,75	5,85	6,92	7,98	8,46		
900000	0,00	0,15	0,77	1,24	1,72	2,20	2,89	3,68	4,70	5,75	6,88	7,92	8,48		
999000	0,00	0,18	0,79	1,29	1,83	2,41	3,25	4,21	5,38	6,64	7,88	9,03	9,63		
1100000	0,00	0,12	0,71	1,21	1,76	2,32	3,11	4,06	5,20	6,43	7,70	8,88	9,50		
1200000	0,00	0,14	0,76	1,30	1,84	2,51	3,42	4,45	5,69	6,94	8,26	9,53	10,20		
1303000	0,00	0,22	0,86	1,53	2,15	3,00	3,97	5,18	6,56	7,97	9,46	10,95	11,73		

Tafel 5.10 : Durchbiegungen Träger 9

Balken 1	DEHNUNGEN [%.]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}
1	-0,38	-0,57	+0,66	+1,44	-0,40	-0,61	+1,31	+2,15
1000	-0,45	-0,54	+1,18	+1,55	-0,48	-0,58	+1,65	+2,07
10000	-0,43	-0,53	+1,20	+1,58	-0,47	-0,57	+1,65	+2,22
100000	-0,43	-0,55	+1,20	+1,64	-0,45	-0,58	+1,60	+2,26
200000	-0,48	-0,60	+1,22	+1,70	-0,48	-0,61	+1,65	+2,33
300000	-0,51	-0,63	+1,23	+1,70	-0,51	-0,63	+1,67	+2,34
400000	-0,51	-0,63	+1,27	+1,75	-0,52	-0,64	+1,72	+2,40
500000	-0,55	-0,68	+1,34	+1,82	-0,54	-0,68	+1,82	+2,51
600000	-0,56	-0,68	+1,35	+1,85	-0,55	-0,68	+1,84	+2,55
700000	-0,56	-0,70	+1,36	+1,85	-0,56	-0,70	+1,85	+2,54
800000	-0,57	-0,69	+1,38	+1,87	-0,56	-0,69	+1,87	+2,58
900000	-0,57	-0,68	+1,36	+1,89	-0,54	-0,65	+1,85	+2,58
1000000	-0,57	-0,70	+1,37	+1,87	-0,55	-0,69	+1,84	+2,56
1100000	-0,58	-0,72	+1,47	+1,96	-0,55	-0,69	+1,97	+2,67
1200000	-0,59	-0,72	+1,54	+2,03	-0,57	-0,70	+2,04	+2,65
1300000	-0,60	-0,71	+1,62	+2,15	-0,58	-0,69	+2,16	+2,83
1400000	-0,61	-0,73	+1,66	+2,17	-0,60	-0,72	+2,28	+2,89
1500000	-0,61	-0,73	+1,73	+2,26	-0,60	-0,73	+2,38	+3,02
1600000	-0,61	-0,74	+1,75	+2,83	-0,60	-0,74	+2,42	--
1700000	-0,61	-0,73	+1,77	+2,32	-0,61	-0,73	+2,45	--
1800000	-0,62	-0,75	+1,78	+2,35	-0,62	-0,75	+2,46	--
1900000	-0,63	-0,75	+1,84	+2,40	-0,61	-0,74	+2,29	--
2000000	-0,64	-0,77	+1,71	+2,27	-0,62	-0,75	+2,57	--
2100000	-0,66	-0,75	+1,95	+2,53	-0,63	-0,76	+2,66	--
2200000	-0,65	-0,53	+1,97	+2,64	-0,65	-0,79	+2,77	--
2300000	-0,65	-0,77	+2,04	+2,62	-0,65	-0,77	+2,84	--
2400000	-0,63	-0,76	+2,07	+2,66	-0,64	-0,77	--	--
2500000	-0,67	-0,77	+2,12	+2,74	-0,68	-0,79	--	--
2600000	-0,65	-0,77	+2,11	+2,76	-0,67	-0,79	--	--
2700000	-0,66	-0,78	+2,14	+2,76	-0,67	-0,79	--	--
2800000	-0,67	-0,79	+2,17	+2,80	-0,68	-0,81	--	--
2900000	-0,66	-0,78	+2,17	+2,79	-0,68	-0,80	--	--
3000000	-0,68	-0,79	+2,19	+2,82	-0,69	-0,82	--	--
3100000	-0,67	-0,79	+2,09	+2,83	-0,68	-0,81	--	--
3200000	-0,67	-0,79	+2,20	+2,74	-0,69	-0,82	--	--
3300000	-0,66	-0,77	+2,19	+2,72	-0,68	-0,80	--	--
3400000	-0,68	-0,80	+2,23	+2,77	-0,69	-0,82	--	--
3500000	-0,66	-0,78	+2,26	+2,79	-0,69	-0,81	--	--
3600000	-0,68	-0,80	+2,26	+2,79	-0,70	-0,83	--	--
3700000	-0,68	-0,79	+2,26	+2,80	-0,65	-0,83	--	--
3800000	-0,69	-0,80	+2,26	+2,80	-0,71	-0,84	--	--
3900000	-0,68	-0,80	+2,27	+2,82	-0,69	-0,83	--	--
4000000	-0,44	-0,81	+2,26	+2,80	-0,70	-0,84	--	--
4100000	-0,68	-0,80	+2,28	+2,82	-0,70	-0,82	--	--
4200000	-0,69	-0,81	+2,29	+2,83	-0,71	-0,83	--	--
4300000	-0,69	-0,81	+2,37	+2,89	-0,71	-0,84	--	--
4400000	-0,69	-0,81	+2,40	+2,93	-0,71	-0,84	--	--
4500000	-0,69	-0,81	+2,41	--	-0,71	-0,84	--	--
4600000	-0,43	-0,81	+2,43	--	-0,71	-0,84	--	--
4700000	-0,70	-0,83	+2,47	--	-0,73	-0,86	--	--
4800000	-0,70	-0,83	+2,50	--	-0,73	-0,86	--	--
4900000	-0,70	-0,82	+2,50	--	-0,72	-0,85	--	--
5000000	-0,71	-0,82	+2,50	--	-0,74	-0,86	--	--

Tafel 5.11 : Dehnungen Träger 1

Balken 2	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}
1	-0,37	-0,57	+0,93	+1,89	-0,43	-0,63	+1,04	+1,53
1000	-0,45	-0,55	+1,43	+1,95	-0,52	-0,62	+1,15	+1,55
10000	-0,42	-0,54	+1,44	+1,95	-0,51	-0,62	+1,16	+1,54
100000	-0,43	-0,54	+1,29	+1,89	-0,52	-0,64	+1,07	+1,51
200000	-0,58	-0,70	+1,21	+1,81	-0,73	-0,87	+1,01	+1,46
300000	-0,63	-0,76	+1,23	+1,82	-0,78	-0,91	+1,01	+1,46
400000	-0,64	-0,72	+1,26	+1,86	-0,79	-0,92	+1,04	+1,49
500000	-0,71	-0,83	+1,39	+1,97	-0,85	-0,99	+1,12	+1,57
600000	-0,70	-0,83	+1,40	+1,99	-0,84	-0,98	+1,13	+1,58
700000	-0,69	-0,82	+1,40	+1,99	-0,84	-0,97	+1,13	+1,58
800000	-0,71	-0,84	+1,41	+1,99	-0,86	-0,99	+1,13	+1,59
900000	-0,73	-0,86	+1,42	+2,04	-0,87	-1,01	+1,14	+1,60
1000000	-0,74	-0,63	+1,56	+2,18	-0,90	-1,05	+1,23	+1,71
1100000	-0,78	-0,91	+1,61	+2,23	-0,95	-1,09	+1,29	+1,79
1200000	-0,79	-0,92	+1,66	+2,29	-0,97	-1,10	+1,33	+1,82
1300000	-0,82	-0,94	+1,64	+2,30	-0,96	-1,09	+1,27	+1,78
1400000	-0,82	-0,95	+1,75	+2,40	-0,97	-1,10	+1,38	+1,88
1500000	-0,84	-0,96	+1,78	+2,43	-1,00	-1,13	+1,40	+1,92
1600000	-0,84	-0,97	+1,82	+2,40	-1,01	-1,14	+1,43	+1,96
1700000	-0,86	-0,98	+1,80	+2,40	-1,01	-1,14	+1,40	+1,93
1800000	-0,87	-1,00	+1,83	+2,44	-1,03	-1,16	+1,42	+1,95
1900000	-0,89	-1,02	+1,94	+2,56	-1,05	-1,19	+1,49	+2,03
2000000	-0,89	-1,02	+1,96	+2,62	-1,05	-1,19	+1,51	+2,06
2100000	-0,90	-1,04	+1,91	+2,57	-1,05	-1,19	+1,44	+1,97
2200000	-0,90	-1,03	+1,93	+2,62	-1,05	-1,20	+1,46	+2,05
2300000	-0,89	-1,02	+1,89	+2,60	-1,05	-1,19	+1,43	+1,97
2400000	-0,91	-1,05	+1,92	+2,62	-1,07	-1,21	+1,46	+1,99
2500000	-0,90	-1,02	+1,88	+2,60	-1,08	-1,22	+1,43	+1,97
2600000	-0,91	-1,05	+1,90	+2,60	-1,09	-1,23	+1,47	+2,00
2700000	-0,90	-1,05	+1,86	--	-1,09	-1,24	+1,44	+2,06
2800000	-0,91	-1,05	+1,95	--	-1,11	-1,25	+1,51	+2,05
2900000	-0,91	-1,04	+1,97	--	-1,10	-1,24	+1,52	+2,07
3000000	-0,92	-1,04	+1,99	--	-1,11	-1,24	+1,55	+1,96
3100000	-0,93	-1,05	+2,01	--	-1,12	-1,25	+1,57	+1,98
3200000	-0,93	-1,06	+2,03	--	-1,12	-1,26	+1,60	+1,99
3300000	-0,92	-1,05	+2,11	--	-1,11	-1,25	+1,74	+2,11
3400000	-0,90	-1,02	+2,12	--	-1,11	-1,24	+1,78	--
3500000	-0,92	-1,04	+2,14	--	-1,12	-1,24	+1,77	--
3600000	-0,93	-1,06	+2,17	--	-1,12	-1,26	+1,81	--
3700000	-0,89	-1,02	+2,19	--	-1,09	-1,23	+1,63	--
3800000	-0,92	-1,04	+2,31	--	-1,13	-1,25	+1,68	--
3900000	-0,91	-1,04	+2,34	--	-1,13	-1,27	+1,72	--
4000000	-0,91	-1,03	+2,33	--	-1,13	-1,26	+1,71	--
4100000	-0,91	-1,03	+2,37	--	-1,13	-1,26	+1,75	--
4200000	-0,91	-1,04	+2,37	--	-1,14	-1,28	+1,75	--
4300000	-0,91	-1,04	+2,33	--	-1,13	-1,27	+1,71	--
4400000	-0,89	-1,03	+2,35	--	-1,13	-1,27	+1,74	--
4500000	-0,91	-1,03	--	--	-1,14	-1,27	--	--
4600000	-0,87	-1,00	--	--	-1,11	-1,25	--	--
4700000	-0,89	-1,02	--	--	-1,13	-1,28	--	--
4800000	-0,89	-1,02	--	--	-1,14	-1,28	--	--
4900000	-0,87	-1,00	--	--	-1,12	-1,26	--	--
5000000	-0,87	-1,03	--	--	-1,12	-1,25	--	--

Tafel 5.12 : Dehnungen Träger 2

Balken 3	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ϵ_{Po}	ϵ_{Po}	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}
1	-0,51	-0,71	+1,21	+1,89	-0,45	-0,65	+0,43	+0,78
1000	-0,55	-0,69	+1,39	+1,93	-0,49	-0,62	+0,64	+0,85
10000	-0,56	-0,69	+1,43	+1,90	-0,49	-0,61	+0,68	+0,85
100000	-0,53	-0,69	+1,26	+1,86	-0,46	-0,62	+0,60	+0,82
200000	-0,55	-0,72	+1,26	+1,87	-0,47	-0,64	+0,59	+0,82
300000	-0,51	-0,72	+1,16	+1,79	-0,51	-0,74	+0,53	+0,77
400000	-0,55	-0,72	+1,19	+1,81	-0,57	-0,76	+0,55	+0,77
500000	-0,63	-0,80	+1,40	+2,03	-0,62	-0,80	+0,61	+0,86
600000	-0,57	-0,77	+1,64	+2,02	-0,64	-0,80	+0,62	+0,87
700000	-0,62	-0,79	+1,43	+2,07	-0,62	-0,79	+0,64	+0,89
800000	-0,62	-0,78	+1,45	+2,09	-0,62	-0,80	+0,65	+0,91
900000	-0,68	-0,85	+1,40	+2,06	-0,63	-0,78	+0,62	+0,89
1000000	-0,69	-0,87	+1,52	+2,02	-0,65	-0,81	+0,67	+0,94
1100000	-0,73	-0,89	+1,76	--	-0,68	-0,83	+0,70	+0,98
1200000	-0,74	-0,92	+1,87	--	-0,69	-0,87	+0,71	+1,00
1300000	-0,76	-0,94	+1,89	--	-0,71	-0,87	+0,71	+1,01
1400000	-0,78	-0,96	+1,73	--	-0,72	-0,88	+0,72	+1,02
1500000	-0,77	-0,94	+1,74	--	-0,73	-0,88	+0,71	+1,01
1600000	-0,83	-1,00	--	--	-0,76	-0,92	+0,82	+1,13
1700000	-0,86	-1,03	--	--	-0,78	-0,94	+0,90	+1,27
1800000	-0,86	-1,04	--	--	-0,78	-0,95	+0,96	+1,33
1900000	-0,88	-1,06	--	--	-0,78	-0,95	+0,97	+0,93
2000000	-0,87	-1,07	--	--	-0,79	-0,96	+1,00	+0,94
2100000	-0,97	-1,16	--	--	-0,79	-0,94	+0,95	+0,91
2200000	-0,86	-1,03	--	--	-0,78	-0,95	+0,99	+0,90
2300000	-0,89	-1,07	--	--	-0,74	-0,90	+0,98	+0,88
2400000	-0,88	-1,09	--	--	-0,74	-0,93	+1,00	+0,91
2500000	-0,90	-1,06	--	--	-0,75	-0,90	+0,69	+1,03
2600000	-0,88	-1,06	--	--	-0,75	-0,91	+0,75	+1,08
2700000	-0,89	-1,08	--	--	-0,74	-0,92	+0,75	+1,13
2800000	-0,87	-1,04	--	--	-0,75	-0,90	+0,87	+1,21
2900000	-0,88	-1,04	--	--	-0,76	-0,91	+0,97	+1,30
3000000	-0,87	-1,02	--	--	-0,75	-0,89	--	--

Tafel 5.13 : Dehnungen Träger 3

Balken 4	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ϵ_{pu}	ϵ_{po}	ϵ_{pu}	ϵ_{po}	ϵ_{pu}	ϵ_{po}	ϵ_{pu}	ϵ_{po}
1	-0,38	-0,61	+1,09	+1,60	-0,43	-0,66	+1,10	+1,77
1000	-0,46	-0,58	+1,13	+1,59	-0,50	-0,63	+1,46	+1,76
10000	-0,43	-0,57	+1,16	+1,59	-0,47	-0,62	+1,25	+1,76
100000	-0,42	-0,57	+1,05	+1,54	-0,46	-0,62	+1,11	+1,69
200000	-0,46	-0,60	+1,05	+1,54	-0,50	-0,65	+1,13	+1,72
300000	-0,49	-0,64	+1,17	+1,67	-0,57	-0,72	+1,29	+1,90
400000	-0,53	-0,67	+1,17	+1,67	-0,59	-0,73	+1,30	+1,91
500000	-0,49	-0,64	+1,21	+1,72	-0,58	-0,72	+1,35	+1,97
600000	-0,51	-0,67	+1,21	+1,71	-0,59	-0,74	+1,35	+1,96
700000	-0,50	-0,65	+1,21	+1,72	-0,58	-0,73	+1,35	+1,96
800000	-0,51	-0,64	+1,20	+1,72	-0,60	-0,73	+1,34	+1,97
900000	-0,51	-0,65	+1,12	+1,69	-0,60	-0,74	+1,33	+1,90
1000000	-0,52	-0,67	+1,24	+1,76	-0,62	-0,77	+1,29	+2,02
1100000	-0,52	-0,67	+1,28	+1,79	-0,60	-0,75	+1,42	+2,05
1200000	-0,52	-0,66	+1,26	+1,78	-0,61	-0,75	+1,41	+2,06
1300000	-0,52	-0,66	+1,26	+1,83	-0,61	-0,76	+1,41	+2,09
1400000	-0,52	-0,67	+1,33	+1,89	-0,61	-0,77	+1,49	+2,21
1500000	-0,54	-0,68	+1,47	+2,02	-0,63	-0,76	+1,72	+1,77
1600000	-0,56	-0,70	+1,52	+2,07	-0,63	-0,78	+1,83	+1,82
1700000	-0,57	-0,70	+1,60	+2,17	-0,66	-0,80	+1,91	+1,90
1800000	-0,59	-0,72	+1,84	+2,45	-0,68	-0,82	+1,50	+2,05
1900000	-0,60	-0,75	+2,13	+2,82	-0,69	-0,83	+1,68	+2,29
2000000	-0,59	-0,49	+2,24	+2,94	-0,67	-0,82	+1,80	+2,43
2100000	-0,60	-0,76	+2,34	--	-0,69	-0,86	+2,01	+2,53
2200000	-0,60	-0,73	+2,38	--	-0,71	-0,84	+1,95	--
2300000	-0,60	-0,74	+2,32	--	-0,71	-0,85	+1,85	--
2400000	-0,60	-0,74	+2,36	--	-0,72	-0,86	+1,90	--
2500000	-0,61	-0,75	--	--	-0,72	-0,86	+2,03	--
2600000	-0,61	-0,76	--	--	-0,74	-0,88	+2,14	--
2700000	-0,62	-0,77	--	--	-0,74	-0,88	--	--
2800000	-0,64	-0,81	--	--	-0,75	-0,91	--	--

Tafel 5.14 : Dehnungen Träger 4

Balken 5	Setzdehnungsmessungen [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}
1	-0,35	-0,62	+0,86	+1,82	-0,37	-0,65	+0,58	+1,69
1000	-0,41	-0,58	+1,12	+2,01	-0,44	-0,62	+0,86	+1,54
10000	-0,42	-0,59	+1,13	+2,04	-0,45	-0,63	+0,89	+1,57
100000	-0,44	-0,64	+1,19	+2,10	-0,53	-0,73	+0,94	+1,61
200000	-0,44	-0,62	+1,22	+2,16	-0,49	-0,67	+0,96	+1,67
300000	-0,48	-0,66	+1,41	+2,36	-0,50	-0,71	+1,10	+1,81
400000	-0,47	-0,66	+1,44	+2,38	-0,56	-0,75	+1,13	+1,83
500000	-0,48	-0,66	+1,47	+2,44	-0,60	-0,78	+1,18	+1,90
600000	-0,48	-0,67	+1,50	+2,46	-0,60	-0,80	+1,20	+1,92
700000	-0,50	-0,68	+1,59	+2,56	-0,62	-0,80	+1,27	+1,99
800000	-0,49	-0,67	+1,70	+2,56	-0,61	-0,80	+1,33	+2,06
900000	-0,53	-0,71	+1,89	+2,82	-0,63	-0,82	+1,44	+2,20
1000000	-0,53	-0,72	+2,17	--	-0,64	-0,83	+1,52	+2,11
1100000	-0,55	-0,74	+2,19	--	-0,66	-0,85	+1,56	+2,23
1200000	-0,56	-0,74	+2,25	--	-0,66	-0,85	+1,57	+2,30
1300000	-0,55	-0,73	+2,26	--	-0,65	-0,84	+1,56	--
1400000	-0,56	-0,73	--	--	-0,65	-0,83	--	--
1500000	-0,55	-0,73	--	--	-0,65	-0,84	--	--
1600000	-0,55	-0,73	--	--	-0,66	-0,84	--	--
1700000	-0,57	-0,75	--	--	-0,66	-0,84	--	--
1800000	-0,57	-0,50	--	--	-0,66	-0,84	--	--
1900000	-0,57	-0,73	--	--	-0,65	-0,83	--	--

Tafel 5.15 : Dehnungen Träger 5

Balken 6	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}	ϵ_{Pu}	ϵ_{Po}
1	-0,32	-0,57	+0,75	+1,82	-0,36	-0,65	+0,88	+1,55
1000	-0,36	-0,52	+1,00	+1,83	-0,48	-0,65	+0,83	+1,45
10000	-0,37	-0,54	+1,02	+1,85	-0,46	-0,64	+0,88	+1,47
100000	-0,39	-0,57	+1,11	+1,96	-0,50	-0,67	+0,91	+1,56
200000	-0,41	-0,59	+1,13	+2,00	-0,53	-0,69	+0,93	+1,61
300000	-0,45	-0,62	+0,95	+1,80	-0,65	-0,84	+0,83	+1,49
400000	-0,46	-0,64	+0,97	+1,83	-0,67	-0,88	+0,84	+1,50
500000	-0,52	-0,69	+1,16	+2,06	-0,75	-0,93	+0,98	+1,68
600000	-0,53	-0,70	+1,26	+2,16	-0,75	-0,95	+1,10	+1,82
700000	-0,54	-0,71	+1,44	+2,37	-0,77	-0,95	+1,21	+1,99
800000	-0,55	-0,74	+1,62	+2,31	-0,77	-0,98	+1,39	+2,19
900000	-0,55	-0,74	+1,49	+2,26	-0,81	-1,00	+1,39	+2,23
1000000	-0,56	-0,76	+1,56	+2,26	-0,79	-1,01	+1,42	+2,29
1100000	-0,57	-0,77	+1,48	+2,23	-0,82	-1,02	+1,44	+2,33
1200000	-0,60	-0,79	+1,49	+2,20	-0,84	-1,04	+1,45	+2,35
1300000	-0,59	-0,78	+1,49	+2,17	-0,85	-1,04	+1,50	+2,35
1400000	-0,60	-0,80	+1,49	+2,18	-0,85	-1,05	+1,51	+2,38
1500000	-0,61	-0,80	+1,47	+2,15	-0,86	-1,06	+1,49	+2,38
1600000	-0,61	-0,80	+1,48	+2,16	-0,85	-1,05	+1,51	+2,42
1700000	-0,61	-0,79	+1,65	+2,22	-0,88	-1,06	+1,68	--
1800000	-0,62	-0,81	+1,71	--	-0,89	-1,09	+1,79	--
1900000	-0,61	-0,79	+1,54	--	-0,87	-1,06	+2,05	--
2000000	-0,62	-0,80	+1,71	--	-0,87	-1,06	--	--
2100000	-0,61	-0,77	+1,76	--	-0,85	-1,03	--	--
2200000	-0,62	-0,78	+1,75	--	-0,86	-1,04	--	--
2300000	-0,60	-0,79	+1,77	--	-0,85	-1,02	--	--
2400000	-0,58	-0,76	+1,41	--	-0,87	-1,04	--	--
2500000	-0,54	-0,72	+1,41	--	-0,83	-1,00	--	--
2600000	-0,54	-0,73	+1,42	--	-0,84	-1,02	--	--
2700000	-0,55	-0,72	+1,49	--	-0,84	-1,00	--	--

Tafel 5.16 : Dehnungen Träger 6

Balken 7	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ε _{Pu}	ε _{Po}	ε _{Pu}	ε _{Po}	ε _{Pu}	ε _{Po}	ε _{Pu}	ε _{Po}
1	-0,39	-0,71	+0,39	+2,05	-0,44	-0,76	+0,38	+1,07
1000	-0,43	-0,68	+0,72	+1,96	-0,47	-0,74	+0,47	+1,07
10000	-0,45	-0,72	+0,72	+2,01	-0,49	-0,79	+0,51	+1,15
100000	-0,48	-0,76	+0,82	+2,16	-0,53	-0,83	+0,54	+1,23
200000	-0,49	-0,77	+0,85	+2,22	-0,55	-0,85	+0,55	+1,26
300000	-0,48	-0,76	+0,88	+2,26	-0,55	-0,84	+0,57	+1,29
400000	-0,51	-0,79	+1,04	+2,41	-0,56	-0,86	+0,66	+1,36
500000	-0,56	-0,83	+1,10	+2,53	-0,61	-0,91	+0,66	+1,41
600000	-0,57	-0,88	+1,23	+2,76	-0,63	-0,93	+0,73	+1,46
700000	-0,59	-0,91	+1,51	--	-0,64	-0,98	+0,81	+1,68
800000	-0,64	-0,92	+1,96	--	-0,68	-0,99	+0,95	+1,80
900000	-0,71	-0,99	--	--	-0,77	-1,07	+1,12	+1,95
1000000	-0,70	-0,97	--	--	-0,78	-1,07	+1,40	+2,45
1100000	-0,70	-0,96	--	--	-0,51	-1,05	+1,51	+2,40
1200000	-0,70	-0,96	--	--	-0,75	-1,04	+1,54	--
1300000	-0,76	-1,01	--	--	-0,76	-1,03	+1,53	--

Tafel 5.17 : Dehnungen Träger 7

Balken 8	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}
1	-0,34	-0,68	+0,38	+1,77	-0,34	-0,71	+0,42	+1,84
1000	-0,40	-0,65	+0,63	+1,70	-0,40	-0,67	+0,66	+1,76
10000	-0,40	-0,67	+0,66	+1,83	-0,42	-0,71	+0,76	+1,97
100000	-0,43	-0,73	+0,72	+1,93	-0,43	-0,74	+0,79	+2,06
200000	-0,45	-0,74	+0,74	+1,97	-0,44	-0,75	+0,79	+2,08
300000	-0,45	-0,74	+0,76	+2,02	-0,44	-0,75	+0,80	+2,12
400000	-0,47	-0,77	+0,86	+2,10	-0,45	-0,78	+0,92	+2,03
500000	-0,49	-0,79	+0,98	+2,28	-0,48	-0,80	+1,00	+2,08
600000	-0,49	-0,80	+1,01	+2,32	-0,49	-0,82	+1,03	+2,11
700000	-0,63	-0,97	--	--	-0,54	-0,89	+1,07	+2,40

Tafel 5.18 : Dehnungen Träger 8

Balken 9	DEHNUNGEN [%]							
Meßstrecke	27/63 oben		9/45 unten		28/64 oben		10/46 unten	
Lastspielzahl n	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}	ε _{pu}	ε _{po}
1	-0,29	-0,59	+0,42	+1,85	-0,36	-0,59	+0,43	+1,42
1000	-0,34	-0,59	+0,68	+1,83	-0,41	-0,69	+0,56	+1,35
10000	-0,34	-0,61	+0,68	+1,85	-0,40	-0,65	+0,56	+1,36
100000	-0,36	-0,63	+0,67	+1,87	-0,46	-0,72	+0,55	+1,37
200000	-0,36	-0,63	+0,69	+1,90	-0,46	-0,73	+0,57	+1,39
300000	-0,34	-0,62	+0,71	+1,91	-0,45	-0,72	+0,57	+1,40
400000	-0,35	-0,65	+0,72	+1,93	-0,47	-0,74	+0,59	+1,41
500000	-0,38	-0,66	+0,99	+2,27	-0,52	-0,80	+0,76	+1,65
600000	-0,42	-0,70	+1,19	+2,50	-0,55	-0,83	+0,91	+1,81
700000	-0,42	-0,69	+1,20	+2,52	-0,55	-0,83	+0,93	+1,86
800000	-0,42	-0,70	+1,21	+2,56	-0,56	-0,84	+1,02	+1,98
900000	-0,40	-0,67	+1,21	+2,55	-0,66	-0,94	+1,07	+1,98
1000000	-0,45	-0,72	+1,34	--	-0,68	-0,94	+1,21	+2,22
1100000	-0,46	-0,76	+1,36	--	-0,71	-0,98	+1,25	+2,29
1200000	-0,50	-0,79	+1,58	--	-0,71	-0,98	+1,30	+2,40
1300000	-0,56	-0,84	+1,60	--	-0,72	-0,98	+1,41	--

Tafel 5.19 : Dehnungen Träger 9

Rissbreiten	Balken 1	Vorderseite																		Laststufe : Oberlast
Lastspiele n	Rissbezeichnung																			
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	m	n	o	p	q	a1	h1	f1	o1	
200000	0,200	0,200	0,200	0,300	0,200	0,125	0,125	0,025	0,075		0,050									
400000	0,200	0,200	0,175	0,175	0,200	0,125	0,150	0,025	0,100		0,075	0,025								
600000	0,250	0,250	0,225	0,200	0,250	0,125	0,150	0,025	0,125	0,025	0,075	0,050								
800000	0,300	0,250	0,250	0,250	0,275	0,125	0,150	0,025	0,125	0,025	0,075	0,050								
1000000	0,250	0,250	0,225	0,250	0,250	0,100	0,175	0,025	0,125	0,025	0,075	0,025								
1200000	0,250	0,300	0,300	0,250	0,250	0,150	0,125	0,025	0,150	0,025	0,100	0,050	0,050	0,025	0,025	0,025				
1400000	0,350	0,350	0,250	0,250	0,300	0,125	0,100	0,025	0,150	0,025	0,075	0,025	0,075	0,050	0,025	0,025	0,025			
1600000	0,350	0,350	0,350	0,300	0,350	0,125	0,250	0,025	0,150	0,025	0,100	0,025	0,050	0,025	0,025	0,025	0,025			
1800000	0,350	0,375	0,350	0,300	0,350	0,075	0,300	0,025	0,150	0,025	0,100	0,050	0,075	0,050	0,025	0,025				
2000000	0,350	0,375	0,350	0,250	0,200	0,050	0,300	0,025	0,150	0,025	0,100	0,075	0,075	0,025	0,025	0,025				
2200000	0,475	0,350	0,425	0,450	0,400	0,050	0,400	0,025	0,200	0,025	0,100	0,075	0,075	0,075	0,025	0,025	0,025	0,025		
2400000	0,450	0,350	0,450	0,450	0,350	0,450	0,250	0,050	0,200	0,025	0,125	0,100	0,100	0,075	0,050	0,025	0,050	0,025		
2600000	0,500	0,300	0,450	0,450	0,400	0,500	0,250	0,025	0,200	0,025	0,150	0,125	0,100	0,100	0,050	0,025	0,050	0,025	0,025	
2800000	0,500	0,350	0,450	0,450	0,450	0,500	0,350	0,025	0,200	0,025	0,150	0,125	0,100	0,100	0,050	0,025	0,075	0,025	0,025	
3000000	0,500	0,400	0,450	0,500	0,400	0,500	0,300	0,025	0,250	0,025	0,200	0,125	0,100	0,100	0,075	0,025	0,075	0,025	0,025	
3200000	0,500	0,400	0,450	0,500	0,400	0,500	0,300	0,025	0,200	0,025	0,175	0,125	0,100	0,100	0,075	0,025	0,075	0,025	0,025	
3400000	0,550	0,350	0,500	0,500	0,400	0,500	0,350	0,025	0,250	0,025	0,175	0,125	0,100	0,150	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
3600000	0,550	0,350	0,500	0,500	0,400	0,550	0,350	0,025	0,250	0,025	0,150	0,150	0,100	0,100	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
3800000	0,500	0,350	0,500	0,500	0,450	0,600	0,350	0,025	0,250	0,025	0,200	0,125	0,100	0,100	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
4000000	0,550	0,350	0,500	0,500	0,450	0,500	0,350	0,025	0,250	0,025	0,200	0,125	0,100	0,100	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
4200000	0,550	0,350	0,500	0,500	0,450	0,550	0,350	0,025	0,250	0,025	0,300	0,125	0,125	0,125	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
4400000	0,550	0,375	0,500	0,600	0,400	0,600	0,350	0,025	0,250	0,025	0,300	0,125	0,125	0,125	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
4600000	0,600	0,375	0,500	0,600	0,400	0,650	0,350	0,025	0,250	0,025	0,300	0,125	0,125	0,125	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
4800000	0,550	0,375	0,500	0,650	0,400	0,650	0,350	0,025	0,250	0,025	0,300	0,125	0,125	0,125	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	
5000000	0,550	0,375	0,500	0,650	0,400	0,600	0,350	0,025	0,250	0,025	0,300	0,125	0,125	0,125	0,075	0,025	0,100	0,025	0,025	

Tafel 5.20 : Rißbreiten Träger 1

Résumé

L'usage de la précontrainte partielle sous des charges dynamiques exige, indépendamment du comportement statique, une étude du compartement à la fatigue de l'acier de précontrainte. La fissuration méthodique de la section du béton suscite dans l'acier prétendu et l'acier passif un accroissement de l'amplitude de la contrainte résultant de la charge dynamique.

On procéda donc à l'institut des structures en béton armé et en béton précontraint, à l'étude du comportement oscillatoire à la fatigue de l'acier de précontrainte en tenant particulièrement compte des effets de longue durée sur le comportement de la fatigue aux frottements. L'étude a été faite sur 9 poutres partiellement contraintes respectivement avec 3 câbles contenant chacune 7 fils de ϕ 0,6".

Grâce au caractère oscillatoire des charges et aussi aux intempéries artificielles auxquelles ont été exposées certaines poutres, on a pu soigneusement examiner et analyser l'effet de sollicitations vibrantes de longue durée sur la fatigue aux frottements des câbles de l'acier de précontrainte. L'amplitude maximale enregistrée au milieu de la travée des poutres varie entre 120 et 190 MN/m².

A la fin des essais, on procéda à un démontage de l'acier prétendu et à une étude microscopique des points de rupture observés. La rupture de certains câbles suscita du fait de la réduction de la section existante de l'acier un accroissement de l'amplitude des contraintes dans le reste de la section. Cette augmentation de l'amplitude pouvait, sans façon, encore être supportée pendant une longue durée par le reste de la section.

Le point de départ de la plupart des ruptures a été la point de touche entre l'acier de précontrainte et la gaine à cause de sollicitation permanente concentrée de frottement y ayant lieu. Il se révéla lors de la comparaison des poutres étudiées en atmosphère sèche, respectivement humide une réduction plus forte de l'amplitude de contrainte supportable auprès des poutres étudiées sous des conditions climatiques sèches. La cause de ce phénomène est la dureté plus élevée des produits d'oxidation y apparaissant avec comme conséquence une attaque plus agressive des surfaces participantes des matériaux.

On peut retenir, comme principal résultat de cette étude, qu'à cause des ruptures provenant de la fatigue aux frottements des fils, il ne survient aucune diminution notable de l'amplitude supportable dans toute l'armature prétendue. La section restante est en mesure de supporter, sans façon, pendant une longue durée des amplitudes plus élevées.

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. H. Trost
Lehrstuhl und Institut für Massivbau
Rhein.-Westf. Technische Hochschule
D-5100 Aachen

Summary

The use of partially prestressed concrete under dynamic loads makes proofs of fatigue resistance apart from static design necessary. Partially prestressed members reveal - caused by the limited crack formation under design load - and increase of stress amplitude in prestressing steel and reinforcing steel due to dynamic load.

Therefore, the Institute of Structural Concrete at RWTH Aachen has carried out test series concerning the long-term fretting fatigue behaviour of prestressing steel under conditions of partial prestressing. The 9 beams used for these tests are partially prestressed with 3 strands diameter 0.6". Due to the long-term testing program it was possible to realise a repeated change of loading and break. The maximum stress amplitude caused by a central single load varies between 120 and 190 MN/m² during the test. After testing was ended prestressing steel was removed and the points of failure were examined microscopically. A discontinuous increase in stress amplitude, caused by a decrease of the remaining area of steel, is clearly visible after each failure of a prestressing wire. The higher stress amplitude was carried for some time by the weakened cross section without any further failure because of a lower fretting fatigue of the remaining cross section. The failure of single wires does not lead to a decrease in the acceptable fatigue stress amplitude of the whole tendon. The remaining cross section has enough capacity to accept even higher stress amplitudes for a long time without any damage. The fundamental requirement for damage due to the fretting fatigue is a locally concentrated acting of the pressure. A comparison between dry and humid beams showed a higher decrease of fatigue strength under dry conditions. This is caused, presumably, by a greater hardness of the oxides formed by dry oxidation leading to a more intensive attack on the material surface.