

Günther Valtinat, Friedhelm Albrecht und Peter Dangelmaier

Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwerterhöhenden Maßnahmen

Bericht Nr. 122
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.
Forschungsvorhaben GAV-Nr. FG 23

Kurzfassung aus dem gleichnamigen Forschungsbericht Heft 3
des Arbeitsbereichs Stahlbau und Holzbau
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftliche Problemstellung

Der Einsatz feuerverzinkten Stahls, ggf. mit zusätzlicher Beschichtung, ist im Stahlbau gängige Praxis [1 bis 3]. Die Verbindung der Einzelteile bzw. Sektionen nach dem Feuerverzinken erfolgt durch Schweißen oder Schrauben, wobei letztgenannte Technik mehr Bedeutung hat, da sie den Vorteil bietet, daß hierbei der Zinküberzug intakt bleibt und aufwendige Nacharbeiten entfallen können. Üblich sind sowohl SL- als auch GV-Verbindungen. In ersteren treten im wesentlichen Scher- und Lochleibungskräfte auf. In letzteren werden die Kräfte durch Reibwirkung in den Fugen der gleitfesten Verbindung übertragen. GV-Verbindungen zeichnen sich durch eine besondere Effizienz aus, wenn es darum geht, Verschiebungen in den Verbindungen unter Lasten mit wechselnden Vorzeichen (z. B. aus Wind) zu verhindern; sie werfen jedoch bei Einsatz feuerverzinkten Stahls auch besondere Probleme auf. Diese liegen in den niedrigen Reibbeiwerten der Zinküberzüge und in Kriecheffekten in den GV-Verbindungen bei Dauerstand- und Dauerschwingbelastung. Die hierzu bisher durchgeführten Untersuchungen konnten zwar Lösungswege aufzeigen, waren jedoch - von einzelnen Anwendungsfällen abgesehen, für eine Umsetzung in die Praxis nicht ausreichend. Dies gilt trotz des Umstandes, daß in [4] Vorschläge dahingehend gemacht wurden, bis zu welchen Ausnutzungsgraden GV-Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung auf den Kontaktflächen durch Dauerstandlasten ausgenutzt werden können, ohne daß ein Kriechgleiten zu befürchten ist. Ferner wurden diejenigen Lastanteile vorgeschlagen, die bis zur vollen Ausnutzung des Reibbeiwertes aus statisch zügigen Versuchen durch Kurzzeitlasten in Anspruch genommen werden können.

Die Erfahrung mit GV-Verbindungen hat gezeigt - und dies ist ein entscheidender, aber bisher ungenutzter Vorteil -, daß in solchen Verbindungen, die lange Zeit unter statischer Belastung oder lange Zeit unter schwingender Belastung standen, sich deutliche Reibbeiwert erhöhungen einstellen. Begründungen hierfür können nicht gegeben werden, aber es besteht die Vermutung, daß sich über die längere Standdauer die Kontaktflächen durch den Querdruck aus den vorgespannten Schrauben und durch die gleichzeitigen Belastungen besser verzahnen und so einen erhöhten Reibbeiwert erzielen.

Systematische Untersuchungen hierzu wurden bisher nicht durchgeführt. Es besteht deshalb die praktische Aufgabe, das Reibverhalten von feuerverzinkten GV-Verbindungen mit reibbeiwert erhöhenden Maßnahmen, die längere Zeit in Bauwerken einer gewissen statischen Grundlast, bestehend aus ständigen Lasten und teilweiser Verkehrslast, oder die längere Zeit einer schwingenden Belastung in Bauwerken ausgesetzt waren, systematisch zu ermitteln.

1.2 Stand der bisherigen Forschung bzw. Technik

In den 70er Jahren sind Untersuchungen zur Erhöhung der Reibbeiwerte der Kontaktflächen feuerverzinkter Stahlteile durchgeführt worden, die ermutigende Ergebnisse erbracht haben. Während feuerverzinkter Stahl je nach Ausbildung des Überzuges Reibbeiwerte von $\mu = 0,12$ bis $0,25$ aufweist, konnten diese durch leichtes Anstrahlen (sogen. "Sweepen") und/oder Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung im statisch zügigen Versuch auf Werte um $\mu = 0,60$ erhöht werden

[3 bis 7]. In den USA und Frankreich ermittelte man vergleichbare Werte [8,9]. Dies sind Reibbeiwerte, wie man sie in statisch zügigen Versuchen auch bei gestrahltem und mit gleitfester Beschichtung versehenem unverzinktem Stahl erreicht. Nachteile gab es jedoch bei einer Dauerstandbelastung solcher Verbindungen. Hierbei stellte sich heraus, daß bei hoher Ausnutzung des Reibbeiwertes die Verbindung zum Kriechgleiten neigt [4,6]. Das bedeutet, daß über einen längeren Zeitraum die Verbindung langsam so lange durchrutscht, bis die Lochwandungen der Bauteile an den Schraubenschäften anliegen. Eine solche Verbindung kann nicht mehr als gleitfeste Verbindung bezeichnet werden, deren besonderes Merkmal es ist, unter Nutzlasten und darüber hinaus keine Verschiebungen zuzulassen.

1.3 Vorgehensweise

Die durch Nachbehandlung des Zinküberzuges erzielbaren Reibbeiwerte wurden an Proben ermittelt, wie sie in der ECCS-Commission TC 10 "Connections" festgelegt wurden [10], um international vergleichbare und anerkannte Daten zu erhalten. Basisuntersuchungen sind die Reibbeiwertprüfungen an Doppellaschenzugskörpern mit den Oberflächenzuständen feuerverzinkt und leicht angestrahlt ("gesweept") sowie feuerverzinkt und mit Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung versehen ("beschichtet"). Bei diesen Basisversuchen wurden die Reibbeiwerte im statisch zügigen Versuch mit definierter Belastungsgeschwindigkeit festgestellt. Damit sind die Reibbeiwerte in ihren Mittelwerten und Standardabweichungen bekannt. Artgleiche Prüfkörper wurden dann Dauerstandbelastungen mit unterschiedlichen Ausnutzungsgraden der zuvor ermittelten Reibbeiwerte ausgesetzt, um die Grenzbelastung zu ermitteln, bei der ein Kriechgleiten gerade noch nicht eintritt.

Das Konzept sah ferner vor, diese Prüfkörper dann nach bis zu 36 Monaten Standdauer dem statisch zügigen Zugversuch zu unterwerfen, um den nach der Dauerstandzeit vorhandenen Reibbeiwert mit dem mittleren Reibbeiwert aus den Basisversuchen zu vergleichen.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden artgleiche Prüfkörper Dauerschwingbelastungen unterworfen, wobei die Lasten den im Dauerstandversuch ermittelten Kriechgleitreibbeiwert ausnutzten. Danach wurden an diesen Proben die Reibbeiwerte im statisch zügigen Zugversuch zum Vergleich mit denjenigen aus den Basisversuchen ermittelt.

2 Versuchskörper, Meßschrauben, Verschiebungsmessungen

2.1 Doppellaschenzugskörper

Allen Versuchen lagen zweischnittige Stab-Laschen-Verbindungen als Doppellaschenzugskörper zugrunde. Die Versuchskörper setzten sich jeweils aus zwei Stäben mit zwei Laschen zusammen, zwischen denen die zu untersuchenden Gleitflächen lagen. Das Stab- und Laschenmaterial war aus St 52-3. Alle Stahlteile wurden, wie im folgenden beschrieben, feuerverzinkt. Das Nennlochspiel vor dem Verzinken betrug 2 mm, nach dem Verzinken ca. 1,2 - 1,5 mm. Je ein Stabteil wurde mit zwei HV M 20 bzw. HV M 16 Schrauben nach DIN 6914 in der Werkstoffgüte 10.9 mit den Laschen verbunden; die Vorspannung der Schrauben erfolgte planmäßig nach DIN 18800, Teil 7 (vgl. hierzu Abschnitt 2.2).

Die Versuchskörper wurden beim Zusammenbau entgegen der Belastungsrichtung zusammengeschoben, so daß ein maximaler Gleitweg von ca. $1,5 + 1,5 = 3$ mm möglich war, bevor die Schrauben kraftschlüssig an der Lochwand anlagen und über Lochleibung trugen. Im Bild 1 ist der Versuchskörper dargestellt. Der Gleitweg wurde für jede Probenhälfte auf jeder Seite mit einem induktiven Wegaufnehmer mit einer Auflösung von 1/1000 mm bei den Versuchsserien I und IV, bzw. mit einer mechanischen Meßuhr mit einer Auflösung von 1/100 mm bei den Versuchsserien II und III gemessen und dann über die Probenhälfte gemittelt.

2.1.1 Feuerverzinkung

Die Stahlteile wurden, wie in Tabelle 1 dargestellt, feuerverzinkt; der Verzinkungsvorgang wurde überwacht, er entsprach dem üblichen Ablauf in der Zinkerei.

Tabelle 1 Verzinkungsprotokoll

Bad Nr.	Zeit [min]	Temperatur [°C]	Aufgabe	Zusammensetzung
1	20	40	Entfettung	52,8 g/l Ritter Chemie Separator-Entfetter
2	120	20	Beizen	131,4 g/l HCl / 55,2 g/l Fe / 1,7 g/l Zn
3			Spülen	Spülwasser
4			Spülen	
5	5		"Fluxen"	Rezept nach Preußag
6	10		Trocknen	an der Luft
7	20	150	Trocknen	
8	5-7	440	Verzinkungsbad	98,270 Zn / 0,019 Fe / 0,010 Al / 0,048 Cu / 0,530 Sn / 1,070 Pb
9			Abkühlen	an der Luft

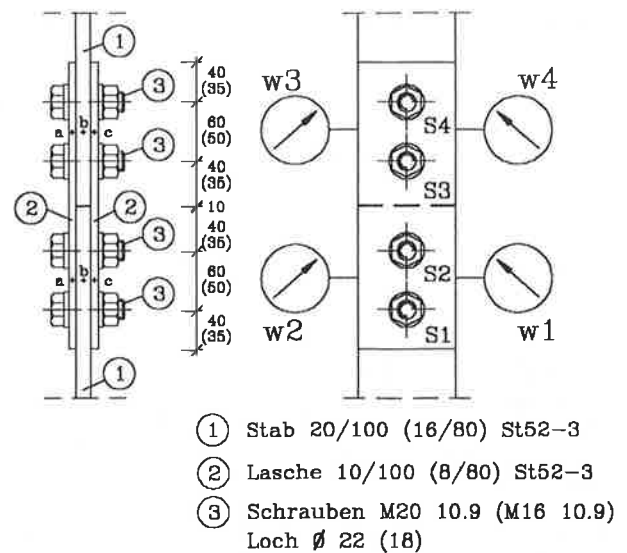


Bild 1 Versuchskörper für Schrauben M 20 (M 16 in Klammern); Maße in mm

2.1.2 Schutz eines M4-Innengewindes

Für die Anbringung der Wegaufnehmer wurden an den Prüfkörpern M4-Innengewinde angebracht, die während des Verzinkungsvorganges zuverlässig zu schützen waren, damit die Gewindelöcher nach dem Verzinken ohne Nachschneiden benutzt werden konnten. Hierfür wurde ein Vorversuch unternommen, bei dem in einem Probekörper 8 verschiedene Varianten zum Schützen des Gewindes untersucht wurden. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 zusammengefaßt. Es wurde das in Zeile 8 beschriebene Verfahren angewendet.

2.2 Schrauben

Für die Bestimmung der Schraubenkraft wurde in jede Schraube im oberen Schaftbereich (ca. 9 mm unter Unterkante Schraubenkopf) ein spezieller, 12 mm langer Dehnungsmeßstreifen (DMS) implantiert und anschließend im Ofen 3 Stunden bei 140 °C ausgehärtet, um eine Dauerstandfestigkeit dieser DMS-Implantation zu erhalten. Auf dem Schraubenkopf wurden zwei Lötstützpunkte zum Anschluß der Leitungen angebracht und der ganze Bereich mit einer Aluminiumhülse als Zugentlastung und Schutzkappe verschlossen. Diese Schrauben wurden zu 10 Stück mit einer Temperaturkompensationsschraube, die genau gleich aufgebaut war, in Sechselektrotechnik zusammengeschaltet und mit einer Meßanlage verbunden. Anschließend wurden die Schrauben in einer Universal-Prüfmaschine in drei Durchgängen mit steigender Last kalibriert.

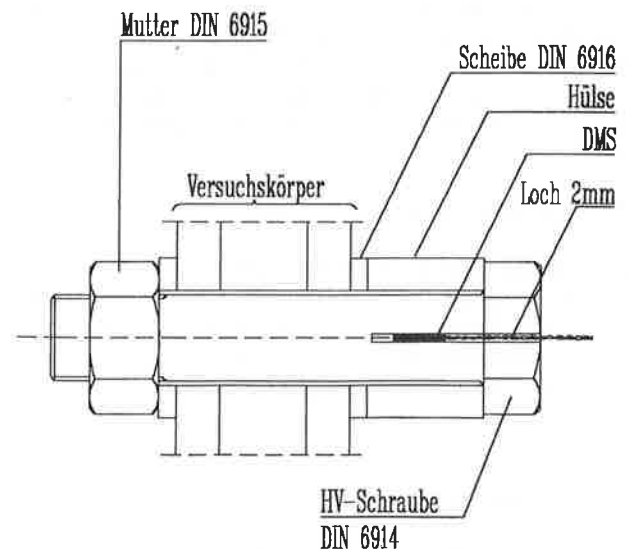


Bild 2 Schraube mit Dehnungsmeßstreifen

zwei nach DIN 6914 vorgesehenen Unterlegscheiben und einer gehärteten und planparallel geschliffenen Distanzhülse eingebaut (Bild 2). Die Lage der Hülse und des DMS waren so gewählt, daß der DMS außerhalb des Scher- und Lochleibungsbereiches einer Gleitfläche lag, um Verfälschungen der Schraubenkraftmessung durch eine eventuelle Scherbeanspruchung der Schraube auszuschließen. Diese Anordnung

In der Laschenverbindung wurden die Schrauben jeweils mit

Tabelle 2

Schutz eines M 4 Innengewindes beim Feuerverzinken

	Schutzart	Einbau	Entfernen	Zinkschicht	Gewinde	Empfehlung
1	Holzstopfen	leicht	leicht	um das Loch und in Abtropfrichtung stark beschädigt	gut	eingeschränkt
2	Auspuffdichtmasse	mühsam	leicht	gut	muß nachgeschnitten werden	eingeschränkt
3	Graphit-Stopfen ¹⁾	leicht	etwas mühsam	0,5 mm um das Loch beschädigt	gut	mit richtigem Typ
4	Schraube M4 DIN 84	leicht	2 von 4 Schrauben abgedreht	gut	gut	keine
5	Schraube M4 Güte 8.8	leicht	1 von 4 Schrauben abgedreht	gut	gut	keine
6 7	Kupferpaste oder Schraubensicherung	etwas mühsam	leicht	2 mm um das Loch und z.T. flächig beschädigt	gut	eingeschränkt
8	Schraube mit Teflonfolie umwickelt	etwas mühsam	leicht	0,5 - 1 mm um das Loch herum beschädigt	gut	ja

¹⁾ Hersteller Name: "Zink-Ex" der Firma Mate Maschinenteile, Isernhagen; der verwendete Typ war nicht für Sacklöcher vorgesehen

hat sich in Vorversuchen als erforderlich erwiesen. Um den normalen Einbaubedingungen einer GV-Verbindung nahezukommen, wurde die kopfseitige Unterlegscheibe zwischen Distanzhülse und Bauteiloberfläche eingebaut. Eine gehärtete Hülse wurde als Distanzstück gewählt, um durch möglichst wenig Fugen eine starre Kraftübertragung zu erhalten, denn jede Fuge verringerte die Steifigkeit des Klemmpaketes, bestehend aus dem Versuchskörper, Unterlegscheiben und Hülse und führte zu einem weiteren Schraubenkraftabfall.

2.3 Verschiebungswegmessung

Für die Wegmessung bei den Versuchen in der Prüfmaschine wurden induktive Wegaufnehmer (W 10) der Firma Hottinger mit einer Auflösung von 1/1000 mm eingesetzt. Für die Dauerstandversuche in den Dauerstandrahmen wurden mechanische Meßuhren mit einer Genauigkeit von 1/100 mm eingesetzt.

2.4 Meßanlage

Zur Messung der Schraubenkräfte, der Verschiebungen und der Maschinenlast wurden 2 Vielstellenmeßanlagen (UPH 3200 und UPM 100) der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt eingesetzt. Die Meßanlagen wurden jeweils vom PC aus gesteuert.

2.5 Prüfmaschine

Die statisch zügigen Versuche und ein Teil der Dauerstandversuche wurden in einer servo-hydraulisch gesteuerten Prüfmaschine der Firma Instron International Limited, Offen-

bach/ Main, Typ 8503, durchgeführt.

2.6 Dauerstandrahmen

Für die Dauerstandversuche wurden vier Rahmen gefertigt, in denen jeweils 5 Doppellaschenzugsscherverbindungen hintereinander eingebaut werden konnten (Bild 3). In jeden Rahmen wurden zur Speicherung der Last 30 Tellerfedern 200 x 102 x 14 mit $l_0 = 18,2$ mm eingebaut, um bei einem Gleiten einer der fünf Proben nur einen möglichst geringen Kraftabfall zu erhalten. Die Belastung wurde mit einem abnehmbaren Hydraulikzylinder aufgebracht und mit einer M 30 - Gewindestange, die mit einer DMS-Vollbrücke versehen war, gemessen. Die M 30 - Gewindestangen wurden genauso wie die Schrauben kalibriert.

2.7 Versuchsbezeichnung

Die Versuche wurden nach folgendem System gekennzeichnet:

- Bezeichnung für die Versuchsserie:
I: Versuchsserie I "statisch zügiger Versuch"
II: Versuchsserie II "kurzer Dauerstandversuch"
III: Versuchsserie III "Dauerstandversuch"
IV: Versuchsserie IV "Dauerschwingversuch"
- Kennziffer für den Ausnutzungsgrad bei der Versuchsserie II, z.B. 7 für 70 % Ausnutzung
- Beschreibung der verwendeten Schrauben:
M 16: Schrauben HV M 16 nach DIN 6914
M 20: Schrauben HV M 20 nach DIN 6914

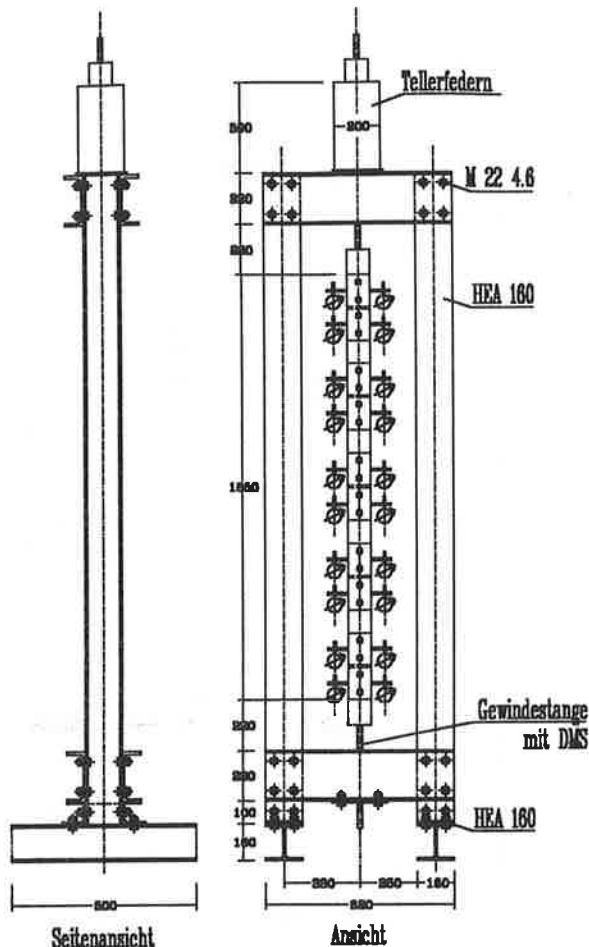


Bild 3 Dauerstandrahmen

- d) Kennbuchstabe für Oberflächenbehandlung:
 F für feuerverzinkt
 S für feuerverzinkt und gesweept
 B für feuerverzinkt und beschichtet
- e) fortlaufende Numerierung
- f) Kennzeichen für die Versuchskörperhälfte:
 a untere Hälfte (Weg 1 und 2)
 b obere Hälfte (Weg 3 und 4)

Beispielhaft wird hier die Versuchsbezeichnung IM20S1a aufgezeigt:

Versuchsserie I, mit Schrauben HV M 20,
 gesweepte Oberfläche, Versuch Nr. 1,
 untere Hälfte.

3 Versuchsserie I

3.1 Beschreibung

In der Versuchsserie I wurden die Reibbeiwerte im statisch zügigen Versuch in der kraftgesteuerten Prüfmaschine mit einer Lastzunahme von 1 kN/sec. ermittelt. Alle 3 sec. wurden die Zugkraft, die Vorspannkraft in jeder Schraube und die Gleitwege je Probenhälfte gemessen.

Beispielhaft ist im Bild 4 der Ablauf eines Versuches dargestellt. Der Versuchskörper ist montiert, die Schrauben sind

mit ca. 5 % über der Nennvorspannkraft möglichst gleichmäßig vorgespannt, und es wurde ca. eine halbe Stunde gewartet, um durch den anfänglich Schraubenvorspannkraft-

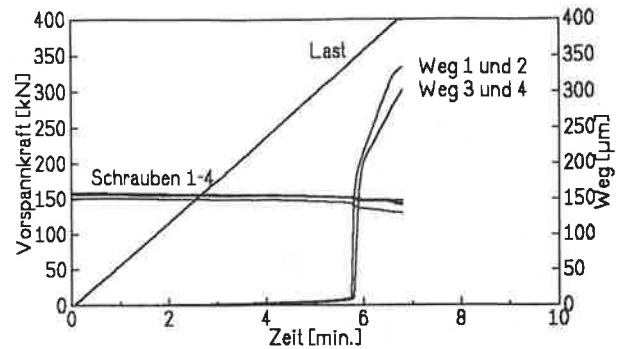


Bild 4 Zeitlicher Ablauf eines statisch zügigen Versuches

abfall den Versuch nicht zu sehr zu beeinflussen. In dem Diagramm mit der Darstellung der Zeit auf der Abszisse und der Kraft auf der linken Ordinate bzw. Weg auf der rechten Ordinate sind 3 verschiedene gemessene Größen dargestellt:

1. Gut zu erkennen ist der zeitgesteuerte kontinuierliche Kraftanstieg der Prüfmaschine.
2. Gleichzeitig tritt ein Schraubenkraftabfall auf, verursacht durch die sich infolge der Querdehnung verringende Klemmpaketdicke.
3. Es ist der Zeit-Verschiebungsweg dargestellt. Nach einer Zeit von ca. 5,5 Minuten, was einer bestimmten Lasthöhe entspricht, tritt Gleiten ein. Im Moment des Gleitens erfolgt ein Schraubenkraftabfall, bedingt durch das Setzen der Kontaktflächen. Die Verbindung rutscht dann ohne weitere nennenswerte Laststeigerung durch, bis die Schrauben an der Lochwandung anliegen und SL-Wirkung hinzutritt.

Aus den Meßergebnissen wird dann der Reibschluß R errechnet. Als Reibschluß wird das Verhältnis der jeweiligen äußeren Zugkraft zur aktuellen Schraubenvorspannkraft je Kontaktfläche verstanden mit

$$R = Z / (2 * (S1 + S2)); \quad (1)$$

wobei Z die Zugbelastung des Versuchskörpers und $S1 + S2$ die Vorspannkraft der Schrauben der untersuchten Probenhälfte sind. Sofern kein eindeutiger Reibbeiwert bestimmt werden kann, wird der bei einem bestimmten Weg von $w = 0,15$ mm vorhandene Reibschluß R nach [10] als Reibbeiwert μ bezeichnet.

3.2 Versuchsdarstellung

In einer anderen Darstellung des Versuchsergebnisses (Bild 5) wird auf der Abszisse der Verschiebungsweg und auf der Ordinate der Reibschluß aufgetragen. Dargestellt sind die Reibschluß-Verschiebungs-Kurven (ähnlich den Last-Verschiebungs-Kurven) der beiden Prüfkörperhälften. Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß kein eindeutiger Reibbeiwert aus schlagartigem Auftreten des Gleitens (wie bei gestrahlten Prüfkörpern) bestimmt werden kann, sondern daß

das Gleiten weicher erfolgt. Hier wird dann der bei 0,150 mm gemessene Reibschluß als Reibbeiwert μ angegeben. Das

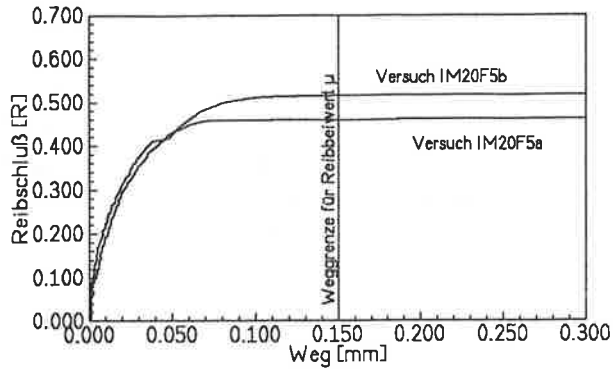


Bild 5 R-w Diagramm vom Versuch IM20F5 mit feuerverzinkten Kontaktflächen

Bild 5 zeigt beispielhaft einen Versuch mit nur feuerverzinkten Kontaktflächen, während in [Bild 6](#) beispielhaft ein Versuch mit feuerverzinkten und gesweepen und in [Bild 7](#) mit feuerverzinkten und beschichteten Kontaktflächen dargestellt sind.

3.3 Versuchsergebnisse

Die aus den Versuchen ermittelten Reibbeiwerte sind in

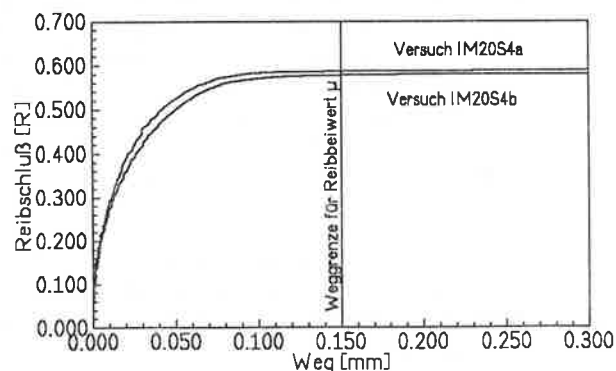


Bild 6 R-w Diagramm vom Versuch IM20S4 mit feuerverzinkten und gesweepen Kontaktflächen

[Tabelle 3](#) dargestellt. Hierbei sind die Reibbeiwerte bezogen auf die aktuelle Schraubkraft. Die Reibbeiwerte wurden für jede Probenhälfte ermittelt; mit dem Index 1 wurde diejenige Probenhälfte gekennzeichnet, die zuerst versagt hat, d.h. bei der der Gleitvorgang zuerst eintrat. Sind beide Probenhälften gleichzeitig gegliitten, so wurde diejenige Probenhälfte, die bei gleicher Zeit den größeren Weg zurücklegte, mit dem Index 2 versehen. Hierdurch konnte untersucht werden, ob bei dieser Versuchskörperform eine gegenseitige Beeinflussung der Probenhälften besteht, die folgendermaßen möglich ist: Beim Versagen und Durchrutschen einer Probenhälfte kann eine schlagartige Beanspruchung entstehen, die bei der anderen, noch nicht gegliittenen, aber fast bis zur Grenztragfähigkeit belasteten Probenhälfte ein vorzeitiges Versagen auslösen kann. Die Auswertung nur der zuerst gegliittenen bzw. mit dem größeren Weg gegliittenen Probenhälften, also

Tabelle 3 Reibbeiwerte der Versuchsserie I

		f-zink	sweep	besch.
M16	1a	0,5189 ¹	0,5535 ¹	0,5584 ¹
	1b	0,4992	0,5717	0,6515
	2a	0,5297	0,5345	0,6453
	2b	0,4673 ¹	0,5307 ²	0,6312 ¹
	3a	0,3585 ²	0,5048 ¹	0,6093
	3b	0,3650	0,5083	0,5786 ¹
	4a	0,4775	0,5945	0,6595
	4b	0,4043 ¹	0,5792 ¹	0,6712 ²
	5a	0,4594	0,5739	0,6703 ¹
	5b	0,4726 ¹	0,5635 ¹	0,7131
M20	1a	0,4698 ²	0,5761 ¹	0,6341
	1b	0,4509	0,5686	0,6106 ¹
	2a		0,5573	0,6192
	2b		0,5441 ²	0,5780 ¹
	3a	0,4529 ¹	0,5725	0,6039 ¹
	3b	0,4389	0,5653 ¹	0,6083
	4a	0,4845	0,5869 ¹	0,5655 ¹
	4b	0,4655 ²	0,5776	0,5969
	5a	0,4594	0,5559 ¹	0,6031 ¹
	5b	0,5169	0,5984	0,6207
M16	Mittelw.	0,4552	0,5515	0,6388
	Min.	0,3585	0,5048	0,5584
	Max.	0,5297	0,5945	0,7131
	St-abw.	0,0602	0,0306	0,0462
	Vkoe[%]	13,2176	5,5540	7,2320
	$\mu(5\%)$	0,3563	0,5011	0,5628
M20	Mittelw.	0,4674	0,5703	0,6040
	Min.	0,4389	0,5441	0,5655
	Max.	0,5169	0,5984	0,6341
	St-abw.	0,0242	0,0158	0,0202
	Vkoe[%]	5,1853	2,7711	3,3511
	$\mu(5\%)$	0,4275	0,5443	0,5707
zus.	Mittelw.	0,4606	0,5609	0,6214
	Min.	0,3585	0,5048	0,5584
	Max.	0,5297	0,5984	0,7131
	St-abw.	0,0469	0,0256	0,0390
	Vkoe[%]	10,1757	4,5658	6,2821
	$\mu(5\%)$	0,3835	0,5187	0,5572
Index: 1: Zuerst versagende Probenhälfte 2: Bei gleichzeitig versagenden Probenhälften die mit dem größeren Weg				

der mit dem Index 1 oder 2, ist in [Tabelle 4](#) enthalten.

In den Tabellen sind für die Reibbeiwerte die einzelnen Versuche je nach Oberflächenbehandlungen F, S oder B, eine statistische Auswertung getrennt nach den Schraubendurchmessern M 16 und M 20 und eine Auswertung für beide Durchmesser gemeinsam angegeben. Hierzu sind der Mittelwert, der minimale und maximale Reibbeiwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient angegeben. Ferner wurde die 5 % Fraktile unter Zugrundelegung einer Normalverteilung ermittelt. Obwohl eine Normal-Verteilung nicht die richtige Verteilungsfunktion ist, da sie auch negative Reibbeiwerte zuläßt, wurde sie gewählt, weil ihre Verwendung im Bauwesen allgemein üblich ist und weil die Abweichung gegenüber einer Lognormal-Verteilung (die keine negativen Werte zuläßt) gering ist. Dieses wurde in einer gesonderten Untersuchung festgestellt. Der Versuch IM20F2 wurde we-

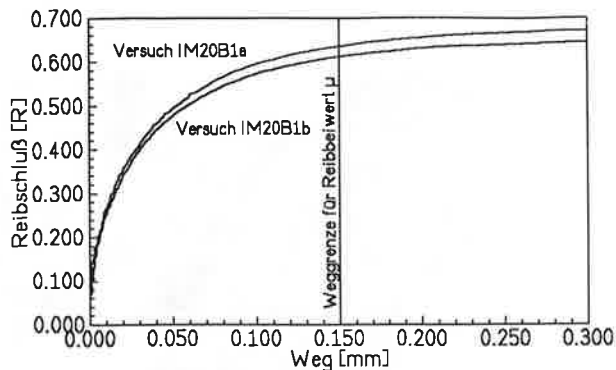


Bild 7 R-w Diagramm vom Versuch IM20B1 mit feuerverzinkter und beschichteter Oberfläche

gen eines Maschinenfehlers vorzeitig abgebrochen und kann zur Auswertung nicht herangezogen werden.

Tabelle 4 Reibbeiwerte der Versuchsserie I bei Auswertung nur einer Probenhälfte

		f-zink	sweep	besch.
M16	Mittelw.	0,4443	0,5463	0,6219
	Min.	0,3585	0,5048	0,5584
	Max.	0,5189	0,5792	0,6712
	St-abw.	0,0630	0,0291	0,0519
	Vkoe[%]	14,1703	5,3330	8,3418
	x(5%)	0,3407	0,4984	0,5366
M20	Mittelw.	0,4619	0,5657	0,5922
	Min.	0,4529	0,5441	0,5655
	Max.	0,4698	0,5869	0,6106
	St-abw.	0,0074	0,0167	0,0194
	Vkoe[%]	1,5940	2,9586	3,2795
	x(5%)	0,4498	0,5381	0,5603
zus.	Mittelw.	0,4521	0,5560	0,6071
	Min.	0,3585	0,5048	0,5584
	Max.	0,5189	0,5869	0,6712
	St-abw.	0,0457	0,0246	0,0401
	Vkoe[%]	10,1071	4,4256	6,6080
	x(5%)	0,3770	0,5155	0,5411

3.4 Kommentar zu den Ergebnissen der Serie I

Beim Vergleich der hier ermittelten Reibbeiwerte mit solchen aus anderen Forschungsprojekten muß unbedingt beachtet werden, daß hier die Reibbeiwerte, bezogen auf die aktuelle Schraubenkraft direkt vor dem Gleiten, errechnet wurden und nicht, wie sonst üblich, bezogen auf die Schraubenkraft zu Versuchsbeginn. Durch die oben beschriebene Technik zum Messen der Schraubenkräfte konnten hier die tatsächlichen Reibbeiwerte ermittelt werden, die jedoch, da die Schraubenvorspannkraft kontinuierlich abfällt, höher ausfallen als bei Bezug auf die Anfangsschraubenkraft. Um einen Bezug zu bisherigen Versuchen und für die Praxis handhabbare Werte zu erhalten, wird in parallelen Versuchen der Abfall der Vorspannkraft untersucht.

Die gegenseitige Beeinflussung beider Probenhälften beim

Versagen ist gering: Die Abweichung der aus den Schrauben M 16 und M 20 zusammengefaßten Reibbeiwerte aus Tabelle 4 (nur eine Probenhälfte ausgewertet) gegenüber denen aus Tabelle 3 (beide Probenhälften ausgewertet) beträgt bei der 5 % Fraktile 1.7 %, 0.6 % und 3.0 % für die Oberflächenzustände feuerverzinkt, gesweep und beschichtet. Es scheint somit vertretbar, für die weiteren Auswertungen beide Probenhälften heranzuziehen.

Auffällig bei den ermittelten Reibbeiwerten aus den statisch zügigen Versuchen sind die sehr hohen Werte für die feuerverzinkten Oberflächen mit 0.455, 0.467 und 0.461 für den Schraubendurchmesser M 16, M 20 und M 16 + M 20 (Mittelwerte). Jedoch streuen diese Werte sehr stark, der Variationskoeffizient beträgt 13.22 %, 5.19 % und 10.17 %. Dies entspricht auch den bisherigen Erfahrungen, wonach für gleitfeste feuerverzinkte Verbindungen Reibbeiwerte von 0.1 bis 0.45 ermittelt wurden [4]. Betrachtet man nur die 5 % Fraktile, so betragen die Reibbeiwerte 0.356, 0.428 bzw. 0.384 was immer noch relativ hoch im Vergleich zu bisher ermittelten Werten ist. Hierfür gibt es folgende Erklärung: Für die Probenkörper wurde die Stahlsorte St 53-3 gewählt, bei der sich infolge des hohen Siliziumgehaltes keine Reinzinkschicht, sondern nur eine durchwachsene harte Eisen-Zinklegierung an der Oberfläche ausbildet. Der Reibbeiwert dieser grau-stumpfen Eisen-Zinklegierung ist höher als der einer typisch silbrigen Reinzinkschicht. Weiterhin zeigen die verzinkten Proben ein sehr schnelles Durchrutschen, d.h. wenn die Reibung von der Haftreibung in die Gleitreibung übergegangen ist, ist keine Reibbeiwertzunahme der Gleitfläche erkennbar. Die Verbindung rutscht durch, ohne daß die Last während des Gleitens noch gesteigert werden kann.

Bei den gesweepten Proben war eine deutliche Erhöhung der ermittelten Reibbeiwerte mit 0.552, 0.570 bzw. 0.561 für M 16, M 20 bzw. M 16 + M 20 erkennbar (Mittelwert aus den Versuchsergebnissen). Auch ist hier die Streuung der Versuchsergebnisse wesentlich geringer, der Variationskoeffizient liegt mit 5.55 %, 2.77 % bzw. 4.57 % deutlich unter den Werten der verzinkten Verbindungen. Hieraus ergibt sich auch eine wesentliche Verbesserung der 5 % Fraktilenwerte, die mit 0.501, 0.544 bzw. 0.519 im Bereich der für GV-Verbindungen üblichen Werte liegen.

Die höchsten Reibbeiwerte wurden an mit Alkali-Silikat-Zinkstaub-Beschichtung versehenen gleitfesten Verbindungen ermittelt. Die Mittelwerte der Reibbeiwerte aus den Versuchen lagen bei 0.639, 0.604 bzw. 0.621; wieder für M 16, M 20 bzw. M 16 + M 20. Die Streuung der Versuchsergebnisse liegt mit einem Variationskoeffizienten von 7.23 %, 3.35 % bzw. 6.28 % höher als bei den gesweepten Verbindungen, ist aber immer noch unter 8 % und somit nach [10] akzeptabel. Der 5 % Fraktilenwert beträgt 0.566, 0.571 bzw. 0.557. Für die beschichteten gleitfesten Verbindungen ergaben sich die höchsten Reibbeiwerte mit einer deutlich erkennbaren "Zähigkeit" der Verbindung. Auch beim Durchrutschen der Gleitflächen ist eine, wenn auch nur geringe, Laststeigerung während des Gleitens möglich; die Verbindung versucht gewissermaßen, sich dem Gleiten zu "widersetzen".

4 Versuchsserie II und III: Dauerstandversuche

4.1 Versuchsprogramm

Ziel der Versuchsserie II und III war die Bestimmung derjenigen Ausnutzung, bei der eine Dauerstandlast gerade noch ertragen werden kann. Die Serie II sollte benutzt werden, um die für Dauerstandlast kritische Ausnutzung zu erlasten, wofür Ausnutzungsgrade von 50, 70 und 90 % von der statisch zügig ermittelten Tragfähigkeit gewählt wurden. In der Serie III sollten die kritischen Ausnutzungsgrade näher untersucht werden. Ein Teil der Versuche (die dreijährigen Dauerstandversuche) wird, bedingt durch den großen Aufwand bei der Einrichtung und Durchführung, unabhängig vom Abschluß des Forschungsvorhabens fortgesetzt. Hierüber muß später berichtet werden.

4.2 Allgemeines zu den Dauerstandversuchen

Die in diesem Teil beschriebenen Versuche wurden zum kleineren Teil in der servohydraulischen Prüfmaschine (Bild 8) und zum größten Teil in den beschriebenen Dauerstandprüfrahmen (Bild 9) durchgeführt. Der Belastungsvorgang im Dauerstandrahmen dauerte ca. eine halbe Stunde. Anschließend wurden sofort und weiter in kurzen Zeitabständen die Kräfte mit einer Vielstellenmeßanlage und die Verschiebungswege mit den angebrachten mechanischen Meßuhren gemessen und aufgezeichnet. Diese Messungen wurden dann in immer längeren Intervallen wiederholt, bis nach

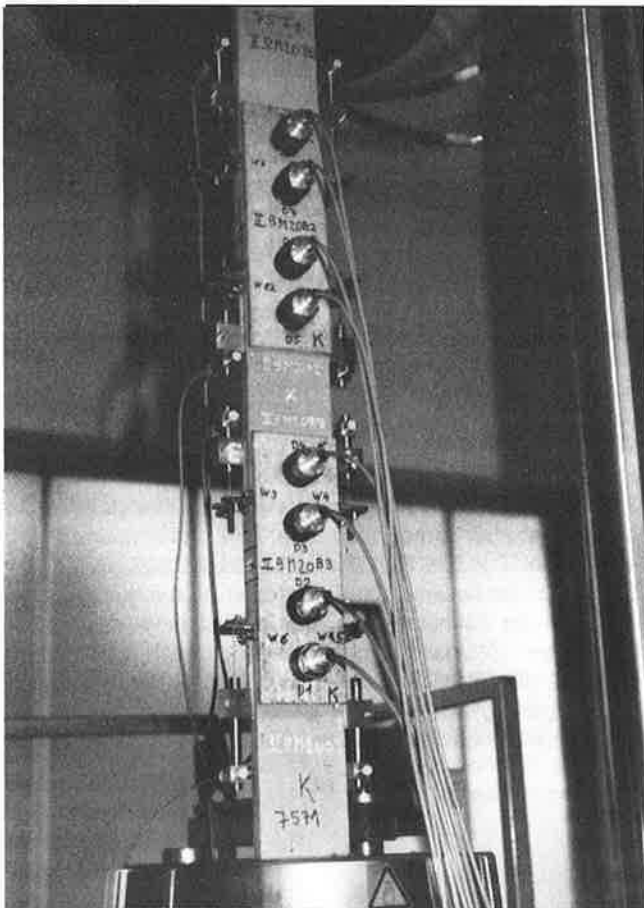


Bild 8 Zwei Versuchskörper in der Prüfmaschine

ungefähr einem Monat ein Meßzyklus von ca. einem Monat beibehalten wurde.

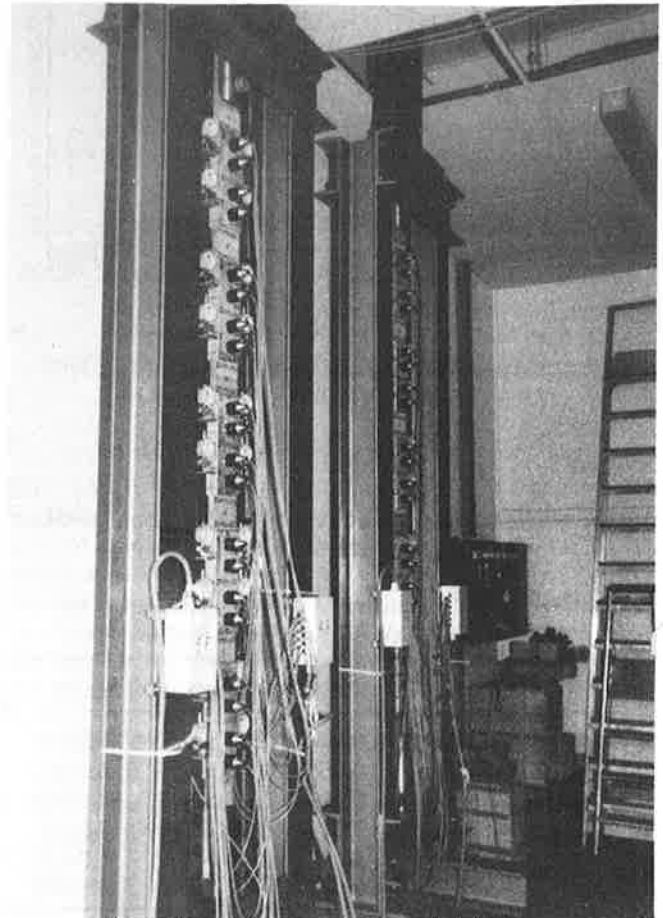


Bild 9 Dauerstandrahmen mit Versuchskörpern

Zur Darstellung der Zeit-Verschiebungs-Verläufe der Versuche der Serie II und III wurden die Zeit in einem einfach logarithmischen Maßstab auf der Abszisse und der für jede Probenhälfte gemittelte Verschiebungsweg und Reibschluß (bezogen auf die aktuelle Schraubenkraft) auf der Ordinate aufgetragen. Da die Versuche in der Regel ein linear-logarithmisches Verhalten zeigten, konnte der zukünftige Verschiebungswegverlauf durch eine Regressionsrechnung extrapoliert werden, was mit Hilfe eines vom Arbeitsbereich erstellten Programmes durchgeführt wurde. Für die einheitliche und übersichtliche Darstellung wurden folgende Definitionen getroffen:

4.2.1 Belastungsbeginn

Der Belastungsbeginn wurde auf den Zeitpunkt 0.876 Stunden (= 0,0001 Jahre) gelegt.

4.2.2 Ausnutzungsgrad

Ein wichtiges Kennzeichen für die Beanspruchung der Verbindung ist der prozentuale Anteil der Ausnutzung der in Tabelle 3 aufgezeigten statisch zügig ermittelten Reibbeiwerte, kurz Ausnutzungsgrad genannt. Würde man den jeweiligen statisch zügigen Reibbeiwert zu 100 % ausnutzen, würde die Probe sofort versagen, weil keine Reserven mehr vorhanden sind. Der Ausnutzungsgrad wird auf den 5 % Fraktilwert ($\mu_{5\%}$) der statisch zügig bestimmten Reibbeiwerte bezogen. Der Ausnutzungsgrad λ ergibt sich somit zu

$$\lambda = \frac{R}{\mu_{5\%}} \cdot 100 \quad (2)$$

mit R als den aktuellen Reibschluß. Es war angestrebt, den Ausnutzungsgrad über die Versuchsdauer möglichst konstant zu halten. Die wurde gut erreicht, da sich der Abfall der Schraubenvorspannkraft und der Lastabfall in den Dauerstandrahmen ungefähr ausglich. Insgesamt fielen die Schraubenvorspannkraft etwas stärker ab, so daß der Ausnutzungsgrad langsam anstieg. Dieses bedeutet ein "ungünstiges" Verhalten der Proben, die Ergebnisse liegen bezüglich dieses Einflusses auf der konservativen Seite, da die Ausnutzung im Verhältnis zu den in den Rechnungen eingesetzten Werten kontinuierlich anstieg.

Als Referenz des Ausnutzungsgrades für die Auswertung wurde der Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt 8,76 Stunden (= 0,001 Jahre) gewählt, einem Zeitpunkt, bei dem der anfänglich größere Schraubenvorspannkraftabfall abgeklungen ist und sich der ganze Versuchsaufbau gesetzt hat.

4.2.3 Regressionsbeginn

Der Regressionsbeginn wurde auch mit 8,76 Stunden nach Belastungsbeginn gewählt, um ebenfalls nur den Bereich der konstanten Verschiebungswegzunahme zu verwenden.

4.2.4 Regressionsende

Regressionsende war immer die letzte Messung mit Ausnahme derjenigen Versuche, bei welchen frühzeitig ein Kriechversagen (= Durchgleiten bis zur Anlage der Schraubenschäfte an den Lochwandungen) auftrat. Hier wurden der linear-logarithmische Teil der Verschiebungswegkurve geschätzt und auch dafür die Parameter bestimmt.

Zusammengefaßt wurden für die Auswertung folgende Zeitpunkte eingesetzt:

Tabelle 5 Definition der Zeitpunkte

Zeitpunkt		Ereignis
[h]	[Jahre]	
0,876	0,0001	Belastung der Proben
8,760	0,0010	Bestimmen des Ausnutzungsgrades
8,760	0,0010	Beginn der Regression

4.3 Versuchsserie II

4.3.1 Ziel der Serie II

Die Prüfkörper der Serie II sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengestellt. Zur Bestimmung desjenigen Ausnutzungsgrades, bei dem ein Kriechgleiten gerade noch nicht eintritt, wurden die in der Serie I (statisch zügig) ermittelten Reibbeiwerte (Basis-Reibbeiwerte sind die 5%-Fraktilewerte der gemessenen statisch zügigen Reibbeiwerte) in unterschiedlicher Höhe ausgenutzt, wobei als Ausnutzungsgrade ungefähr Werte von 90 %, 70 % und 50 % angestrebt wurden.

Tabelle 6

Versuchskörper der Serie II und III mit feuerverzinkten und gesweepeten Kontaktflächen.

	Versuch	R [-]	Ausn. λ [%]	Beginn	Dauer [Tage]	Gerät	Reibbeiw μ	GB
1	II5M20S1a	0.294	56.7	15.08.90	989.00	Stand 3	!	
2	II5M20S1b	0.291	56.1	15.08.90	989.00	Stand 3	!	
3	II5M20S2a	0.272	52.4	15.08.90	989.00	Stand 3	!	
4	II5M20S2b	0.270	52.1	15.08.90	989.00	Stand 3	!	
5	II5M20S3a	0.238	45.9	15.08.90	989.00	Stand 3	!	
6	II5M20S3b	0.241	46.5	15.08.90	989.00	Stand 3	!	
7	II7M20S1a	0.363	70.0	24.07.90	13.91	Instron	0.6755	
8	II7M20S1b	0.363	70.0	24.07.90	13.91	Instron	0.7034	
9	II7M20S2a	0.326	62.8	08.10.90	935.00	Stand 4	!	
10	II7M20S2b	0.329	63.4	08.10.90	935.00	Stand 4	!	
11	II7M20S3a	0.370	71.3	08.10.90	935.00	Stand 4	!	
12	II7M20S3b	0.373	71.9	08.10.90	935.00	Stand 4	!	
13	III80S1a	0.436	84.1	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6629	
14	III80S1b	0.437	84.2	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6896	
15	III78S2a	0.420	81.0	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6833	
16	III78S2b	0.420	81.0	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6783	
17	III76S3a	0.409	78.9	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6442	
18	III76S3b	0.409	78.9	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6870	
19	III74S4a	0.401	77.3	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6347	
20	III74S4b	0.400	77.1	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6173	
21	III71S5a	0.386	74.4	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6930	
22	III71S5b	0.384	74.0	23.05.91	403.80	Stand 1	0.6861	
23	II9M20S1a	0.445	85.8	05.06.90	0.06	Instron	0.4474	*
24	II9M20S1b	0.449	86.6	05.06.90	0.11	Instron	0.4562	*
25	II9M20S2a	0.469	90.4	23.07.90	0.18	Instron	0.4760	*
26	II9M20S2b	0.474	91.4	23.07.90	0.23	Instron	0.4814	*
27	II9M20S3a	0.468	90.2	24.07.90	0.10	Instron	0.4716	*
28	II9M20S3b	0.475	91.6	24.07.90	0.09	Instron	0.4914	*
Ausnutzung bezogen auf einen Reibbeiwert von μ= 0.5187								
Ausnutzung zum Zeitpunkt t = 8,76 h								
GB = Gleitbruch								
Standzeiten der noch laufenden Versuche am 30.04.93								

Die obengenannten Ausnutzungsgrade erbrachten im kurzen Dauerstandversuch nicht den gewünschten Grenzwert des Ausnutzungsgrades, bei welchem die Grenzverschiebung von 0,3 mm auf 50 Jahre extrapoliert noch sichergestellt ist. Daher wurden Prüfkörper der späteren Serie III mit zwischengeschalteten Ausnutzungsgraden zum Versuch gebracht und Prüfkörper der Serie II dafür dem Dauerstandprogramm mit Langzeiteinwirkung zugeschlagen.

4.3.2 Gemessene Zeit-Verschiebungsweg-Kurven der Serie II

Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich schnell, daß schon die Proben der Serie II erhebliche Zeit in Anspruch nahmen und die Prüfmaschine über Monate blockieren würden. Deswegen kamen diese Proben, immer 5 Stück in einem Strang, in dem Dauerstandrahmen zum Versuch (Bild 9). Die unterschiedlichen Ausnutzungsgrade mußten hierbei durch unterschiedlich hohes Vorspannen der Schrauben erreicht werden, da ja zwangsläufig die Zugkraft für

alle 5 hintereinanderhängenden Verbindungen in einem Dauerstandrahmen gleich ist.

Tabelle 7 Versuchskörper der Serie II und III mit feuerverzinkten und beschichteten Kontaktfächen

Versuch	R	Ausn.	Beginn	Dauer	Gerät	Reibbeiw	GB
	[-]	λ [%]		[Tage]		μ	
1	II5M20B1a	0.277	49.7	16.03.90	234.00	Stand 1	0.7103
2	II5M20B1b	0.278	49.9	16.03.90	234.00	Stand 1	0.7019
3	II5M20B2a	0.297	53.3	15.08.90	989.00	Stand 3	!
4	II5M20B2b	0.298	53.5	15.08.90	989.00	Stand 3	!
5	II5M20B3a	0.320	57.4	15.08.90	989.00	Stand 3	!
6	II5M20B3b	0.318	57.1	15.08.90	989.00	Stand 3	!
7	II5M20B4a	0.228	40.9	28.09.90	7.88	Instron	0.6051
8	II5M20B4b	0.229	41.1	28.09.90	7.88	Instron	0.6132
9	II5M20B5a	0.214	38.4	28.09.90	7.88	Instron	0.6020
10	II5M20B5b	0.215	38.6	28.09.90	7.88	Instron	0.5840
11	II7M20B1a	0.393	70.5	08.10.90	935.00	Stand 4	!
12	II7M20B1b	0.394	70.7	08.10.90	935.00	Stand 4	!
13	II7M20B2a	0.370	66.4	08.10.90	935.00	Stand 4	!
14	II7M20B2b	0.367	65.9	08.10.90	935.00	Stand 4	!
15	II7M20B3a	0.341	61.2	08.10.90	935.00	Stand 4	!
16	II7M20B3b	0.345	61.9	08.10.90	935.00	Stand 4	!
17	III74B1a	0.440	79.0	02.10.91	369.90	Stand 2	0.7435
18	III74B1b	0.440	79.0	02.10.91	369.90	Stand 2	0.7387
19	III72B2a	0.424	76.1	02.10.91	369.90	Stand 2	0.7074
20	III72B2b	0.424	76.1	02.10.91	369.90	Stand 2	0.6863
21	III70B3a	0.414	74.3	02.10.91	369.90	Stand 2	0.6914
22	III70B3b	0.412	73.9	02.10.91	369.90	Stand 2	0.6837
23	III68B4a	0.401	72.0	02.10.91	369.90	Stand 2	0.5945
24	III68B4b	0.401	72.0	02.10.91	369.90	Stand 2	0.6676
25	III66B5a	0.385	69.1	02.10.91	369.90	Stand 2	0.6548
26	III66B5b	0.386	69.3	02.10.91	369.90	Stand 2	0.6564
27	II9M20B1a	0.490	87.9	04.07.90	3.64	Instron	0.5003
28	II9M20B1b	0.500	89.7	04.07.90	1.06	Instron	0.5076
29	II9M20B2a	0.436	78.2	07.09.90	11.93	Instron	0.6993
30	II9M20B2b	0.439	78.8	07.09.90	11.93	Instron	0.6976
31	II9M20B3a	0.473	84.9	07.09.90	11.93	Instron	0.4761
32	II9M20B3b	0.472	84.7	07.09.90	11.93	Instron	0.8301
Ausnutzung bezogen auf einen Reibbeiwert von $\mu = 0.5572$							
Ausnutzung zum Zeitpunkt $t = 8,76$ h							
GB = Gleitbruch							
Standzeiten der noch laufenden Versuche am 30.04.93							

Die gemessenen Zeit-Verschiebungsweg-Kurven der Serie II sind in den folgenden Bildern dargestellt, jeweils mit der Zeit auf der Abszisse und dem Verschiebungsweg auf der Ordinate. In den Zeit-Verschiebungsweg-Kurven mit den verschiedenen Ausnutzungsgraden wurde folgendes beobachtet:

Ausnutzungsgrad: 50 %

Die Zeit-Verschiebungsweg-Kurve einer zu 50 % des Basis-Reibbeiwertes ausgelasteten Verbindung (beispielhaft im

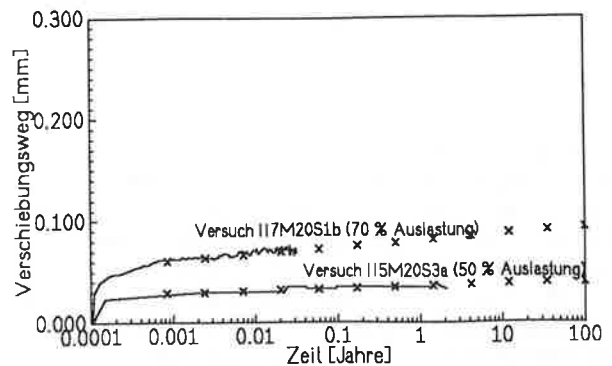


Bild 10 Zeit-Verschiebungsverhalten von gesweepeten Verbindungen mit 50 und 70 % Auslastung

Bild 10 für eine gesweepete und **Bild 11** für eine beschichtete Verbindung dargestellt; die gemessene Kurve ist die ausgezogene Linie) zeigt, daß diese Verbindung nicht starr ist. Sie erfährt eine ständige, wenn auch immer langsamer zunehmende Verschiebung. Man kann von einem *viskoelastischen* Verhalten sprechen. Dieses Verhalten ist bei höheren Auslastungen noch ausgeprägter. Es gilt für gesweepete und beschichtete Oberflächen gleichermaßen.

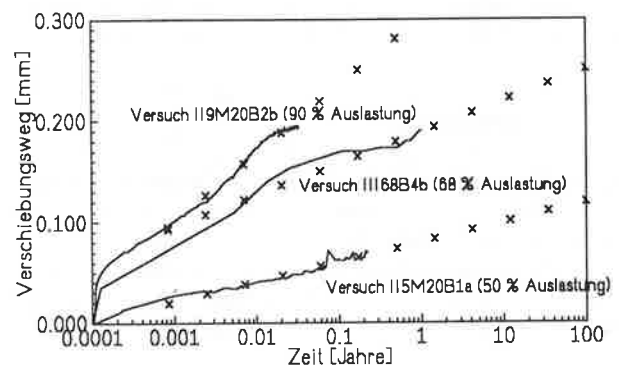


Bild 11 Zeit-Verschiebungsverhalten von beschichteten Verbindungen mit 50, 70 und 90 % Auslastung

Ausnutzungsgrad: 70 %

Bei einer zu 70% des Basis-Reibbeiwertes ausgelasteten Verbindung zeigt die Zeit-Verschiebungs-Kurve einen ähnlichen Verlauf (**Bild 10** und **Bild 11**). Die Anfangssetzung und Gleitgeschwindigkeit sind größer, vom Verlauf her aber gleich.

Ausnutzungsgrad: 90 %

Die Zeit-Verschiebungsweg-Kurve einer zu 90 % des Basis-Reibbeiwertes ausgenutzten Probe zeigt besonders bei den gesweepeten Proben eine Art Kriechversagen (**Bild 12**): Nach einer Anfangssetzung und allmählich abnehmender Kriechgleitgeschwindigkeit erhöht sich diese plötzlich wieder und leitet das Versagen der Gleitfläche ein. Eine mögliche Erklärung ist, daß die Gleitfläche gewissermaßen ihre "Verzahnung" verliert und sich selber glättet. Bei den beschichteten Proben konnte dieses Phänomen nicht beobachtet werden, es wurde lediglich eine noch höhere Kriechgeschwindigkeit registriert (**Bild 11**).

4.3.3 Gleitlastverhalten im Anschluß an die Dauerstandversuche der Serie II

Mit Prüfkörpern der Serie II wurden im Anschluß an die Dauerstandversuche statisch zügige Gleitlastversuche wie mit der Serie I unternommen, um die mögliche Veränderung des Reibbeiwertes durch die lange Dauerstandbelastung festzustellen. Die Tabelle 6 zeigt das Ergebnis als Reibbeiwert μ für gesweepete und die Tabelle 7 für beschichtete Prüfkörper (nicht ausgefüllte Werte stehen noch offen und können erst mitgeteilt werden, wenn die Dauerstandversuche beendet sind). Die Tabellen geben auch an, wie lange die Prüfkörper zuvor der Dauerstandlast unterworfen waren, welchen Reibschluß und welchen Ausnutzungsgrad die Dauerstandlast bewirkte. Die letzten 6 Zeilen der Tabelle 6 geben Dauerstandversuche mit ca. 90 %igem Ausnutzungsgrad wieder, die nach kurzer Zeit das Kriechgleiten einleiteten (Kriechgleitversagen). Die nutzbaren Werte: Zeilen 7 u. 8 in Tabelle 6 sowie Zeilen 1,2,7 bis 10, 27 bis 32 in Tabelle 7 lassen erkennen, daß im Mittel mit einer 24 %igen Erhöhung des Reibbeiwertes für die gesweepeten und einer 13 %igen Erhöhung des Reibbeiwertes für die beschichteten Prüfkörper nach einer längeren Dauerstandbelastung auch mit unter 50 %igem Ausnutzungsgrad zu rechnen ist.

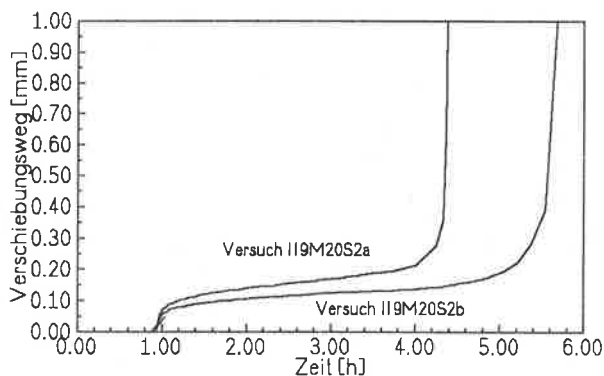


Bild 12 Zeit-Verschiebungsverhalten einer gesweepeten Verbindung mit 90 % Auslastung

4.4 Versuchsserie III

4.4.1 Ziel der Serie III

Die Prüfkörper der Serie III sind ebenfalls in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgeführt. Die Versuchsserie III war ursprünglich als die eigentliche Dauerstandserie konzipiert. Die Prüfkörper der Serie III standen ein Jahr unter Dauerstandlast und wurden danach statisch zügig wie die Serie I geprüft, um die Reibbeiwerte nach dieser Dauerstandbelastung zu bestimmen.

4.4.2 Gemessene Zeit-Verschiebungsweg-Kurven der Serie III

Die Verhaltenscharakteristiken und die Auswertung der Proben der Serie III sind genauso wie bei Serie II, es trat jedoch wegen der geringeren Auslastungen kein Kriechversagen auf. Außer den Proben III74B1a und III72B2a hat keine weitere Probe die 0,3 mm Weggrenze überschritten. Die zu erwartenden Gleitwege in der Lebensdauer der Konstruktion werden weiter unten behandelt.

4.4.3 Gleitlastverhalten nach den Dauerstandversuchen der Serie III im statisch zügigen Versuch

Die im statisch zügigen Versuch gemessenen Reibbeiwerte an den Versuchskörpern der Serie III, die eine einjährige Dauerstandzeit hinter sich hatten, sind ebenfalls in Tabelle 6 und Tabelle 7 für die gesweepeten und beschichteten Verbindungen zusammengefaßt. Das Versagen aller Proben geschah schlagartig mit lautem Knall (wie bei schwarzen gestrahlten Kontaktflächen), so daß der Versagenspunkt und somit der Reibbeiwert eindeutig definiert sind. Diese Versagensform ist ein Zeichen dafür, daß sich über die lange Dauerstandzeit eine innige Verzahnung eingestellt hatte.

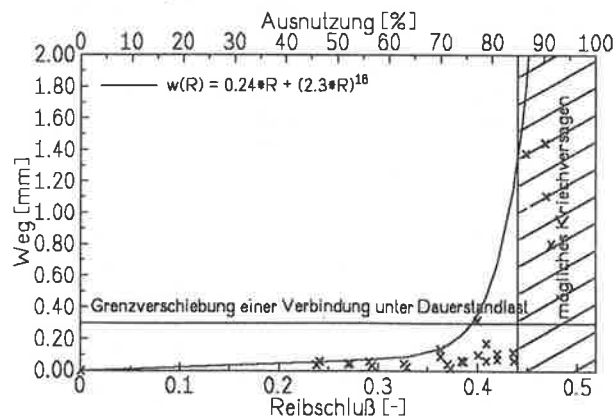


Bild 13 Extrapolierte Kriechverschiebungen nach 50 Jahren (bei gesweepeten Kontaktflächen)

4.5 Abschätzung der maximalen Ausnutzung durch Dauerstandlasten

Eine gleitfeste vorgespannte Verbindung wird dann als dauerstandfest bezeichnet, wenn die Kriechverschiebungen unter einer bestimmten Last den Grenzwert von 0,3 mm innerhalb von 50 Jahren nicht überschreiten. Diejenige Last, mit der diese Bedingung gerade noch erfüllt wird, wird auf die Gleitlast im statisch zügigen Versuch bezogen; dieses Verhältnis wurde als Ausnutzungsgrad bezeichnet. Um die maximale Ausnutzbarkeit einer GV-Verbindung mit feuerver-

zinkten Stahlbauteilen, die anschließend auf den Kontaktflächen gesweept oder mit Alkali-Silikat-Zinkstaub-Farbe beschichtet sind, innerhalb der Lebensdauer einer Konstruktion abschätzen zu können, wurde eine linear-logarithmische Regressionsgerade mit

$$w_t = a \log t + w_0 \quad (3)$$

mit w_t = Verschiebungsweg zum Zeitpunkt t , t = Zeit in Stunden, a = Regressionsparameter und w_0 = Anfangsverschiebung zur Erreichung des Fehlerquadratminimums, durch die gemessenen Zeit-Verschiebungsweg-Punkte gelegt und so der weitere Zeit-Verschiebungsverlauf über die Versuchs-

Tabelle 8 Rechnerische Extrapolation der Last-Kriechverschiebungskurve auf 50 oder 100 Jahre (gesweepte Kontaktfläche)

Versuch	R	λ	Regression: $w_t = a \log(t) + w_0$			Weg nach ... Jahren		
Sweep	0.9h	0.519	a	w_0	c	0.1	50	100
II5M20S1a	0.294	56.7%	-0.00020	0.03576	-0.20640	0.04	0.03	0.03
II5M20S1b	0.291	56.1%	0.00395	0.03552	0.87157	0.05	0.06	0.06
II5M20S2a	0.272	52.4%	0.00052	0.04317	0.24721	0.05	0.05	0.05
II5M20S2b	0.270	52.1%	0.00167	0.03443	0.76592	0.04	0.04	0.04
II5M20S3a	0.238	45.9%	0.00234	0.02690	0.74913	0.04	0.04	0.04
II5M20S3b	0.241	46.5%	0.00669	0.02307	0.95526	0.05	0.06	0.06
II7M20S1a	0.363	70.0%	0.01351	0.05975	0.96730	0.10	0.14	0.14
II7M20S1b	0.363	70.0%	0.00676	0.05467	0.81367	0.07	0.09	0.09
II7M20S2a	0.326	62.8%	0.00168	0.03665	0.49994	0.04	0.05	0.05
II7M20S2b	0.329	63.4%	0.00133	0.01925	0.56563	0.02	0.03	0.03
II7M20S3a	0.370	71.3%	0.00369	0.02346	0.89566	0.03	0.04	0.05
II7M20S3b	0.373	71.9%	0.00090	0.01586	0.76287	0.02	0.02	0.02
III80S1a	0.436	84.1%	0.00793	0.07541	0.97362	0.10	0.12	0.12
III80S1b	0.437	84.2%	-0.00290	0.08377	-0.87680	0.08	0.07	0.07
III78S2a	0.420	81.0%	0.01134	0.04624	0.80888	0.08	0.11	0.11
III78S2b	0.420	81.0%	-0.00010	0.07453	-0.07380	0.07	0.07	0.07
III76S3a	0.409	78.9%	0.00096	0.06029	0.59026	0.06	0.07	0.07
III76S3b	0.409	78.9%	0.00966	0.12134	0.88057	0.15	0.18	0.18
III74S4a	0.401	77.3%	0.00496	0.07440	0.90332	0.09	0.10	0.10
III74S4b	0.400	77.1%	0.02234	0.19279	0.90435	0.26	0.32	0.33
III71S5a	0.386	74.4%	0.00000	0.06000	0.89350	0.06	0.06	0.06
III71S5b	0.384	74.0%	0.00344	0.04432	--	0.05	0.06	0.06
II9M20S1a	0.445	85.8%	4.74464	0.27280	--	14.23	27.04	28.47
II9M20S1b	0.449	86.6%	0.24006	0.02236	0.99740	0.73	1.38	1.45
II9M20S2a	0.469	90.4%	0.18066	0.08799	0.99732	0.62	1.11	1.16
II9M20S2b	0.474	91.4%	0.12997	0.07011	0.99248	0.45	0.80	0.84
II9M20S3a	0.468	90.2%	0.24083	0.08560	0.99878	0.79	1.44	1.52
II9M20S3b	0.475	91.6%	0.25228	0.08754	0.99825	0.83	1.51	1.59

1) Die scheinbar negativen Steigungen ergeben sich aus Ablesungenauigkeiten Wege in [mm]

standdauer hinaus extrapoliert. Eine Darstellung der Regressionsgeraden (angedeutet durch die Kreuze) findet sich beispielhaft in Bild 10 und Bild 11 für die gezeigten Versuche. Eine Zusammenstellung der einzelnen Regressionsparameter ist in **Tabelle 8** (Kontaktflächenzustand S) und in **Tabelle 9** (Kontaktflächenzustand B) im enthalten. Der Parameter c (Korrelationskoeffizient) gibt die Anpassung der Regressionskurve an die Meßpunkte an; $c = 1.0$ bedeutete, daß die Kurve alle Meßpunkte genau trifft.

Die so extrapolierten Verschiebungswegen sind, in Abhängigkeit von der Ausnutzung der Reibbeiwerte, in dem **Bilder 13** und **Bild 14** dargestellt. Als Lebensdauer einer Kon-

struktion wurden in diesen Bildern 50 Jahre zugrundegelegt.

Tabelle 9 Rechnerische Extrapolation der Last-Kriechverschiebungskurve auf 50 oder 100 Jahre (beschichtete Kontaktfl.)

Versuch	R	λ	Regression: $w_t = a \log(t) + w_0$			Weg nach ... Jahren		
Beschicht	0.9h	0.557	a	w_0	c	0.1	50	100
II5M20B1a	0.277	49.7%	0.01964	0.00281	0.96723	0.06	0.11	0.12
II5M20B1b	0.278	49.9%	0.01318	0.01789	0.96788	0.06	0.09	0.10
II5M20B2a	0.297	53.3%	0.01006	0.03522	0.90385	0.06	0.09	0.10
II5M20B2b	0.298	53.5%	0.00856	0.02906	0.87295	0.05	0.08	0.08
II5M20B3a	0.320	57.4%	0.00917	0.03146	0.94126	0.06	0.08	0.09
II5M20B3b	0.318	57.1%	0.03231	0.05382	0.91421	0.15	0.24	0.25
II5M20B4a	0.228	40.9%	0.00889	0.02175	0.86344	0.05	0.07	0.07
II5M20B4b	0.229	41.1%	0.00921	0.01480	0.95260	0.04	0.07	0.07
II5M20B5a	0.214	38.4%	0.01481	0.01245	0.99109	0.06	0.10	0.10
II5M20B5b	0.215	38.6%	0.01050	0.01410	0.85486	0.04	0.07	0.08
II7M20B1a	0.393	70.5%	0.00983	0.02925	0.89354	0.06	0.08	0.09
II7M20B1b	0.394	70.7%	0.04375	-0.00815	0.94238	0.12	0.24	0.25
II7M20B2a	0.370	66.4%	0.02654	0.01020	0.95773	0.09	0.16	0.17
II7M20B2b	0.367	65.9%	0.01674	0.01523	0.95652	0.06	0.11	0.11
II7M20B3a	0.341	61.2%	0.00767	0.02665	0.94302	0.05	0.07	0.07
II7M20B3b	0.345	61.9%	0.01337	0.01031	0.96478	0.05	0.09	0.09
III74B1a	0.440	79.0%	0.02379	0.07769	0.94350	0.15	0.21	0.22
III74B1b	0.440	79.0%	0.09238	0.03805	0.95537	0.31	0.56	0.59
III72B2a	0.424	76.1%	0.02227	0.06173	0.95350	0.13	0.19	0.19
III72B2b	0.424	76.1%	0.09820	0.11555	0.92478	0.40	0.67	0.70
III70B3a	0.414	74.3%	0.02655	0.10690	0.91903	0.19	0.26	0.26
III70B3b	0.412	73.9%	0.01726	0.09596	0.90615	0.15	0.19	0.20
III68B4a	0.401	72.0%	0.03111	0.06623	0.96293	0.16	0.24	0.25
III68B4b	0.401	72.0%	0.02406	0.08846	0.94578	0.16	0.22	0.23
III66B5a	0.385	69.1%	0.01365	0.05788	0.95649	0.10	0.13	0.14
III66B5b	0.386	69.3%	0.01550	0.07158	0.95490	0.12	0.16	0.16
II9M20B1a	0.490	87.9%	0.09779	0.11030	0.99264	0.40	0.66	0.69
II9M20B1b	0.500	89.7%	0.24800	-0.04449	0.99492	0.69	1.35	1.43
II9M20B2a	0.436	78.2%	0.05136	0.04928	0.98550	0.20	0.34	0.35
II9M20B2b	0.439	78.8%	0.06717	0.03698	0.98629	0.23	0.42	0.44
II9M20B3a	0.473	84.9%	0.29028	-0.05522	0.97990	0.80	1.58	1.67
II9M20B3b	0.472	84.7%	0.06370	0.05425	0.98500	0.24	0.41	0.43

Wege in [mm]

Die eingetragene Kurve für die Verschiebungen w in Abhängigkeit vom Reibschluß R wurde so gelegt, daß sie alle Punkte konservativ abdeckt. Sie hat die Form

$$\text{Kontaktflächenzustand S: } w = 0,24 \cdot R + (2,3 \cdot R)^{16} \quad (4)$$

$$\text{Kontaktflächenzustand B: } w = 0,71 \cdot R + (2,17 \cdot R)^{11} \quad (5)$$

Für eine Grenzverschiebung von 0,3 mm nach einer 50jährigen Standdauer einer Konstruktion ergeben sich somit folgende Ausnutzungsgrade:

Kontaktflächenzustand S:

$$R = 0,39 \text{ bzw. Ausnutzungsgrad: } 76 \% (6)$$

Kontaktflächenzustand B:

$$R = 0,35 \text{ bzw. Ausnutzungsgrad: } 63 \% (7)$$

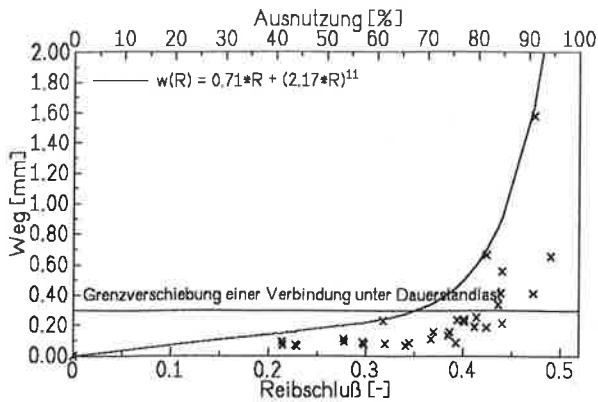


Bild 14 Extrapolierte Kriechverschiebungen nach 50 Jahren (bei beschichteten Kontaktflächen)

5. Dauerschwinguntersuchungen mit der Versuchsserie IV

5.1 Ziel der Serie IV

In der Serie IV sollte in Pilotversuchen die Standdauer der Gleitverbindungen gegen Verschiebungen unter schwingender Belastung untersucht werden. Ferner sollte ermittelt werden, wie sich der Reibbeiwert in einem statisch zügigen Versuch ändert, wenn zuvor hohe Lastwechselzahlen unter Schwingbelastung ertragen wurden. Hierzu wurden Probestäbe einer Zugschwellbelastung $\kappa = 0,1$ mit $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln unterworfen. Dabei sollte geprüft werden, ob die zuvor in den Dauerstandversuchen ermittelten Ausnutzungsgrade auch in Schwingversuchen sicherstellen, daß

- die maximal erlaubten Gleitwege von 0,3 mm nicht überschritten werden
- die Verbindung diese Lastwechselzahl ertragen kann und
- ein negativer Einfluß einer Dauerschwingbeanspruchung auf das Reibverhalten nicht gegeben ist.

Insgesamt kamen 5 Dauerschwingproben zum Versuch.

5.2 Durchführung der Serie IV

Diese Versuche wurden in der vorgenannten Universal-Prüfmaschine durchgeführt. Zur Prüfung der Verbindungen wurden die in der Serie I ermittelten Reibbeiwerte für die Oberflächen "feuerverzinkt und gesweept" und "feuerverzinkt und beschichtet" folgendermaßen ausgenutzt:

P_{\min}	P_{\max}	Kennzeichen
6,5 %	65 %	65
7,0 %	70 %	70
7,5 %	75 %	75

Die Versuche wurden langsam, mit ca. 0,002 Hz, was ungefähr der Belastungsgeschwindigkeit der statisch zügigen Versuche von 1 kN/sec. entspricht, gestartet. Bei den ersten beiden Lastzyklen wurden wie bei den statisch zügigen Versuchen die Maschinenlast, die Vorspannkräfte der Schrau-

ben und die Wegaufnehmer mit einer Vielstellenmeßanlage ca. alle 2 sec. abgelesen. Dann wurde die Ablesung gestoppt und die Belastungsfrequenz langsam bis zur Höchstleistung der Prüfmaschine, die je nach Lastamplitude zwischen 7 und 8,5 Hz lag, gesteigert. In bestimmten Intervallen wurde die Belastungsfrequenz dann wieder auf 0,01 Hz verlangsamt und die Last-Verschiebungen eines kompletten Belastungszyklus von P_{\min} über P_{\max} bis P_{\min} aufgezeichnet.

Nach Erreichen der Soll-Lastwechselzahl wurde die Probe entlastet und anschließend wie in der Serie I statisch zügig bis zum Reibversagen belastet, um so die Reibbeiwerte zu bestimmen.

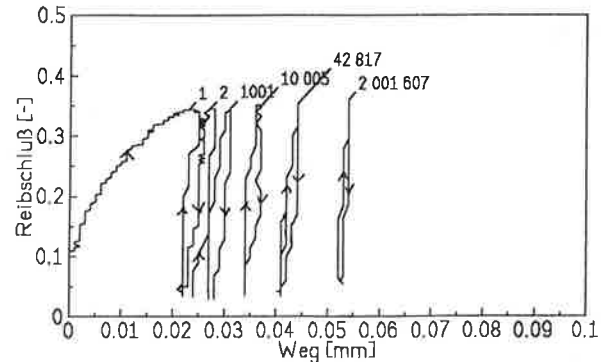


Bild 15 Dauerschwingversuch (IV65S2b) mit gesweepten Kontaktflächen

5.3 Versuchsergebnisse

In dem **Bild 15** ist beispielhaft eine gesweept Probe und in dem **Bild 16** eine beschichtete Probe dargestellt. Hierbei wurde jeweils eine Darstellung im Last(Reibschluß)-Verschiebungs-Diagramm nach einer bestimmten Lastwechselzahl gewählt. Der stufenartige Verlauf der Kurven entsteht durch die sehr hohe Auflösung in der Darstellung; die feinste Auflösung in der Ablesung der Wegaufnehmer beträgt 1/1000 mm, was in den Diagrammen gleich eine "Stufe" ergibt.

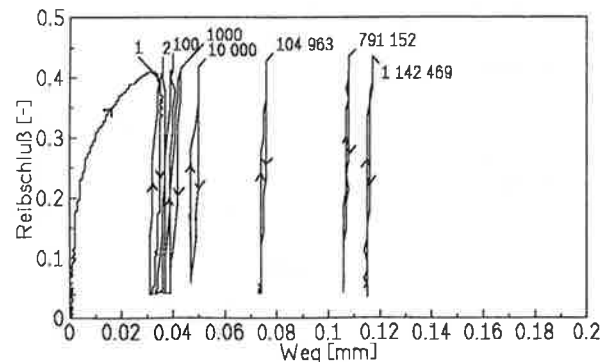


Bild 16 Dauerschwingversuch (IV70B1a) mit beschichteter Kontaktfläche

In dem **Bild 17** und **Bild 18** sind die Verschiebungswege (Ordinate) unter der jeweiligen Oberlast in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl in logarithmischer Teilung (Abszisse) während der zwischengeschalteten Intervalle dargestellt.

Beim statisch zügigen Gleitlastversuch der Verbindungen nach der Dauerschwingbelastung versagten die gesweepten Proben schlagartig mit lautem Knall. Die beschichteten Pro-

ben versagten nicht ganz so hart. Durch diese Versagensart war der Reibbeiwert eindeutig definiert. Eine Zusammenstellung der Reibbeiwerte ist in **Tabelle 10** zusammengefaßt. Die Reibbeiwerte sind jeweils auf die aktuelle Schraubenkraft bezogen.

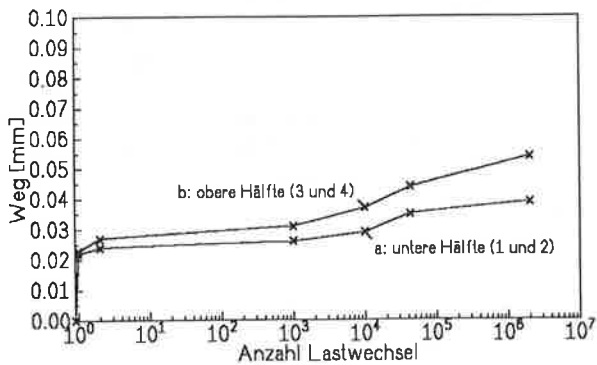


Bild 17 Verschiebungswege bei Maximallast (Versuch IV65S2), Kontaktflächen gesweept

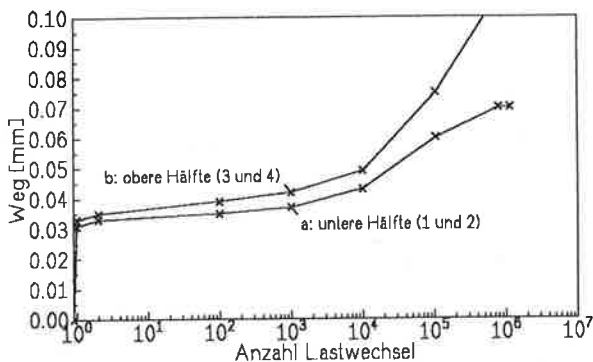


Bild 18 Verschiebungswege bei Maximallast (Versuch IV70B1a), Kontaktflächen beschichtet

6 Reibbeiwerte nach Dauerstand- und Dauerschwingversuchen

Die festgestellten Reibbeiwerte nach längerer Dauerstandsbeanspruchung sind in Tabelle 6 für gesweept und Tabelle 7 für beschichtete Kontaktflächen, die Reibbeiwerte nach Dauerschwingbeanspruchung mit 2×10^6 LW sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Im **Bild 19** und **Bild 20** sind diese erzielten Ergebnisse sowie auch die Reibbeiwerte der Serie I ohne vorherige Dauerstand- oder Dauerschwingbeanspruchung dargestellt. Für die Bestimmung der Reibbeiwerte wurde immer die aktuelle Schraubenkraft eingesetzt, so daß für die Anwendung dieser Reibbeiwerte der Schraubenvorspannkraftabfall mit berücksichtigt werden muß.

Die ursprüngliche und aus früheren Testversuchen abgeleitete Vermutung, daß durch vorherige Dauerstandsbeanspruchung sowie auch durch vorherige Dauerschwingbeanspruchung eine Verzahnung der Kontaktflächen derart stattfindet, daß der Reibbeiwert deutlich erhöht wird, hat sich in den Versuchen bestätigt. Außerdem ändert sich die Versagensart von einem weichen nichtlinearen Gleitverhalten in Richtung auf ein hartes schlagartiges Durchgleiten mit Knall.

Tabelle 10

Statisch zügige Gleitversuche (Pilotversuche) nach Schwingversuchen mit $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln

Versuch	Kontfl.	R	λ	μ_{LW}
IV70S1a	S	0,3672	70,79	0,6738
IV70S1b	S	0,3789	73,05	0,6919
IV65S2a	S	0,3466	66,82	0,6208
IV65S2b	S	0,3447	66,45	0,6451
IV75S3a	S	0,4131	79,64	0,6955
IV75S3b	S	0,3855	74,32	0,6648
IV70B1a	B	0,3946	70,82	Bruch
IV70B1b	B	0,4093	73,46	Bruch
IV70B2a	B	0,3724	66,83	0,6719
IV70B2b	B	0,3724	66,83	0,6823

S = Kontaktflächen gesweept
B = Kontaktflächen beschichtet
R = Reibschluß bei der ersten Belastung
 λ = Ausnutzung bezogen auf $\mu = 0,5187$ (S) bzw. $\mu = 0,5572$ (B)
 μ_{LW} = Reibbeiwert nach $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln

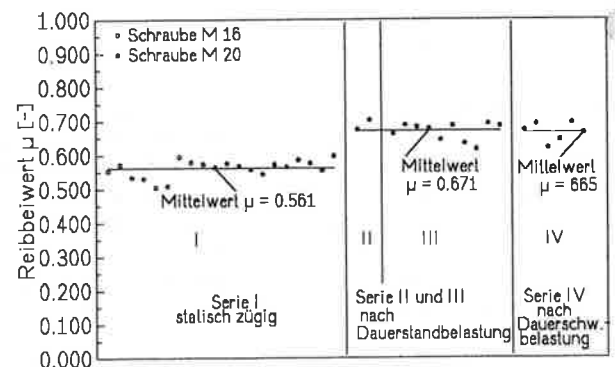


Bild 19 Reibbeiwerte der einzelnen Versuchsserien im statisch zügigen Versuch; Kontaktflächen feuerverzinkt und gesweept

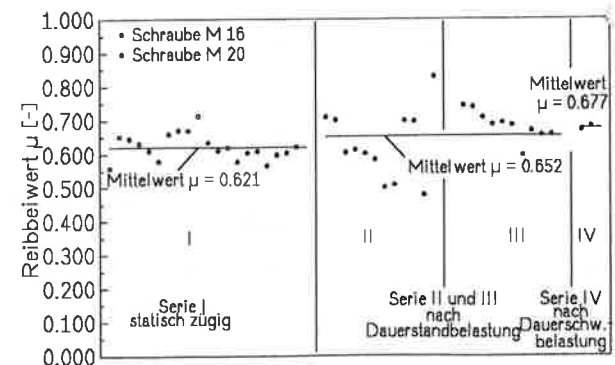


Bild 20 Reibbeiwerte der einzelnen Versuchsserien im statisch zügigen Versuch; Kontaktflächen feuerverzinkt und beschichtet

7 Untersuchungen der Kontaktfläche

Betrachtet man die Kontaktflächen der zertörten, d.h. der durchgeglittenen Versuchskörper, kann man zwischen den Versuchen mit feuerverzinkter und gesweepter Oberfläche und den mit feuerverzinkter und mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe beschichteten Versuchen deutliche Unterschiede erkennen:

Bei den beschichteten Proben werden anhand der Schleifspuren deutlich die Berührungsflächen erkennbar (Bild 21). Der gleitfeste Anstrich ist hauptsächlich um das Loch herum und in Gleitrichtung abgeschabt, die Zinkschicht selbst ist außer durch Kratzer und Schleifspuren nicht beschädigt. An den Proben ist deutlich zu sehen, daß die Verbindung über Reibung getragen hat. Ähnlich ist das Bild auch bei den nur feuerverzinkten Proben der Serie I; auch hier ist ein nur reiner Oberflächenkontakt erkennbar.

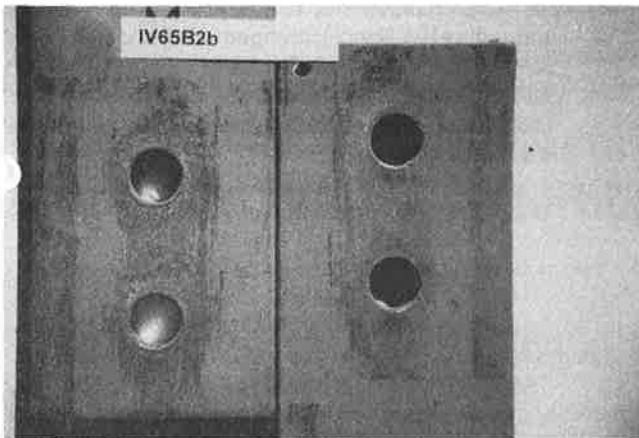


Bild 21 Kontaktstelle mit gleitfestem Anstrich nach Versuch

Ganz anders ist das Bild bei den feuerverzinkten und gesweepten Proben (Bild 22). Zwischen den aufeinandergepreßten Kontaktflächen findet eine so innige Verbindung statt, daß Teile der Zinkschicht beim Durchgleiten der Verbindung herausgerissen wurden und fest auf der gegenüberliegenden Zinkschicht haften blieben; daher auch der laute Knall beim Versagen der Proben. Die herausgerissenen Teile haften so fest auf der Probe, daß sie auch durch kräftiges kratzen, z.B. mit dem Schraubenzieher, nicht entfernt werden können. Dieser Versagenszustand ist bei den statisch zügigen Versuchen schon im Ansatz erkennbar und wird sehr deutlich bei den durch Dauerstand- und Dauerschwingbelastung beanspruchten Proben.

Betrachtet man eine derartig geschädigte Stelle als Schliffprobe (Ätzung: Salpetersäure 2%) unter dem Mikroskop mit 150-facher Vergrößerung (Bild 23), wird erkennbar, daß die Eisen-Zink-Legierung kurz über dem Eisen/Eisen-Zink-Übergang (der Γ -Phase) abgerissen ist, während Teile der gegenüberliegenden Eisen-Zink-Legierung noch fest haften. Diese Beobachtung läßt den Schluß zu, daß die Verbindung nach einiger Beanspruchungszeit eine höhere Festigkeit als der Grundwerkstoff, das ist hier die Eisen-Zink-Legierung, aufweist. Die Tragfähigkeit der GV-Verbindung mit gesweepter Kontaktfläche wird also dann durch die Scherfestigkeit der Eisen-Zink-Legierung bestimmt. Als tragender Querschnitt kann ungefähr der Spannungskegel aus der vorgespannten HV-Schraube angesetzt werden; bei den Proben

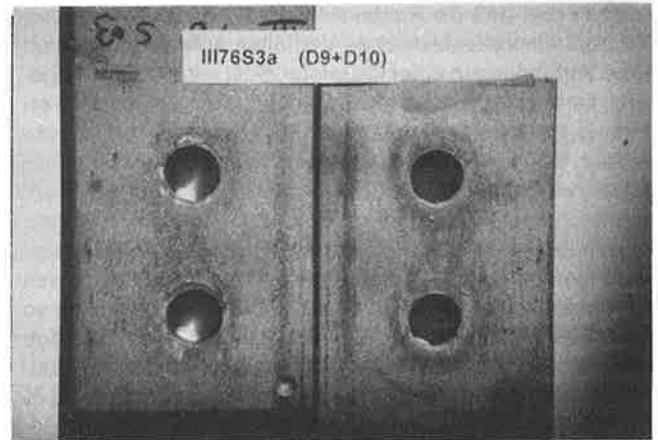


Bild 22 Kontaktstelle mit gesweepter Oberfläche nach Versuch

wurden Durchmesser von ca. 35 mm gemessen. Diese These wird auch dadurch gefestigt, daß die gemessenen Reibbeiwerte nach Dauerstand- oder Dauerschwingbeanspruchung einem "Endwert", der bei ca. $\mu = 0,67$ bis $0,70$ liegt, mit relativ geringen Streuungen zustreben (vgl. auch Bild 19).

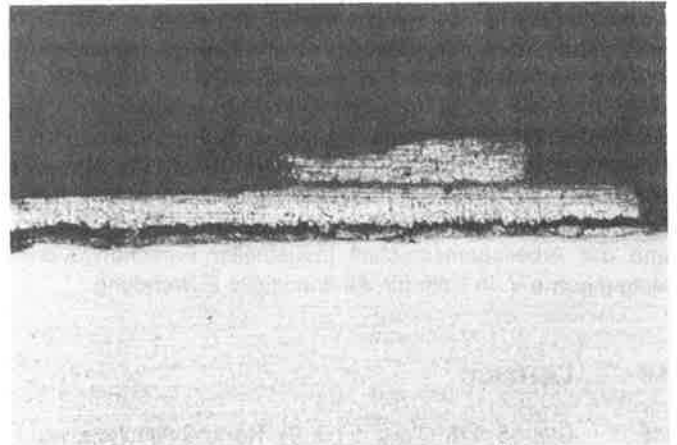


Bild 23 Schliffbild einer zerstörten Kontaktstelle

Bei den beschichteten Verbindungen sind im Gegensatz dazu die Streuungen der gemessenen Reibbeiwerte nach Dauerstandsbeanspruchung deutlich größer, vermutlich weil die Verbindung nur über Reibung trägt.

8 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Forschungsbericht wurden die Reibbeiwerte von feuerverzinkten GV-Verbindungen aus St 52-3 mit mattgrauer Zinkschicht und den reibbeiwerterhöhenden Maßnahmen ermittelt. Es wurden folgende Kontaktflächen

- Feuerverzinkung (Kontaktflächenzustand F)
- Feuerverzinkung und Sweepen (leichtes Strahlen) (Kontaktflächenzustand S) und
- Feuerverzinkung und Beschichten mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe (Kontaktflächenzustand B)

untersucht. Es zeigte sich, daß die Verbindungen mit den Kontaktflächenzuständen S und B im statisch zügigen Versuch einen höheren Reibbeiwert als die Kontaktfläche F

besitzen und daß die Kontaktflächen S und B unter Dauerstandlast ein viskoelastisches Verhalten aufweisen. Werden diese Verbindungen unter Dauerstandlast relativ hoch ausgenutzt, kann ein Kriechgleitversagen auftreten, indem die Verbindung nach anfänglicher Beruhigung plötzlich mit zunehmender Kriechgleitgeschwindigkeit versagt. Diese Versagensart wurde jedoch nur bei feuerverzinkten und gesweepen Verbindungen mit Ausnutzungsgraden über ca. 85 % der statisch zügig ermittelten Reibbeiwerte beobachtet. Bei Verbindungen mit dem Kontaktflächenzustand B trat dies in den Dauerstandversuchen nicht so ausgeprägt auf, weil nicht so hohe Ausnutzungsgrade gefahren wurden; eine derartige Versagensart ist aber ohne Zweifel auch bei diesen Kontaktflächen zu erwarten, wenn die Ausnutzungsgrade über 90 % liegen.

Es zeigte sich, daß die reibwerterhöhenden Maßnahmen Sweepen oder Beschichten durchaus brauchbare Möglichkeiten zur Herstellung von GV-Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlbauteilen und verbesserter Reibtragwirkung darstellen. Dieses um so mehr, als es sich gezeigt hat, daß die Reibbeiwerte dieses Verbindungstyps, wenn sie längeren Dauerstand- oder Dauerschwingbeanspruchungen unterworfen wurden, steigen. Die Nutzung der erhöhten Reibtragwirkungen in Stahlbauwerken muß aber differenzierter gestaltet werden, weil diese Verbindungen unter Dauerstandlast zum Kriechgleiten neigen und nur Ausnutzungsgrade um 60 % vom Reibbeiwert aus Langzeitlasten sicherstellen, daß in einer Lebensdauer von 50 Jahren die Grenzverschiebung von 0,3 mm pro Anschluß eingehalten bleibt.

Wir danken dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. in Düsseldorf für die ausführliche Betreuung des Forschungsvorhabens, der Firma Preußag Oberflächentechnik GmbH in Neumünster für das kostenlose Verzinken der Probekörper und der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. in Köln für die finanzielle Zuwendung.

10 Literatur:

- [1] DIN 55 928 (Teile 1 bis 9): Korrosionsschutz von Stahlbauteilen durch Beschichtungen und Überzüge.
- [2] Qeteren, K.-A. van: Feuerverzinken + Beschichten = Duplex-System. Merkblatt 329 der Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1981.
- [3] Valtinat, G.: Die Feuerverzinkung im Stahlbau. "25 Jahre GAV", S. 109-137. Gemeinschaftsausschuß Verzinken e. V., Düsseldorf 1976.
- [4] Valtinat, G.: Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau - im Hinblick auf Schraubenverbindungen. Herausgegeben von der Beratung Feuerverzinken, Hagen in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Ausschuß für Stahlbau, Köln; dem Deutschen Stahlbauverband Köln; dem Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V. (GAV), Düsseldorf und dem Verband Deutscher Feuerverzinkereien Hagen.
- [5] Zimmermann, W., und F.S. Rostásy: Der Reibbeiwert feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nachbehandlung der Zinkschicht. Der Stahlbau 44 (1975), Nr. 3, S. 82-84
- [6] Zimmermann, W., und F.S. Rostásy: Der Reibbeiwert belasteter und unbelasteter feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Zeit. Der Stahlbau 46 (1977), Nr. 3, S. 91-94.
- [7] Prüfungsbericht S 12 518 vom 23.07.1980 der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart.
- [8] Herrschaft, D: C.: Verbindungsverfahren für Stahlbauteile mit Zinküberzug. Industrie-Anzeiger 93 (1971) 102, S. 2610-2613.
- [9] Heurtaux, J.: Galvanized assemblies using 8.8 and 10.9 highstrength bolts with controlled tightness. Proceedings 12th International Galvanizing Conference, S. 260/266, Paris 1979.
- [10] Europäische Konvention für Stahlbau (EKS): European Recommendations for bolted connections in structural steelwork; Publication No 38, Brussels 1985.
- [11] Valtinat, G., Albrecht, F., Dangelmaier, P.: Gleitfeste Verbindungen mit feuerverzinkten Stahlteilen und reibfesten Beschichtungen oder anderen reibbeiwerterhöhenden Maßnahmen (Forschungsbericht). Schriftenreihe Stahlbau und Holzbau der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Heft 3. Hamburg 1993.