

## **Der Reibbeiwert feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nachbehandlung der Zinkschicht**

Von **W. Zimmermann** und **F. S. Rostásy**, Stuttgart

Bericht Nr. 71 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.

# Der Reibbeiwert feuerverzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nachbehandlung der Zinkschicht<sup>1)</sup>

DK 693.814.26.001.5 : 669.586

Von W. Zimmermann und F. S. Rostásy, Stuttgart

Mitteilung aus der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsaustalt, Otto-Graf-Institut, an der Universität Stuttgart.

## 1. Einleitung

Bei feuerverzinkten Bauteilen von Stahlkonstruktionen mit HV-Verbindungen sind auch die Berührungsflächen der HV-Verbindungen feuerverzinkt. Bleiben die Berührungsflächen vor dem Zusammenbau unbehandelt, kann für die Verbindungen nur ein Reibbeiwert  $\mu < 0,2$  erwartet werden [1].

Der zunehmende Einsatz feuerverzinkter Konstruktionsteile im Stahlbau gibt Veranlassung, nach Möglichkeiten zu suchen, auch bei HV-Verbindungen wirtschaftlichere Verbindungen durch höhere Reibbeiwerte zu erreichen. Die nachfolgend beschriebenen Versuche hatten das Ziel, Möglichkeiten zur Verbesserung des Reibbeiwertes von feuerverzinkten HV-Verbindungen zu untersuchen.

## 2. Versuchsdurchführung

An zweischnittigen Laschenverbindungen aus feuerverzinktem St 37 und St 52 nach Bild 1 wurden in Kurzzeit-Zugversuchen und in einigen Zeitstandversuchen die Gleitlasten an Probekörpern bestimmt, deren Berührungsflächen nach dem Feuerverzinken unbehandelt blieben oder zur Verbesserung des Reibbeiwertes auf verschiedene Art nachbehandelt waren.

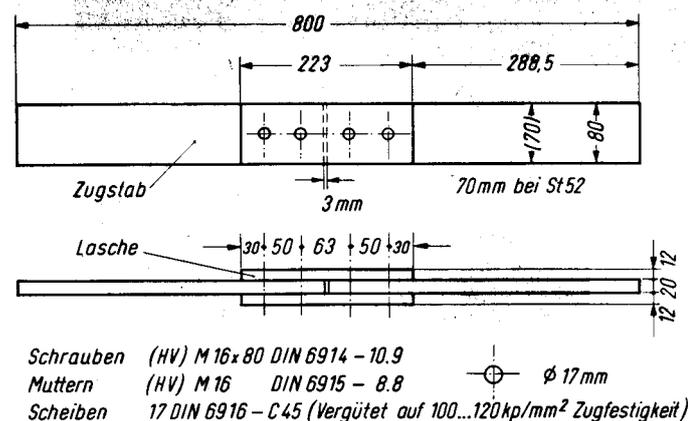


Bild 1. Probekörper

Der Einfluß von folgenden Arten der Nachbehandlung auf den Reibbeiwert wurde untersucht:

- mechanisches Aufrauen der Zinkoberfläche durch „Überblasen“ (leichtes Strahlen) mit Quarzsand oder Korund, Schmirgeln von Hand mit Schmirgelpapier, Bürsten mit rotierender Zopf-Drahtbürste,
- chemisches Aufrauen der Zinkoberfläche mit phosphorsäurehaltiger Paste oder Flüssigkeit,
- Anstrich mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe,
- Spritzmetallisieren mit Aluminium.

Zum Verschrauben der Probekörper wurden geeichte, ungeschützte HV-Schrauben, HV-M 16 x 80 DIN 6914, 10.9, mit zugehörigen Muttern und Unterlegscheiben verwendet. Beim Eichen in einer Zugprüfmaschine wurde für jede Schraube die Verlängerung  $\Delta l$  bei Belastung mit  $P_v = 10$  Mp gemessen, so daß beim Vorspannen der Schrauben in den Probekörpern mit Drehmomentenschlüssel aus der Verlängerung jeder Schraube die tatsächlich aufgebrachte Vorspannkraft  $P_v$  festgestellt werden konnte.

<sup>1)</sup> Bericht Nr. 71 des Gemeinschaftsausschusses Verzinken e. V.: Versuche zur Verbesserung des Reibbeiwertes feuerverzinkter HV-Verbindungen aus St 37 und St 52 durch mechanische oder chemische Aufrauhung sowie durch Farbanstrich oder Spritzmetallisierung der Zinkoberfläche.

Bei der Gleitlastbestimmung im Kurzzeit-Zugversuch, d. h. bei stufenweiser Laststeigerung bis zum Gleiten der Verbindungsteile, wurden die relativen Verschiebungen zwischen den Verbindungsteilen (zwischen Zugstab und Laschen) über Meßbügel mit Meßuhren mit 1/1000 mm Skalenteilung gemessen.

Als Gleitlast wurde dabei diejenige Last definiert, bei der die Verschiebungen zwischen den Verbindungsteilen schlagartig oder allmählich 150  $\mu$ m überschritten.

Der Reibbeiwert wurde wie folgt errechnet:

$$\mu = P_g / (m \cdot n \cdot P_v),$$

mit Gleitlast  $P_g$ , Schnittigkeit  $m$  der Verbindung (hier zweischnittig), Summe  $n \cdot P_v$  der Vorspannkraft  $P_v$  in den beiden Schrauben jeder Verbindungshälfte.

Bei jedem Versuch wurden je Probekörper zwei Reibbeiwerte gewonnen.

Unter ständig wirkender zweiaxialer Belastung, hervorgerufen durch die Vorspannkraft in den HV-Schrauben und durch die Scherbeanspruchung in den Berührungsflächen aus der Belastung der Verbindung, sind Kriechverformungen (Kriechgleiten) in den Zink- und Anstrichschichten zu erwarten. Es wurden deswegen zusätzlich einige Tastversuche mit ständig wirkender Belastung als Zeitstandversuche durchgeführt.

Bei diesen Zeitstandversuchen wurde die Belastung über einen Zeitraum von 100 bis 200 Stunden konstant gehalten, sofern die Verbindungen in diesem Zeitraum nicht über 150  $\mu$ m hinaus glitten. Dabei wurden, wie beim Kurzzeit-Zugversuch, während der gesamten Versuchsdauer die Verschiebungen zwischen Zugstäben und Laschen gemessen oder die Änderungen der Verschiebungen unter der konstanten Last beobachtet.

Zum Vergleich mit den in den Kurzzeit-Zugversuchen ermittelten Reibbeiwerten  $\mu$  wurde bei den Zeitstandversuchen der rechnerische Reibbeiwert  $\mu^r = P_z / (m \cdot n \cdot P_v)$  aus der konstant wirkenden Zeitstandlast  $P_z$  und der Vorspannung  $P_v$  in den Schrauben herangezogen.

## 3. Versuchsergebnisse

In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Versuche in den Einzelgruppen aufgeführt, wobei in den Hauptgruppen A bis G die Einzelgruppen mit gleichartigen Berührungsflächen zusammengefaßt sind.

Zunächst wurden als Vergleichsbasis die Reibbeiwerte an Probekörpern bestimmt, deren Berührungsflächen keine Nachbehandlung erfahren hatten; die Probekörper sind jedoch zu verschiedenen Zeiten von verschiedenen Industriebetrieben verzinkt worden. Unmittelbar vor dem Verschrauben wurden sie mit Trichloräthylen entfettet.

Die Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Struktur der Zinkschicht. In den Hauptgruppen A und B sind die Versuchsergebnisse von Probekörpern aufgeführt, die sich in der Struktur der Zinkschicht unterscheiden. In der Hauptgruppe A, mit grauer, durchgewachsener Eisenzinklegierungsschicht, lagen die Reibbeiwerte zwischen  $\mu = 0,424$  bis  $\mu = 0,466$ , während in der Hauptgruppe B, an Probekörpern mit glatter, glänzender Reinzinkschicht, nur Reibbeiwerte  $\mu = 0,163$  bis  $\mu = 0,306$  festgestellt wurden.

In den Hauptgruppen C und D sind die Ergebnisse von Probekörpern zusammengefaßt, deren Berührungsflächen nachträglich „überblasen“, mechanisch aufgeraut oder „phosphatiert“ worden sind. Hier wurde bei der Hauptgruppe C, mit grauer Eisenzinkschicht, mit Reibbeiwerten  $\mu = 0,433$  bis  $\mu = 0,500$ , gegenüber

Tabelle 1. Zusammenstellung der Versuchsergebnisse, in Hauptgruppen geordnet

1	2	3	4	5	6	7	8	9										10
								Spannweiten der Reibbeiwerte $\mu$ ... $\mu$ und Mittelwerte $\bar{\mu}$ der Einzelergebnisse in den Gruppen 1.1 bis 22.1 (St 37) und 1.2 bis 15.2 (St 52)										
Bezeichnung Haupt-Gruppe	Einzel-Gruppe	Nachbehandlung der feuerverzinkten Berührungsfächen	Schichtdicken Zink $\mu\text{m}$	Anstrich-Metallisierung	Spannweite der Einzelergebnisse, Reibbeiwerte $\mu = P_g/m \cdot n \cdot P_v$ min $\mu$ ... max $\mu$	Anzahl der Ergebnisse n	Mittelwert $\bar{\mu}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Bemerkungen	
A St 37	1.1	unbehandelte, graue Eisenzinkschicht	90	-	0,424...0,466	10	0,448										a) "unbehandelt" bedeutet immer, mit Trichloräthylen entfettet	
B St 37	10.1	glatte Reinzinkschicht	75	-	0,193...0,260	8	0,214										b) "überblasen" mit Quarzsand oder Korund leicht gestrahlt, bis die glänzende Oberfläche matt erscheint	
	11.1		80	-	0,182...0,191	4	0,187											
	13.1		80	-	0,175...0,235	6	0,205											
	14.1		95	-	0,163...0,306	10	0,237											
	16.1	115	-	0,197...0,237	6	0,219												
C St 37	2.1	"überblasen", graue Eisenzinkschicht	115	-	0,476...0,496	6	0,488										c) "phosphatiert" mit phosphorsäurehaltiger Paste bzw. Flüssigkeit aufgeraut	
	2.19		90	-	0,433...0,500	6	0,459											
D St 37	8.1	glatte Reinzinkschicht "phosphatiert" bzw. mechanisch aufgeraut	75	-	0,374...0,415	4	0,396										d) "mechanisch aufgeraut" mit Schmirgelpapier von Hand oder mit rotierender Zapf-Drahtbürste (an elektr. Winkelschleifer) aufgeraut	
	12.1		80	-	0,322...0,415	6	0,369											
	17.1		100	-	0,315...0,365	4	0,342											
	22.1		100	-	0,295...0,428	4	0,345											
E St 37	3.1	wie 1.1 bzw. phosphatiert und mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen	115	85	0,538...0,774	10	0,637										e) "Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe" nach TL 918385 der DB geprüfte Zweikomponenten-Zinkstaubfarbe mit $\mu > 0,55$ auf Stahl	
	4.1		75	85	0,606...0,701	10	0,664											
	9.1		90	55	0,586...0,636	8	0,610											
F St 37	15.1	verschieden, dann mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen	84	63	0,458...0,561	10	0,522										f) "Spritzmetallisierung mit Aluminium" flammgespritzt mit Spritzdraht Sd-AlMg 5 nach DIN 8566	
	18.1		100	25	0,394...0,462	4	0,424											
	19.1		100	35	0,475...0,508	4	0,485											
	20.1		100	40	0,452...0,524	4	0,476											
G St 37	5.1	mit Aluminium spritzmetallisiert	90	115	0,711...0,821	6	0,744											
A St 52	1.2	unbehandelte, graue Eisenzinkschicht	115	-	0,463...0,606	10	0,529											
C St 52	2.2	"überblasen", graue Eisenzinkschicht	140	-	0,470...0,538	6	0,503											
	2.29		110	-	0,365...0,532	6	0,461											
B St 52	14.2	graue Eisenzinkschicht unbehandelt	127	-	0,347...0,470	10	0,425											
F St 52	15.2	entfettet und mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen	128	60	0,448...0,696	10	0,538											

Tabelle 2. Auswertung der Versuchsergebnisse in Hauptgruppen mit gleichartigen Merkmalen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										11					
									Vertrauensbereich für den wahren Mittelwert ( $\bar{\mu} \pm \epsilon$ ) bei P = 95 % statistischer Sicherheit Reibbeiwerte $\mu$															
Bezeichnung Haupt-Gruppe	Einzel-Gruppe	Nachbehandlung der feuerverzinkten Berührungsfächen	Spannweite der Einzelergebnisse, Reibbeiwerte $\mu = P_g/m \cdot n \cdot P_v$ min $\mu$ ... max $\mu$	Anzahl der Ergebnisse n	Mittelwert $\bar{\mu}$	Standardabweichung s	Variationskoeffizient v(%)	$\pm \epsilon$	$(\bar{\mu} - \epsilon) \dots (\bar{\mu} + \epsilon)$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Bemerkungen						
A + C St 37	1.1	graue Eisenzinkschicht unbehandelt oder "überblasen"	0,424...0,500	22	0,462	0,023	5,1	0,010	0,452...0,472									Vertrauensbereich Spannweite						
	2.1									2.1.9														
B St 37	10.1	glatte Reinzinkschicht unbehandelt	0,163...0,306	34	0,217	0,032	14,9	0,011	0,206...0,228															
	16.1																							
D St 37	8.1	glatte Reinzinkschicht aufgeraut	0,295...0,415	18	0,375	0,035	9,3	0,017	0,357...0,392															
	22.1																							
E St 37	3.1	graue Eisenzinkschicht, "phosphatiert" und mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen	0,538...0,774	28	0,639	0,052	8,1	0,020	0,619...0,659															
	9.1																							
F St 37	15.1	glatte Reinzinkschicht aufgeraut und mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen	0,394...0,561	22	0,489	0,045	9,3	0,020	0,469...0,509															
	20.1																							
A+B+C St 52	1.2	graue Eisenzinkschicht, unbehandelt	0,347...0,606	32	0,479	0,063	13,1	0,022	0,457...0,501															
	2.2																							
	2.29																							
	14.2																							
F St 52	15.2	graue Eisenzinkschicht mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen	0,448...0,696	10	0,538	0,046	8,5	0,033	0,505...0,571															

Hauptgruppe A keine Verbesserung des Reibbeiwertes erzielt, während in der Hauptgruppe D durch die Aufrauung der glatten Reinzinkschicht gegenüber der Hauptgruppe B eine Steigerung der Reibbeiwerte zwischen  $\mu = 0,295$  bis  $\mu = 0,428$  zu verzeichnen war. Eine weitere Steigerung der Reibbeiwerte wurde durch einen Anstrich der Berührungsfächen mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe nach Aufrauhen der Zinkschicht erreicht. Auch hier waren die Ergebnisse bei den Probekörpern der Hauptgruppe E mit grauer Eisenzinkschicht besser als bei der Hauptgruppe F mit glatter Reinzinkschicht. Die Reibbeiwerte lagen bei E zwischen  $\mu = 0,538$  bis  $\mu = 0,774$ , bei F zwischen  $\mu = 0,394$  bis  $\mu = 0,561$ . Die härtere

graue Eisenzinkschicht bewirkte offenbar bei den Probekörpern der Hauptgruppe E eine bessere Haftung der Farbschicht und damit einen höheren Reibbeiwert.

Die Hauptgruppe G enthält die Ergebnisse bei den Probekörpern, deren graue Eisenzinkschicht durch "überblasen" (leichtes Strahlen mit Korund) und Spritzmetallisieren mit Aluminium nachbehandelt waren. Die Reibbeiwerte lagen mit  $\mu = 0,711$  bis  $\mu = 0,821$  sehr hoch, jedoch blätterte die Aluminiumschicht beim Öffnen der Probekörper nach den Versuchen ab. Da es sich hier um Tastversuche mit nur sechs Ergebnissen handelt, können die Ergebnisse nicht verallgemeinert werden.

Die grafische Darstellung der Ergebnisse in Tabelle 1 zeigt deutlich eine Gruppenbildung mit charakteristischen Merkmalen. In Tabelle 2 sind diese Gruppen zusammengefaßt und statistisch ausgewertet.

So wurden die Gruppen A und C zusammengefaßt, da das Überblasen (mit Korund oder Quarzsand) der graue Eisenzinkschicht keinen deutlichen Unterschied im Reibbeiwert zeigte. Aus 22 Ergebnissen ergab sich hier ein Mittelwert  $\bar{\mu} = 0,462$  mit einem Vertrauensbereich für den wahren Mittelwert der Grundgesamtheit, bei 95 % statistischer Sicherheit, von  $\mu = 0,452$  bis  $\mu = 0,472$ .

Demgegenüber sind in der Hauptgruppe B alle Ergebnisse von Probekörpern mit glatter Reinzinkschicht ohne Nachbehandlung zusammengefaßt. Hier liegt der Mittelwert von 34 Ergebnissen mit  $\mu = 0,217$  in einem Vertrauensbereich von  $\mu = 0,206$  bis  $\mu = 0,228$ .

Werden glatte Reinzinkschichten chemisch oder mechanisch aufgeraut, wie in der Hauptgruppe D zusammengefaßt, so ist mit einem mittleren Reibbeiwert  $\bar{\mu} = 0,375$  in einem Vertrauensbereich von  $\mu = 0,357$  bis  $\mu = 0,392$  zu rechnen, d. h. durch das Aufrauen der glatten Reinzinkschicht ist eine Steigerung des Reibbeiwertes um rund 70 % erreicht worden. Dabei sind die Reibflächen jeweils nur so lange bearbeitet worden, bis die glatte Oberfläche matt glänzend aussah, ohne daß die Zinkschichtdicke wesentlich vermindert wurde.

Eine weitere Steigerung des Reibbeiwertes war durch einen Anstrich der Berührungsflächen mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe möglich. Eine Aufrauhung der Zinkoberfläche war hier in jedem Fall notwendig, da sonst der Farbanstrich nicht zufriedenstellend haftete.

Trotz der Aufrauhung unterschieden sich die Ergebnisse in der Hauptgruppe E (Anstrich auf grauer Eisenzinkschicht) mit  $\bar{\mu} = 0,639$  von den Ergebnissen der Hauptgruppe F (Anstrich auf glatter Reinzinkschicht) mit  $\bar{\mu} = 0,489$  deutlich voneinander, wie die Vertrauensbereiche für die wahren Mittelwerte zeigen; die Spannweiten der Einzelergebnisse sind jedoch relativ groß.

Den Ergebnissen an Probekörpern aus St 37 sind in Tabelle 2 die Ergebnisse an einigen Parallelversuchen mit St 52 gegenübergestellt.

Beim St 52 war die Zinkschicht bei allen Probekörpern mattgrau, d. h. die Eisenzinkschicht war bei allen Probekörpern gleichmäßig durchgewachsen. Die ermittelten Reibbeiwerte unterschieden sich in den Hauptgruppen A, B und C, St 52, nur wenig, sie wurden deswegen zusammengefaßt. Das Ergebnis,  $\bar{\mu} = 0,479$ , stimmt mit dem Ergebnis bei St 37 mit grauer Eisenzinkschicht (Hauptgruppen A + C) überein.

In der Hauptgruppe F, St 52, wurden die Berührungsflächen lediglich mit Trichloräthylen entfettet und danach mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen. Die Ergebnisse lagen mit  $\bar{\mu} = 0,538$  zwischen den Ergebnissen der Hauptgruppen E und F bei St 37.

Bei den oben beschriebenen Zusatzversuchen unter ständig wirkender Last (Zeitstandversuchen) wurden sowohl bei den Probekörpern aus St 37 mit glatter Reinzinkschicht, aufgeraut und mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe gestrichen, als auch bei St 52 mit grauer Eisenzinkschicht und dem gleichen Anstrich nur rechnerische Reibbeiwerte  $\mu^r = P_z / (m \cdot n \cdot P_v) = 0,30$  erreicht.

Drei Tastversuche mit feuerverzinkten Probekörpern aus St 37, deren Berührungsflächen mit Aluminium spritzmetallisiert waren,

ertrugen unter gleichen Bedingungen Zeitstandlasten, die Reibbeiwerten  $\mu^r = 0,6$  entsprachen.

Die geringe Zahl der Zeitstandversuche macht eine klärende Ergänzung notwendig. In einem weiterführenden Forschungsvorhaben wurden solche Versuche bereits begonnen.

Weitere Tastversuche an vier feuerverzinkten Probekörpern aus St 37, deren Berührungsflächen unmittelbar vor dem Vorspannen der Schrauben mit Kunststoffkleber verklebt wurden (VK-Verbindung), erbrachten mit  $\mu = 0,61$  bis  $\mu = 0,69$  nur relativ niedrige Reibbeiwerte. Nach Auskunft der Lackindustrie ist bisher kein Kleber verfügbar, mit dem bei feuerverzinkten Flächen ähnlich gute Ergebnisse zu erzielen wären wie beim Verkleben von unverzinktem Stahl.

#### 4. Zusammenfassung

Versuche mit feuerverzinkten HV-Verbindungen aus St 37 mit glatter Reinzinkschicht ergaben Reibbeiwerte  $\mu > 0,16$  mit einem mittleren Reibbeiwert  $\bar{\mu} = 0,22$ .

Durch mechanisches oder chemisches Aufrauen der Reinzinkschicht wurde der Reibbeiwert  $\mu > 0,3$ , im Mittel  $\bar{\mu} = 0,37$ . Bei weitgehend mattgrauer, durchgewachsener Eisenzinkschicht bei St 37 und bei St 52 waren die ermittelten Reibbeiwerte  $\mu > 0,35$  und lagen im Mittel bei  $\bar{\mu} = 0,46$ .

Reibbeiwerte  $\mu > 0,4$ , mit Mittelwerten  $\bar{\mu} = 0,64$ ,  $\bar{\mu} = 0,54$  und  $\bar{\mu} = 0,49$ , wurden mit einem Anstrich einer Alkali-Silikat-Zinkstaubfarbe erzielt, wobei die höheren Reibbeiwerte bei den Probekörpern erreicht wurden, bei denen der Anstrich auf rauhere Zinkschichten aufgebracht war.

Tastversuche mit Probekörpern, deren Berührungsflächen mit Aluminium spritzmetallisiert waren, brachten Reibbeiwerte  $\mu > 0,7$ , die Haftung der Aluminiumschicht war jedoch mangelhaft.

Bei einigen Tastversuchen mit VK-Verbindungen waren die Reibbeiwerte  $\mu > 0,6$ .

Mit Abminderung der Reibbeiwerte, bzw. der über lange Zeit konstant wirkenden Belastung, muß bei feuerverzinkten HV-Verbindungen mit Alkali-Silikat-Zinkstaubfarben-Anstrich gerechnet werden, wenn Kriechverformungen in den Zink- und Farbschichten begrenzt bleiben sollen. Einige Versuche haben gezeigt, daß dann nur Langzeitbelastungen ertragen werden, die rechnerischen Reibbeiwerten  $\mu^r < 0,3$  entsprechen. Der Einfluß statischer Langzeitbelastung ist Gegenstand eines weiterführenden Forschungsvorhabens. Der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e. V., Köln, sei auch an dieser Stelle für die Bereitstellung der Mittel zu diesen Untersuchungen gedankt.

#### Schrifttum

- [1] Birkemoe, P. C., and Herrschaft, D. C.: Bolted galvanic bridges—engineering acceptance near. Civil Engineering ASCE 40 (1970), No. 4, S. 42—46.
- [2] Birkemoe, P. C., and Srinivasan, R.: Fatigue of bolted high strength structural steel. Proc. ASCE 91 (1965), ST 6, S. 57—69.
- [3] Kennedy, J. D. L.: High strength bolted galvanized joints. Proc. ASCE 98 (1972), ST 12, S. 2723—2738.
- [4] Herzog, M.: Die optimale Ausnutzung hochfester Schraubenverbindungen nach Versuchen. Der Stahlbau 43 (1974), H. 9, S. 267—276.