

Zuverlässigkeitstheoretische Ermittlung
der Beanspruchbarkeit der Gleitfuge für
den Nachweis der Gleitsicherheit bei
Lagern

T 2368

T 2368

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

Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Wissenschaftsbereich Verkehrsbau

05.09.1991

Zuverlässigkeitstheoretische Ermittlung der
Beanspruchbarkeit der Gleitfuge für den Nach-
weis der Gleitsicherheit bei Lagern

Schlußbericht

Auftraggeber: Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 72-76
1000 Berlin 30
Gesch.-Z. IV 1-5-655/91

Bearbeiter: Doz. Dr.-Ing. Freundt
Dr.-Ing. Frenzel

Marienstr. 13
Weimar
0-5300

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einführung	1
2. Beschreibung der zufälligen Eigenschaften der Basisvariablen X_i	3
2.1. Ursachen der Basisvariablen	3
2.2. Basisvariable Reibungszahl	3
2.2.1. Reibpaarung Stahl/Stahl	4
2.2.2. Reibpaarung Stahl/Beton	10
2.2.3. Reibpaarung Stahl/Holz	13
2.3. Basisvariable Eigengewicht	15
2.4. Basisvariable Verkehrslast	16
2.5. Basisvariable Wind	17
3. Das mechanische Modell des Gleitsicher- heitsnachweises	18
4. Definition des Grenzzustandes und Festlegung des Sicherheitsmaßes und der zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeit	19
5. Zuverlässigkeitstheoretische Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte	19
6. Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungszahlen nach /7/	27
7. Spiegelung der empfohlenen Werte an Normfest- legungen zu den Reibungszahlen für den Gleit- sicherheitsnachweis	29
8. Empfehlung zu den Bemessungswerten der Reibungszahlen für die praktische Anwendung	32
9. Hinweise auf offene Probleme	33
Literaturverzeichnis	35

<u>Verzeichnis der Tabellen</u>	Seite
1 Basisvariable und deren Ursachen	3
2 Statistische Parameter der Reibungszahl Stahl/Stahl (Normalverteilung)	9
3 Mittelwert der Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl/Stahl nach Auswertung der Versuche Nr. 10-22, 29-34, 38-40, 44-46, 50-52 nach /5/	10
4 Statistische Parameter der Reibungszahl Stahl/Beton (Normalverteilung)	12
5 Zusammenstellung der Ausgangsdaten der Berechnung	22
6 Charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungszahlen	24
7 Bemessungswerte und Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungs- zahlen nach /7/ und der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung	29
8 Vergleich der empfohlenen Werte mit Normfestlegungen	31

<u>Verzeichnis der Bilder</u>	Seite
1 Auswertung der minimalen Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl/Stahl aus den Versuchen 10-22, 29-34, 38-40, 44-46 und 50-52 in /5/	6
2 Auswertung der minimalen Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl/Stahl aus den Versuchen 97-102 in /4/	7
3 Auswertung der minimalen Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl/Beton aus den Versuchen 84-89, 94-96 in /4/	11
4 Auswertung der Gleitreibungszahlen der Reibpaarung Stahl/Holz aus den Versuchsreihen 13, 14 und 18 in /6/	14
5 Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung für die Grenzzustandsgleichung-Bremslast	25
6 Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung für die Grenzzustandsgleichung-Windlast	26

Verzeichnis der verwendeten Symbole

S	- Beanspruchung
R	- Beanspruchbarkeit
B	- Sicherheitsindex
T	- Bezugszeitraum
X_i	- Basisvariable
β_{X_i}	- Teilsicherheitsbeiwert von X_i
μ_{X_i}	- Mittelwert von X_i
σ_{X_i}	- Standardabweichung von X_i
v_{X_i}	- Variationskoeffizient von X_i
a } u }	- Parameter der Extremwertverteilung Typ I (Gumbel-Verteilung)
λ } k } b }	- Parameter der Extremwertverteilung Typ III (Weibull-Verteilung)
$f_{X_i}(\cdot)$	- Verteilungsdichtefunktion
$F_{X_i}(\cdot)$	- Verteilungsfunktion
$\varphi(\cdot)$	- Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung
$\Phi(\cdot)$	- Normalverteilungsfunktion
$\Phi^{-1}(\cdot)$	- inverse Normalverteilungsfunktion
g(\underline{x})	- Grenzzustandsgleichung im Originalraum der Basisvariablen
h(\underline{y})	- Grenzzustandsgleichung im Raum der standardisiert normalverteilten Basisvariablen
α_i	- Wichtungsfaktor
x^*	- Bemessungspunkt, wahrscheinlichster Versagens- punkt mit den Koordinaten x_i^*
$\mu_{X_i}^*, \sigma_{X_i}^*$	- Mittelwert und Standardabweichung der ange- näherten Normalverteilung

f_i	- Reibungszahl
$f_{5\%}$	- 5%-Fraktilwert der Reibungszahl
f_k	- charakteristischer Wert der Reibungszahl
f_d	- Bemessungswert der Reibungszahl
$\mathcal{K}_{m,f}$	- Teilsicherheitsbeiwert der Reibungszahl
K_s	- Fraktilfaktor
F	- Einwirkung (allgemeines Formelzeichen)
x,y,z	- Richtungsanzeiger
G	- ständige Last
Q	- veränderliche Last
$\mathcal{K}_F, \mathcal{K}_G, \mathcal{K}_Q$	- Lastfaktoren, berücksichtigen die Streuung der Lastgröße auf der Seite der Beanspruchung
$\mathcal{K}_{m,F}, \mathcal{K}_{m,G}$	- Teilsicherheitsbeiwerte der Beanspruchbarkeit, berücksichtigen die Streuung der Lastgröße auf der Widerstandsseite
$\mathcal{K}_{m,Q}$	- Teilsicherheitsbeiwert der Beanspruchbarkeit, berücksichtigen die Streuung der Lastgröße auf der Widerstandsseite
V_a	- Tragfähigkeit der Verbindungsmittel (Kopfbolzen, Dübel)
v_W	- Windgeschwindigkeit
H	- Höhe über Gelände
c_f	- aerodynamischer Beiwert
q	- Staudruck
γ	- Sicherheitszahl nach DIN 4141 /1/
\dot{s}	- Geschwindigkeit
f^f	- fiktiver Bemessungswert der Reibungszahl

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

NV	- Normalverteilung
Ex-I	- Extremwertverteilung Typ I
Ex-III	- Extremwertverteilung Typ III
ULS	- Ultimate limit state

1. Einführung

Ein Bauwerk besteht aus Bauteilen, die so zusammengefügt werden, daß Kräfte übertragen werden können und Verformungen ermöglicht werden. Sind die so entstehenden Fugen zwischen den Bauteilen nicht dauerhaft miteinander verankert, können sich die Bauteile gegeneinander bewegen. Der Bewegung wirkt die Reibung entgegen.

Zur Gewährleistung der Trag- und Funktionsfähigkeit eines Bauwerkes ist eine Wegbegrenzung in den Fugen erforderlich.

Für die baupraktische Anwendung wird dies über den Nachweis der Gleitsicherheit bei Lagern berücksichtigt. Die Grundlage ist in DIN 4141 Teil 1, Abschnitt 6 /1/ dokumentiert.

Basis dieser Regelung ist das Sicherheitskonzept mit globalem Sicherheitsbeiwert. Dabei ist das Sicherheitsmaß als Quotient aus Widerstand und Beanspruchung definiert und wird Sicherheitszahl γ genannt. Die Größe des Sicherheitsmaßes wird an der Erfahrung mit früher ausgeführten Bauwerken gemessen. Dem heute vorliegenden großen Erfahrungsbereich entsprechend, widerspiegeln die Normen mit diesem Sicherheitskonzept das reale Tragverhalten gut. Sie haben sich im Bauwesen bewährt. Da der Erfahrungsmechanismus nur unvollkommen einem Optimum entgegenstrebt, widmet man sich gegenwärtig wissenschaftlichen Methoden zur Bewältigung des Sicherheitsproblems. Den zukünftigen Eurocodes liegt deshalb ein modernes theoretisches Sicherheitskonzept, die Berechnungsmethode mit Teilsicherheitsbeiwerten zugrunde. Der Sicherheitsnachweis $S \leq R$ erfolgt auf deterministischer Weise für jeden Grenzzustand getrennt. Die angezielte Sicherheit wird durch ein System von Teilsicherheitsbeiwerten, die den unterschiedlichen streuenden Einflüssen zugeordnet sind und sich auf charakteristische Werte beziehen, erreicht. Die Teilsicherheitsbeiwerte können nach der Zuverlässigkeitstheorie ermittelt werden, wenn

- ausreichende statistische Informationen über die Basisvariablen X_i bekannt sind
- die mechanischen Gesetze über den Zusammenhang zwischen äußeren Einwirkungen und innerem Widerstand des Tragwerkes mathematisch formuliert vorliegen
- wenn der Grenzzustand, auf den sich die Versagenswahrscheinlichkeit bezieht, definiert ist und
- wenn die Gesetze zum Rechnen mit Zufallsgrößen und Zufallsprozessen soweit vereinfacht aufbereitet sind, daß sie mit einem vertretbaren Aufwand auf das mechanische Problem anwendbar sind. /2, Seite 59/

Das Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist die Ermittlung von charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten für die Reibungszahlen f_i innerhalb des Nachweises der Gleitsicherheit in Fugen auf zuverlässigkeitstheoretischem Weg. Dabei werden die Reibpaarungen Stahl/Stahl, Stahl/Beton und Stahl/Holz analysiert.

Die Beschreibung des Lösungsweges folgt den oben angeführten Spiegelstrichen.

2. Beschreibung der zufälligen Eigenschaften der Basisvariablen X_i

2.1. Ursachen der Basisvariablen

Für die Beschreibung der Basisvariablen ist ihre Konkretisierung erforderlich. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird als Modell eine Straßenbrücke aus Spannbeton gewählt. Die damit definierbaren Basisvariablen und ihre Ursachen im Rahmen des Nachweises der Gleitsicherheit sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

Tabelle 1: Basisvariable und deren Ursachen

lfd. Nr.	Basisvariable	Ursache
1	f_i	Relativbewegungen der Materialpaarungen Stahl/Stahl, Stahl/Beton und Stahl/Holz
2	F_z	Eigengewicht, Vertikallasten infolge Verkehr
3	F_x am festen Lager	Bremsen Die Kräfte 2. Ordnung (Horizontalkräfte infolge Verformung) werden vernachlässigt, da sie für die zuverlässigkeitstheoretische Untersuchung nicht relevant sind.
4	F_y am festen Lager	Wind Kräfte 2. Ordnung wieder wie 3

2.2. Basisvariable Reibungszahl

Die Beschreibung der zufälligen Eigenschaften der Basisvariablen setzt hinreichende statistische Informationen voraus.

Da die zahlenmäßige Festschreibung der einzelnen Werte auch im Sicherheitskonzept mit globalem Sicherheitsbeiwert "Erfahrungswerte" voraussetzt, kann auf Dokumentationen von Versuchen zurückgegriffen werden, die zur zahlenmäßigen Festlegung der Reibungszahlen in DIN 4141 /1/ und in DIN 4421 /3/ erarbeitet wurden. Für die Reibpaarungen Stahl/Stahl und Stahl/Beton sind dies die Forschungsberichte F 88 /4/ und F 152 /5/ der TH Aachen und für die Reibpaarung Stahl/Holz der Forschungsbericht 29/II von 1978 der TU Karlsruhe /6/. Die Berichte stellte dankenswerter Weise der Auftraggeber zur Verfügung.

2.2.1. Reibpaarung Stahl/Stahl

Die Reibungszahlen beschreiben den Zusammenhang von Vertikal- und Horizontallast bei einer Relativbewegung zweier Oberflächen. Dabei hat die Oberflächenbeschaffenheit einen großen Einfluß.

Für die statistische Auswertung stehen die Versuchsergebnisse aus /4/ und /5/ zur Verfügung.

Der Quervergleich der Versuchsvoraussetzungen in /4/ und /5/ läßt folgende Schlußfolgerungen zu:

- die Versuchsaufbauten sind vergleichbar,
- die Pressungen liegen in analogen Bereichen,
- die Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner ist ähnlich,
- die verwendeten Bewegungsgeschwindigkeiten differieren stark.
(Sie betragen in /4/ $10^{-6} \text{ mm/s} \leq \dot{s} \leq 10^{-5} \text{ mm/s}$ und in /5/ $0,01 \text{ mm/s} \leq \dot{s} \leq 10 \text{ mm/s}$.)

Damit ist eine gemeinsame Auswertung der Versuchsergebnisse nicht möglich; sie werden getrennt behandelt.

Die statistische Auswertung wird entsprechend der Zielstellung des vorliegenden Berichtes für die minimalen Reibungszahlen bei vergleichbaren Pressungen (20 N/mm^2 bzw. 40 N/mm^2) geführt.

Die minimale Reibungszahl wird anhand der Versuchsaufzeichnung als kleinster Wert nach Überwinden der Anlaufreibung definiert. Die Oberflächenbeschaffenheit wird in beiden Berichten mit Stahl walzrauh - Stahl spritzverzinkt bzw. zinksilikatbeschichtet beschrieben. Die Oberflächen waren ohne Verschmutzung. Entsprechend den o.a. Auswahlkriterien werden aus /5/ die Versuche Nr. 10-22, 29-34, 38-40, 44-46 und 50-52 ausgewertet und das Ergebnis in Bild 1 dargestellt.

Es wurde eine Normalverteilung angenommen. Die Parameter der Verteilung ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}\mu_f &= 0,295 \\ \sigma_f &= 0,066 \\ v_f &= 0,22\end{aligned}$$

Der charakteristische Wert wird als 5%-Fraktilwert festgelegt. Für die Ermittlung des 5%-Fraktilwertes wird nach /7/ die geringe Datenmenge berücksichtigt und eine Aussagewahrscheinlichkeit von 75% angenommen.

$$\begin{aligned}f_{5\%} &= (\mu_f - K_s \cdot \sigma_f) \\ &= (0,295 - 1,83 \cdot 0,066) \\ &= 0,17\end{aligned}$$

Für die analoge Auswertung der Versuchsergebnisse in /4/ wurden die Versuche Nr. 97-102 ausgewählt.

Das Ergebnis der Auswertung ist in Bild 2 dargestellt.

Der Kuiper-Test bestätigt eine Normalverteilung (NV).

Es wird wegen der geringen Datenmenge und den Empfehlungen in /8/ eine Normalverteilung angenommen.

Die Parameter der Verteilung ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}\mu_f &= 0,53 \\ \sigma_f &= 0,1214 \\ v_f &= 0,23\end{aligned}$$

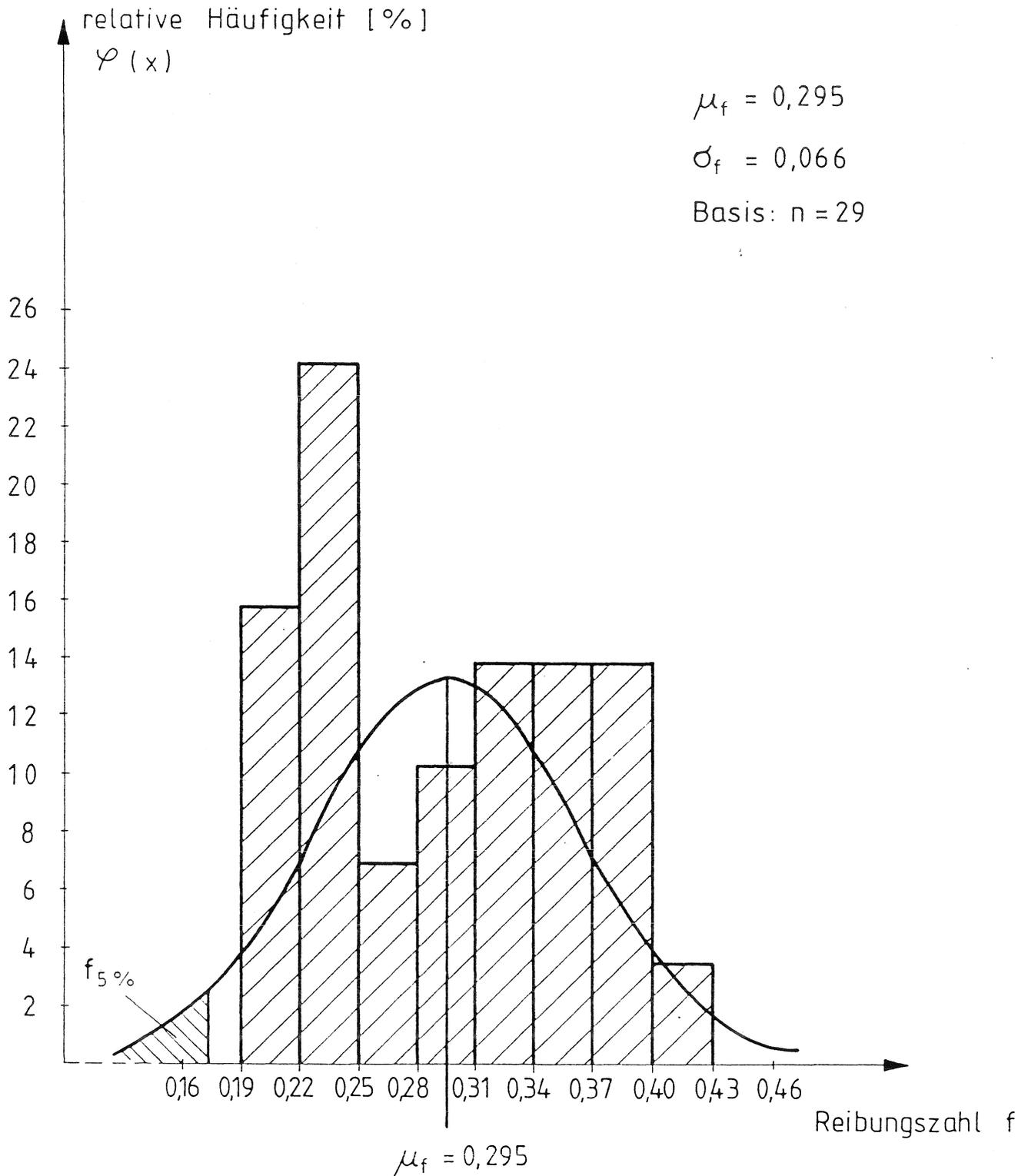


Bild 1 : Auswertung der minimalen Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl / Stahl aus den Versuchen 10-22, 29-34, 38-40, 44-46 und 50-52 in / 5 /

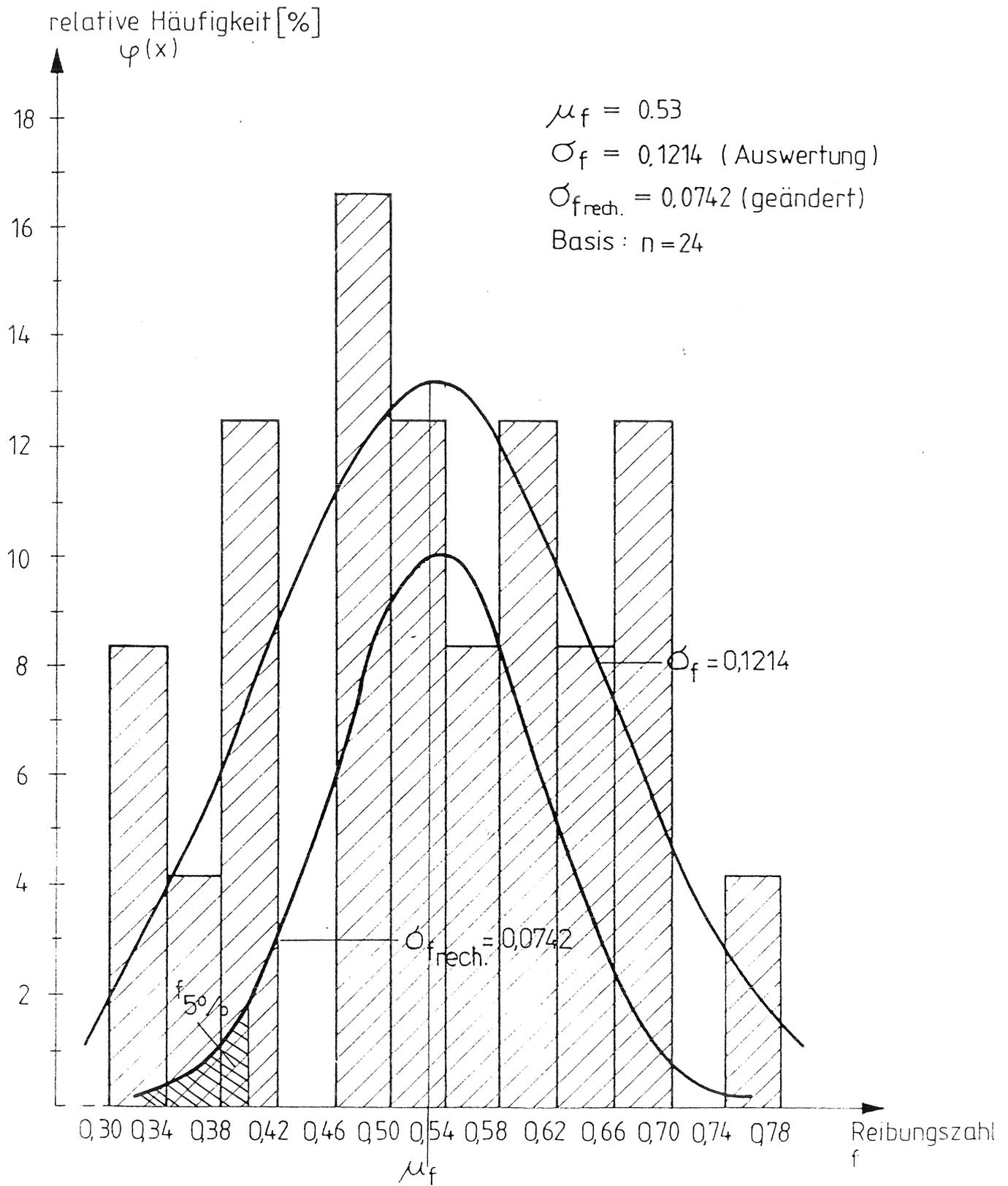


Bild 2 Auswertung der minimalen Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl / Stahl aus den Versuchen 97-102 in /4/

Die Darstellung in Bild 2 und die Parameter der Verteilung weisen eine große Streuung der Versuchsergebnisse aus. Dies ist auf die labormäßigen Versuchsbedingungen, die geringe Anzahl der Versuche und die Spezifik der Reibpaarung Stahl/Stahl zurückzuführen.

Aufgrund der daraus resultierenden hohen Unsicherheiten bei der Abschätzung des charakteristischen Wertes und infolge der Berücksichtigung der baupraktischen Gegebenheiten wird für die weitere Bearbeitung der Variationskoeffizient von $v_f = 0,23$ auf $v_f = 0,14$ gesenkt.

Die Annahme von $v_f = 0,14$ entspricht den Aussagen in /9/ und /10/.

Damit ergeben sich die veränderten Parameter zu

$$\begin{aligned}\mu_f &= 0,53 \\ \sigma_f &= 0,0742 \\ v_f &= 0,14\end{aligned}$$

Der 5%-Fraktilwert als charakteristischer Wert ergibt sich somit zu:

$$\begin{aligned}f_{5\%} = f_k &= (\mu_f - K_s \cdot \sigma_f) \\ &= (0,53 - 1,645 \cdot 0,0742) \\ &= 0,40\end{aligned}$$

Zur Beurteilung der Ergebnisse werden in Tabelle 2 Beschreibungen der zufälligen Eigenschaften der Reibungszahlen Stahl/Stahl aus Literaturangaben zusammengefaßt.

Tabelle 2: Statistische Parameter der Reibungszahl
Stahl/Stahl (Normalverteilung)

lfd. Nr.	Oberflächen Nachbehandlung	Anzahl der Versuche	μ_f	σ_f	v_f	Lit.	$f_{5\%}$
1	graue Eisenzink- schicht, unbe- handelt	32	0,479	0,063	0,131	/8/	0,36
2	graue Eisenzink- schicht mit Alkali- silikat-Zinkstaub- farbe gestrichen	10	0,538	0,046	0,085	/8/	0,44
3	Probekörper mit Anstrich (Alkali- silikat-Zinkstaub- farbe) auf grauer Eisen-Zink-Legierungs- schicht	80	0,605	0,062	0,103	/9/	0,5
4	Probekörper mit Anstrich (w.v.) auf hellglänzender Reinzinkschicht	96	0,589	0,068	0,116	/9/	0,48

Vergleicht man die Mittelwerte in Tabelle 2 mit dem Mittelwert der Versuchsergebnisse aus /4/, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Dagegen weicht der Mittelwert der Reibungszahl nach /5/ dominant ab. Die Ursache für die Abweichung ist die Reibgeschwindigkeit im Versuch.

Der Einfluß der Reibgeschwindigkeit auf den Mittelwert der Reibungszahl bei hohen Pressungen ist signifikant, was durch die Zusammenstellung in Tabelle 3 verdeutlicht wird.

Tabelle 3: Mittelwert der Reibungszahlen der Reibpaarung
Stahl/Stahl nach Auswertung der Versuche
Nr. 10-22, 29-34, 38-40, 44-46, 50-52 nach /5/

Pressung in N/mm ²	Reibgeschwindigkeit \dot{s} in mm/s		
	0,01	0,5	10
20	0,315	keine Versuche	0,250
40	0,377	0,340	0,260

Für die weitere Bearbeitung werden die Ergebnisse der Auswertung nach /4/ mit folgenden Parametern empfohlen:

$$\begin{aligned}\mu_f &= 0,53 \\ \sigma_f &= 0,0742 \\ v_f &= 0,14 \\ f_k &= 0,40\end{aligned}$$

2.2.2. Reibpaarung Stahl/Beton

Die Auswertung der Versuche für die Reibpaarung Stahl/Beton wird nach der minimalen Reibungszahl, wie in 2.2.1. beschrieben, vorgenommen. Zur Auswertung aus /4/ werden die Versuche Nr. 84-89 und 94-96 genutzt.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner wird mit Stahlspritzverzinkt - Beton abgezogen beschrieben.

Für die statistische Auswertung stehen 35 Werte zur Verfügung. Das Ergebnis ist in Bild 3 dargestellt. Der Kuiper-Test bestätigt die Annahme einer Normalverteilung.

Die Parameter ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}\mu_f &= 0,66 \\ \sigma_f &= 0,0483 \\ v_f &= 0,0734\end{aligned}$$

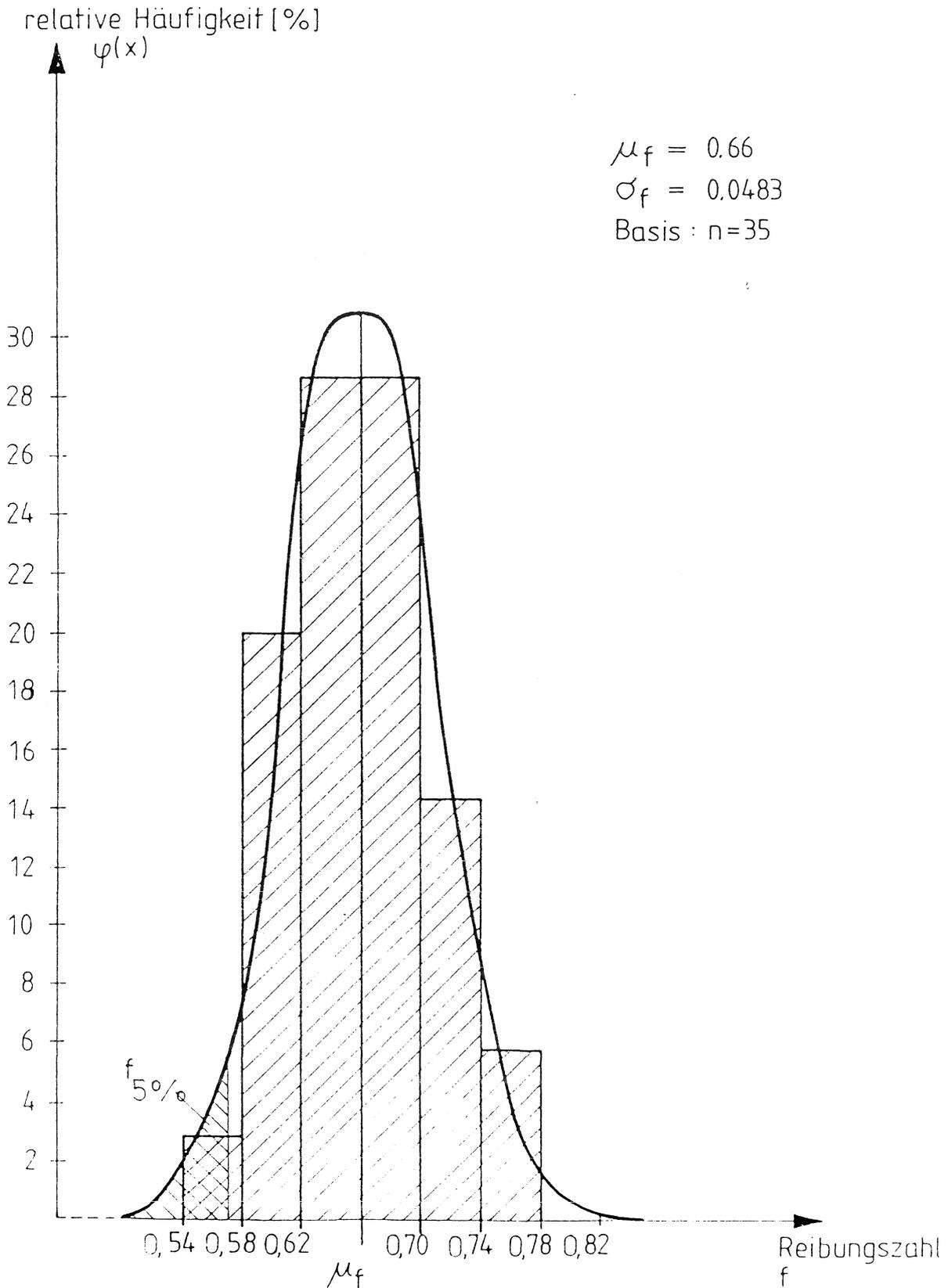


Bild 3 Auswertung der minimalen Reibungszahlen der Reibpaarung Stahl / Beton aus den Versuchen 84 - 89, 94 - 96 in /4/

Der 5%-Fraktilwert ist unter Berücksichtigung der Anzahl der Werte nach /7/ und einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75%

$$f_{5\%} = 0,66 - 1,842 \cdot 0,0483 = 0,57$$

Danach wird der charakteristische Wert der Reibungszahl für die Reibpaarung Stahl/Beton aufgerundet und mit $f_k = 0,6$ angenommen.

Zum Vergleich werden die statistischen Parameter für die entsprechende Reibpaarung aus Literaturangaben in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Tabelle 4: Statistische Parameter der Reibungszahl Stahl/Beton (Normalverteilung)

lfd. Nr.	Anzahl der Versuche	μ_f	σ_f	v_f	Lit.	$f_{5\%}$
1	20	0,766	0,0464	0,0606	/11/	0,686
2	10	0,707	0,0584	0,0826	/11/	0,601
3	16	0,714	0,0795	0,1113	/11/	0,575
4	10	0,612	0,0665	0,109	/11/	0,506
5	10	0,589	0,0215	0,0365	/11/	0,550

Der Vergleich der Angaben in Tabelle 4 mit den Ergebnissen aus der Versuchsauswertung zeigt eine gute Übereinstimmung. Für die weitere Bearbeitung werden deshalb folgende Parameter empfohlen:

$$\mu_f = 0,66$$

$$\sigma_f = 0,0483$$

$$v_f = 0,0734$$

$$f_k = 0,6$$

2.2.3. Reibpaarung Stahl/Holz

Versuche mit der Reibpaarung Stahl/Holz sind in /6/ dokumentiert. Für die angestrebte Zielstellung stehen damit zur Verfügung:

- Versuchsreihe Nr. 13 Holz längs / Stahl mit Walzhaut
(n = 4)
- Versuchsreihe Nr. 14 Holz längs / Stahl mit grundierter
(n = 4) Oberfläche
- Versuchsreihe Nr. 18 Hirnholz / Stahl mit grundierter
(n = 3) Oberfläche

Bei allen genannten Versuchen betrug die Druckspannung $0,6 \text{ N/mm}^2$ und es lag eine Holzfeuchtigkeit von 20 - 25% vor.

Zur Auswertung wurden die genannten 11 Versuche zusammengefaßt und in Bild 4 dargestellt.

Unter der Annahme einer Normalverteilung ergeben sich folgende statistische Parameter:

$$\mu_f = 0,593$$

$$\sigma_f = 0,0936$$

$$v_f = 0,158$$

Der Variationskoeffizient von $v_f = 0,158$ ist mit dem Variationskoeffizienten der Reibpaarung Stahl/Stahl zahlenmäßig vergleichbar.

Die Grundlagen für die Parameter der Verteilungsfunktionen für die Reibungszahlen der Reibpaarungen Stahl/Holz und Stahl/Stahl differieren sehr stark. Für die Reibpaarung Stahl/Holz standen drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit und mit insgesamt 11 Versuchen zu Verfügung.

Das in Bild 4 dargestellte Histogramm ist für eine statistische Auswertung offensichtlich ungeeignet, und eine geführte Literaturrecherche ergab ebenfalls keine geeigneten Angaben.

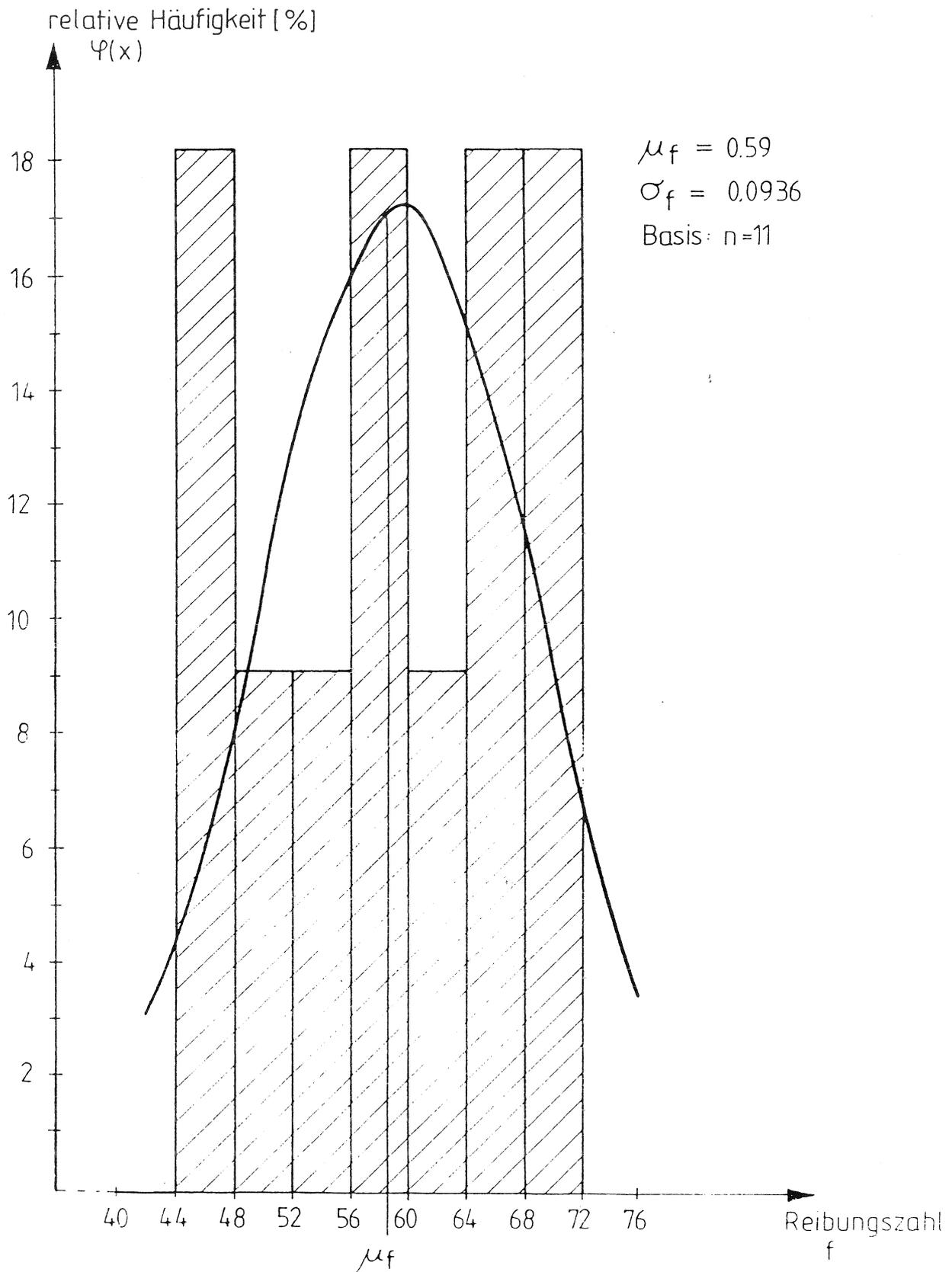


Bild 4 Auswertung der Gleitreibungszahlen der Reibpaarung Stahl/Holz aus den Versuchsreihen 13, 14 und 18 in /6/

Weil eine statistische Auswertung nicht möglich ist, wird für die weitere Bearbeitung, ungeachtet des mangelnden Ausgangsmaterials, auf die Verteilungsfunktion und ihre Parameter der vorgelegten Auswertung von /6/ zurückgegriffen.

Die geringe Qualität dieser Parameter muß jedoch betont werden. Für die Festlegung des charakteristischen Wertes als 5%-Fraktilewert wird deshalb entsprechend den Empfehlungen in /22/ eine höhere Aussagewahrscheinlichkeit (95%) angenommen.

Der charakteristische Wert ergibt sich somit zu:

$$f_{5\%} = \mu_f - K_s \cdot \sigma_f$$
$$= 0,593 - 2,74 \cdot 0,0936 = 0,34$$

und wird mit $f_k = 0,35$ festgelegt.

2.3. Basisvariable Eigengewicht

Für die Beschreibung der zufälligen Eigenschaften des Eigengewichtes gibt es in der Literatur umfangreiche Empfehlungen. Als Verteilungsfunktion wird einheitlich eine Normalverteilung empfohlen. Die angegebenen Variationskoeffizienten schwanken zwischen 0,02 und 0,07 (z.B. /2/, /7/, /11/, /12/). Eine Ursache für die differenten Angaben ist der Anteil an baustellenbedingten Unsicherheiten, die berücksichtigt werden.

Für die weiteren Untersuchungen werden folgende Parameter angenommen:

Eigengewicht Stahlbeton:

$$\mu_G = 25000 \text{ N/m}^3$$
$$\sigma_G = 1750 \text{ N/m}^3$$
$$v_G = 0,07$$

Eigengewicht Stahl:

$$\mu_G = 78500 \text{ N/m}^3$$
$$\sigma_G = 3925 \text{ N/m}^3$$
$$v_G = 0,05$$

Als charakteristischer Wert wird der Mittelwert angenommen.

2.4. Basisvariable Verkehrslast

Für den Gleitsicherheitsnachweis sind die Situationen des Straßenverkehrs relevant, die die ungünstigste Bremslast ergeben. Dieser Situation entspricht der fließende Verkehr mit geringer Stauwahrscheinlichkeit.

Untersuchungen über die Lasten selbst (Radlasten, Achslasten, Fahrzeuggewichte etc.) liegen in größerem Umfang (z.B. in /15/, /16/) vor.

Die zufälligen Eigenschaften der Bremslast werden unter Voraussetzung des Lastmodelles fließender Verkehr und der Fahrzeuglasten über eine Monte-Carlo-Simulation nach /14/ ermittelt. Die Stützweitenabhängigkeit von Beanspruchungen infolge Verkehrslasten auf Brücken zwingt zur Modellrechnung. Als Berechnungsmodell diente ein Einfeldträger mit 60 m Stützweite. Durch die simulierte Überfahrt eines fiktiven Verkehrsstromes entstehen Beanspruchungssozillogramme, die nach der Spitzenwertmethode ausgewertet werden. Aus den so ermittelten Häufigkeitshistogrammen können streuende Eigenschaften der Lastintensität abgeleitet werden. Die Verkehrslasten sind zeitabhängig. Für die mathematische Beschreibung muß deshalb ein Bezugszeitraum T definiert werden. Dieser wird für die vorliegende Untersuchung mit T = 1 Jahr angenommen. Die zufälligen Eigenschaften der Bremslast für eine Einfeldbrücke mit 60 m Stützweite und für den Bezugszeitraum von einem Jahr werden danach wie folgt beschrieben:

- Extremwertverteilung Typ III (Weibull-Verteilung) mit

$$f(x) = \lambda \cdot k (b-x)^{k-1} \cdot \exp(-\lambda (b-x)^k)$$

$$\mu_{Q_x} = 287 \text{ kN}$$

$$\sigma_{Q_x} = 29,77 \text{ kN}$$

$$v_{Q_x} = 0,104$$

$$b = 430 \text{ kN}$$

Die zugehörige Stützkraft folgt den gleichen Gesetzen.

$$\mu_{Q_z} = 855 \text{ kN}$$

$$\sigma_{Q_z} = 88,92 \text{ kN}$$

$$v_{Q_z} = 0,104$$

$$b = 1283 \text{ kN}$$

2.5. Basisvariable Wind

Für den Gleitsicherheitsnachweis ist die statische Windlast (Staudruck q) maßgebend, da die untersuchte Massivbrücke nicht schwingungsanfällig ist.

Der Wind gehört zu den klimatischen Einwirkungen. Diese hängen von der geographischen Situation und von der Lage des Bauwerkes im Gelände ab. In allen Fällen ist der Zufallscharakter an einen Zufallsparameter gebunden, der auf den physikalischen Ursprung der Einwirkung zurückführt. Der Zufallsparameter, aus dem sich die Windeinwirkung ergibt, ist die Windgeschwindigkeit. Für die Beschreibung der streuenden Eigenschaften der Windgeschwindigkeit werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Verteilungsfunktion für den Größtwert der Windgeschwindigkeit ist eine Extremwertverteilung Typ I (Gumbel-Verteilung) /17/, /18/, /2/.
- Der Variationskoeffizient für einen Bezugszeitraum von $T = 50$ Jahren beträgt nach /18/, /2/ $v_{v_W} = 0,09$
- Als Mittelwert der Windgeschwindigkeiten für $T = 50$ Jahre wird für den Fall - Wind ohne Verkehrslast - für eine Höhe

über Gelände von $H = 100$ m, $v_W = 43,8$ m/s angenommen (entspricht Windstärke 12 Beaufort).

- Die resultierenden Parameter der Extremwertverteilung Typ I für $T = 50$ Jahre sind:

$$\mu_{v_W} = 43,8 \text{ m/s}$$

$$\sigma_{v_W} = 3,942 \text{ m/s}$$

$$v_{v_W} = 0,09$$

$$a = 0,3254$$

$$u = 42,0$$

mit $f(x) = a \cdot \exp(-a(x-u) - \exp(-a(x-u)))$

- Die Rückrechnung der Verteilungsfunktion für einen Bezugszeitraum von $T = 1$ Jahr ergibt:

$$\mu_{v_W} = 31,75 \text{ m/s}$$

$$\sigma_{v_W} = 3,942 \text{ m/s}$$

$$v_{v_W} = 0,124$$

$$a = 0,3254$$

$$u = 29,98$$

Da die zufälligen Eigenschaften der Windlast maßgebend durch die zufälligen Eigenschaften der Windgeschwindigkeit bestimmt werden, kann die Windlast über die Funktion $q = 0,613 \cdot v_W^2 / 19$ hinreichend genau beschrieben werden.

3. Das mechanische Modell des Gleitsicherheitsnachweises

Anliegen ist die Gewährleistung der Übertragung von Horizontalkräften in den Fugen zwischen Lagerteilen oder zwischen Lagern und anschließenden Bauteilen, ohne nennenswerten Schlupf.

Bei parallelen Fugen erfolgt die Übertragung von Horizontal-
kräften durch Reibung zwischen den sich berührenden Ober-
flächen bzw. durch Verbindungen dieser (Dübel, Kopfbolzen).

$$F_{xy} = F_z \cdot f + V_a$$

Dabei stellen F_{xy} die äußeren Einwirkungen und $F_z \cdot f + V_a$
den inneren Widerstand dar.

F_{xy} , F_z , f und V_a sind die Basisvariablen für die zuver-
lässigkeitstheoretische Behandlung des Problems. Für die
Fragestellung nach charakteristischem Wert und Teilsicher-
heitsfaktor der Reibung ist das Gleichgewicht zwischen den
äußeren Einwirkungen und der Reibung relevant.

4. Definition des Grenzzustandes und Festlegung des Sicher- heitsmaßes und der zugehörigen Versagenswahrscheinlich- keit

Ist die Übertragung der Horizontalkräfte in den Fugen nicht
gewährleistet, so versagt das Bauwerk. Der Überbau erfährt
eine Lageveränderung. Damit ist der Nachweis der Gleitsicher-
heit ein Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS).
In /17/ werden Sicherheitsindizes für 3 Sicherheitsklassen
empfohlen. Für die Brücke wird die Sicherheitsklasse 2 ange-
nommen. Damit ergibt sich der Sicherheitsindex β für den
Gleitsicherheitsnachweis zu 4.7, was einer Versagenswahr-
scheinlichkeit von 10^{-6} bei einem Bezugszeitraum von $T =$
1 Jahr entspricht.

5. Zuverlässigkeitstheoretische Ermittlung der Teilsicher- heitsbeiwerte

Die Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte erfolgt über die
Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung.

Rackwitz/Fießler/Hawranek /20/ entwickelten hierzu ein
numerisches Verfahren, nach dem der Sicherheitsindex bei

bekannter Verteilungsdichte der Einwirkungen und der widerstehenden Seite berechnet werden kann.

Dieses Iterationsverfahren läßt sich durch folgende 8 Schritte beschreiben:

1. Wahl eines Startvektors $x^{(0)}$ im x -Raum (geeignet ist der Mittelwert)
2. Annäherung aller nicht normalverteilten Zufallsgrößen an eine Normalverteilung, in dem Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion im Punkt $x^{(0)}$ gleichgesetzt werden. Die annähernde Normalverteilung hat die Standardabweichung

$$\sigma_{X_i}^{*(0)} = \frac{1}{f_{X_i}(x_i^{(0)})} \varphi(\Phi^{-1}(F_{X_i}(x_i^{(0)})))$$

und den Mittelwert

$$\mu_{X_i}^{*(0)} = x_i^{(0)} - \sigma_{X_i}^{*(0)} \Phi^{-1}(F_{X_i}(x_i^{(0)})) \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

3. Standardisierung der Basisvariablen $x_i^{(0)}$ zu

$$y_i^{(0)} = \frac{x_i^{(0)} - \mu_{X_i}^{*(0)}}{\sigma_{X_i}^{*(0)}} \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

4. Berechnung des Wertes der Grenzzustandsgleichung und ihrer Ableitungen im Punkt $y^{(0)}$

$$h(y^{(0)}) = g(x^{(0)})$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y_i} \right|_{y=y^{(0)}} = \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x=x^{(0)}} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial y_i} = \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x=x^{(0)}} \cdot \sigma_{X_i}^{*(0)}$$

5. Berechnung der Wichtungsfaktoren $\alpha_i^{(0)}$ und des Sicherheitsindex β mit

$$\alpha_i^{(0)} = \frac{\left. \frac{\partial h}{\partial y_i} \right|_{y=y^{(0)}}}{\left(\sum_{j=1}^m \left(\left. \frac{\partial h}{\partial y_j} \right|_{y=y^{(0)}} \right)^2 \right)^{1/2}} \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

$$\beta^{(0)} = \frac{h(y^{(0)}) - \sum_{j=1}^m y_j^{(0)} \left. \frac{\partial h}{\partial y_j} \right|_{y=y^{(0)}}}{\left(\sum_{j=1}^m \left(\left. \frac{\partial h}{\partial y_j} \right|_{y=y^{(0)}} \right)^2 \right)^{1/2}}$$

6. Damit ergibt sich der verbesserte Näherungsfaktor für den Bemessungspunkt im y -Raum zu

$$y_i^{(1)} = -\alpha_i^{(0)} \cdot \beta^{(0)} \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

7. Durch Rücktransformation in den x -Raum (Originalraum der Basisvariablen) ergibt sich

$$x_i^{(1)} = \mu_{X_i}^*(0) + y_i^{(1)} \sigma_{X_i}^*(0) \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

8. Wiederholung der Schritte 2-7 bis Konvergenz erreicht ist.

Die Folge $x^{(0)}, x^{(1)}, \dots, x^{(k)}, \dots$ konvergiert gegen den Bemessungspunkt $x^*/2/$.

Die Koordinaten des Bemessungspunktes x^* im Originalraum der Basisvariablen x_i^* werden im weiteren Bemessungswerte genannt. Sie dienen zur Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte β_i , mit

$$\beta_i = \frac{x_i^*}{x_k} = \frac{x_d}{x_k} \quad \beta_{m,i} = \frac{x_k}{x_i^*} = \frac{x_k}{x_d}$$

Beanspruchung

Beanspruchbarkeit

Für dieses Verfahren liegt ein Programm für Personalcomputer vor. Es wurden die Grenzzustandsgleichungen des beschriebenen Problems eingefügt. Da der "ungünstige Fall" beurteilt werden muß, wurden folgende Grenzzustandsgleichungen angewandt:

$$F_x - F_z \cdot f = 0$$

F_x = Bremslast

F_z = Eigengewicht plus zugehörige Verkehrslast

f = Reibungszahl

$$F_y - F_z \cdot f = 0$$

F_y = Windlast ohne Verkehr

F_z = Eigengewicht

f = Reibungszahl

In Tabelle 5 sind die Verteilungsparameter und Verteilungstypen der verwendeten Zufallsvariablen zusammengestellt. Es sind die Ausgangswerte der Berechnung.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Ausgangsdaten der Berechnung

lfd. Nr.	Basisvariable	Verteil. typ	Mittelwert μ_{X_i}	Variationskoeffizient v_{X_i}	charakt. Wert
1	Reibungszahl Stahl/ Stahl	NV	0,53	0,14	5%-Fraktilwert
2	Reibungszahl Stahl/ Beton	NV	0,66	0,0734	5%-Fraktilwert
3	Eigengewicht Stahlbeton	NV	25000 N/m ³	0,07	Mittelwert

lfd. Nr.	Basis-variable	Verteil. typ	Mittelwert μ_{X_i}	Variationskoeffizient v_{X_i}	charakt. Wert
4	Eigengewicht Stahl	NV	78500 N/m ³	0,05	Mittelwert
5	Bremslast	Ex-III	287000 N	0,104	hier Mittelwert \neq
6	vertikale Verkehrslast	Ex-III	855000 N	0,104	Mittelwert \neq
7	Windlast	Ex-I	31,75 m/s	0,124	99% Fraktilwert

\neq abweichende Annahme zu /8/, da mathematische Formulierung nur global vorgenommen wurde

Berechnungsergebnisse sind die Bemessungswerte und die Wichtungsfaktoren der einzelnen Basisvariablen.

Die Wichtungsfaktoren sind Ausdruck für den Einfluß der streuenden Größen (Basisvariablen) auf die Sicherheit des betrachteten Grenzzustandes.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen sind die Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungszahlen für die Reibpaarungen Stahl/Stahl, Stahl/Beton und Stahl/Holz bei einem Sicherheitsindex von $\beta = 4,7$.

Zuverlässigkeitstheoretische Berechnungen werden im folgenden nur für die Reibpaarungen Stahl/Stahl und Stahl/Beton geführt. Für die Reibpaarung Stahl/Holz sind, wie schon auf S. 13 dargestellt, die vorliegenden Ausgangsdaten nicht ausreichend und deshalb wird eine zuverlässigkeitstheoretische Berechnung nicht vorgenommen. Für diese Reibpaarung erfolgt eine Abschätzung des Bemessungswertes.

Die Bemessungswerte der Reibungszahlen der Reibpaarungen Stahl/Stahl und Stahl/Beton sind in Abhängigkeit vom Sicherheitsindex β und der gewählten Grenzzustandsgleichung in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Mit wachsendem Sicherheitsindex fallen die Bemessungswerte. Für den Sicherheitsindex von $\beta = 4,7$ sind die entsprechenden Bemessungswerte in den Bildern 5 und 6 gekennzeichnet und in Tab. 6 zusammengefaßt. Die zugehörigen Wichtungsfaktoren sind ebenfalls in Tab. 6 enthalten. Die in Abschnitt 2.2. vereinbarten charakteristischen Werte der Reibungszahlen führen in Zusammenhang mit den Bemessungswerten zu den Teilsicherheitsbeiwerten.

Tabelle 6: Charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungszahlen

Grenzzustands- gleichung	Reib- paarung	Wichtungs- faktor α_i	charakt. Wert $f_{k,i}$	Bemessungs- wert $f_{d,i}$	Teilsicher- heitsbeiwert $\gamma_{m,f,i}$
Bremslast	Stahl/ Stahl	0,9	0,4	0,2	2,0
	Stahl/ Beton	0,7	0,6	0,5	1,2
Windlast	Stahl/ Stahl	0,4	0,4	0,38	1,05
	Stahl/ Beton	0,2	0,6	0,62	0,97

Die Ergebnisse der Berechnungen für die Grenzzustandsgleichung-Windlast (Bemessungswerte und Teilsicherheitsbeiwerte) bedürfen einer Deutung. Die Bemessungswerte der Reibungszahlen weichen kaum von deren charakteristischen Werten ab. Die vorhandene Beanspruchung (Windlast) erfordert eine Beanspruchbar-

Bemessungswerte

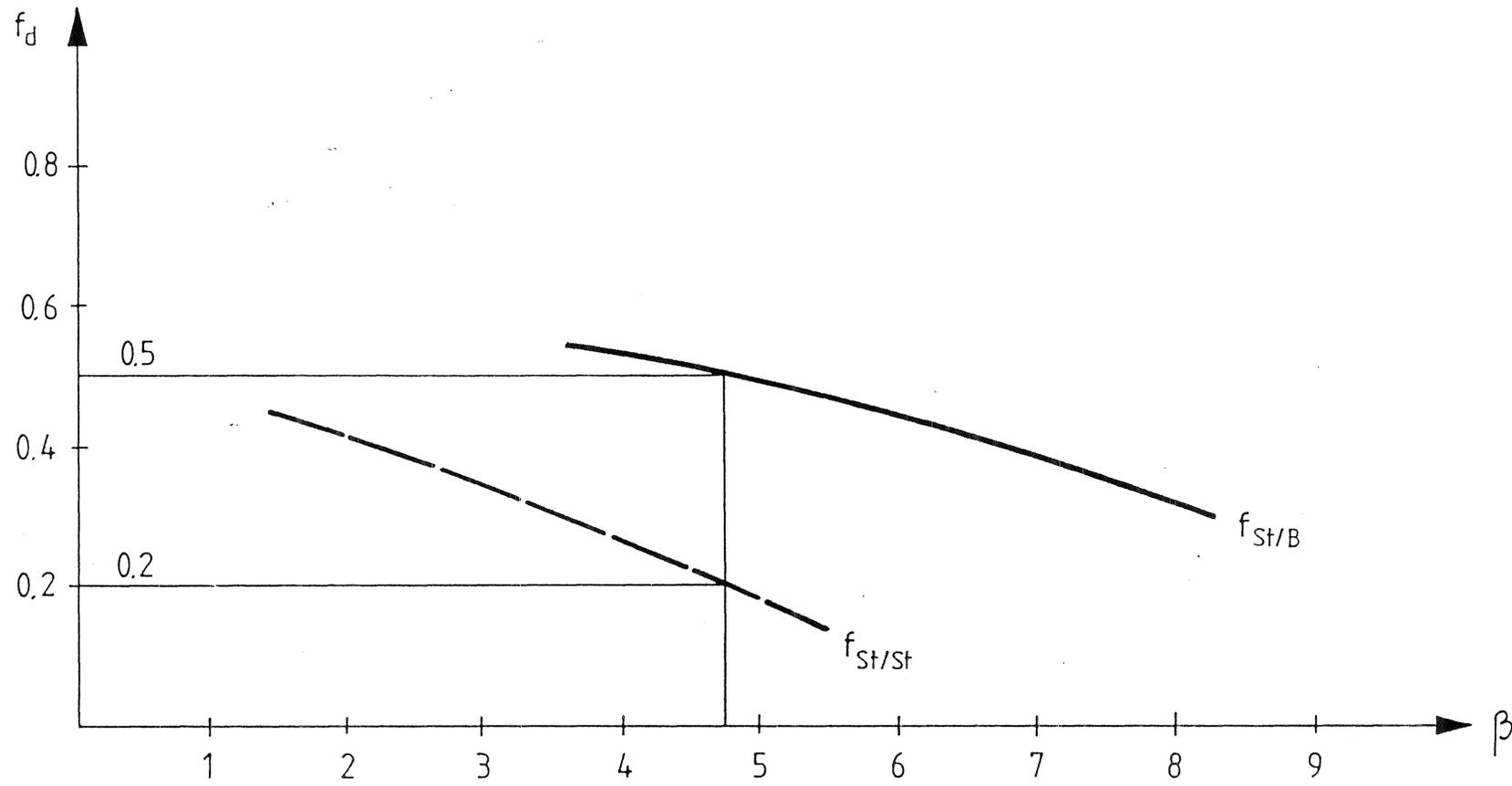


Bild 5 Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung für die Grenzzustandsgleichung - Bremslast

Bemessungswerte

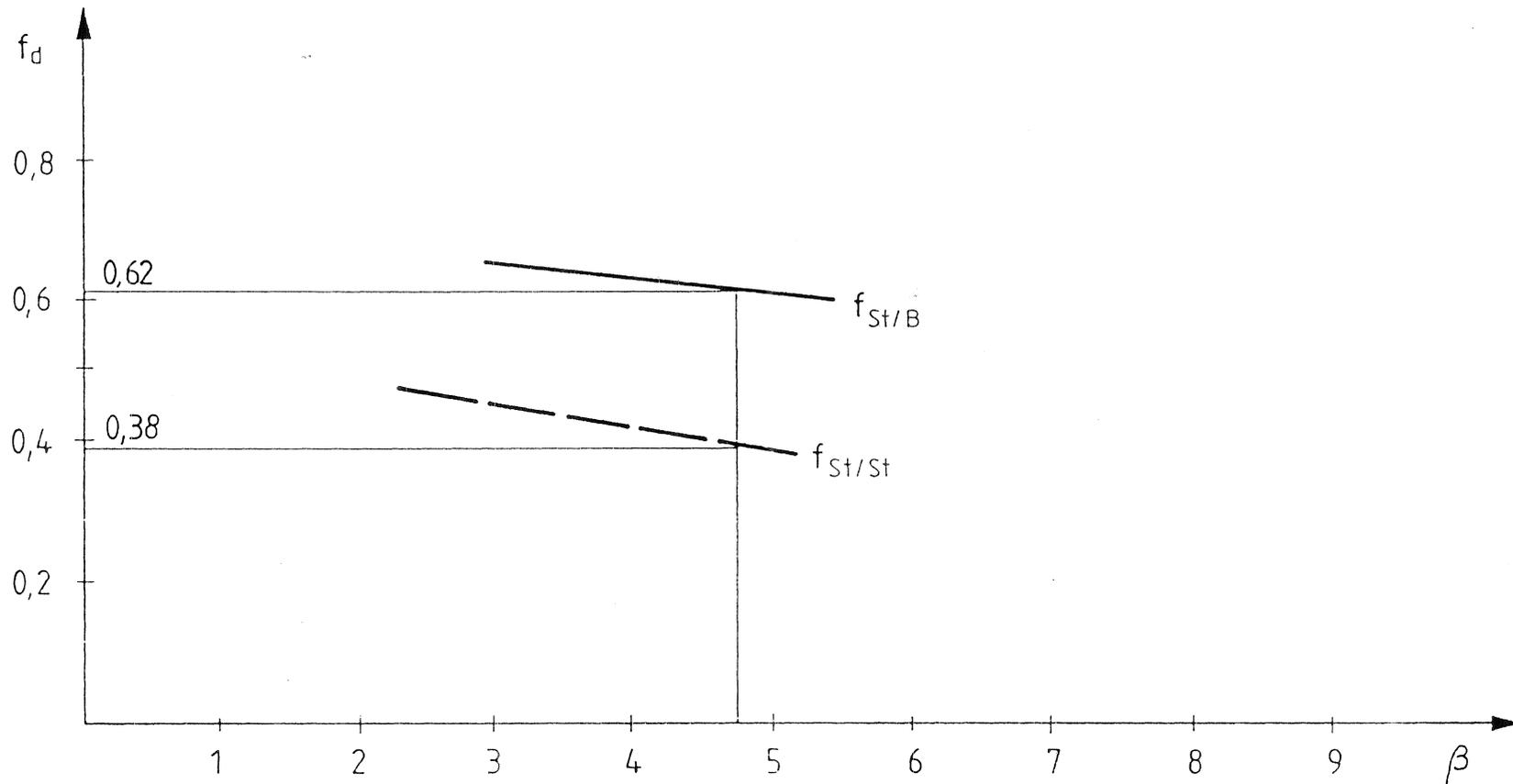


Bild 6 Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung für die Grenzzustandsgleichung - Windlast

keit ($f_i \cdot F_z$), bei der die Reibungszahl f_i über dem 5%-Fraktilwert liegt. Dies ist ein unsicheres Ergebnis. Die Horizontalkräfte können praktisch nicht durch Reibung übertragen werden. Für diesen als ungünstigen Modellfall gedachten Ansatz müssen zusätzlich Festhaltungen (z.B. Dübel) zur Übertragung der Horizontalkraft herangezogen werden. Die Bemessungswerte dieser Grenzzustandsgleichung sind für die angestrebte Zielstellung nicht relevant.

Der maßgebende Ansatz für die Ermittlung von Bemessungswerten und Teilsicherheitsbeiwerten der Reibungszahlen für den Gleitsicherheitsnachweis ist bei dem gewählten System die Grenzzustandsgleichung - Bremslast.

Die Ergebnisse zu den weiteren beteiligten Zufallsgrößen werden nur kurz diskutiert.

Für das Eigengewicht ergibt sich bei Annahme einer Normalverteilung und Festlegung des charakteristischen Wertes als Mittelwert ein Teilsicherheitsbeiwert von $\mu_{m,G} = 1,1$. Damit wird die Stellung des Eigengewichtes in der Nachweisgleichung auf der Seite der Beanspruchbarkeit deutlich.

Für die Bremslast ergibt sich bei Annahme einer Extremwertverteilung Typ III und der Festlegung des charakteristischen Wertes als Mittelwert ein Teilsicherheitsbeiwert von $\mu_{Q_x} = 1,2$. Die Unsicherheit der mathematischen Beschreibung der zufälligen Eigenschaften der Verkehrslast sind bekannt. Die Komplexität der Einflußparameter zwingt zu Vereinfachungen. Das Ergebnis wird als annehmbarer Trend eingeschätzt.

6. Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungszahlen nach /7/

In /7/ wird ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte empfohlen. Die Vereinfachung besteht in der Empfehlung der Wichtungsfaktoren. Somit kann für die Beanspruchbarkeit (Festigkeit) bei Kenntnis der Parameter der Basisvariablen und Definition der charakteristischen Werte global ein Wichtungsfaktor von $\alpha_i = 0,8$ angenommen werden.

Die Empfehlung $\alpha_i = 0,8$ wird unabhängig von den zufälligen Eigenschaften der Basisvariablen und einer Grenzzustandsgleichung gegeben. Der Unterschied zu den Wichtungsfaktoren der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung ist durch einen Vergleich mit Tab. 6 (Grenzzustandsgleichung-Bremslast) erkennbar.

Unter der Annahme von $\alpha_i = 0,8$ ergibt sich der Bemessungswert zu:

$$f_d = \mu_f - 0,8 \cdot \beta \cdot \sigma_f$$

Der Teilsicherheitsbeiwert ist somit

$$\gamma_{m,f} = \frac{f_k}{f_d}$$

Für die Reibungszahlen der untersuchten Reibpaarungen ergeben sich danach bei einem Sicherheitsindex von $\beta = 4,7$ folgende Teilsicherheitsbeiwerte:

a) Reibpaarung Stahl/Stahl

$$\mu_f = 0,53 \quad \sigma_f = 0,0742 \quad f_k = 0,4$$

$$f_d = 0,53 - 0,8 \cdot 4,7 \cdot 0,0742 = 0,251$$

$$\gamma_{m,f} = \frac{0,4}{0,251} = 1,59$$

b) Reibpaarung Stahl/Beton

$$\mu_f = 0,66 \quad \sigma_f = 0,0483 \quad f_k = 0,6$$

$$f_d = 0,66 - 0,8 \cdot 4,7 \cdot 0,0483 = 0,48$$

$$\gamma_{m,f} = \frac{0,6}{0,48} = 1,25$$

c) Reibpaarung Stahl/Holz

$$\mu_f = 0,593 \quad \sigma_f = 0,0936 \quad f_k = 0,35$$

$$f_d = 0,593 - 0,8 \cdot 4,7 \cdot 0,0936 = 0,24$$

$$\gamma_{m,f} = \frac{0,35}{0,24} = 1,45$$

In Tab. 7 sind die bisher vorliegenden Ergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 7: Bemessungswerte und Teilsicherheitsbeiwerte der Reibungszahlen nach /7/ und der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung

Reibpaarung	charakt. Wert f_k	Bemessungswert f_d und Teilsicherheitsbeiwert $\beta_{m,f}$ nach zuverlässigkeitstheoretische Berechnung			
		f_d	$\beta_{m,f}$	/7/	
		f_d	$\beta_{m,f}$	f_d	$\beta_{m,f}$
Stahl/Stahl	<u>0,4</u>	<u>0,2</u>	<u>2,0</u>	0,251	1,59
Stahl/Beton	<u>0,6</u>	<u>0,5</u>	<u>1,2</u>	0,48	1,25
Stahl/Holz	<u>0,35</u>	k.A.	k.A.	<u>0,24</u>	<u>1,45</u>

Die Ergebnisse der beiden Berechnungsverfahren sind kaum different.

Der empfohlene Wichtungsfaktor nach /7/ von $\alpha_i = 0,8$ kann damit auch für die Reibungszahlen im Nachweis der Gleitsicherheit als genügend genau eingeschätzt werden.

Die unterstrichenen Werte in der Tab. 7 sind für die Anwendung zu empfehlen.

7. Spiegelung der empfohlenen Werte an Normfestlegungen zu den Reibungszahlen für den Gleitsicherheitsnachweis

Die auf der Basis der zuverlässigkeitstheoretischen Betrachtungen empfohlenen Werte der Reibungszahlen werden im folgenden mit entsprechenden Normfestlegungen (DIN 4141 /1/, Entwurf prEN, T. 1 /23/) verglichen.

Da den Normfestlegungen unterschiedliche Sicherheitskonzepte

zugrunde liegen, ist ein direkter Vergleich der Reibungszahlen nicht möglich.

Zur quantitativen Abschätzung des Sicherheitsabstandes in den Nachweisgleichungen in /1/ und /23/ wird ein fiktiver Bemessungswert der Reibungszahl f^f eingeführt.

Der fiktive Bemessungswert hat keinerlei praktische Bedeutung für den Nachweis. Eine Zusammenstellung der Nachweisgleichungen, der Reibungszahlen und der fiktiven Bemessungswerte zeigt Tab. 8.

Die in Tab. 8 ausgewiesenen fiktiven Bemessungswerte für die Reibungszahlen der Reibpaarungen Stahl/Stahl und Stahl/Beton erreichen nach /1/, /23/ und der Empfehlung die gleiche Größenordnung. Damit wird der gegenwärtig vorliegende Erfahrungsbereich nicht verlassen.

Für die Festlegungen der Reibungszahlen in /1/ und für die mathematische Beschreibung der zufälligen Eigenschaften der Reibungszahlen der vorgelegten Berechnung wurden die gleichen Ausgangsdaten /4/ verwendet.

Die fiktiven Bemessungswerte der Reibungszahl für die Reibpaarung Stahl/Holz differieren um 50%.

Dabei wurde der Wert der Reibungszahl für den Vergleich aus /3/ entnommen und in die Nachweisgleichung nach /1/ eingesetzt. Diese Vorgehensweise ist unkorrekt. Deshalb ist der zahlenmäßige Vergleich nur eingeschränkt gültig. Die Ausgangsdaten zur Festlegung der Reibungszahl in /3/ und in den Empfehlungen basieren auf /6/. Die Ausgangsdaten in /6/ sind für eine statistische Auswertung nicht hinreichend. Die Qualität des auf dieser Basis vereinbarten charakteristischen Wertes kann damit nicht beurteilt werden.

Die dennoch gegebene Empfehlung für die praktische Anwendung (s. Tab. 7) entspricht dem gegenwärtigen Erkenntnisstand.

Tabelle 8: Vergleich der empfohlenen Werte mit Normfestlegungen

	DIN 4141, Teil 1 /1/	Entwurf prEN, Teil 1 /23/	Empfehlung
Nachweisgleichung	$\nu \cdot F_{xy} \leq f \cdot F_z + D$ <p>Bezeichnungen nach /1/ mit $f = 0,2$ für Stahl/Stahl $f = 0,5$ für Stahl/Beton $f = 0,5$ für Stahl/Holz nach /3/ und $\nu = 1,5$</p>	$S_{xyd} \leq R_{xyd} \text{ mit } R_{xyd} = \frac{f_k \cdot N_{zd}}{\gamma_d \cdot \gamma_{m,f}} + \frac{V_{a,k}}{\gamma_{m,a}}$ <p>Bezeichnungen nach /23/ mit $f_k = 0,3$ für Stahl/Stahl $f_k = 0,65$ für Stahl/Beton und $\gamma_{m,f} = 1,5$ $\gamma_d = 1,5$ (gemittelter Lastfaktor)</p>	<p>mit $f_k = 0,4, \gamma_{m,f} = 2,0$ Stahl/Stahl $f_k = 0,6, \gamma_{m,f} = 1,2$ Stahl/Beton $f_k = 0,35, \gamma_{m,f} = 1,45$ Stahl/Holz und $\gamma_d = 1,5$ (gemittelter Lastfaktor)</p>
fiktiver Bemessungswert f^f für $D = 0$ bzw. $V_{a,k} = 0$	$f^f = \frac{f}{\nu}$ <p>Stahl/Stahl $f^f_{St/St} = 0,13$ Stahl/Beton $f^f_{St/B} = 0,33$ Stahl/Holz $f^f_{St/H} = 0,33$</p>	$f^f = \frac{f_k}{\gamma_{m,f} \cdot \gamma_d}$ <p>Stahl/Stahl $f^f_{St/St} = 0,13$ Stahl/Beton $f^f_{St/B} = 0,29$ keine Angabe</p>	<p>Stahl/Stahl $f^f_{St/St} = 0,13$ Stahl/Beton $f^f_{St/B} = 0,33$ Stahl/Holz $f^f_{St/H} = 0,16$</p>

8. Empfehlung zu den Bemessungswerten der Reibungszahlen für
die praktische Anwendung (Zusammenfassung)

Für die Reibpaarungen Stahl/Stahl und Stahl/Beton werden unter Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung die Bemessungswerte der Reibungszahlen ermittelt.

Als charakteristische Werte dienen die 5%-Fraktilwerte. Eine Spiegelung der Ergebnisse an den Festlegungen der DIN 4141 /1/ und Entwurf prEN /23/ zeigt ihre Einordnung in den vorliegenden Erfahrungsbereich. Sie werden deshalb für die praktische Anwendung in den Nachweisgleichungen des Sicherheitskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten empfohlen.

Reibpaarung	f_k	f_d	$\mu_{m,f}$
Stahl/Stahl	0,4	0,2	2,0
Stahl/Beton	0,6	0,5	1,2

Die Ermittlung der Bemessungswerte nach den Empfehlungen in /7/ führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Die allgemein für Festigkeiten in /7/ empfohlene näherungsweise Ermittlung der Bemessungswerte kann somit auch für die Reibungszahlen im Rahmen des Gleitsicherheitsnachweises angewandt werden.

Für die Reibpaarung Stahl/Holz ist wegen mangelnder Ausgangsdaten die Beschreibung der zufälligen Eigenschaften der Reibungszahl nur eingeschränkt möglich. Deshalb wurde für die Ermittlung des Bemessungswertes auf eine zuverlässigkeitstheoretische Berechnung verzichtet. Der Bemessungswert für diese Reibpaarung ist eine Abschätzung auf der Basis der Empfehlungen in /7/.

Reibpaarung	f_k	f_d	$\mu_{m,f}$
Stahl/Holz	0,35	0,24	1,45

Die praktische Anwendung dieser Werte kann nur bedingt empfohlen werden. Sie entsprechen dem gegenwärtigen Erfahrungsbereich, dieser ist jedoch gering.

9. Hinweise auf offene Probleme

In den Abschnitten 2.2.3, 6. und 7. werden mehrfach die Schwierigkeiten der mathematischen Formulierung der zufälligen Eigenschaften der Reibungszahl für die Reibpaarung Stahl/Holz erwähnt. Zur Klärung dieses Sachverhaltes sind Reibversuche erforderlich. Sofern die Reibpaarung Stahl/Holz für den Gleitsicherheitsnachweis relevant ist, müssen die Reibversuche die entsprechenden baupraktischen Randbedingungen erfüllen (Pressung, Oberflächenbeschaffenheit, Reibgeschwindigkeit). Die Anzahl der Einzelversuche sollte nicht unter $n = 20$ liegen.

Abschließend sei noch eine Bemerkung zum globalen Problem der Darstellungsform der Nachweisgleichungen nach /23/ gestattet. Die Gleichung der Gleitsicherheit in Fugen in /23, Abschnitt 4.1.2./ beinhaltet sowohl charakteristische Werte mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten als auch Bemessungswerte. Für die praktische Anwendung kann das zu Fehldeutungen führen. Es wird empfohlen nur eine der genannten Varianten durchgängig anzuwenden.

Wegen der unterschiedlichen Bedeutung des Begriffes Bemessungswert in Abhängigkeit von seiner Stellung in der Nachweisgleichung wird die Anwendung von charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten als günstig eingeschätzt. Die Nachweisgleichung hat dann folgende Form:

$$S_{xyd} \leq R_{xyd}$$
$$S_{xyd} = S(F_{xy} \cdot \gamma_F)$$
$$R_{xyd} = \frac{f_k \cdot N_{zk}}{\gamma_{m,f} \gamma_{m,F}} + \frac{V_{a,k}}{\gamma_{m,a}}$$

Dabei ist $\gamma_{m,F}$ der Teilsicherheitsbeiwert für die Kraft rechtwinklig zur Fuge, wobei diese Kraft Teil der Beanspruchbarkeit ist.

Für $\beta_{m,F}$ wird auf der Basis der vorliegenden zuverlässigkeitstheoretischen Berechnungen empfohlen:

$$\text{Eigengewicht : } \beta_{m,G} = 1,1$$

$$\text{Verkehrslast : } \beta_{m,Q} = 1,0$$

Der in /23/ definierte gemittelte Lastfaktor β_d hat eine andere Bedeutung. Er ist für die vorgeschlagene Nachweisgleichung nicht erforderlich; bei Anwendung der Gleichung in /23/ muß $\beta_{m,F}$ zusätzlich eingeführt werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ DIN 4141 Sept. 1984. Lager im Bauwesen.
Allgemeine Regelungen
- /2/ Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen.
Berlin: Verlag für Bauwesen, 1987
- /3/ DIN 4421 Aug. 1982. Traggerüste. Berechnung,
Konstruktion und Ausführung
- /4/ Schrage, I.: Versuche zur Ermittlung zulässiger Hori-
zontalkräfte bei unverankerten Lagern / RWTH Aachen.
Aachen: 1978.- (Abschlußbericht F 88)
- /5/ Schrage, I.: Reibungsverhalten von zinkbeschichteten
Lagerbauteilen / RWTH Aachen. Aachen: 1982.- (Abschluß-
bericht F 152)
- /6/ Möhler, K., Herröder, W.: Ermittlung von oberen und
unteren Reibungsbeiwertgrenzen für den Gleitsicherheits-
nachweis bei Traggerüsten (DIN 4421) / TU Karlsruhe.
Karlsruhe: 1978
- /7/ Eurocode 3, Annex Z 1990. Procedure for the
determination of design resistance from tests
- /8/ König, G., Hosser, D., Schobbe, W.: Sicherheitsan-
forderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen
nach den Empfehlungen des NABau - eine Erläuterung.
In: Der Bauingenieur 57 (1982) H. 2, S. 69 - 78
- /9/ Zimmermann, W., Rostasy, F.S.: Der Reibbeiwert feuer-
verzinkter HV-Verbindungen in Abhängigkeit von der Nach-
behandlung der Zinkschicht. In: Der Stahlbau. 44 (1975)
H. 3, S. 82 - 84
- /10/ Zimmermann, W., Rostasy, F.S.: Der Reibbeiwert be-
lasteter und unbelasteter HV-Verbindungen. In: Der
Stahlbau 46 (1977) H. 3, S. 91 - 94
- /11/ Roik, K., Bürkner, K.-E.: Reibwert zwischen Stahl-
gurten und aufgespannten Betonfestigkeiten. In: Der
Bauingenieur. 53 (1978) H. 2, S. 37 - 41

- /12/ König, G., Hosser, D.: Praktische Beispiele und Hinweise zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen nach den Empfehlungen des NABau. In: Der Bauingenieur. 57 (1982) H. 12, S. 459 - 467
- /13/ Vrouwenvelder, A., Siemens, A.: Probabilistic Calibration Procedure for the Derivation of Partial Safety Factors for the Netherlands Building Codes. In: Heron. Vol. 32 (1987) No. 4, S. 9 - 29
- /14/ Spaethe, G.: Erweiterung und Verbesserung des Simulationsmodells zur Berechnung von Beanspruchungskollektiven von Straßenbrücken als Grundlage für die Anwendung im Betriebsfestigkeitsnachweis / VEB Entwurfs- und Ingenieurbüro des Straßenwesens. Berlin. - (Forschungsbericht)
- /15/ Spaethe, G.: Beanspruchungskollektive von Straßenbrücken. In: Die Straße. 17 (1977) H. 6, S. 241 - 246
- /16/ Pohl, S.: Ermittlung von Straßenverkehrsdaten; Anlage 1 zum Abschlußbericht des Forschungsauftrages: Betriebsfestigkeit von Straßenbrücken / VEB Entwurfs- und Ingenieurbüro des Straßenwesens, Direktionsbereich Forschung und Rationalisierung, Fachbereich Brücke. Berlin: 1978. - (Forschungsbericht)
- /17/ Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. Berlin: Beuth Verlag, 1981
- /18/ Hosser, D.: Tragfähigkeit und Zuverlässigkeit von Stahlbetondruckgliedern. Berlin-München-Düsseldorf: Ernst, 1978. - (Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau der TH Darmstadt, Heft 28)
- /19/ Intern. System einheitlicher technischer Baubestimmungen Bd. I, Einheitliche Regeln für verschiedene Bauarten und Baustoffe / Comite Euro-International du Beton (CEB). Paris, 1976. - (Bulletin d' Information; Nr. 116.-D.)

- /20/ Fießler, B., Hawranek, H., Rackwitz, R.: Numerische Methoden für probabilistische Bemessungsverfahren und Sicherheitsnachweise. München, 1976. - (Berichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke; 14)
- /21/ Frenzel, B.: Beitrag zur Kombination der Einwirkungen aus Verkehr und Temperatur an Spannbetonbrücken. Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Fak. Bauingenieurwesen, Diss., 1991
- /22/ Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen und Zulassungsverfahren / Institut für Bautechnik. Berlin, 1986
- /23/ Entwurf prEN Teil 1 Feb. 1991. Lager im Bauwesen, Allgemeine Regelungen

Determination of the characteristically values of the friction coefficients

7 2368

Summary

Between bearings or between bearing and the connected construction elements should be transmitted horizontal forces. Where reliance is placed on friction to resist these forces the value of friction coefficients obtained from available test data appropriate to the surface condition should be assumed. Therefore should be known the characteristically values and partial safety coefficients of friction. These values are determining for guides steel on steel, steel on concrete and steel on wood on the following way:

1. Applying statistical methods on the test data given in /1/, /2/, /3/ to determine the distribution function considering their parameter of the friction coefficient, where
/1/ for steel on concrete
/1/ and /2/ for steel on steel
/3/ for steel on wood.
2. Using the 5%-fraction as the characteristically value
3. Using simulated calculations and literature analysis to determine the distribution functions considering their parameter for the further base variable.
4. Determination of the category of safety for bridges and the accepted safety index β as 4,7.
5. Applying the procedure of /4/ to determine the theoretical reliability of the partial safety coefficient to the guides steel on steel and steel on concrete.
6. Determination of the partial safety coefficient to the guide steel on wood in reference to /5/.

The results are shown in the following table.

frictional coupling	distribution type	mean value	variation coefficient	characteristic value	partial safety coefficient
steel/steel	normal	0,53	0,14	0,4	2,0
steel/concrete	"	0,66	0,0734	0,6	1,2
steel/wood	"	0,593	0,158	0,35	1,45

The surface condition is given as following.

steel on steel - rough rolled steel - steel sprayed with zinc
steel on concrete - steel sprayed with zinc - screeded concrete
steel on wood - steel with primed surface - longitudinally wood.

This work was supported by the Institute of Construction Technique Berlin.

Literature:

- /1/ Schrage, I.: Versuche zur Ermittlung zulässiger Horizontalkräfte bei unverankerten Lagern / RWTH Aachen. Aachen: 1978.- (Abschlußbericht F 88)
- /2/ Schrage, I.: Reibungsverhalten von zinkbeschichteten Lagerbauteilen / RWTH Aachen. Aachen 1982.- (Abschlußbericht F 152)
- /3/ Möhler, K., Herröder, W.: Ermittlung von oberen und unteren Reibungsbeiwertgrenzen für den Gleitsicherheitsnachweis bei Traggerüsten (DIN 4421) / TU Karlsruhe. Karlsruhe: 1978
- /4/ Fießler, B., Hawranek, H., Rackwitz, R.: Numerische Methoden für probabilistische Bemessungsverfahren und Sicherheitsnachweise. München, 1976. - (Berichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke; 14)
- /5/ Eurocode 3, Annex Z 1990. Procedure for the determination of design resistance from tests

La détermination de certitude théorique des sollicitations
au joint de dilatation

T 2368

Résumé

La justification de sécurité de glissement chez les appuis se porte garant de la transmission des forces horizontales entre les parts de l'appui ou entre les appuis et les éléments de construction qui se sont ajoutés par frottement et le cas échéant par les liaisons avec un convenable grade de sécurité. Les valeurs caractéristiques et les partiels facteurs de sécurité du coefficient de frottement sont nécessaires pour cette justification dans le cadre d'Eurocode. Ces valeurs sont disposées pour les couples de frottement acier/acier, béton/acier, et bois/acier après le moyen suivant

1. La détermination des fonctions des distributions et leurs paramètres pour les coefficient de frottements par les utilisations statistiques des expériences de frottements dans /1/ pour acier/béton,
/1/ et /2/ pour acier/acier,
/3/ pour acier/bois.
2. La fixation des valeurs caractéristiques comme 5% fractions.
3. La détermination des fonctions des distributions et leurs paramètres pour les autres variables des bases par le calcul de simulation et l'analyse de la littérature
4. La fixation de classe de sécurité pour les ponts et l'adoption au index de sécurité β égal 4,7
5. La détermination de certitude théorique des partielles facteurs de sécurité en employant les procédés de /4/
6. La détermination des partielles facteurs de sécurité en gardant les points 1 jusqu'à 4 après /5/

Les résultats sont mises ensemble dans le tableau suivant.

Numero d'ordre	le couple de frottements	le type de distribution	la valeur moyenne	le coefficient de variation	la valeur caractéristique	le partiel facteur de sécurité
1.	acier/acier	distribution normal	0,53	0,14	0,4	2,0
2.	acier/béton	"	0,66	0,0734	0,6	1,2
3.	acier/bois	"	0,593	0,158	0,35	1,45

Les résultats sont dérivées des valeurs des expériences.
La constitution superficielle des couples de frottements est démontrée comme suit.

acier/acier - acier brut laminé - acier pulvérisé au zinc
acier/béton - acier pulvérisé au zinc - béton lissé
acier/bois - acier avec une surface du fond - bois au long

Le projet était soutenu de l'institut technique de construction.

littérature:

- /1/ Schrage, I.: Versuche zur Ermittlung zulässiger Horizontalkräfte bei unverankerten Lagern / RWTH Aachen. Aachen: 1978.- (Abschlußbericht F 88)
- /2/ Schrage, I.: Reibungsverhalten von zinkbeschichteten Lagerbauteilen / RWTH Aachen. Aachen 1982.- (Abschlußbericht F 152)
- /3/ Möhler, K., Herröder, W.: Ermittlung von oberen und unteren Reibungsbeiwertgrenzen für den Gleitsicherheitsnachweis bei Traggerüsten (DIN 4421) / TU Karlsruhe. Karlsruhe: 1978

- /4/ Fießler, B., Hawranek, H., Rackwitz, R.: Numerische Methoden für probabilistische Bemessungsverfahren und Sicherheitsnachweise. München, 1976. - (Berichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke; 14)
- /5/ Eurocode 3, Annex Z 1990. Procedure for the determination of design resistance from tests