Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 36 (1976)

Artikel: Reibungsmessungen an Gleitlagern
Autor: Favre, R. / Kropf, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-925

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

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

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

Download PDF: 11.12.2025

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

Reibungsmessungen an Gleitlagern

Friction Tests on sliding bearings

Mesures du frottement d'appuis glissants

R. FAVRE
Professor für Betontragwerke
Eidg. Technische Hochschule
Lausanne (Schweiz)

P. KROPF
Partner im Ingenieurbüro
Schalcher und Partner
Zürich (Schweiz)

1. Zweck der Versuche

Die rund 1500 m lange, sechsspurige Sihlhochstrasse wurde im Herbst 1974 dem Verkehr übergeben. Sie ist ein Bestandteil der mitten durch die Stadt Zürich geführten Expressstrasse, welche die bis an den Stadtrand gebauten Autobahnen miteinander verbinden wird. Sie bildet mit ihren Anschlussbauwerken eine Brückenfläche von 50000 m^2 und folgt bei Spannweiten von 42,4 m bis 57,8 m dem Flusslauf der Sihl [1].

Aus flussbaulichen Gründen (grosse Hochwasser und Eisschollenbildung) mussten die Abmessungen der Pfeiler gering gehalten werden. Andererseits wurden zur Verminderung des Unterhaltes möglichst wenige Dilatationsfugen gewählt. Es ergab sich damit ein mittlerer Dilatationsabschnitt von 821 m, dessen Festpunkt durch drei Pfeilerpaare mit festen Neotopflagern gebildet wird. Die Beanspruchung dieser Pfeiler wird nun hauptsächlich durch die Reibungskräfte erzeugt, die in den flussaufwärts bzw. -abwärts liegenden Gleitlagern entstehen. Wenn auch letzten Endes nur der Reibungsunterschied zwischen Oberwasser und Unterwasser massgebend ist, so ist doch klar ersichtlich, dass man sich zuerst für den Absolutwert der Reibung interessiert. Für den statischen Nachweis der Pfeiler mit beweglichen Lagern muss er ohnehin bekannt sein.

Wie im modernen Brückenbau immer öfter, wurden auch hier anstelle von Rollenlagern Gleitlager eingebaut, wobei die Gleitschicht aus Polytetrafluoräthylen (PTFE) besteht. Die von der Firma Proceq gelieferten Lager besitzen eine PTFE-Gleitschicht mit dem Handelsnamen «Teflon».

Der Zweck der nachfolgend beschriebenen Lagerversuche bestand darin, die angenommenen Rechenwerte der Reibungskoeffizienten μ zu überprüfen. Diese Rechenwerte stützen sich in der Schweiz auf den Angaben des Standardkataloges D 340 «Konstruktive Einzelheiten» des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau.

[1] Siehe Schweizerische Bauzeitung Heft 21, 1974.

Sie wurden aus Laborversuchen extrapoliert, indem die unter günstigen Bedingungen ermittelten Versuchswerte mit Sicherheitszuschlägen behaftet wurden (siehe Kapitel 5). Damit wollte man dem Umstand Rechnung tragen, dass wichtige, ungünstige Faktoren im Labor schlecht oder nicht erfasst werden. Dazu gehören die Alterung, die Abnützung, das Entfetten und die Verschmutzung des Teflons. Des weiteren musste die grosse Streuung der Resultate und deren wesentliche Abhängigkeit

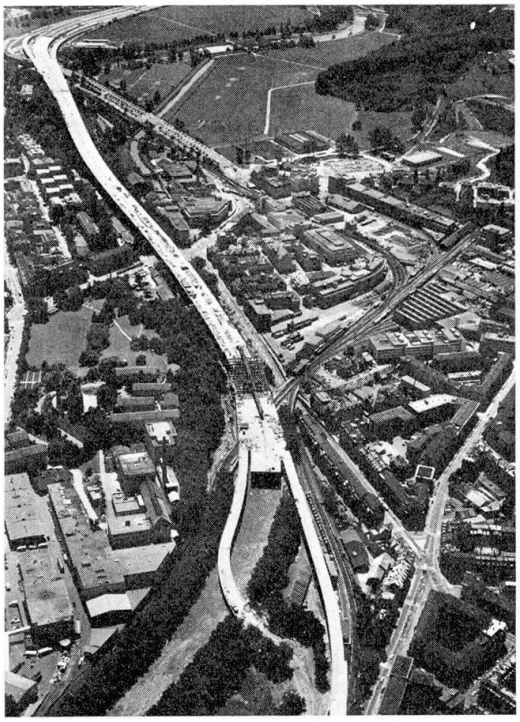

Fig. 1. Flugaufnahme der Sihlhochstrasse bei der Erstellung des letzten Brückenfeldes.

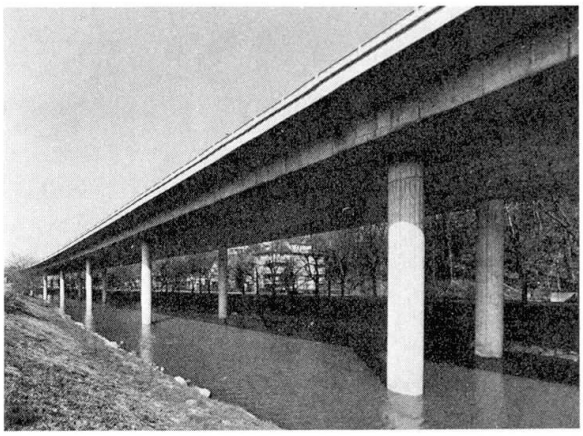

Fig. 2. Brückenansicht.

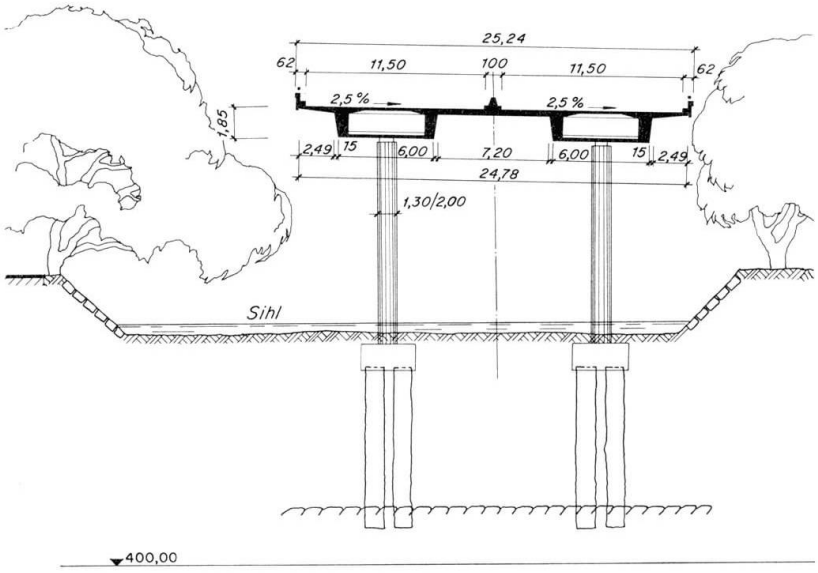

Fig. 3. Normalquerschnitt.

von spezifischer Pressung, Gleitgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Kriecherscheinungen durch den Sicherheitswert abgedeckt werden. Ferner können auch Ausführungsungenauigkeiten und Kräfte auf Führungsleisten die globale Lagerreibung erhöhen.

Deshalb war es von ausserordentlich hohem Interesse, die Reibungswerte an zwei zufällig herausgegriffenen, seit drei Jahren eingebauten Lagern der Sihlhochstrassenbrücke *in situ* überprüfen zu können. Die Messungen wurden unter der Oberaufsicht des Projektverfassers (Schlacher und Partner, H. Eichenberger AG) durch die Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) und die Lieferfirma (Proceq) ausgeführt. Grosser Dank gebührt dem Kantonalen Tiefbauamt Zürich für die Bereitschaft, diese allgemein interessierenden Versuche gefördert und finanziert zu haben.

2. Versuchsdurchführung

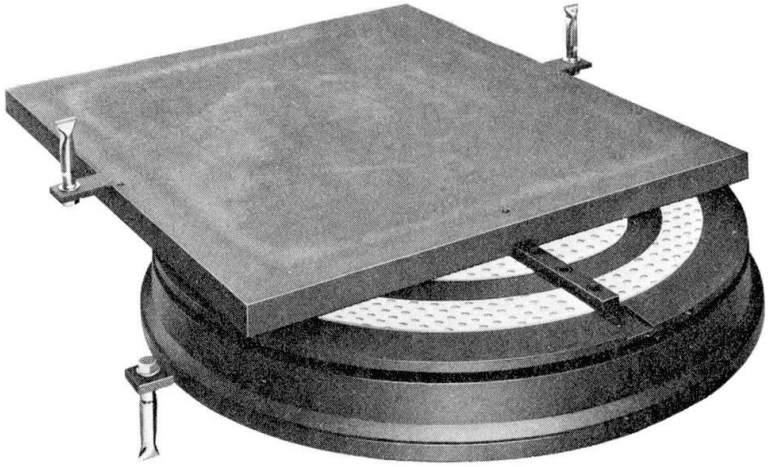

Fig. 4. Neotopfteflongleitlager Sihlhochstrasse Typ NGe 1250 t (Proceq).

Die Reibungsmessungen wurden im Herbst 1973 an zwei seit 3 Jahren eingebauten Neotopfteflongleitlagern am fertigen Bauwerk durchgeführt.

Im Zeitpunkt der Versuche war die Brücke noch nicht dem Verkehr übergeben, was eine erschütterungsfreie Durchführung der Versuche erlaubte.

Die ausgewählten Lager sind in Brückenlängsrichtung verschieblich; quer zur Brücke sind sie zur Übertragung des Seitenwindes auf den paarweise angeordneten elliptischen Pfeilern geführt.

Auf die Lagerführungen wirken horizontale Zwängungskräfte in der rechnerisch ermittelten Grössenordnung von 5 bis 8 t, hervorgerufen durch Schwinden, Vorspannung und Temperaturänderungen des Überbaus.

Die in den Versuchen ermittelten Reibungswerte schliessen diese Zwängungseinflüsse ein und sind deshalb mit im Labor ermittelten reinen Teflon-Reibungsmessungen nicht direkt vergleichbar.

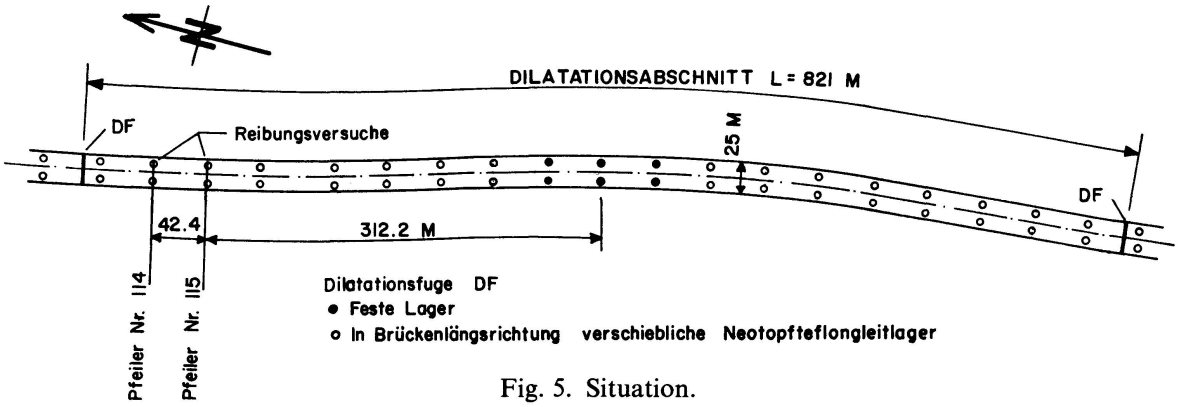

Fig. 5. Situation.

Bekannte Daten bei Versuchsbeginn

	Lager 114 Ost	Lager 115 Ost
Brückenauflast	810 t	820 t
Mittlere Teflonpressung	258 kg/cm²	261 kg/cm²
Stützenabmessungen	Ellipse 2,0/1,3 ml	Ellipse 2,0/1,3 ml
Mittleres Stützenträgheitsmoment	0,545 m⁴	0,545 m⁴
Stützenträgheitsmoment auf Höhe der Dehnmessstreifen	0,559 m⁴	0,559 m⁴
Widerstandsmoment auf Höhe der Dehnmessstreifen	0,559 m³	0,559 m³
H: Abstand zwischen Pressenkraft und Fundament	12,39 ml	12,53 ml
H_1: Abstand zwischen Pressenkraft und Dehnmessstelle	11,0 ml	11,0 ml
Entfernung bis zum Festpunkt der Brücke	354,6 ml	312,2 ml
Aussentemperatur während der Versuche	Abnehmend 0° bis − 3°	Um 0°
Temperatur im Brückenkasten	Abnehmend + 1,5° bis − 1,5°	Nicht gemessen

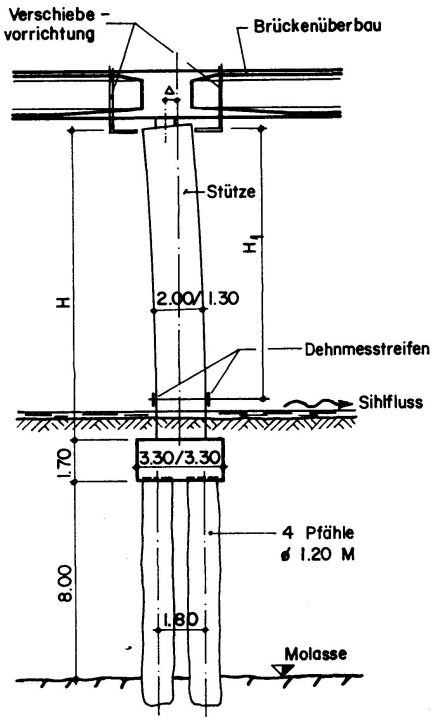

Fig. 6. Versuchsanordnung.

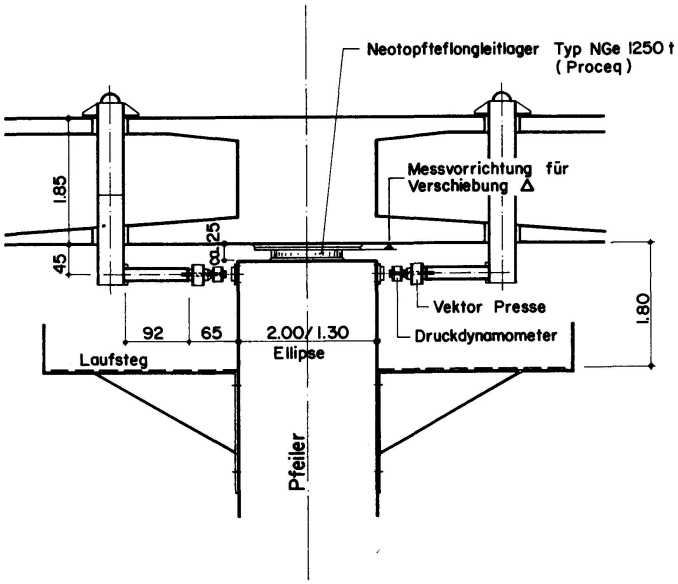

Fig. 7. Detail der Verschiebevorrichtung.

Bei den Versuchen wurden die Pfeiler der untersuchten Lager gegenüber dem Brückenüberbau mit hydraulisch gesteuerten Pressen hin- und hergeschoben. Durch einen gekoppelten Schreiber wurde die aufgebrachte Pressenkraft in Abhängigkeit der Pfeilerkopfauslenkung Δ direkt in einem Kraft-Weg-Diagramm aufgetragen. Mittels Dehnmessstreifen, die am Pfeilerfuss angeordnet waren, wurden die auftretenden Spannungen im Pfeilerquerschnitt laufend überwacht. Die gemessenen Dehnungen ε wurden ebenfalls in Abhängigkeit der Pfeilerkopfauslenkung Δ direkt in einem ε-Weg-Diagramm aufgezeichnet.

Aus den aufgezeichneten Diagrammen konnte die Reibungskraft bestimmt und mittels der bekannten Brückenauflast auf den Reibungskoeffizienten μ geschlossen werden.

3. Ermittlung der Reibung aus den Versuchen

3.1. Reines Gleiten (linearer Bereich)

3.1.1. Beziehungen zwischen Reibung, Feder- und Pressenkraft

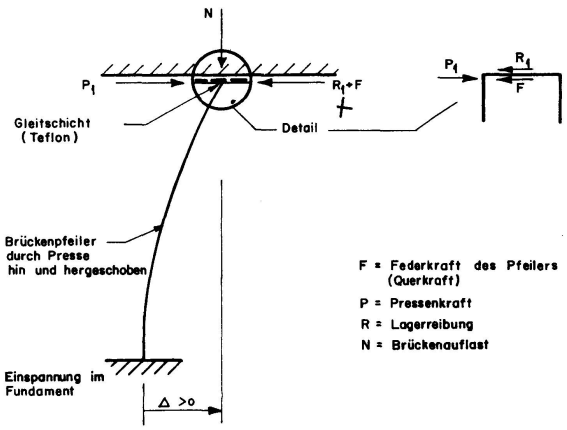

Fig. 8. Systemskizze mit angreifenden Kräften am Pfeilerkopf.

Da die Verformungen des Pfeilers sehr gering sind ($\Delta < 1$ cm), spielen sie bei der Gleichgewichtsbetrachtung am Pfeilerkopf eine vernachlässigbare Rolle (Problem erster Ordnung). Es gilt somit allgemein für einen nach rechts gedrückten Pfeiler:

$$P_1 - R_1 - F = 0 \tag{1}$$

Die als Federkraft F bezeichnete Querkraft wirkt konstant über die Pfeilerhöhe. Sie erzeugt ein linear zunehmendes Biegemoment im Pfeiler und ein Drehmoment im Fundament. Diese Momente bewirken die Pfeilerauslenkung Δ. Da die Messdauer kurz (höchstens eine Stunde), der Beton schon alt (ca. vier Jahre) ist und nirgends Zugspannungen auftreten, darf Proportionalität zwischen Auslenkung und Federkraft vorausgesetzt werden.

Es gilt somit $$F = a_1 \cdot \Delta$$

Aus der Rechnung und den Versuchen zeigt sich, dass für das Fundament eine starre Einspannung angenommen werden darf.

Es folgt daraus
$$F = \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta \tag{2}$$

mit EJ = Biegesteifigkeit des homogenen Querschnittes Beton plus Armierung.
H = Pfeilerhöhe (bzw. Abstand Pressenkraft zum Fundament).

(2) in (1) eingesetzt ergibt:
$$R_1 = P_1 - \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta \tag{3}$$

Diese Beziehung lässt leicht erkennen, dass die Reibungswerte R folgendermassen aus den Versuchsergebnissen ermittelt werden können:

a) unter Eliminierung von Δ.

Wird bei einem um $\Delta > 0$ ausgelenkten Pfeiler die Richtung der Pressenkraft geändert, so stellt sich folgendes Gleichgewicht ein:

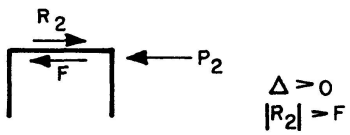

Fig. 9. Kräfte am Pfeilerkopf.

$$R_2 = P_2 + F = P_2 + \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta \tag{3'}$$

Durch Addition der Gleichungen (3) und (3′) wird Δ eliminiert:
$$R_1 + R_2 = P_1 + P_2 \tag{4}$$

Sofern die Reibungskräfte in beiden Bewegungsrichtungen gleich gross sind, gilt $R_1 = R_2 = R_0$ und
$$R_0 = \tfrac{1}{2}(P_1 + P_2) \tag{4'}$$

b) ohne Eliminierung von Δ.

Im linearen Bereich $P = f(\Delta)$ gilt, indem aus (3) für $P = 0$ und $\Delta = -\Delta_0$:
$$R_\Delta = \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta_0 \tag{5}$$

dieser Sonderwert wieder in (3) eingesetzt wird:
$$P = R_\Delta + \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta = \frac{3\,EJ}{H^3}(\Delta_0 + \Delta),$$

worin der Proportionalitätsfaktor $\frac{3\,EJ}{H^3} = \frac{P}{\Delta_0 + \Delta}$ die Neigung der Geraden $P = f(\Delta)$ bedeutet.

Die Reibung lässt sich also aus (5) ermitteln zu:

$$R_\Delta = P \frac{\Delta_0}{\Delta_0 + \Delta} \tag{5'}$$

wobei (4') ein Sonderfall von (5') darstellt, wenn $\Delta = \Delta_0$ und $P_1 = P$ und $P_2 = 0$ gesetzt werden.

Ist die Nullage des Pfeilers, d.h. der Koordinatenursprung der linearen Funktion $P = f(\Delta)$ bestimmt, so ist $\Delta = 0$ und $R_\Delta = P$. Die Biegesteifigkeit EJ, die genaue Pfeilerhöhe H bis zur Einspannstelle sowie eine eventuelle (elastische) Fundamentverdrehung brauchen für den linearen Bereich $P = f(\Delta)$ gar nicht bekannt zu sein. Wie unter 3.12 gezeigt werden wird, ist dies bei reinem Gleiten der Fall.

In Kapitel 3.2 dagegen wird auf die gemessenen Kriecherscheinungen eingegangen, für deren Auswertung die Federkraft F in Abhängigkeit der Auslenkung Δ bekannt sein muss.

Es gilt nach (2) und (3):

$$F = \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta = P_1 - R_1 \text{ und, nachdem } R_1 \text{ in (5') zu } R_\Delta$$

bestimmt wurde, lässt sich die Federkonstante des Pfeilers leicht anschreiben zu

$$a_1 = \frac{3\,EJ}{H^3} = \frac{P_1 - R_\Delta}{\Delta} \tag{6}$$

Dabei kann noch überprüft werden, inwiefern die gemessenen Werte mit rechnerischen Werten E, J und H übereinstimmen. Ein weiterer Vergleich ergibt sich durch die Auswertung der gemessenen spezifischen Dehnungen ε in Abhängigkeit der Auslenkung Δ.

Es gilt nämlich folgende Beziehung:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{M \cdot b}{J} = \frac{F \cdot H_1 \cdot b}{J}$$

mit b = halbe Pfeilerstärke.

H_1 = Abstand Pressenkraft zu Dehnungsmessstelle und somit:

$$F = \frac{3\,EJ}{H^3} \cdot \Delta = \frac{EJ}{bH_1} \cdot \varepsilon \text{ oder } \frac{\Delta}{\varepsilon} = \frac{H^3}{3\,bH_1} \tag{7}$$

3.1.2. Versuchsauswertung

Solange die Pfeiler mit konstanten Geschwindigkeiten hin- und hergeschoben wurden, konnten innerhalb eines Versuches erstaunlich konstante Reibungswerte anhand zweier parallelen Geraden im Kraft-Weg-Diagramm festgestellt werden. Dies bedeutet, dass hier die Reibung und die Federkonstante unabhängig von der Auslenkung Δ, von der Pfeilernullage und von der Verschieberichtung wirklich

konstante Werte sind, die gemäss 3.1.1 ausgewertet werden können. Die Nullage der Pfeiler liegt in der Mitte zwischen den Schnittpunkten der Parallelen P_1 und P_2 mit der Abszisse.

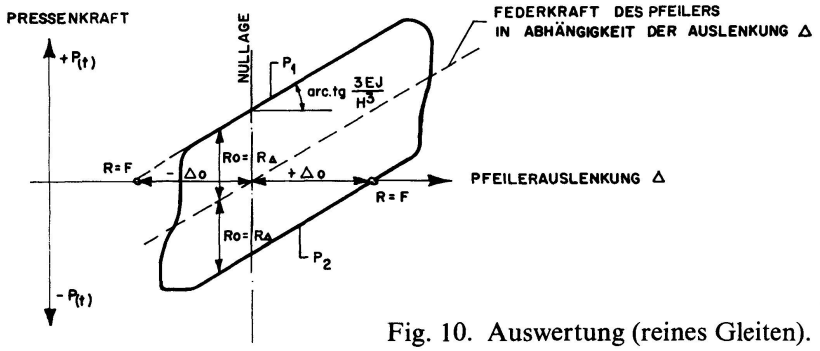

Fig. 10. Auswertung (reines Gleiten).

Für die Auswertung von R_Δ wurde für P der mittlere Abstand zwischen den aufgezeichneten, ca. parallelen Kraft-Weg-Linien herausgelesen. Für die Auswertung der Federkonstanten wurde die mittlere Neigung dieser Linien genommen. Der Vergleichswert $\frac{\Delta}{\varepsilon}$ schliesslich ergibt sich als reziproker Wert der Neigung des gemessenen $\varepsilon(\Delta)$ – Diagrammes.

Numerische Auswertung

Lager Nr.	Versuch Nr.	In Nullage gemessene Gleitgeschwindigkeit V in mm/sec · 10^{-2}	Pressenkraft Aenderung pro Sekunde P/sec (t)	Gleitreibung $R_\Delta = P\frac{\Delta_o}{\Delta_o+\Delta}$ (t)	Gleitreibung μ %	Federkonstante $a_1 = \frac{3EJ}{H^3} = \frac{P_1 R_\Delta}{\Delta}$ (t/m)	Vergleichswert $\frac{\Delta}{\varepsilon} = \frac{H^3}{3bH_1}$ (m)
Lager 115 Ost, Auflast 820 t	1	1,4	0,067	29	3,55	--	--
	2	29,0	1,33	(25 - 40)	(3,05-4,90)	--	--
	3	2,6	0,12	21,7	2,65	$5{,}0 \cdot 10^3$	50,5
	5	4,3	0,2	15,6	1,90	4,8 "	52,1
	6	21,8	1,0	15,3	1,87	4,81 "	52,1
	7	21,8	1,0	14,7	1,79	4,70 "	52,1
	8	65,3	3,0	13,3	1,62	4,65 "	51,8
	10	21,8	1,0	11,3	1,38	4,60 "	51,3
	11	0,65	0,03	8,3	1,01	4,50 "	51,5
	12	4,3	0,2	8,8	1,07	4,65 "	52,4
	13	5,4	0,25	9,2	1,12	4,65 "	51,8
	15	--	--	unbrauchbar		--	--
	16	21,6	1,0	11	1,34	4,50 "	51,3
	17	21,6	1,0	11	1,34	4,50 "	52,1
	18	--	--	unbrauchbar		--	--
	19	1,8	0,08	8,7	1,06	4,5 "	50,5
	20	10,8	0,5	9,3	1,13	4,4 "	51,0
	21	0,7	0,03	7,7	0,99	4,4 "	51,3
	22	2,4	0,11	8,3	1,01	4,6 "	51,5
	23	7,2	0,33	8,0	0,98	4,6 "	52,1
				Mittel	1,31	Mittel: $4{,}62 \cdot 10^3$	Mittel: 51,65
Lager 114 Ost, Auflast 810 t	24	--	0,083	26,0	3,21	--	--
	25	--	4,0	30,0	3,70	--	--
	26	--	--	unbrauchbar	--	--	--
	28	4,6	0,22	25,0	3,09	$4{,}70 \cdot 10^3$	46,7
	29	2,9	0,13	18,0	2,22	4,85 "	45,9
	30	1,3	0,06	14,5	1,79	4,70 "	47,2
	31	21,0	1,0	20,6	2,54	4,70 "	45,2
	32	21,0	1,0	17,5	2,16	4,70 "	45,0
				Mittel	2,67	Mittel: $4{,}73 \cdot 10^3$	Mittel: 46,0

Zum Vergleich seien noch rechnerische Werte angegeben, wobei die Höhe H das obere Einspannmoment berücksichtigt (Angriffsebene von R ca. 45 cm höher als jene von P).

$$\frac{3\,EJ}{H^3} = \frac{3 \cdot 4{,}5 \cdot 10^6 \cdot 0{,}545}{12{,}0^3} = 4{,}3 \cdot 10^3 \text{ t/m}'$$

$$\frac{H^3}{3\,b \cdot H_1} = \frac{12{,}0^3}{3 \cdot 1{,}0 \cdot 11{,}0} = 52 \text{ m}'$$

Interpretation der Ergebnisse

— Die Reibungskoeffizienten sind bei den ersten Versuchen am grössten und nehmen, bedingt durch die Hin- und Herbewegung der Pfeiler (Schmiereffekt), rasch ab.

— Die Rebungskoeffizienten sind in beiden Richtungen gleich gross.

— Der Reibungskoeffizient ist abhängig von der Gleitgeschwindigkeit, was besonders bei den ersten Versuchen zum Ausdruck kommt. Bei den nachfolgenden Versuchen kann dies infolge des eingetretenen Schmiereffektes nicht mehr eindeutig ausgesagt werden.

— Die Gleitgeschwindigkeiten betrugen bei den ersten Versuchen $1{,}4 \cdot 10^{-2}$ bis $29 \cdot 10^{-2}$ mm/sec.
Unter der ungünstigen Annahme, dass sich die mittlere Temperatur des Überbaus um 1 Grad pro Stunde ändern würde, ergeben sich Gleitgeschwindigkeiten von maximal $9 \cdot 10^{-4}$ mm/sec im Bereiche der Versuchslager. Diese Geschwindigkeiten sind somit 15 bis 300 mal kleiner als die Versuchsgeschwindigkeiten.

— Die ausgewerteten Gleitreibungen treffen für die Versuchs-Gleitgeschwindigkeiten zu, geben jedoch wegen des in den Versuchen festgestellten Kriechverhaltens des Teflons keinen Aufschluss über die in Wirklichkeit am Bauwerk auftretenden Lagerreibungen bei wesentlich geringeren Gleitgeschwindigkeiten.

3.2. Gleiten und Kriechen (nicht linearer Bereich)

Nach dem Aufbringen und Halten einer bestimmten Pressenkraft stellte sich nicht sofort ein Gleichgewichtszustand zwischen Pressenkraft, Federkraft und Lagerreibung ein. Dies ist nicht etwa auf eine Fundament-Verdrehung zurückzuführen, was unter anderem durch das konstante Verhältnis $\frac{A}{\varepsilon}$ nachgewiesen ist. Die Ursache liegt im Kriechverhalten des Teflons. Bei den ersten ungestörten Versuchen dauerte es jeweils mehrere Minuten, bis sich ein Gleichgewicht der Kräfte einstellte. Dasselbe Bild zeigte sich, wenn bei ausgelenkter Pfeilerlage die Pressen voll entlastet wurden.

In Wirklichkeit werden die Pfeiler durch Bewegungen des Brückenüberbaus nur soweit ausgelenkt, bis die Federkraft des Pfeilers die Lagerreibung erreicht hat. Alsdann stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand zwischen Feder- und Reibungskraft ein.

Entsprechend dem naturgetreuen Ablauf werden die Reibungswerte bei dieser Versuchsauswertung in jenen Punkten der Diagramme ermittelt, wo sich bei ausgelenkter Pfeilerlage ein Gleichgewicht der Kräfte einstellt.

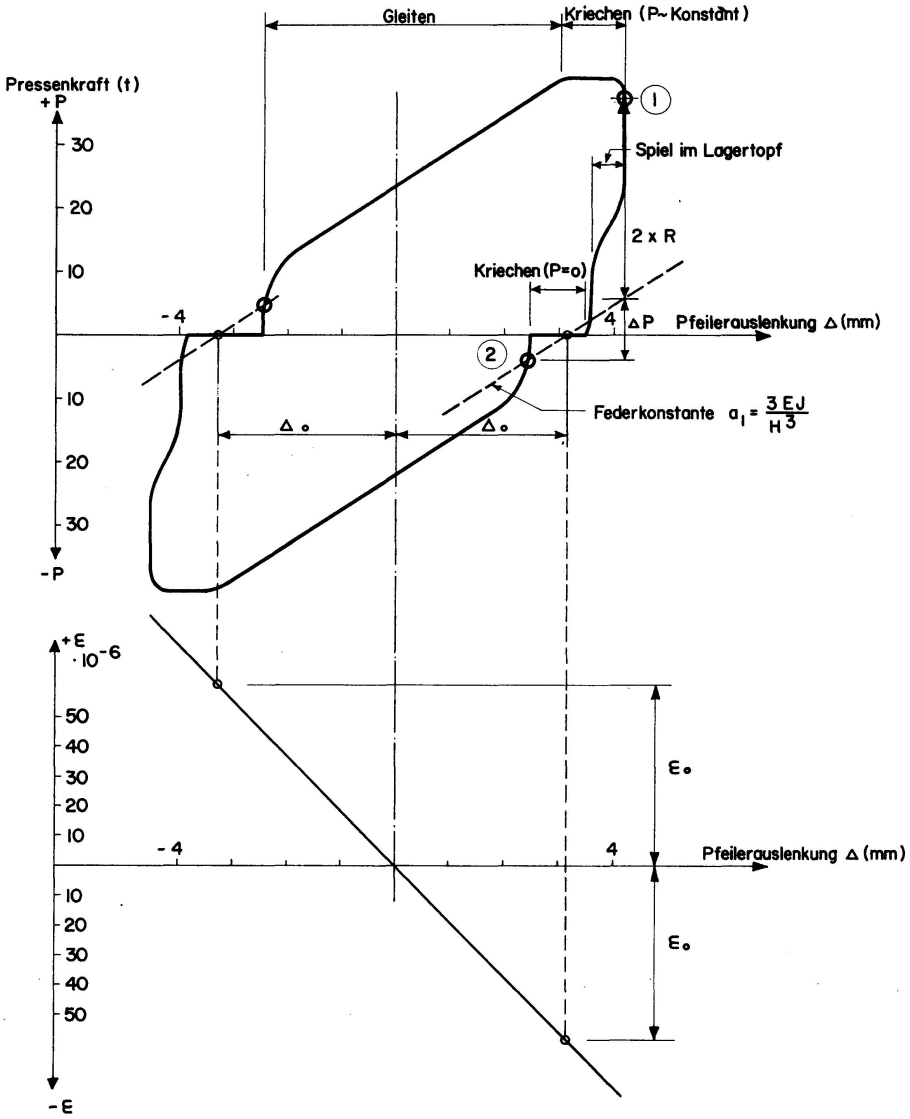

Fig. 11. Auswertung (Gleitung und Kriechen).

Die Reibungswerte lassen sich auf 3 Arten bestimmen

a) *Direkt aus dem Diagramm gemessen*

$$\overset{P_1}{\rightarrow} \; + \; \underset{F_1}{\overset{R_1}{\leftleftarrows}} \qquad \text{Gleichgewicht Pkt 1: } P_1 = F_1 + R_1;\; R_1 = P_1 - F_1.$$

$$\overset{R_2}{\rightarrow} \; \underset{F_2}{\overset{P_2}{\leftleftarrows}} \qquad \text{Gleichgewicht Pkt 2: } R_2 = |P_2| + F_2 = |P_2| + F_1 - |\Delta P|$$

unter der Annahme, dass $R_1 = R_2$ ist, gilt:

$$2 \cdot R = P_1 - F_1 + |P_2| + F_1 - |\Delta P|$$

$$R = \frac{P_1 + |P_2| - |\Delta P|}{2}$$

b) *In Abhängigkeit der Auslenkung* Δ_0

für $P = 0$ folgt nach Gleichung (5)

$$F = R_\Delta = \frac{3 \cdot EJ}{H^3} \cdot \Delta = a_1 \cdot \Delta$$

Mittlere Federkonstante a_1 aus Versuchen:
für Stütze 115 Ost: $a_1 = 4{,}62 \cdot 10^3$ t/m′
für Stütze 114 Ost: $a_1 = 4{,}73 \cdot 10^3$ t/m′

c) *In Abhängigkeit der spezifischen Dehnungen* ε_0 *zur Auslenkung* Δ_0

für $P = 0$ folgt:

$$F = R = \frac{E \cdot J}{b \cdot H_1} \cdot \varepsilon_0 = \frac{a_1}{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0$$

aus Versuchen:

$$\frac{a_1}{\varepsilon} = \frac{\text{Mittlere Federkonstante}}{\text{Mittleres } \varepsilon}$$

für Stütze 115 Ost: $\frac{a_1}{\varepsilon} = 4{,}62 \cdot 10^3 \cdot 51{,}61 = 0{,}24 \cdot 10^6$ t

für Stütze 114 Ost: $\frac{a_1}{\varepsilon} = 4{,}73 \cdot 10^3 \cdot 46{,}0 = 0{,}22 \cdot 10^6$ t

Versuchsauswertung

	Versuch Nr.	V mm/s·10⁻²	ΔP/S	Ergebnis aus gemessener Kraft R	μ %	Ergebnis aus gemessener Stützenauslenkung Δ ·10⁻³m	a1 ·10³ t/m	R_Δ	μ %	Ergebnis aus gemessenen Dehnungen ε₀ ·10⁻⁶	a1/ε ·10⁶t	R_ε	μ %	μ Mittel %
Lager 115 Ost Auflast 820 t	1	1,4	0,067 t	22,5 t	2,8	3,6	4,62	16,6 t	2,02	70	0,24	16,8 t	2,05	2,29
	2	29	1,33 t	18,5 t	2,26	4,2	"	19,4 t	2,37	83	"	19,9 t	2,43	2,34
	3	2,6	0,12 t	15 t	1,83	3,3	"	15,2 t	1,85	67	"	16,1 t	1,96	1,88
	5	4,3	0,2 t	14 t	1,71	3,1	"	14,3 t	1,74	50	"	12,0 t	1,46	1,64
Lager 114 Ost Auflast 810 t	24	-	0,083 t	21 t	2,59	kein Resultat, die Stütze ist unwesentlich aus der Nullage ausgelenkt				kein Resultat, die Stütze ist nur unwesentlich aus der Nullage ausgelenkt				
	25	-	0,2 t	22 t	2,71	4,5	4,73	21,3 t	2,63					2,67
	28 1. Umgang	4,6	0,22 t	20,3 t	2,50	4,3	"	20,3 t	2,51	95	0,22	20,9 t	2,58	2,53
	2. Umgang	4,6	0,22 t	17 t	2,10	3,7	"	17,5 t	2,16	82	"	18 t	2,22	2,16
	3. Umgang	4,6	0,22 t	15 t	1,85	3,3	"	15,6 t	1,93	74	"	16,3 t	2,01	1,93
	29	2,9	0,13 t	15 t	1,85	3,25	"	15,4 t	1,90	71	"	15,6 t	1,93	1,89
	30	1,3	0,06 t	12 t	1,48	2,95	"	14,0 t	1,73	64	"	14,1 t	1,74	1,65
	31	21,0	1,0 t	14,5 t	1,79	3,2	"	15,1 t	1,86	70	"	15,4 t	1,90	1,85
	32	21,0	1,0 t	14 t	1,73	3,2	"	15,1 t	1,86	71	"	15,6 t	1,93	1,84

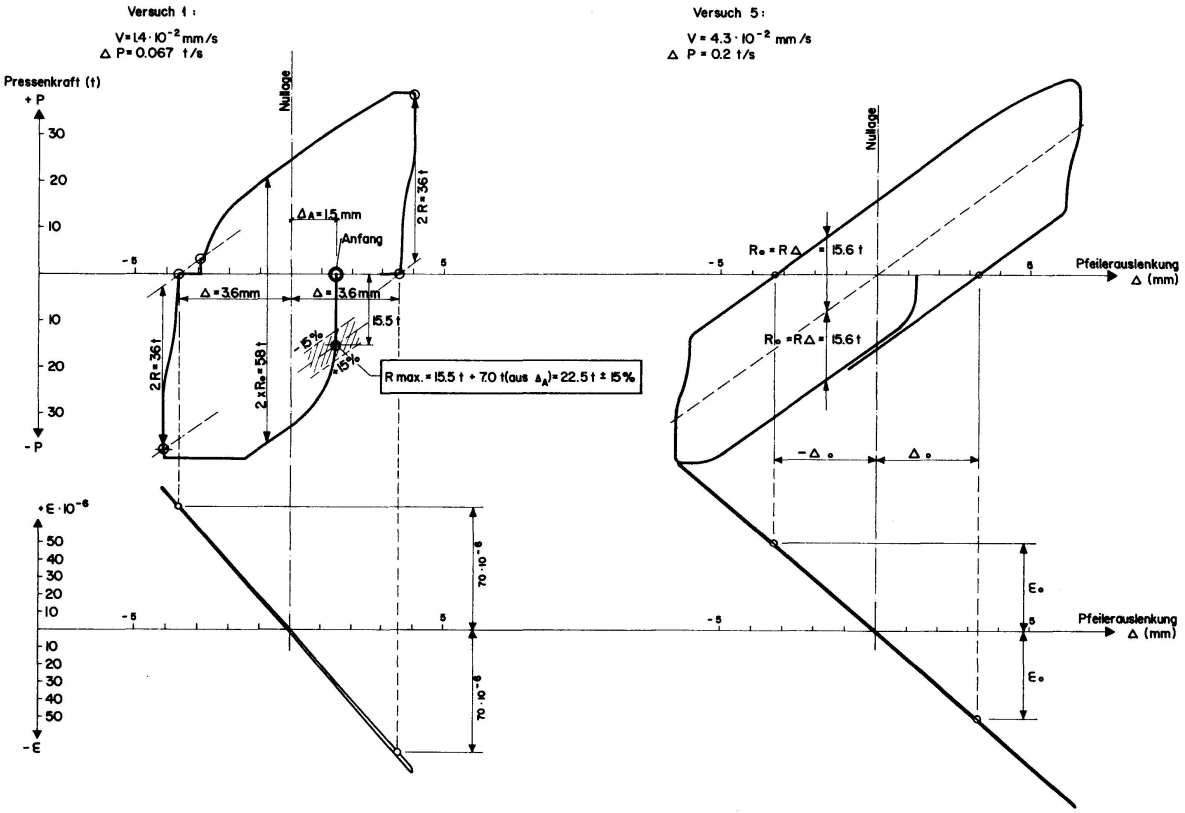

Fig. 12. Lager 115 Ost, Versuchsdiagramme 1 und 5.

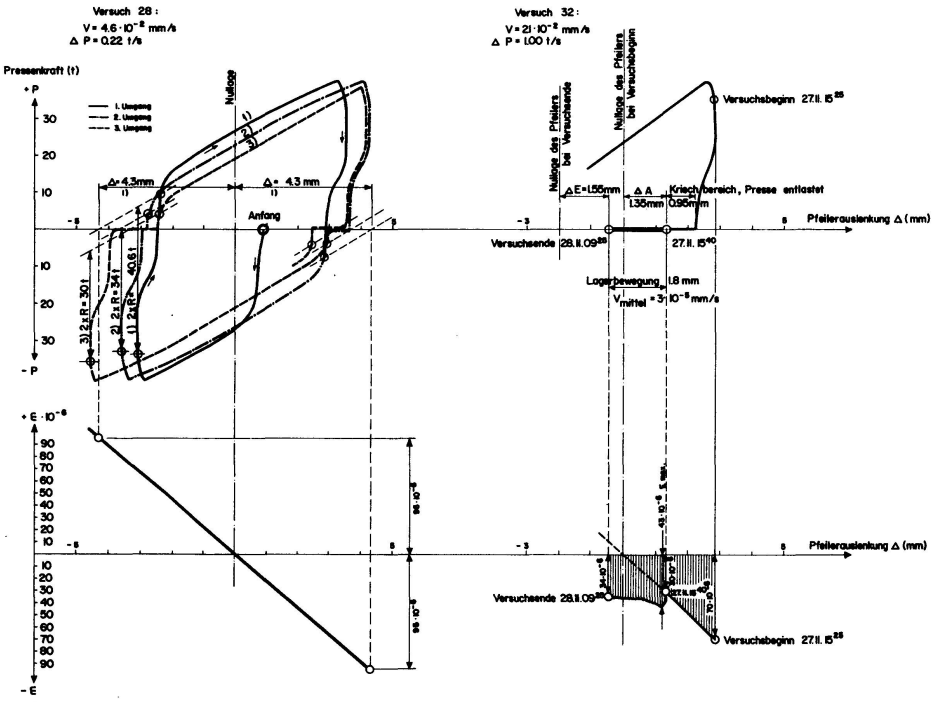

Fig. 13. Lager 114 Ost, Versuchsdiagramme 28 und 32.

Beurteilung der Ergebnisse

Der Übergang vom Lagerstillstand zur Lagerbewegung ist in den Diagrammen zum Teil schwierig erfassbar. (Schleifender Schnitt.) Die Ergebnisse sind deshalb mit einem Fehler behaftet, der bei beiden Lagern innerhalb von $\pm$ 15% liegen dürfte. (Siehe Auswertung Versuch 1.)

Die langsam durchgeführten Versuche (kleine Presskraftänderung pro Zeiteinheit) erlauben eine genauere Erfassung dieser Punkte als die schnell durchgeführten Versuche. Unter Berücksichtigung eines Zuschlages von 15% erhalten wir beim jeweiligen ersten Versuch folgende Werte:

Lager	Versuch		Reibung	
	Nr.	Geschwindigkeit	R	μ
Pfeiler 115 Ost	1	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$ mm/sec	26 t	3,2%
Pfeiler 114 Ost	24	$0{,}7 \cdot 10^{-2}$ mm/sec	24 t	3,0%

4. Ermittlung der Reibung infolge der natürlichen Brückendilatation

Beim Lager 114 Ost konnte dank günstiger Witterungsbedingungen beim letzten Versuch Nr. 32 eine Überprüfung der Lagerreibung über eine Zeitspanne von 17 Stunden vorgenommen werden.

Über diese Zeitspanne, welche durch eine ständige Abkühlung des Brückenkastens bei annährernd konstanter Aussentemperatur gekennzeichnet war, wurden einerseits die einseitigen Lagerbewegungen, anderseits die aufgetretenen Dehnungen am Pfeilerfuss laufend registriert.

Versuch 32	Reibung aus gemessenen ε – Werten				Bemerkungen
	ε $\cdot 10^6$	$\frac{a_1}{\varepsilon}$ $\cdot 10^6$ (t)	R (t)	μ %	
27.11. 15^{25}	70				– Versuchsbeginn: gemessenes ε bei maximaler Auslenkung mittels Pressen.
27.11. 15^{40}	30	0,22	6,6	0,82	– Nach Einspielen des Pfeilers, Pressen entlastet. Wartezeit 15′.
	43	0,22	9,4	1,16	– Maximalwert während des Versuches.
28.11. 09^{25}	34	0,22	7,5	0,92	– Wert bei Versuchsende.

Bei diesem Versuch, wo die Lagerbewegung und die Pfeilerauslenkung entsprechend dem natürlichen Vorgang durch Eigenbewegungen des Überbaus bewirkt wurden, sind somit Reibungskoeffizienten zwischen 0,82% und 1,16% nachgewiesen.

Der untere Wert entspricht dem Gleitreibungskoeffizienten, der nach dem Einspielen des Pfeilers bei entlasteter Presse auch bei den übrigen Versuchen in dieser Grössenordnung festgestellt wurde, der obere Wert deutet auf einen Anfahrwert (Haftreibung) hin.

Die Bewegung des Lagers während des Versuches betrug total 1,8 mm, die mittlere Verschiebegeschwindigkeit $3 \cdot 10^{-5}$ mm/sec.

Ein Vergleich der Reibungswerte μ mit Hilfe der gemessenen Auslenkungen Δ zeigt eine gute Übereinstimmung.

Zeit	Reibung aus Auslenkung			Bemerkungen
	Δ mm	R	μ %	
27.11. 15^{40}	1,35	6,4 t	0,79	– nach Einspielen des Pfeilers, Presse entlastet.
28.11. 09^{25}	1,55	7,4 t	0,91	– bei Versuchsende.

5. Schlussfolgerungen für die Praxis

Der entwerfende Ingenieur, der PTFE-Gleitlager (z.B. aus Teflon) in einem Bauwerk einzubauen gedenkt, stützt sich für die Ermittlung der Reibung auf amtliche Richlinien oder Angaben des Lieferanten. In der Schweiz z.B. gelten die im Jahre 1973 durch das Eidg. Departement des Innern (Amt für Strassen- und Flussbau) herausgegebenen «Standardprojekte für Brücken», worin folgende Angaben stehen:

PTFE-Pressung kg/cm²	100	200	300	450
Reibungsbeiwert μ	5%	4%	3%	2,5%

Mit diesen Angaben allein wird sich der entwerfende Ingenieur aber nicht begnügen, denn er wird wissen wollen, ob es sich dabei um Mittelwerte oder um mutmassliche oder absolute Grösstwerte handelt.

In der Tat stellen diese Werte mutmassliche Grösstwerte dar, die sich im Labor an Teflonmustern unter Berücksichtigung verschiedener Temperaturen, Gleitgeschwindigkeiten und Laufwege ergeben.

Man wird aber das unangenehme Gefühl nicht los, dass dabei wesentliche Aspekte unberücksichtigt bleiben. Dazu gehören, wie schon unter 1.) erwähnt, Alterung, Verschmutzung, Ausführungstoleranzen usw. Hinzu kommt die Frage nach dem Anfahrwert (Haftreibung).

Die hier an zwei seit drei Jahren in einem Brückenbauwerk eingebauten Lagern *in situ* durchgeführten Messungen konnten natürlich nicht über alle Fragen Auskunft geben. Die Messungen wurden bei niedriger Temperatur (ca. 0° Celsius) an normal verschmutzten, mit normalen Ausführungstoleranzen versehenen Lagern und mit normalen, durch die Führungsleiste erzeugten Zwängungen durchgeführt.

Um über die Alterung Auskunft zu erhalten, sollen die Versuche periodisch wiederholt werden.

Die gemessenen Werte stellen somit etwa Mittelwerte dar, die unter ungünstigeren Bedingungen grösser ausfallen würden.

Da die Teflon-Pressung in den untersuchten Lagern 258 bzw. 261 kg/cm^2 beträgt, ergibt sich durch Interpolation der oben angegebenen Reibungswerte μ ein Rechenwert von 3,4%. In den Versuchen wurden Gleitreibungswerte von 1,0 bis 3,7% festgestellt. Grössere Werte infolge Haftreibung beim Anfahren wurden nie festgestellt. Dagegen ergaben sich kleinere Werte bei sinkender Gleitgeschwindigkeit, besonders bei jener, die sich aus der natürlichen Brückendilatation ergab (siehe 4.). Hier wurden nur noch Reibungsbeiwerte von 0,8 bis 1,2% gemessen.

Als wesentlich neue Erkenntnis hat sich gezeigt, dass Teflon-Gleitlager kriechen, sofern man ihnen mit einer Schonzeit genügend Zeit lässt.

Diese Schonzeit, die einige Minuten bis Stunden dauert, ist aber bei den meisten Anwendungen immer vorhanden. Da die Bewegungen infolge Betonkriechen, Schwinden und Temperaturänderungen äusserst langsam vor sich gehen, ist für die Praxis nur jener Reibungswert von Interesse, der sich bei einer langandauernden, konstanten Horizontalkraft ergibt. Dieser Wert ist – wie gesagt – wesentlich kleiner als ein Gleitreibungswert wie er bis jetzt im Labor ermittelt wurde, geschweige von einem Haftreibungswert, der sich bei einer plötzlich auftretenden Horizontallast ergibt.

Zurzeit sind am «Centre d'Etude du Béton Armé et Précontraint» der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne Versuche im Gange, die diese Vorgänge bestätigen.

Abschliessend kann folgendes festgehalten werden:

Obwohl weitere Untersuchungen an eingebauten Lagern unerlässlich sind, verhalten sich Teflon-Gleitlager dank Kriecherscheinungen günstiger als vermutet. Die oben angegebenen Reibungsbeiwerte μ in Abhängigkeit der Pressung können, sofern keine abnormale Verschmutzung vorliegt, als Rechenwerte für die statischen Nachweise bedenkenlos angewendet werden. Vollständigere Untersuchungen werden vielleicht zu noch kleineren Werten in den Rechenvorschriften führen.

Zusammenfassung

An zwei seit drei Jahren eingebauten Teflon-Gleitlagern wurden eingehende Reibungsversuche in situ durchgeführt. Es hat sich dabei gezeigt, dass bei sehr langsamen Vorgängen, wie z.B. einer Brückendilatation, die Reibung dank dem Teflonkriechen wesentlich kleiner ausfällt als beim reinen Gleiten oder beim plötzlichen Anfahren.

Da für praktische Fälle immer mit einer genügenden Schonzeit gerechnet werden kann und die Kriecherscheinung stattfinden wird, verhalten sich solche Lager günstiger als vermutet. Damit konnten in der Praxis angewendete Rechenwerte der Reibung, die sich aus reinen Laborversuchen ergaben, bestätigt werden.

Summary

This paper describes tests carried out "in situ" on two teflon sliding bearings, after three years of service. The study showed that friction is greatly reduced, compared to a pure sliding or a movement starting suddenly, by the creep-effect of

teflon, as long as the displacement is very slow, as it is by dilatation of bridges. Since, in practical cases, the bearings have always an adequate time to respond to an horizontal thrust with yelding by creep, the behaviour of such bearings will be better than expected. Thus, it has been possible to confirm the values of the friction factors assumed in practice, that were obtained by extrapoling laboratory tests results.

Résumé

L'article décrit les essais in situ effectués sur deux appuis glissants au teflon, qui étaient en service depuis trois années. L'étude de leur comportement a révélé que le frottement était grandement diminué — par suite de l'effet de fluage du teflon — lors de phénomènes très lents tels la dilatation d'un pont par rapport à un glissement pur ou un démarrage brusque. Etant donné que, dans la pratique, les appuis auront toujours le temps nécessaire de répondre à une sollicitation horizontale en cédant par fluage, ils se comportent plus favorablement que prévu. Il a été ainsi possible de confirmer les coefficients de frottement admis dans la pratique et résultant d'extrapolation d'essais en laboratoire.