

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 96 (1978)
Heft: 13

Artikel: Versuche mit Brückenlagern
Autor: Maissen, Aluis
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73656>

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: 15.01.2026

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

andere, eine *symbolische Wirklichkeit* steht. Und so ähneln sich moderne Bilder von Picasso und die *Höhlenzeichnungen von Lascaux* in frappierender Weise, aber nicht etwa deshalb, weil Picasso diese Höhlenzeichnungen nachahmte, sondern weil in der zyklischen Welt, wenn die «Erkenntnis gleichsam durch ein Unendliches gegangen ist, sich die Grazie wieder einstellt» (*Kleist*). Aber diese Erkenntnis ist keine vernunftgemäße wissenschaftliche Erkenntnis sondern eine ästhetische Erkenntnis, die zwischen Vernunft und Gefühl vermittelt, welche die anderweitig unauflösbar Spannung zwischen Denken und Fühlen austragen kann. Hier liegt die wahre Aufgabe der Kunst als einer Meta-Wissenschaft. Diese Meta-Wissenschaft darf, um ihre Aufgabe leisten zu können, nicht vorwissenschaftlich, also Prä-Wissenschaft sein, sondern sie muss die Welt der Realitäten voll in sich hineinnehmen, noch darf sie para-wissenschaftlich sein, das heißt neben der Wissenschaft her operieren und sich gegen sie stellen, von der Wissenschaft prostituiert, aber neben ihr ohne Geltung. Sie muss vielmehr echte Meta-Wissenschaft sein, das heißt unter Hineinnahme aller, auch der letzten wissenschaftlichen Er-

kenntnisse den Menschen in einen ästhetischen Raum weiterführen. Die letzten Grenzen unserer Erkenntnis in der Kernphysik und in der Biologie scheinen mir solche Übergänge von Wissenschaft zu Meta-Wissenschaft anzudeuten, in der nicht mehr allein die Kategorie der Rationalität gilt, sondern zusätzlich die Kategorie des Ästhetischen mitbestimmend wird.

Kann es gelingen, Wissenschaft und Kunst wieder zusammenzuführen, Denken und Fühlen in Einklang zu bringen im «Reich des schönen Scheins»? Jedenfalls müssen wir den Versuch machen, *den Menschen aus der Fessel des Objektivitätsprinzips zu befreien*, so wie er sich aus den Fesseln der Natur befreit hat, und ich betone eindringlich: nicht durch Umstossen des Objektivitätsprinzips, sondern durch Überwinden auf höherer Ebene muss der Mensch wieder «lebende Gestalt» gewinnen. Vielleicht wird er dann ohne Entzagung und intellektuelle Opfer verzichten können zu Gunsten eines wahren *Fortschritts*.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. F. Cramer, Direktor am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin, Abtlg. Chemie, Hermann-Rein-Straße 3, D-3400 Göttingen.

Versuche mit Brückenlagern

Von Aluis Maissen, Dübendorf

Mit den folgenden Ausführungen beabsichtigt der Verfasser, *Bauherren, Herstellern von Lagern und projektierenden Ingenieuren* über die Möglichkeiten zu berichten, die zurzeit an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) in Dübendorf für die Prüfung von Lagern vorhanden sind. Im weiteren sollten einige charakteristische Merkmale über das Verhalten der verschiedenen Lagertypen vermittelt werden. Dies erfolgt anhand von ausgewählten Versuchen, die in den letzten Jahren in Zusammenhang mit Zulassungsversuchen, Abnahmetests und Neuentwicklungen durchgeführt wurden. Insbesondere sollen dabei Versuchseinrichtungen und Prüfmethoden folgender Auflager beschrieben werden:

- *Rollenlager* (Lager aus herkömmlichem Stahl sowie Edelstahl),
- *Gleitlager* (Gleitschichten aus PTFE und Chromstahlblechen),
- *bewehrte Elastomere-Lager*,
- *Topflager*.

Neben eingehenden Materialprüfungen wurden Roll- und Gleitreibungsuntersuchungen, Funktionsprüfungen sowie Verschleiss- und Bruchversuche durchgeführt. Zudem erfolgten besondere Untersuchungen an Lagerausschnitten in Zusammenhang mit Grundlagenforschung und Neuentwicklung. Die Versuche erfolgten ausschliesslich im Auftrag privater Firmen.

Die Hauptschwierigkeit bei der Prüfung von Brückenlagern liegt in der Regel bei den aufzubringenden grossen Kräften. Während die Bruchlasten bei Elementen des Massivbaus mit der heute zur Verfügung stehenden Hydraulik normalerweise ohne Schwierigkeiten aufgebracht werden können, liegen diese bei grossen Auflagern um rund eine Zehnerpotenz höher. Nutzlasten von 40 MN sind heute, beispielsweise auf dem Gebiet der Topflager, nichts Aussergewöhnliches mehr.

Wenn man zudem bedenkt, dass die Sicherheitsfaktoren der Lager im allgemeinen wesentlich höher liegen als bei den übrigen Konstruktionsteilen, so wird klar, dass die Bruch-

lasten grosser Auflager die Kapazität der heutigen Prüfmaschinen bei weitem übersteigen. Die Prüfung muss sich deshalb auf kleinere Lager oder auf Lagerausschnitte beschränken, sofern dies ebenfalls aussagekräftig ist, und die Ergebnisse dadurch nicht verfälscht werden.

In der EMPA stehen heute Prüfeinrichtungen mit folgenden Lastkapazitäten zur Verfügung:

- | | |
|---|---|
| – Grosses Presse, $P_{max} = 20 \text{ MN}$: | einfache Prüfungen unter zentrischer Belastung |
| – Aufspannboden, $P_{max} = 7,5 \text{ MN}$: | kompliziertere Einrichtungen für Reibungsversuche, Zwangskippungen usw. |

Normen, Richtlinien

Im Vergleich zum Ausland, vorab in der *Bundesrepublik Deutschland* [1], kennt man in der *Schweiz* recht wenig verbindliche Vorschriften und Normen auf dem Gebiet des Lagerbaus. Vor allem ist hierzulande das Prinzip der sogenannten *Zulassung nicht eingeführt*. Zudem beziehen sich die bestehenden Vorschriften primär auf den Einbau und die Anordnung der Lager und erst in zweiter Linie auf die Lager selber. Die wichtigsten Vorschriften, die sich auf Brückenlager beziehen, wurden vom *Eidgenössischen Departement des Innern* als *Richtlinien für den Nationalstrassenbau* herausgegeben. Sie sind in «Schweizerische Nationalstrassen, Standardprojekte für Brücken, Konstruktive Einzelheiten, D. 340» enthalten. Im weiteren sind vereinzelte Vorschriften in den *Normen SIA 160 (Reibungskräfte)* und *161 (Berechnungsgrundlagen für Lager)* enthalten. Zudem geben einzelne Kantone eigene Richtlinien oder Hinweise über das Lagerwesen heraus. Seitens der Bauherrschaften wird in der Schweiz jedoch häufig auf eine allenfalls vorhandene deutsche Zulassung abgestellt oder es werden die Bestimmungen des *Instituts für Bautechnik in Berlin* für Zulassungsversuche herangezogen.

Lagertypen und ihre Prüfungen

Rollenlager, Rollreibungsversuche

Versuchseinrichtung und Durchführung

Bei diesen Versuchen wurde ein Rollkörpersatz aus St. 80, bestehend aus vier Walzen und acht Platten, verwendet. Die wichtigsten Abmessungen betragen:

- Rollendurchmesser $\varnothing = 94$ mm
- Rollenlänge $L = 150$ mm
- Plattendicke $t = 34,5$ mm.

Die Vickershärte HV_{30} lag bei den Rollen um 255, bei den Lagerplatten um 210. Hauptziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung der Rollreibungszahlen μ und μ_{\max} in Kurzzeitversuchen von je 10 Überrollungen. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung.

Das Rollkörpersystem besteht aus zwei übereinander angeordneten Walzenpaaren mit den entsprechenden Lagerplatten. Durch eine mit dem hydraulischen Antrieb verbundene Zwischenplatte werden die Walzen hin und her bewegt. Die gleichzeitig wirkende lotrechte Druckbelastung wird von einer 5-MN-Presse aufgebracht. Die Hin- und Herbewegungen der Zwischenplatte erfolgen mit konstanter Geschwindigkeit und werden über zwei Endschalter gesteuert. Die für die Rollbewegungen erforderlichen Zug-Druckkräfte werden von einem hydraulischen Zylinder aufgebracht, der mit einem Federmanometer und einem Hydrospeicher (Druckspeicher) verbunden ist. Das Federmanometer wird von einem Synchrongeber so gesteuert, dass die Geschwindigkeit der Zwischenplatte über den ganzen Rollweg konstant bleibt. Der Rollwiderstand kann durch eine Zug-Druckmessdose gemessen und über einen Kompensationsschreiber in Abhängigkeit vom Rollweg aufgezeichnet werden. Zwischen Zylinder und Zwischenplatte ist ein Leerlaufglied angeordnet, das eine saubere Trennung zwischen Zug- und Druckkräften ermöglicht. Zwischenplatte und hydraulischer Zylinder sind über einen Stahlrahmen kraftschlüssig mit den Druckverteilungsplatten verbunden.

Auf den Probekörpern (Walzen und Platten) waren je drei Prüfbahnen angeordnet, auf welchen Rollversuche für die Hertzischen Pressungen von 9,5, 12,0 und 15,0 Pa gefahren wurden. Die Geschwindigkeit der Zwischenplatte betrug dabei 0,083 mm/s und der gewählte Rollweg um die Mittelachse der Anlage ± 20 mm für die Zwischenplatte bzw. ± 10 mm für die Rollen. Die Walzen wurden jeweils in der Mitte der Prüfbahn eingebaut, und zwar in mittlerer Stellung der Zwischenplatte. Danach wurde das Rollkörpersystem unter einer minimalen Vorlast von 20 kN um den halben Betrag des Rollweges in Druckrichtung in Ausgangsstellung gebracht. Hier erfolgte die vertikale Belastung, welche während rund 10 Minuten stehen gelassen wurde. Darauf begannen die Rollversuche, bei denen der erste Hub in Zugrichtung erfolgte. Insgesamt wurden je 10 Doppelhübe auf jeder Prüfbahn ausgeführt.

Reibungscharakteristik

In Bild 2 ist der Verlauf der Zug- und Druckkräfte in Abhängigkeit vom Rollweg für die erste und zehnte Überrollung dargestellt. Die Reibungscharakteristik, die von Hakenjos [2] ausführlich beschrieben wurde, geht daraus besonders klar hervor. Die Zugkraft nimmt beim ersten Hub zunächst stark zu bis zu einem Höchstwert (bei der ersten Messung in Zugrichtung mit Z_1 bezeichnet) und fällt nach dem Maximum auf einen bis zum Ende des Rollweges hin etwa gleichbleibenden Wert ab. Dieser Kurvenverlauf lässt sich damit erklären, dass die mit $v = 0,083$ mm/s bewegten Rollkörper bei kleinen Auflasten den bereits bei statischer Belastung in Ausgangsstellung gebildeten Wall vor sich her

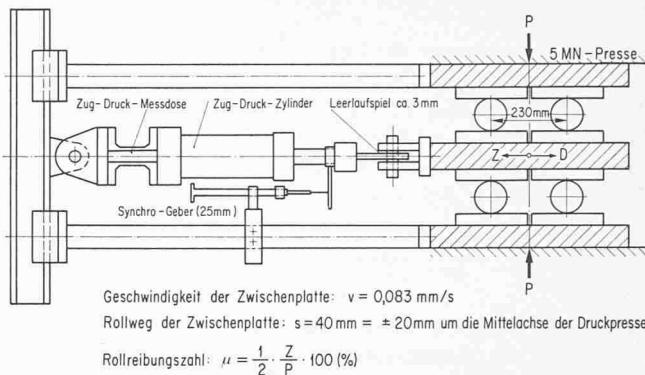


Bild 1. Rollenlager. Schematische Versuchsanordnung zur Bestimmung der Rollreibung
Rollendurchmesser: 94 mm, Rollenlänge: 150 mm

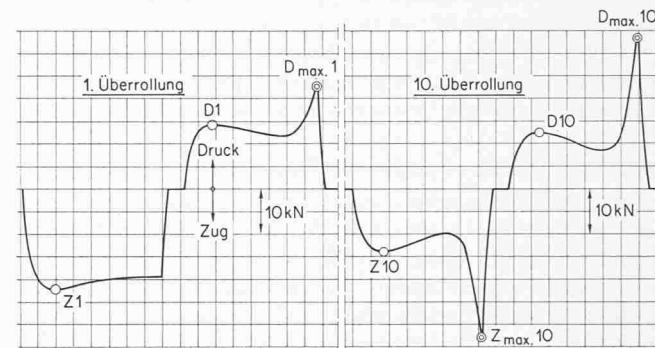


Bild 2. Rollenlager. Zug- und Druckkraftverlauf in Abhängigkeit vom Rollweg der Zwischenplatte
Hertzche Pressung: $p = 15$ Pa

walzen, während die Rollen bei mittleren und grossen Auflasten zusätzlich teilweise aus den muldenförmigen Vertiefungen in den Platten herausbewegen werden.

Bei der Rückwärtsbewegung aus der Endstellung der Zwischenplatte bewegt sich das Rollkörpersystem um eine bestimmte Strecke, den sogenannten Leerlaufweg, in Druckrichtung, ohne dass eine Druckkraft erforderlich ist. Dabei hängt die Zwischenplatte nach der Richtungsumkehr so lange an der Messdose, bis diese frei wird. Am Ende des Leerlaufweges bleibt die Zwischenplatte stehen, bis das Leerlaufspiel durchmessen ist und der Bolzen im Langloch zum Anliegen kommt. Während der ersten Messung in Druckrichtung nimmt die Kraft nach einem Höchstwert D_1 ab und steigt danach wieder an. Dieser Kraftanstieg am Ende des Rollweges auf einen Wert $D_{\max,1}$ ist darauf zurückzuführen, dass das Rollkörpersystem gegen den bereits bei der statischen Belastung in Ausgangsstellung gebildeten Wall bewegt wird. Hinzu kommt noch, dass sich die Walzen im Verlauf des ersten Doppelhubes in zunehmendem Mass in die Platten eingewalzt haben, wobei die Rollen gleichzeitig abgeplattet wurden. Ein ähnlicher Kraftverlauf wie bei der ersten Messung in Druckrichtung ergibt sich bei den weiteren Messungen in Zug- und Druckrichtung. Da die Bewegungsrichtung der Zwischenplatte immer in denselben Endstellungen umgekehrt wird ($1/100$ mm Umschlagsgenauigkeit), nimmt der Wall am Anfang und am Ende des Rollweges zu infolge der fortschreitenden Verformung von Walzen und Platten.

Rollreibungszahl

Zwischen den zur Bewegung der Zwischenplatte in Zug- und Druckrichtung erforderlichen Kräften besteht kein wesentlicher Unterschied. Für die Auswertung wurden deshalb nur die Höchstwerte Z_n und $Z_{\max n}$ (Zugkräfte) zugrunde gelegt. Mit den Bezeichnungen von Bild 1 ergibt sich die Rollreibungszahl μ_n und $\mu_{\max n}$ zu:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z}{P} \cdot 100 (\%)$$

Verlauf und Grösse der Rollreibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Doppelhübe ist aus Bild 3 ersichtlich. Der μ_n -Wert nimmt mit der Anzahl der Hin- und Herbewegungen ab und nähert sich bei der kleinsten Auflast etwa von der dritten Überrollung an einem praktisch gleichbleibenden Wert. Bei der mittleren und grossen Auflast wird der konstante Wert etwa nach vier bis fünf Doppelhüben erreicht. Dieser Verlauf dürfte in der Hauptsache auf eine Verfestigung der Wälzbahn von Rollen und Platten zurückzuführen sein.

Die Rollreibungszahl $\mu_{\max n}$ nimmt im untersuchten Bereich mit der Anzahl der Doppelhübe zu, da der Wall in den Endstellungen infolge der fortschreitenden Verformungen von Walzen und Platten immer grösser wird. Es ist bemerkenswert, dass die $\mu_{\max 10}$ -Werte bedeutend höher liegen als die μ_1 -Werte.

Edelstahlrollenlager, Funktionsprüfungen

Bei diesen Versuchen ging es um die seitliche Führung von Edelstahlrollen durch eine neuartige Konstruktion aus Litzenseilen, welche die früher übliche Führung durch Zahnrad/Zahnstange ersetzte. Geprüft werden sollte aber nicht die Seilführung an sich, sondern das Parallelieren der Rolle. Dies geschah in einem Dauerversuch mit einer grösseren Zahl von Rollbewegungen, die einem gesamten Rollweg von 2 km entsprechen.

Die wichtigsten Merkmale der Probekörper sind:

- Rollendurchmesser: $\varnothing = 130 \text{ mm}$
- Rollenlänge: $L = 600 \text{ mm}$
- Dicke der Lagerplatten: $t = 26 \text{ mm}$
- Vickershärte: $HV_{20} = 500$ im Mittel.

Versuchseinrichtung

Bild 4 zeigt eine schematische Darstellung der gesamten Versuchsanordnung mit allen wichtigen Teilen, angeordnet auf dem Aufspannboden der EMPA. Das Rollkörpersystem besteht aus drei Walzen mit entsprechenden Lagerplatten, die

in zwei Ebenen übereinander angeordnet sind. Prüfobjekt ist dabei nur die obere Stahlrolle mit Seilführung. Die unteren zwei Walzen sind zwar von gleicher Qualität und weisen auch die gleichen Abmessungen auf, gehören hier jedoch zur Versuchseinrichtung. Ihre Anordnung in der unteren Ebene ermöglicht erst die Hin- und Herbewegungen der Zwischenplatte. Die untere Stahlplatte von 2,20 m Länge dient der Stabilisierung des Rollkörpersystems. Im Gegensatz zu den Gleitlagern wandert nämlich bei Rollenlagern die Achse der einzelnen Rollen mit der Rollbewegung mit und entfernt sich damit von der Zylinderachse der vertikalen Auflast.

Die vertikale Druckbelastung wurde von einem hydraulischen Zylinder aufgebracht und betrug konstant 4,75 bzw. 3,5 MN. Infolge der Hin- und Herbewegungen der Zwischenplatte schwankt beim vorliegenden System die Auflast der Prüfrollen zwischen 4,75 MN (zentrische Lage) und 4,99 MN (exzentrische Lage). Aus dem gleichen Grund resultieren sich Auflagerkräfte an den beiden Enden der Stabilisierungsplatte. Diese schwankten zwischen 0 und 0,24 MN. Die Verschiebungen der Zwischenplatte erfolgten etwa mit konstanter Geschwindigkeit und wurden über zwei Endschalter gesteuert. Die für die Rollbewegungen erforderlichen Zug-Druckkräfte wurden von einem hydraulischen Zylinder aufgebracht, der mit einem Pumpenaggregat verbunden war. Die Querkraft, die in einzelnen Versuchsphasen ebenfalls auf das Lager wirkte und als Erschwernis für das Parallelaufen der Prüfrolle gedacht war, wurde durch zwei Druckspindeln aufgebracht (Bild 4). Die Querkrafteinleitung hing bei der skizzierten Einrichtung mit der Führung der Zwischenplatte zusammen, so dass dieser Teil der Belastung nicht hydraulisch, sondern mechanisch aufgebracht werden musste. Infolge einer gewissen Entspannung während der Rollversuche mussten die Druckspindeln periodisch nachgespannt werden. Die Querkraft wirkte deshalb nicht konstant, sondern schwankte innerhalb bestimmter Grenzen.

Versuchsdurchführung

Das Versuchsprogramm sah insgesamt fünf verschiedene Versuchsphasen vor. In Tabelle 1 sind die besonderen Bedingungen für die einzelnen Abschnitte zusammengestellt. Die darin vorkommende Exzentrizität bezieht sich auf die Querrichtung des Lagers bzw. auf die Längsachse der Rolle. Bei der gegebenen Rollenlänge von 60 cm bedeutet die Verschiebung der vertikalen Auflast um 10 cm, dass die spezifische Belastung der Rolle dreiecksförmig ist; d.h. die vertikale Normalkraft greift gerade am Rande des Querschnittskernes an.

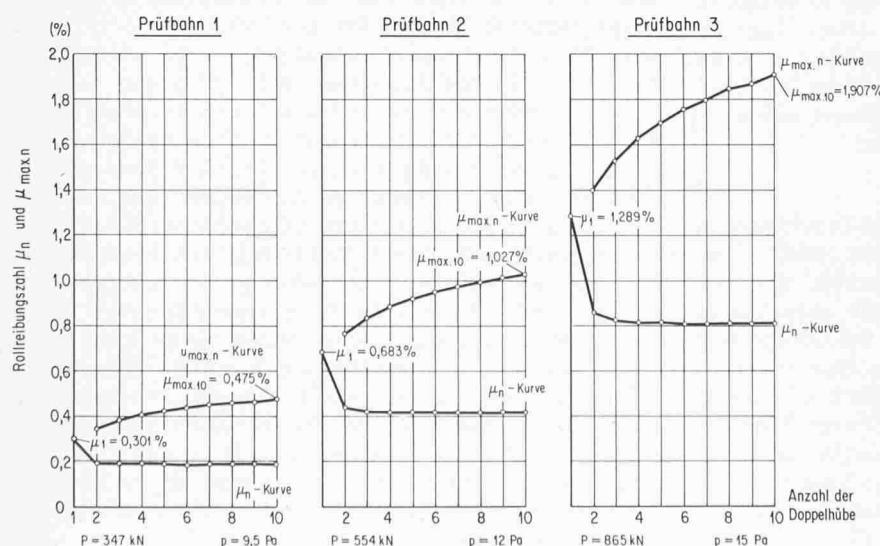


Bild 3. Rollenlager. Verlauf der Rollreibungszahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Doppelhübe
Rollenlänge: $L = 60 \text{ cm}$
Hertzche Pressung: $p = 9,5; 12,0; 15,0 \text{ Pa}$
Werkstoff: Stahl St. 80

Tabelle 1

Versuchsphase	Vertikale Belastung P (MN)	Hertz'sche Pressung p (Pa)	Querkraft Q (MN)	Q_{Nenn}	Q_{effektiv}	Exzentrizität e (cm)	Anzahl der Doppelhübe n	Gesamter Rollweg der Zwischenplatte S_{total} (m)
I	4,75 / 4,99	23,1 *	0	0	0	0	2000	800
II	4,75 / 4,99	23,1 *	0,25	0,15–0,25	0	0	1000	400
III	4,75 / 4,99	23,1 *	0,25	0,15–0,25	0	0	1000	400
IV	3,5 / 3,68	38,7 **	0	0	0	10	1000	400
V	3,5 / 3,68	38,7 **	0,25	0,15–0,25	10	800		320

* für effektive Berührungsfläche von 52,7 cm ** am Rand (Dreiecksbelastung)

Die übrigen Bedingungen für die Rollversuche lauten:

– Rollweg der Zwischenplatte: $s = \pm 100$ mm um die Mittelachse (d.h. 0,4 m je Doppelhub)

– Gleitgeschwindigkeit der Zwischenplatte: $v_Z = 2,0$ mm/s in Zugrichtung $v_D = 1,5$ mm/s in Druckrichtung

Die zwei verschiedenen Geschwindigkeiten in Zug- und Druckrichtung sind auf die verschiedenen grossen Querschnittsflächen auf der Zug- bzw. Druckseite des hydraulischen Zylinders zurückzuführen.

Zu den Versuchsergebnissen ist in diesem Fall wenig zu sagen, da es sich um eine *Funktionsprüfung* handelte. Wie bereits erwähnt, bestand das Hauptziel der vorliegenden Untersuchung in der Überprüfung der Seilführung, d.h. der Führung der Edelstahlrolle durch die vier Litzenseile. Zu diesem Zweck wurde der Prüfkörper im Dauerversuch periodisch hinsichtlich allfälliger Abweichungen von der Soll-Lage kontrolliert. Während des ganzen Versuches konnten denn auch nur unbedeutende Abweichungen festgestellt werden.

Kugel- und Walzenlager, Bestimmung des Rollwiderstandes

Versuchsanordnung

Beim letzten zu beschreibenden Versuch, bei dem es um *Rollreibung* geht, handelt es sich um *einfache bewegliche Lager für Fernwärmeleitungen eines Elektrizitätswerkes*. Hauptziel dieser Versuche war die Ermittlung des Rollwiderstandes in einem Dauerversuch sowie der dabei auftretenden plastischen Verformungen. Die Versuchsanordnung auf dem Aufspannboden sowie einige konstruktive Details der Lager finden sich in der zeichnerischen Darstellung von Bild 5.

Das Rollsystem besteht aus einem 14,0 m langen Stahlrohr vom Durchmesser $\varnothing_A = 457,2$ mm, das an zwei Stellen mittels der zu prüfenden Lager aufgehängt ist. Die Hin- und Herbewegungen der Lager erfolgen über die Rohrleitung, die an einem hydraulischen Antrieb angeschlossen ist. Die gleichzeitige wirkende lotrechte Belastung beträgt 25 kN je Lager und röhrt vom Eigengewicht der mit Wasser gefüllten Leitung sowie vom zusätzlichen Ballast (Bleiplatten) her. Hydraulischer Antrieb und Messanlage sind hier die gleichen wie im ersten Versuch, der schon beschrieben worden ist.

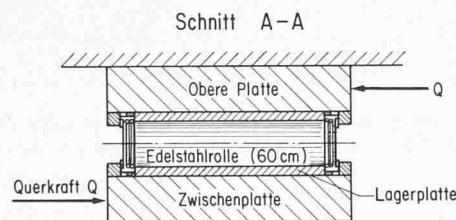


Bild 4 (links). Edelstahlrollenlager mit Seilführung. Versuchsanordnung für die Funktionsprüfungen

Rollweg der Zwischenplatte $= \pm 100$ mm von der Mittelachse aus d. h. $s = 400$ mm je Doppelhub

Geschwindigkeit der Zwischenplatte: $v_Z = 2,0$ mm/s in Zugrichtung

Zwischenplatte: $v_D = 1,5$ mm/s in Druckrichtung

Rollenlänge: 600 mm

Vickershärte Walzen/Platten: HV_{20} = rund 550

Das untere Walzenpaar und die lange Stabilisierungsplatte gehören zur Versuchseinrichtung

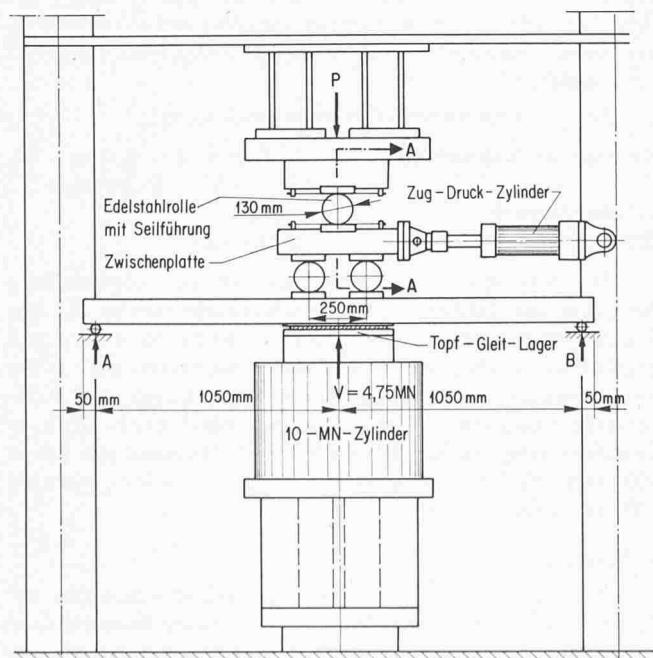


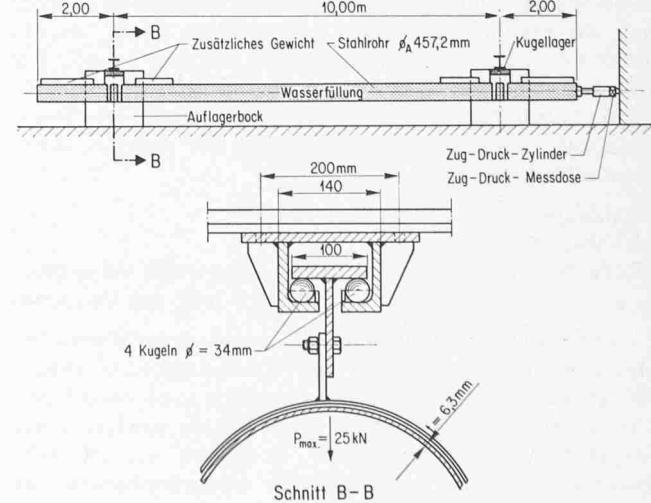
Bild 5 (unten). Kugellager. Versuchsanordnung und Versuchskörper Kugellager mit je 4 Stahlkugeln $\varnothing = 34$ mm

Auflagerkraft je Lager: 25 kN

Rollweg der Rohrleitung: $s = \pm 80$ mm

d. h. $s = 320$ mm je Doppelhub

Geschwindigkeit der Rohrleitung: $v = 0,833$ mm/s



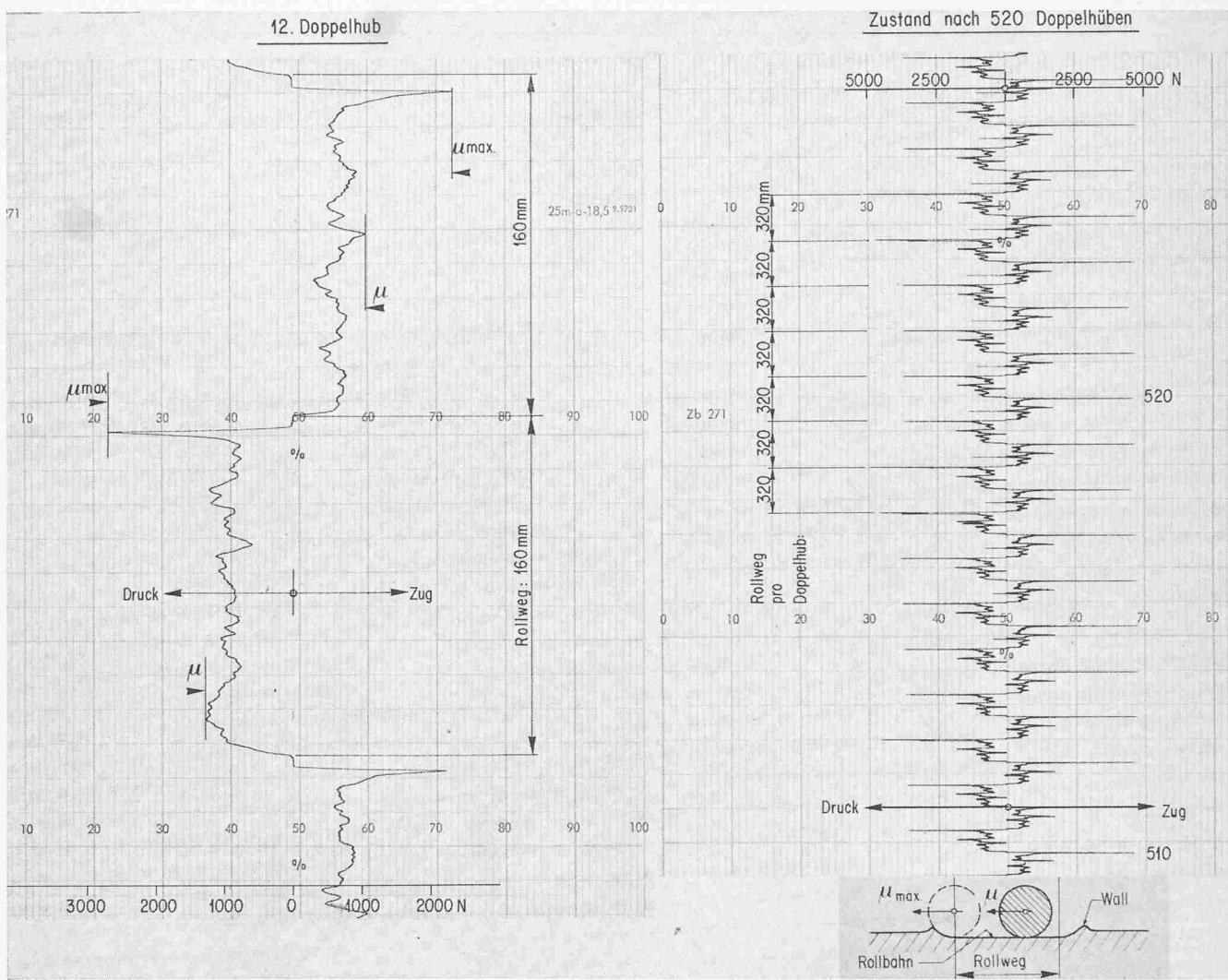


Bild 6. Kugellager. Zug- und Druckkraftverlauf in Abhängigkeit vom Rollweg der Rohrleitung. Die Diagramme zeigen den Zustand nach 12 bzw. 520 Doppelhüben, entsprechend 3,84 m bzw. 166,4 m Verschiebung der Rohrleitung. Die verschiedenen Massstäbe der Diagramme sind messtechnisch bedingt, die Rollgeschwindigkeit ist immer die gleiche

Probekörper und Versuchsbedingungen

Die zu prüfenden Lager unterscheiden sich kaum durch ihre äussere Form, sondern lediglich durch die gewählten Rollkörper. Es wurden nämlich zwei verschiedene Varianten geprüft, eine Ausführung mit Stahlkugeln und eine Ausführung mit Stahlwalzen als Rollelemente. Bei der ersten wurden je vier gehärtete und geschliffene Stahlkugeln vom Durchmesser 34 mm je Lager eingesetzt, bei der zweiten hingegen bloss deren zwei, die ebenfalls geschliffen und gehärtet waren. Durchmesser und Länge der Rollen betrugen ebenfalls 34 mm. Die Roll- und Wälzbahnen bestanden hingegen nur aus gewöhnlichen Walzprofilen aus St.37 mit unbearbeiteter und feuerverzinkter Oberfläche. Die Vickershärte der einzelnen Konstruktionsteile betragen:

- Stahlkugeln: $HV_{10} = \text{ca. } 900$
- Stahlwalzen: $\text{ca. } 750$
- Rollbahn (St.37): $\text{ca. } 140$ vor den Versuchen
 $160-280$ nach den Versuchen

Die ungleichen Eigenschaften der verwendeten Materialien müssen bei der Interpretation der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass diese Art Lager nur für untergeordnete Zwecke Verwendung finden darf, da es sich um eine recht primitive Ausführung handelt, bei der die Rollreibungszahlen

sehr hoch liegen und das Material auf den Wälzbahnen zudem arg strapaziert wird. Wenn diese Lager hier trotzdem beschrieben werden, so geschieht es aus dem einfachen Grund, die versuchstechnischen Möglichkeiten an ganzen Bauteilen aufzuzeigen.

Die weiteren Versuchsbedingungen lauteten:

Rollweg der Rohrleitung: $s = \pm 80 \text{ mm}$, d.h. $0,32 \text{ m}$
je Doppelhub

Geschwindigkeit
der Rohrleitung: $v = 0,833 \text{ mm/s.}$

Die erste Rollbewegung erfolgte von der Mittelstellung der Lager aus. In dieser symmetrischen Lage wurden die vier Stahlkugeln bzw. die zwei Walzen in der Mitte der Rollbahnen angeordnet, wobei die Stahlkugeln paarweise und ohne Zwischenraum aneinander gereiht zu liegen kamen. Die Rollversuche begannen in der Folge mit einem ersten Hub in Druckrichtung, worauf die normalen Rollbewegungen um je 160 mm erfolgten. Insgesamt wurden in jedem Versuch 1000 Doppelhübe ausgeführt.

Rollwiderstand

Wie bereits erwähnt, liegen die Rollreibungszahlen bei diesen Lagern sehr hoch. Für die Kugellager beispielsweise schwanken die μ -Werte zwischen 3 und 5 %, die μ_{\max} -Werte

zwischen 7 und 15 %. Bild 6 zeigt den Verlauf der Zug-Druckkräfte in Abhängigkeit vom Rollweg in zwei verschiedenen Versuchphasen. Der unruhige Verlauf der Diagramme stammt dabei von der holprigen Rollbahn (unbearbeitete Walzprofile).

PTFE-Gleitlager, Dauerversuche

Im Auftrag einer Lagerfirma führte die EMPA Dauerversuche an PTFE-Gleitlagern durch. Es handelte sich um Gleitreibungsuntersuchungen bei hin- und hergehender Bewegung, wobei Polytetrafluoräthylen (PTFE) und CrNi-Stahl die Gleitelemente bildeten. Hauptziel der vorliegenden Versuche war die Ermittlung der statischen und dynamischen Reibungszahlen μ_A und μ sowie das Verhalten der Gleitschichten in einem längeren Versuch mit insgesamt 2 km Gleitweg zu überprüfen.

Versuchseinrichtung und Durchführung

Bild 7 zeigt eine Aufnahme der Versuchsanordnung. Das Gleitkörpersystem besteht aus zwei übereinander angeordneten Probekörpern. Durch eine mit dem Antrieb verbundene Zwischenplatte werden die Gleitbleche hin- und herbewegt. Die symmetrische Anordnung von zwei gleichen Lagern wurde

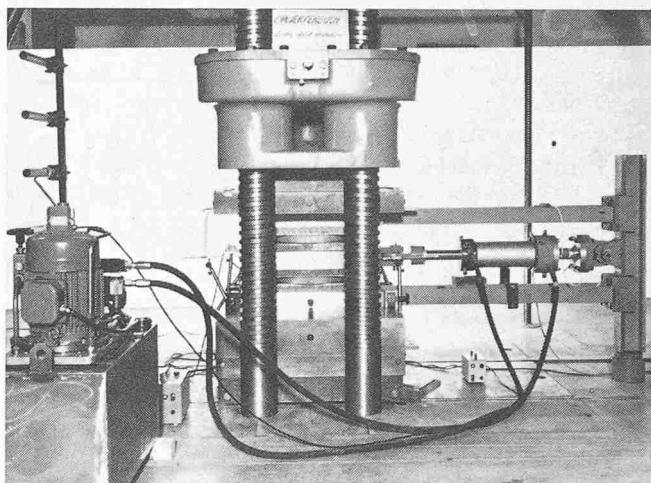


Bild 7. PTFE-Gleitlager

Versuchseinrichtung: Zwei Gleitlager in symmetrischer Anordnung in der 5-MN-Presse, links das Pumpenaggregat
Gleitelemente: PTFE mit Schmierung, CrNi-Stahl

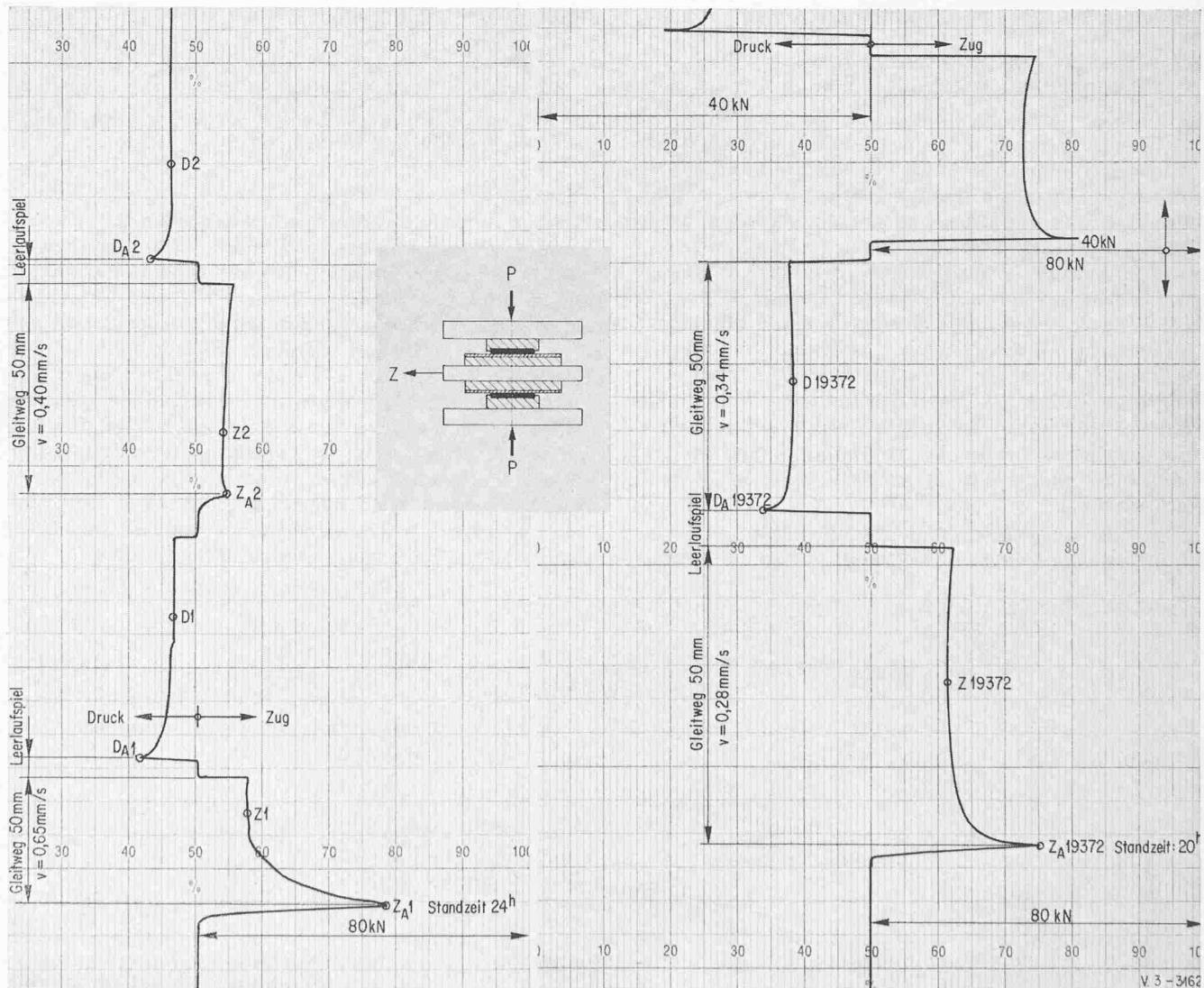


Bild 8. PTFE-Gleitlager. Zug- und Druckkraftverlauf in Abhängigkeit vom Gleitweg der Zwischenplatte

Links: Erster und zweiter Doppelhub. Der erste Hub in Zugrichtung erfolgte nach einer Standzeit von rund 24 Stunden
Rechts: Zustand nach 19 370 Doppelhüben, entsprechend einem Gleitweg von etwa 2 km

dadurch ermöglicht, dass die Probekörper bestimmte minimale Abmessungen aufwiesen. Im übrigen funktionierte die Versuchsanlage ähnlich wie in den Versuchen mit Rollenlagern, einzig die Öldruckversorgung war hier an einem etwas einfacheren Pumpenaggregat angeschlossen.

Für die Versuche wurden zwei gleich ausgebildete Gleitlager verwendet. Die wichtigsten Abmessungen betragen:

PTFE-Schicht: $\varnothing 280 \text{ mm}$, $4,5 \text{ mm}$ dick, mit Schmierung

Gleitblech: $300 \times 400 \text{ mm}$, 3 mm dick.

Das Versuchsprogramm sah insgesamt fünf Phasen vor, wobei zwei verschiedene Gleitgeschwindigkeiten gewählt wurden. Vor Bewegungsbeginn in den Phasen I und V wirkte die vertikale Belastung jeweils während 19 Stunden, in Phase III während einer Stunde (Standzeit). Die speziellen Versuchsbedingungen lauteten:

Spezifische Pressung: $p = 30 \text{ N/mm}^2$

Gleitweg der Zwischenplatte: $s = \pm 25 \text{ mm}$, d.h. $0,10^{\text{m}}$
je Doppelhub

Gleitgeschwindigkeit der Zwischenplatte: $v = 0,4 \text{ mm/s}$ Phasen I, III, V
 $v = 2,0 \text{ mm/s}$ Phasen II und IV

Temperatur: $T = \text{ca. } 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Die Prüfkörper waren mit Siliconfett geschmiert.

Reibungscharakteristik und Reibungszahlen

Der Verlauf des Gleitwiderstandes ist ganz anders als der des Rollwiderstandes bei Rollenlagern. Bei Gleitlagern ergibt sich beim Bewegen der Zwischenplatte in Zug- oder Druckrichtung nach dem Anliegen des Leerlaufgliedes zunächst eine Verspannung innerhalb des Prüfsystems. In dem in Bild 8 wiedergegebenen Zug-Druckkraftverlauf in Abhängigkeit vom Gleitweg drückt sich diese Verspannung als Kraftanstieg bis zu einem Höchstwert Z_A (Zugrichtung) bzw. D_A (Druckrichtung) aus. Erst dann beginnt die Zwischenplatte sich zu bewegen. Die Reibungskraft nimmt dann plötzlich ab und nähert sich mit zunehmendem Gleitweg einem Kleinstwert. Am Ende des Versuchsweges steigt der Gleitwiderstand wieder etwas an. Die Kraftspitze Z_A bzw. D_A bildet den statischen Wert (Anfahrwert) und tritt bei allen Versuchen auf. Der dynamische Wert Z bzw. D ist jeweils kleiner. Dieser typische Verlauf des Gleitwiderstandes wurde auch verschiedentlich in der Literatur beschrieben [3].

Aus der waagrechten Kraft Z (Gleitwiderstand von zwei Lagern) und der lotrechten Druckkraft P kann die Reibungs-

zahl μ berechnet werden. Mit den Bezeichnungen aus Bild 8 ergibt sich die Gleitreibungszahl für die Zugrichtung zu:

$$\text{statischer Wert: } \mu_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z_A}{P} \cdot 100 \text{ (%)}$$

$$\text{dynamischer Wert: } \mu = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z}{P} \cdot 100 \text{ (%)}$$

Der Verlauf der Reibungszahlen μ_A und μ in Abhängigkeit von der Anzahl der Doppelhübe ist aus Bild 9 ersichtlich. Mit Ausnahme des ersten Hubes zeigen die statischen und dynamischen Reibungszahlen etwa den gleichen Verlauf, nur ist der dynamische Wert jeweils kleiner. Bei der ersten Bewegung ist die Reibungszahl (Anfahrwert μ_{A1}) am grössten und fällt dann sogleich auf einen minimalen Wert ab, um allmählich wieder bis zum Ende dieser ersten Versuchsphase anzusteigen. In der folgenden Phase bleibt der Gleitwiderstand mehr oder weniger konstant bis zum 5000. Doppelhub, steigt aber gegen Ende dieses Abschnittes wiederum an. In der 3. und 4. Phase (in Bild 9 nicht mehr ganz ersichtlich) ist die Zunahme der Reibungswerte indessen nur noch geringfügig. Die eingeschalteten Standzeiten vor der 3. und 5. Phase haben jeweils eine Steigerung der Anfahrwerte zur Folge, allerdings nur für den jeweiligen ersten Hub in Zugrichtung.

Gleitreibungsversuche bei verschiedenen Temperaturen

Eine neue Aufgabe stellte sich bei den vorliegenden Versuchen, deren Hauptziel die Ermittlung der Gleitreibungszahlen bei drei verschiedenen Temperaturstufen war. Als Gleitelemente gelangten wiederum Polytetrafluoräthylen (PTFE) und Chromstahlproben zur Prüfung.

Versuchseinrichtung

Bild 10 zeigt eine zeichnerische Darstellung der Versuchsanordnung. Angeschlossen sind zudem Öldruckversorgung, elektronische Steuereinheit, Kühlagggregat und Messapparatur. Die zu prüfenden Gleitelemente aus PTFE und Chromstahl liegen dabei zwischen der oberen Druckverteilungsplatte und der sich horizontal bewegenden Zwischenplatte. In der unteren Ebene, die aus Symmetriegründen ebenfalls beweglich sein muss, wurden die Gleitschichten durch ein Edelstahlrollenpaar ersetzt, dessen Vickershärte HV rund 500 beträgt. Dadurch konnte eine Stabilisierung der Zwischenplatte erreicht werden, die in Anbetracht der kleinen Probekörper bei symmetrischer Anordnung nicht ohne weiteres gegeben wäre. Der Rollwiderstand der Edelstahlwalzen ist im Vergleich zum Gleitwiderstand der Prüfschichten vernachlässigbar klein.

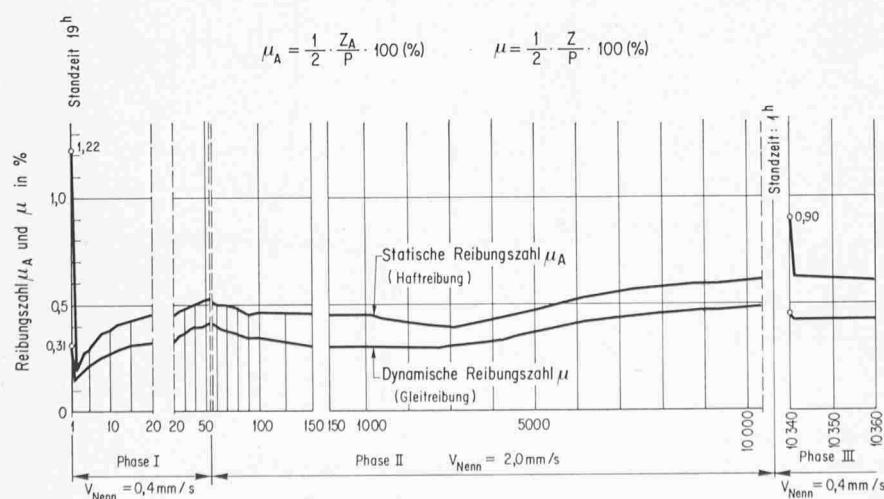


Bild 9. PTFE-Gleitlager. Gleitweg-Charakteristik bei langsamer Hin- und Herbewegung. Diagramme für die Zugrichtung. Dargestellt ist der Verlauf der Reibungszahlen in Abhängigkeit von der Anzahl der Doppelhübe bzw. des Gleitweges

Durch die mit dem *servohydraulischen Antrieb* verbundene Zwischenplatte wird die untere Gleitschicht (Chromstahlteil) hin- und herbewegt. Die gleichzeitig wirkende lotrechte Belastung von 130 kN wird ebenfalls von einem hydraulischen Zylinder aufgebracht. Die Hin- und Herbewegungen der Zwischenplatte erfolgen mit konstanter Geschwindigkeit und werden durch elektrische Geber gesteuert. Die für die Gleitbewegungen erforderlichen Zug-Druckkräfte werden von einem Servozylinder aufgebracht, der mit dem Öldruckversorgungsteil und der elektronischen Steuerung verbunden ist. Die Geschwindigkeit der Zwischenplatte bleibt über den ganzen Gleitweg konstant. Der Gleitwiderstand kann durch eine Zug-Druckmessdose registriert und durch einen Flachbettenschreiber aufgezeichnet werden.

Als *Kältemaschine* wurde ein Sole-Umlaufkühler mit einem Temperaturbereich von -40°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ verwendet. Die Kühlung der Gleitschichten erfolgte über Kühlplatten, die in einem Umlaufsystem an das Temperierbad angeschlossen waren. Als Kühlflüssigkeit diente Baysinolöl.

Versuchsbedingungen und Durchführung

Die wichtigsten Versuchsbedingungen waren:

- Spezifische Pressung: $p = 30 \text{ N/mm}^2$
- Gleitweg
- der Zwischenplatte: $s = \pm 10 \text{ mm}$, d.h. 40 mm
je Doppelhub
- Anzahl der Doppelhübe: $n = 25$
(je Versuch)
- Temperaturstufen: $T = +21, 0, -35^{\circ}\text{C}$

Vor Bewegungsbeginn wurden die eingebauten und geschmierten Proben während einer Stunde (Standzeit) der vertikalen Last von 130 kN unterworfen. Danach erfolgte die erste Gleitbewegung von einer Endlage aus in Zugrichtung, wobei die Gleitgeschwindigkeit, wie bereits erwähnt, auf dem ganzen Weg konstant blieb und $0,4 \text{ mm/s}$ für Zug- und Druckrichtung betrug. In jedem Versuch wurden insgesamt 25 Doppelhübe entsprechend 1 m Gleitweg gefahren. Die Erwärmung bzw. Abkühlung auf die Soll-Temperatur erfolgte während der vorgenannten Standzeit.

Versuchsergebnisse

Die grundlegende Reibungscharakteristik wurde bereits im Abschnitt «PTFE-Gleitlager, Dauerversuche» ausführlich beschrieben, so dass hier nicht besonders darauf eingegangen werden muss. Die Reibungszahlen errechnen sich wiederum aus der waagrechten Reibungskraft Z und der lotrechten Druckkraft P zu:

$$\mu_A = \frac{Z_A}{P} \cdot 100 \text{ (%)} \quad \text{statischer Wert}$$

$$\mu = \frac{Z}{P} \cdot 100 \text{ (%)} \quad \text{dynamischer Wert}$$

In den oben aufgeführten Formeln ist der Anteil des Rollwiderstandes vernachlässigt. Der Verlauf der Reibungszahlen in Abhängigkeit von der Anzahl der Doppelhübe ist in Bild 11 graphisch dargestellt. Der Unterschied zwischen den drei untersuchten Temperaturstufen wird darin deutlich sichtbar. Vor allem bei Tieftemperaturen von -35°C steigen die Gleitwiderstände wesentlich an. Dargestellt sind hierin die Reibungswerte von PTFE und hartverchromten Stahlplatten.

Bewehrte Elastomerlager

In diesem Abschnitt werden einige ausgewählte Versuche an Elastomerlagern beschrieben, die im Rahmen von Zulassungsversuchen gemäss den «vorläufigen Bestimmungen für

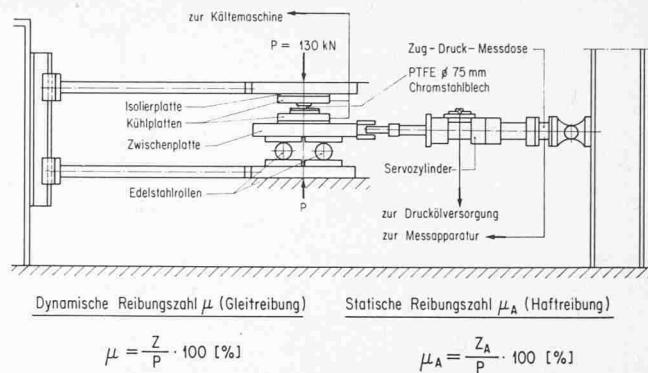


Bild 10. Gleitreibungsversuche. Gleitkörpersystem in der Prüfanlage mit servohydraulischem Antrieb, Zug-Druck-Messdose, Servozylinder, Kältemaschine und Kühlplatten sowie Öldruckversorgung und elektronischer Steuerung. Der Rollwiderstand der beiden Edelstahlwalzen ist gegenüber der Gleitreibung vernachlässigbar klein

Spezifische Pressung der PTFE-Schichten: 30 N/mm^2

Gleitgeschwindigkeit: $v = 0,4 \text{ mm/s}$

Gleitweg: $s = \pm 10 \text{ mm}$

Anzahl der Doppelhübe je Versuch $n = 25$

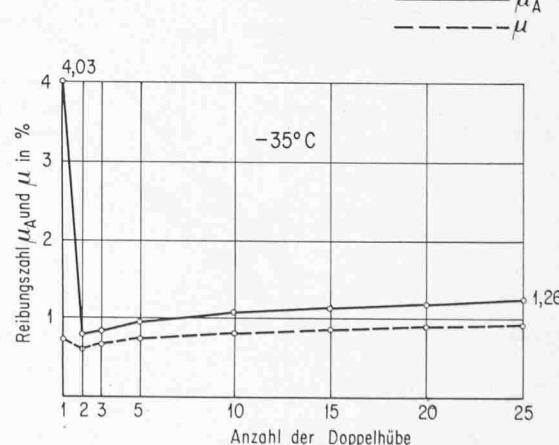
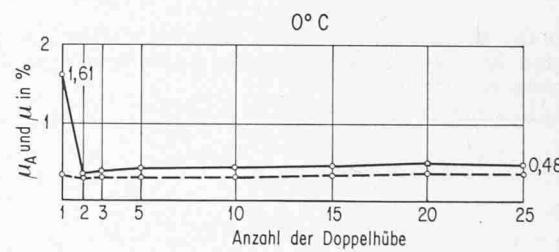
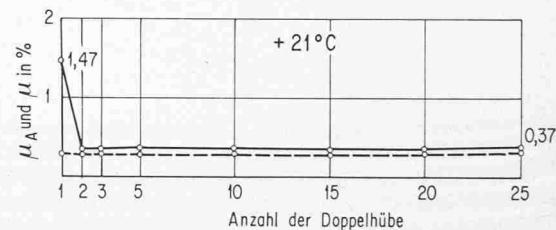


Bild 11. Gleitreibungsversuche. Statische und dynamische Reibungszahlen in Abhängigkeit von der Anzahl der Doppelhübe

Gleitschichten: PTFE mit Schmiertaschen, hartverchromte Stahlplatten

Temperaturstufen: $+21,0$ und -35°C

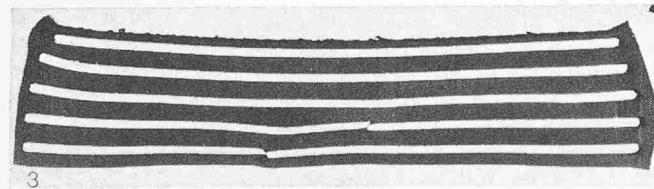
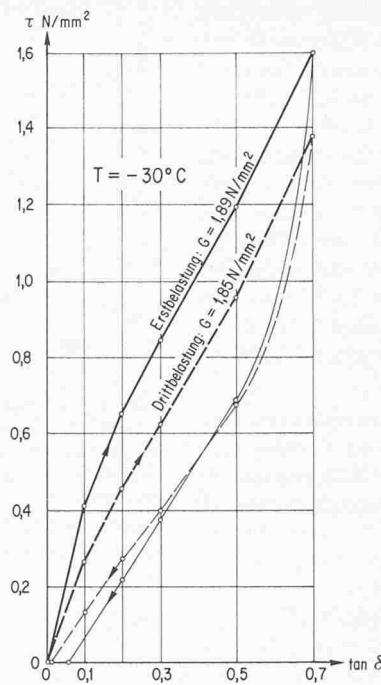
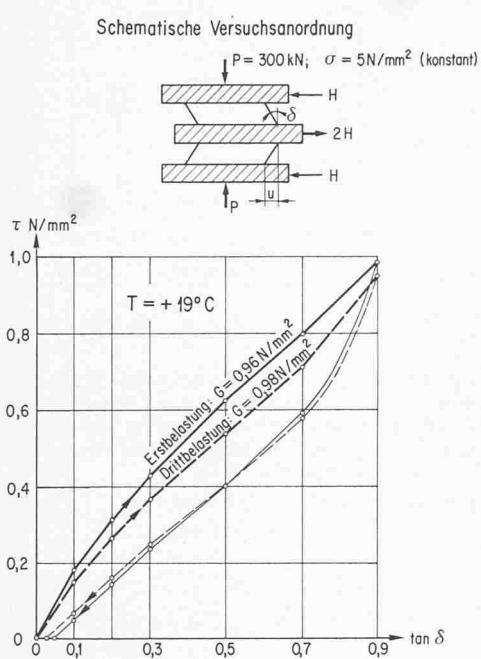


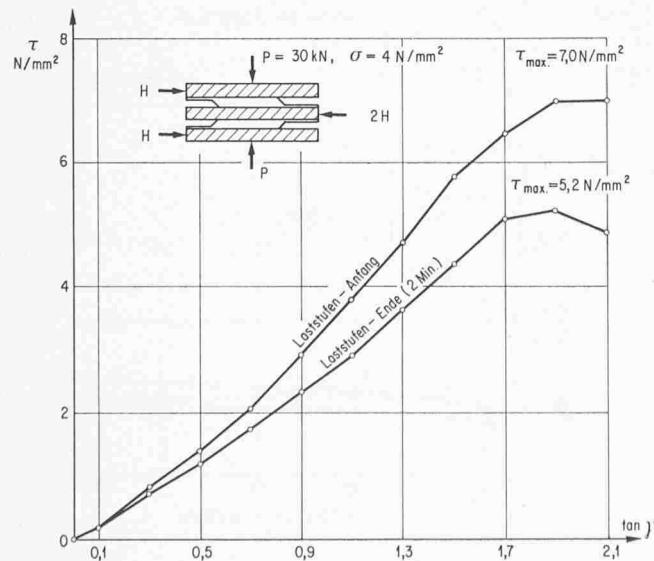
Bild 13. Bewehrte Elastomerlager. Statischer Bruchversuch bei senkrechter Belastung. Aufnahme nach dem Bruch (Schnitt $250 \times 52 \text{ mm}^2$): Reissen der Stahlbleche

Bruchspannung: $\sigma_{Br} = 195 \text{ N/mm}^2$

die Zulassungsprüfung bewehrter Elastomerlager» des Institutes für Bautechnik, Berlin, durchgeführt wurden. Die Probenkörper bestanden aus synthetischem Chloroprenkautschuk mit Bewehrungseinlagen aus St. 50. Vor Beginn der Prüfungen erfolgte eine künstliche Alterung der Prüfkörper, bei der die Lager während 168 Stunden bei einer Temperatur von $+70^\circ\text{C}$, anschließend während mindestens 48 Stunden bei Raumtemperatur gelagert wurden. Unter zahlreichen Tests sollen hier zwei davon etwas näher erläutert werden, nämlich die Bestimmung des G-Moduls bei statischer Belastung und verschiedenen Temperaturen sowie statische Bruchversuche unter senkrechter und horizontaler Belastung.

Bestimmung des G-Moduls bei statischer Belastung

Die Versuchsanordnung kann der schematischen Darstellung in Bild 12 entnommen werden. Die Abmessungen der verwendeten Lager betragen:



Länge \times Breite:	$200 \times 300 \text{ mm}^2$
Einbauhöhe:	52 mm
Anzahl und Dicke der inneren Schichten:	$4 \times 8 \text{ mm}$
Dicke der Aussenschichten:	$2,5 \text{ mm}$
Anzahl und Dicke der Stahlbleche:	$5 \times 3 \text{ mm}$

Die Ermittlung des G-Moduls erfolgte bei Raumtemperatur sowie bei -20°C , -25°C und -30°C , wobei bestimmte Einkühlzeiten zu beachten waren. Bei der Prüfung wurden die Lager einer konstanten Auflast von 300 kN unterworfen, entsprechend einer Spannung von 5 N/mm^2 . Die horizontale Verschiebung der Zwischenplatte erfolgte stufenweise und mit der konstanten Geschwindigkeit von $12,5 \text{ mm/min}$. Auf jeder Stufe wurde die Verformung während zwei Minuten konstant gehalten und dann die Last abgelesen. Die ermittelten Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramme für die Erst- und Drittbelastung sind ebenfalls in Bild 12 enthalten. Dargestellt sind

Bild 14. Bewehrte Elastomerlager: Versuche an Lagerausschnitten. Bruchversuch unter horizontaler Belastung: Schubspannungs-Gleitwinkel-Diagramme

Abmessungen der Ausschnitte: $50 \times 150 \times 21 \text{ mm}^3$

die Diagramme für die Temperaturstufen von +19 °C und -30 °C. Die daraus berechneten Schubmoduln betragen:

$$\text{Raumtemperatur: } G_1 = 0,96 \text{ N/mm}^2 \text{ Erstbelastung}$$

$$T = -30^\circ\text{C}: \quad G_1 = 1,89 \text{ N/mm}^2 \text{ Erstbelastung}$$

Statischer Bruchversuch unter senkrechter Belastung

Die Abmessungen des hier verwendeten Lagers betragen $250 \times 400 \times 52 \text{ mm}^3$. Innere Schichten und Stahlbleche sind gleich wie bei den oben beschriebenen Probekörpern. Der Bruchversuch unter zentrischer Belastung wurde in der 20-MN-Presse durchgeführt. Die Erhöhung der Spannung erfolgte in Stufen von 15 N/mm^2 . Auf jeder Belastungsstufe wurde die Last während zwei Minuten konstant gehalten. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug etwa $21,5 \text{ N/mm}^2$ und Minute. Die Messung der Verformungen erfolgte mittels vier an den Eckpunkten des Lagers angebrachten Uhren von $\pm 1/100 \text{ mm}$ Genauigkeit. Die ermittelte Bruchlast beträgt: $P_{Br} = 19,5 \text{ MN}$, die einer Bruchspannung von 195 N/mm^2 entspricht. Gegenüber der zulässigen Spannung von $12,5 \text{ N/mm}^2$ bedeutet dies eine Bruchsicherheit von $S = 15,6$. Die Aufnahme in Bild 13 zeigt das Lager im Bruchzustand. Wie aus dem abgebildeten Querschnitt ersichtlich wird, liegt die Bruchursache im Versagen der Bewehrung: von insgesamt fünf Blechen wurden zwei gerissen.

Statischer Bruchversuch unter horizontaler Belastung

Dieser Versuch wurde an herausgearbeiteten Lagerelementen durchgeführt. Die Probekörper hatten einen Grundriss von $50 \times 150 \text{ mm}^2$ und waren an den Kopfenden unter 45° abgeschnitten (vgl. dazu die Angaben in Bild 15). Die schematische Versuchsanordnung ist aus Bild 14 ersichtlich. Durch eine neue Versuchseinrichtung konnte die Auflast P von 30 kN , entsprechend einer Normalspannung von 4 N/mm^2 , während der ganzen Versuchsdauer konstant gehalten werden. Die Horizontalbelastung wurde in Stufen aufgebracht, die jeweils einem $\tan \gamma$ von $0,2$ entsprachen. Auf jeder Stufe wurde die Verformung während zwei Minuten konstant gehalten und die Schubkraft je am Anfang und am Ende abgelesen. In Bild 14 sind die Versuchsergebnisse graphisch dargestellt. Beim Schubbruch betrug die Schubspannung:

$$\tau_{max} = 7,0 \text{ N/mm}^2: \text{Laststufenanfang}$$

$$\tau_{max} = 5,2 \text{ N/mm}^2: \text{Laststufenende}$$

In diesem Zustand betrug der $\tan \gamma$ 1,9. Bild 15 zeigt die Lagerausschnitte vor und nach dem Bruchversuch.

Topflager, Abnahmeprüfungen

Bei den letzten Versuchen, die hier erwähnt werden, handelt es sich um einfache Abnahmeprüfungen von Topflagern mit Nutzlasten von 5000 kN . Zwei von einer Lagerfirma gelieferten Brückenlager wurden in 20-MN-Presse der EMPA eingebaut und einer zentrischen Druckbeanspruchung gemäß der Anordnung in Bild 16 unterworfen. Zur Bestimmung der vertikalen Verformungen dienten kreuzweise angeordnete Messuhren, welche die Veränderungen des Abstandes der Pressenplatten erfassen. Die Belastung wurde in Stufen aufgebracht und bis zur 1,5fachen Nutzlast gesteigert.

In der gleichen Presse kann zudem auch die Tragfähigkeit ähnlicher Lager in Querrichtung überprüft werden. Dazu ist ebenfalls eine symmetrische Anordnung von zwei gleichen Lagern erforderlich. Die Einleitung der horizontalen Kräfte geschieht dabei über vier hydraulische Zylinder, die in einer speziellen Rahmenkonstruktion kraftschlüssig angeordnet sind. Die auftretenden Verschiebungen können sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung gemessen werden.

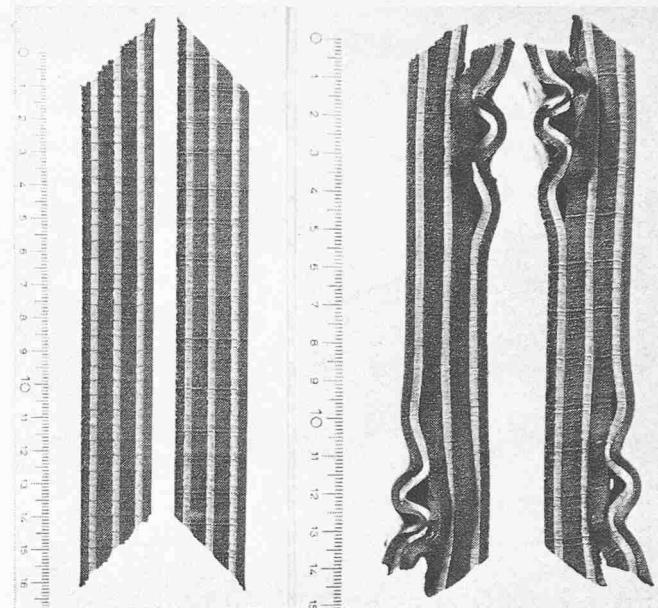


Bild 15. Bewehrte Elastomerelager: Versuche an Lagerausschnitten Bruchversuch unter horizontaler Belastung:
Aufnahmen vor und nach dem Bruchversuch

Abmessungen der Probekörper: $50 \times 150 \times 21 \text{ mm}^3$

Innere Schichten: $2 \times 5 \text{ mm}$

Stahlbleche: $3 \times 2 \text{ mm}$

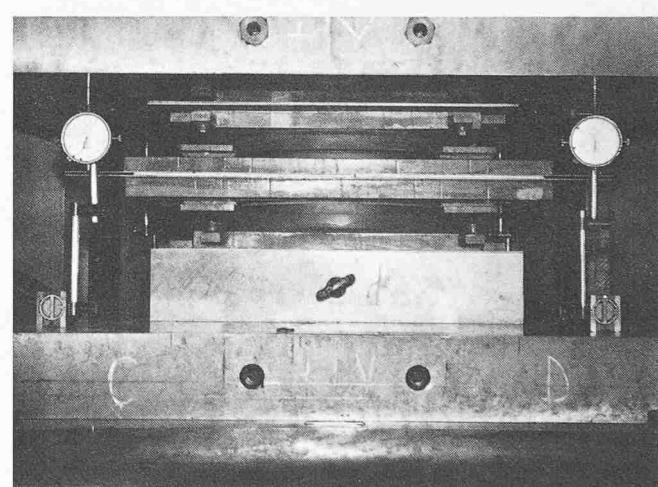


Bild 16. Topflager. Statischer Versuch unter vertikaler Belastung: Versuchsanordnung in der 20-MN-Presse. Nutzlasten: 5000 kN

Literaturverzeichnis

- [1] Eggert/Grote/Kauschke: «Lager im Bauwesen», Band I. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1974: Vergleiche dazu die Ausführungen im Abschnitt 5 über Baurecht, Normen, Richtlinien.
- [2] Hakenjos V.: «Untersuchungen über die Rollreibung bei Stahl im elastisch-plastischen Zustand.» Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart.
- [3] Uetz H./Hakenjos V.: «Gleitreibungsuntersuchungen mit Polytetrafluoräthylen bei hin- und hergehender Bewegung.» Die Bautechnik, Heft 5, Mai 1967.

Adresse des Verfassers: A. Maissen, dipl. Ing. ETH, Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA), Ueberlandstr. 129, 8600 Dübendorf.