

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 103/104 (1934)
Heft: 16

Artikel: Lagerspiele für hohe Drehzahlen
Autor: Falz, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-83197>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

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

INHALT: Lagerspiele für hohe Drehzahlen. — Beitrag zur Untersuchung des physikalischen und statischen Verhaltens kohärenter Bodenarten. — Wettbewerb für Seeufergestaltung der Stadt Thun — Der Ausbau des Bahnhofplatzes Genf-Cornavin. — Mitteilungen: Der neue Bahnhof Florenz. Neue Dampffahrzeuge für Strasse und Schiene. Die Vereinigung „Freunde der internat. Kongresse für Neues Bauen“. Die

elektrische Turmuhr des Eiffelturms in Paris. Betriebswissenschaftliche Abendvorlesungen an der E. T. H. VII. Internat. Strassenkongress in München. Kunstgewerbemuseum der Stadt Zürich. Die Direttissima Bologna-Firenze. Ein internat. Geometerkongress. — Wettbewerbe: Reformierte Kirche in Beinwil. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 103

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 16

Lagerspiele für hohe Drehzahlen.

Von E. FALZ, VDI, Hannover.

Bei Gleitlagern für mässige Drehzahlen oder solche raschlaufenden Maschinenteile, die unbedingt grösste Führungsgenauigkeit erfordern (wie z. B. Schleifspindeln), kommen sogenannte *Führungs-Laufsitz*e in Betracht. Sie sind grundsätzlich — auch bei grösseren Durchmessern — verhältnismässig eng und werden in grösserer Weite nur dann angewandt, wenn dies durch Rücksichten auf Wärmedeformationen, Wellendurchbiegungen, Montageungenauigkeiten oder Herstellungskosten geboten erscheint.

Bei Lagern grösserer raschlaufender Maschinen, deren umlaufende Massen nicht homogen sind (wie z. B. bei Elektromotoren und -Generatoren, Dampfturbinen, Kreiselpumpen und -Verdichtern, Gassaugern, Schleudermaschinen usw.), verbleiben von der Herstellung, bzw. entstehen im Betriebe bekanntlich gewisse, praktisch nicht beseitigbare Unbalancen, die sich durch umlaufende Reaktionen in den Wellenzapfen fühlbar machen und durch Vermittlung der Schmierschicht auch auf die Lager übertragen. Die Heftigkeit dieser wahrnehmbaren Vibrationen hängt nach Ansicht des Verfassers in erheblichem Masse vom Lagerpiel bzw. der im Betriebe gegebenen Lage des Zapfens im Lager ab.

Nach der hydrodynamischen Theorie, der die Vorgänge in solchen „vollkommen geschmierten“ Gleitlagern mit hinlänglicher Annäherung folgen, schwimmt der Zapfen innerhalb des Lagerspieles auf der Schmierschicht derart, dass er sich — gegenüber der Ruhelage — sowohl nach oben, wie auch in der Drehrichtung seitlich verlagert. Je nach dem „Einlaufwinkel“, d. h. dem Zentriwinkel zwischen Oelzutritt und Lastrichtung, beschreibt das Zapfenmittel vom Ruhezustand (Tiefstpunkt) bis zur entgegengesetzten Grenzlage — unendlich grosse Drehzahl (Lagermittelpunkt) — eine Bahn, die mehr oder weniger einem Halbkreis ähnelt (Abb. 1).¹⁾

Den bisher sorgfältigsten experimentellen Wellenbahnermittlungen von W. Nücker²⁾ sind die in Abb. 2 eingetragenen sternförmigen Versuchspunkte für ein ganzumschliessendes Lager entnommen, deren Lage sich weitgehend mit dem gestrichelt eingezeichneten Halbkreis deckt; fast gleichartigen Verlauf zeigen die kreisförmigen Versuchspunkte bei halbumschliessendem Lager.

Die in Abb. 1 eingetragene Relativ-Exzentrizität χ bildet ein Mass der exzentrischen Verlagerung des Wellen-

mittels zum Lagermittel. Je kleiner bei gegebener Drehzahl das Lagerpiel, um so kleiner wird χ , um so zentrischer schwimmt die Welle. Um so geringer wird aber auch (infolge der Spielverkleinerung) die Dämpfung der rasch umlaufenden Reaktionen durch die Schmierschicht, weil das Schmiermittel um so langsamer verdrängt wird, je enger das Spiel. Bei ganz kleinem Lagerpiel übertragen sich die Vibrationen der Welle fast mit voller Härte auf das Lager.

Die Richtigkeit dieser Ueberlegung wird durch die bekannten BBC-Versuche — ausgeführt von J. von Freudenreich³⁾ — voll bestätigt: Kleinste Spiele ergaben allerstärkste und härteste Vibrationen, grosse und sehr grosse Spiele — völlig vibrationsfreien Lauf. Aehnliche Erfahrungen, die eine Notiz der Zeitschrift „Petroleum“ wiedergibt⁴⁾, sind vom Verfasser gemacht worden. Nach obiger Darstellung — im Gegensatz zu älteren Auslegungen (auch des Verfassers) — möchte man mehr zu der Anschauung neigen, dass die Vibrationen nicht durch die bei kleinem Spiel „unstabile“ Wellenlage (zu kleines χ) hervorgebracht werden, sondern dass sie durch die unvermeidlichen Unbalancen entstehen und bei kleinem Spiel nur unzulänglich gedämpft werden; bei grösserem Spiel wird die Wirkung der Unbalancen durch die erheblich weichere Dämpfung der Schmierschicht so abgeschwächt, dass jede Härte verschwindet und die Lagerkörper trommelnde Schwingungen überhaupt nicht mehr fühlen lassen.

Jedenfalls sind, um ruhigen Gang zu erreichen, allzu kleine Exzentrizitäten zu vermeiden. Als kleinste zulässige Relativ-Exzentrizität darf etwa $\chi = 0,5$ angesehen werden, wenn unruhigem Lauf vorgebeugt werden soll.

Die Exzentrizität χ ist abhängig von der Drehzahl, der Oelzähigkeit in der Schmierschicht, der Flächenpressung und dem Lagerpiel. Von diesen Grössen ist die Drehzahl praktisch ja stets von vornherein gegeben, sodass sie als Variable ausscheidet. Bei Lagern mit künstlicher Kühlung pflegt auch die Oelaustrittstemperatur nur wenig verschieden zu sein, so dass damit auch die mittlere Zähigkeit in der Schmierschicht — die Oelgattung liegt praktisch nahezu fest — als angenähert konstant angenommen werden kann. Der Flächendruck variiert bei Maschinen der genannten Art etwa von 5 bis höchstens 20 kg/cm².

Als ausgesprochene Variable zur Gewährleistung der anzustrebenden Exzentrizität von $\chi = 0,5$ als Mindestgrenzwert verbleibt somit eigentlich nur das Lagerpiel, da der Flächendruck — bei konstruktiv gegebenem Zapfendurchmesser — in wesentlichen Grenzen auch nicht verändert werden kann, wenn andere Nachteile (Kantenpressungen bei zu langen Lagern oder gefährdete SelbstEinstellung bei zu kurzer Lagerlänge) vermieden werden sollen. Man hat demnach das Lagerpiel bei dem jeweils gegebenen Lagerflächendruck so zu bemessen, dass eine Exzentrizität von mindestens $\chi = 0,5$ erreicht wird.

Das erforderliche Lagerpiel für den betriebswarmen Zustand (das sogenannte Warmspiel) kann man für $\chi = 0,5$ mit zureichender Annäherung nach Formel 53 des Buches des Verfassers⁵⁾ ermitteln. Es beträgt (für halbumschliessende Lager) etwa

$$(D'' - d'')_{\chi=0,5} = \frac{a''}{309} \sqrt{\frac{z \cdot \eta}{p}} \text{ mm} \quad \dots \quad (I)$$

³⁾ „Untersuchungen an Lagern“, BBC-Mitteilungen 1927, Heft 1 bis 4.

⁴⁾ „Beseitigung von Lagervibrationen an einem Turbogenerator“, Petroleum 1933, Heft 40.

⁵⁾ E. Falz: „Grundzüge der Schmiertechnik“ II. Auflage 1931, Verlag Jul. Springer, Berlin, bzw. „Technique du graissage“ 1933, Librairie Ch. Béranger, Paris.

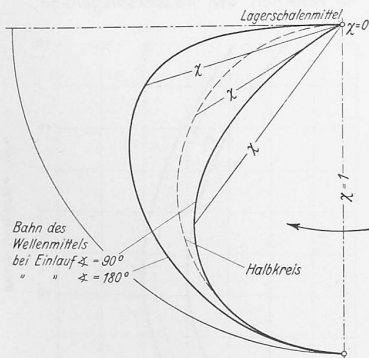


Abb. 1. Theoretische Bahn des Wellenmittels nach Stieber. Gestrichelt: Halbkreis.

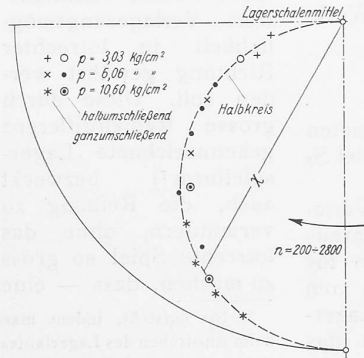


Abb. 2. Experimentell ermittelte Bahn des Wellenmittels nach Nücker für ganz- und halbumschliessende Lagerschale.

wobei D'' und d'' den Durchmesser (in mm) von Lagerbohrung bzw. Zapfen im Warmzustande, z die mittlere Oelzähigkeit in der Schmierschicht in $\text{kg} \cdot \text{sek}/\text{m}^2$, n die minutliche Drehzahl und p den mittlern Lagerflächendruck in kg/cm^2 bedeutet.

Wie aus Gl. (1) ersichtlich, erfordern Maschinen mit hoher Drehzahl, die möglichst vibrationsfrei laufen sollen, *Spezial-Laufsitze*, die mit dem Lagerdurchmesser linear zunehmen, also proportional d verlaufen, während beispielsweise die DIN-Laufsitze (die *Führungslaufsitze* darstellen) proportional $d^{0.33}$ wachsen — also sehr viel langsamer als die Schnellaufsitze oder Turbolaufsitze. Hieraus geht ohne weiteres hervor, dass zweckmässige Turbo-Lagerspiele für grosse und kleine Durchmesser durch Anwendung nur einer einzigen weiten Laufsitze nach DIN *nicht* zu erhalten sind, weil der Charakter der DIN-Laufsitze der oben erwähnten Forderung nach linearer Abhängigkeit des Spieles vom Durchmesser nicht entspricht.

Um auch der Forderung ruhigen Laufes bei hochtourigen Maschinen durch eine genormte Passung genügen zu können, wurden auf Anregung des Verfassers einige Schweizer VSM-Weitlaufsitze mit in die ISA-Laufsitzenormen aufgenommen, da die Spiele dieser Sitze linear proportional mit dem Lagerdurchmesser zunehmen, wie das in der obigen Ableitung als erforderlich nachgewiesen worden war.

Setzt man in Gl. (1) die Schmiermittelzähigkeit $z = 0,0008 \text{ kg} \cdot \text{sek}/\text{m}^2$ (ungefährer Durchschnittswert für Lager mit künstl. Kühlung), die Drehzahl beispielsweise mit $n = 3000$ und die Flächenpressung mit $10 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ein, so ergibt sich als Warmspiel, das der Kürze wegen mit S_w bezeichnet werden möge,

$$(D'' - d'')_{z=0,5} = S_w = \frac{d''}{309} \cdot \sqrt{\frac{0,0008 \cdot 3000}{10}} = \frac{d''}{309} \cdot \frac{1}{\sqrt{+1,16}}$$

$$S_w = \frac{d''}{309 \cdot 2,04} = \frac{d''}{630} \text{ oder } 1,59 \text{ ‰ von } d.$$

In ähnlicher Weise kann das Warmspiel auch für andere Drehzahlen und weitere in Betracht kommende Flächendrücke — einfach in ‰ von d , also für alle Zapfendurchmesser gültig — ermittelt werden. — Um diese errechneten Spiele im betriebswarmen Zustande zu erhalten, muss das werkstattechnisch auszuführende Lagerspiel (das sogenannte Kaltspiel) um so viel grösser sein als das Warmspiel, dass der Einfluss der Wärmedehnung praktisch ausgeglichen wird. Dieser zur Kompensation der Wärmedehnungs-Deformationen zum Warmspiel zu machende Zuschlag sei mit Z' bezeichnet, sodass das Kaltspiel S_k sich aus dem Warmspiel S_w aus der Gleichung ergibt:

$$S_k = S_w + Z' \dots \dots \dots (2)$$

Bezüglich der Berechnung von Z' muss hier auf die Arbeit des Verfassers „Das Lagerspiel bei höheren Temperaturen“⁶⁾ verwiesen werden. Für künstlich gekühlte Lager, deren Temperatur mit etwa 70° angenommen werden kann, ergibt sich nach jener Abhandlung (für 20° Werkstatttemperatur) ein erforderlicher Zuschlag von

$$Z' = 1,5 \cdot \frac{(70 - 20)}{100} = 0,75 \text{ ‰ von } d.$$

Dieser Betrag Z' wäre also allen nach Gl. (1) errechneten Warmspielen S_w hinzuzufügen, um das gesuchte Kaltspiel S_k zu erhalten.

In Abb. 3 sind die nach Gl. (1) errechneten Warmspiele S_w , der gemeinsame Zuschlag Z' und die daraus ermittelten Kaltspiele S_k für $n = 3000$ und $n = 1500$ für Lagerflächendrücke von $p = 5$ bis $20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ in ‰ vom Zapfendurchmesser — also für kleinere und grössere Lagerdurchmesser geltend — graphisch dargestellt. Wie das Bild zeigt, haben Flächendruck und Drehzahl einen recht

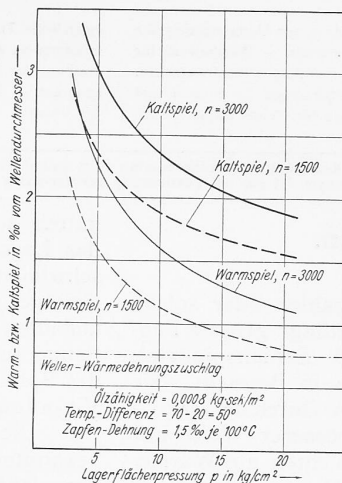


Abb. 3. Rechnerisch ermittelte Warm- und Kaltspiele nach Falz.

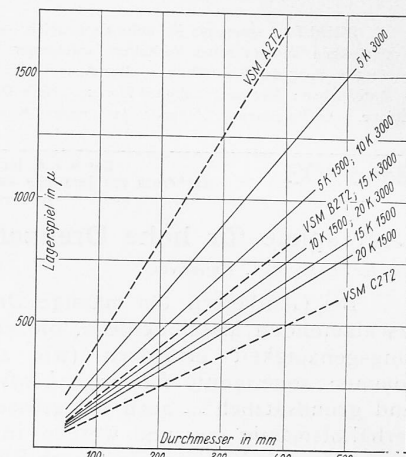


Abb. 4. Rechnerisch ermittelte Kaltspiele nach Falz für die wichtigsten Drehzahlen und Flächendrücke. Gestrichelt: Schweiz. VSM-Weitspiele.

erheblichen Einfluss auf die Grösse des erforderlichen Lagerspieles, sodass die Festlegung zweckmässiger Stufungen für Weitspiele der hier behandelten Art zweifellos schon eingehendere Sachkenntnis voraussetzt.

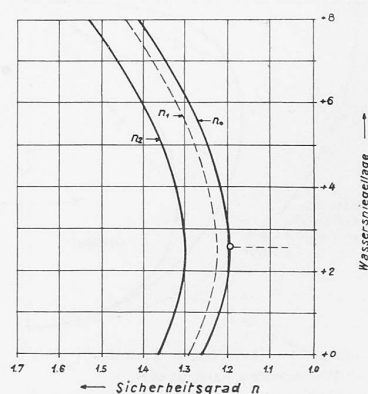
In welchem Umfang die Staffelung der Schweizer Spezialpassungen gelungen ist, zeigt die graphische Darstellung Abb. 4: Verzeichnet sind dünn die mittleren Kaltspiele nach den Gleichungen (1) und (2) für $n = 3000$ und $n = 1500$ bei $p = 5, 10, 15$ und $20 \text{ kg}/\text{cm}^2$, und dick gestrichelt die mittleren Spiele (natürlich ebenfalls Kaltspiele) der Schweizer VSM-Präzisions-Weitpassungen A2T2, B2T2 und C2T2, in Abhängigkeit vom Durchmesser. Wie das Schaubild erkennen lässt, deckt sich der Sitz B2T2 mit den errechneten Spielen für $n = 3000$ bei $p = 15$, entspricht damit also genau dem häufigsten Ausführungsfall. Die genannte Passung erfasst aber mit hinlänglicher Genauigkeit auch noch die Fälle $n = 1500$ bei $p = 10$ und $n = 3000$ bei $p = 20$; zur Not auch noch den Strahl für $n = 3000$ bei $p = 10$ und $n = 1500$ bei $p = 5$.

In der Mitte zwischen B2T2 und C2T2 liegen die Linien für $n = 1500$ bei $p = 15$ und für $n = 1500$ bei $p = 20$; bis zu C2T2 hinunter reichen aber die Fälle natürlicher Kühlung bei Elektromaschinen mit mässigeren Drehzahlen und Riemetrieb.

Zwischen B2T2 und A2T2 liegt von den gerechneten Spielen nur noch der Fall $n = 3000$ bei $p = 5$. Die A-Passung findet Anwendung bei höheren Drehzahlen, ferner, allgemein, auch bei den sogenannten „Zitronen-Spielen“, — vom Verfasser so benannt nach der Form des Lagerlaufquerschnittes gemäss Abb. 5, die dem stilisierten Längsschnitt durch eine Zitrone ähnelt. Diese Lagerlaufquerschnittsform wird — unabhängig von der Drehzahl — angewandt, wenn die gesamte Spülölmenge nur an den Lagerstirnenden abgeführt, dem Wellenzapfen indes keine nennenswerte Verlagerungsmöglichkeit in lotrechter Richtung gewährt werden soll. Diese durch grosse Radiendifferenz gekennzeichnete Lagerspielform⁷⁾ bezweckt auch, die Reibung zu vermindern, ohne das lotrechte Spiel so gross zu machen, dass — eine

⁷⁾ Sie entsteht, indem man beim Ausdrehen des Lagerlaufes Beilagen in der Teilfuge benutzt, die nachher herausgenommen werden.

Sicherheitsgrad $n = \frac{M(-)}{M(+)}$ in Funktion der Wasserspiegellage



⁶⁾ Zeitschrift „Petroleum“ 1934, Heft 2.

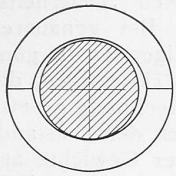


Abb. 5. Zitronen-Spiel für künstlich gekühlte Turbomaschinenlager.

bei zweipoligen elektrischen Maschinen mit sehr kleinem Luftspalt begründete Befürchtung — der Rotor eventuell beim Anlassen oder bei einem Belastungsstoss nach oben gegen die Polschuhe gerissen werden könnte. — Ob die beim „Zitronen-Spiel“ gewaltsam unterdrückte natürliche Wellenverlagerung, die durch die bekannten Rechnungsverfahren nicht mehr zu erfassen ist, andererseits nicht zu Nachteilen

führt, z. B. zu einseitigem Verschleiss der Oberschale und verminderter Dämpfung in senkrechter Richtung (in der das Kaltspiel mindestens = Z' sein muss), mag dahingestellt bleiben; ohne Notwendigkeit (also wenn besondere Rücksichten auf Luftspalt oder Schaufelspiel nicht zu nehmen sind) sollte man jedenfalls von der normalen (kreisrunden) Form des Lagerquerschnittes nicht abgehen.

Die genannten drei VSM-Spezial-Laufsitzte tragen bei kreisrunder Lagerbohrung der Bedingung vibrationsfreien Laufes und der Berücksichtigung der Wärmedehnungserscheinungen ohne Zweifel so weitgehend Rechnung, wie dies nach dem heutigen Stande der Erkenntnis überhaupt möglich erscheint. Zu bemerken ist dabei aber, dass die genannten Turbolaufsitzte nicht Weitsitze im üblichen Sinne, (also etwa entsprechend den Laufsitzten der DIN-Grobpassung) darstellen, sondern vielmehr ausgesprochene Präzisions-Weitsitze, denn ihre Toleranzen sind prozentual so gering, dass ihr „Spiel-Quotient“⁸⁾ erheblich kleinere Werte als bei den Feinpassungs-Laufsitzten erreicht. Die Abweichung des Grösstspieles vom Mittelspiel ist also relativ sehr gering, wobei die Fertigung trotzdem keine Schwierigkeiten bereitet, weil die *Absolutwerte* der zulässigen Abweichungen gross genug sind.

⁸⁾ Vom Verfasser eingeführter Massstab für die Toleranzbemessung. Siehe O. Kienzle und E. Falz „Die Ordnung der ISA-Laufsitzte“, Werkstattstechnik 1933, Heft 16.

Beitrag zur Untersuchung des physikalischen und statischen Verhaltens kohärenter Bodenarten.

Von Dr. H. E. GRUNER und Ing. R. HAEFELI, Basel.

(Schluss von Seite 174.)

III. STATISCHE UNTERSUCHUNGEN.

Um den Einfluss des Spannungszustandes des Porenwassers auf das Gleichgewicht und die innern Kräfte kohärenter, gesättigter Erdmassen zu veranschaulichen, untersuchen wir zwei Beispiele.

1. *Aenderung der Gleitsicherheit von Dammböschungen infolge rascher Absenkung des Wasserspiegels.* Der betrachtete Erddamm ruhe auf einer wenig wasserdurchlässigen Unterlage aus dichtgelagertem Kiessand. Der Dammkörper bestehe aus einem kohärenten Material als Kern (Schlick), das von einer kohäsionslosen Schutzschicht (Kiessand), die gegen die Angriffe des Wassers durch einen durchlässigen Belag (Trockenpflaster) geschützt sei, überlagert wird. Die dabei angenommenen Abmessungen und Neigungsverhältnisse, sowie die durch bodenphysikalische Untersuchungen bestimmten Materialeigenschaften, die als Berechnungsgrundlage dienen, sind aus Abb. 6 ersichtlich.

Theorie und Erfahrung zeigen, dass bei Erdrutschungen in homogenem Material normalerweise gekrümmte Gleitflächen entstehen,

deren Form sich unter gewissen Voraussetzungen mathematisch formulieren lässt.⁸⁾ Bei der statischen Untersuchung praktischer Fälle können die Profile solcher Gleitflächen mit genügender Genauigkeit durch Kreisbogen oder gebrochene Linienzüge ersetzt werden. Durch allgemeine Ueberlegungen wird unter den möglichen Gleitflächen eine Auswahl getroffen und für jede derselben die statische Untersuchung hinsichtlich Gleitsicherheit durchgeführt, um dadurch die denkbar ungünstigste Gleitfläche zu ermitteln.⁹⁾

Im vorliegenden Falle wird angenommen, dass die Gleitlinie sich zusammensetzt aus der Grenzlinie zwischen gewachsenem und geschüttetem Kiessand A—B, dem vollständig innerhalb des Schlickkernes verlaufenden Bogen B—C—D mit dem Mittelpunkt o und der Strecke D—E,

deren ungünstigste Neigung sich auf Grund der Erddrucktheorie ergibt. In allen Punkten dieser Gleitfläche herrsche beim höchsten zulässigen Wasserstand, der auf Höhe der obern Begrenzung des Schlickkernes angenommen wurde, der totale hydrostatische Wasserdruck. Wir vernachlässigen somit vorerst den statisch günstig wirkenden Druckverlust des Wassers beim Durchfliessen des über der Gleitfläche liegenden Gleitkörpers. Es

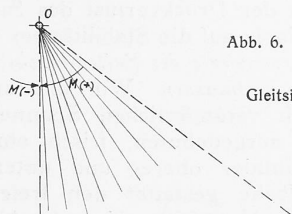
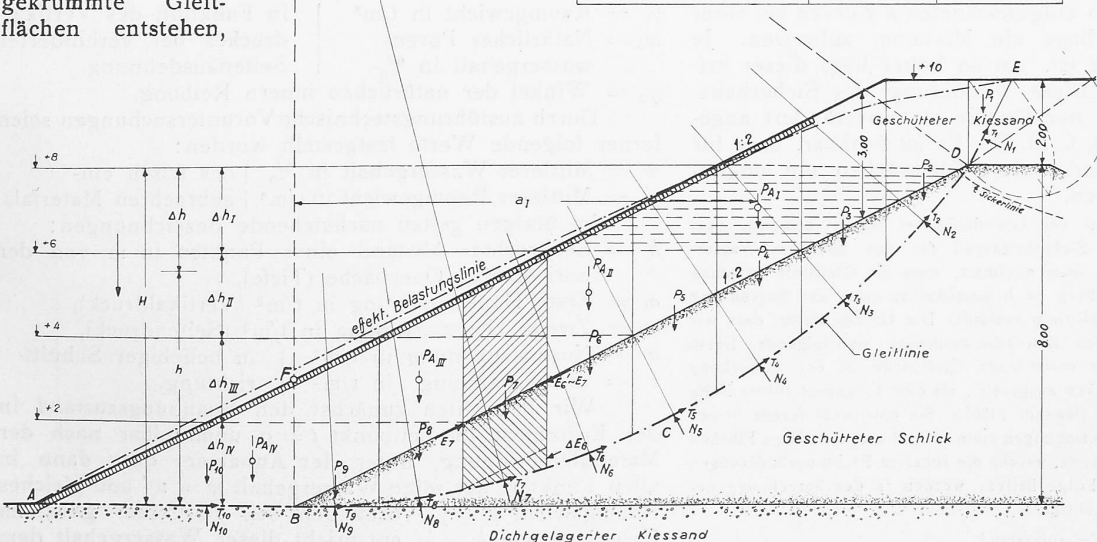


Abb. 6. Untersuchung der Gleitsicherheit eines Erddammes mit Schlickkern, Kies-Schutzschicht und Trockenpflaster. Gleitsicherheit in Funktion der Wasserspiegellage links nebenan (Seite 184).

	Kiessand	Schlick
Raumgewichte γ	gesättigt (w = 22%)	2.2 t/m ³
	feucht (w = 41%)	2.0 t/m ³
	trocken (w = 0)	1.8 t/m ³
	im Wasser	1.2 t/m ³
Reibungswert $\tan \varphi_0$	0.70	0.60
Durchlässigkeitsk k	0.01 cm/sek	0.01 · 10 ⁻⁵ cm/sek



⁸⁾ M. Frontard: Comptes rendus de l'Académie des Sciences 1922: pages 526, 740, 930; 1928: page 1597. — 1^{er} Congrès des Grands Barrages 1933: Rapport No. 28.

⁹⁾ W. Fellenius: Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen.