

DIE BAUTECHNIK

Alle Rechte vorbehalten.

Umbau einer Eisenbahnbrücke.

Von Techn. RB.-Oberinspektor Zeyer.

1. Allgemeines.

Eine eingleisige Eisenbahnlinie wurde in den Jahren 1870/71 erbaut. 3,7 km hinter dem Bahnhof wird das Strombett durch eine rd. 450 m lange Eisenbahnbrücke überquert. Die Pfeiler und Widerlager der Brücke wurden schon damals für die Aufnahme eines zweiten Gleises hergerichtet; beim zweigleisigen Ausbau der Strecke im Jahre 1899 wurden die Überbauten für das zweite Gleis eingebaut. Die Überbauten sind Parallel-Fachwerkträger mit oberliegender Fahrbahn. Im Jahre 1926 wurden die Überbauten im zweiten Gleis von der Brückenklasse J nach E verstärkt. Bei Außerbetriebsetzung des Gleises konnte damals die Verstärkung denkbar günstig durchgeführt werden dadurch, daß zu derselben Zeit ein Brückenträger von ausreichender Stützweite als Montageträger zur Verfügung stand, so daß dadurch das Eigengewicht der zu verstärkenden Brücken während der Anbringung der Verstärkungsteile ausgeschaltet werden konnte. Die Überbauten im ersten Gleis wurden in den Jahren 1927/28 unter Beibehaltung derselben Bauweise durch neue, der Brückenklasse N entsprechende Überbauten aus St 48 ersetzt.

Bei Durchführung des Gesetzes über die Verbesserung der von der Bahn gekreuzten Wasserstraße im Interesse der Schifffahrt spielte u. a. auch die Frage eine Rolle, inwieweit die Stromsohle in der Nähe der Eisenbahnbrücke vertieft werden könnte, ohne die an sich nicht allzu tief gegründeten Pfeiler der Eisenbahnbrücke zu gefährden. Die geringe

2. Beschreibung und Ausführung des Baues.

Für den Bau der neuen Pfeiler wurde die Druckluftgründung gewählt, die den besonderen Vorteil der schnellen und bequemen Beseitigung der alten Pfeilerfundamente in Verbindung mit dem Absenken der Senkkasten für die neuen Pfeiler bot.

Für den Aufbau der Baustelleneinrichtung stand nur der schmale Streifen des außer Betrieb gesetzten Gleises zur Verfügung. Baustofflagerplätze und Zementschuppen waren auf der einen Seite vor der Brücke auf dem Böschungsrande und dem dort befindlichen Anfahrtswege angeordnet. Die Betonmischmaschine stand jeweilig über Pfeiler VI und VIII, die Zuschlagstoffe mit Zement, fertig abgemessen, wurden auf Feldbahngleis mit Lokomotivbetrieb zur Mischmaschine herangefahren. Dadurch wurde das weite Verfahren des fertig gemischten Betons und das damit möglicherweise verbundene Entmischen des Betons vermieden.

Der nicht unerhebliche Kraftbedarf für die gleichzeitige Druckluftgründung zweier Pfeiler mußte auf der Baustelle selbst erzeugt werden, da der Anschluß der Baustelle an das Netz der Überlandzentrale zu kostspielig geworden wäre. Für die Gesamtanordnung der Maschinenanlage, die im stillgelegten Gleis von Pfeiler V bis zum Widerlager A aufgebaut wurde, waren folgende Gesichtspunkte maßgebend:

1. Der Kraft- und Druckluftbedarf für die gleichzeitige Absenkung zweier Senkkasten mit je zwei Schleusen mußte sichergestellt werden.

2. Für jeden Senkkasten mußte ein Betriebs- und ein Aushilfskompressor zur Verfügung stehen.

3. Außerdem mußte für jeden Senkkasten eine Aushilfskraftquelle zum mindesten zur Erzeugung der erforderlichen Druckluft vorhanden sein.

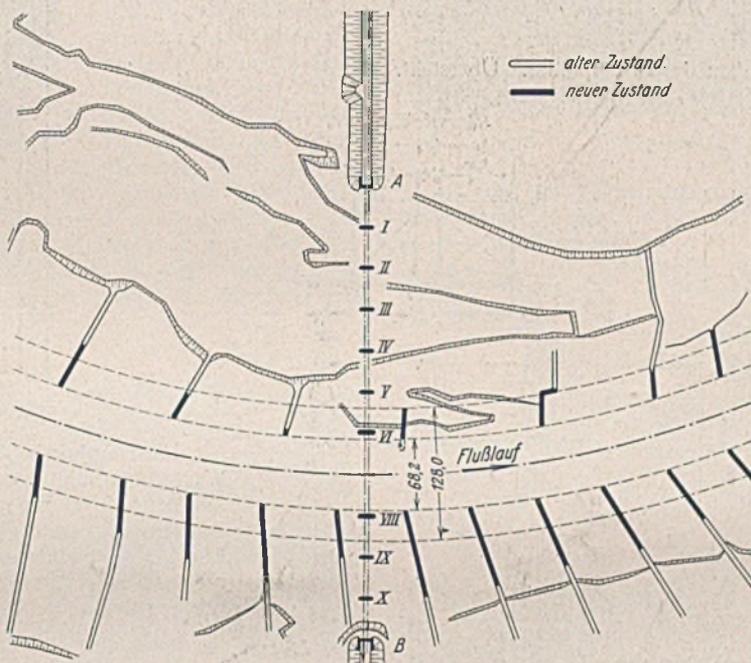


Abb. 1. Lageplan.

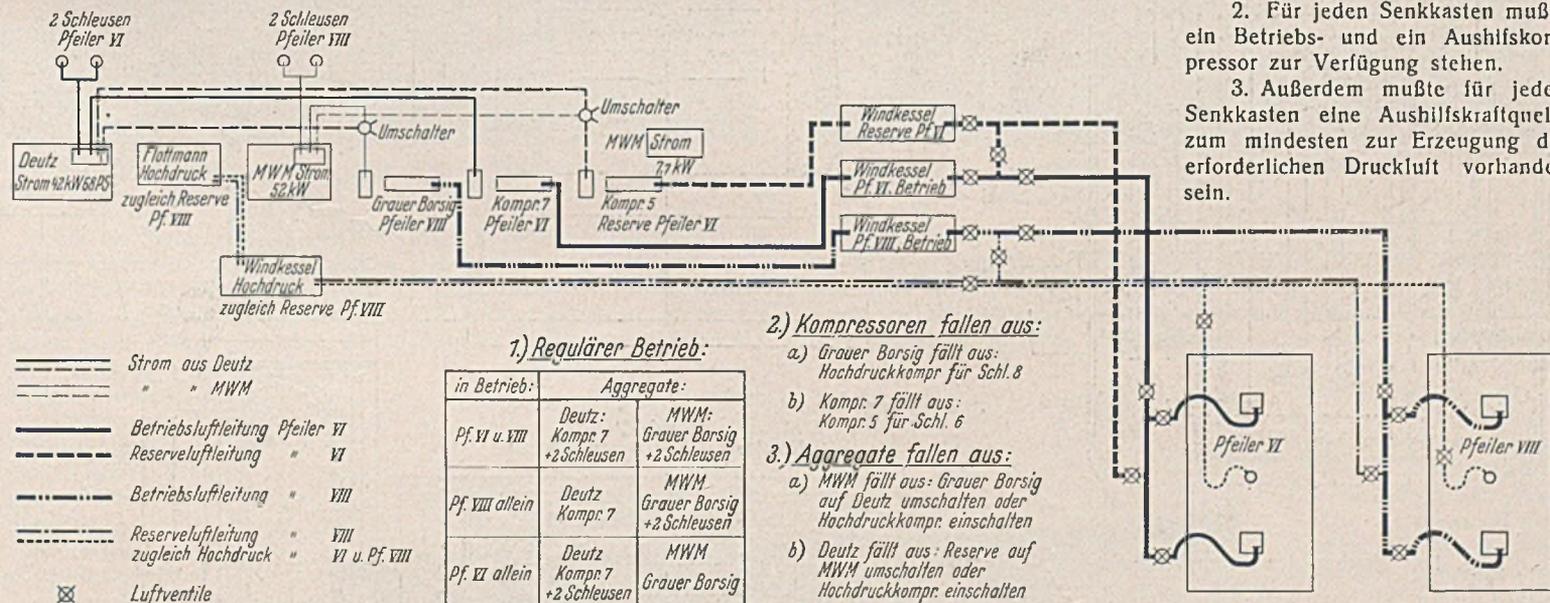


Abb. 2. Kraftanlage.

Durchfahrtsbreite zwischen den Pfeilern stellte für die Schifffahrt ein großes Hindernis dar. Nach Ausarbeitung mehrerer Brücken- und Strombauentwürfe durch die Reichsbahn und die zuständige Strombauverwaltung entstand der in Abb. 1 dargestellte Entwurf für den Ausbau des Stromes. Der in der Schifffahrtrinne stehende Pfeiler VII mußte beseitigt, die alten Strompfeiler VI und VIII mußten für die Aufnahme eines neuen zweigleisigen Überbaues über zwei Brückenöffnungen hinweg erneuert und das Vorland unter der Brücke mußte vom Pfeiler VIII bis zum Widerlager B befestigt werden.

Diese Bedingungen wurden in folgender Weise erfüllt (Abb. 2):

- für Pfeiler VI: Kraftquelle ein 42-kW-Deutz-Diesel-Stromerzeuger, Betriebsluftpumpe Kompressor 7, Aushilfsluftpumpe Nr. 5, gegebenenfalls angetrieben durch den MWM-Stromerzeugungssatz des Pfeilers VIII mit 52 kW;
- für Pfeiler VIII: Betriebsstromerzeuger MWM 52 kW, Betriebsluftpumpe „Grauer Borsig“, Aushilfe Flottmann-Hochdruckkompressor mit eigenem Dieselantrieb.

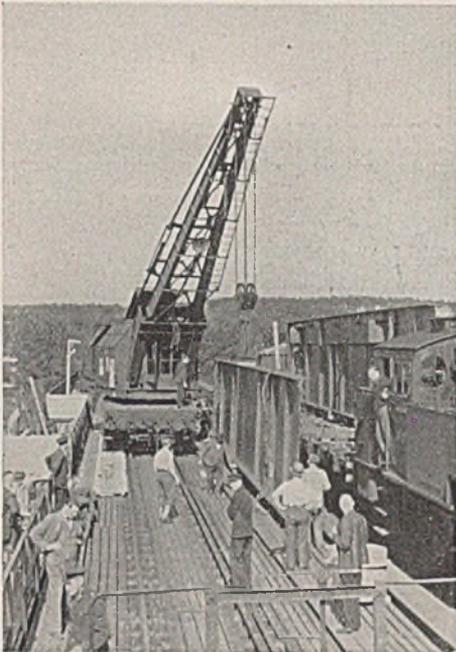


Abb. 6. Einbringen der Unterzüge auf die Abfängerüste.

werte Behinderungen. Erwähnt sei noch, daß bei dem Beginn des Aufbaues des Gerippes und der Schalung des Senkkastens für Pfeiler VI die Aufstellenebene überflutet wurde. Das Gerippe wurde daher 0,70 m über der Aufstellenebene montiert, eingeschalt und nach Abfluß des Wassers Anfang September 1937 abgespindelt und sogleich betoniert. Die zur Sicherung der Abfängerüste und zur Aufrechterhaltung der Schifffahrt erforderlichen Leitwerke sind aus Abb. 4 zu ersehen. Die Schifffahrt wurde durch einen ständigen Bugsierbetrieb aufrechterhalten. Ende November 1937 waren beide Pfeiler so weit fertiggestellt, daß die alten Überbauten auf ihnen abgesetzt und mit der Wiederbeseitigung der Abfängerüstungen und der Leitwerke begonnen werden konnte. Die Form und die Abmessungen der neuen Pfeiler sind aus Abb. 5 zu ersehen. Die gesamten Pfeilerarbeiten wurden in 160 Tagen durchgeführt. Die folgenden Lichtbildaufnahmen 6 bis 10 zeigen die verschiedenen Bauzustände.

Fußwegträger und zusätzlicher Einbau von Endquerverbänden, um dadurch die äußeren Hauptträger zum Seitwärtsverschieben standsicher zu machen.

Ausbau der Fahrbahn in den beiden alten Überbauten, Verschieben des einen äußeren Hauptträgers mittels Handwinden auf den mit Schmierseife überzogenen Verschiebebahnen.

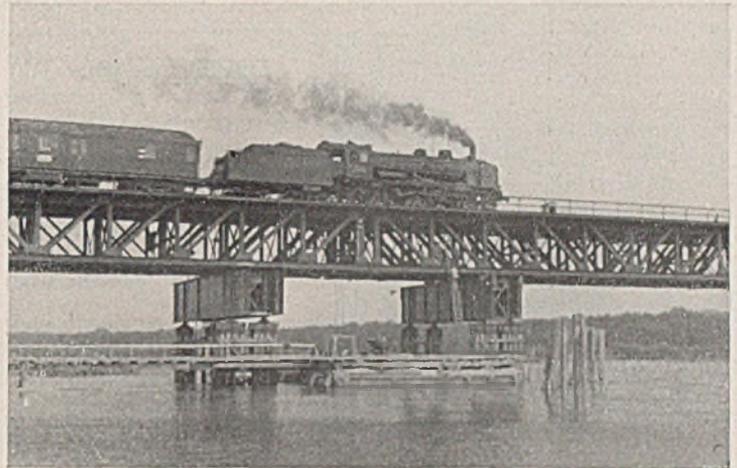


Abb. 7. Herstellen der Aufstellenebene am Pfeiler VI.

Einbau der Rüstungsquerträger, der Belagträger, der Verbände und des Rüstungsbelages sowie der Kranbahnträger auf den beiden Obergurten für den Montagekran.

Am 21. Juli 1938 Beginn des Zusammenbaues des neuen zweigleisigen Überbaues von Pfeiler VIII. Nach dem Absetzen Anheben des Überbaues mittels vier 300-t-Wasserdruckpressen und Freisetzen

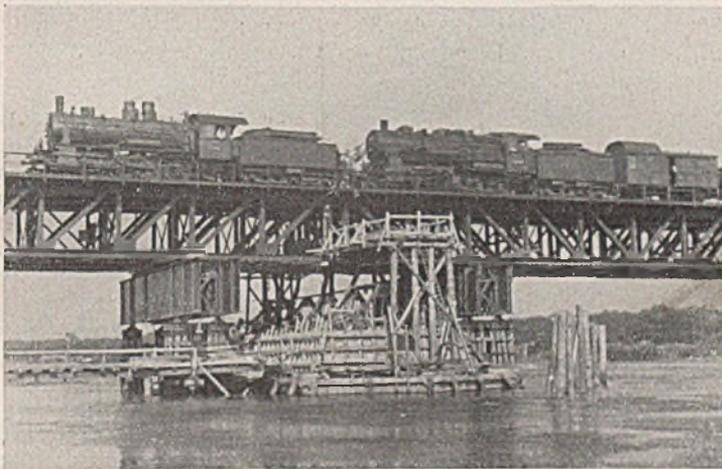


Abb. 8. Probelastung über dem abgefängenen Pfeiler VI.

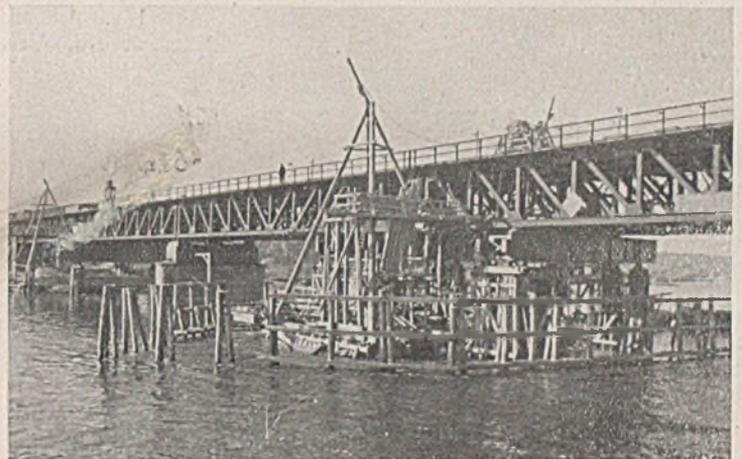


Abb. 9. Herstellen des Senkkastens über Pfeiler VI.

Für die Montage des neuen Überbaues im Baujahr 1938 wurden die beiden Überbauten des stillgelegten Gleises zwischen den Pfeilern VI bis VIII zu Hilfsbrücken ausgebildet. Zu diesem Zweck wurden zunächst in Verlängerung der Pfeiler VI, VII und VIII auf der unterstrom gelegenen Brückenseite Pfähle gerammt, womit Mitte Mai 1938 begonnen wurde.

Die einzelnen Bauvorgänge waren (Abb. 11):

Rammen von Trag- und Leitwerkpfählen vor Kopf der Pfeiler VI, VII und VIII ober- und unterstrom, gleichzeitig Einrichtung eines Bugsierbetriebs für die Schifffahrt.

Nach Beseitigung des Oberbaues Anheben der beiden Überbauten mittels Wasserdruckpressen. Entfernen der Auflager und Einbau von Verschiebebahnträgern, gleichzeitiger Einbau eines waagerechten Verbandes im ausgekrigten

von der Rüstung, Absenken bis dicht über den Rüstungsbelag, Abbruch des Montagekrans und der gesamten Rüstung unter Zuhilfenahme des neuen Überbaues. Aufbringen der neuen Schwellen und Schienen sowie weiteres Absenken und Absetzen des Überbaues auf Rollsättel unter den Auflagerpunkten auf den Verschiebebahnen. — Bis zum 23. September 1938 waren 43 000 Baustellenniete geschlagen. Zum betriebsfertigen Einschleppen des neuen und Ausschleppen der beiden alten, im Betrieb befindlichen Überbauten stand am 25. September nur eine Betriebspause von 12 Stunden zur Verfügung. Nach Durchfahrt des letzten Zuges wurden die beiden alten Überbauten mit Pressen gleichzeitig an sämtlichen acht Auflagerpunkten angehoben und ebenfalls auf Rollsättel und die Verschiebebahn abgesetzt.



Abb. 10. Gesamtübersicht über die abgefängenen Pfeiler VI und VIII.

Der neue zweigleisige Überbau und die beiden alten Überbauten wurden dann mit Bauwinden ein- bzw. ausgeschoben. Nach Anheben des neuen Überbaues wurden die Rollsättel beseitigt, die Verschiebebahn ausgebaut und der Überbau auf Schwellenstapel abgesetzt und nach und nach auf seine endgültige Höhe abgesetzt. Nach Vornahme der Probelastung konnten dann beide Gleise in Betrieb genommen werden. Das Gewicht des neuen zweigleisigen Überbaues beträgt rund 850 t St 37 und rd. 18 t Stahlguß für die Lager.

Nach Inbetriebnahme beider Gleise auf der Brücke wurden die nach oberstrom ausgefahrenen beiden Überbauten von je 39,40 m auf den Aufstellgerüsten zur Wiederverwendung auseinander-genietet und ab- befördert. Von Anfang Oktober bis Mitte Dezember 1938 wurde der frei gewordene Pfeiler VII zunächst bis zur Mittelwasserlinie abgebrochen.

In folgenden Lichtbildaufnahmen 12 bis 18 sind die verschiedenen Bauzustände festgehalten.

3. Statische Berechnung.

Der zweigleisige Überbau ist ein Stabbogen mit fachwerkförmigem Versteifungsträger, der zusammen mit den Hauptträgern der anschließenden Öffnungen ein durchlaufendes Band bildet. Das Tragwerk ist einfach statisch unbestimmt. Als statisch nicht bestimmbar Größe wird die waagerechte Seitenkraft der Bogenkräfte eingeführt, deren Einflußlinie mit Hilfe der elastischen Gewichte ermittelt wird. Aus dem Unterschiede der Momentenlinie für den einfachen Balken und

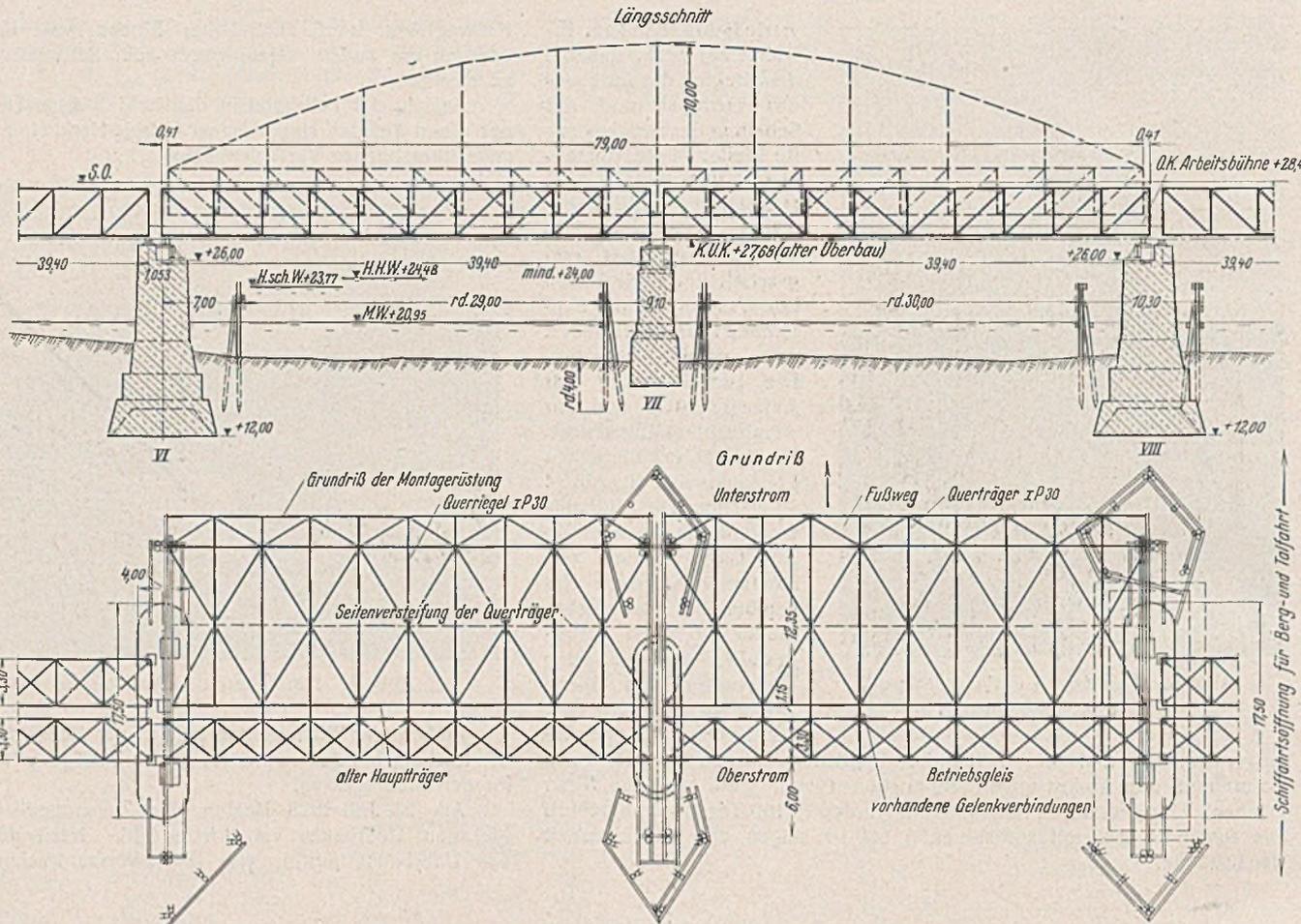


Abb. 11a. Aufbau und Einschleiben des Überbaues der Stromöffnung; Hilfsbrücke mit Verschiebeträgern und Kran. Längsschnitt und Grundriß.

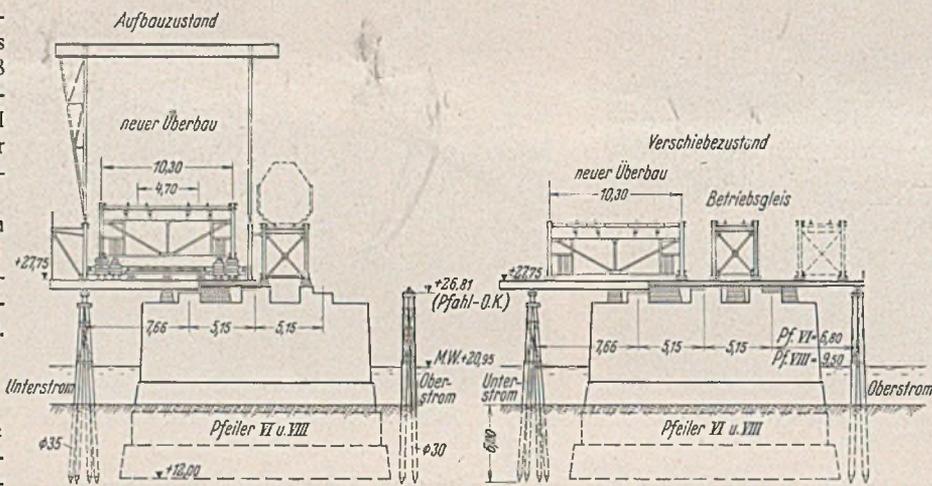


Abb. 11b. Querschnitte bei Pfeiler VI und VIII.

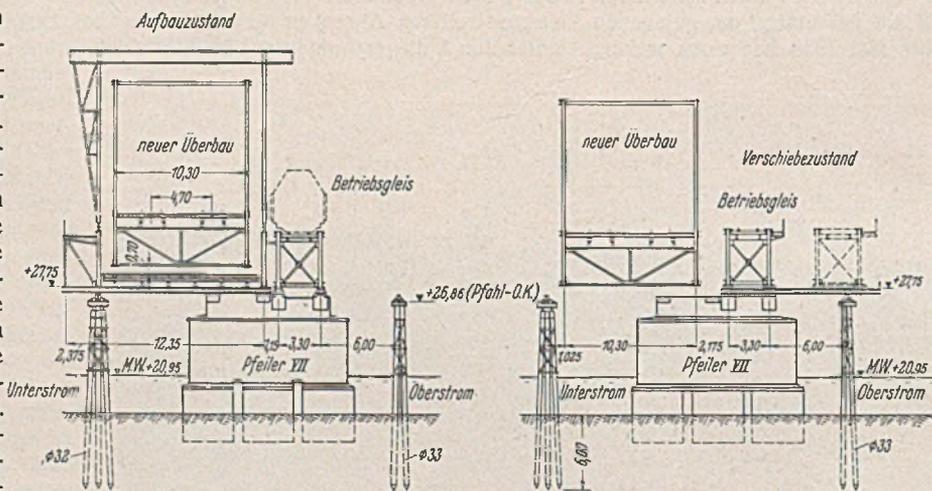
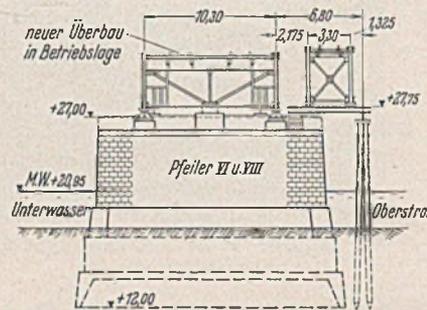
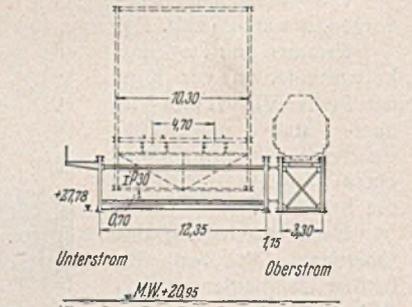


Abb. 11c. Querschnitte bei Pfeiler VII.

der (x-y)-Linie ergeben sich die Einflußlinien für die Momente im statisch unbestimmten Tragwerk und damit die Einflußlinien für die Ober- und



Untersturkräfte im Versteifungsträger. Die Querkraftlinien findet man als $Q = Q_0 - H \cdot \text{tg } \alpha$ $= \text{tg } \alpha [Q_0 \cdot \text{ctg } \alpha - H]$.



Sie ergeben unmittelbar die Einflußlinien der Pfosten und durch Multiplikation mit $\frac{1}{\sin \varphi}$ die der Strebenelemente.



Abb. 12. Blick auf Brücke und Kran.

Stabkräfte aus ständiger Last.

Mit den rechnerisch ermittelten Werten $\Sigma \eta$ und der Knotenlast P_g erhält man die Stabkräfte als $S = \mu \Sigma \eta P_g$.

trägers auf. Der Wärmeunterschied beider wurde nach den BE mit $\pm 15^\circ$ eingesetzt, woraus sich eine Schubkraft von $\pm 13,6$ t ergab.

Einfluß

der Zusatzkräfte.

Die Zusatzkräfte setzen sich zusammen aus Windkräften, Seitenstoß und Bremskräften. Der Hauptwindverband liegt in der Ebene der Untergurtung des Versteifungsträgers, so daß sich die Windkräfte dort auswirken. Dazu treten senkrechte Zusatzkräfte aus Winddruck auf die Obergurtung und das Verkehrsband sowie aus der Überleitung der Kräfte aus dem Winddruck zwischen den Druckgurten durch die Windportale.

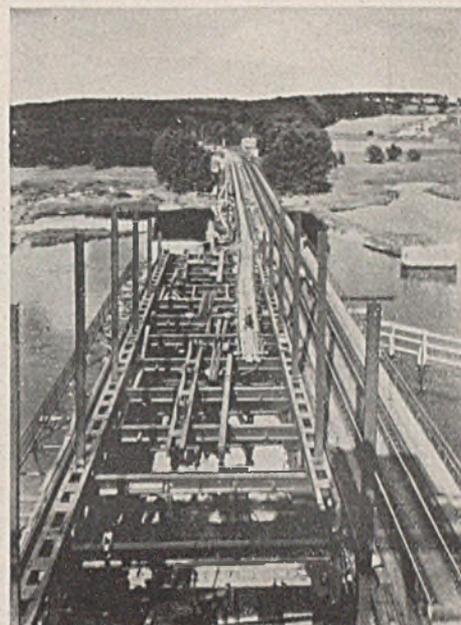


Abb. 13. Überbau bis auf das Schlußstück des Druckgurtes zusammengebaut.

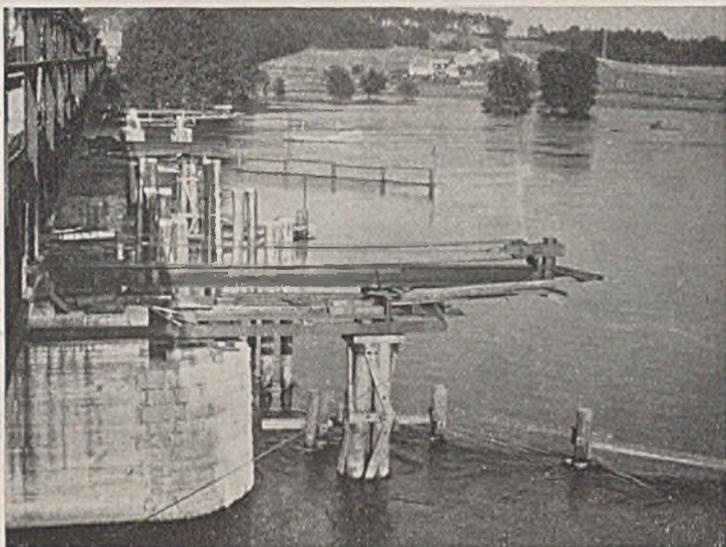


Abb. 14a u. b. Stromauf gelegene Verschiebebahnen mit Zugvorrichtungen zum Verschieben.

Durch den einseitigen öffentlichen Fußweg und eine schwerere Ausbildung der Fahrabdeckung des danebenliegenden Gleises erhält der unterstromseitige Hauptträger eine etwas höhere ständige Belastung. Wegen des verhältnismäßig geringen Einflusses des Mehrgewichts sind für den zweiten Hauptträger die gleichen Stabkräfte eingesetzt.

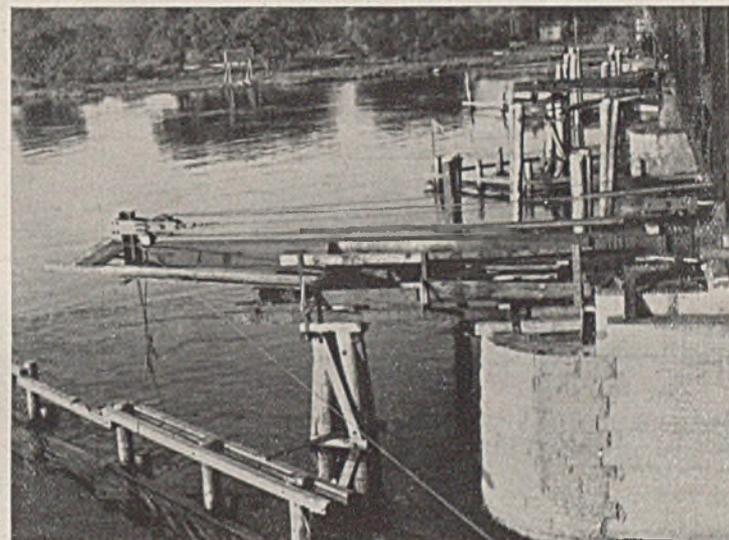
Stabkräfte aus Verkehrslast.

Die Laststellungen sind in die Zeichnungen der Einflußlinien eingetragen. Dabei sind die Vorschriften der Berechnungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken der Deutschen Reichsbahn (BE) berücksichtigt, nach denen bei Brücken über 40 m Zuggrennungen nicht anzunehmen sind. Die Ordinaten der Lokomotiv- und Wagenachsstellungen sind mit dem Zirkel addiert und daraus die Stabkräfte ermittelt.

Als weitere senkrechte Belastung kommt noch die durch den einseitigen Fußweg in Betracht, die besonders nachgewiesen wurde.

Stabkräfte aus Wärmewirkung.

Stabkräfte aus Wärmewirkung treten nur bei ungleicher Erwärmung des Druckbogens und des Versteifungs-



Ebenso rufen die Seitenstöße sowohl waagerechte als auch senkrechte Kraftwirkungen hervor, da die Stöße in Schienenoberkante angreifen, der Verband aber 4,20 m tiefer zwischen den Untergurten liegt.

Die Bremskräfte rufen eine waagerechte Seitenkraft der Druckbogenkräfte

$$H = \frac{\Sigma S_0 S_1 \cdot \frac{S}{F}}{\Sigma S_1 \cdot \frac{2S}{F}}$$

hervor, worin S_0 die Stabkräfte im Versteifungsträger sind, wenn $H = 0$ ist und S_1 die Stabkräfte infolge $H = 1$ bedeuten. Die Hauptträger sind demnach auch für Bremskräfte einfach statisch unbestimmt.

Aus der Zusammenstellung der Einzelkräfte ergab sich, daß für die Bemessung der Untergurtsstäbe Haupt- und Zusatzkräfte maßgebend waren.

Für die Gestaltung der Gurtungen des Versteifungsträgers waren Rücksichten auf Angleichung an die Stäbe der Nachbaröffnungen maßgebend. Es wurde daher für den Untergurt eine Stegblechhöhe von 500 mm und für den Obergurt eine solche von 470 mm gewählt. Beide Gurtungen haben \square -förmige Ge-

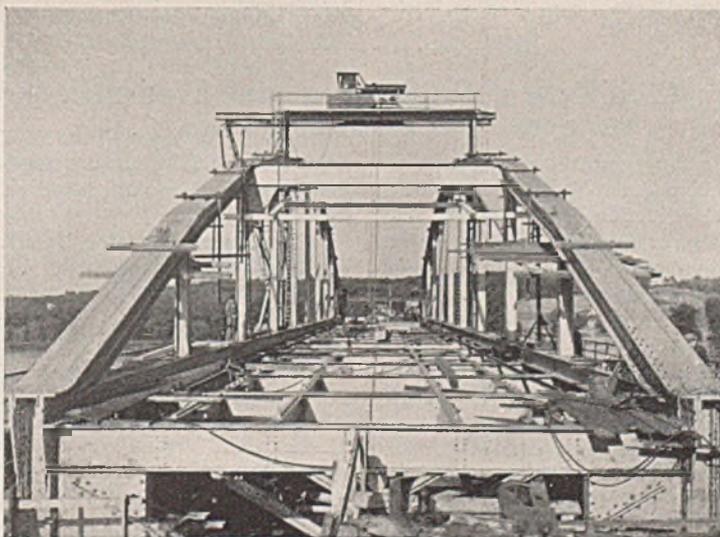


Abb. 15. Neuer Überbau am 25. September 1938 zum Verschieben fertig.



Abb. 16. Neuer Überbau während des Einschlebens.

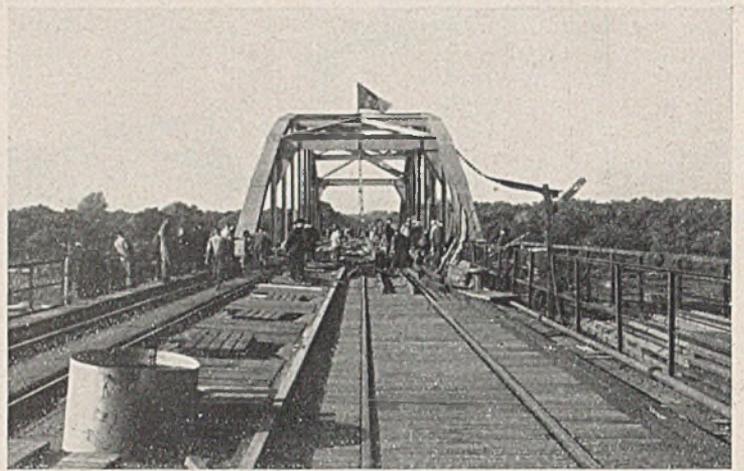


Abb. 17. Neuer Überbau eingeschoben.

stalt; Pfosten und Streben erhielten I-förmigen Querschnitt. Für den Druckgurt wurde in üblicher Weise $\overline{\text{C}}\overline{\text{C}}$ -Querschnitt gewählt.

Festigkeitsberechnung der Querverbände.

Zur Berechnung der Schwellenträger ist nichts zu bemerken.

Die Querträger sind untergespannte Balken und als solche einfach statisch unbestimmt. Als statisch nicht bestimmbar Größe ist die Stabkraft des Pfostens in Querträgermitte eingeführt. Der Einfluß ungleicher Erwärmung konnte vernachlässigt werden, da die Querträger im Schutze der Fahrbahndecke liegen.

gurt (Grundnetz des Überbaues s. Abb. 11). Die auftretenden Windkräfte sind anteilig auf beide Verbände verteilt. Außerdem entfallen auf den unteren Verband auch die Stoßkräfte.

Der obere Windverband ist K-förmig und infolgedessen in den beiden Mittelfeldern statisch unbestimmt. Als statisch nicht bestimmbar Größe ist eine Gurtkraft in einem der beiden Mittelfelder eingeführt.

Die Kräfte aus dem oberen Verbande werden durch Stützrahmen in den Knotenpunkten 4 und 4' in den unteren Verband und in die Auflager geleitet. Da zu dem Rahmen auch die Stäbe des Querträgers gehören, ist er vierfach statisch unbestimmt. In die Berechnung wurde das

bereits bei Berechnung der Querträger untersuchte, einfach statisch unbestimmte Tragwerk als unbestimmtes Untersystem und als weitere Unbekannte die Längskraft, die Querkraft und das Moment in der Mitte des oberen Riegels eingeführt. Nach Bestimmung der Unbekannten sind die Stabkräfte und Momente im Rahmen verhältnismäßig einfach zu berechnen.

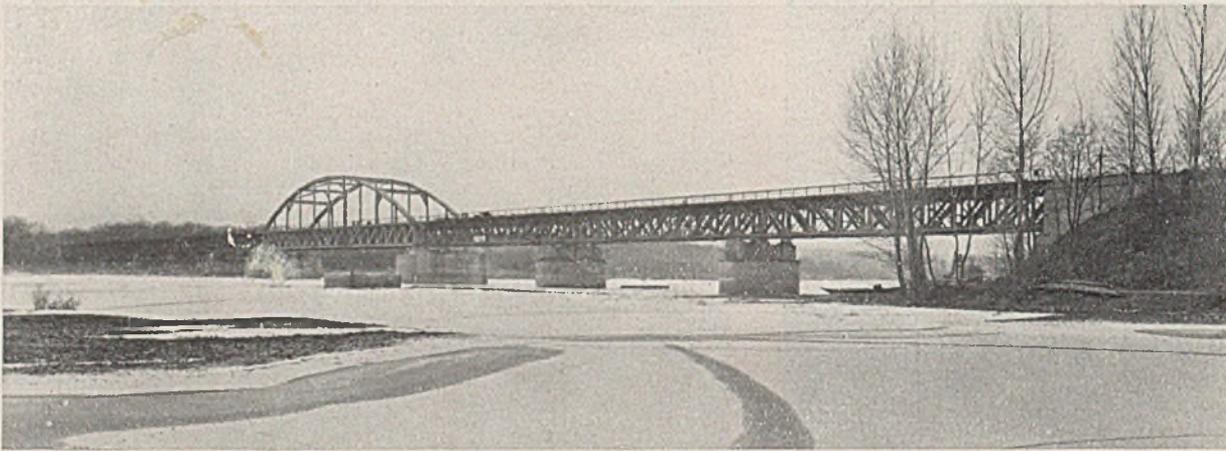


Abb. 18. Gesamtansicht der umgebauten Brücke.

Die Endquerträger sind durch ständige und Verkehrslast geringer belastet als die anderen Querträger. Sie dienen jedoch auch zum Anheben der Brücke und sind für diesen Belastungsfall als Zweigelenrahmen mit Druckgurt berechnet.

Windverbände befinden sich zwischen den Untergurten der Versteifungsträger und zwischen den Knotenpunkten 4 und 4' des Druck-

die Pfeilerbauten durch die Abteilung Beton und Tiefbau ausgeführt, während Bau und Aufstellung des stählernen Überbaues und Ausbau der alten Überbauten durch die Abteilung Brücken- und Stahlbau besorgt wurde.

Die Gesamtbaukosten in Höhe von 1 625 000 RM wurden mit 76% von der Reichswasserstraßenverwaltung und mit 24% von der Reichsbahn aufgebracht.

Sämtliche Arbeiten wurden der Firma Beuchelt & Co. in Auftrag gegeben, und zwar wurden

Alle Rechte vorbehalten.

Gleitflächen, Prüfflächen und Erddruck.

Von Dr.-Ing. habil. Leo Rendulic, Frankfurt a. M.

Inhaltsangabe. Das Coulombsche Reibungsgesetz bedingt das Vorhandensein von Flächen, in denen in jedem Punkt die Spannung zum Flächenlot genau den Reibungswinkel einschließt. Diese Flächen, die Gleitflächen, spielen in allen gebräuchlichen Erddruckbetrachtungen eine wichtige Rolle. Während nun das Bestehen von Gleitflächen als Folge des Coulombschen Reibungsgesetzes frühzeitig erkannt und diese Gleitflächen als wichtigstes Hilfsmittel zum Auffinden des Erddruckes benutzt wurden, hat merkwürdigerweise eine zweite Folgerung aus dem Coulombschen Gesetz bisher noch keinen Eingang in die Erddrucklehre gefunden. Diese zweite Folgerung kann so gefaßt werden: Legen wir eine willkürliche Fläche, eine Prüffläche, wie wir sie nennen wollen, durch den Hinterfüllungsboden einer Stützwand, dann darf in keinem Punkt dieser Prüffläche die Spannung einen größeren Winkel mit dem zugehörigen Flächenlot einschließen als den Reibungswinkel¹⁾. Dieser

¹⁾ In den bisher vorhandenen Ansätzen zu einer mathematischen Erddrucklehre ist diese Bedingung, daß nirgends die Richtung der Spannung zum zugehörigen Flächenlot einen größeren Winkel einschließen

Satz über die Prüfflächen verspricht in seiner Anwendung auf die Erddruckfragen ebenso fruchtbar zu werden wie der Satz über die Gleitflächen.

In der nachfolgenden Untersuchung wird gezeigt, wie man mit Hilfe des Prüfflächenverfahrens bei Verwendung von logarithmischen Spiralen als Gleit- und Prüfflächen die Auswahl der als Gleitflächen möglichen Kurven treffen kann. Das Verfahren liefert für jede als möglich erkannte Gleitfläche Größe und Angriffspunkt des zugehörigen Erddruckes.

Um die Abhängigkeit der Gleitflächenausbildung von der Art der Stützwandbewegung zu erfassen, wird der Satz vom Größtwert der verlorenen Arbeit aufgestellt. Mit seiner Hilfe gelingt nicht nur die Zu-

darf als den Reibungswinkel des Bodens, berücksichtigt. So ist z. B. die Köttersche Gleichung auf Grund dieser Bedingung abgeleitet. (F. Kötter, Die Bestimmung des Druckes an gekrümmten Gleitflächen. Berliner Akad. Bericht 1903)

In den zeichnerischen Näherungsverfahren dagegen ist dieser selbstverständliche Grundsatz bisher nirgends bewußt angewendet worden.

ordnung der möglichen Gleitflächen zu den Bewegungsmöglichkeiten einer starren Stützwand, sondern man kann mit seiner Hilfe auch die Erddruckverteilung auffinden.

1. Die Coulombsche Erddrucklehre als Verfahren erster Näherung.

Die Coulombsche Erddrucklehre baut ihre Ergebnisse außer auf die selbstverständliche Voraussetzung, daß sich jeder Teil des Hinterfüllungsbodens im Gleichgewicht befinden muß, auf vier weitere grundsätzliche Forderungen bzw. Annahmen auf.

1. Sie zieht nur das Auftreten ebener Gleitflächen in Betracht.
2. Sie setzt weiterhin die Gültigkeit des linearen Coulombschen Reibungsgesetzes voraus und verlangt dementsprechend das Auftreten von Gleitflächen, in denen die Mittelkraft zum Flächenlot um den Reibungswinkel geneigt ist.
3. Sie nimmt an, daß von unendlich vielen Möglichkeiten der Gleitflächenausbildung im Falle des angreifenden Erddruckes diejenige Gleitfläche wirklich auftritt, für die der Erddruck einen Größtwert annimmt²⁾.

4. Da schließlich auch die Lage des Angriffspunktes der Mittelkraft des Erddruckes und im Zusammenhang damit die Verteilung des Erddruckes längs der Stützwand von Bedeutung war, hat man, da die eigentliche Coulombsche Lehre auf die Frage nach der Spannungsverteilung keine Antwort geben kann, den weiteren Grundsatz dazu genommen, daß Zwischengleitflächen nach demselben Verfahren gefunden werden können wie die Hauptgleitfläche.

Mit Hauptgleitfläche wollen wir die Gleitfläche bezeichnen, die durch den Fußpunkt der Stützwand hindurchführt. Die Hauptgleitfläche trennt also den Teil des Hinterfüllungsbodens, der bei der Stützwandbewegung Verschleibungen erleidet, von den durch die Stützwandverschiebung nicht beeinflussten Bodengebieten.

Wie bekannt, sind in den letzten Jahren berechtigte Zweifel an der Brauchbarkeit der Coulombschen Lehre aufgetaucht³⁾. Zweifel, die ihren Hauptgrund darin haben, daß durch den Versuch festgestellte Druckverteilungen mit den rechnerisch nach dem Coulombschen Verfahren zu erwartenden nicht übereinstimmen. Dieser Unterschied zwischen Theorie und Praxis kann seinen Grund nur darin haben, daß die eine oder die andere der Coulombschen Voraussetzungen nicht zu Recht besteht.

An dem Grundsatz, daß jeder Teil des Erdkörpers im Gleichgewicht stehen und demzufolge den drei Gleichgewichtsbedingungen genügen muß, ist nicht zu rütteln. Jede Erddrucklehre wird diese Voraussetzung beibehalten müssen, sofern sie nur den Endzustand nach vollendeter Wandbewegung, also einen bewegungsfreien Zustand betrachtet.

Wie steht es nun mit der Voraussetzung für die Gültigkeit des Coulombschen Reibungsgesetzes? Die Überprüfungen dieses Coulombschen Gesetzes durch den Versuch haben ergeben, daß im großen und ganzen beim Bruchzustand tatsächlich Normaldruck und Schubspannung verhältnismäßig sind. Diese Ergebnisse bedeuten eine Bestätigung des Coulombschen Reibungsgesetzes. Allerdings konnten kleinere Abweichungen vom einfachen linearen Gesetz, besonders bei kleinen Normaldrücken, beobachtet werden, und auch die Coulombsche Annahme, daß der Bruchzustand von der Größe der mittleren Hauptspannung unabhängig ist, steht heute nicht mehr unangefochten da⁴⁾. Soweit man aber heute den Einfluß dieser Abweichungen vom einfachen linearen Gesetz einschätzen kann, dürften die Fehler in der Erddrucklehre, die ihre Ursache in der Voraussetzung der Gültigkeit des vereinfachten Reibungsgesetzes haben, von untergeordnetem Einfluß sein. Eine Beseitigung dieser Fehlerquelle wäre nur auf Kosten der Einfachheit und Übersichtlichkeit der Erddrucklehre durchzuführen mit dem voraussichtlichen Ergebnis, daß die Verbesserungen in Erddruckgröße und Druckverteilung kleiner sind als die Ungenauigkeiten, die durch Abschätzen von Reibungswinkel und Raumgewicht entstehen. Eine Abänderung des Reibungsgesetzes ver-

spricht also wenig Erfolg, und außerdem lassen sich die bisher bekanntgewordenen Abweichungen von der Rechnung aus der Ungenauigkeit des Reibungsgesetzes nicht erklären.

Es verbleiben also als Voraussetzungen der Erddrucklehre, deren Abänderung zwecks Anpassung an die naturgegebenen Verhältnisse zu erwägen sind, das Coulombsche Grundgesetz vom Größtwert oder Kleinstwert der Erddruckkraft, die Annahme, daß Zwischengleitflächen auf dieselbe Art gefunden werden wie Hauptgleitflächen und schließlich die Coulombsche Einschränkung, daß nur Ebenen als Gleitflächen in Betracht gezogen werden.

Wir wollen uns zuerst die Frage vorlegen, ob es sich bei diesen drei Coulombschen Voraussetzungen auch wirklich um drei voneinander unabhängige Forderungen oder Annahmen handelt. Nur in diesem Falle dürften wir eine willkürliche Abänderung der einen oder der anderen dieser Voraussetzungen ohne Rücksicht auf die übrigen vornehmen. Wir dürften also z. B. von der Coulombschen Beschränkung auf nur ebene Gleitflächen bei gleichzeitiger Beibehaltung des Grundgesetzes vom Kleinstwert oder Größtwert der Erddruckkraft nur dann abgehen, wenn diese beiden Voraussetzungen wirklich voneinander unabhängig sind⁵⁾.

Zunächst wollen wir feststellen, daß das Reibungsgesetz in der Form, wie es die Coulombsche Lehre verwendet, unvollständig ist. Es genügt nämlich nicht das Auftreten von Flächen zu verlangen, in denen überall die Spannung gegen das Flächenlot um den Reibungswinkel geneigt ist. Ein wesentlicher und ebenso wichtiger Bestandteil des Reibungsgesetzes, wie wir es aus den Reibungsversuchen kennengelernt haben, ist nämlich die Forderung, daß es keine Flächen im Hinterfüllungsboden geben darf, in denen in irgendeinem Punkt die resultierende Spannung gegen das Flächenlot einen größeren Winkel einschließt, als es der Reibungswinkel ist. Auf diese zweite Folgerung aus dem Reibungsgesetz nimmt nun die Coulombsche Lehre scheinbar keine Rücksicht. Es läßt sich jedoch zeigen, daß die Erfüllung des zweiten Teils des Reibungsgesetzes in Verbindung mit der Annahme von nur ebenen Gleitflächen mit der Coulombschen Forderung vom Größt- bzw. Kleinstwert der Erddruckkraft gleichbedeutend ist.

Um das zu beweisen, wollen wir unter der vereinfachten Coulombschen Voraussetzung, daß die Gleitfläche eine Ebene ist, untersuchen, welche Gleitflächenlage überhaupt in Frage kommt, wenn

1. die Gleichgewichtsbedingungen für jeden Teil des Hinterfüllungsbodens erfüllt sind und
2. das Reibungsgesetz in der erweiterten Form angewendet wird.

Wir verlangen also, daß es eine Ebene gibt, in der die Spannung gegen das Flächenlot um den Reibungswinkel geneigt ist (die Gleitebene), daß es aber keine Prüfebene gibt, für die die Spannung mit dem Flächenlot einen größeren Winkel als den Reibungswinkel einschließt. Dagegen wollen wir nicht schon von vornherein die Coulombsche Forderung nach einem Grenzwert der Erddruckkraft aufstellen. Tatsächlich genügen diese beiden Forderungen bei der Annahme nur ebener Gleitflächen, um die Aufgabe zu lösen.

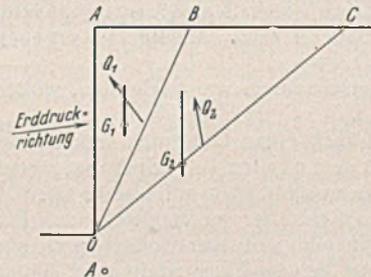


Abb. 1. Bei einer willkürlich gelegenen Schnittfläche OC müssen Erddruck, Gewicht des Erdkeils OAC und die Kraft Q_2 , die durch die Fläche OC übertragen wird, im Gleichgewicht stehen.

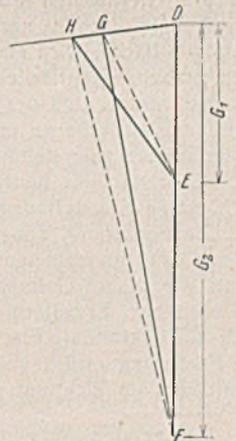


Abb. 2. Kräfte-dreiecke zu Abb. 1.

Vom Fuß der Stützwand denken wir uns die beiden Ebenen OB und OC durch den Hinterfüllungsboden gelegt (Abb. 1). G_1 ist das nach Angriffspunkt und Größe bekannte Gewicht des Erdkeils OAB und G_2 das Gewicht des Erdkeils OAC. Von der Erddruckkraft wollen wir wie in der Coulombschen Lehre voraussetzen, daß sie ihrer Richtung nach bekannt ist.

Nehmen wir zuerst an, daß OB die Gleitfläche sei, dann ist auch die Richtung der Kraft Q_1 , die durch diese Ebene übertragen wird, bekannt, und aus dem Kräfte-dreieck DEH (Abb. 2) ergibt sich die Größe der Erddruckkraft zu DH. Unter der Annahme, daß OC die wirkliche

⁵⁾ Den hier angedeuteten Weg hat Ohde beschränkt (s. Fußnote ³⁾). Auch Krey (Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes 5 Aufl. Berlin 1936, Wilh. Ernst & Sohn) behält den Grundsatz vom Größtwert des Erddruckes bei, wenn er zu gekrümmten Gleitflächen übergeht. Wie sich zeigen wird, ist dieses Verfahren jedoch nicht einwandfrei.

²⁾ Beim Erdwiderstand tritt nach Coulomb diejenige Gleitfläche auf, für die der Erdwiderstand einen Kleinstwert erlangt.

³⁾ v. Terzaghi, Large Retaining-Wall Tests. Eng. News-Rec., Bd. 112, (1934); derselbe, Festigkeitseigenschaften der Schüttungen, Sedimente und Gele. In Auerbach-Hort, Handbuch der phys. und techn. Mechanik. Bd. IV, 2. Hälfte, S. 521. Leipzig 1931, J. A. Barth. — Spilker, Mitteilungen über Messungen der Kräfte in einer Baugrubenaussteifung. Bautechn. 1937, Heft 1, S. 16. — Ohde, Zur Theorie des Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung. Bautechn. 1938, Heft 10/11, S. 150. — Rendulic, Der Erddruck im Straßen- und Brückenbau. Berlin 1938, Volk und Reich-Verlag. — Hertwig, Bemerkungen über neue Erddruckuntersuchungen. Veröffentlichungen des Instituts der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik an der T. H. Berlin. Heft 7. Berlin 1939, Jul. Springer.

⁴⁾ Lode, Der Einfluß der mittleren Hauptspannung auf das Fließen der Metalle. Forsch.-Arb. Ing.-Wesen, Heft 303, 1928. — Hencky, Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nebenspannungen. Proc. First Intern. Congr. Applied Mech., Delft 1924. — Rendulic, Eine Betrachtung zur Frage der plastischen Grenzstände. Bauing. 1938, Heft 11/12, S. 159.

Gleitfläche ist, ergibt sich das Kräfte-dreieck DFG und die Größe des Erddruckes zu DG . Welche der beiden in Vergleich gezogenen Flächen OB oder OC ist nun tatsächlich die Gleitfläche, und welches ist die wirkliche Größe des Erddruckes, DG oder DH ?

Die Annahme, daß CO , zu welcher Ebene der kleinere der beiden gefundenen Erddruckwerte, nämlich DG , gehört, die wahre Gleitfläche ist, ergibt einen Widerspruch zum erweiterten Reibungsgesetz. Denn wäre OC die Gleitfläche, dann könnten wir OB als Prüflfläche benutzen. Der Erdkeil OAB müßte im Gleichgewicht stehen, d. h. die drei an diesem Erdkeil angreifenden Kräfte G_1 , Q_1 und die Erddruckkraft DG müßten ein geschlossenes Kräfteck ergeben. Dieses Kräfteck wäre in Abb. 2 und durch den Linienzug $D-E-G$ dargestellt, denn wir haben ja vorausgesetzt, daß DG die Größe und Richtung der Erddruckkraft ist. Die innere Kraft Q_1 , die durch die Prüfebene OB übertragen wird, ist nach Größe und Richtung durch die Strecke EG (Abb. 2) dargestellt. EG ist aber, wie man sich überzeugen kann, zum Flächenlot von OB um einen Winkel geneigt, der größer ist als der Reibungswinkel. Nach Voraussetzung ist nämlich EH die Richtung, die zum Flächenlot den Reibungswinkel einschließt, und EG ist steiler geneigt als EH .

Die Annahme, OC mit dem zugehörigen kleineren Erddruckwert wäre die wahre Gleitfläche, ergibt in OB als Prüflfläche eine Kraftwirkung, die mit dem Reibungsgesetz in Widerspruch steht. Sie kann daher nicht aufrechterhalten werden.

Umgekehrt führt die Annahme, daß OB die wahre Gleitfläche ist, in der Prüfebene OC zu einer inneren Kraft Q_2 , die in Abb. 2 durch die Strecke FH dargestellt wird. FH schließt mit dem Flächenlot in OC einen kleineren Winkel ein als den Reibungswinkel, da ja nach Voraussetzung FG zu diesem Flächenlot den Reibungswinkel einschließt und FH weniger steil ist als FG .

Kämen also nur die beiden Flächen OB und OC als Gleitflächen in Frage, dann wäre OB die wirklich auftretende Gleitfläche, weil sie zum größeren Erddruckwert führt. Die Annahme, daß OC die Gleitfläche ist, steht im Widerspruch zum erweiterten Reibungsgesetz.

Von allen durch den Fußpunkt O hindurch gelegten Ebenen kann nur diejenige als Gleitfläche auftreten, die den größten Erddruckwert ergibt. Denn nur bei dieser Gleitflächenlage ergeben sich aus Gleichgewichtsbetrachtungen für alle Prüfebene durch O Kraftwirkungen, die nicht zum Reibungsgesetz in Widerspruch stehen⁶⁾.

Damit ist bewiesen, daß die Coulombsche Forderung nach einem Größtwert der Erddruckkraft bei Annahme nur ebener Gleitflächen eine unmittelbare Folge des Reibungsgesetzes ist. Sofern man also dieses Reibungsgesetz ebenso wie die Erfüllung der Gleichgewichtsbedingungen als naturgegebene Gesetzmäßigkeit betrachtet, enthält die Coulombsche Lehre nur eine einzige willkürliche Voraussetzung, nämlich die Annahme, daß die Gleitflächen ebene Flächen sind. Auch die Gepflogenheit, Zwischengleitflächen nach demselben Verfahren aufzusuchen wie die Hauptgleitfläche, wird aus dieser Betrachtung heraus gerechtfertigt. Denn auch Zwischengleitflächen müssen, wenn wir nur Ebenen zulassen, so gesucht werden, daß der Teilerddruck oberhalb des Ausgangspunktes der Zwischengleitfläche zu einem Größtwert wird. Anderenfalls ergeben sich Widersprüche zum Reibungsgesetz.

Bevor wir mit unseren Untersuchungen weiterschreiten, wollen wir noch einige Feststellungen treffen.

Die Forderung, daß der Erddruck einen Größtwert annehmen muß, ist nur dann gleichbedeutend mit dem zweiten Teil des Reibungsgesetzes, wenn wir unsere Untersuchungen ausschließlich auf ebene Gleitflächen beschränken. Erweitern wir den Kreis der zu vergleichenden Flächen auch auf gekrümmte Flächen, dann muß selbstverständlich nach wie vor die Forderung erfüllt sein, daß in keinem Flächenteil einer beliebigen Prüflfläche die Richtung der Spannung vom zugehörigen Flächenlot um

⁶⁾ Über den Sinn des Coulombschen Grundsatzes wird öfters die folgende Anschauung vertreten: Es kann jede der Ebenen durch den Fußpunkt der Stützwand als Gleitebene auftreten. Zu jeder dieser möglichen Gleitebenen gehört ein möglicher Erddruck. Da man nicht feststellen kann, welche dieser Gleitebenen nun tatsächlich auftritt, d. h. also, wie groß der Erddruck wirklich ausfällt, muß die Stützwand für den größten dieser möglichen Erddrucke bemessen werden. So sagt z. B. Krey (Erddruck, Erdwiderstand, 5. Aufl., S. 84): „Der gefährlichste Erddruck, dem die Wand widerstehen muß, ist der größte und diejenige Gleitfläche wird sich bei eintretender Bewegung wahrscheinlich ausbilden, für die $E \dots$ zum Maximum wird“.

Diese Anschauung ist, wie man aus den hier gebrachten Ableitungen erkennt, falsch, und sie kann sich verhängnisvoll auswirken, da die Meinung entstehen kann, man habe die Wand für den größtmöglichen Erddruck bemessen und somit genügend Sicherheit im Bauwerk. Das Gegenteil ist aber richtig. Der Coulombsche Erddruck ist der kleinstmögliche Erddruck, der überhaupt auftreten kann (siehe Satz A), und der wahre Erddruck ist im Allgemeinen größer als dieser Coulombsche Wert. (Siehe auch Abschnitt: Der Einfluß der Zeit auf Stützkonstruktionen in: Rendulic, Der Erddruck im Straßen- und Brückenbau, s. oben, Fußnote 3.)

mehr abweicht als um den Reibungswinkel. Dagegen muß bei gekrümmten Gleitflächen nicht mehr die Bedingung erfüllt sein, daß der Erddruck einen Größtwert annimmt. Die Erfüllung des Reibungsgesetzes ist auf jeden Fall das Voranstehende. Der Coulombsche Grundsatz vom Größtwert des Erddruckes ist bei Verwendung ebener Gleitflächen mit Erfüllung des Reibungsgesetzes gleichbedeutend und ersetzt den zweiten Teil des Reibungsgesetzes. Dieser Coulombsche Grundsatz hat in der Erddrucklehre sehr befruchtend gewirkt. Trotzdem dürfen wir ihn, sobald wir zu gekrümmten Gleitflächen übergehen, nicht mehr verwenden, da seine Anwendbarkeit erst aus dem Reibungsgesetz, wie im Falle der ebenen Gleitflächen, bewiesen werden müßte, was im allgemeinen nicht gelingen kann. Wir haben es aber auch nicht nötig, einen solchen abgeleiteten Satz, als der sich das Coulombsche Grundgesetz erwiesen hat, zu verwenden, da wir ja ohne weiteres in der Lage sind, das erweiterte Reibungsgesetz als das ursprüngliche Gesetz unmittelbar anzuwenden. Das zuvor gezeigte Prüflflächenverfahren erlaubt uns, unter Berücksichtigung der Gleichgewichtsbedingungen, in besonderen Fällen eine unmittelbare Anwendung des vollständigen Reibungsgesetzes. Es liefert, wie später gezeigt werden wird, für diese Fälle das dem Coulombschen Grundgesetz entsprechende abgeleitete Gesetz, das je nach der Wahl der Flächenschar, deren einzelne Teile untereinander zu vergleichen sind, verschieden ausfällt.

Wir dürfen übrigens im Falle ebener Gleitflächen aus der Tatsache, daß wir diejenige Fläche festgestellt haben, für die der Erddruck einen Größtwert ergibt, noch nicht schließen, daß es sich dabei um die wirklich auftretende Gleitfläche handelt. Unsere Untersuchung zeigt nur, daß alle anderen Ebenen durch den Stützwandfußpunkt bestimmt nicht als Gleitflächen in Frage kommen, weil sie offensichtlich dem zweiten Teil des Reibungsgesetzes widersprechen. Wir müssen jedoch immer noch die Möglichkeit ins Auge fassen, daß die wirkliche Gleitfläche irgendeine gekrümmte Fläche ist und der wirkliche Erddruck dabei noch größer ausfällt als der Coulombsche Erddruck. Es würden in diesem Falle, wie man sich leicht an Hand der Abb. 2 überzeugen kann, in allen ebenen Prüflflächen durch den Fußpunkt der Stützwand die inneren Kräfte Q mit den zugehörigen Flächenloten Winkel einschließen, die kleiner sind als der Reibungswinkel. Auch die Coulombsche Gleitfläche müßten wir in diesem Falle als Prüflfläche auffassen, und auch in ihr wäre der Winkel, den die innere Kraft Q mit dem Flächenlot einschließt, kleiner als der Reibungswinkel.

Das Prüflflächenverfahren zeigt also, daß auf rein statischer Grundlage nur die Möglichkeit besteht, diejenigen Flächen festzustellen und auszuscheiden, die als Gleitflächen mit Rücksicht auf das erweiterte Reibungsgesetz bestimmt nicht in Frage kommen. Dagegen sind wir nicht in der Lage, eine bestimmte Feststellung in dem Sinne zu treffen, daß eine bestimmte Fläche tatsächlich die auftretende Gleitfläche ist. Wie sich später zeigen wird, hat das seinen Grund darin, daß die Lösung der Erddruckfragen nicht eindeutig ist. Es gibt bei gegebenen Reibungsverhältnissen im Boden und an der Wand, bei gegebener Stützwandlage und gegebener Hinterfüllungsoberfläche unendlich viele Möglichkeiten für die Ausbildung der Gleitfläche. Die Feststellung, welche dieser Möglichkeiten in einem gegebenen Falle tatsächlich auftritt, läßt sich auf rein statischer Grundlage nicht treffen.

Der Coulombsche Erddruckwert hat jedoch unter allen nur denkbaren Erddruckwerten eine Eigenschaft, die wir in dem folgenden Satz A festlegen wollen:

Satz A: Der angreifende Erddruck, den man unter Verwendung nur ebener Gleitflächen erhält, d. h. also der Coulombsche Erddruck, ist der denkbar kleinste Erddruck, der bei gegebenen Verhältnissen (Bodenreibung, Wandreibung, Wandneigung und Oberflächenböschung) überhaupt auftreten kann. Der Coulombsche Erdwiderstand dagegen ist der denkbar größte Erddruck, der bei gegebenen Verhältnissen auftreten kann.

Der Satz A ist, obwohl im Rahmen eines Näherungsverfahrens abgeleitet, streng richtig, solange das vorausgesetzte Reibungsgesetz als streng richtig angesehen wird. Er gilt unabhängig davon, ob die Gleitflächen ebene Flächen oder logarithmische Spiralen sind, oder ob sie sonst irgendeine andere Form haben. Er gilt auch dann, wenn überhaupt keine Gleitflächen auftreten, wie dies z. B. hinter unnachgiebigen Stützwänden der Fall sein kann.

Der Beweis ist mit Hilfe der Prüflflächen sehr einfach zu führen. In Abb. 3 sei AB die Gleitfläche, die sich aus der Coulombschen Lehre ergibt. E sei also der Coulombsche angreifende Erddruck. E , Q und G stehen untereinander im Gleichgewicht und ergeben das bekannte geschlossene Kräfte-dreieck der Abb. 4. Nehmen wir nun an, daß irgend eine andere gekrümmte Gleitfläche einen kleineren Erddruck als E ergäbe, dann könnten wir die Ebene AB in Abb. 3 als Prüflfläche benutzen und könnten in Abb. 4 das geschlossene Kräfte-dreieck mit $E' < E$ als Erddruckkraft zeichnen. Das Gewicht G des Erdkörpers ABC ist unverändert geblieben, so daß also in der Prüflfläche AB die innere Kraft Q , auftreten müßte. Wie aus Abb. 4 zu ersehen ist, schließen Q und Q ,

den Winkel α ein. Während Q mit dem Flächenlot voraussetzungsgemäß den Reibungswinkel ρ einschließt, würde Q' mit dem Flächenlot den Winkel $\rho + \alpha$ einschließen.

Die Annahme, es könnte sich unter irgendwelchen Voraussetzungen ein kleinerer Erddruck einstellen, als es der Coulombsche ist, würde in der Coulombschen Gleitfläche als Prüffläche Verhältnisse ergeben, die dem Reibungsgesetz widersprechen.

In Abb. 5 sei GQE das Kräfte Dreieck im Falle des Coulombschen Erdwiderstandes. Man erkennt ohne weiteres, daß die Voraussetzung $E' > E$ eine Kraft Q' in der Coulombschen Gleitfläche als Prüffläche ergäbe, die zum Flächenlot unter dem Winkel $\rho + \alpha > \rho$ geneigt wäre. Die Annahme $E' > E_{pass}$ ergibt somit Widersprüche zum Reibungsgesetz. Damit ist der Satz A allgemeingültig bewiesen.

Nach diesen einleitenden Untersuchungen wollen wir zu der eingangs gestellten Frage zurückkehren, welche der Coulombschen Voraussetzungen abgeändert werden muß, um die offensichtlich vorhandenen Unterschiede zwischen Rechnung und Versuchsergebnissen zu beseitigen. Die Beantwortung fällt jetzt nicht mehr schwer. Die Coulombsche Lehre enthält überhaupt nur eine einzige willkürliche Voraussetzung, nämlich die vereinfachende Annahme, daß die Gleitflächen Ebenen sind. Wollen wir also zu besseren rechnerischen Ergebnissen gelangen, dann müssen wir diese Beschränkung fallen lassen und auch gekrümmte Flächen in den Bereich unserer Untersuchungen einbeziehen.

Nun war es gerade die Beschränkung auf nur ebene Gleitflächen, die die Coulombsche Lehre so einfach und übersichtlich werden ließ. Durch diese Annahme war nämlich die Richtung der Mittelkraft in der Gleitfläche eindeutig festgelegt. Als Mittelwert von Spannungen, die alle untereinander gleichgerichtet sind, mußte diese Mittelkraft ebenfalls dieselbe Richtung haben wie die Spannung. Und nur die Kenntnis dieser Richtung ermöglichte das Zeichnen des Kräfte Dreiecks und das Auffinden der Erddruckgröße. Gehen wir nun zu gekrümmten Gleitflächen über, dann entfällt dieser Vorteil. Wir können von vornherein weder über Größe noch über Richtung und Angriffspunkt der Mittelkraft aller Druckkräfte in der gekrümmten Gleitfläche etwas aussagen. Darin liegt die Schwierigkeit der Behandlung gekrümmter Gleitflächen.

Nur für eine einzige Gattung gekrümmter Flächen besteht Aussicht auf eine gleich übersichtliche und einfache Behandlungsweise wie bei ebenen Gleitflächen. Wählen wir nämlich die gekrümmte Gleitfläche so, daß die um den Reibungswinkel gegen die jeweiligen Flächenlote geneigten Spannungen alle durch einen Punkt hindurchführen, dann ergibt sich eine ähnliche Rechnung wie bei ebenen Gleitflächen.

2. Erddruckuntersuchung mittels Prüfflächen.

a) Gleitflächen erster Art. Die logarithmische Spirale mit der Gleichung:

$$(1) \quad r = r_0 e^{\alpha \cdot \text{tg } \rho}$$

(in Polarkoordinaten) hat die Eigenschaft, daß alle Leitstrahlen, d. h. alle Geraden durch den Pol der logarithmischen Spirale mit der Kurve selbst überall den Winkel $90 - \rho$ bzw. $90 + \rho$ einschließen. Wählen wir also einen Teil einer logarithmischen Spirale als Gleitfläche und treffen wir die Voraussetzung, daß die Spannungen in dieser Gleitfläche überall zum Flächenlot den Reibungswinkel ρ einschließen, dann führen die Spannungsrichtungen in jedem Punkt durch den Pol der Spirale (Abb. 6).

Als Folge dieser Eigenschaft muß auch die Mittelkraft R aus allen Spannungen durch den Pol O hindurchführen. Diese Eigenschaft der logarithmischen Spirale läßt erwarten, daß sich bei Benutzung der Spirale als Gleitfläche ähnlich vereinfachte Verfahren zur Ermittlung der in Frage kommenden Gleitfläche ableiten lassen wie bei Benutzung der Ebene als Gleitfläche.

Die weitere Verfolgung dieses Gedankens läßt erkennen, daß man sich, ebenso wie bei dem Coulombschen Verfahren, zunächst nicht weiter um die Spannungsverteilung in der

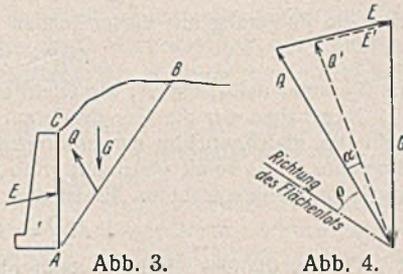


Abb. 3.

Abb. 4.

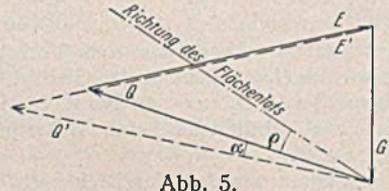


Abb. 5.

Gleitfläche zu kümmern braucht, um zu wertvollen Schlüssen über den Erddruck zu gelangen, sondern daß es genügt, mit der Mittelkraft zu arbeiten.

In der Coulombschen Lehre (in der Behandlungsart, wie sie hier dargestellt wurde) genügte die Tatsache, daß in irgendeiner Prüfebene durch den Fußpunkt der Stützwand die innere Kraft gegenüber dem Flächenlot um mehr als den Reibungswinkel geneigt war, um den damit verknüpften Spannungszustand im Sand als unmöglich erkennen zu lassen. Die Verfolgung dieses Grundsatzes führte zur Aufstellung des Coulombschen Grundgesetzes vom GrößtWert der Erddruckkraft und weiterhin zur Auswahl der allein möglichen ebenen Gleitfläche.

Ein ähnliches Merkmal läßt sich nun auch bei der Verwendung der logarithmischen Spirale als Gleitfläche finden. Führt nämlich wie in Abb. 7a die Mittelkraft R rechts vom Pol O der Spirale vorbei, dann schließt sie mit dem Flächenlot im Angriffspunkt P einen Winkel ein, der größer ist als der Reibungswinkel. Das ist aber, wenn in der Prüffläche nur Druckspannungen übertragen werden, ein untrüglisches Zeichen dafür, daß in irgendeinem Teil der Fläche AB der Reibungswiderstand überwunden ist, d. h. daß in diesem Teil der Prüffläche die Druckspannungen zum jeweiligen Flächenlot einen Winkel einschließen, der größer ist als der Reibungswinkel. Ein solcher Zustand, wie er in Abb. 7a dargestellt ist, widerspricht also dem Reibungsgesetz und kann im Boden mit dem Reibungswinkel ρ niemals auftreten.

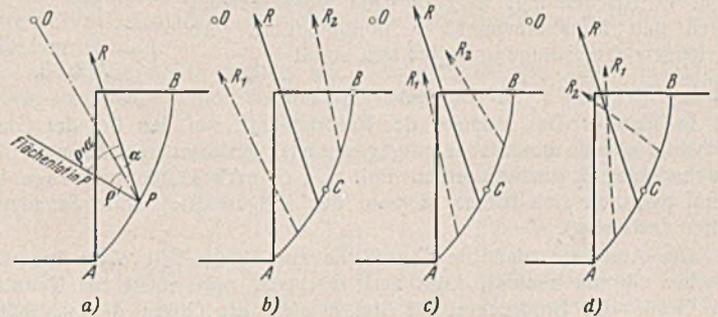


Abb. 7a bis d. Mögliche Lagen der Teilkräfte R_1 und R_2 , wenn die Mittelkraft R rechts vom Pol verläuft. Es muß immer mindestens eine der beiden Teilkräfte ebenfalls rechts vom Pol verlaufen.

Um das zu beweisen, teilen wir den als Prüffläche wirksamen Teil AB der logarithmischen Spirale durch den Punkt C in die beiden Teilabschnitte AC und CB (Abb. 7b). Die Mittelkraft der durch die Prüffläche übertragenen Druckspannungen sei für den Abschnitt AC die Kraft R_1 und für den Abschnitt CB die Kraft R_2 . R_1 und R_2 zu einer Mittelkraft zusammengesetzt müssen R ergeben, da voraussetzungsgemäß R die Mittelkraft für den ganzen Abschnitt AB ist. Es müssen sich demnach R_1 und R_2 in einem Punkt schneiden, der auf der Wirkungslinie von R liegt. Dementsprechend ergeben sich für die Lagen der Kräfte R_1 und R_2 die in den Abb. 7b bis 7d dargestellten Möglichkeiten. In Abb. 7b ist dieser Schnittpunkt zwischen R_1 und R_2 unterhalb der Prüffläche angenommen und R_1 führt links vom Pol der Prüffläche vorbei. R_1 schließt mit dem Lot im Angriffspunkt auf der Prüffläche einen Winkel ein, der kleiner als der Reibungswinkel ist. Dagegen führt R_2 rechts von O vorbei, und R_2 schließt mit dem Flächenlot im Schnittpunkt von R_2 mit der Gleitfläche einen Winkel ein, der größer ist als der Reibungswinkel.

Im Falle 7c verlaufen beide Teilkräfte R_1 und R_2 rechts von O , und beide Kräfte schließen mit ihren zugehörigen Flächenloten Winkel ein, die größer sind als der Reibungswinkel.

Im Falle 7d führt schließlich R_2 links von O vorbei, während R_1 rechts von O verläuft und demnach mit seinem zugehörigen Flächenlot einen Winkel einschließt, der größer ist als der Reibungswinkel.

Wir erkennen also, daß mindestens eine der beiden Teilkräfte rechts von O vorbeiführen muß, wenn die Gesamtkraft R rechts von O verläuft.

Ist nun AC derjenige Teil, für den die Kraft R_1 rechts von O vorbeiführt, dann teilen wir den Abschnitt AC durch den Punkt C_1 neuerdings in zwei Teile. Die Kraft R_1 zerfällt damit in die beiden weiteren Teilkräfte R_1' und R_2' , von denen nach dem Gesagten mindestens eine rechts von O vorbeiführen muß.

Wir können nun diesen Vorgang der Teilung durch einen willkürlich gelegenen Punkt beliebig weit treiben. Bei jeder neuen Teilung muß mindestens eine der beiden Mittelkräfte aus den Spannungen der beiden Teilabschnitte rechts von O vorbeiführen. Bei fortschreitender Teilung werden die Längen der einzelnen Abschnitte immer kleiner, so daß sie schließlich die Größenordnung eines Liniensegmentes erlangen, bei dem die Krümmung vernachlässigt werden kann und die Spannungsrichtungen alle untereinander und zur Mittelkraft gleichgerichtet sind. Damit ist bewiesen, daß, wenn die Mittelkraft aller Druckkräfte längs der Prüffläche zum Flächenlot im Schnittpunkt der Mittelkraft mit der Prüffläche einen Winkel einschließt, der größer ist als der Reibungswinkel, notwendig in

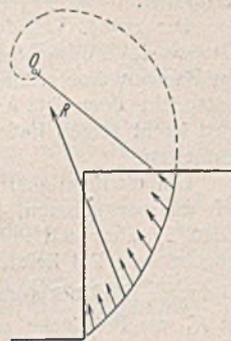


Abb. 6. Wenn die Spannungsrichtungen in jedem Flächenteilstück durch den Punkt O führen, muß die Mittelkraft R ebenfalls durch O verlaufen.

einzelnen Teilen der Prüffläche Spannungsrichtungen vorherrschen müssen, die zu ihrem Flächenlot größere Winkel einschließen als den Reibungswinkel. In einzelnen Teilen der Prüffläche herrschen dann Spannungsverhältnisse, die zum Reibungsgesetz in Widerspruch stehen.

Ergibt also die Annahme, die Spirale K_1 durch den Fußpunkt der Stützmauer sei die Gleitfläche, daß in einer anderen Spirale K_2 , die wir als Prüffläche durch den Fußpunkt der Stützmauer legen, die Mittelkraft der inneren Kräfte nach Art der Abb. 7a rechts vom Pol der Kurve K_2 vorbeiführt, dann ist damit bewiesen, daß K_1 als Gleitfläche nicht in Frage kommt, weil sonst ein Widerspruch zum Reibungsgesetz bestünde.

In Abb. 8 sei A der Fußpunkt einer Stützmauer und AC ein Teil einer logarithmischen Spirale mit der Gleichung $r = r_1 e^{\alpha \cdot \lg \rho}$, wobei O der Pol der Spirale sei. Die Mittelkraft Q der inneren Drücke in der Gleitfläche AC führt also, wie früher gezeigt wurde, durch den Pol O hindurch, wenn wir AC als Gleitfläche voraussetzen. Im Schwerpunkt des abgleitenden Bodenteiles ABC (schraffliert) greift sein Gewicht G an. Vom Erddruck E sei nur die Richtung bekannt (Wandreibung). Wir können dann die Momentensumme der drei Kräfte G , Q und E um den Pol O bilden. Da es sich um einen Gleichgewichtszustand handelt, muß diese Momentensumme zu Null werden. Das Moment der inneren Kraft Q tritt dabei überhaupt nicht in Erscheinung, weil Q nach Voraussetzung durch den Momentenpunkt O hindurchführt. Als Gleichgewichtsbedingung ergibt sich somit

$$(2) \quad M_E = -M_G.$$

In Worten: Das Moment der Erddruckkraft um den Pol der Gleitfläche ist ebenso groß, aber entgegengesetzt gerichtet dem Moment des Erdgewichtes G um denselben Pol. Da G nach Größe und Lage bekannt ist, läßt sich dieses Moment des Erdgewichtes ohne Schwierigkeiten feststellen.

Die Annahme, daß die Gleitfläche aus einem Teil einer logarithmischen Spirale besteht, führt zwar vorläufig noch nicht zur Kenntnis der Größe des Erddruckes, sie liefert aber die Größe des statischen Moments dieser Erddruckkraft um einen bestimmten bekannten Punkt, nämlich um den Pol der logarithmischen Spirale.

In Abb. 9 haben wir eine Gerade P gleichgerichtet zur bekannten Richtung der Erddruckkraft gezogen und auf dieser Geraden zwei Punkte 1 und 2 willkürlich herausgegriffen. Durch den Fußpunkt A der Stützmauer haben wir zunächst mit 1 als Pol die Gleitfläche K_1 gezeichnet und dann mit 2 als Pol die Gleitfläche K_2 . Sowohl K_1 als auch K_2 sind Teile einer logarithmischen Spirale, die zum Reibungswinkel ρ gehören [Gl. (1)]. Wir stellen uns nun die Frage: welche dieser beiden Kurven würde sich wirklich beim Ausweichen der Stützmauer ausbilden, wenn nur K_1 oder K_2 als Gleitflächen auftreten könnten.

Diese Frage ist leicht zu beantworten. Wir wissen: Ist K_2 die Gleitfläche, dann verläuft die innere Kraft Q_2 , die durch K_2 übertragen wird, durch den Pol 2, und es ist aus Gleichgewichtsgründen

$$(3) \quad M_{E_2}^{(2)} = -M_{G_2}^{(2)}.$$

Der obere Zeiger bedeutet den Momentenpunkt, im Falle der Gl. (3) also den Pol 2, der untere Zeiger (E_2 bzw. G_2) die Kraft, deren Moment um den angegebenen Momentenpol gebildet wurde.

Wollen wir nun nicht K_2 , sondern K_1 als Gleitfläche voraussetzen und die Kurve K_2 als Prüffläche benutzen, dann darf die Kraft Q_2 nicht rechts vom Pol 2 vorbeiführen, da dies einen Widerspruch zum Reibungsgesetz bedeuten würde. Es ergäbe sich für den Erdkörper ABC die Gleichgewichtsbedingung

$$(4) \quad M_{E_1}^{(2)} = -M_{G_2}^{(2)} - M_{Q_2}^{(2)} \dots (M_{Q_2}^{(2)} \geq 0).$$

Unter der Voraussetzung, daß K_1 die Gleitfläche ist, würde sich in K_2 als Prüffläche nur dann kein Widerspruch ergeben, wenn, wie sich aus dem Vergleich von (3) und (4) ergibt,

$$(5) \quad M_{E_1}^{(2)} \geq M_{E_2}^{(2)} \text{ ist.}$$

Setzen wir umgekehrt voraus, daß bei Annahme von K_1 als Gleitfläche in der Prüffläche K_2 Widersprüche zum Reibungsgesetz entstünden, dann müßte Gl. (4), da ja in diesem Falle Q_2 rechts von 2 vorbeiführen würde, lauten:

$$M_{E_1}^{(2)} = -M_{G_2}^{(2)} + M_{Q_2}^{(2)}.$$

Und die Folgerung aus dieser letzten Gleichung und aus Gl. (3) ergäbe

$$M_{E_1}^{(2)} < M_{E_2}^{(2)},$$

als Merkmal dafür, daß K_1 als Gleitfläche nicht auftreten kann.

Nun haben wir die Gerade P , auf der sich die beiden Pole 1 und 2 befinden, gleichgerichtet zur Erddruckrichtung gelegt. Für die Erddruckmomente ist es somit gleichgültig, ob wir den Punkt 1 oder den Punkt 2 als Momentenpol wählen. Es ist also insbesondere

$$M_{E_1}^{(2)} = M_{E_1}^{(1)}.$$

Gl. (5), die das Merkmal dafür abgibt, daß bei K_1 als Gleitfläche in K_2 als Prüffläche keine Widersprüche zum Reibungsgesetz entstehen, kann also auch wie folgt angeschrieben werden:

$$(6a) \quad M_{E_1}^{(1)} \geq M_{E_2}^{(2)}.$$

In Worten ausgedrückt bedeutet Gl. (6a): Von zwei logarithmischen Spiralen, deren Pole sich auf einer zur Erddruckrichtung gleichgerichteten Geraden befinden, kommt nur diejenige als Gleitfläche in Frage, die das größere Erddruckmoment um den zugehörigen Pol ergibt.

Wegen Gl. (3), die dann gilt, wenn K_1 als Gleitfläche vorausgesetzt wird, und einer entsprechenden Gleichung, die sich ergibt, wenn wir K_2 als Gleitfläche voraussetzen, können wir (6a) auch in der Form:

$$(6b) \quad |M_{G_1}^{(1)}| \geq |M_{G_2}^{(2)}|$$

ansprechen. Abgesehen vom Vorzeichen, muß das Moment des Erdgewichtes G_1 um den Pol der Gleitspirale größer sein als das Erdgewichtsmoment von G_2 um den Pol 2 der Prüffspirale, wenn K_1 als Gleitfläche in K_2 als Prüffläche keine Widersprüche zum Reibungsgesetz hervorgerufen soll.

Führen wir den Vergleich nicht nur zwischen zwei Spiralen durch, dann gilt zur Auswahl der möglichen Gleitfläche der folgende

Satz B_1 : Von allen logarithmischen Spiralen durch den Fuß einer Stützmauer, deren Pole sich auf einer bestimmten, zum Erddruck gleichlaufenden Geraden P befinden, kann nur die als Gleitfläche in Frage kommen, die das größte Erddruckmoment um den zugehörigen Pol ergibt. Die Größe dieses maßgebenden Erddruckmoments ist der denkbar kleinste Betrag, den ein Erddruckmoment bei gegebenen Verhältnissen um einen Punkt der Geraden P überhaupt annehmen kann.

Die Erfüllung des ersten Teiles des Satzes B_1 ist gleichbedeutend mit Erfüllung des zweiten Teiles des Reibungsgesetzes, wonach nach keiner Flächenrichtung die Spannungsrichtung mit dem Flächenlot einen größeren Winkel als den Reibungswinkel einschließen darf. Der Satz B_1 kann also als gleichbedeutender Ersatz für den zweiten Teil des Reibungsgesetzes gewertet werden und entspricht somit dem Coulombschen Grundgesetz in der Coulombschen Erddrucklehre. Es läßt sich sogar zeigen, daß das Coulombsche Grundgesetz als Sonderfall im ersten Teil des Satzes B_1 enthalten ist. Rückt nämlich die Gerade P in Abb. 9, auf der sich die Pole der logarithmischen Spiralen befinden, ins Unendliche, dann arten die logarithmischen Spiralen zu Geraden durch den Fußpunkt A der Stützmauer aus. Die Bedingung, daß das Erddruckmoment um den zugehörigen Drehpol einen Größtwert annimmt, ist in diesem Falle gleichbedeutend mit der Bedingung, daß der Erddruckwert selbst einen Größtwert annimmt, weil ja die Hebelarme der statischen Momente alle untereinander gleich groß werden, nämlich unendlich groß.

Mit Feststellung dieser Tatsache ist der Anschluß des hier entwickelten erweiterten Verfahrens mit gekrümmten Gleitflächen an das gebräuchliche Coulombsche Verfahren gefunden. Die Coulombsche Lehre ist als Sonderfall in der hier abzuleitenden erweiterten Erddrucklehre enthalten.

Der zweite Teil des Satzes B_1 mit seiner Aussage über die untere Grenze des Erddruckmoments um einen Punkt der Geraden P ist, obwohl im Rahmen einer Näherungsuntersuchung gefunden, streng gültig. Er entspricht dem Satz A bei Verwendung ebener Gleitflächen, und, wie sich leicht zeigen ließe, ist der Satz A im Satze B_1 sogar als Sonderfall enthalten.

Um die Richtigkeit des zweiten Teiles von B_1 zu beweisen, brauchen wir nur anzunehmen, in Abb. 9 wäre K_1 diejenige Gleitfläche, die von allen Spiralen mit Polen auf P das größte Erddruckmoment um den zugehörigen Pol liefert. Würde nun irgendeine andere Gleitfläche ein kleineres Erddruckmoment um den Pol 1 ergeben als $M_{E_1}^{(1)}$, dann würde in K_1 als Prüffläche die Kraft Q_1 rechts vom Pol 1 vorbeiführen. Das Gleichgewicht am Erdkörper ADB verlangt nämlich

$$-M_{G_1}^{(1)} + M_{Q_1}^{(1)} = M_E^{(1)} < M_{E_1}^{(1)},$$

wobei $M_{Q_1}^{(1)}$ eine andere Drehrichtung um den Pol 1 haben muß als $M_{G_1}^{(1)}$, weil ja andererseits

$$-M_{G_1}^{(1)} = M_{E_1}^{(1)}$$

sein muß.

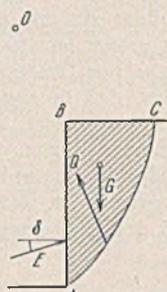


Abb. 8.

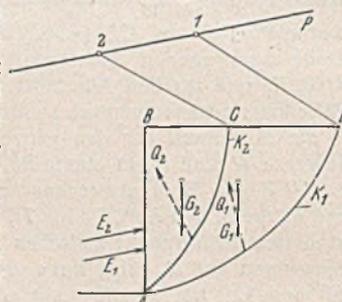


Abb. 9.

Die Annahme, es könnte irgendein auftretender Erddruck ein kleineres Moment um 1 haben als $M_{E_1}^{(1)}$, führt also in K_1 als Prüffläche zu Widersprüchen mit dem Reibungsgesetz und kann somit nicht aufrechterhalten werden.

Ohne die Ableitung besonders durchzuführen da sie Punkt für Punkt der soeben durchgeführten entspricht, sei noch der Satz aufgestellt, der für den Erdwiderstand gilt:

Satz B₂: Von allen logarithmischen Spiralen des Reibungswinkels ρ durch den Stützwandfuß, deren Pole sich auf einer bestimmten Geraden P gleichgerichtet zur Erddruckrichtung befinden, kann im Falle des Erdwiderstandes nur diejenige tatsächlich als Gleitfläche auftreten, zu der das kleinste Erdwiderstandsmoment um den zugehörigen Drehpol gehört. Dieses kleinste Erdwiderstandsmoment ist gleichzeitig der größte Wert, den das statische Moment irgendeines Erdwiderstandes um einen Punkt der Geraden P überhaupt annehmen kann.

Auch der Satz B₂ enthält sowohl das Coulombsche Grundgesetz vom Kleinstwert der Erddruckkraft, wie es für den Coulombschen Erdwiderstand gilt, als auch den Teil des Satzes A, der sich auf den Erdwiderstand bezieht, als Sonderfälle für ins Unendliche rückende Gerade P eingeschlossen.

Bevor wir mit unseren Untersuchungen weiter fortschreiten, wollen wir noch einiges über die Anwendung der logarithmischen Spirale sagen⁷⁾.

Für jeden Reibungswinkel ρ ist eine andere Spirale zu verwenden. Wie man aus Gl. (1) erkennt, ist der Exponent von e eine Abhängige dieses Reibungswinkels. Bei der praktischen Durchführung von Erd-druckuntersuchungen kann man mit Vorteil Lehren dieser Spiralen verwenden. Man muß sich dabei für jeden Reibungswinkel eine eigene Lehre anfertigen.

Es ist darauf zu achten, daß man die Lehre beim Einzeichnen der Gleitfläche nicht falsch anwendet. Sie wird verschieden angelegt, je nachdem, ob man es mit angreifendem Erddruck oder mit Erdwiderstand zu tun hat.

Abb. 10a zeigt die richtige Lage der Lehre im Falle angreifenden Erddruckes, denn beim Hinuntergleiten des schraffierten Erdkörpers wirken die Spannungen, die alle durch den Pol 0 der Spirale hindurchführen, bewegungshemmend. Abb. 10b dagegen zeigt die richtige Lage der Spirale bei Erdwiderstand, denn auch hier wirken die Spannungen entgegen der nach aufwärts gerichteten Bewegung.

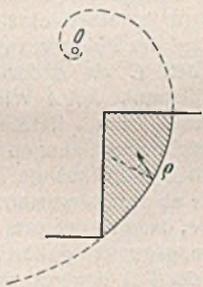


Abb. 10a.

Richtige Lage der Spirale bei angreifendem Erddruck.

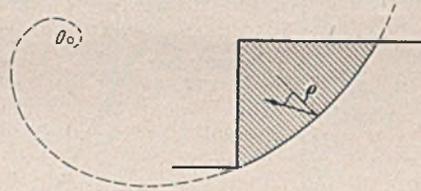


Abb. 10b. Richtige Lage der Spirale bei Erdwiderstand.

Dagegen wäre es falsch, wollte man die Spirallage der Abb. 10b bei der Behandlung des angreifenden Erddruckes benutzen, wie dies in Abb. 11 angedeutet ist. Die Spannungen in der Gleitfläche, die bei angreifendem Erddruck nach aufwärts gerichtet sein müssen, würden nicht durch den Pol der Spirale hindurchführen. Die wichtigste Voraussetzung unseres Verfahrens wäre somit nicht erfüllt, und man erhielte völlig falsche Ergebnisse.

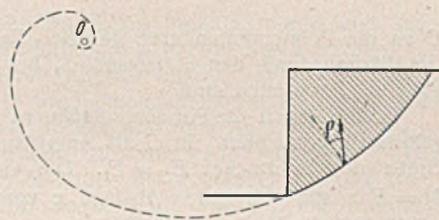


Abb. 11. Falsche Lage der Spirale für den Fall des angreifenden Erddruckes.

In Abb. 9 haben wir von der Geraden P nur vorausgesetzt, daß sie zur Erddruckrichtung gleichgerichtet ist. Der Abstand dieser Geraden vom Stützwandfuß war jedoch beliebig gewählt worden. Mit Hilfe des Satzes B₁ sind wir in der Lage, auf dieser Geraden einen ausgezeichneten Punkt S_K zu finden. Dieser Punkt S_K ist der Pol der einzigen logarith-

⁷⁾ Etwas ausführlicher, jedoch nicht auf Erddruckfragen zugeschnitten, findet man das hier Gesagte in Rendulic, Ein Beitrag zur Bestimmung der Gleitsicherheit. Bauing. 1935, S. 230. Bei Veröffentlichung dieser Arbeit waren mir frühere Vorschläge (Zimmermann, Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues, 2. Aufl. Berlin 1930, Wilh. Ernst & Sohn) für die Benutzung der logarithmischen Spirale als Gleitfläche nicht bekannt. Anscheinend hat Schwedler als erster auf die Vorteile der logarithmischen Spirale als Gleitfläche hingewiesen.

mischen Spirale (mit Pollage auf der Geraden P) durch den Stützwandfuß, bei deren Annahme als Gleitfläche kein Widerspruch zum erweiterten Reibungsgesetz entsteht.

Wir können nun beliebig viele solcher zur Erddruckrichtung gleichlaufender Geraden ziehen und erhalten auf jeder dieser Geraden einen ausgezeichneten Punkt. Verbinden wir alle diese Punkte durch einen Linienzug, dann erhalten wir die Polkurve.

Die Polkurve kann nach dem Gesagten als der geometrische Ort aller Pole von logarithmischen Spiralen durch den Fuß einer gegebenen Stützwand erläutert werden, bei deren Annahme als Pole von Gleitflächen bei einer vorgeschriebenen Erddruckrichtung kein Widerspruch zum Reibungsgesetz entsteht. Für verschiedene Erddruckrichtungen ergeben sich verschiedene Polkurven.

Bisher haben wir allerdings nur bewiesen, daß das Auftreten einer Gleitfläche (einer logarithmischen Spirale), deren Pol S_K auf der Polkurve liegt, in keiner der Prüfflächen, deren Mittelpunkte auf einer gleichlaufenden zur Erddruckrichtung durch den Punkt S_K liegen, Widersprüche zum Reibungsgesetz erzeugt. Es könnte nun noch der Fall sein, daß beim Vergleich aller dieser bevorzugten Spiralen untereinander, d. h. aller Spiralen mit Polen auf der Polkurve, neuerdings wegen Widersprüchen zum Reibungsgesetz ein Teil ausgeschaltet werden muß.

Die nachfolgenden Untersuchungen werden zeigen, daß das tatsächlich der Fall ist. Für den verbleibenden Rest der Spiralen lassen sich jedoch Angriffspunkte der Erddruckkräfte so finden, daß sie durchwegs mögliche Gleitflächen darstellen, die untereinander zunächst völlig gleichwertig sind.

An dieser Stelle wollen wir einige Ergebnisse eines vollständig durchgerechneten Erddruckfalles angeben. So ist in Abb. 12 gezeigt,

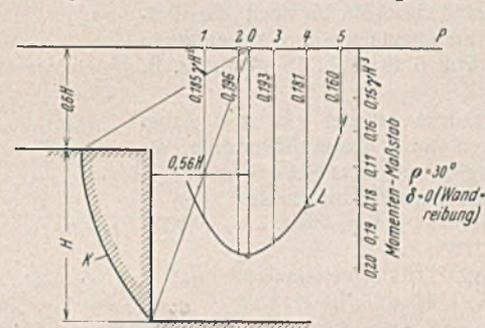


Abb. 12. Ermittlung der einzig widerspruchsfreien Pollage auf der Geraden P .

$\rho = 30^\circ$ behandelt. In Abb. 12 ist die Gerade P in einem Abstand $1,6H$ vom Stützwandfuß angenommen (H ist die Stützwandhöhe). Es wurden für eine ganze Anzahl von Polen auf der Geraden P die Spiralen durch den Stützwandfuß gelegt und das statische Moment des abrutschenden Bodengewichtes auf die zugehörigen Pole ermittelt. Da dieses statische Moment des Bodengewichtes nach Gl. (3) genau so groß ist wie das Moment des Erddruckes um denselben Pol, waren damit auch diese Erddruckmomente gefunden.

Die Erdgewichtsmomente sind rechnerisch ermittelt. Es wurde zuerst das statische Moment des Gewichtes des ganzen in Abb. 13 schraffiert gezeichneten Teiles ermittelt. Das Gewicht eines Elementes beträgt

$$dG = \frac{1}{2} \gamma r^2 d\varphi.$$

Der Hebelarm dieses Gewichtes um den Pol 0 beträgt

$$s = \frac{2}{3} r \cdot \sin \varphi.$$

Es ist also

$$dM = s \cdot dG = \frac{1}{3} \gamma r^3 \cdot \sin \varphi d\varphi.$$

Die Gleichung der Spirale lautet:

$$r = r_0 e^{-\varphi \cdot \operatorname{tg} \rho}.$$

Somit ist

$$M = \frac{1}{3} \gamma r_0^3 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{-3\varphi \cdot \operatorname{tg} \rho} \cdot \sin \varphi d\varphi.$$

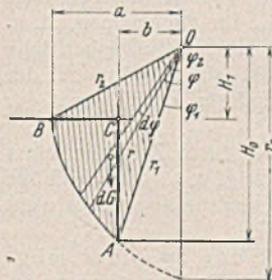


Abb. 13.

Die Integration ergibt:

$$M = \frac{\gamma}{3(1+9 \cdot \operatorname{tg}^2 \rho)} [r_1^2 (H_0 + 3b \cdot \operatorname{tg} \rho) - r_2^2 (H_1 + 3a \cdot \operatorname{tg} \rho)].$$

Von diesem Wert müssen noch die Gewichtsmomente der beiden Dreiecke OBC und OCA abgezogen werden, so daß man endgültig erhält

$$(7) \quad M_0 = \frac{\gamma}{3(1+9 \cdot \operatorname{tg}^2 \rho)} [r_1^2 (H_0 + 3b \cdot \operatorname{tg} \rho) - r_2^2 (H_1 + 3a \cdot \operatorname{tg} \rho) - \frac{H_1}{6} (a^2 - b^2) - \frac{b^2}{3} (H_0 - H_1)].$$

In dieser Gleichung sind H_0 , H_1 , b , r_1 und φ_1 von vornherein gegebene bzw. unmittelbar zu errechnende Größen. Den Wert r_2 kann

man entweder durch Anlegen der Spirallehre zeichnerisch ermitteln, oder wenn dies bei größeren Werten von H_1 zu Ungenauigkeiten führen sollte, kann man r_2 auch auf dem Umwege über r_0 aus der Gleichung $H_1 = r_0 e^{-\varphi_2 \cdot \lg \rho} \cdot \cos \varphi_2$ durch versuchsweise Lösung finden. Mit r_2 ist auch φ_2 und a bekannt, so daß M_0 aus Gl. (7) errechnet werden kann.

Für den Punkt 1 in Abb. 12 ergibt sich z. B. M_0 zu $M_0 = 0,185 \gamma H^3$.

Trägt man die Werte M_0 , wie dies in Abb. 12 durchgeführt ist, zu den zugehörigen Polen als Abszissen auf, dann erhält man die Kurve L der Abb. 12, aus der man unmittelbar entnehmen kann, daß $\max M_0$ zum Punkt 0 auf der Geraden P gehört und $\max M_0 = 0,200 \gamma H^3$ wird.

Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn die Gerade P unter dem Fußpunkt der Stützwand angenommen wird. In Abb. 14 liegt die Gerade P um $0,8 H$ unter dem Stützwandfuß. Es ergibt sich der maßgebende Pol im Abstand $0,89 H$ von der Stützwand und es wird das Erddruckmoment $M_0 = 0,172 \gamma H^3$.

Sucht man für eine größere Anzahl von Geraden P , die alle zur gegebenen Erddruckrichtung gleichgerichtet sein müssen, die maßgebenden Pole, dann erhält man die Polkurve. In Abb. 15 ist diese Polkurve, die aus zwei Ästen mit einer gemeinsamen Asymptote besteht, eingezeichnet, soweit sie sich zeichnerisch ermitteln ließ. Die Richtung der Asymptote der Polkurve können wir auf jeden Fall angeben, denn die Asymptote fällt mit der Richtungslinie der inneren Kraft Q (Abb. 3) in der Coulombschen Gleitfläche zusammen. Für eine eben werdende Gleitfläche rückt nämlich der Pol ins Unendliche, und die innere Kraft Q in der Gleitfläche führt immer durch den Pol hindurch.

Außer der Polkurve sind in Abb. 15 noch die Polmomente, d. h. die Erddruckmomente um ihre zugehörigen Pole, eingezeichnet. Zum Pol 0 in Abb. 15 gehört z. B. das Polmoment $M_0 = \overline{AB}$.

Auch die Polmomentenkurve besteht aus zwei Ästen mit einer gemeinsamen Asymptote. Diese Asymptote, als Momentenlinie aufgefaßt, ergibt zu jedem Pol das statische Moment der Coulombschen Erddruckkraft.

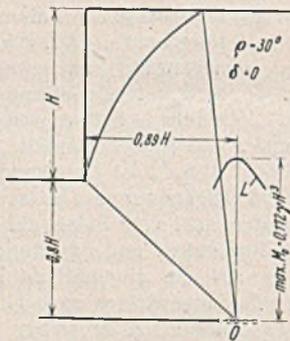


Abb. 14.

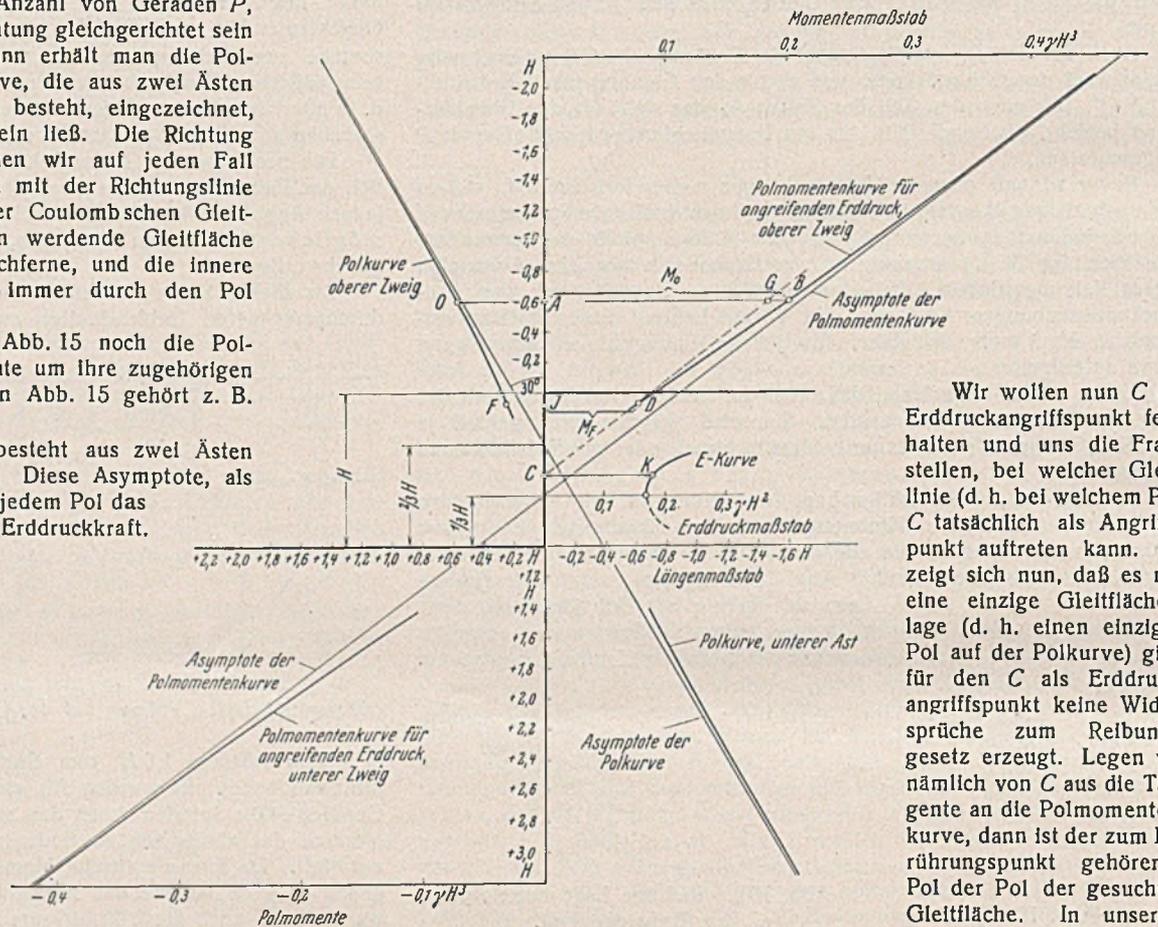


Abb. 15. Polkurve und Polmomentenkurve für den angreifenden Erddruck.

Die Asymptote schneidet also die Stützwand im Angriffspunkt der Coulombschen Erddruckkraft. In dem von uns behandelten Fall liegt dieser Angriffspunkt in $H/3$ über Stützwandfuß. Im allgemeinen, d. h. wenn der Erddruck nicht gleichgerichtet zur Hinterfüllungsoberfläche ist, wird sich jedoch ein anderer Angriffspunkt als Schnittpunkt der Asymptote mit der Stützwand, also auch ein anderer Angriffspunkt der Coulombschen Erddruckkraft ergeben.

Die Darstellung der Polmomente in Abb. 15 durch Zeichnen einer Polmomentenkurve ist sehr aufschlußreich. Sie zeigt u. a., daß die Größe der Erddruckkräfte und somit die Wahl des Erddruckangriffspunktes nicht willkürlich festgesetzt werden kann.

Das Prüfflächenverfahren gibt nicht nur zu einer möglichen Gleitfläche (Pol auf der Polkurve) das Erddruckmoment, bezogen auf den zugehörigen Pol, sondern es liefert auch die Größe des Erddruckes und seinen Angriffspunkt.

Um das zu beweisen, wollen wir vorübergehend annehmen, daß der willkürliche Punkt C auf der Stützwand der Angriffspunkt der Erddruckkraft wäre, wenn als Gleitfläche die Spirale mit F als Pol auftritt. Das Erddruckmoment um F , wenn F der Pol der Gleitfläche ist, kennen wir. Es ist in Abb. 15 durch die Strecke $JD = M_F$ dargestellt. Die Erddruckkraft müßte also, wenn C ihr Angriffspunkt ist, die Größe $E_C = \frac{M_F}{JC}$ haben. Die in Abb. 15 gestrichelte Verbindungslinie von C und D

kann als Momentenlinie der Erddruckkraft E_C angesehen werden. Das statische Moment der Erddruckkraft E_C auf den Pol F hat dann, wie es

ja sein muß, die Größe \overline{JD} , während das Moment derselben Kraft E_C auf den Pol 0 die Größe \overline{AG} hat. Wir wollen nun die logarithmische Spirale mit dem Pol 0 als Prüffläche benutzen und sehen, ob unsere Annahme, C wäre der Angriffspunkt der Erddruckkraft, wenn F der Pol der Gleitfläche ist, in dieser Prüffläche keine Widersprüche zum Reibungsgesetz erzeugt.

Nach Satz B₁ ist das Moment $M_0 = \overline{AB}$ das kleinste Erddruckmoment, das um den Pol 0 überhaupt auftreten kann. Jede Annahme über Größe und Angriffspunkt einer Erddruckkraft, die in 0 ein kleineres Erddruckmoment erzeugt, ergibt in der Prüffläche mit 0 als Pol Verhältnisse, die zum erweiterten Reibungsgesetz in Widerspruch stehen.

Unsere Annahme, C sei der Erddruckangriffspunkt, wenn F der Pol der Gleitfläche ist, würde aber ein Erddruckmoment um den Pol 0 der Prüffläche von der Größe $\overline{AG} < \overline{AB}$ erzeugen. Diese Annahme steht also im Widerspruch zum Reibungsgesetz und kann somit nicht aufrechterhalten werden.

Wir wollen nun C als Erddruckangriffspunkt festhalten und uns die Frage stellen, bei welcher Gleitlinie (d. h. bei welchem Pol) C tatsächlich als Angriffspunkt auftreten kann. Es zeigt sich nun, daß es nur eine einzige Gleitflächenlage (d. h. einen einzigen Pol auf der Polkurve) gibt, für den C als Erddruckangriffspunkt keine Widersprüche zum Reibungsgesetz erzeugt. Legen wir nämlich von C aus die Tangente an die Polmomentenkurve, dann ist der zum Berührungspunkt gehörende Pol der Pol der gesuchten Gleitfläche. In unserem besonderen Fall ist B der Berührungspunkt der von

C an die Polmomentenkurve gelegten Tangente, und 0 ist der Pol der Gleitflächen durch den Stützwandfuß, bei deren Auftreten die Erddruckkraft in C angreifen muß.

In Abb. 16 ist die Polmomentenkurve zur Verdeutlichung übertrieben gekrümmt gezeichnet. In C als Angriffspunkt wählen wir zunächst die Größe des Erddruckes $E_C = E_1$. Die Gerade M_1 mit der Gleichung $M = E_1 x$ gibt für jeden Abstand x vom Angriffspunkt die Größe des Erddruckmoments.

Wir erkennen deutlich, daß im Bereich zwischen A und B bei $E_C = E_1$ auf die entsprechenden Prüfflächenpole Erddruckmomente entstehen, die kleiner sind als die zugehörigen Polmomente, daß also in C als Angriffspunkt $E_C = E_1$ als Erddruckgröße nicht auftreten kann. Unsere zweite Wahl von E_C , nämlich $E_C = E_2 > E_1$, treffen wir so, daß die Gerade mit der Gleichung $M = E_2 x$ die Polmomentenkurve berührt (Berührungspunkt D). Mit dieser Wahl von E_C ist in $x = x_1$ das Moment der Erddruckkraft genau so groß wie das Polmoment, in allen anderen Punkten $x \neq x_1$

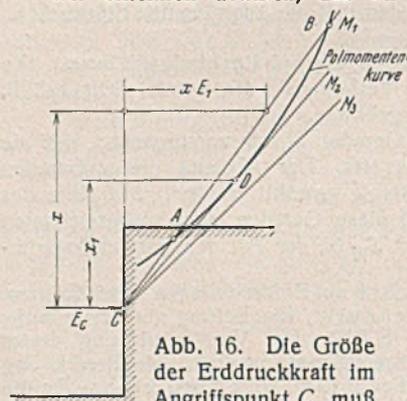


Abb. 16. Die Größe der Erddruckkraft im Angriffspunkt C muß so gewählt werden, daß kein Widerspruch zum Reibungsgesetz entsteht.

Ist das Moment von $E_C = E_2$ größer als das zugehörige Polmoment. Es treten somit in keiner Prüffläche Widersprüche zum Reibungsgesetz auf. Würden wir noch einen dritten Versuch mit $E_C = E_3 > E_2$ machen, dann erhielten wir überhaupt keinen Abstand x_1 , in dem das Moment der angenommenen Erddruckkraft ebenso groß ist wie das Polmoment. $E_3 > E_2$ kommt aus diesem Grund nicht in Frage.

Es ergibt sich somit der folgende

Satz C_1 : Bei festgelegtem Angriffspunkt der Erddruckkraft muß die Größe des Erddruckes den größten Wert annehmen, den sie in Hinblick auf die bekannten Kleinstmomente (Polmomente) überhaupt annehmen kann. Die Annahme, der Erddruck könnte kleiner sein als dieser größte Erddruck, führt immer in einzelnen Prüfflächen zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz.

Wollen wir umgekehrt Angriffspunkt und Größe des Erddruckes feststellen, die zu einer bestimmten möglichen Gleitfläche gehören (zu einem bestimmten Pol auf der Polkurve), dann müssen wir in dem zum Pol gehörigen Punkt der Polmomentenkurve die Tangente ziehen. Der Schnittpunkt dieser Tangente mit der Stützwand ist der Angriffspunkt der gesuchten Erddruckkraft. Da wir das Erddruckmoment auf den gewählten Pol kennen, und nach Auffinden des Angriffspunktes auch den Hebelarm des Erddruckmoments, können wir uns die Größe des Erddruckes ohne Schwierigkeit errechnen. Außerdem ist die Tangensfunktion des Winkels, den die Tangente an die Polmomentenkurve mit der Stütz-

Tafel 1. Angreifender Erddruck.

ξ	b	m	ξ	b	m
+ 0,1 H	0,225 H	0,071 γH^3	+ 1,6 H	- 0,77 H	- 0,136 γH^3
$\pm 0,0$	0,28	0,090	+ 1,8	- 0,88	- 0,172
- 0,2	0,37	0,130	+ 2,0	- 0,99	- 0,210
- 0,4	0,46	0,167	+ 2,2	- 1,09	- 0,247
- 0,6	0,56	0,204	+ 2,4	- 1,20	- 0,282
- 0,8	0,67	0,240	+ 2,6	- 1,31	- 0,317
- 1,0	0,78	0,275	+ 2,8	- 1,43	- 0,352
- 1,5	1,07	0,360	+ 3,0	- 1,55	- 0,385
- 2,0	1,35	0,442	+ 3,4	- 1,78	- 0,450

Tafel 2. Erdwiderstand.

ξ	b	m	ξ	b	m
+ 0,8 H	+ 1,6 H	0,083 γH^3	+ 1,0 H	- 2,114 H	- 0,815 γH^3
+ 0,6	+ 0,36	0,321	+ 1,2	- 2,410	- 1,065
+ 0,4	+ 0,6	0,581	+ 1,4	- 2,688	- 1,323
+ 0,2	+ 0,84	0,853	+ 1,6	- 2,952	- 1,588
$\pm 0,0$	+ 1,13	1,132	+ 1,8	- 3,230	- 1,862
- 0,2	+ 1,42	1,416	+ 2,0	- 3,510	- 2,142
- 0,4	+ 1,70	1,702	+ 2,2	- 3,780	- 2,430
- 0,6	+ 2,00	2,010	+ 2,4	- 4,060	- 2,710
- 0,8	+ 2,31	2,284	+ 2,5	- 4,210	- 2,853

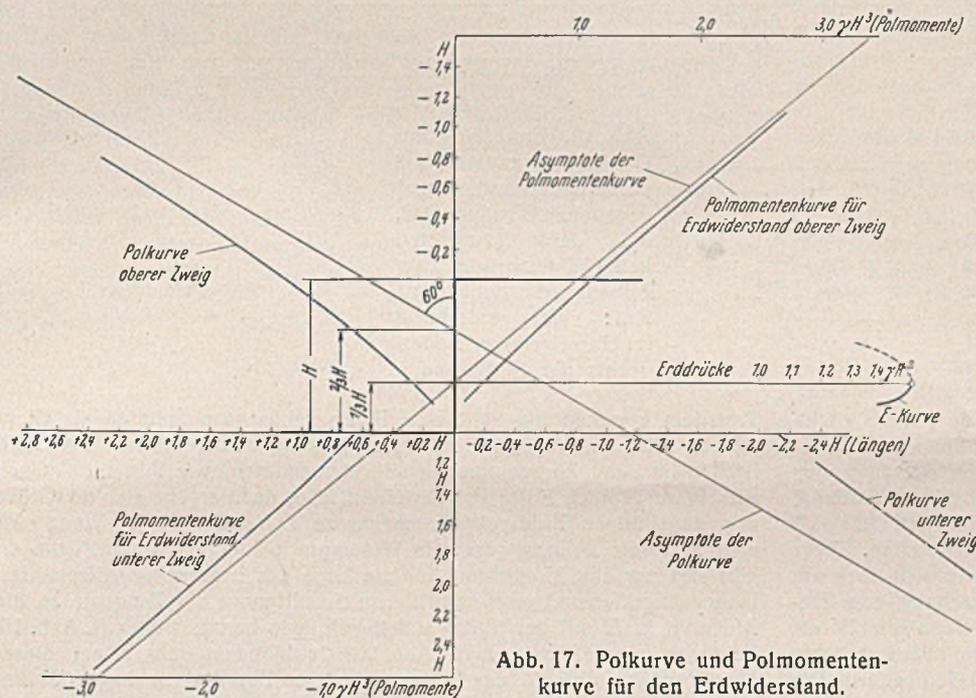


Abb. 17. Polkurve und Polmomentenkurve für den Erdwiderstand.

wand einschließt, der Größe des Erddruckes verhältnismäßig und kann somit auch zur Ermittlung der Erddruckgröße herangezogen werden.

In Abb. 15 sind zu mehreren Angriffspunkten auf der Stützwand durch Errichten der Tangenten an die Polmomentenkurve die zugehörigen Größen des Erddruckes ermittelt worden und vom Angriffspunkt aus in einem gewählten Maßstab senkrecht zur Stützwand aufgetragen. Die Endpunkte dieser Erddruckstrecken bilden die Erddruckkurve (E-Kurve). Zum Angriffspunkt C auf der Stützwand gehört also z. B. der Erddruck $E_C = CK = 1,79 \gamma H^2$, während er in $H/3$ vom Fußpunkt entfernt die Größe $E = 1,67 \gamma H^2$ hat, d. h. also den Wert der Coulombschen Lehre ergibt.

Für den Erdwiderstand gilt an Stelle des Satzes C_1 der folgende

Satz C_2 : Bei festgelegtem Angriffspunkt des Erdwiderstandes muß seine Größe den kleinsten Wert annehmen, den sie in Hinblick auf die zeichnerisch zu ermittelnden und somit bekannten Größtmomente (Polmomente) überhaupt erreichen kann. Die Annahme, der Erdwiderstand könnte größer sein als dieser zum Angriffspunkt gehörende kleinste Erdwiderstand, führt immer in einzelnen Prüfflächen zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz.

Abb. 17 enthält die Ergebnisse der Erddruckuntersuchung für den Erdwiderstand. Auch hier wird der Erddruckangriffspunkt für einen bestimmten Pol auf der Polkurve gefunden, indem man an den zum Pol gehörigen Punkt der Polmomentenkurve die Tangente zieht und mit der Stützwand zum Schnitt bringt. Der Schnittpunkt ist der Angriffspunkt der gesuchten Erddruckkraft, die Tangensfunktion des Winkels zwischen Tangente und Stützwand ist ein Maß für die Größe des Erddruckes.

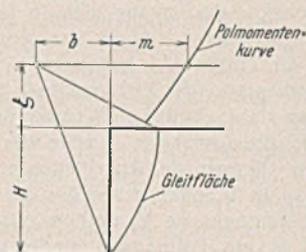


Abb. 18. Zeichenerklärung zu den Tafeln 1 und 2.

In den beiden Tafeln sind die Ergebnisse der Untersuchung, nämlich die Lage der Polkurve und die Größe der zugehörigen Polmomente, wie sie zeichnerisch bereits in den beiden dargestellt sind, nochmals übersichtlich zusammengestellt. Die Bedeutung der Werte ξ , b und m ist Abb. 18 zu entnehmen.

b) Gleitflächen zweiter Art. Wir haben bisher nur Gleitlinien und Gleitflächen untersucht, die vom Fuß der Stützwand ausgehend nach der Oberfläche des Hinterfüllungsbodens führen (Gleitlinien erster Art). Dabei haben wir eine einfach unendliche Anzahl von logarithmischen Spiralen festgestellt, von denen wir wissen, daß bei ihrem Auftreten als Gleitflächen keine Widersprüche zum Reibungsgesetz entstehen, wenn der Erddruckangriffspunkt sich an der Stelle befindet, die wir im vorigen Abschnitt als einzig möglich erkannt haben.

Wir wollen nun auch die Möglichkeit ins Auge fassen, daß die Gleitfläche vom Fuß der Stützwand ausgehend zu einem Punkt der Stützwand zurückführt, also etwa wie in Abb. 19a von A nach B. Was oberhalb von B geschieht, darüber wollen wir uns zunächst noch keine Gedanken machen. Als Gleitlinien wollen wir auch hier nur logarithmische Spiralen in Erwägung ziehen, da wir andernfalls auf die Vorteile, die uns das Prüfflächenverfahren bietet, verzichten müßten. Wir wählen also einen beliebigen Punkt B auf der Stützwand und halten damit die Höhe h des unteren Teilstückes unveränderlich. Der geometrische Ort aller Pole von logarithmischen Spiralen, die durch A und B hindurchführen, ist die gekrümmte Linie P in Abb. 19b (In Abb. 19b ist nur ein kleiner Teil der Stützwand in der Umgebung von B dargestellt). Nehmen wir an, C wäre der Pol der Gleitkurve, dann muß die innere Kraft Q, die in der Spirale übertragen wird, durch C hindurchführen, und es muß aus Gleichgewichtsgründen das statische Moment des Bodengewichtes G um C ebenso groß werden wie das statische Moment der Teilerddruckkraft E_1 , die an den Stützwandteil AB angreift, um denselben Momentenpunkt C. In der Abb. 19b ist die Größe dieses Erddruckmoments um den Pol C durch die Strecke DE dargestellt. Die Kurve M gibt also für jeden Pol die Größe des Erddruckmoments an, wenn wir diesen Pol als Pol der Gleitfläche auffassen. Ist jedoch die Fläche, die zum Pol C gehört, nicht die Gleitfläche, sondern eine Prüffläche, dann führt die Kraft Q in Abb. 19b links von C vorbei und die Momentensumme um den Punkt C lautet (s. Abb. 19):

$$-M_E = M_G + M_Q.$$

Für C als Pol einer Prüffläche kann das Erddruckmoment also nur größer sein als DE in Abb. 19b. Würden wir für irgendeine Gleitfläche einen

Erddruck E_2 für die Teilstrecke erhalten, dessen Moment um C kleiner ist als DE , dann würden in der Prüffläche mit dem Pol C die Spannungen gegen das Flächenlot um mehr als den Reibungswinkel geneigt sein. Da dieser Zustand im Sandboden dem Reibungsgesetz widerspricht und daher niemals auftreten kann, ist die Annahme, E_2 wäre der Erddruck, nicht aufrechtzuerhalten.

So kann z. B. die Spirale, die zum Pol F gehört, niemals als Gleitfläche in Frage kommen, da das zugehörige Erddruckmoment KH kleiner ist als das Erddruckmoment KJ , das zum Pol L gehört. Die Annahme, F wäre der Pol der Gleitfläche, würde in der Prüffläche mit dem Pol L zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz führen und kann demnach nicht aufrechterhalten werden.

Aber auch L kommt als Pol einer Gleitfläche nicht in Frage. Zum Pol L gehört das Polmoment KJ . Wir ziehen in J die Tangente an die Polmomentenkurve, bringen sie mit der Stützwand zum Schnitt und nehmen an, dieser Schnittpunkt O wäre der Angriffspunkt der Erddruckkraft, wenn L der Pol der Gleitfläche ist. In diesem Falle würde das Moment der Erddruckkraft um den Pol U die Größe ST annehmen, d. h. also kleiner werden als SN , das zu U gehörende Polmoment. In der Prüffläche mit Pol U ergäben sich somit Widersprüche bei der Annahme, L wäre der Pol der Gleitfläche und O der Angriffspunkt der Teilerddruckkraft.

Liegt der Angriffspunkt der Erddruckkraft aber tiefer als O (bei L als Gleitfläche), dann ergäbe sich in U ein noch kleineres Moment als zuvor, da ja das Moment um L auf jeden Fall die Größe KJ haben soll. Die Annahme, daß der Angriffspunkt der Erddruckkraft tiefer liegt als O , führt, wie man sieht, ebenso zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz wie die Annahme, O wäre der Angriffspunkt: Nimmt man aber an, der Angriffspunkt läge höher als in O , also etwa in V , dann schneidet die Verbindungslinie VJ die Momentenkurve M , und es läßt sich immer zwischen J und R ein Polmoment finden, das größer ist als das dabei entstehende Erddruckmoment.

Die Annahme, L könnte der Pol der Gleitfläche sein, führt also auf jeden Fall, wo wir auch den Angriffspunkt der Erddruckkraft voraussetzen, zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz und kann nicht aufrechterhalten werden.

Es ergibt sich, daß überhaupt nur der Punkt W als die tiefstmögliche Lage des Pols als Gleitfläche angenommen werden kann, ohne daß Widersprüche zum Reibungsgesetz auftreten. Streng gilt dies allerdings nur dann, wenn die Momentenlinie M (Abb. 19b) in ihrem tiefsten Punkt R in einer Spitze ausläuft. Ob dies nun tatsächlich der Fall ist, läßt sich aus dem zeichnerischen Verfahren nicht mit Sicherheit feststellen. Aber selbst wenn keine Spitze in R auftreten sollte, handelt es sich doch um eine sehr schmale Schleife. Für die praktische Untersuchung von Erddruckgröße und Angriffspunkt spielt es keine Rolle, wenn wir W als einzig möglichen Gleitflächenpol ansehen, obwohl es dann in der nächsten Umgebung von W noch einige widerspruchsfreie Pollagen gäbe. Die Größe des Erddruckmoments bleibt praktisch unverändert.

Wenn also eine Gleitfläche nach Art der Abb. 19 auftritt und durch diese Gleitfläche ein Gebiet von der Höhe $h = aH$ aus der Stützwand herausgeschnitten wird, dann kann diese Gleitfläche nur auf eine einzige Art durch eine logarithmische Spirale angenähert dargestellt werden.

In dem hier behandelten Fall liegt der Pol dieser Spirale in der Höhe $0,826 h = 0,826 aH$ über Stützwandfuß und um den Betrag $0,145 h = 0,145 aH$ von der Stützwand entfernt auf der Luftseite der Stützwand. Der Teilerddruck, der im Bereich vom Stützwandfuß bis $h = aH$ über Stützwandfuß auftritt, muß dann auf den oben angegebenen Pol das Moment $0,0558 \gamma h^3 = 0,0558 \gamma a^3 H^3$ aufweisen.

Diese Angabe stimmt für den Fall der Stützwandbewegung, bei der die in Abb. 19a dargestellte Bodenkalotte nach unten abrutschen will (angreifender Erddruck).

Ist die Stützwandbewegung von der Art, daß diese Kalotte nach oben hochgedrückt wird, dann ergeben sich die Verhältnisse der Abb. 20b. Die Kurve P sowohl als auch die Momentenkurve sind zur P - und M -Kurve der Abb. 19b symmetrisch.

Für diesen Fall des Teilerdrückes gelten die Verhältnisse der Abb. 20a. Ist C der Pol der angenommenen Gleitfläche, dann muß die innere Kraft durch C verlaufen, und es muß aus Gleichgewichtsgründen das Moment G um C ebenso groß sein wie das Erdwiderstandsmoment um C . Ist dagegen C der Pol einer Prüffläche, dann muß Q oberhalb von C vorbeiführen, und es wird

$$-M_E = M_G - M_Q,$$

also kleiner als das zugehörige Polmoment M_G . Die Annahme, es könnte irgendeine Mittelkraft des Erdwiderstandes für den Abschnitt AB

einen größeren Erdwiderstand um den Pol C erzeugen als das zu C gehörende Polmoment, führt immer in der zu C gehörenden Prüffläche zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz. Hier liegen also die Verhältnisse umgekehrt als im Fall des angreifenden Erddruckes, wo kein Erddruckmoment kleiner sein durfte als das zugehörige Polmoment.

Es zeigt sich nun auch hier, daß die einzige in Frage kommende Gleitfläche ihren Pol im höchsten Punkt W hat. Für alle anderen Annahmen von Gleitflächenpolen lassen sich Prüfflächen finden, in denen Widersprüche zum Reibungsgesetz auftreten, weil die dabei entstehenden Erddruckmomente um die Prüfflächenpole kleiner sind als die Polmomente.

Eine Ausnahme bilden nur die Pole zwischen W und F (Abb. 20b). Für diese Pole ergeben sich keine Widersprüche zum Reibungsgesetz.

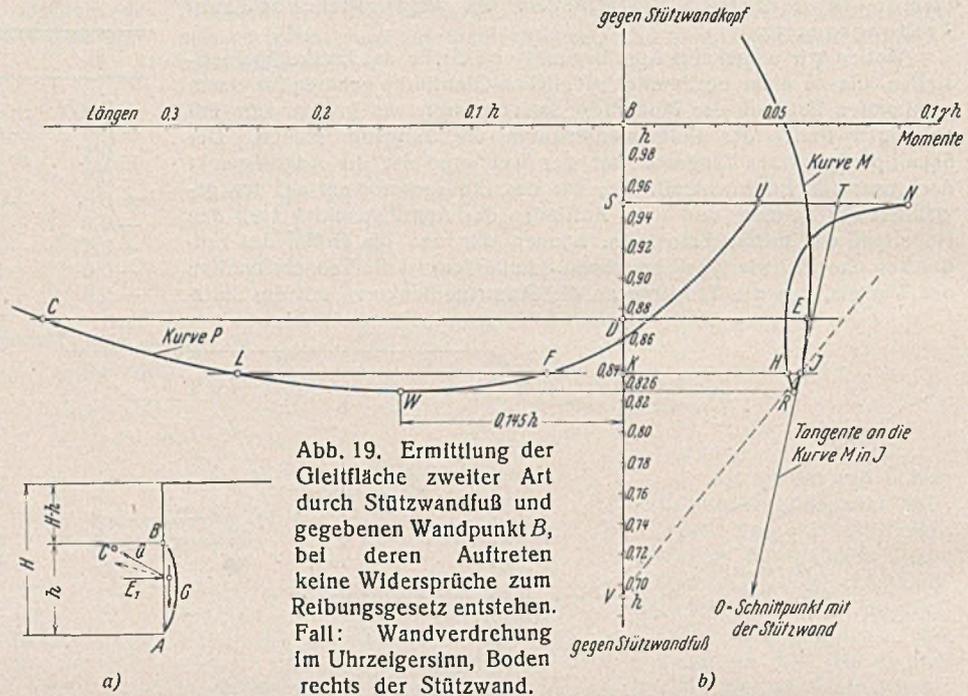


Abb. 19. Ermittlung der Gleitfläche zweiter Art durch Stützwandfuß und gegebenen Wandpunkt B , bei deren Auftreten keine Widersprüche zum Reibungsgesetz entstehen. Fall: Wandverdrehung im Uhrzeigersinn, Boden rechts der Stützwand.

Trotzdem kommen die zu diesen Polen gehörenden Spiralen als Gleitflächen nicht in Frage, da bei Voraussetzung dieser Flächen als Gleitflächen im Sand Zugspannungen auftreten müßten, wie leicht zu zeigen ist. Wäre nämlich F der Pol der Gleitfläche, dann ergäbe sich die Größe des zugehörigen Erddruckpolmoments zu DH (Abb. 20b). Wenn wir nicht mit dem Reibungsgesetz in Widerspruch kommen wollen, dann ergibt sich nur eine Möglichkeit für die Lage des Erddruckangriffspunktes. Dieser Angriffspunkt muß nämlich im Schnittpunkt der Tangente an die M -Kurve in H mit der Stützwand liegen, wie bereits früher (s. Abb. 16) bewiesen wurde. Wie man Abb. 20b entnehmen kann, liegt dieser Schnittpunkt unterhalb des Stützwandfußes. Damit diese Lage des Angriffspunktes tatsächlich auftreten kann, müßten zwischen Stützwand und Hinterfüllungsboden im oberen Teil von h Zugspannungen auftreten. Da dies einen Widerspruch zu einer der wichtigsten Eigenschaften des Sandes bedeuten würde, müssen wir die Pollagen zwischen W und F

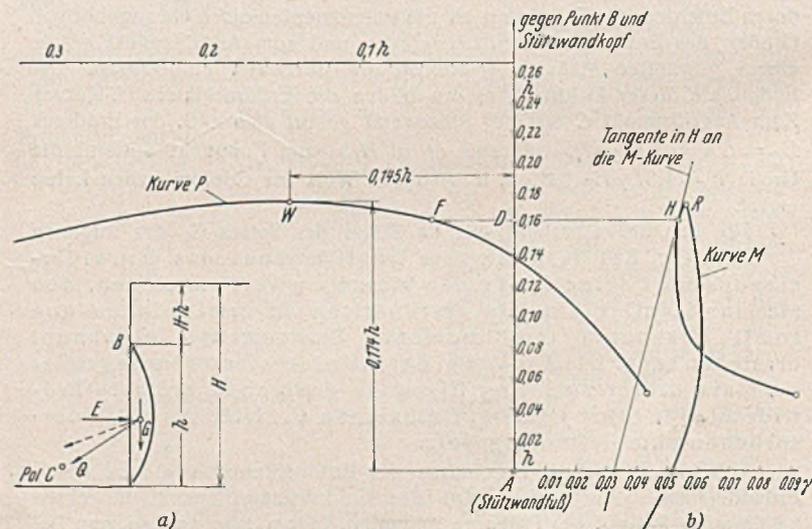


Abb. 20. Ermittlung der Gleitfläche zweiter Art durch Stützwandfuß und gegebenen Wandpunkt B , bei deren Auftreten keine Widersprüche zum Reibungsgesetz entstehen. Fall: Wandverdrehung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn, Boden rechts der Stützwand.

ebenfalls als Gleitflächenpole ausschalten. Es bleibt also nur die einzige Möglichkeit, daß W der Pol der Gleitfläche ist. Das zugehörige Polmoment hat die Größe $0,0558 \gamma h^3$.

Wir haben zwei grundsätzliche Eigenschaften des Sandes dazu benutzt, um die Auswahl der möglichen Gleitflächen durchzuführen bzw. um alle Spiralen durch den Stützwandfuß auszuschalten, die mit diesen Eigenschaften in Widerspruch stehen. Das war zunächst das Reibungsgesetz mit seiner positiven Aussage: Es gibt Flächen, in denen in jedem Flächenelement die Spannungsrichtung zum Flächenlot den Reibungswinkel einschließt, und mit seiner negativen Aussage: Es darf keine Flächen geben, in denen in irgendeinem Flächenelement die Spannungsrichtung zum Flächenlot einen größeren Winkel einschließt als den Reibungswinkel. Bei dem zuletzt behandelten Erddruckfall haben wir noch die weitere Eigenschaft dazu genommen, daß keine Zugspannungen auftreten können. Beide Eigenschaften des Sandes sind bezüglich ihrer Anwendung auf die Erddruckuntersuchung untereinander gleichwertig, so daß wir zweifellos berechtigt waren, auch das Unvermögen des Sandes, Zugspannungen aufzunehmen, zur Auswahl von zulässigen oder möglichen Gleitflächen zu benutzen.

c) Zusammengesetzte Gleitflächen. Die Gleitflächen zweiter Art, die wir unter b behandelt haben, treten nicht an der Oberfläche des Hinterfüllungsbodens aus, sondern führen zu einem Punkt der Stützwand zurück. Im allgemeinen wird von diesem Punkt ausgehend (Punkt B , Abb. 21 a) sich eine neue Gleitfläche ausbilden müssen. Wenn wir keine Voraussetzungen über die Art der Stützwandbewegungen treffen, dann müssen wir die Möglichkeit ins Auge fassen, daß sich jede Gleitfläche erster Art, die wir bisher als mögliche Gleitfläche gefunden haben, von Punkt B ausgehend ausbilden kann. Die weitere Möglichkeit, daß sich von B zunächst noch eine weitere Gleitfläche zweiter Art ausbildet und erst oberhalb dieser Gleitfläche eine Gleitfläche erster Art einstellt (Abb. 21 b.) besteht ebenfalls, ist aber für unsere Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung, so daß wir diese Gleitflächenausbildung nicht näher untersuchen wollen. Wenn wir von zusammengesetzten Gleitflächen sprechen, wollen wir, falls nicht ein besonderer Hinweis gemacht wird, Gleitflächen nach Art der Abb. 21 a verstehen, also eine Gleitfläche zweiter Art, an die sich oben eine Gleitfläche erster Art anschließt.

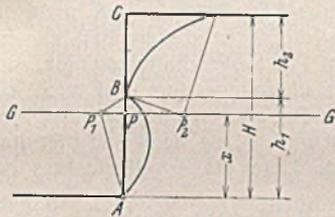


Abb. 21 a. Zusammengesetzte Gleitfläche, für die das Erddruckmoment um den Momentenpunkt P den absolut kleinsten Wert annimmt. (Positive Drehrichtung im Uhrzeigersinn.)

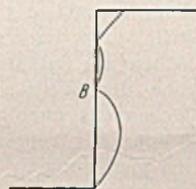


Abb. 21 b. Zusammengesetzte Gleitfläche, bestehend aus zwei Gleitflächen zweiter Art und einer Gleitfläche erster Art.

Wir haben bisher, als wir die Gleitflächen erster Art untersuchten, nur Spiralen erster Art als Prüfflächen benutzt zur Ausschaltung aller Spiralen, bei deren Auftreten als Gleitfläche Widersprüche zum Reibungsgesetz entstehen.

Bei der Untersuchung der Gleitflächen zweiter Art wurden auch nur Spiralen zweiter Art als Prüfflächen benutzt. Es besteht keine Möglichkeit, Spiralen zweiter Art als Prüfflächen für Gleitflächen erster Art heranzuziehen und umgekehrt, weil den Spiralen erster Art das Erddruckmoment der ganzen Stützwand als Polmoment zugeordnet ist, während bei den Spiralen zweiter Art sich nur Polmomente von Erddrücken über einen Stützwandteil ermitteln lassen.

Bei den zusammengesetzten Gleitflächen können wir nun wieder Polmomente der gesamten Erddruckkraft feststellen, und wir müssen untersuchen, ob wir nicht einen Teil der bisher als möglich betrachteten Gleitflächen erster Art ausschalten müssen, wenn wir zusammengesetzte Prüfflächen zur Untersuchung heranziehen.

Es ergibt sich nun tatsächlich, daß bei dem von uns behandelten Beispiel alle Gleitflächen erster Art mit untenliegendem Pol ausgeschaltet werden müssen, weil die Annahme, diese Spiralen könnten als Gleitflächen auftreten, in gewissen zusammengesetzten Prüfflächen zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz führen würde.

Den Beweis dafür, daß diese Gleitflächen ausgeschaltet werden müssen, d. h. also, daß überhaupt keine Spirale mit tiefliegenderem Pol als Gleitfläche auftreten kann, wollen wir mittelbar führen. Wir nehmen zunächst an, daß diese Spiralen mögliche Gleitflächen sind, und werden zeigen, daß diese Annahme zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz führt.

Wir wissen von früher, daß die Polmomente, d. h. also die Momente der Erddruckkräfte um die Pole der Gleitflächen erster Art im Falle des Erddruckes die absolut kleinsten, im Falle des Erdwiderstandes die absolut größten Momente sind, die das Moment einer Erddruckkraft auf den jeweiligen Pol überhaupt annehmen kann (siehe die Sätze B). Wir haben aber auch gesehen (s. Abb. 15 bzw. 17), daß wir im Fall des Erddruckes mit den Polen nicht tiefer kommen als ungefähr $0,174 H$ unter Stützwandkopf, im Falle des Erdwiderstandes $0,826 H$ unter Stützwandkopf. Unterhalb dieser Grenzlagen konnten wir bisher keine Kleinst- oder Größtmomente ermitteln. Erst noch tiefer fangen dann die Pole an, die auf dem unteren Zweig der Polkurve liegen. Wir wollen uns jetzt die Frage nach den Größtwerten der Momente auf Momentenpunkte stellen, die in diesem bis jetzt unbestimmten Gebiet liegen.

Der Punkt P in Abb. 21 a liegt beispielsweise in einer solchen Zwischenlage. Wir fragen uns, welchen Wert das kleinste Erddruckmoment mit Drehrichtung im Uhrzeigersinn um den Punkt P überhaupt annehmen kann.

Durch P legen wir eine Gerade gleichgerichtet zur gegebenen Erddruckrichtung und zeichnen die einzig mögliche Erddruckgleitfläche zweiter Art, deren Pol auf dieser Geraden liegt. Diese Gleitfläche geht durch den Stützwandfuß und führt in B wieder zur Stützwand zurück. Das Erddruckmoment der Tellerdruckkraft vom Stützwandfuß bis B beträgt, wie zuvor gezeigt wurde, $M_1 = + 0,0558 \gamma h_1^3$. Dieser Wert gibt nun den überhaupt kleinsten Wert an, den ein Erddruckmoment in der angegebenen Drehrichtung für das Teilstück AB der Wand auf den Pol P_1 und somit auch auf P annehmen kann. Wir hatten im vorigen Abschnitt gezeigt, daß die Annahme, es könnte ein Tellerdruckmoment für den Wandteil AB um P_1 einen kleinen Wert annehmen, notwendig zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz führt.

Wir sind nun auch in der Lage, für den restlichen Teil der Stützwand von B bis zur Oberfläche den unteren Grenzwert dieses Tellerdruckes anzugeben. Wir müssen durch B diejenige Gleitfläche erster Art des Erdwiderstandes legen, die ihren Pol ebenfalls auf der Geraden P hat. Die Gleitfläche ist durch diese Angabe eindeutig bestimmt, und das Polmoment um P_2 gibt den kleinsten Wert an, den das Moment eines Tellerdruckes auf BC überhaupt annehmen kann. Dieser kleinste Wert sei M_2 . Wir wissen dann, daß

$$\min M_P = M_1 - M_2$$

der untere Grenzwert ist, den ein Erddruckmoment, im Uhrzeigersinn drehend, um einen Punkt der Geraden G der Abb. 21 a überhaupt annehmen kann. Bestimmt man für mehrere solche Punkte P die Kleinstmomente, dann erhält man die Kleinstmomentenkurve $FHEG$, die in Abb. 22 dargestellt ist. Diese Kurve schließt oben in F an die Polmomentenkurve des Erddruckes für obenliegende Pole und unten in G an die Polmomentenkurve des Erdwiderstandes (untenliegende Pole) an. Damit haben wir eine Kleinstmomentenkurve gefunden, die von $+\infty$ bis $-\infty$ lückenlos die Kleinstmomente der gegebenen Momentendrehrichtung angibt, unter der Voraussetzung, daß die Gleitlinien mit tiefliegenden Polen als Gleitflächen auftreten können.

Wir ziehen nun an den Punkt A der Polmomentenkurve die Tangente. Der Schnittpunkt B dieser Tangente muß, wie früher gezeigt wurde, der Angriffspunkt der Erddruckkraft sein, wenn die zum Punkt A gehörende Gleitfläche auftritt. Das Moment dieser Erddruckkraft auf C hat dann die Größe CD . Wir haben aber zuvor gefunden, daß das kleinste Moment, das mit Rücksicht auf das Reibungsgesetz auftreten kann, den Wert CE hat, also größer ist als CD . (Wir befinden uns im negativen Teil der Kleinstmomentenkurve.)

Beim Auftreten der Gleitfläche, die zum Punkt A gehört, würden also in der zusammengesetzten Prüffläche, die zum Momentenpunkt E gehört, Spannungszustände entstehen, die dem Reibungsgesetz widersprechen. Die zu A gehörende Gleitfläche erster Art muß also aus dem Kreis der möglichen, d. h. also zum Reibungsgesetz nicht im Widerspruch stehenden Gleitflächen gestrichen werden.

Die Tangente an die Polmomentenkurve in K berührt die Kleinstmomentenkurve in H zum zweiten Male. Es ist leicht zu ersehen, daß dasselbe, was wir soeben für den Punkt A gezeigt haben, für alle Punkte gilt, die zwischen G und K liegen. Die zu diesen Punkten der Polmomentenkurve gehörenden Spiralen würden Spannungszustände erzeugen, die zum Reibungsgesetz im Widerspruch stehen und können somit als Gleitflächen nicht auftreten.

Mit dieser Feststellung ergibt sich aber auch, daß wir unsere Kleinstmomentenkurve zwischen G und F falsch gezeichnet haben, denn wir haben bei den zusammengesetzten Gleitflächen für die oberen Gleitflächen erster Art Gleitflächen benutzt, die jetzt nachträglich als zum Reibungsgesetz im Widerspruch stehend erkannt wurden. Wir müssen demnach das Stück GF der Kleinstmomentenkurve neu berechnen unter Ausschaltung der Gleitkurven erster Art, die zu dem Stück GK der Polmomentenkurve gehören.

Die neue Kleinstmomentenkurve hat den Verlauf FL (in Abb. 22 gestrichelt gezeichnet). Oberhalb von F geht diese Kleinstmomenten-

kurve in die Polmomentenkurve des Erddruckes über, unterhalb von L in die Gerade LK ; von K nach abwärts wäre dann wieder die Polmomentenkurve für den Erdwiderstand gültig.

Auch bei diesem neuen Verlauf der Kleinstmomentenkurve ergibt sich bei L dieselbe einspringende Ecke wie zuvor bei G . Wir können mit derselben Schlußfolgerung wie zuvor beweisen, daß ein weiterer Teil der Gleitflächen mit untenliegendem Pol ausgeschaltet werden muß, weil bei ihrem Auftreten als Gleitfläche Widersprüche zum Reibungsgesetz entstehen würden. Damit ist aber auch die neue Kleinstmomentenkurve FL nicht richtig, und wir müßten auch diesen Teil neu errechnen.

Man erhält so schrittweise immer mehr Gleitflächen mit untenliegendem Pol, die ausgeschaltet werden müssen, bis endlich in der Kleinstmomentenkurve in Höhe des Stützwandfußpunktes keine einspringende Ecke mehr auftritt wie in G und L . Erst dann haben wir den Zustand erreicht, bei dem keine der noch verwendeten Gleitflächen Widersprüche zum Reibungsgesetz erzeugt.

Diese Grenze können wir rechnerisch unmittelbar aus der Bedingung ermitteln, daß die Kleinstmomentenkurve in Höhe des Stützwandfußes stetig verläuft und keine Ecke aufweist.

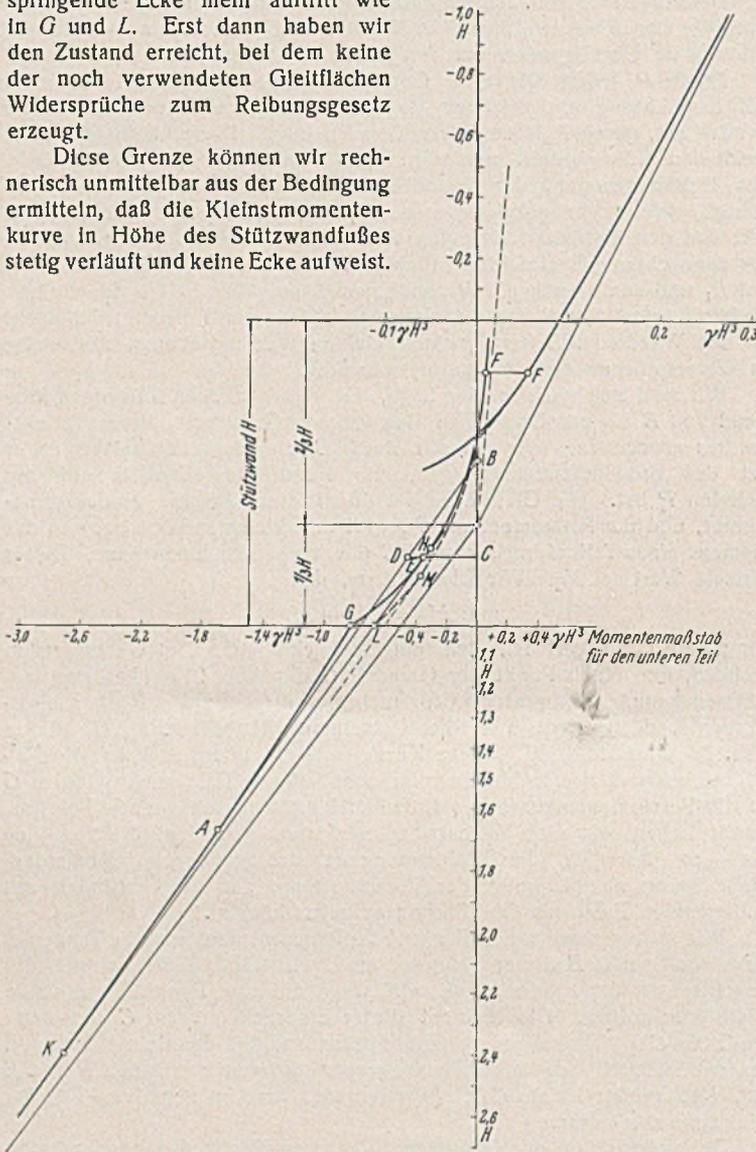


Abb. 22. Die Annahme, es könnten auch Gleitflächen erster Art mit Pollagen auftreten, die tiefer liegen als der Stützwandfuß, führt zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz.

Nehmen wir an, die erste Gleitfläche erster Art des Erdwiderstandes mit untenliegendem Pol, die wir nicht ausschalten müssen, erzeuge den Erddruck $E = \lambda \gamma H^2$ und sein Angriffspunkt liege in Höhe αH über Stützwandfuß. Die Gleichung der Kleinstmomentenkurve unterhalb des Stützwandfußes lautet dann:

$$M = -\lambda \gamma H^2 (\alpha H - x) \quad \text{für } x < 0;$$

x zähle vom Stützwandfuß nach oben positiv.

In $x = 0$ hat die Tangente an die Kleinstmomentenkurve die Richtung

$$\frac{dM}{dx} = +\lambda \gamma H^2.$$

Für Punkte mit positivem x hat die Kleinstmomentenkurve in der Umgebung von $x = 0$ unter den getroffenen Voraussetzungen die Gleichung (s. Abb. 21 a)

$$M = 0,0558 \gamma h_1^3 - \lambda \gamma h_2^2 (h_1 - x + \alpha h_2) \quad \text{für } x > 0.$$

Darin stellt der erste Teil das Erddruckmoment des Wandteiles AB (Abb. 21 a) dar, der zweite Teil das Erddruckmoment des Wandteiles BC auf dem Punkt P in Höhe x über Stützwandfuß. Nun ist

$$h_1 = \frac{1}{0,826} \cdot x = 1,211 x \quad h_2 = H - h_1 = H - 1,211 x,$$

also

$$M = 0,0558 \cdot 1,211^3 \gamma x^3 - \lambda \gamma (H - 1,211 x)^2 (1,211 x - x + \alpha H - 1,211 x \alpha),$$

und es ist

$$\frac{dM}{dx} = 3 \cdot 0,0558 \cdot 1,211^3 \gamma x^2 + 2 \lambda \gamma (H - 1,211 x) 1,211 (1,211 x - x + \alpha H - 1,211 x \alpha) - \lambda \gamma (H - 1,211 x)^2 (1,211 - 1 - 1,211 \alpha),$$

und für $x = 0$ ist

$$\frac{dM}{dx} \Big|_{x=0} = 2 \lambda \gamma \cdot 1,211 \alpha H^2 - \lambda \gamma H^2 (0,211 - 1,211 \alpha) = \lambda \gamma H^2 (3 \cdot 1,211 \alpha - 0,211).$$

Man erkennt, daß dann keine Ecke in $x = 0$ auftritt, wenn

$$\lambda \gamma H^2 = \lambda \gamma H^2 (3 \cdot 1,211 \alpha - 0,211)$$

oder

$$\alpha = \frac{1}{3} \text{ ist.}$$

Eine einspringende Ecke tritt dann auf, wenn

$$\lambda \gamma H^2 < \lambda \gamma H^2 (3 \cdot 1,211 \alpha - 0,211)$$

oder

$$\alpha > \frac{1}{3} \text{ ist.}$$

Alle Gleitflächen erster Art des Erdwiderstandes, die einen Kraftangriffspunkt zugeordnet haben, der höher liegt als im unteren Drittel der Stützwand, müssen, da bei ihrem Auftreten Widersprüche zum Reibungsgesetz entstünden, aus dem Kreis der möglichen Gleitflächen ausgeschlossen werden.

Eine ähnliche Betrachtung läßt sich auch für die Größtmomentenkurve durchführen.

Das Endergebnis, das wir dabei erhalten, lautet:

Alle Gleitflächen erster Art des angreifenden Erddruckes, denen ein Kraftangriffspunkt zugeordnet ist, der tiefer liegt als der untere Drittel der Wand, müssen wegen Widersprüchen zum Reibungsgesetz aus dem Kreis der möglichen Gleitflächen ausgeschlossen werden.

Für das von uns behandelte Beispiel der lotrechten reibungslosen Wand und der waagerechten Hinterfüllungsfläche bedeutet das, daß sämtliche Gleitflächen mit untenliegendem Pol, sowohl die des Erddruckes wie die des Erdwiderstandes ausgeschaltet werden müssen. Bei waagerechter Hinterfüllungsfläche und Wandreibungswinkel $\delta \neq 0$ fällt der Angriffspunkt der Coulombschen Erddruckkraft nicht in den unteren Drittel der Wand. Es müßte in diesem Fall nur ein Teil der Gleitflächen mit untenliegendem Pol ausgeschaltet werden, oder es müßte neben den Gleitflächen mit untenliegendem Pol auch ein Teil der Gleitflächen mit obenliegendem Pol ausgeschaltet werden, je nachdem $\delta > 0$ oder $\delta < 0$ vorausgesetzt wird. Maßgebend sind hier die zuvor aufgestellten Bedingungen über die Lage des Angriffspunktes bei den Gleitflächen erster Art.

Zusammenfassend können wir als Ergebnis der unter a, b und c durchgeführten Erddruckuntersuchung folgendes sagen:

Unter Berücksichtigung des vollständigen Reibungsgesetzes können wir mit Hilfe des Prüfflächenverfahrens für den Erddruck eine einfach unendliche Schar von Spiralen feststellen, die als Gleitflächen erster Art zugelassen werden dürfen. Die Pole dieser Gleitflächen liegen auf dem oberen und im allgemeinen auch auf dem unteren Zweig der Polkurve. Die zugehörigen Erddruckangriffspunkte liegen im unteren Drittel der Stützwand und über diesem Punkt.

Desgleichen läßt sich für den Erdwiderstand eine einfach unendliche Reihe von Spiralen finden, die als Gleitflächen erster Art zugelassen werden dürfen. Ihre Pole liegen auf dem oberen und im allgemeinen auch auf dem unteren Zweig der Polkurve. Die zugehörigen Erddruckangriffspunkte liegen im unteren Drittel der Stützwand und tiefer. Spiralen, die einen höheren Angriffspunkt ergeben würden, dürfen als Gleitflächen nicht zugelassen werden.

Weiter können zusammengesetzte Gleitflächen auftreten, die in einer vom Fuß der Stützwand ausgehenden Gleitfläche zweiter Art und einer daran anschließenden Gleitfläche erster Art bestehen. Über die oben anschließende Gleitfläche erster Art kann nichts anderes ausgesagt werden, als daß sie dem Kreis der möglichen und zulässigen Gleitflächen angehören muß.

Mehr läßt sich in der rein statisch durchgeführten Erddruckuntersuchung nicht feststellen. Die wichtigste Frage nach der Zuordnung aller in der Erddruckuntersuchung als möglich erkannten Gleitflächen zu den möglichen Bewegungs- und Verformungsarten einer Stützwand läßt sich auf rein statischem Weg nicht lösen. Dazu müssen wir auf den Zusammenhang eingehen, der zwischen Spannungszustand und Formänderungszustand besteht.

3. Erddruck und Wandbewegung.

In der Elastizitätslehre, bei der Berechnung von statisch unbestimmten Systemen und bei ähnlichen Aufgaben des technischen Wissenschaftsbereiches erscheint uns heute als notwendige Voraussetzung zur Durchführung einer Spannungsermittlung die Kenntnis der Abhängigkeit zwischen Spannungszustand und Formänderung.

Nur in der Erddrucklehre hat sich bis heute merkwürdigerweise noch vielfach die Anschauung erhalten, daß es möglich ist, den Erddruck und die Erddruckverteilung festzustellen, ohne auf den Zusammenhang zwischen Formänderung und Spannung einzugehen, ja selbst ohne auf die Bewegung der Stützwand bei der Erddruckermittlung Rücksicht nehmen zu müssen.

Diese Anschauung stammt wohl aus dem Vorstellungskreis der Coulombschen Erddrucklehre, denn mit ihrer Hilfe wird bekanntlich bei gegebener Stützwandlage und gegebener Bodenoberflächenbegrenzung eine einzig mögliche Gleitfläche und Erddruckgröße ermittelt. Das Coulombsche Verfahren bietet daher keine Möglichkeit zur Berücksichtigung von verschiedenen Stützwandverformungen und Stützwandverschiebungen, so daß sich die Ansicht eingebürgert hat, die Art der Stützwandbewegung sei ohne Einfluß auf Größe und Verteilung des Erddruckes.

Ein Verfahren zweiter Näherung, wie es hier entwickelt wird, zeigt nun, daß durchaus nicht nur eine Möglichkeit für die Ausbildung der Gleitfläche besteht, und daß auch die Größe und der Angriffspunkt des Erddruckes nicht von vornherein eindeutig festliegen, sondern innerhalb ziemlich weiter Grenzen schwanken.

Damit ergibt sich im Rahmen des Verfahrens zweiter Näherung nicht nur die Möglichkeit zur Berücksichtigung der Bewegungsart der Stützwand, sondern es besteht sogar die Notwendigkeit, auf die Art der Stützwandbewegung einzugehen. Andernfalls wäre man nämlich außerstande, festzustellen, welche der unendlich vielen Gleitflächen erster Art und der zusammengesetzten Gleitflächen mit ihren zugehörigen Erddruckgrößen und Angriffspunkten in einem gegebenen Erddruckfall tatsächlich auftritt.

Der Weg, wie die Art der Stützwandbewegung berücksichtigt werden kann, ist nach dem Zuvorgesagten ziemlich eindeutig festgelegt. Wir müssen auf den Zusammenhang eingehen, der zwischen Verformungen und Spannungen im Boden vorherrscht. Wir müssen also denselben Weg beschreiten, den die Elastizitätslehre schon vor mehr als hundert Jahren eingeschlagen hat und dessen Richtigkeit wir auf dem Gebiet der Festigkeitslehre heute als über jeden Zweifel erhaben ansehen.

Selbstverständlich dürfen wir nicht das Hookesche Gesetz, das auf dem Gebiet der elastischen Verformungen gültig ist, an Böden anwenden, die ausgesprochen plastische Eigenschaften haben.

Wir wissen sogar, daß bei Böden kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Formänderungen und Spannungen vorhanden ist, wie er bei den elastischen Körpern besteht. Zu ein und demselben Spannungszustand, der allerdings unbedingt ein Grenzspannungszustand sein muß, damit überhaupt Formänderungen auftreten können, gibt es unendlich viele Möglichkeiten der Formänderung. Alle diese Formänderungen, die im Zusammenhang mit einem gegebenen Grenzspannungszustand auftreten können, haben aber das eine gemeinsam, daß die Richtung der größten Zusammendrückung mit der Richtung der größten Hauptdruckspannung zusammenfällt. Diese Tatsache ist uns aus unzähligen Versuchen bekannt und kann als gesicherte Erkenntnis auf dem Gebiet der plastischen Formänderung angesehen werden. Sie stellt zugleich auch die gesuchte Gesetzmäßigkeit dar, die zwischen den Formänderungen und den Spannungen herrscht. Wir können also den folgenden Satz *D* aussprechen:

Satz D: Im plastischen⁹⁾ Boden (z. B. Sand) können nur dann bleibende Formänderungen auftreten, wenn der herrschende Spannungszustand ein Grenzspannungszustand ist. Die Hauptachsen des Formänderungszustandes fallen immer mit den Hauptachsen des Grenzspannungszustandes zusammen, und zwar so, daß sich die Richtung der größten Zusammendrückung mit der Richtung der größten Druckspannung deckt. Im übrigen ist die Größe der Formänderungen unabhängig von der Größe der Spannungen.

Unter Grenzspannungszustand verstehen wir einen Spannungszustand in einem Punkt, wenn es in diesem Punkt mindestens eine Ebenenrichtung und, wie die Theorie zeigt, genau zwei Ebenenrichtungen gibt, in denen der Grenzspannungszustand des Reibungsgesetzes erfüllt ist, d. h. die Spannung mit dem Flächenlot den Reibungswinkel einschließt. Es darf aber in diesem Punkt keine Ebenenrichtung geben, in der die Spannung zum Flächenlot einen größeren Winkel einschließt als den Reibungswinkel.

Das Gesetz D sagt alles aus, was wir unmittelbar in der Natur und durch Versuche über den Zusammenhang zwischen Formänderung und Spannung beim Sand beobachten können. Für die Anwendung auf die hier abzuleitende Erddruckrechnung ist dieses Gesetz, zumindest in der hier gebrachten Form, ungeeignet.

Wir wollen deshalb ein neues Gesetz aufstellen, das mehr aussagt als der Satz D, das aber allem Anschein nach zum Satz D nicht im Widerspruch steht.

⁹⁾ Die Bezeichnung plastisch bedeutet hier nicht dasselbe wie bindig, sondern ist als Gegensatz zu elastisch zu verstehen. Plastische Formänderungen sind bleibende Formänderungen.

Um die Zusammenhänge zu klären und die anzuwendenden Begriffe festzulegen, sei zunächst der in Abb. 23 dargestellte Wasserbehälter betrachtet. Die Wand *A* des Behälters sei so entworfen, daß sie beliebig verschoben werden kann. Verschieben wir sie z. B. in die Stellung *A'*, dann sinkt der Wasserspiegel des Behälters um die sehr kleine Größe ΔH . Die oben verlorengegangene Wassermenge füllt nach der Verschiebung den schraffiert gezeichneten Teil zwischen alter

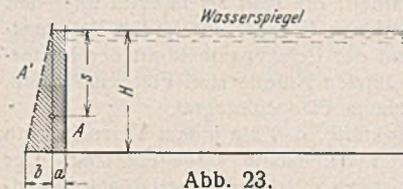


Abb. 23.

und neuer Wandlage aus. Die potentielle Energie des Wassers im Behälter hat sich dabei etwas verringert, und zwar um den Betrag

$$(8a) \quad \Delta P = \gamma a H \cdot \frac{H}{2} + \gamma b \cdot \frac{H}{2} \cdot \frac{2}{3} H = \gamma H^2 \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{3} \right).$$

Es hat sich die Wassermenge vom Gewicht $G = \gamma \cdot \frac{2a+b}{2} \cdot H$ (in der Zeichnung schraffiert dargestellt) um den Weg $s = H \cdot \frac{3a+2b}{3(2a+b)}$ gesenkt.

Andererseits wurde aber bei der Verschiebung der Wand von der Lage *A* nach *A'* Arbeit frei, und zwar hat der Wasserdruck $W = \frac{1}{2} \gamma H^2$ bei der Verschiebung um den Betrag $a + \frac{2}{3} b$ die Arbeit

$$(8b) \quad A_W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left(a + \frac{2}{3} b \right) = \gamma H^2 \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{3} \right)$$

geleistet. Wie man sieht, ist diese bei der Wandverschiebung geleistete Arbeit genau so groß wie der Verlust an potentieller Energie. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie ist somit erfüllt und läßt sich in diesem Fall in der Form

$$(9) \quad \Delta P = A_W$$

niederschreiben.

Füllen wir nun den Behälter (Abb. 23) statt mit Wasser mit trockenem Sand vom Reibungswinkel φ , dann zeigt es sich, daß zwar bei Vernachlässigung von Größen zweiter Kleinheitsordnung der Verlust ΔP an potentieller Energie durch dieselbe Gl. (8a) ausgedrückt werden kann⁹⁾, daß aber die an der Wand bei der Wandverschiebung frei werdende Wandarbeit kleiner ist als der durch Gl. (8b) gegebene Wert. Nehmen wir der Einfachheit halber an, die Größe des Erddruckes sei durch den Coulombschen Erddruckwert gegeben und sein Angriffspunkt liege im unteren Drittelpunkt, dann ist

$$A_W = \frac{1}{2} \cdot \gamma H^2 \cdot \text{tg}^2(45 - \varphi/2) \left(a + \frac{2}{3} b \right),$$

und es wird ΔP größer als A_W .

Ein Teil, nämlich der Betrag A_V des Verlustes an potentieller Energie, wird bei Böden mit innerer Reibung zur Überwindung der Reibungswiderstände aufgebraucht. Die Gesetzmäßigkeit von der Erhaltung der Energie lautet hier

$$(10) \quad \Delta P = A_V + A_W.$$

Der Betrag A_V ist im Boden bei der Überwindung der Reibungswiderstände in Wärme und elektrische Ladung umgewandelt worden, so daß die bei der Wandverschiebung zu gewinnende Arbeit kleiner wird,

⁹⁾ Dabei muß allerdings Raumbeständigkeit des Füllstoffes vorausgesetzt werden. Diese Raumbeständigkeit ist z. B. beim Sand im allgemeinen nicht vorhanden. Bei plastischen Formänderungen werden Auflockerungen oder Verdichtungen stattfinden. Um die Raumbeständigkeit trotzdem voraussetzen zu können, teilen wir die Wandbewegung in zwei Teile. Im ersten Teil finden noch zum Teil elastische Formänderungen statt und ebenfalls die erwähnten Änderungen in der Dichte des Bodens. Mit Beendigung des ersten Teiles der Wandbewegung hat sich der neue Gleichgewichtszustand im Sand eingestellt, und es finden auch keine weiteren Dichteänderungen mehr statt. Unsere Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf den zweiten Teil der Wandverschiebung, bei der die vorausgesetzte Raumbeständigkeit tatsächlich vorhanden ist.

Diese Überlegung steht in Übereinstimmung mit Ergebnissen von Versuchen. Die Stützwand muß immer erst einen gewissen Weg bei ihrer Verschiebung zurücklegen, bis sich ein unveränderlicher Erddruckwert einstellt. Im ersten Teil der Stützwandbewegung, in dem der Erddruck nach Größe und Angriffspunkt noch veränderlich ist, finden die erwähnten Dichteänderungen statt, und der Spannungszustand ist auch noch kein Grenzspannungszustand, sondern es finden elastische Formänderungen statt. Für diesen ersten Teil der Wandbewegung sind also die Voraussetzungen unserer Erddrucklehre noch nicht erfüllt. Terzaghi drückt die Größe der Übergangsbewegung der Stützwand, die erforderlich ist, um die Voraussetzungen der Erddrucklehre herzustellen, in Bruchteilen der Wandhöhe aus. Er erhält aus seinen Versuchen, daß bei dicht gelagertem Sand mindestens eine Verschiebung von $0,005 H$ erforderlich ist, um die Erddruckwerte der Theorie zu erhalten. Siehe v. Terzaghi: A fundamental fallacy in earth pressure computations. Publications from the graduate school of engineering, 1935—36, Nr. 182 (Harvard University).

als der Verlust an potentieller Energie beträgt. Den Energieanteil A_V bezeichnen wir deshalb als verlorene Arbeit.

Die verlorene Arbeit setzt sich aus drei Teilen zusammen: der Formänderungsarbeit, einer Rauminhaltsarbeit, die man als Integral über den ganzen von der Verschiebung betroffenen Körper erhält, der Reibungsarbeit längs der Hauptgleitfläche und der Reibungsarbeit an der Hinterfläche der Stützwand. Die beiden letzten Anteile sind Flächenarbeiten. Man erhält ihre Gesamtgröße aus einem Flächenintegral.

Es liegt im Wesen der Reibungskräfte, daß sie jedem Versuch, eine Formänderung zu erzwingen, inneren Widerstand entgegensetzen. Der Betrag A_V , die verlorene Arbeit, ist also bei jeder beliebigen Wandverschiebung zu leisten, und er ist immer positiv, d. h. er wirkt der erzwungenen Formänderung auf alle Fälle entgegen. Das Auftreten der verlorenen Arbeit bei allen erzwungenen Formänderungen von Böden mit innerer Reibung scheint die wesentlichste Ausdrucksform der physikalischen Eigenschaft „Reibung“ zu sein.

Wir wollen jetzt weitergehen und als Grundeigenschaft von Böden mit Reibung den folgenden Satz aussprechen:

Satz E: Bei einer erzwungenen Formänderung in einem plastischen Stoff, wie es z. B. der Sand ist, stellen sich Formänderungszustand und Grenzspannungszustand so ein, daß die verlorene Arbeit einen Größtwert annimmt.

Den Satz E, den wir nicht beweisen können, den wir aber zur Aufstellung unserer Erddrucklehre brauchen, können wir uns gefühlsmäßig sehr nahebringen. Er sagt nämlich nichts anderes aus, als daß der Widerstand gegen jede erzwungene Formänderung einen Größtwert annimmt. Es handelt sich also beim Satz E um eine Art Trägheitsgesetz. Der Stoff trachtet solange als möglich seine einmal eingenommene Gestalt beizubehalten. Der Widerstand gegen eine erzwungene Formänderung wächst mit den Kräften, die diese Formänderungen erzwingen wollen, an, und zwar so lange, bis dieser Widerstand den größten Wert erreicht hat, den er mit Rücksicht auf das Reibungsgesetz und die Gleichgewichtsbedingungen überhaupt annehmen kann. Beim Überschreiten dieser Grenze treten schließlich Formänderungen auf, aber zur Durchführung dieser Formänderungen muß ein Größtwert an Arbeit aufgewendet werden.

Entscheidend aber für die Zulässigkeit dieses neuen, wissenschaftlich nicht zu beweisenden Gesetzes scheint mir die Tatsache zu sein, daß die Anwendung des Satzes E auf unsere Erddrucklehre zu Ergebnissen führt, die mit den Versuchsergebnissen durchaus in Einklang stehen. Es ergibt sich die Lage des Erddruckangriffspunktes genau so, wie die Versuche Terzaghis es notwendig erscheinen lassen. Auch die Gleitflächenausbildung, die sich als Folge des Satzes E ergibt, steht mit dem, was man gefühlsmäßig erwarten muß, und auch mit versuchsmäßigen Feststellungen (s. Abb. 44) im Einklang. Überraschend sind nur die gefundenen Druckverteilungskurven. Über die Druckverteilung fehlen aber bis jetzt noch genügend genaue Meßergebnisse, so daß dieser Punkt nicht als Gegenbeweis benutzt werden kann.

Schließlich sei noch an einem einfachen Beispiel gezeigt, daß der Satz D, der die unmittelbar in der Natur zu beobachtenden Zusammenhänge zwischen Spannungszustand und Formänderungszustand ausdrückt, zumindest in dem hier gezeigten Beispiel erfüllt ist, wenn der Satz E erfüllt ist.

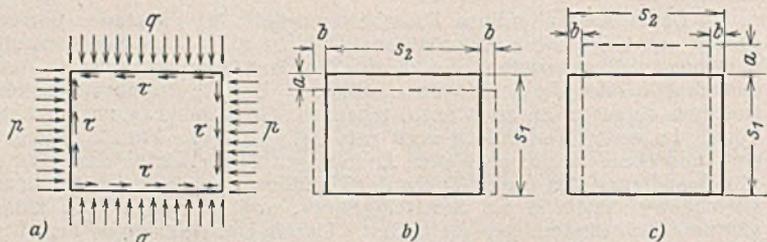


Abb. 24.

In Abb. 24a ist ein würfelförmiger Sandkörper dargestellt. An den vier lotrechten Begrenzungsflächen greife ein Druck p an. Außerdem seien noch die Schubspannungen τ von unbekannter Größe wirksam und der Normaldruck q ebenfalls von unbekannter Größe, auf den beiden waagerechten Flächen angreifend. Von dem in Abb. 24a dargestellten Spannungszustand ist also einzig der Druck p bekannt. An diesem Würfel wollen wir eine Formänderung nach Art der Abb. 24b erzwingen. Da wir den Sand als raumbeständig voraussetzen wollen und die Länge s_3 der dritten Würfelseite sich nicht ändern soll, ist

$$b = \frac{a}{2} \cdot \frac{s_2}{s_1}$$

Unsere Frage lautet: Wie sieht der vollständige Spannungszustand der Abb. 24a aus, wenn die Formänderung 24b eintreten soll, d. h. also, wie groß sind die beiden bisher unbekanntenen Spannungsgrößen q und τ ?

Um zu einer Lösung zu gelangen, setzen wir die Gültigkeit des Satzes E voraus:

Die bei der Formänderung Abb. 24b verlorene Arbeit soll ein Größtwert sein.

Wenn überhaupt die Formänderung 24b auftreten soll, muß der Spannungszustand 24a ein Grenzspannungszustand sein, d. h. zwischen den Spannungsgrößen p , q und τ muß die Beziehung

$$(11) \quad q = \frac{p}{\cos^2 \varphi} \left[1 + \sin^2 \varphi \pm 2 \sqrt{\sin^2 \varphi - \frac{\tau^2}{p^2} \cdot \cos^2 \varphi} \right]$$

bestehen, die man sich leicht aus der Mohrschen Spannungsdarstellung ableiten kann.

Die verlorene Arbeit hat die Größe

$$A_V = q s_2 s_3 a - 2 p s_1 s_3 b = q s_2 s_3 a - 2 p s_1 s_3 \cdot \frac{a}{2} \cdot \frac{s_2}{s_1}$$

$$A_V = a s_2 s_3 (q - p)$$

oder unter Berücksichtigung von Gl. (11)

$$(12) \quad A_V = a s_2 s_3 \left\{ \frac{p}{\cos^2 \varphi} \left[1 + \sin^2 \varphi \pm 2 \sqrt{\sin^2 \varphi - \frac{\tau^2}{p^2} \cdot \cos^2 \varphi} \right] - p \right\}$$

Aus Gl. (12) kann man unmittelbar ablesen, daß A_V ein Größtwert wird, wenn das obere Wurzelvorzeichen gilt und $\tau = 0$ wird. Für diesen Fall wird aus Gl. (11)

$$q = p \left(\frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} \right)^2 = p \cdot \operatorname{tg}^2 (45 + \varphi/2)$$

In Worten ausgedrückt lautet dieses Ergebnis:

Die Hauptachsen des Hauptspannungszustandes müssen mit den Hauptachsen des Formänderungszustandes übereinstimmen ($\tau = 0$), und die größere Hauptspannung tritt in Richtung der Zusammendrückung auf. Das ist also genau dasselbe, was der Satz D aussagt.

Würden wir eine Formänderung nach Art der Abb. 24c erzwingen wollen, dann würde der Ausdruck für die verlorene Arbeit beim Spannungszustand 24a lauten:

$$A_V = a s_2 s_3 (p - q)$$

$$= a s_2 s_3 \left\{ p - \frac{p}{\cos^2 \varphi} \left[1 + \sin^2 \varphi \pm 2 \sqrt{\sin^2 \varphi - \frac{\tau^2}{p^2} \cdot \cos^2 \varphi} \right] \right\}$$

A_V wird jetzt zu einem Größtwert beim unteren Wurzelvorzeichen und bei $\tau = 0$ wie zuvor. Für das untere Wurzelvorzeichen erhalten wir aus Gl. (11)

$$q = p \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right)^2 = p \cdot \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2)$$

Also auch in diesem Fall besteht Übereinstimmung mit Satz D. Hauptspannungs- und Hauptformänderungsachsen fallen zusammen, und die größere Hauptdruckspannung (in diesem Falle ist das p) fällt in Richtung der Zusammendrückung.

Die vollkommene Übereinstimmung der Sätze E und D bei diesem Beispiel darf aber nicht die Vorstellung erwecken, als wären die Aussagen von E und D tatsächlich gleichbedeutend, denn die Aussage des Satzes E erstreckt sich auch über die Reibungsarbeit längs der Hauptgleitebene und längs der Stützwandrückfläche. Der Satz E sagt also zweifellos mehr aus als der Satz D. Er steht aber, wie am letzten Beispiel gezeigt wurde, mit dem Satz D nicht in Widerspruch, und es erscheint mir durchaus möglich, daß sich der Satz D ganz allgemein aus dem Satz E als Teilfolgerung dieses Satzes ableiten läßt.

Und nun zur Anwendung des Satzes E auf unsere Erddrucklehre.

Wir beschränken uns auf Erddruckfälle, bei denen der Hinterfüllungsboden waagrecht verläuft. Der Verlust an potentieller Energie ΔP ist hier von der Art der Gleitflächenausbildung vollständig unabhängig. ΔP ist einzig und allein eine Abhängige der Wandbewegung, wie man aus Gl. (8a) und Abb. 23 erkennt. In Gl. (10), die man auch

$$A_W = \Delta P - A_V$$

anschreiben kann, ist ΔP bei gegebener Wandverschiebung als unveränderliche Größe zu betrachten.

Die Aufgabe, zu der gegebenen Wandverschiebung denjenigen Grenzspannungszustand zu finden, für den A_V ein Größtwert wird, ist hier gleichbedeutend mit der Aufgabe, A_W , die Wandarbeit, zu einem Kleinstwert zu machen.

In Abb. 25 ist die Erddruckverteilung längs der Stützwand dargestellt. Da wir die Stützwand als starr voraussetzen wollen, ist die Bewegung der Wand durch Angabe einer Drehachse und eines Verdrehungswinkels eindeutig festgelegt.

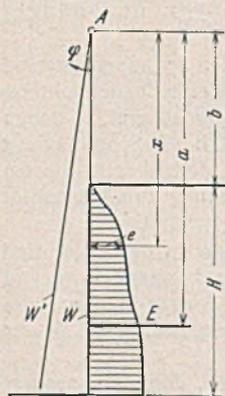


Abb. 25. Die frei werdende Wandarbeit ist dem statischen Moment der Erddruckkraft verhältnismäßig.

In Abb. 25 sei A die Drehachse, W die Wand vor und W' die Wand nach der Wandverschiebung. Der Verdrehungswinkel habe die Größe φ . Die Druckverteilung sei gegeben durch $e = f(x)$. Die Wandarbeit $A_{W'}$ hat dann den Wert

$$(13) \quad A_{W'} = \int_b^{b+H} e \varphi x dx = \varphi \int_b^{b+H} e x dx = \varphi E a.$$

Bis auf den Verdrehungswinkel φ , der als Verhältnisziffer auftritt, ist die Wandarbeit gleichwertig mit dem statischen Moment der Erddruckkraft auf die Drehachse. Da wir die Wandbewegung und somit auch den Winkel φ als gegebene, unveränderliche Größe betrachten, müssen wir die Auswahl des Grenzspannungszustandes zur gegebenen Wandbewegung so vornehmen, daß das statische Moment der Erddruckkraft auf die Drehachse einen Kleinstwert annimmt.

Als Anwendung des Satzes E auf den Fall „starre Stützwand und waagerechte Bodenunterfüllung“ erhält man somit den

Satz F_1 : Bei einer Stützwandverdrehung um die Drehachse A bildet sich aus der unendlichen Schar der im Abschnitt 2 gefundenen möglichen Gleitflächen diejenige aus, für die das Erddruckmoment um die Drehachse einen Kleinstwert annimmt. Dabei ist als positive Momentendrehrichtung die Verdrehungsrichtung der Stützwand um A vorausgesetzt.

Den Satz F_1 können wir, ohne seinen Sinn abzuändern, auch in der folgenden Form aussprechen:

Satz F_2 : Bei einer Stützwandverdrehung um die Drehachse A bildet sich diejenige der möglichen Gleitflächen aus, für die das Erddruckmoment um A einen Größtwert annimmt, wobei die positive Momentendrehrichtung entgegengesetzt drehend wie die Wandverdrehung angenommen ist.

Es steht uns frei, ob wir den Satz F in der Form F_1 oder in der Form F_2 verwenden. Da wir jedoch gewöhnt sind, Erddruckmomente immer als positiv anzusetzen, wird man mit Vorteil den Satz F_1 für Erddruck und den Satz F_2 für Erdwiderstand anwenden.

Wie bereits erwähnt, gelten die Sätze F streng nur für den Fall waagerechter Erdhinterfüllung. Sobald der Hinterfüllungsboden geböschet ist oder auch, wenn auf der waagerechten Hinterfüllung eine ungleichmäßige Auflast aufgebracht ist, dann ist der Verlust an potentieller Energie ΔP neben der Art der Wandbewegung noch von der Art der Gleitflächenbildung abhängig. Man kann das an Hand der Abb. 26 erkennen. In dieser Abbildung bedeutet G das Gewicht der Bodenmasse zwischen alter und neuer Stützwandlage, S sei der Schwerpunkt dieser Bodenmasse. Ist nun F_1 die Hauptgleitfläche, dann liegt der Schwerpunkt des an der Oberfläche abgesackten Bodens ungefähr in S_1 . Bei F_2 als Hauptgleitfläche liegt dieser Schwerpunkt annähernd in S_2 . Wir erhalten also, je nachdem wir F_1 oder F_2 als Hauptgleitfläche voraussetzen, für den Verlust an potentieller Energie die Werte $\Delta P_1 = G a_1$ $\Delta P_2 = G a_2$.

Der Wert ΔP darf nicht mehr bei gegebener Wandbewegung als unveränderliche Größe angesehen werden. Die Verhältnisse liegen hier ungefähr so wie in Abb. 27, einer zeichnerischen Darstellung der Gl. 10. Der Größtwert der verlorenen Arbeit tritt bei einer anderen Hauptgleitfläche auf als der Kleinstwert der frei werdenden Wandarbeit.

Wenn wir trotzdem die beiden Sätze F auch auf die Fälle geböschten Hinterfüllungsbodens anwenden wollen, dann beschreiten wir bewußt einen Näherungsweg. Der Fehler, den wir dabei begehen, wird um so größer, je steiler die Hinterfüllungsböschung ist und je ungleichmäßiger die Auflasten auf der Hinterfüllungsoberfläche verteilt sind.

Aus den Ableitungen des zweiten Abschnittes wissen wir, daß es auf irgendeinen Pol P_1 der Polkurve im Falle des angreifenden Erddruckes kein kleineres Erddruckmoment geben kann als das zu P_1 gehörende Polmoment. Die Annahme, es

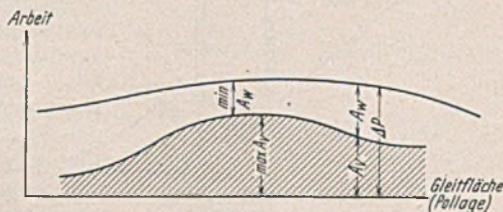


Abb. 27. Wenn der Verlust an potentieller Energie keine unveränderliche Größe ist, dann führen die Grundsätze vom Größtwert der verlorenen Arbeit und vom Kleinstwert der frei werdenden Wandarbeit zu verschiedenen Gleitflächen.

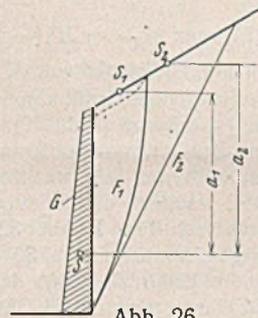


Abb. 26.

Bei geböschter Bodenunterfüllung ist der Verlust an potentieller Energie von der Art der Gleitflächenbildung abhängig.

könnte irgendeine andere Gleitfläche einen Erddruck erzeugen, dessen Moment auf P_1 kleiner ist als dieses zu P_1 gehörende Polmoment, führt, wie bereits gezeigt wurde, in der zu P_1 gehörenden Prüffläche zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz.

Unsere Aufgabe, zu einer gegebenen Drehachse A (Abb. 28) diejenige Gleitfläche zu finden, für die das Erddruckmoment auf A einen Kleinstwert annimmt, ist somit leicht zu lösen. Wir ziehen durch A eine Parallele zur gegebenen Erddruckrichtung und bringen sie mit der Polkurve des angreifenden Erddruckes zum Schnitt. Der Schnittpunkt P ist der Pol der gesuchten Gleitfläche. Das zu P gehörende Polmoment ist ebenso groß wie der Kleinstwert, den überhaupt ein Erddruckmoment um A annehmen kann. Angriffspunkt und Größe des Erddruckes, die bei A als Drehachse der Wand auftreten, sind gleichbedeutend mit der im Abschnitt 2 gefundenen zum Pol P gehörenden Erddruckgröße und ihrem Angriffspunkt.

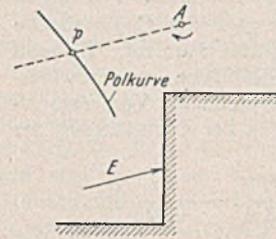


Abb. 28.

Für die umgekehrte Drehrichtung der Wand um A , also beim Erdwiderstand, müssen wir nach Satz F_2 diejenige Gleitfläche mit zugehöriger Erddruckkraft finden, für die das Erddruckmoment um A einen Größtwert annimmt. Nach den Untersuchungen unseres zweiten Abschnittes sind im Falle des Erdwiderstandes die Polmomente Größtwerte. Man findet also für den Erdwiderstand den zur Drehachse A gehörigen Pol P ebenso wie für den Erddruck, d. h. wie in Abb. 28 dargestellt. Als Polkurve müssen wir selbstverständlich die Polkurve des Erdwiderstandes (Abb. 17) nehmen.

Die Zuordnung zwischen Drehachsenlage und Gleitflächenpol ist also eindeutig, solange wir dabei auf Gleitflächen erster Art stoßen, d. h. auf Gleitflächen, die vom Fußpunkt der Wand ausgehend nach der Oberfläche des Hinterfüllungsbodens führen. Das ist immer der Fall bei rein angreifendem Erddruck und reinem Erdwiderstand, d. h. wenn die Drehachse tiefer als der Stützwandfuß oder höher als der Stützwandkopf liegt.

Die Begriffe „angreifender Erddruck“ und „Erdwiderstand“ bedürfen jetzt bei Berücksichtigung aller denkbaren Verschiebungsmöglichkeiten einer starren Stützwand einer neuen Bestimmung. Als Erddruckfall wollen wir einen solchen bezeichnen, bei dem längs der ganzen Stützwand Wandarbeit frei wird, d. h. also Erddruckrichtung und Verschiebungsrichtung jedes Wandpunktes gleichgerichtet sind. Dementsprechend liegt der Fall des Erdwiderstandes vor, wenn längs der ganzen Wand Arbeit zu leisten ist.

Außer diesen beiden Fällen müssen wir jetzt noch die gemischten Erddruckfälle einführen. Beim gemischten Erddruckfall wird an einem Teil der Stützwand Arbeit geleistet, an einem anderen Teil wird Arbeit frei. Gemischte Erddruckfälle entstehen dann, wenn die Drehachse zwischen Stützwandkopf und Stützwandfuß liegt. Je nachdem ob die frei werdende Arbeit an der Wand die zu leistende überwiegt oder umgekehrt, können wir auch von gemischten Fällen mit überwiegendem Erddruck oder mit überwiegendem Erdwiderstand sprechen.

Die gemischten Erddruckfälle müssen wir noch besonders untersuchen. Bei ihnen besteht die zuvor gezeigte eindeutige und einfache Zuordnung zwischen Drehachsenlage und Gleitflächenpol zunächst noch nicht wie bei den reinen Erddruck- und reinen Erdwiderstandsfällen.

In Abb. 29 sei A die Drehachse der Wandverdrehung. Die Drehrichtung verlaufe im Uhrzeigersinn. Es gibt keinen Pol zu Gleitflächen erster Art des Erddruckes, der in Höhe der Drehachse A liegt. Die tiefste Lage eines solchen Poles ist in Höhe $0,826 H$ über Stützwandfuß (bei dem behandelten Beispiel). Bei dieser tiefsten Lage der Gleitflächen erster Art geht die Hauptgleitfläche bereits durch den Punkt D . Die Höhe $0,826 H$ über Stützwandfuß ist also auch die tiefste Lage der Drehachse, bei der sich noch eine Hauptgleitfläche erster Art ausbildet. Bei der in Abb. 29 gezeichneten Lage der Drehachse wird sich also eine zusammengesetzte Gleitfläche ausbilden müssen. Die Höhe h_1 hat nach unseren Untersuchungen (Abb. 20) den Wert

$$h_1 = \frac{1}{0,826} \cdot h = \frac{a}{0,826} \cdot H.$$

Der Abstand b des Poles von der Stützwand beträgt

$$b = \frac{0,145}{0,826} \cdot h = \frac{0,145}{0,826} \cdot a H.$$

Das kleinste Moment (Drehrichtung im Uhrzeigersinn), das ein Erddruckmoment für den Erddruck des Teilabschnittes BC der Wand um

den Pol P und somit auch um die Drehachse A annehmen kann, hat den Wert¹⁰⁾

$$\min M_{BC} = 0,0558 h_1^3 = \frac{0,0558}{0,826^3} \cdot \gamma a^3 H^3 = 0,099 \gamma a^3 H^3.$$

Da oberhalb von C ebenfalls Formänderungen auftreten, muß sich in C eine neue Gleitfläche ausbilden. Nach Satz F_2 wird diese Gleitfläche sich so einstellen müssen, daß das statische Moment der dabei entstehenden Erddruckkraft E_{CD} einen Größtwert annimmt. Für einen Momentenpunkt, der unterhalb von C liegt, ergibt der Coulombsche Erdwiderstand (Pol im Unendlichen) das größte Moment. Es muß sich also von C ausgehend die Coulombsche Gleitfläche des Erdwiderstandes ausbilden. Das größte Moment entgegengesetzt der Verdrehungsrichtung der Wand bzw. das kleinste Moment in der Drehrichtung der Wandverdrehung um A hat den Wert

$$\begin{aligned} \max M_{CD} &= 1,5 \gamma H^2 \left(1 - \frac{a}{0,826}\right)^2 \left[h_1 - h + \frac{H}{3} \left(1 - \frac{a}{0,826}\right)\right] \\ &= 1,5 \gamma H^3 \left(1 - \frac{a}{0,826}\right)^2 \left(\frac{1}{3} - 0,1929 a\right). \end{aligned}$$

Das kleinstmögliche Erddruckmoment um die Drehachse A ergibt sich somit zu

$$\min M_{BD} = 0,09901 \gamma a^3 H^3 - 1,5 \gamma H^3 \left(1 - \frac{a}{0,826}\right)^2 \left(\frac{1}{3} - 0,1929 a\right)$$

$$(14) \quad \min M_{BD} = \gamma H^3 (0,5231 a^3 - 1,4334 a^2 + 1,500 a - 0,5).$$

In Gl. (14) wird $\min M_{BD} = 0$ für $a = 0,61$.

Mit Hilfe der Gl. (14) und der bereits früher gefundenen Polmomente können wir für den Fall Boden rechts der Stützwand, Drehrichtung der Wand im Sinne des Uhrzeigers, oder Boden links der Wand, Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn die Kleinstmomentenkurve auftragen (Abb. 30).

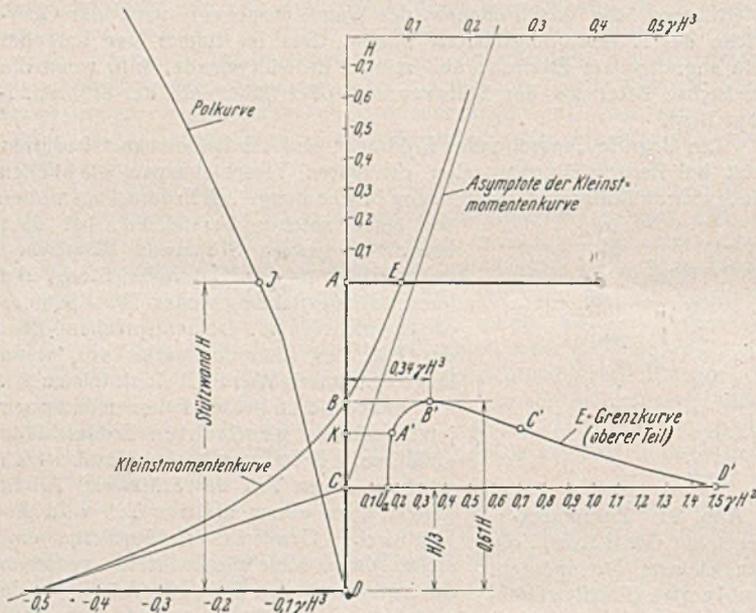


Abb. 30. Ermittlung

des oberen Teiles der E -Grenzkurve aus der Kleinstmomentenlinie. Dieser Teil der E -Grenzkurve gilt für Boden rechts der Stützwand und Wandverdrehung im Uhrzeigersinn oder Boden links der Stützwand und Wandverdrehung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn.

Wie bereits früher gezeigt wurde, erhält man aus der Momentenkurve die Angriffspunkte der zugehörigen Erddruckmittelkraft, indem man an diese Kleinstmomentenkurve die Tangente zieht und mit der Stützwand zum Schnitt bringt. Dieser Schnittpunkt ist der gesuchte Angriffspunkt, die Tangensfunktion des Winkels zwischen Tangente und Stützwand gibt ein Maß für die Größe des Erddruckes.

In Abb. 30 sind die zu den jeweiligen Angriffspunkten gehörenden Erddruckwerte senkrecht zur Stützwand aufgetragen. Die Endpunkte dieser Erddruckwerte bilden die E -Grenzkurve. Zur Drehachse A (Stützwandkopf) bildet sich also beispielsweise bei Drehrichtung im Uhrzeigersinn die Gleitfläche aus, die ihren Pol in J hat. Das Erddruckmoment um die Drehachse A hat die Größe $AF = 0,09 \gamma H^3$. Der Angriffspunkt der Erddruckkraft liegt in K , weil die Tangente in F an die Momentenkurve die Stützwand in K schneidet. Die Strecke DK vom Fußpunkt der Stützwand bis zum Angriffspunkt hat ungefähr die Größe $0,52 H$, und die Größe des Erddruckes ist durch die Strecke $KA' = 0,188 \gamma H^2$ dargestellt. Durch Abb. 30 erhalten wir also alle Angaben, die wir zur Lösung der Erddruckaufgabe brauchen.

¹⁰⁾ Siehe auch die Ableitungen des Abschnittes 2c: zusammengesetzte Gleitflächen.

Bei Drehrichtung im Uhrzeigersinn und Boden rechts der Stützwand ist bei Pollage oben im Unendlichen der Erddruckangriffspunkt in C ($H/3$ von D entfernt), und seine Größe wird durch den Punkt U_a bestimmt (Coulombscher angreifender Erddruck). Rücken wir die Drehachse aus dem Unendlichen gegen A , dann rückt der Erddruckangriffspunkt immer höher und erreicht K , sobald die Achse in A liegt. Die reinen Erddruckfälle bei obenliegender Drehachse sind in der E -Grenzkurve durch das Kurvenstück $U_a A'$ erfaßt. Rücken wir mit der Drehachse tiefer, dann gelangen wir in den Bereich der gemischten Fälle mit überwiegendem Erddruck. Fällt die Drehachse schließlich nach B , dann haben wir die höchste Lage des Erddruckes erreicht ($DB = 0,61 H$). Drehachsenlagen zwischen B und D ergeben die gemischten Fälle mit überwiegendem Erdwiderstand. Bei Drehachsenlage in D liegt der Erddruck wieder im unteren Drittel, die Erddruckgröße nimmt den Wert des Coulombschen Erdwiderstandes an. Bei noch tieferen Angriffspunkten behalten (bei der eingangs angegebenen Drehrichtung) Erddruckgröße und Angriffspunkt ihre Werte unverändert bei, wie bei Drehachse in D . Die gemischten Erddruckfälle stellen, wie man sieht, den Übergang von Erddruck zu Erdwiderstand dar.

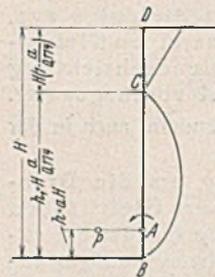


Abb. 31. Zusammengesetzte Gleitfläche, die das größte Drehmoment um A ergibt. (Positive Drehrichtung im Uhrzeigersinn.)

$$\begin{aligned} \max M_A &= 0,0558 \gamma H^3 \cdot \frac{a^3}{0,174^3} \\ &- 0,1667 \gamma H^3 \left(1 - \frac{a}{0,174}\right)^2 \left(\frac{1}{3} + 2,8314 a\right) \end{aligned}$$

oder

$$(15) \quad \max M_A = \gamma H^3 (-4,994 a^3 + 3,589 a^2 + 0,1667 a - 0,0555).$$

Der Nullpunkt von M_A ergibt sich hier bei $a = 0,111$. In Abb. 32 ist die ganze Größtmomentenkurve dargestellt, wie wir sie als Polmomentenkurve (Abb. 17) bereits gefunden haben, und nach Gl. (15) in dem Bereich, wo es keine Pole zu Gleitflächen erster Art mehr gibt. Unterhalb des Stützwandfußes ist die Größtmomentenkurve eine gerade Linie, nämlich die Asymptote des unteren Zweiges der Polmomentenkurve (Abb. 17). In Abb. 32 ist auch die Erddruckgrenzkurve eingetragen, die genau wie in Abb. 30 erhalten wird.

Bei Erddruck rechts der Stützwand und Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn ist der Erddruck nach Größe und Angriffspunkt durch U_D gekennzeichnet, wenn die Drehachse oben im Unendlichen liegt. Kommt die Drehachse ins Endliche und erreicht sie schließlich den Punkt A ,

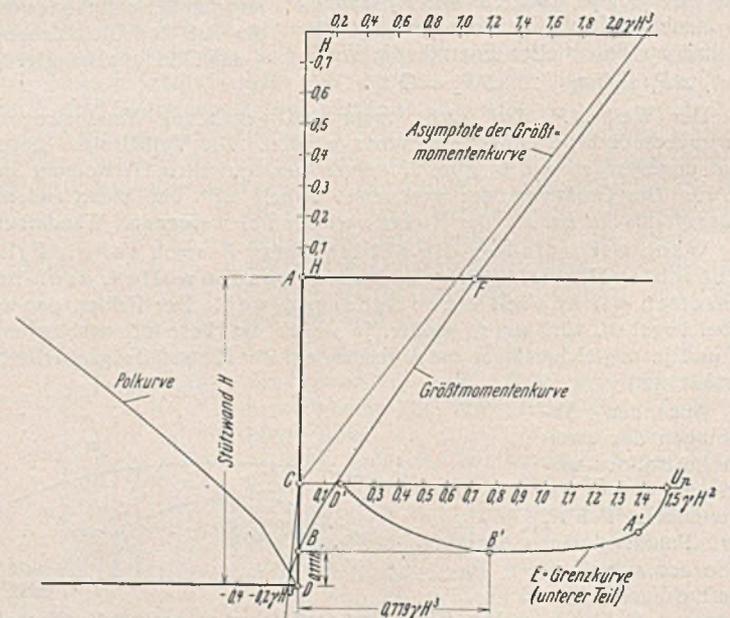


Abb. 32. Den unteren Teil der E -Grenzkurve erhält man aus der Größtmomentenlinie. Er gilt für den Boden rechts der Stützwand und Wandverdrehung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn oder für Boden links der Stützwand und Wandverdrehung im Uhrzeigersinn.

dann gehört zu dieser Drehachsenlage der Punkt A' auf der E -Grenzkurve. Der Teil $U_p A'$ der E -Grenzkurve gehört also zu den reinen Erdwiderstandsgrößen mit oberliegender Drehachse. Die Drehachsenlagen zwischen A und B ergeben die gemischten Fälle mit überwiegendem Erdwiderstande. Zu ihnen gehört der Kurventeil $A'B'$ auf der E -Grenzkurve. B ist gleichzeitig der tiefste Angriffspunkt des Erdwiderstandes, der in unserem Falle überhaupt auftreten kann. Die Drehachsenlagen zwischen B und D ergeben bei der festgelegten Drehrichtung die gemischten Fälle mit überwiegendem Erddruck. Größe und Angriffspunkt der dazugehörigen Erddruckmittelkräfte wird hier durch den Abschnitt $B'D'$ der E -Grenzkurve gekennzeichnet. Bei der Drehachsenlage unterhalb von D bleiben Erd-druckgröße CD' (Coulombscher angreifender Erddruck) und Angriffspunkt C unverändert.

Eine besondere Rolle spielen die höchste und die tiefste Lage des Erddruckangriffspunktes (B in Abb. 30 u. 32). Während im allgemeinen für irgendeine Drehachse die eine Drehrichtung zum Falle des angreifenden Erddruckes oder zumindest zu dem gemischten Falle mit überwiegend angreifendem Erddrucke und dementsprechend die entgegengesetzte Drehrichtung zum Falle des Erdwiderstandes oder zu dem gemischten Falle mit überwiegendem Erdwiderstande führt, gilt dies für Drehachsenlagen zwischen den beiden Grenzlagen des Erddruckangriffspunktes nicht. Hier ergeben sich für beide Drehrichtungen gemischte Erddruckfälle mit überwiegendem Erdwiderstand, d. h. es ist auf jeden Fall und unabhängig von der Drehrichtung Arbeit zu leisten, wenn die Stützwandverdringung um eine Achse stattfinden soll, die zwischen den beiden Erddruckgrenzlagen liegt. Man kann das unmittelbar aus dem Verlauf der M -Kurven in Abb. 30 u. 32 erkennen, denn die Momente ergeben ja die zu leistende oder die frei werdende Wandarbeit, wenn man sie mit dem Verdringungswinkel multipliziert. Diese Tatsache bedeutet, daß es genügt, eine Stützwand in einem einzigen Punkt fest abzustützen, wenn dieser Punkt zwischen den beiden Grenzlagen des Erddruckangriffspunktes liegt. Ein Klippen der Stützwand um diesen festgehaltenen Punkt, der hier die Rolle der Drehachse übernimmt, kann nicht stattfinden. Diese Überlegung ließe sich mit einfachen Mitteln durch Versuche überprüfen (Abb. 33). Die Durchführung eines solchen Versuchs würde auch zahlenmäßig die höchste und tiefste Lage des Erddruckangriffspunktes, die Punkte A und B der Abb. 33 ergeben. Die in der Abbildung eingeschriebenen Maße für A und B ergaben sich rechnerisch für reibungslose Wand und einen Bodenreibungswinkel von 30° .

Wird eine Stützwand mit festen reibungslosen Gelenken oberhalb von A oder unterhalb von B versehen, dann erhalten wir kein beständiges Gleichgewicht. Eine solche Wand muß noch in einem weiteren Punkt zusätzlich gestützt werden, damit keine Drehung um die Achse entsteht. Bei reibungslosen festen Drehachsen zwischen A und B entsteht beständiges Gleichgewicht. Fällt die Drehachse mit A oder B zusammen, dann erhalten wir einen unbeständigen Gleichgewichtszustand. Der leiseste Anstoß genügt, um die Wand in Drehung um A oder B zu versetzen.

In Abb. 36a sind die in den beiden Abb. 30 u. 32 gezeichneten zwei Hälften der Erddruckgrenzkurve in einer Darstellung vereinigt. An Hand dieser Abbildung erkennen wir deutlich den Unterschied gegenüber dem Coulombschen Verfahren. Die Coulombsche Lehre kennt nur zwei mögliche Erddruckgrenzwerte, nämlich den Erddruck (in Abb. 36a durch A dargestellt) und den Erdwiderstand (in Abb. 36a dem Punkt B entsprechend). Erddruckfälle, die sich nicht aus einem Grenzspannungszustand ergeben, liegen nach Coulomb zwischen den Werten des Erddruckes und des Erdwiderstandes, ihr Angriffspunkt wird ebenfalls im unteren Drittel angenommen.

Demgegenüber erhalten wir nach unserem Verfahren eine Erddruckgrenzkurve. Alle Erddruckfälle, die aus einem Grenzspannungszustand entstehen, weisen Erddruckmittelkräfte auf, die durch Punkte auf der E -Grenzkurve gekennzeichnet sind. Durch die Erddruckgrenzkurve (oder λ -Grenzkurve) wird die Erddruckfläche (oder λ -Fläche) begrenzt. Erddrucke, die nicht zu einem Grenzspannungszustand gehören, sind in Abb. 36a durch Punkte im Innern der E -Fläche gekennzeichnet.

In unserer allgemeineren Erddrucklehre ist also die Coulombsche

Lehre als Sonderfall enthalten. Entgegen der alten Auffassung, daß immer eine dreieckige Druckverteilung und ebene Gleitflächen auftreten, gibt die Coulombsche Lehre aber nur dann die wahren Verhältnisse angenähert wieder, wenn es sich um eine Parallelverschiebung der Wand handelt oder um eine Wandverdringung um eine Drehachse, die nicht höher liegt als der Stützwandfuß. Bei allen anderen Verdringungsmöglichkeiten einer starren Stützwand ergeben sich nichtlineare Druckverteilungen und gekrümmte Gleitflächen¹¹⁾.

Wir können bisher den Zusammenhang zwischen Drehachsenlage und zugehöriger Erddruckmittelkraft bei Boden rechts der Stützwand und Drehrichtung im Uhrzeigersinn nur auf dem Umweg über die Kleinstmomentenkurve oder bei Boden rechts und Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn auf dem Umweg über die Größtmomentenkurve herstellen. Da dieses Verfahren etwas unübersichtlich ist, sei noch gezeigt, wie man zu einem λ -Wert und Erddruckangriffspunkt die zugehörige Drehachsenlage allein unter Benutzung der E -Grenzkurve (oder der λ -Grenzkurve) feststellen kann.

Nach den Sätzen F stellt sich bei gegebener Drehachse A derjenige Erddruck ein, der auf A den Grenzwert eines Drehmoments erzeugt. Es muß also mit der Bezeichnungswiese der Abb. 33a $M = E \cdot x$ zu einem Grenzwert werden. Daraus ergibt sich, daß

$$\frac{dM}{dx} = \frac{dE}{dx} \cdot x + E = 0$$

oder

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{x}$$

sein muß.

Bedeutet C den Schnittpunkt der Tangente in Punkt B der E -Grenzkurve mit der Stützwand, dann muß also die Strecke AB ebenso groß sein wie die Strecke BC , wenn $B'B$ derjenige Erddruck ist, für den sich ein Grenzwert des Drehmoments um A ergeben soll.

Haben wir umgekehrt diejenige Drehachsenlage zu suchen, bei der der Erddruck in B' angreift und die Größe $B'B$ hat, dann müssen wir in B die Tangente ziehen und den Schnittpunkt C mit der Stützwand ermitteln. Machen wir sodann die Strecke BD ebenso groß wie BC , dann ist D eine der Drehachsen, zu denen der Erddruck $B'B$ mit Angriffspunkten in B' gehört. Alle anderen Drehachsen, zu denen derselbe Erddruck gehört, liegen auf einer Geraden durch D , die gleichgerichtet zur Erddruckrichtung verläuft.

Wir wollen noch ausdrücklich darauf hinweisen, daß die E -Grenzkurve (Abb. 36a) unter der Voraussetzung gefunden wurde, daß die Stützwand starr ist. Nur unter dieser Voraussetzung gelten die Sätze F, mit deren Hilfe wir die E -Grenzkurve aus der Kleinst- oder Größtmomentenkurve ableiten konnten.

Handelt es sich um eine nichtlineare Verformung der Stützwand, dann gilt wohl der Satz E vom Größtwert der verlorenen Arbeit und bei waagerechter Bodenunterfüllung auch der Satz vom Kleinstwert der Wandarbeit, jedoch nicht mehr die Sätze F vom Kleinstwert des Erddruckmoments auf die Drehachse. Für einen solchen allgemeinen Wandverformungsfall hat also die E -Grenzkurve der Abb. 36a keine Gültigkeit. Auch die Druckverteilungskurven, die wir im nächsten Abschnitt ableiten, gelten demnach nur für völlig starre Wände.

4. Die Verteilung des Erddruckes.

Alle Ableitungen unseres zweiten Abschnittes gelten für beliebige Gleitflächen im Hinterfüllungsboden. Wir mußten, um die Sätze B und C abzuleiten, keine Unterscheidung zwischen Hauptgleitflächen und Zwischen- oder Nebengleitflächen machen. Wir finden die möglichen, d. h. mit dem Reibungsgesetz nicht in Widerspruch stehenden Hauptgleitflächen durch den Stützwandfuß auf genau dieselbe Art wie die möglichen Zwischengleitflächen, die von einem Zwischenpunkt (Punkt C der Abb. 34) der Stützwand ausgehen. Anders ist es mit den Sätzen F. Diese Sätze ermöglichen uns nur das Auffinden der zu einer gegebenen Drehachse der Wand gehörigen Hauptgleitfläche.

Es muß zwar der Satz E über den Größtwert der verlorenen Arbeit auch für einen beliebigen Teil des Hinterfüllungsbodens gelten, also z. B. in Abb. 34 auch für den Erdkörper $BCFB$. Wir sind aber im allgemeinen nicht in der Lage, für einen solchen Teilabschnitt die Größe $\angle P_1$ des Verlustes an potentieller Energie festzustellen. Vom Erdkörper $BCD JFB$ wissen wir, daß dieser Wert $\angle P$ unabhängig von

¹¹⁾ In einer früheren Erddruckuntersuchung (siehe Fußnote 3) habe ich die Vermutung ausgesprochen, daß bei Parallelverschiebung der Stützwand zwar der Coulombsche Erddruckwert auftritt, daß aber sein Angriffspunkt höher liegt als im unteren Drittelpunkt. Diese Ansicht läßt sich nicht aufrechterhalten, wie das Prüflflächenverfahren zeigt. Auch wenn keine weiteren Gleitflächen im abrutschenden Erdkell entstehen, muß der Erddruckangriffspunkt im unteren Wanddrittel liegen, wenn die Hauptgleitfläche eine Ebene ist, und die Druckverteilung muß linear sein. Jede andere Annahme über die Lage des Erddruckangriffspunktes (bei dem hier behandelten Beispiel) führt zu Widersprüchen zum Reibungsgesetz.

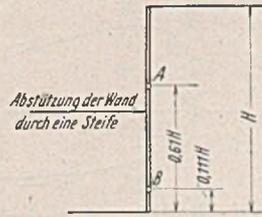


Abb. 33. Ohne äußere Krafteinwirkung kann eine Wandverdringung um eine Drehachse zwischen den Grenzlagen der Erddruckkraft niemals stattfinden.

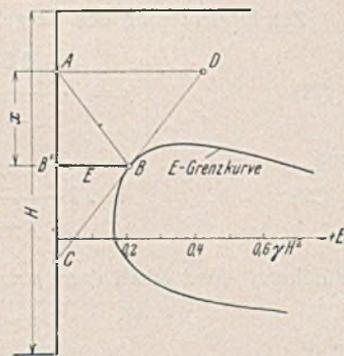


Abb. 33a. Ermittlung der zu einem gegebenen Erddruckangriffspunkt gehörenden Drehachse aus der E -Grenzkurve.

der Art der Gleitflächenausbildung ist (bei waagerechter Hinterfüllungs-
oberfläche). Das hat seinen Grund darin, daß der unterhalb der Haupt-
gleitfläche G_1 befindliche Boden als unverschieblich angenommen werden
kann.

Die Richtungen der Verschiebungen von Bodenpunkten
in der Hauptgleitfläche fallen in die Richtung der Haupt-
gleitfläche. Bei Zwischengleitflächen ist dies im allgemeinen nicht der
Fall. Die Richtungen der Verschiebungen von Punkten der
Zwischengleitfläche G_2 fallen nicht zusammen mit den Rich-
tungsteilstücken der Gleitfläche G_2 . Es werden also die Punkte,
die sich vor der Wandverschiebung längs der
Gleitfläche G_2 (voll ausgezogen) befanden,
nach der Wandverschiebung sich etwa in der
gestrichelten Lage (Abb. 34) befinden. Wir
müßten also den Verschiebungszustand im
ganzen Hinterfüllungskörper kennen, um den
Wert $\angle P_1$ für den Teilabschnitt $BCFB$ fest-
zustellen. Jedenfalls ist $\angle P_1$ für einen Teil-
abschnitt nicht mehr von der Gleitflächen-
ausbildung oder vom Verschiebungszustand
unabhängig, und die wesentlichste Voraus-
setzung des Satzes F gilt hier nicht mehr.

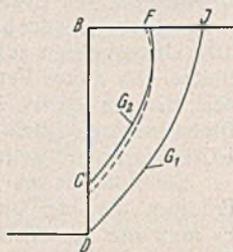


Abb. 34. Verschiebungs-
richtung und Gleit-
flächenrichtung fallen
bei Zwischengleitflächen
nicht zusammen.

In Abb. 34 müssen wir also die Haupt-
gleitfläche so aufsuchen, daß das Moment des
Erddruckes von B bis D um die Drehachse A
einen Kleinstwert annimmt. Dagegen dürfen
wir die Zwischengleitfläche G_2 nicht nach dem-
selben Grundsatz auswählen, daß das Erddruckmoment des Wand-
abschnittes B bis C um die Drehachse A einen Kleinstwert annimmt.

Für das Auffinden von Zwischengleitflächen und damit für die Er-
mittlung der Druckverteilung können und müssen wir die Gleichgewichts-
bedingungen heranziehen.

Wir haben gefunden, daß sich der gesamte Erddruck in einer Gleichung
(16a)
$$E = \gamma H^2 \lambda$$

darstellen läßt, wobei

(16b)
$$\lambda = f\left(\frac{x_a}{H}\right) = f(\xi)$$

von der Lage des Erddruckangriffspunktes abhängig ist. In Gl. (16b) be-
deutet x_a den Abstand des Angriffspunktes vom Stützwandkopf und ξ
das Verhältnis dieses Abstandes zur Stützwand-
höhe. Die Abhängigkeit (16b) ist uns durch
unsere Untersuchungen bekannt, und wir
konnten sie auch in Abb. 36a zeichnerisch
festlegen. Die Gl. (16) gelten nun nicht bloß
für den auf die ganze Stützwand BD (Abb. 34)
wirkenden Erddruck, sondern auch für den
Erddruck, der auf das Teilstück BC wirkt
(starre Stützwand vorausgesetzt), wobei C will-
kürlich angenommen werden kann¹²⁾. Die
einzige Voraussetzung, die wir getroffen haben,
um zur Gl. (16b) zu kommen, war die, daß
durch den unteren Endpunkt C des unter-
suchten Abschnittes eine Gleitfläche führt.

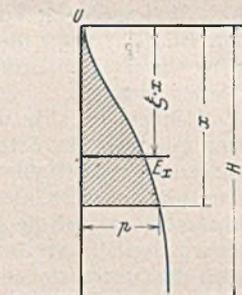


Abb. 35.

Für den Teilabschnitt x gilt also

$$E_x = \gamma x^2 \lambda,$$

wobei λ immer durch dieselbe Gl. (16b) oder Abb. 36a gegeben ist.

Wir erkennen ohne weiteres, daß aus Gleichgewichtsgründen

$$p = \frac{dE_x}{dx}$$

sein muß, also

(17)
$$p = 2\gamma x \lambda + \gamma x^2 \cdot \frac{d\lambda}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dx}.$$

Bilden wir das Moment der Tellerdruckkraft um 0, dann erhalten wir

$$M = E_x \xi x = \gamma x^3 \lambda \xi,$$

¹²⁾ Das gilt ohne Einschränkung nur für die Teile AC und BD der
 λ -Kurve (Abb. 36a), weil diese Teile aus Gleitflächen erster Art ge-
funden wurden. Wenn wir auch die Teile CB und DA der λ -Kurve als
gültig für Tellerdrücke übernehmen, dann handelt es sich so lange
um eine Arbeitsvoraussetzung, als der Beweis für die Zulässigkeit dieses
Vorganges nicht erbracht ist. Die Teile CB und DA sind nämlich aus
zusammengesetzten Gleitflächen ermittelt unter der Annahme, daß die
obere Gleitfläche erster Art die Coulombsche Gleitfläche ist. Einen all-
gemeingültigen Beweis dafür, daß die λ -Kurve, die nur für den gesamten
Erddruck abgeleitet wurde, auch für Teilstücke der starren Stützwand
gilt, konnte ich bisher nicht erbringen. Dagegen scheint der Beweis
dann möglich zu sein, wenn die Hauptgleitfläche selbst eine zusammen-
gesetzte Gleitfläche ist.

wobei wieder aus Gleichgewichtsgründen sein muß

$$p x = \frac{dM}{dx}$$

oder

(18)
$$p x = 3\gamma x^2 \lambda \xi + \gamma x^3 \cdot \frac{d\lambda}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dx} \cdot \xi + \gamma x^3 \lambda \cdot \frac{d\xi}{dx}.$$

Die beiden Gl. (17) u. (18) ergeben nach den beiden Größen p und $\frac{d\xi}{dx}$
aufgelöst:

(19)
$$p = \gamma x \lambda \cdot \frac{2\lambda - \xi \cdot \frac{d\lambda}{d\xi}}{\lambda - (1 - \xi) \frac{d\lambda}{d\xi}}$$

(20)
$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{\lambda}{x} \cdot \frac{2 - 3\xi}{\lambda - (1 - \xi) \frac{d\lambda}{d\xi}}$$

Aus Gl. (19) entnehmen wir, daß für irgendeinen Punkt C der
Stützwand (Abb. 34) die Größe p des Erddruckes angegeben werden kann,
wenn nur die Lage ξ des Angriffspunktes für die Tellerdruckkraft auf
dem Wandteil BC bekannt ist. Bei bekanntem ξ können wir der Abb. 36a
die Werte λ und $\frac{d\lambda}{d\xi}$ entnehmen, so daß also tatsächlich p errechnet werden
kann.

Im allgemeinen ist aber für einen Zwischenpunkt der Stützwand der
Wert ξ , der die Lage des Erddruckangriffspunktes bestimmt, nicht be-
kannt. Nur für den

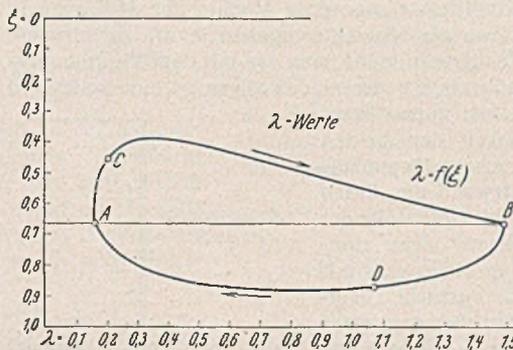


Abb. 36a. Die λ -Grenzkurve.

Stützwandfußpunkt
können wir das zu-
gehörige ξ bei bekann-
ter Drehachsenlage mit
Hilfe des Satzes F er-
mitteln.

Aus Gl. (20) können
wir aber die Abhängig-
keit $\xi = f(x)$ auffinden,
da wir ja das ξ für den
Stützwandfuß kennen.
Wir brauchen nur vom
Stützwandfuß aus-
gehend mit Hilfe von
(20) einen benach-

arten ξ -Wert aufzusuchen, den
Wert $\frac{d\xi}{dx}$ mit diesem neuen ξ -Wert

neu zu bestimmen und so von Punkt
zu Punkt fortschreitend die Ab-
hängigkeit $\xi = f(x)$ zu ermitteln.
Es handelt sich dabei um das be-
kannte Verfahren der zeichnerischen
Lösung einer linearen Differential-
gleichung, die allerdings hier eine
Schwierigkeit aufweist, weil die Ge-
raden $\xi = 0,39$ und $\xi = 0,889$ ein-
malige Lösungen derselben Dif-
ferentialgleichungen sind. Diese ein-
maligen Lösungen sind hier nicht von
Belang, sie machen aber Schwierig-
keiten bei der zeichnerischen Lösung,
weil wir, sobald die Lösungskurve
 $\xi = f(x)$ nach $\xi = 0,39$ oder $\xi = 0,889$
kommt, nur durch Schätzung aus der
Geraden herausgelangen können.

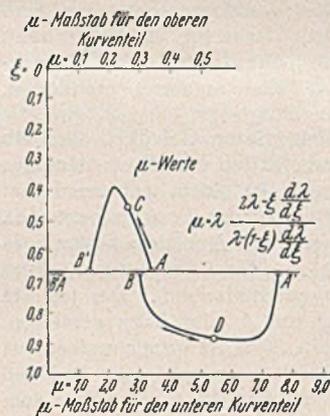


Abb. 36b.

Die μ -Kurve. Der μ -Maßstab
für den unteren Kurventeil
wurde 10mal kleiner gewählt
als der für den oberen Kurventeil.

Zur Erleichterung des Vorgehens kann man die Hilfswerte

(21)
$$\mu = \lambda \cdot \frac{2\lambda - \xi \cdot \frac{d\lambda}{d\xi}}{\lambda - (1 - \xi) \frac{d\lambda}{d\xi}} = \mu(\xi)$$

und

(22)
$$v = \lambda \cdot \frac{2 - 3\xi}{\lambda - (1 - \xi) \frac{d\lambda}{d\xi}} = v(\xi)$$

eingeführen. Man erhält dann p und $\frac{d\xi}{dx}$ zu

$$p = \gamma x \mu$$

und

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{v}{x}$$

In Abb. 36b ist die Abhängigkeit $\mu = \mu(\xi)$ und in Abb. 37a der
Wert $v = v(\xi)$ für unseren Fall ($\rho = 30^\circ$, $\delta = 0$, Wand lotrecht, Hinter-
füllungsboden waagrecht) dargestellt.

Die Abhängige $\mu = \mu(\xi)$ (Abb. 36b) weist eine bemerkenswerte Unregelmäßigkeit auf. In $\xi = 2/3$ und $\lambda = 1,667$ ist $\mu(\xi) = 0,333$. Mit wachsendem λ und kleiner werdendem ξ nimmt die Kurve $\mu = \mu(\xi)$ in Abb. 36b von A ausgehend ihren Verlauf in Richtung des eingezeichneten Pfeiles. Kommen wir schließlich wieder auf $\xi = 2/3$, aber $\lambda = 1,5$ (Coulomb-

scher Erdwiderstand), dann nimmt μ die unbestimmte Form $0:0$ an. Es ist nun $\lim_{\xi \rightarrow 2/3} \mu = 0,1345$, dagegen hat die Abhängigkeit selbst die Größe $\mu = \mu(2/3) = 3,00$.

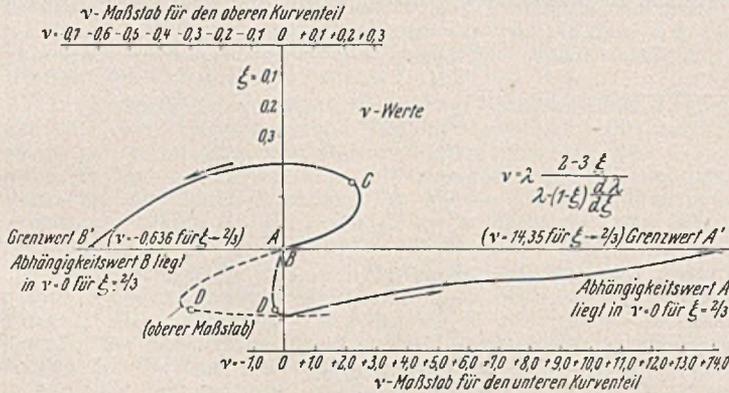


Abb. 37a. Die ν -Kurve. Der ν -Maßstab für den unteren Kurventeil wurde 10mal kleiner gewählt als der für den oberen Kurventeil.

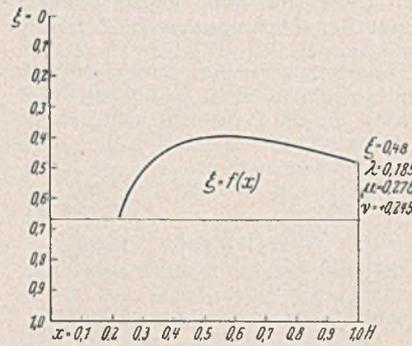


Abb. 37b. Die Abhängigkeit $\xi = f(x)$. Sie wurde ermittelt unter Verwendung der ν -Kurve (Abb. 37a).

Der Punkt B' der Abb. 36b gehört also der Abhängigen $\mu = \mu(\xi)$ nicht an, sondern es tritt in $\xi = 2/3$ eine Unstetigkeit auf. Die Abhängige ist in Abb. 36b durch B dargestellt. In Abb. 36b mußte für den unteren Teil des Wertes $\mu = \mu(\xi)$ ein anderer μ -Maßstab gewählt werden als für den oberen Teil. Die Punkte A, B, A' und B' der Abb. 36b, die in $\xi = 2/3$ liegen, wurden mit einem nach oben oder nach unten gerichteten Halbkreis dargestellt, je nachdem der obere oder der untere μ -Maßstab zu verwenden ist.

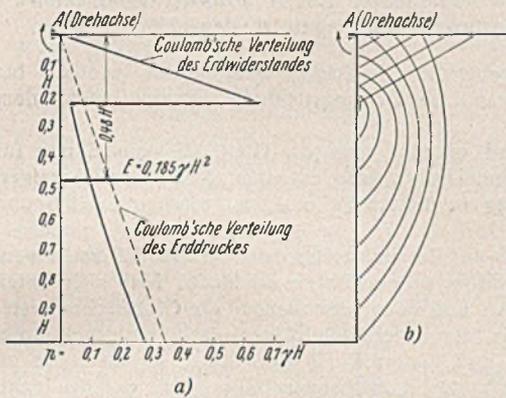


Abb. 38. Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachse im Stützwandkopf. Boden rechts der Wand, Drehrichtung im Uhrzeigersinn.

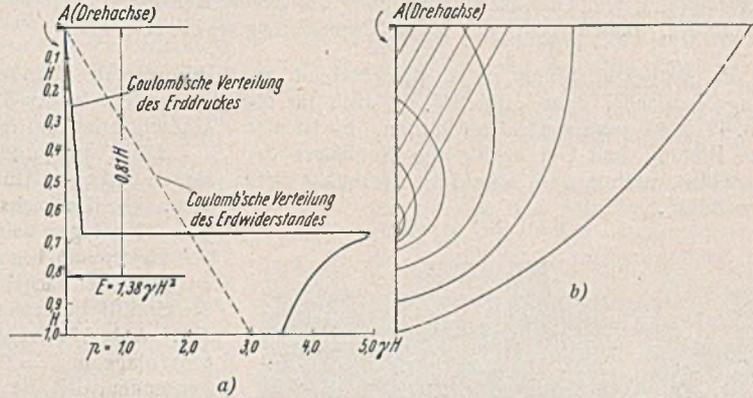


Abb. 39. Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachse im Stützwandkopf. Boden rechts der Wand, Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn.

Lassen wir λ von $\lambda = 1,5$ angefangen immer kleiner werden, wobei $\xi > 2/3$ sein soll, dann gibt die untere Kurve (Abb. 36b) den Verlauf der Abhängigkeit $\mu = \mu(\xi)$. Die Kurve geht von B ($\xi = 2/3, \mu = 3,0$) ausgehend in Richtung des eingezeichneten Pfeiles gegen A' ($\xi = 2/3, \mu = 7,5$).

In $\xi = 2/3$ tritt aber neuerdings eine Unstetigkeit auf. Nicht A' gibt den Wert der Abhängigen, sondern A ($\xi = 2/3, \mu = 0,333$). Die Werte in $\xi = 2/3$ ergeben sich nämlich unabhängig von der Größe von $\frac{d\lambda}{d\xi}$, weil in $\xi = 2/3$, $(1 - \xi) = 1/3$ wird und

$$(23) \quad \mu_{2/3} = \lambda \cdot \frac{2\lambda - \xi \cdot \frac{d\lambda}{d\xi}}{\lambda - (1 - \xi) \frac{d\lambda}{d\xi}} \Big|_{\xi=2/3} = 2\lambda \cdot \frac{\lambda - 1/3 \cdot \frac{d\lambda}{d\xi}}{\lambda - 1/3 \cdot \frac{d\lambda}{d\xi}} = 2\lambda$$

ist. Daß nun tatsächlich in $\xi = 2/3$ nicht der Grenzwert als Abhängigkeitswert auftritt, sondern der Wert der Gl. (23), ergibt sich notwendig daraus, daß für die ganze Stützwand die Größe und der Angriffspunkt des Erddruckes bereits von vornherein festliegen. Die Grenzwertermittlungen (die Lagen von B' und A') konnten mit aller Genauigkeit durchgeführt werden, da in diesem Bereich die Abhängigkeit $\lambda = f(\xi)$ durch die Gl. (14) u. (15) rechnerisch festgelegt sind und man den Ungenauigkeiten einer zeichnerischen Ermittlung entgegen konnte.

Ähnliche Unstetigkeiten weist auch die Abhängige $\nu = \nu(\xi)$ auf (Abb. 37a). Auch hier dürfen wir sinngemäß die Punkte B' und A' nicht als zur Abhängigen gehörig betrachten, obwohl sie die Grenzwerte dieser Abhängigkeit für $\xi \rightarrow 1/3$ darstellen. Wir müssen vielmehr die zusammenfallenden Punkte A ($\xi = 1/3, \nu = 0$) und B ($\xi = 1/3, \nu = 0$) als die Abhängigkeitswerte ansehen.

In Abb. 37b ist schließlich für den Fall, daß die Drehachse im Stützwandkopf liegt, die zeichnerische Ermittlung von $\xi = f(x)$ mit Hilfe des Wertes $\nu = \nu(\xi)$ (Abb. 37a) durchgeführt. Da Abb. 37b für jeden Zwischenpunkt x die Lage des Tellerdruckes durch Angabe von $\xi = \frac{x_a}{x}$ festlegt, kann man die Abhängigkeit $p = f(x)$ mit Hilfe von Abb. 36b ermitteln. Das Ergebnis ist in Abb. 38a dargestellt. In Abb. 38b ist das zugehörige Gleitflächennetz eingezeichnet, wie es aus unserem Näherungsverfahren erhalten wird.

Abb. 39a u. 39b zeigen die Druckverteilung und die Gleitflächenausbildung ebenfalls für die Lage der Drehachse im Stützwandkopf, jedoch bei einer dem Uhrzeigersinn entgegengesetzten Drehrichtung bei Boden rechts der Stützwand (Fall des Erdwiderstandes). Abb. 40a u. 40b

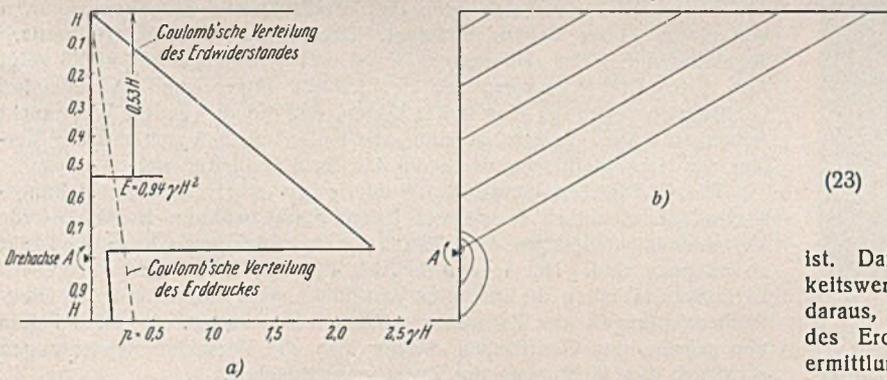


Abb. 40. Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachse in $\xi = 0,8$. Boden rechts der Wand, Drehrichtung im Uhrzeigersinn.

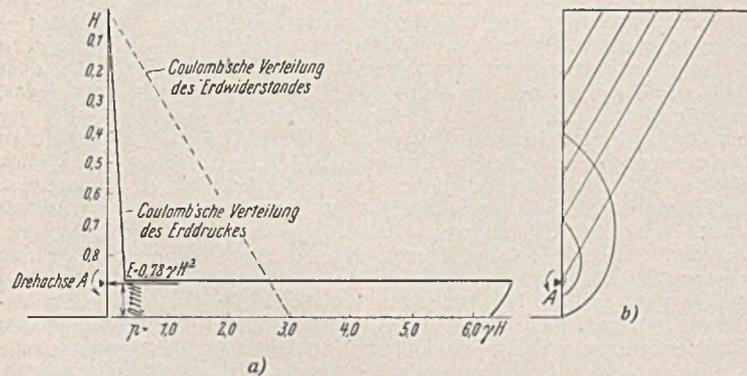


Abb. 41. Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachse in $\xi = 0,889$. Boden rechts der Wand, Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn.

zeigen bei Boden rechts der Wand und Drehrichtung im Uhrzeigersinn Druckverteilung und Gleitflächenausbildung, wenn die Drehachse in $\xi = 0,8$ liegt. Abb. 41 a u. 41 b gelten für die umgekehrte Drehrichtung und Drehachsenlage in $\xi = 0,889$ (tiefste Lage des Erddruckangriffspunktes).

Schließlich zeigen noch Abb. 42 a, 42 b, 43 a u. 43 b Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachsenlagen im Stützwandfuß oder unterhalb des Stützwandfußes. Diese Druckverteilungen und Gleitflächen stimmen mit den Ergebnissen der Coulombschen Erddrucklehre

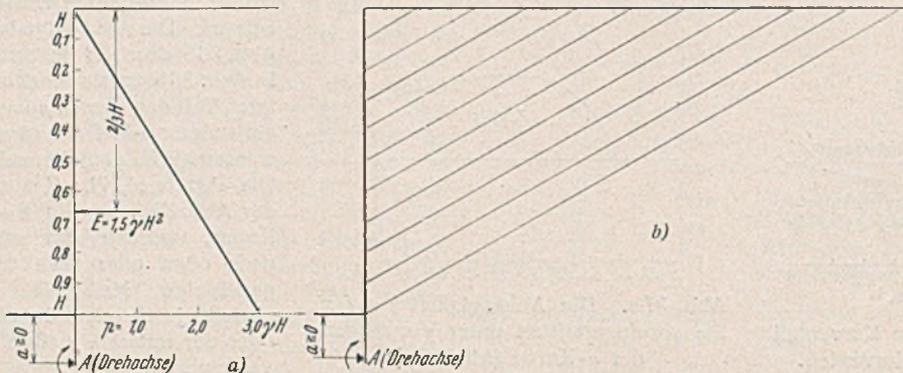


Abb. 42. Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachsenlage unterhalb des Stützwandfußes. Boden rechts der Wand, Drehrichtung im Uhrzeigersinn.

überein. Wäre jedoch die Erddruckrichtung nicht gleichlaufend zur waagerechten Hinterfüllungsfläche, dann erhielten wir auch für die Drehachsenlagen der Abb. 42 u. 43 gekrümmte Gleitflächen. Es ist also nicht so, daß man ohne Prüfung und Überlegung die Ergebnisse der Coulombschen Lehre als richtig ansehen darf, sobald die Drehachse nicht höher liegt als der Stützwandfuß.

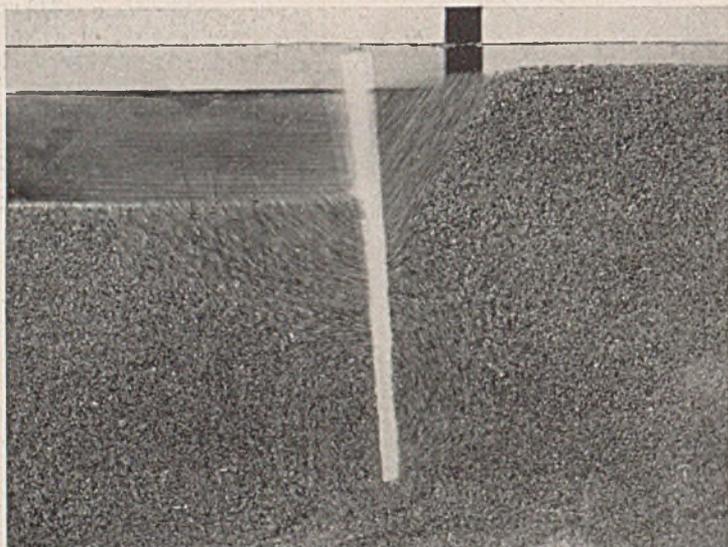


Abb. 44. Lichtbild, aufgenommen während einer Spundwandverdrehung. Man beachte die Verschiebungsrichtungen der einzelnen Bodenteilchen.

In Abb. 44 sei schließlich noch ein Lichtbild gezeigt, das aus einer Versuchsreihe H. Kreys stammt und mir in entgegenkommender Weise von der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau in Berlin zur Verfügung gestellt wurde. Das Lichtbild zeigt die Gleitflächenausbildung beiderseits einer Spundwand, die durch Kraft-einwirkung zur Verdrehung gebracht wurde. Es haben sich dabei auf

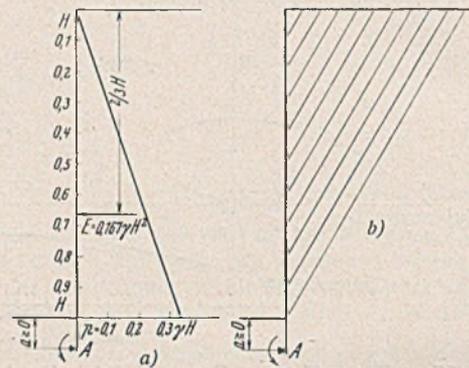


Abb. 43. Druckverteilung und Gleitflächenausbildung bei Drehachsenlage unterhalb des Stützwandfußes. Boden rechts der Wand, Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn.

der rechten Spundwandseite die Gleitflächen ausgebildet, wie sie bei Boden rechts der Stützwand, Verdrehungsrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn auftreten.

Links der Spundwand erkennt man die Gleitflächenausbildung für Boden links der Stützwand, Drehrichtung entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn. Die Drehachse mag in diesem Falle etwa zwischen $\xi = 0,8$ und $\xi = 0,9$ gelegen sein.

Es ist nun besonders auf der rechten Spundwandseite die zusammengesetzte Gleitflächenausbildung sehr schön zu erkennen. Man sieht unten die Gleitflächen zweiter Art und oben anschließend die Gleitflächen erster Art. Abb. 41 b zeigt die berechnete Gleitflächenausbildung bei Drehachsenlage in $\xi = 0,889$ und glatter Wand ($\rho = 30^\circ$). Es ist nicht zu verkennen, daß die berechnete Gleitflächenausbildung mit der des Lichtbildes gut übereinstimmt.

Auf der linken Spundwandseite sind die Gleitflächen zweiter Art nicht gut zu sehen, dagegen kann man die oben auftretenden Gleitflächen erster Art des Erdwiderstandes schön erkennen. Man sieht auch, daß diese Gleitflächen nicht vom Fuß der Stützwand ausgehen, sondern von einem höher liegenden Punkt. Den entsprechenden, rechnerisch abgeleiteten Fall für reibungslose Wand und Achsenlage in $\xi = 0,8$ zeigt Abb. 40 b. Die Krümmung der im Lichtbild linker Hand zu sehenden Gleitflächen erster Art mag daher rühren, daß die verwendete Wand nicht reibungslos war. Außerdem muß man bedenken, daß sich nur der Verlauf der Hauptgleitfläche durch das Lichtbild festhalten läßt.

Die Gleitflächen kennzeichnen den gegenseitigen Verschiebungszustand der einzelnen Teilchen in jedem Punkt, während in Abb. 44 die Verschiebungsrichtungen der absoluten Verschiebungen in jedem Punkt zu erkennen sind. Nur in den in Abb. 42 b und 43 b dargestellten Gleitflächenverlauf fallen die absoluten Verschiebungsrichtungen mit den Gleitflächenrichtungen der Zwischengleitflächen zusammen. In allen Fällen von gekrümmten Gleitflächen decken sich die Verschiebungsrichtungen nicht mit den Richtungen der Zwischengleitflächen.

Alle Rechte vorbehalten.

Vortragstagung des Deutschen Beton-Vereins.

Die 43. Hauptversammlung des Deutschen Beton-Vereins (E. V.) fand am 29. Februar im Hotel Kaiserhof, Berlin, unter Leitung des Vorsitzenden, Regierungs- u. Baurates a. D. Dr.-Ing. W. Nakonz, statt. Für die Vortragstagung war der Saal bis auf den letzten Platz gefüllt, eine Tatsache, die bei Beachtung der Augenblicksanforderungen von Krieg und Kriegswirtschaft besonders unterstrichen werden soll. Als Einleitung hörte man das Vorspiel zu Beethovens „Coriolan“. Dr.-Ing. Nakonz begrüßte dann die Teilnehmer der Tagung, insbesondere die Vertreter der Behörden, der Wehrmacht und der Technischen Hochschulen. Er sprach von der Betonindustrie als einem wichtigen Teil der deutschen Waffenschmiede, einer Industrie, die es verstanden hat, wehrtechnische Fragen trotz größter Schwierigkeiten zu lösen. Der Beschäftigungsgrad ist ein hoher geblieben. Die Notwendigkeit, mit einem verhältnismäßig großen Anteil berufsfremder, auch ausländischer Arbeiter Höchstleistungen zu erzielen, stellt besonders hohe Anforderungen an den Betriebsführer. Er soll loben, wo es angebracht erscheint, soll in allem die Leute gerecht behandeln, sie aufklären über Wesen und Eigenarten des Baues und sie so arbeitsfreudig erhalten. Die Leitung des Baustellenbetriebes gewinnt besondere Bedeutung in einer Zeit, in der die rechtzeitige Beschaffung der nötigen Baustoffe oft größten

Schwierigkeiten begegnet und die Entwurfspläne bei allzu kurzer Vorbereitungszeit nur zu oft — bisweilen noch im letzten Augenblick — abgeändert werden. Das hat dann Arbeitsverzögerungen und -verteuerungen zur Folge, mit denen man zuvor nicht gerechnet hat. Da auch dem Arbeiter leicht die Lust an der Arbeit genommen wird, wenn er das, was er gestern erst geschaffen hat, heute wieder umändern oder gar ganz abreißen muß, vermeide man nach Möglichkeit solche Verluste an Volksvermögen. Eine weitere Leistungssteigerung erscheint kaum noch möglich. Die Leute sind allen möglichen Berufsschichten entnommen. Der Nutzen kurzer Schulungskurse ist im Baugewerbe oft fragwürdiger Natur; besser wäre eine zwei- bis dreimonatliche Pflichtausbildung. Stücklohn erscheint dann angebracht, wenn die Arbeiter in ihrer Leistung einigermaßen gleichartig sind. Zur Entlastung des technischen Büros ist eine weitgehende Normung der Baueinzeltile und Baugeräte anzustreben. Durch die vielen der Bauwirtschaft gestellten zusätzlichen Aufgaben bedingt, werden jetzt bedauerlicherweise für das kaufmännische Büro mehr Angestellte benötigt als für das technische Büro, ein Zustand, der hoffentlich bald durch ein sieghaftes Kriegsende beseitigt werden kann.

Der Reichswalter des NSBDT., Generalinspektor Prof. Dr. Todt, beglückwünschte den Verein zu seiner 43. Hauptversammlung und würdigte

seine Leistungen insbesondere für die Reichsautostraßen mit ihren vielen Kunstbauten und für den Westwall. Eine spätere Zeit, die es einmal erlauben werde, Näheres zu berichten, werde das Wort prägen, daß der Eisenbetonbau im Westwall Geschichte gemacht habe. Über die von Dr. Todt vorgenommene Überreichung der Emil-Mörsch-Denkünze an Prof. Dr. Dischinger in Würdigung seiner wissenschaftlichen Leistungen wurde bereits in Heft 10 der Bautechnik berichtet. Anschließend gab Dr. Nakonz die Ernennung von Dr.-Ing. e. h. Franz Schlüter, dem verdienstvollen, langjährigen Vorstandsmitglied des Vereins, zum Ehrenmitglied bekannt¹⁾.

Die Reihe der Fachvorträge eröffnete Herr Ministerialdirektor Schulze-Fleitz, beim Generalinspektor für das deutsche Straßenwesen, mit einem von Lichtbildern unterstützten Vortrag über den Bau des Westwalls, an dem der Genannte an leitender Stelle mitgearbeitet hat. In Vertretung des dienstlich verhinderten Ministerialrats im Reichsluftfahrtministerium Dr.-Ing. Löffen berichtete Regierungsbaurat Otto über neue Erfahrungen auf dem Gebiete des baulichen Luftschutzes.

Es sprach dann Dr. K. Knecht, Hauptgeschäftsführer der Wirtschaftsgruppe Bauindustrie, zu dem Thema „Die deutsche Bauindustrie im Kriege“. Dank der schon vor Kriegsbeginn geschaffenen planmäßigen Lenkung der Bauwirtschaft durch straffe Zusammenführung aller in Frage kommenden Verbände ließ sich die Umstellung auf die Kriegsverhältnisse in kürzester Zeit und ohne wesentliche Erschütterung der Bauwirtschaft ermöglichen. Eine alte Forderung der Bauindustrie wurde dadurch erfüllt, daß die Bauten nun nach ihrer Dringlichkeit und Kriegsnotwendigkeit zu ordnen und zu fördern sind. Durch Zusammenschluß mehrerer Unternehmungen für Großaufgaben konnten viele Schwierigkeiten überwunden und die Leistungen gesteigert werden. Die von dem Redner zum Ausdruck gebrachte Hoffnung, daß die Verhandlungen über die Vereinfachung der Lohnlisten zu einem günstigen Endergebnis führen werden, wurde mit Beifall aufgenommen. Von besonderer Wichtigkeit sind die Maßnahmen zur Beschaffung wirklich brauchbarer Arbeitskräfte; an der Umschulung, mit der man im allgemeinen gute Erfahrungen machen konnte, hat die Wirtschaftsgruppe Bauindustrie tatkräftig mitgeholfen. Die richtige Menschenführung ist wichtig; der Unternehmer, voran der örtliche Bauleiter, hat hier ein dankbares Arbeitsfeld. Geräte und Maschinen müssen erhalten bleiben. Unterhaltungs- und Ersatzbedarf sind zu sichern. Durch ordnende Maßnahmen auf dem Gebiete der Neu- und Ersatzteilbelieferung von Baumaschinen hat der Generalbevollmächtigte für die Regelung der Bauwirtschaft viel dazu beigetragen, daß die Leistungsfähigkeit des Geräteparks der Unternehmer den gestiegenen Anforderungen gerecht werden kann. Die Verhältnisse liegen jetzt — auf beiden Seiten — oft reichlich schwierig; immerhin könnten die Bestimmungen der auftraggebenden Behörde oft mehr den tatsächlichen Bedürfnissen und Gegebenheiten der Praxis angepaßt sein.

in seinem Bericht aus der Tätigkeit des Deutschen Beton-Vereins im Jahre 1939 behandelte der Geschäftsführer, Regierungsbaumeister a. D. Bornemann, vor allem die als Selbstüberwachungsmaßnahme der Bauindustrie geschaffene fachliche Beratung auf den Baustellen, die sich auch in der Ostmark gut eingeführt habe. Die Prüfkisten und der Film „Werkgerechtes Bauen“ hätten bei der Heranbildung neuer Fachkräfte gute Dienste getan. Als nicht minder zweckmäßig hätten sich die in Berlin abgehaltenen Sprechabende und Baustellenbesichtigungen erwiesen. Nach Mitteilungen über die Zusammenarbeit mit anderen Körperschaften gab dann der Redner einen kurzen Bericht über die vom Deutschen Beton-Verein im Juni und Juli 1939 veranstaltete Studienreise nach Italien, an welcher sich 25 Herren beteiligten. Er hob besonders die vorzügliche Vorbereitung und lebenswürdige Aufnahme durch die italienischen Behörden und Bauunternehmungen hervor und zeigte im Lichtbild einige der besichtigten Eisenbetonbauten (Abb. 1).

¹⁾ Vgl. Bautechn. 1940, S. 106.

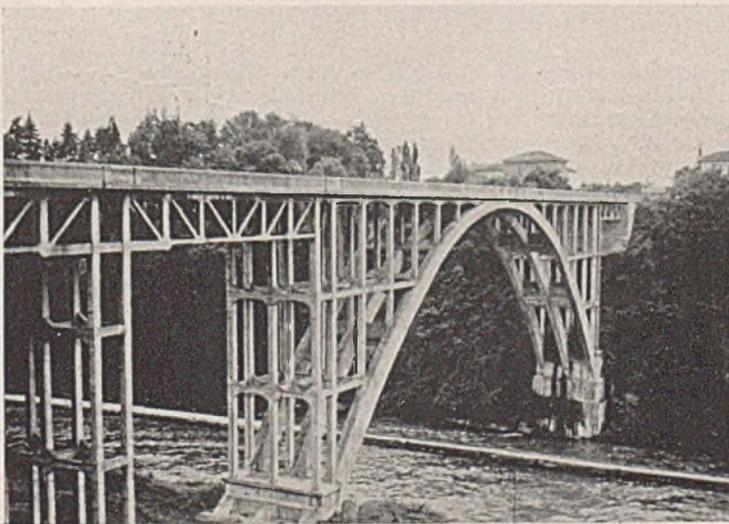


Abb. 1. Adda-Brücke bei Trezzo, erbaut 1927 für die Autostraße Mailand—Bergamo; Bogenspannweite 80 m (Vortrag Bornemann).

Zu der zeitgemäßen Frage „Vorspannung der Stahleinlagen im Eisenbetonbau“ sprach Prof. Dr. Pistor, zur Zeit Rektor der Technischen Hochschule München²⁾. Der Redner gab einen zusammenfassenden Überblick über Grundzüge und Entwicklungsstand dieses Bauverfahrens. Bekanntlich hat die Ribbildung ihre Ursache einerseits in der Dehnung der gezogenen Stahleinlagen und andererseits im Schwinden des Betons. Der Frage der Ribbildung und des damit etwa gestörten Verbundes muß erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden, sobald Stähle hoher Streckgrenze Verwendung finden; Erhöhung der Streckgrenze gestaltet das Verhältnis von Rib- zur Bruchlast immer ungünstiger. Den Anlaß zur Entwicklung der neuen Gedanken im Stahlbetonbau gab die Notwendigkeit einer Steigerung der Stahlersparnis im Zusammenhang mit neuartigen und kühnen Bauaufgaben. Zwecks Verringerung oder Ausschaltung von Zugspannungen werden Druckspannungen in den Querschnitt eingeleitet, sodaß sie sich den etwa vorhandenen Biegespannungen überlagern. Sehr zu begrüßen ist nun die vom Redner gegebene Festlegung der Fachausdrücke:

I. Stahlbetontragwerke mit stählernen Zuggurten

- a) bei Anspannung vor dem Ausrüsten: „mit gespannten Zuggurten“,
- b) bei Anspannung mit einer größeren als der Ausrüstekraft (mit Wasserdruckpressen oder auch Ballast): „mit vorgespannten Zuggurten“;

II. „Spannbetontragwerke“ oder „Tragwerke mit vorgespannter Bewehrung“, auch für kleinere Tragwerkteile (Fertigbauteile) geeignet.

Die Merkmale der Gruppe I sind folgende:

1. Aufteilung in getrennte Druck- und Zuggurte, wobei letztere außerhalb des Verbundquerschnitts liegen und mit den zulässigen Spannungen des Stahlbaues bemessen werden können;
2. Anspannen der Zuggurte durch den Ausrüstungsvorgang oder Ausrüsten durch Anspannen der Zuggurte; im letzteren Fall kann das Anspannen mit einer dem vorhandenen Belastungszustand entsprechenden oder einer größeren Kraft vorgenommen werden;
3. die Zuggurte können zur Ausschaltung der Wirkungen des Schwindens und Kriechens in den gedrückten Verbundquerschnitten bei einigen Bauweisen nachgespannt werden;
4. die Umhüllung der Zuggurtungen wird nach dem Anspannen aufgebracht.

In einem Lichtbild wurden geeignete Tragwerke zusammengestellt gezeigt: Zweigelenkbogen mit Zugband (Dischinger, Saalebrücke Alsleben), unterspannter Balken (Ausgangsform des von Dischinger angegebenen Spannverfahrens für Balkenbrücken, Auebrücke), Fachwerkträger (Finsterwälder), Sonderlösung des unterspannten Balkens nach Finsterwälder (Reichsautobahnbrücke Wiedenbrück), Hängebrücke mit Versteifungsträger. Zur Gruppe I ist auch eine Anzahl von Rohrbauarten zuzurechnen; die Bewehrung dieser Rohre ist außerhalb des Verbundquerschnitts angeordnet.

Die Merkmale der Gruppe II sind folgende:

1. Die Bewehrung liegt innerhalb des Stabquerschnitts;
2. Anspannen der Bewehrung vor dem Betonieren des unbelasteten Stabes, Übertragen der Anspannkraft auf den Beton nach genügender Erhärtung.

In jedem Falle ist ein Beton höchster Güte und rascher Erhärtung zu verwenden. Für die Stähle sind besondere Endverankerungen notwendig; Drähte bis etwa 2 mm Durchm. bilden eine Ausnahme. Risse, die durch Überbelastung entstehen, schließen sich nach Fortfall der Überbelastung. Die Riblast ist nur von der Größe der angewendeten Vorspannung, die Bruchlast dagegen von der Streckgrenze und Zugfestigkeit des Stahles abhängig. Über das Verfahren Freyssinet, das in Deutschland durch die Wayss & Freytag AG. weiterentwickelt wurde, ist von Dr. Lenk auf der Hauptversammlung 1937 ausführlich berichtet worden. Mit in Gang befindlichen Ausführungen wurden bisher rd. 7000 tfd. m Träger bis zu $h = \frac{1}{20} l$ ausgeführt. Das Verfahren findet auch für Druckrohre mit Bewehrung innerhalb des Betonquerschnitts Anwendung. — Der Stahlsaitenbeton Hoyer zeigt einen außerordentlich niedrigen Stahlbedarf; die Verwendung höchstwertiger Stahldrähte ergibt die bisher weitestgehende Ausnutzung aller Vorteile des Spannbetonverfahrens. — Emperger verwendet innerhalb eines Querschnitts neben üblicher Stahlbewehrung vorgespannte Zulagen aus Stahl von hoher Streckgrenze; eine Reichsautobahnbrücke bei Wien ist zur Zeit nach seinen Vorschlägen im Bau. Der Redner schließt seinen mit besonderem Beifall aufgenommenen Vortrag mit dem Hinweis, daß die einzelnen Bauweisen nicht gegeneinander kämpfen, sondern lediglich im Wettstreit stehen und in ihrer Gesamtheit der deutschen Baukunst dienen.

Nach dem von Prof. Dr. Pistor gehaltenen Vortrag meldete sich Oberbaurat Dr. von Emperger zum Wort. Geht man den Ursachen nach, die für eine höhere Ausnutzung und gleichzeitig auch für die Ribbreite maßgebend sind, so ergibt sich dies bei spiegelglatten Drähten durch eine entsprechende Höhe des Kraftwiderstandes, der störende Bewegungen des Stahles im Beton verhindert. Die Ausnutzung des Stahles über die Streckgrenze hinaus sei daher nur eine Frage der Steigerung des Haftwiderstandes. In Amerika wird die Bewehrung mit Knoteneisen allgemein angewendet, in der Ostmark die Bewehrung mit Isteg- oder Torstahl. In Böhmen und Mähren hatte man bereits 1932 den Roxorstahl eingeführt und mit dieser Bewehrungsform bedeutende Brückenbauten geschaffen. Man solle die Einführung solcher Knotenstäbe

²⁾ Der Vortrag wird in Beton u. Eisen veröffentlicht werden.

mit höheren zulässigen Spannungswerten nicht durch zeitraubende Beratungen verzögern. In einem Schlußwort gab der Vorsitzende bekannt, daß vom Deutschen Ausschuß entsprechende Versuche durchgeführt werden sollen.

Baumeister P. Roloff, technischer Aufsichtsbeamter der Nordöstlichen Baugewerks-Berufsgenossenschaft, Berlin, sprach an Hand überzeugender Lichtbilder über „Unfallverhütung auf Baustellen“ (Abb. 2 bis 4). Wenn man mit 1/4 Million gemeldeter Unfälle rechnet, für jeden Unfall etwa 10 Std.

Arbeitsversäumnis durch Hilfeleistung, Verbinden, Ausfüllen der Unfallanzeige usw. ansetzt und die erforderlich werdenden

Wiederinstandsetzungsarbeiten mit berücksichtigt, so käme man auf die erschreckende Zahl von rd. 2,5 Millionen versäumter Arbeitsstunden. Hinzu kommen

Heilbehandlungskosten und persönliche Verluste des Verletzten. Überdies werden die Verluste an Arbeitszeit — es wird ja nicht gleich jede Betriebsstörung zum Unfall — zweifellos ein noch größeres Ausmaß erreichen. Unfallverhütung ist Erhaltung der Arbeitskraft

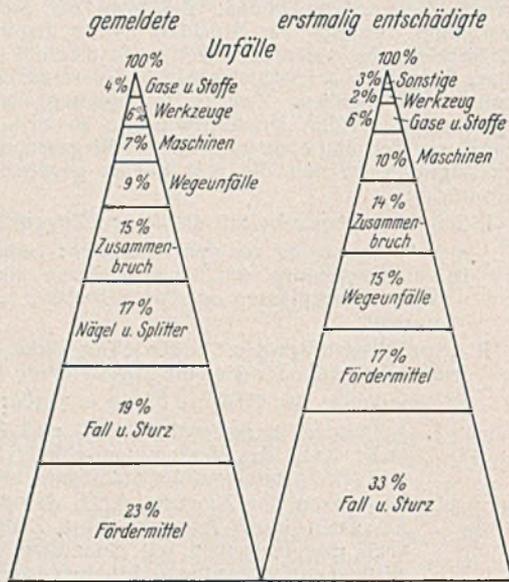


Abb. 2. Darstellung aus der Unfallursachenstatistik der Nordöstlichen Baugewerks-Berufsgenossenschaft Berlin über gemeldete (links) und erstmalig entschädigte (rechts) Unfälle (Vortrag Roloff).

machte Prof. Dr. Garbotz Mittellungen über Versuche mit Straßenfertigern. Diese Versuche wurden in den Jahren 1938 und 1939 durchgeführt und galten der Feststellung, ob einschichtige Betonfahrbahnen auf maschinellem Wege in einem einzigen Arbeitsgang hergestellt werden können. Dabei wurden Rüttel-, Stampibohlen- und Putzbohlenfertiger eingesetzt. Die Versuche ergaben, daß mit Rüttelfertigern eine einwandfreie fortlaufende Deckenfertigung bei 60 oder 120 m Stundenvortriebsgeschwindigkeit für erdfeuchten oder Naßbeton erzielbar ist, wenn der Fertiger mit einer Rüttel-Verdichtungsbohle bei 70 Hz und einer Rüttel-Putzbohle bei 35 Hz ausgerüstet wird.

Der nächste Vortrag behandelte das Thema „Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Betons durch Zusätze“. Dr. Haegermann³⁾, Leiter des Laboratoriums des Vereins Deutscher Portland-Zement-Fabrikanten, behandelte die Frage der Zusatzstoffe, die eigentlich bisher sehr stiefmütterlich behandelt worden ist. Man kann, so führte der Redner aus, ganz allgemein sagen, daß der Bedarf an Feinstanteilen um so größer ist, je wasserreicher die Mischung gehalten werden muß. Ein Überschuß an Feinstanteilen setzt die Verarbeitbarkeit herab oder erhöht den Wasserbedarf und vermindert die Festigkeit. Praktisch kann die erforderliche Menge an Feinstanteilen bei erdfeuchtem Mörtel oder Beton in der Weise ermittelt werden, daß man ohne Änderung des Wasserzusatzes den Zusatzstoff in steigender Menge der Mischung hinzusetzt und nach dem Rütteln oder Stampfen das Raumgewicht, wenn möglich auch die Festigkeit bestimmt. Nehmen Raumgewicht und Festigkeit nicht mehr zu, ist für die angewendete Verarbeitungsweise die günstigste Zusatzmenge erreicht. Gegenüber der Verwendung von Normensand als Zuschlag konnte in Mischung 1:3 bei Ersatz von 12,5% Normensand durch Feinsand, 8% Wasser und Verdichten mit dem Hammergerät die Festigkeit um mehr als 50% gesteigert werden. Der Rütteltisch empfiehlt sich dann, wenn die günstigste Feinstanteilmenge eines weichen Mörtels oder Betons festgestellt werden soll. Bei einem Mörtel, der aus Normensand mit Feinsand und Zement im Verhältnis 3:1 zusammengesetzt wird, ist bei 15% Wasserzusatz zur Erzielung der günstigsten Mischung etwa die doppelte Menge Feinsand erforderlich als bei erdfeuchtem Mörtel. Bei einem dünnflüssigen Mörtel 1:3 zeigten Versuche mit Hilfe eines Trichters für 18% Wasserzusatz die günstigste Mischung bei 30% Feinsand und 70% Normensand, für 23,5% Wasserzusatz bei 44% Feinsand und 56% Normensand. — Neben der Wahl



Abb. 3. Lokomotive stürzte auf einer Kippe ab, weil das Kippgleis nicht sicher verlegt war (Vortrag Roloff).



Abb. 4. Über das nicht gesicherte Gleisende hinübergefahren und abgestürzte Feldbahnwagen (Vortrag Roloff).

unseres Volkes, ist ausgesprochene Gemeinschaftsaufgabe, Dienst und Fürsorge für den schaffenden Menschen. Unfälle werden dort verhütet, wo eine sachgemäße Betriebssicherheit gepflegt wird. Wenn auch einige Großbetriebe in Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft bereits ihre erfahrensten Oberbauleiter mit in die Dienste der Unfallverhütung gestellt haben, so bleibt in diesen Dingen noch mancherlei zu tun übrig. Weitere Erfolge können nur durch freiwillige Mitarbeit der Baustellen erzielt werden. Die Kosten, die durch die mit einem Unfall verbundenen Betriebsstörungen entstehen, sind erfahrungsgemäß erheblich höher als die Kosten, die durch die Betreuung der vom Unfall betroffenen Gefolgschaftsmitglieder erwachsen. Der lebendige, in völlig freier Rede gehaltene Vortrag fand besonderen Beifall. Zum Schluß zeigte der Redner einen von ihm selbst mit einem Ikonon-16 mm-Tonfilm-Aufnahmegerät der Zeiß-Ikon-AG, Dresden, als Schmalfilm aufgenommenen Tonfilm aus seinem Arbeitsgebiet.

Es sprach dann Professor O. Graf zu dem Thema „Über das Rütteln des Betons“. Er berichtete über die damit gewonnenen Erfahrungen und zeigte, welche Verbesserung der Güte des Betons mit diesem neuartigen Arbeitsverfahren erzielt werden kann⁴⁾. Im Anschluß an diesen Vortrag

der richtigen Menge des Zusatzstoffes spielt ferner seine Körnung für die Verarbeitbarkeit eine beachtliche Rolle. Je feiner ein Stoff gemahlen ist, um so kleiner ist sein Raumgewicht. Bei sehr fein gemahlenden Stoffen die z. B. 2% Rückstand auf dem 4900-Sieb aufweisen, ist der Wasserbedarf größer als bei solchen Stoffen, deren Rückstand etwa 10% beträgt. — Hochofenschlacke und Traß sind Zusatzstoffe, die nicht nur als Füller wirken, sondern auch selbst wirksam in die Erhärtung eingreifen. Durch das neue deutsche Normenprüfverfahren wird eine den praktischen Bedürfnissen entsprechende bessere Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften von Zusatzstoffen (bei weitgehender Ausschaltung der reinen Füllwirkung) ermöglicht. Bei Anwendung solcher Zusatzmittel, die den Wasserbedarf des Betons herabsetzen sollen, ist gewisse Vorsicht am Platze. Die Frage solcher Mittel wird z. Z. von einem Ausschuß des Deutschen Beton-Vereins eingehend geprüft.

Den Abschluß der Tagung bildete ein Vortrag von Dr. Arndt, Vorstandsmitglied der Philipp Holzmann AG., Frankfurt a. M., über eine größere deutsche Auslandsarbeit.

C. Kersten.

³⁾ Der Vortrag wird demnächst in der Bautechnik veröffentlicht werden.

⁴⁾ Der Vortrag wird in Beton u. Eisen veröffentlicht werden.

Vermischtes.

Eine Sondertagung über die Metallurgie des Schweißens findet am Freitag, dem 26. April 1940, in Hannover in der Technischen Hochschule statt. Folgende Vorträge sind vorgesehen: Dr.-Ing. K. Tewes, Düsseldorf: „Metallurgische Vorgänge beim Schweißen und ihre Beobachtung unter dem Mikroskop“. — Obering. W. Hoffmann VDI, Berlin: „Mikro-Härteprüfung an Schweißverbindungen“. — Dr.-Ing. habil. K. Jurczyk, Aachen: „Das elektrische Lichtbogenschweißen dicker Wandungen“. — Dr.-Ing. P. Brenner, Hannover: „Metallurgische Fragen der Leichtmetallschweißung“. — Oberreichsbahnrat Dr.-Ing. R. Kühnel VDI, Berlin: „Schweißbarkeit von Stahl, Betrachtungen und Versuchsergebnisse“. — Prof. Dr.-Ing. E. H. Schulz VDI und Dr.-Ing. habil. W. Bischof, Dortmund: „Über die Aufhärtung von niedrig legierten hochfesten Baustählen beim Schweißen.“ — Dr.-Ing. K. L. Zeyen VDI, Essen: „Untersuchungen über statische und Dauerfestigkeit von geschweißtem Baustahl St 52 nach verschiedenen Wärmebehandlungen und nach Schweißung unter Vorwärmung.“

Schinkelfest des Architekten- und Ingenieurvereins Berlin. Beim diesjährigen Schinkelfest am 13. März nahm der Preußische Finanzminister Professor Dr. Popitz die Verteilung des Schinkelpreises vor. Er überreichte die Schinkelplakette dem Bauassessor Dr. Richard Klamt in Friedland (Isergebirge) und dem Regierungs-Baureferendar Wolfgang Fraustadt in Leipzig für die besten Entwürfe zu einem Weihebau der deutschen Technik. Die Preisaufgaben auf dem Gebiete des Wasser- und Straßenbaus und des Eisenbetonbaus haben in diesem Jahre — wohl wegen des Krieges — keine Bewerber gefunden.

Den Festvortrag hielt Ministerialrat Leopold vom Reichsverkehrsministerium über neuere Entwicklungsrichtungen in der Wasserwirtschaft der Reichswasserstraßen¹⁾. Der Redner ging aus von der geschichtlichen Entwicklung der deutschen Wasserstraßen, wobei er die richtunggebenden wasserwirtschaftlichen Maßnahmen Friedrichs des Großen und die grundlegenden Entscheidungen hervorhob, die Bismarck im Jahre 1877 durch Veröffentlichung einer großzügigen, die Arbeit der folgenden Jahrzehnte bestimmenden Planung des deutschen Wasserstraßennetzes und im Jahre 1883 durch Schaffung der preußischen Wasserbauverwaltung als Hoheitsverwaltung traf. Er sprach dann von den Schwierigkeiten, die sich nach dem Weltkriege durch die starke Betonung der Verkehrswirtschaft in der Reichsverfassung ergaben, und legte dar, daß die Gefahr der Vernachlässigung der übrigen wasserwirtschaftlichen Erfordernisse im wesentlichen durch die vernünftige Handhabung der gesamten Wasserbau- und Wasserwirtschaftsverwaltung vermieden worden sei. Weiter gab er ein Bild der Vielgestaltigkeit und des Ineinandergreifens aller Fragen, die mit dem Wasser zu tun haben. Dabei teilte er mit, daß der Reichsverkehrsminister zur Förderung der wissenschaftlichen Behandlung aller Wasserwirtschaftsfragen im Juli v. J. bei der Wasserstraßendirektion Berlin ein hydrographisches Institut und im Januar d. J. ein Archiv für die Wasserwirtschaft der Reichswasserstraßen beim Reichsverkehrsministerium geschaffen habe. Schließlich gab der Redner einen Ausblick auf die neuen Aufgaben, die sich aus dem Anschluß des deutschen Wasserstraßennetzes an den Donauraum und an das russische Wasserstraßennetz ergeben.

Vorschriften für geschweißte Stahlhochbauten (Din 4100). Der Reichsarbeitsminister hat unter dem 6. Februar d. J. — IV 2 Nr. 9603/43/40 — den folgenden Runderlaß an die Baupolizeiverwaltungen der Länderregierungen einschließlich Ostmark und Sudetengau — außer Preußen — und an den Reichskommissar für das Saarland herausgegeben, dem sich der Preuß. Finanzminister mit Runderlaß vom 24. 2. 1940 — Bau $\frac{2111}{9}$ 6. 2. — für seinen Bereich angeschlossen hat.

„Unter der Aufhebung meines Runderlasses vom 10. November 1938²⁾ — IVc 4 Nr. 8610a 72 — über das Schweißen von Baustahl St 52 wird auf Grund der inzwischen durchgeführten Erhebungen der § 2 Ziff. 1 der obengenannten Vorschriften durch folgende Fassung ersetzt: Als Werkstoff darf nur St 37.12 und St 37.21 (nach DIN 1612 u. 1621) und St 52 nach den Vorschriften³⁾ der Deutschen Reichsbahn verwendet werden⁴⁾. St 52 in Dicken > 30 mm ist nur von Werken zu verwenden, die auf Grund besonderer Prüfung von der Deutschen Reichsbahn zugelassen⁵⁾ sind.“

Bei St 37.12 kommt Thomasstahl für Breitflachstahl, Gurtplatten mit Stegansatz, bei Nasenprofilen u. dgl. nur in Betracht, wenn die Dicke ≤ 25 mm ist, bei sonstigen Walzwerkerzeugnissen bis 50 mm Dicke.

Bleche aus St 37.21 dürfen nur bei Dicken ≤ 20 mm in Thomasgüte verwendet werden.

Werden ausnahmsweise Gurtplatten (auch solche mit Stegansätzen usw.) verwendet, die dicker als 30 mm sind, so müssen diese den Sondervorschriften der Deutschen Reichsbahn für dicke Gurtplatten²⁾ entsprechen. Das Zeugnis über das Ergebnis der dort vorgeschriebenen Aufschweißbiegeversuche ist bei Bauten aus St 37.12 und aus St 52 den Baugenehmigungsbehörden vorzulegen.

Ich bitte, Ihre nachgeordneten Behörden entsprechend zu unterrichten.“

¹⁾ Der Vortrag wird in Kürze im Ztrbl. d. Bauv. wiedergegeben werden.

²⁾ Bautechn. 1939, Heft 1, S. 18. — Ztrbl. d. Bauv. 1938, S. 1442.

³⁾ Zu beziehen vom Reichsbahn-Zentralamt Berlin, Hallesches Ufer 76.

⁴⁾ Bei der Stahlbestellung ist anzugeben, daß der Stahl für geschweißte Bauteile verwendet werden soll.

⁵⁾ Auskunft erteilt hierüber das Reichsbahn-Zentralamt Berlin, Dezernat 79.

Berechnungsgrundlagen für stählerne Bohrtürme für Tiefbohrungen und stählerne Fördertürme für Erdöl-gewinnung (DIN 4111). Der Reichsarbeitsminister hat die genannten Berechnungsgrundlagen¹⁾ (DIN 4111, Blatt 1) als Richtlinie für die Baupolizei eingeführt und Blatt 2 der DIN 4111, das für vier Bohr- und zwei Förderturmgrößen die Maße, Baustoffe und Regellasten festlegt, zur Beachtung empfohlen.

Bücherschau.

Klippel, H.: Gefahren an wasserdruckhaltenden Dichtungen und deren Beurteilung. IV, 35 S. mit 42 Abb. Berlin 1940, Verlag von Wilh. Ernst & Sohn. Preis geh. 2,60 RM.

Die im Verlage von Wilh. Ernst & Sohn erscheinende Schriftenreihe „Mitteilungen aus dem Gebiete des Wasserbaues und der Baugrundforschung“ erhält durch die Arbeit von Klippel einen wertvollen Beitrag durch Behandlung der Abdichtungsfragen bei der Ausführung von Bauwerken in drückendem Grundwasser.

Verfasser gibt einleitend eine allgemeine Übersicht über die verschiedenen Abdichtungsarten bei Massivbauwerken und unterscheidet zwei Gruppen: 1. Dichtungen durch Porenfüllung und 2. Dichtungen durch eine Haut. Der Verfasser hebt hervor, daß bei Bauwerken, bei denen schon eine wahrnehmbare Nässe oder Feuchtigkeit den Wert des Gebäudes in Frage stellen kann und eine unbedingt sicher wirkende Abdichtung gefordert werden muß, sich von den heute bekannten Dichtungen die Asphaltpappdichtung — insbesondere bei drückendem Grundwasser — als durchaus zuverlässig erwiesen hat. In dem vorliegenden Heft sind deshalb diese Dichtung, die an sie zu stellenden Anforderungen und die ihrem Bestande drohenden Gefahren ausführlich behandelt, vornehmlich in ihrer Anwendung bei Betonbauten.

Eine Dichtung mit den verschiedenen Pappen und Klebemassen kann sachgemäß nur durch einen erfahrenen Sonderunternehmer ausgeführt werden, der mit den unterschiedlichen Wirkungsweisen vertraut ist. Aber auch der Entwurfsbearbeiter muß die Eigenheiten und Eigenschaften der Dichtungsstoffe so hinreichend kennen, daß er ihnen bei der Entwurfsgestaltung in genügender Weise Rechnung tragen kann. Hier will die vorliegende Arbeit vermitteln.

Bei der Besprechung der mechanischen Einflüsse auf die Dichtung vergleicht der Verfasser besonders die Reibungswiderstände, die sich bei Versuchen im Prüfraum ergeben haben, mit Beobachtungen und Rückschlüssen aus dem praktischen Baubetrieb. Es werden mannigfache Anregungen gegeben für die Ausschaltung von Fehlerquellen bei der Entwurfsgestaltung und der Bauausführung, alles erläutert an zahlreichen Beispielen und Abbildungen. So wird u. a. auf die Einwirkung des Arbeitsvorganges auf die Entwurfsgestaltung des Bauwerkes bei Unterfangungsbauwerken im Grundwasser eingegangen an Hand eines vom Verfasser zur Ausführung gebrachten Beispiels. Es wird weiterhin erläutert, welche Ansprüche bei abzudichtenden Bauwerken an den Beton in seiner Beziehung zur Abdichtung zu stellen sind. Zum Schluß geht der Verfasser noch auf die Frage ein, ob aus Rammerschütterungen dem Bestand einer wasserdruckhaltenden Dichtung Gefahr droht.

Allen Ingenieuren und Architekten, die sich mit Gründungsentwürfen befassen, wird dieses Heft in Dichtungsfragen bei Betonbauten wertvolle Auskunft und Anregung geben; der bauleitende Ingenieur kann aus ihm entnehmen, welche Maßnahmen zu treffen sind, um die Dichtungsarbeiten sachgemäß durchzuführen und die Abdichtungen in ihrem Bestand durch den Baubetrieb nicht zu schädigen. Tiedemann.

Schlink: Technische Statik. Ein Lehrbuch zur Einführung ins technische Denken. IX, 386 S. mit 463 Textabb. Berlin 1939, Julius Springer. Preis geh. 27,60, geb. 29,40 RM.

Die Statik wird dem werdenden Ingenieur in steigender Anpassung an die Forderungen der Praxis im Physikunterricht, in den Vorlesungen über Technische Mechanik und über die Baustatik nahegebracht. Das vorliegende Werk behandelt den Stoff als Teil der Technischen Mechanik, und zwar als den Teil, der mit der Bezeichnung „Statik starrer Körper“ genauer umrissen wird. Diese Begrenzung schließt also, weil die Möglichkeit der Formänderung der Körper außer acht bleiben soll, die Berechnung statisch unbestimmter Tragwerke aus; sie gestattet noch Erläuterungen über den Begriff und den Grad der statischen Unbestimmtheit.

Das Werk, das aus den Vorlesungen des Verfassers an der Technischen Hochschule Darmstadt entstanden ist, wendet sich zwar an Studierende und Ingenieure aller Fachrichtungen, doch dürfte es uns Bauingenieuren am meisten zu sagen haben. In seiner klaren, umfassenden und allgemeinen Behandlung des Stoffgebiets gibt es eine vortreffliche Grundlage für das Studium der Baustatik, die selbst sich im wesentlichen nur mit den im Bauwesen üblichen Tragwerksformen befassen kann. Die Fülle und Schwierigkeit des an den Hochschulen bei recht knapper verfügbarer Zeit in der Baustatik zu Erlernenden macht gründliche Vorkenntnisse in der allgemeinen Statik zur Bedingung, von der ohne Schaden in keinem Fall abgegangen werden darf.

Auch zum Selbststudium eignet sich das vorliegende Werk sehr gut, denn „auf die Punkte, die dem Anfänger erfahrungsgemäß Schwierigkeiten machen, ist besonders ausführlich eingegangen, und immer wieder wird auf die Anleitung zum selbständigen Denken Wert gelegt“. Das Verständnis für das Allgemeine und Grundsätzliche wird in glücklicher Form

¹⁾ Wortlaut s. Ztrbl. d. Bauv. 1940, Heft 12, S. 186.

vermittelt. Hierdurch wird das Buch auch für den praktisch tätigen Ingenieur wertvoll, der über der Behandlung immer wiederkehrender Sonderaufgaben zwar vielfach zum geübten Fachmann wird, aber nur zu oft dabei den Blick für das Allgemeine und Grundlegende verliert und daher mitunter versagt, wenn außergewöhnliche Fälle behandelt werden sollen.

Im Sinne der beabsichtigten allgemeinen Behandlung des Stoffes sind außer dem ebenen Problem, das ja nur einen — allerdings in der Statik mit Rücksicht auf die praktischen Erfordernisse den breitesten Raum einnehmenden — Sonderfall darstellt, besonders ausführlich die Kräfte im Raum und die räumlichen Tragwerke behandelt. Hervorhebung verdienen u. a. auch die eingehenden Darlegungen über die mit „Gemischtbauweise“ bezeichneten Tragwerke, die aus vollwandigen, also biegesteifen, und aus fachwerkartig gegliederten Teilen zusammengesetzt sind.

Auf die Fülle des sonstigen Inhalts und der gegebenen Anregungen kann hier im übrigen nicht eingegangen werden. Aus dem Gesagten geht aber schon zur Genüge hervor, an wen sich das Buch wendet, und diesen Männern kann es zur sorgfältigen Beachtung nur wärmstens empfohlen werden.
Berrer.

Voß, Fr., Architekt: Kalkulations-Hilfsbuch für das Baugewerbe. I. Teil. 5. neubearbeitete und erweiterte Auflage. 123 S. Berlin 1940, Verlag von Wilh. Ernst & Sohn. Preis steif geh. 3 RM.

Das Kalkulationsbuch von Voß hat sich gut eingeführt. Es erschien in 1. Auflage im Jahre 1932 und liegt nun schon in 5. Auflage vor. Zur Besprechung gelangen die folgenden Kapitel: Erd-, Maurer- und Putzarbeiten, die Estrich- und Fliesen-, Asphalt- und Dichtungsarbeiten, die Beton- und Eisenbeton-, Zimmer- und Dachdeckerarbeiten, schließlich noch Abbruch- und Gerüstarbeiten. Den Abschluß bilden Angaben über Baustoffverbrauch und Bedarf an Arbeitszeit für Ziegelsteine verschiedener Größe. — Die listenmäßigen Aufstellungen sind übersichtlich angeordnet und lassen den jeweilig nötigen Baustoffverbrauch und die Arbeitszeit je Einheit schnell erkennen. Die gegebenen Werte stimmen zwar nicht in allen Punkten mit denen der Baugewerbe-Innungen überein; man wird in der Preisberechnung und der Geschäftskosten-Ermittlung mehr oder weniger von Zeitumständen und örtlichen Bedingtheiten abhängig sein. Jedenfalls hätte ein Einsetzen von Preisen bei den einzelnen Lieferungen und Arbeiten immer nur eine recht beschränkte Gültigkeit. Das Voßsche Kalkulationsbuch wird auch in seiner Neuauflage bestens dazu beitragen, zwischen verschiedenen Angeboten eine tunlichst günstige Mittellinie zu finden. Der Neuauflage ist weiteste Verbreitung zu wünschen.
C. Kersten.

Grün, R., Dr. phil., Professor: Chemie für Bauingenieure und Architekten. IX, 144 S. mit 58 Abb. Berlin 1939, Julius Springer. Preis geh. 9,60, geb. 11 RM.

Während über mehrere Jahrtausende die Beschaffenheit der Baustoffe unverändert geblieben war, hat etwa seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts die Entwicklung neuer Baustoffe eingesetzt, die in ihrer heutigen Güte dem Architekten ungeahnte Möglichkeiten für seinen Form- und Gestaltungswillen geben, aber auch nicht minder große Anforderungen an seine künstlerischen Fähigkeiten stellen wie die Ausführungen mit Baustoffen früherer Zeiten.

Es gibt Architekten, die die Baustoffkunde und erst recht die Chemie der Baustoffe für unwesentliche Wissensgebiete halten, ja einzelne lehnen den Fortschritt der Technik auf diesem Gebiete grundsätzlich ab. Hohle Schlagworte, wie z. B. „Zement verdirbt den Charakter“, beweisen, daß die Betreffenden mit den neuzeitlichen Baustoffen nichts anzufangen wissen.

An diese wendet sich das vorliegende Buch nicht, obwohl sie darin auch einiges über die „alten“ Baustoffe finden, wohl aber wendet es sich an jene, die die Fortschritte der Technik aufgreifen und nutzbar machen wollen.

Nach einer kurzen Einleitung über den Begriff „Chemie“ und über die Geschichte der Baustoffe geht Verfasser allgemein auf chemische Formeln ein und behandelt dann im einzelnen die Natursteine, die Bindemittel (Kalk, Gips, Zemente), den Aufbau des Betons und seinen Schutz gegen schädliche Einflüsse. In einem weiteren Abschnitt werden die Kunststeine mit Gips, Kalk und Zement als Bindemittel und Leichtbeton mit verschiedenen Zuschlagstoffen, wie Bims und Hochofenschlacke, besprochen. Schließlich werden neben den aus flüssiger Hochofenschlacke gegossenen Steinen Ziegel und Tonwaren erörtert. Einige Seiten sind dem Eisen und Stahl sowie den Leichtmetallen gewidmet.

Im zweiten Teil des Buches geht Verfasser auf die organischen Baustoffe, wie Holz, Kunstharz, Dachpappe, Klebstoffe und Kitt ein. Anstrichfarben und Schutzanstriche bilden den Schluß. Der Text wird durch zahlreiche Abbildungen ergänzt.

Das Buch gibt einen guten allgemeinen Überblick über die Gewinnung und die Eigenschaften der Baustoffe, so daß es entsprechend der Absicht des Verfassers als Ratgeber für Bauingenieure und Architekten bestens empfohlen werden kann.
Haegermann.

Faerber, J., Statische Gebrauchswerte. 86 S. mit 49 Abb. Stuttgart 1939, Konrad Wittwer. Preis geh. 4,20 RM.

Verfasser will so vollständig wie nur möglich erhebliche Lücken in den bisher vorhandenen Formelsammlungen schließen. Lücken wird es in solchen Sammlungen stets geben, wenn man von ihnen verlangt, daß sie für jeden nur möglichen Belastungsfall die entsprechenden Formeln enthalten. Ein derartiges Ziel streben aber die bisher erschienenen Formelsammlungen gar nicht an; sie beschränken sich mit Recht auf die

häufig vorkommenden Belastungsfälle. Für seltener vorkommende Fälle muß der Ingenieur sich die Werte selbst entwickeln.

Auch der Verfasser der „Statischen Gebrauchswerte“ schließt die angeblichen Lücken durchaus nicht: in den drei Abschnitten des Buches behandelt er lediglich den Träger auf zwei Stützen, den elastisch eingespannten Träger und den Kragträger. Die behandelten Belastungsfälle sind zum großen Teil aus den vorhandenen Tafelwerken bekannt, zum Teil behandeln sie sehr selten vorkommende Fälle, z. B. parabolische Streckenbelastung usw. Der Titel des Buches ist zu umfassend und daher leicht irreführend. Zutreffender hätte er lauten müssen: Einige statische Gebrauchswerte.

Davon abgesehen ist die Darstellung sehr klar und kann als Studie empfohlen werden.
Franz Boerner.

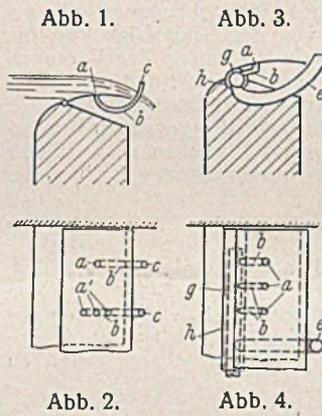
Roloff, P., Die Eisenbetonbaustelle, Teil I. Band 8 der Schriftenreihe für die Bauberufe. 154 S. mit 84 Textabb. Berlin 1939, Verlag der Deutschen Arbeitsfront. Preis geh. 2,75, i. L. geb. 3,40 RM.

Der Verfasser bringt auf Grund eigener langjähriger Baustellentätigkeit allerhand Richtlinien und Fingerzeige für die Einrichtung einer Baustelle. Bücher solcher Art sind in jedem Falle zu begrüßen; den Belangen des Vierjahresplans ist, sofern man sich für bestimmte Baustoffe und Bauweisen entschieden hat, in erster Linie auf dem Bauplatz selbst Rechnung zu tragen. Einiges in dem vorliegenden Buche erscheint ein wenig ergänzungsbedürftig. Anderes könnte gekürzt, wenn nicht ganz gestrichen werden. So wird z. B. den ehemals viel angewendeten hohen Gießtürmen mit ihren Fliegerrinnen kaum noch eine sonderlich günstige Zukunft beschieden sein; ein kurzes Eingehen auf den Pump- und den Rüttelbeton erscheint jetzt angebrachter. Doch das nur nebenbei. Das Buch enthält viel Gutes und Brauchbares für jeden anzulernenden Bauleiter und kann durchaus empfohlen werden.
C. Kersten.

Patentschau.

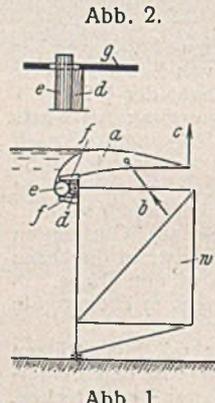
Einrichtung zur Verhinderung von Schwingungen des Wehrkörpers bei überströmten Wehren. (Kl. 84a, Nr. 649 468, vom 28. 5. 1935, von Firma August Klönne in Dortmund.)

Um die durch Hohlräume zwischen dem Wasserstrahl und der benetzten Stauwand sich bildenden Schwingungen zu verhüten, sind an die Öffnungen der Stauwand auf der unbenetzten Seite Rohre angeschlossen, die in allen schwingungsgefährdeten Wehrstellungen in unmittelbarer Verbindung mit der Außenluft stehen. Hierdurch wird bei allen Stellungen des Wehrkörpers das Entstehen eines Unterdruckes verhindert, und Schwingungen werden beseitigt. Die Klappe hat eine Anzahl von Öffnungen *a*, an die sich Rohre *b* anschließen, die bei *c* in die Außenluft münden. Es können auch über die Länge des Wehres verteilte Gruppen von Öffnungen *a'* vorgesehen sein. Die Rohre *b* können zu einem Sammelrohr *g* führen, das in der hohlen Welle *h* der Klappe angeordnet ist und mit Belüftungsrohren *e* in Verbindung steht.



Bewegliches Wehr mit Stauklappe. (Kl. 84a, Nr. 654 071, vom 17. 1. 1935, von Firma Aug. Klönne in Dortmund.)

Um mit einfachen Mitteln zu erreichen, daß die Stauklappe in allen Stellungen durch den Wasserdruck fest gegen den Dichtungskörper gedrückt wird, ist der untere, mit der Drehwelle verbundene Teil der Stauklappe hakenförmig zum Unterwasser hin gekrümmt, und der Hauptwehrkörper trägt am oberen Ende seiner Stauwand einen Dichtungskörper, gegen den sich die in waagerechter Richtung frei verschiebbar angeordnete Drehwelle der Stauklappe unter der Wirkung des Wasserdrucks legt. Die Stauklappe *a* des als Schützenwehr ausgebildeten Wehrkörpers *w* wird durch Stangen *b* oder Ketten *c* an ihrem freien Ende gehalten. Der untere Teil der Klappe ist an der Unterkante mit einer Drehwelle *e* verbunden, die sich gegen eine Dichtungsfläche *d* aus Holz, Metall od. dgl. legt. Die Welle *e* wird durch Halter *f* gestützt, an beiden Enden verlängert und dort in den Seitenschildern *g* des Wehrkörpers *w* drehbar und in der Strömungsrichtung verschiebbar gelagert. Der Dichtungskörper dient gleichzeitig als Lager für die Drehwelle.



INHALT: Umbau einer Eisenbahnbrücke. — Gleitflächen, Prüflflächen und Erddruck. — Vortragstagung des Deutschen Beton-Vereins. — Vermischtes: Eine Sondertagung über die Metallurgie des Schweißens. — Schinkelfest des Architekten- und Ingenieurvereins Berlin. — Vorschriften für geschweißte Stahlhochbauten (DIN 4100). — Berechnungsgrundlagen für stählerne Bohrtürme für Tiefbohrungen und stählerne Fördertürme für Erdölgewinnung (DIN 4111). — Bücherschau. — Patentschau.

Verantwortlich für den Inhalt: Dr.-Ing. Erich Lohmeyer, Oberbaudirektor a. D., Berlin. Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin W 9. Druck: Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.