DIE BAUTECHNIK

16. Jahrgang BERLIN, 6. Mai 1938 Heft 19

Alle Rechte vorbehalten.

Die Umbauarbeiten der Margarethen-Donaubrücke in Budapest.

Von Oberingenieur Dr. jur. Dipl.-Ing. Karl von Széchy, Budapest.

(Schluß aus Heft 17.)

Die Höhe der eigentlichen Senkkastenkonstruktion betrug 3,5 m, während die zu durchdringende Wassertiefe zwischen 5,5 und 8,5 m schwankte. Zur Verdrängung der über der Konstruktionsoberkante liegenden 2 bis 5 m hohen Wassersäule wurden hier statt der bisher allgemein angewendeten 1 bis 2 m dicken Betonwände 0,3 m dicke kastenförmig ausgebildete Eisenbetonwände angewendet. Ferner wurden statt der mit Rundholzpölzung ausgesteiften und sich an die Blechummantelung des Senkkastens anschließenden, wasserdicht ausgebildeten Mantelblechumhüllung — die die Ausführung der unter dem MW liegenden Teile der aufgehenden Pfeilermauer ermöglichte — spundbohlenartig zusammengestellte Holzwände benutzt, die mit umlaufenden Winkeleisengurten zusammengehalten, von der Wasserseite mit einem ganz dünnen Blechmantel bedeckt, und schließlich von unten mittels Schrauben zu einem auf der Oberkante des Fundamentkörpers einbetonierten, rings herumlaufenden Winkeleisen befestigt wurden. Nach der Fertigstellung dieses Mauerteils wurden die Schrauben unter Wasser von einem Taucher herausgenommen und dadurch die Holzwand aufgeschwemmt (Abb. 11).

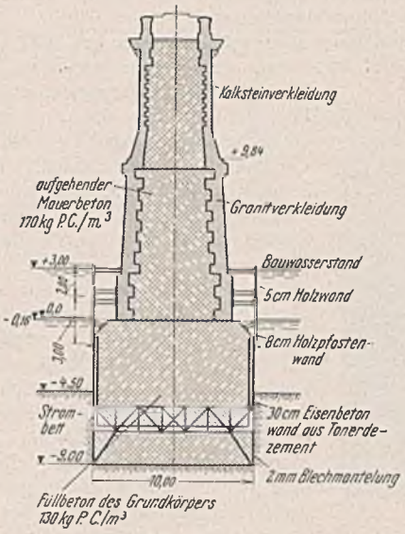

Abb. 11. Querschnitt einer Strompfeilerverlängerung mit den zur vorläufigen Wasserhaltung angewendeten oberen Holzwänden.

Diese Gründungskörper der Pfeilerverlängerungen wurden in 0,7 bis 1 m Abstand stromabwärts von den alten Pfeilergründungen mittels Druckluft abgesenkt. Inzwischen hatte man auch die unterstromseitigen Vorköpfe der alten Pfeiler mit den auf diesen aufgebauten Verzierungen und Bildwerken mit der 100 bis 130 cm dicken alten Granitsteinverkleidung zusammen mit größter Sorgfalt bis zum Wasserspiegel hinunter abgebaut.

Zur Ermöglichung des weiteren Abbaues des alten Pfeilermauerwerks sowie auch des Wiederaufbaues wurde eine offene Wasserhaltung angeordnet, und zwar so: 10 m lange Larssenspundwandbohlen wurden beiderseitig neben dem Pfeiler in das Flußbett eingerammt, die sich einerseits an die obenerwähnte Holzwanderhöhung des Gründungskörpers, anderseits an die alten und ungestörten Pfeilerwände (Abb. 12) anschlossen. Von der so entstandenen offenen Baugrube wurde das einsickernde Wasser mit kleinen Kreiselpumpen ausgesaugt und der Wasserspiegel ständig unter Null gehalten. So konnte man die noch fehlenden Teile des alten Pfeilermauerwerks auch abbauen und den neuen Pfeileroberbau als den die beiden Fundamente überbrückenden, 9 m hohen Eisenbetonbalken aufbauen (Abb. 13). Die so eisenbetonbalkenartig ausgebildeten neuen Pfeilervorköpfe sollten mit ihrem großen Widerstandsmoment und entsprechender Tragfähigkeit auch gegen die zu erwartenden ungleichmäßigen Absenkungen der alten und der neuen Fundamente Gewähr leisten und die etwaigen Ungleichmäßigkeiten ausgleichen, bis das Gleichgewicht des Untergrundes wiederhergestellt wird.

Abb. 12. Offene Wasserhaltung zwischen den Gründungen des alten Strompfeilers (rechts) und der neuen Pfeilerverlängerung (links).

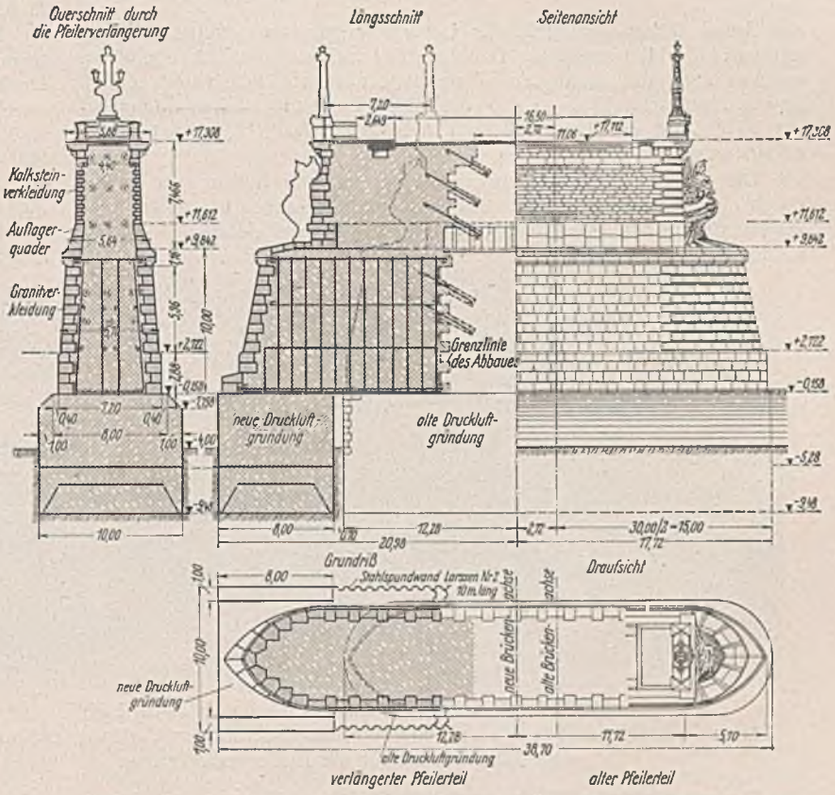

Abb. 13. Verlängerung der alten Strompfeiler.

Bei dem Wiederaufbau der verlängerten unterstromseitigen Pfeilervorköpfe wurden alle Steine der alten Granit- und Kalksteinverkleidung und die der Verzierungen ausgenutzt, und zwar, weil man auch Verkleidungsmaterial für die verlängerten Flächen schaffen mußte, wurden gleich nach dem Abbau die 1 bis 1,3 m dicken alten Granitblöcke entzweigespalten (geritzt) und die so entfallenen und neuerdings bearbeiteten hinteren Teile zur Verkleidung der neuen Flächen verwendet.

Diese Bauweise ermöglichte, daß man auf die schwierige und kostspielige Einfuhr des ausländischen Granitmaterials vollständig verzichten konnte.

Das Verkleidungsmaterial über der Kämpferhöhe (+ 9,84 m) bestand auch früher aus Kalk- und Sandstein, die leicht von den Steinbrüchen in der Nähe von Budapest zu besorgen waren. Daher wurden hier die abgebauten Steinblöcke nicht gespaltet, sondern die neuen Flächen konnten mit ähnlichem neuem Material verkleidet und die beim Abbau etwa zerbrochenen oder ausgefrorenen Stücke durch neues Material ergänzt werden.

Der zu dem Aufbau der neuen Pfeilerteile angewendete Beton wurde aus örtlichem Donausand und Kies und aus Totiser Portland- bzw. Tonerdezement hergestellt. Die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe wurde

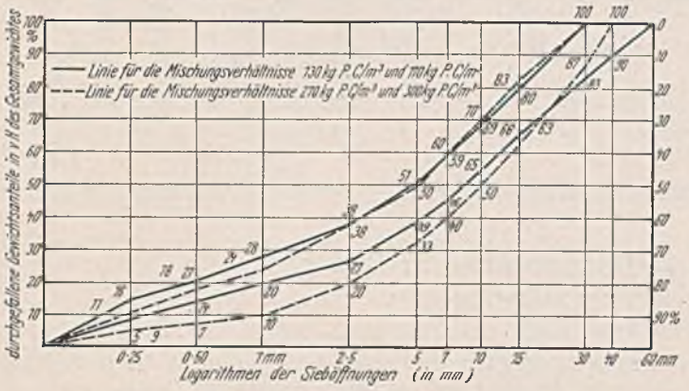

Abb. 14. Grenzkurven für die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe des Betons.

auf Grund früher durchgeführter Laboratoriumsversuche mittels Grenzkurven (Abb. 14) festgesetzt. Dabei wurden nicht nur das Zementgewicht, sondern auch die mindesten Würfelfestigkeitswerte der verschiedenen Betone vorgeschrieben, so daß bei einer Ersparnis an Zementgewicht von 10 bis 20 % die Gleichmäßigkeit und nötige Festigkeit des Betons gesichert wurde.

Die vorgeschriebenen Kornzusammensetzungen ließen sich immer durch die Mischung von höchstens zwei Naturkiessanden herstellen, aber meistens hatte das vom Donaubett ausgebaggerte Material die Voraussetzungen gleich erfüllt.

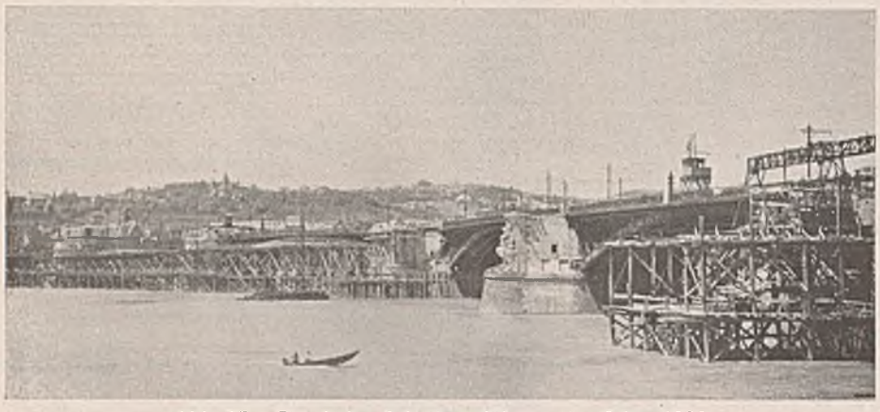

Abb. 15. Stand der Arbeitsausführung im Jahre 1936.
Links: Montagegerüst für die neue Stahlkonstruktion; rechts: Verlängerter Strompfeiler und Arbeitsgerüst für die Pfeilerverlängerung.

Die angewendeten Mischungsverhältnisse und die vorgeschriebenen Mindestfestigkeitswerte waren die folgenden:

Fundamentbeton: Bei einem Zementzusatz von 130 kg/m³ wurde eine Würfelfestigkeit (20-cm-Würfel) $W_{28} = 100$ kg/cm² festgelegt.

Mauerbeton: Bei einem Zementzusatz von 170 kg/m³ wurde eine Würfelfestigkeit $W_{28} = 150$ kg/cm² festgelegt.

Eisenbeton: Bei einem Zementzusatz von 270 kg/m³ wurde eine Würfelfestigkeit $W_{28} = 250$ kg/cm² festgelegt.

Abb. 16. Elektrischer Laufkran für die Montage der zwei neuen Hauptträger.

Alle diese vorgeschriebenen Werte wurden ohne Schwierigkeiten während des ganzen Baues eingehalten, und damit wurde neben den Ersparnissen bei den Herstellungskosten auch die Gleichmäßigkeit des Betons durchaus gesichert.

b) Die Montage der eisernen Überbauten.

Die Arbeiten der unterstromseitigen Verlängerungen der Brückenpfeiler in dem rechtseitigen Donauarm wurden in zwei Gruppen, von je einer Baustelle auf dem rechten Ufer und auf der Margarethenlinsel aus, von zwei Unternehmern noch im Jahre 1935 vollendet, um diesen Raum für die planmäßig im folgenden Jahre in Arbeit zu nehmende Montage des neuen unterstromseitigen Teiles der Überbauten für 1936 zu überlassen, während die Unterbauten in dem linken Donauarm fortschritten (Abb. 15).

Die Montage geschah auf einem festen Gerüst, bestehend aus eingerammten und in der Längs- und Querrichtung mit doppelten Querstreben zueinander gebundenen und versteiften Holzpfählen, auf denen die auf I-förmigen eisernen Längsträgern aufgebaute bogenförmige hölzerne Montagebühne hergestellt wurde.

Neben dem eigentlichen Montagegerüst wurde eine hölzerne Laufbahn, auch auf eingerammten Pfählen, für die Bewegung der elektrischen Laufkrane hergestellt (Abb. 16).

Die Stahlkonstruktion wurde nämlich in Werkstätten hergestellt und in 6 bis 7 m langen Stücken an Ort und Stelle geliefert. Die einzelnen Stücke wurden mittels dieser Krane, von den — auf dem Ufer liegenden — Lagerplätzen aufgehoben und gleich zu dem richtigen Platz auf der Montagebühne eingeliefert.

Beide neuen Hauptträger wurden aus St 37 als Zweigelenkbogenträger ausgebildet, wo man aus Ähnlichkeits- und Schönheitsgründen auch das versteifende Doppelfachwerk nicht wegfallen lassen konnte (Abb. 17). Doch um die vielfachen statischen Unbestimmtheiten und die davon stammende hochgradige Unsicherheit zu vermeiden, wurden die Nietlöcher der Streben auf den Knotenplatten absichtlich ovalförmig ausgebildet, damit die Kraftübertragung auf diesen Stellen aufgehoben wurde und die lotrechten Lasten bloß von den Pfosten auf den Bogenträger übertragen wurden, während der obere waagerechte Versteifungsgurt nur als Fahrbahnlängsträger in Anspruch genommen wurde. Die Bogenträger sind als Vollwandträger mit kastenförmigem Querschnitt ausgebildet. Die Stöße der Bogenträger wurden erst nach der ganz genauen lotrechten und waagerechten Einstellung und Ausrichtung der Konstruktion eingenietet und erst dann von dem Montagegerüst abgelassen. Zwischen dem alten und dem neuen Hauptträger liegende Querträger und Querversteifungen wurden erst dann miteinander verbunden, als auf diesen Streifen auch schon die ganze Fahrbahn fertiggestellt war und sogar auch der Verkehr darauf gelenkt wurde.

Die Fahrbahnkonstruktion des neuen Brückenteiles wurde auch ähnlich der alten Fahrbahn ausgebildet. Die waagerechten Versteifungsgurte der Bogenträger als Fahrbahnlängsträger sind nämlich von den lotrechten Pfosten unterstützt und bei jeder Pfostenstelle mit einem Hauptquerträger und zwischen den Pfosten noch mit zwei Nebenquerträgern zusammengebunden. Der Fahrbahnbelag selbst wurde aber hier nicht auf Buckelblechen, sondern auf Belageisen (Zoreseisen) verlegt. Die Zwischenräume der Belageisen wurden mit Leichtbeton ($\gamma = 1600$ kg/m³) ausgefüllt, damit wurde auch das Quergefälle (2 % nach beiden Bordsteinen) der Fahrbahntafel gesichert. Die Oberfläche des Leichtbetons wurde mit einer zwischen Bitumenanstriche aufgebrachten und aus zwei Schichten von Asphaltpappen bestehenden 1 cm dicken Isolierung bedeckt, die wiederum mit einer

Abb. 17. Montage des Doppelfachwerkes.

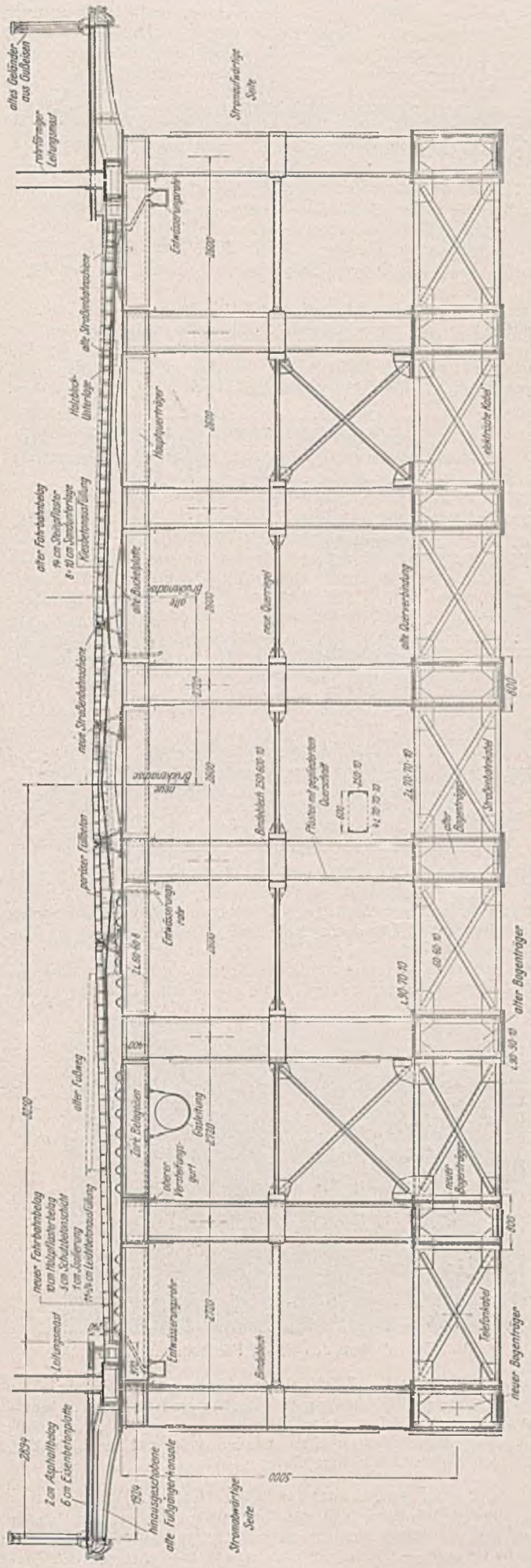

Abb. 18. Gesamtquerschnitt der Brückenkonstruktion.
(Die neuen Konstruktionsteile sind mit dicker, die alten Konstruktionsteile mit dünner Linie ausgezogen.)

5 cm dicken und mit einem Drahtgewebe bewehrten Schutzbetonschicht versehen wurde. Die 10 cm dicke Holzpflasterung aus getränktem Lärchenholz wurde dann unmittelbar auf diese Schutzbetonschicht verlegt (Abb. 18).

Die alten Straßenbahnschienen, die auf beiden Seiten der alten Fahrbahn auf in 2 m Abstand einbetonierten Holzblöcken unmittelbar aufgelegt waren, wurden aufgenommen und die neuen Schienen in der Mitte der neuen Fahrbahn auf eisernen, geschweißten und auf den Querträgern befestigten Lagerstühlen verlegt (Abb. 19).

Die mehr als 60jährigen Buckelbleche hatte man meistens in tadellosem Zustande gefunden, so daß Korrosionsschäden sich nur ausnahmsweise und nur wegen Mangels an Isolierung unter den Straßenbahnschienen auf einigen Stellen zeigten, wo sie gleichzeitig mit Belageisen ersetzt wurden.

Deshalb wurde auf die einheitliche Isolierung der neuen Fahrbahntafel und hauptsächlich auf den unter den Straßenbahnschienen liegenden Teil bei den Umbauarbeiten großer Wert gelegt. Die ununterbrochen durchgehende neue Isolierung wird auf beiden Seiten mit Quergefälle zu Entwässerungsrohren geleitet, die also nicht nur das Oberflächenwasser, sondern auch das durch Holzpflasterung und Schutzbeton einsickernde Wasser aufnehmen sollen. Unter den Straßenbahnschienen wurde die Dicke der Schutzbetonschicht vergrößert und die Oberfläche mit stärkerem Gegengefälle aus porösem Beton hergestellt und mit unabhängigen Entwässerungsrohren versehen, so daß damit ein vollständig getrenntes und möglichst rasches Entfernen des unter den Schienen einsickernden Wassers ermöglicht wird (vgl. Abb. 20).

Abb. 19. Erneuerung des mittleren Streifens der Fahrbahntafel. Verlegung der Straßenbahnschienen in der Mitte.

c) Die Verstärkungsarbeiten.

Die Verstärkungsarbeiten auf der alten Eisenkonstruktion wurden gleichzeitig mit der Montage der neuen Konstruktion unter unbeschränkter Aufrechterhaltung des ganzen Verkehrs und ohne die Anwendung eines unterstützenden, festen Gerüstes ausgeführt. Der interessanteste Teil dieser Arbeiten war das Auswechseln der alten Lagerplatten am Bogenkämpfer durch Gelenklager (Abb. 21).

Die Auswechselungen wurden einzeln an allen Auflagerpunkten jedes Bogenträgers und in jeder Öffnung nacheinander ausgeführt, so daß diese Arbeiten in 72 Fällen in den sechs Stromöffnungen und in 28 Fällen in den beiden Uferöffnungen, also insgesamt hundertmal, wiederholt werden mußten.

Am Ende des Bogenträgers, parallel mit den Stegblechen, wurde auf beiden Seiten je ein stählerner, genieteter Kragarm (aus St 52) als Hilfskonstruktion aufgeschraubt.

Die beiderseitigen Kragarmträger haben gemeinsame untere und obere Gurtplatten gehabt, die auf die Gurtplatten des Bogenträgers aufgenietet wurden, und zwar so, daß die Niete der alten Gurtplatten zuerst nacheinander auf versenkten Nieten ausgewechselt wurden. Dann wurde diese überquerende gemeinsame Platte daraufgelegt und an Ort und Stelle durchgebohrt, so daß die versenkten Niete einzeln ausgebohrt und durch dickere Niete ersetzt wurden.

Unter den oben und unten auskragenden Enden des behelfmäßigen Kragarmträgers wurden auch behelfmäßige Eisenbetonauflagerquadern hergestellt, auf denen man die behelfmäßig unterstützenden Wasserdruckpressen bzw. Hilfslager aufstellen konnte. Zuerst wurde das Ende des Bogenträgers mit 5 bis 7 mm durch vier 300-t-Wasserdruckpressen aufgehoben, wodurch man die alten Keile der Auflagerplatten und dann die Auflagerplatten selbst ausschieben konnte. Dann hat man die alten Granitquadern bis zu einer Tiefe — die der größeren Konstruktionshöhe der neuen Auflagergelenke entsprach — ausgemeißelt, die neuen Gelenke eingeschoben und dann den Bogenträger auf die neuen Auflager niedergelassen (Abb. 22.) Dann wurde die Hilfskonstruktion abgeschraubt und an dem Ende des folgenden Bogenträgers wieder aufmontiert. Nach dem

Entfernen der aufgeschraubten Hilfskragarme wurden die obenerwähnten und die normale Breite weit überragenden Gurtplatten auf die Breite der Gurtplatten des Kastenträgers autogen abgeschnitten, während die darauf gebliebenen Teile derselben gleichzeitig auch zur Verfestigung der Endquerschnitte des Bogenträgers dienen.

Das Aufheben des Trägers geschah natürlich sehr langsam, und jede Lage der Pressen wurde durch fortwährendes Nachschlagen der Keile der behelfmäßigen Hilfslager gesichert. Man hatte hauptsächlich darauf geachtet, daß der obere und der untere Teil des Endquerschnittes mit dem genauen gleichen Maße von der ursprünglichen Lage entfernt wurde, so daß keine Verdrehungen entstehen konnten, und deshalb wurden die Bewegungen mit Präzisionsmeßuhren immer pünktlich beobachtet.

Da es vorher nicht bekannt war, was für Bewegungen zur vollkommenen Entlastung der Auflagerplatten benötigt, und was für Erhöhungen des Bogenscheitels diesen Bewegungen entsprechen werden, wurden am Anfang diese Arbeiten so eingerichtet, daß das Erheben wie auch das Niederlassen des Bogenträgers auf die verkehrsfreien Nachtstunden fallen sollten. Als man aber erfahren hatte, daß 5 bis 7 mm Bewegung schon für die Entlastung der alten Lagerplatten und für das Ausziehen der Keile vollständig genügt und die infolgedessen entstandene Erhebung des Scheitelpunktes unter keinen Umständen mehr als 10 mm betragen kann, wurden diese Arbeiten auch bei Tag ohne Unterbrechung durchgeführt. Das Auswechseln eines Auflagers dauerte sechs bis sieben Tage, die Ausmeißelung der Granitblöcke inbegriffen.

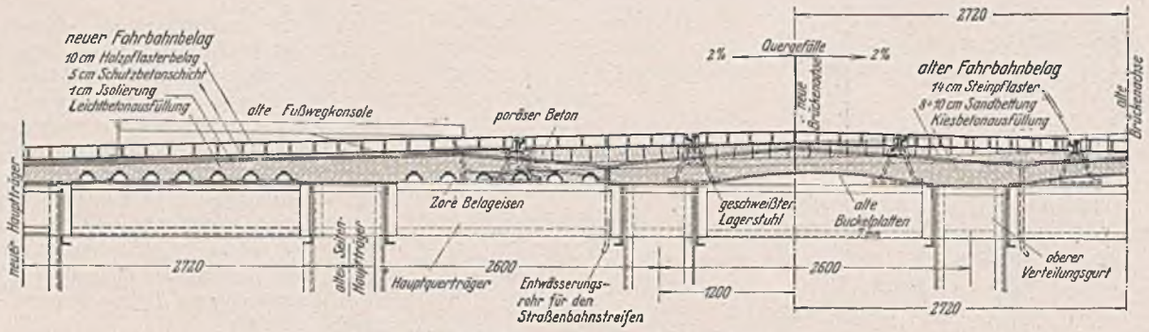

Abb. 20. Fahrbahnkonstruktion der Brücke.

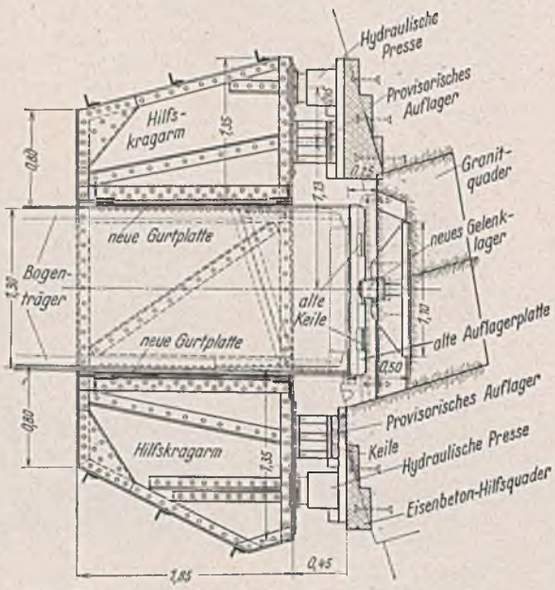

Abb. 21. Anordnung des Auflagerauswechsels.

Abb. 22. Aufhebevorrichtung. (Mit dem eingeschobenen neuen Gelenklager.)

Weitere Verstärkungen wurden noch auf dem nördlichen Seitenträger in den beiden größten Mittelöffnungen durchgeführt, wo die Fahrbahn mit je 1 m nach beiden Seiten wegen der Straßenbahnhaltestellen-inseln noch mehr erweitert wurde und diese alten Hauptträger dadurch stark überlastet wurden. Die Verstärkung geschah durch neue Gurtplatten, die in drei bis vier Streifen nebeneinander aufgenietet wurden, um das gleichzeitige Stören aller Niete in einem Querschnitte vermeiden zu können (Abb. 23). Diese Überverbreiterung hat den Raum der Fußgängerkonsolbefestigung am oberen Versteifungsgurt auch teilweise weggenommen, und deshalb konnte man hier die alten Konsole nicht wieder benutzen; infolgedessen wurden an diesen Stellen ganz neue Fußgängerkonsole angewendet. Diese Arbeiten wurden hauptsächlich in den verkehrsfreien Nachtstunden und noch vor der Ausführung der Fahrbahnverbreiterung ausgeführt, da gegen die Beanspruchungen, die von Nutzlast und von diesem Zusatzeigengewicht entstehen würden, schon die verstärkten Querschnitte wirken sollten.

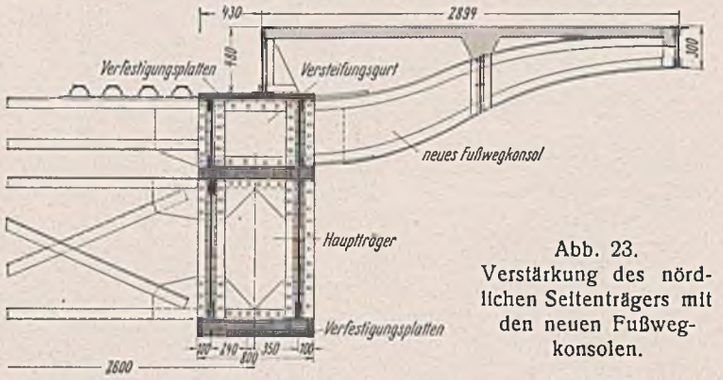

Abb. 23. Verstärkung des nördlichen Seitenträgers mit den neuen Fußwegkonsolen.

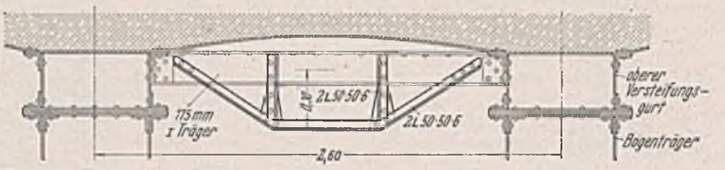

Abb. 24. Verstärkung der mittleren Nebenquerträger. (Vgl. auch Abb. 8.)

Außerdem wurden noch die gegliederten Querschnitte der Endpfosten der Versteifungsträger in deren Mitte mit Bindeblechen gegen Ausknickung zusammengebunden (vgl. Abb. 18).

Von den Fahrbahnträgern waren die Nebenquerträger den schweren 20- bis 24-t-Lastwagen schon lange nicht gewachsen. Deshalb wurden diese alten 175 mm hohen I-Träger mit einem aus zwei Winkeleisen bestehenden, unteren Versteifungsgurt versehen und damit sprengwerkartig ausgebildet (Abb. 24, vgl. auch Abb. 8).

Abb. 25. Aufbau des neuen Fahrbahnanteils.

Alle diese Verstärkungsarbeiten wurden möglichst auch in den verkehrsfreien Nachtstunden ausgeführt.

d) Fahrbahnerneuerungsarbeiten.

Der alte Fahrbahnbelag und die Straßenbahnschienen selbst waren in so schlechtem Zustande, daß sie sowieso ganz erneuert werden mußten. Diese Arbeit wurde — wie schon oben erwähnt — auch mit den Um-

bauarbeiten zusammen planmäßig durchgeführt. Zuerst wurde der stromabliegende neue Streifen auf neuen Belageisen vollendet (Abb. 25): dann wurde der mittlere vom Wagenverkehr abgesperrt, der alte Steinpflasterbelag mit dem Schotterunterlager entfernt und der alte Füllbeton mit der darunterliegenden nachträglichen Isolierung aufgerissen. Danach wurde auch dieser Streifen mit dem neuen Holzpflasterbelag und mit porösem Füllbeton versehen; die Straßenbahnschienen wurden in die Mitte verlegt (vgl. Abb. 19 u. 20). Zuletzt wurden dieselben Arbeiten am nördlichen Streifen der Fahrbahn ausgeführt, und damit war die neue Fahrbahn vollständig und plangemäß fertiggestellt, ohne daß der Verkehr dadurch während der ganzen Bauzeit im mindesten gestört wurde.

Gelegentlich des Umbaues wurde auch der alte Eichenholzbelag der Fußwege entfernt und durch eine 6 cm dicke Eisenbetonplatte mit dem darauf gelegten 2 cm dicken Gußasphaltbelag ersetzt.

Der Anstrich der ganzen Eisenkonstruktion wurde auch mit den Umbauarbeiten zusammen erneuert.

Die oben beschriebenen Arbeiten wurden im Juni 1935 angefangen und in zweieinhalb Jahren (bis November 1937) fertiggestellt. — Die Gesamtkosten betrugen 5 Mill. Pengö (3,5 Mill. RM), der Voranschlag wurde also genau eingehalten.

Die Umbauarbeiten wurden vom Königlich ungarischen Handels- und Verkehrsministerium, und zwar unter der Leitung des Vorstandes der Donaubrückenbauabteilung zuerst vom Sektionsrat Dr.-Ing. P. Ágyay-Hubert, dann von seinem Nachfolger Ministerialrat P. Tantó und von dessen Stellvertreter Sektionsrat A. Dömötör durchgeführt.

An der örtlichen Bauleitung und an der Vorbereitung der Baupläne haben Obering. Z. Ullrich, Dipl.-Ing. A. von Steller, L. Körmendy und der Verfasser teilgenommen.

Zur Theorie des Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung.

Alle Rechte vorbehalten.

Von Ingenieur Joh. Ohde, Neuenhagen bei Berlin.
(Mitteilung der Erdbauabteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin.)

(Fortsetzung aus Heft 13.)

IV. Berechnung des Erddruckes auf eine starre Wand, die sich um ihren untersten Punkt dreht.

(Wandbewegung A.)

Wir beschränken uns hier wieder — wie auch weiterhin unter V und VI dieses Aufsatzes — auf Boden ohne Gleitfestigkeit (Kohäsion). Die vorstehenden Ausführungen haben bereits gezeigt, daß für die Wandbewegung A (Drehung um den untersten Erdpunkt) überall im Gleitkörper der Grenzzustand des Gleichgewichts erreicht ist. Die oft nur wenig gekrümmten Gleitflächen (s. z. B. Abb. 29a u. 37a) deuten darauf hin, daß man mit ebenen Gleitflächen, also mit der alten Coulombschen Theorie in vielen Fällen genügend genaue Erddruckwerte erhalten wird. Grundsätzlich wird man aber die ebenen Gleitflächen nur so lange anwenden dürfen, solange die ungünstigste ebene Gleitfläche nicht allzusehr von der [nach Gl. (27) leicht zu errechnenden] genauen Richtung der Gleitfläche in der Nähe der Wand abweicht. Die bei baustatischen Berechnungen noch zuzulassende Abweichung dürfte beim Erddruck etwa bei 20°, beim Erdwiderstand etwa bei 10° liegen.

Die zeichnerischen Verfahren für die Rechnung mit ebenen Gleitflächen sind hinreichend bekannt[45]), weshalb ich hier nicht weiter darauf eingehen will. Ich will nur den unter II schon angekündigten Nachweis bringen, daß auch die rechnerische Ermittlung des Erddruckes für ebene Gleitflächen nicht so umständlich ist, wie man nach den bisher bekannten Formeln meinen könnte, wenn man für die Winkel ϱ, δ, β usw. deren Tangensfunktion einsetzt. Diese Tangenswerte sind durch die Konstruktionszeichnungen auch meistens unmittelbar gegeben[46]), so daß man garnicht erst den Umweg über die Winkel nötig hat.

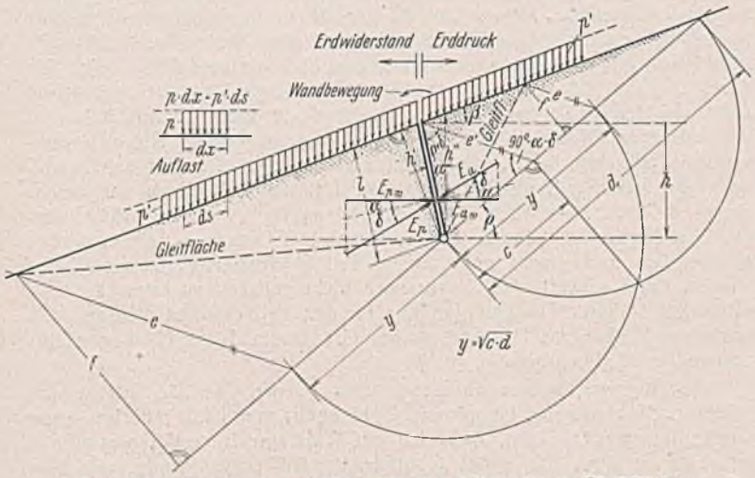

Abb. 38. Erddruck und Erdwiderstand für ebene Gleitflächen.

Wie Weyrauch zuerst gezeigt hat[47]), kann man die Erddruckformel leicht aus der Ponceletschen Konstruktion ableiten. In Abb. 38 ist dieses Verfahren für beide Grenzwerte des Erddruckes wiedergegeben. Wie schon aus den früheren Ausführungen hervorgeht, habe ich für die Winkel die Kreyschen Bezeichnungen beibehalten, nur weise ich hier noch besonders darauf hin, daß ich die Vorzeichen dieser Winkel verschiedentlich anders gewählt habe. Insbesondere habe ich das Vorzeichen des Neigungswinkels δ für den Erdwiderstand entgegengesetzt der Festlegung von Krey gewählt (vgl. auch Abb. 21). Diese andere Wahl der Vorzeichen wird durch den Aufbau der Formeln unter II bedingt; doch lassen sich dafür auch noch andere Gründe angeben. Aus Abb. 38 findet man zunächst:

$$\frac{e}{e'} = \frac{d \mp y}{d - c}$$

und mit $y = \sqrt{c\,d}$:

$$\frac{e}{e'} = \frac{d \mp \sqrt{c\,d}}{d - c} = \frac{1}{1 \pm \sqrt{\frac{c}{d}}},$$

wo das obere Vorzeichen wieder für den Erddruck, das untere für den Erdwiderstand gilt. Weiter liest man folgende Beziehungen ab:

$$f = e \cdot \sin(90° - \alpha - \delta) = e \cdot \cos(\alpha + \delta)$$

$$\frac{e'}{l} = \frac{\sin(90° - \varrho + \alpha)}{\sin(90° - \alpha - \delta)} = \frac{\cos(\varrho - \alpha)}{\cos(\alpha + \delta)}$$

$$\frac{c}{l} = \frac{\sin(\varrho + \delta)}{\sin(90° - \alpha - \delta)} = \frac{\sin(\varrho + \delta)}{\cos(\alpha + \delta)}$$

$$\frac{d}{l} = \frac{\sin(90° - \alpha + \beta)}{\sin(\varrho - \beta)} = \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\sin(\varrho - \beta)}.$$

Man findet damit:

$$\frac{c}{d} = \frac{c}{l} \cdot \frac{l}{d} = \frac{\sin(\varrho + \delta)\sin(\varrho - \beta)}{\cos(\alpha + \delta)\cos(\alpha - \beta)}$$

und weiter

$$e\,f = e^2 \cdot \cos(\alpha + \delta) = \frac{\cos^2(\varrho - \alpha)}{\cos(\alpha + \delta)} \cdot \frac{l^2}{\left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta)\sin(\varrho - \beta)}{\cos(\alpha + \delta)\cos(\alpha - \beta)}}\right]^2}.$$

Nun ist bekanntlich

$$(43) \qquad \begin{cases} E = \frac{1}{2} \cdot \gamma'\,e\,f \quad \text{mit} \\ \gamma' = \gamma + \frac{2\,p'}{h'}, \end{cases}$$

wenn p' und h' die in Abb. 38 angegebene Bedeutung haben. Wird die auf die waagerechte Ebene bezogene (lotrechte) Auflast mit p und die Lotrechte zwischen dem unteren Wandpunkt und der Geländelinie mit h'' bezeichnet, so kann man auch schreiben:

$$(43a) \qquad \gamma' = \gamma + \frac{2\,p}{h''}.$$

Setzt man den Wert für $e\,f$ in Gl. (43) ein, so erhält man die Erddruckformel für ebene Gleitflächen in der von Weyrauch angegebenen Form[48]):

$$(44) \quad E = \frac{\gamma'\,l^2}{2} \cdot \frac{\cos^2(\varrho - \alpha)}{\cos(\alpha + \delta)} \cdot \frac{1}{\left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varrho + \delta)\sin(\varrho - \beta)}{\cos(\alpha + \delta)\cos(\alpha - \beta)}}\right]^2}.$$

Führen wir wieder — ähnlich wie unter II — die Verhältniszahl λ des Erddruckes ein:

$$(45) \qquad E_w = \lambda \cdot \gamma' \frac{h^2}{2}; \quad \lambda = \frac{2\,E_w}{\gamma'\,h^2}.$$

Wenn E_w die waagerechte Teilkraft des Erddruckes bedeutet:

$$[E_w = E \cdot \cos(\alpha + \delta)],$$

---

[45]) s. z. B. Müller-Breslau oder Krey.

[46]) z. B. gibt man die Richtung einer Böschung gewöhnlich an durch $1 : \text{cotg}\,\beta = \text{tg}\,\beta = b$.

[47]) J. Weyrauch, Zur Theorie des Erddruckes. Zeitschr. f. Baukunde 1878, S. 193.

[48]) s. auch Müller-Breslau, Erddruck auf Stützmauern, S. 13 u. 14.

so ist demnach:

$$\lambda = \frac{\cos^2(\varrho - \alpha)}{\cos^2\alpha} \cdot \frac{1}{\left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\varrho+\delta)\sin(\varrho-\beta)}{\cos(\alpha+\delta)\cos(\alpha-\beta)}}\right]^2}. \tag{46}$$

Zur Abkürzung sei $a = \operatorname{tg}\alpha$ gesetzt, und es seien die früher schon benutzten Bezeichnungen

$$b = \operatorname{tg}\beta; \quad m = \operatorname{tg}\delta; \quad \mu = \operatorname{tg}\varrho$$

verwendet. Für den Ausdruck unter der Wurzel hat man damit nach bekannten goniometrischen Formeln:

$$\frac{\sin(\varrho+\delta)\sin(\varrho-\beta)}{\cos(\alpha+\delta)\cos(\alpha-\beta)} = \frac{\cos^2\varrho}{\cos^2\alpha} \cdot \frac{\mu+m}{1-m\,a} \cdot \frac{\mu-b}{1+a\,b}$$
$$= \frac{1+a^2}{1+a\,b} \cdot \frac{\mu+m}{1+\mu^2} \cdot \frac{\mu-b}{1-m\,a}$$

und weiter für den ersten Teil:

$$\frac{\cos^2(\varrho-\alpha)}{\cos^2\alpha} = \cos^2\varrho\,(1+a\,\mu)^2 = \frac{(1+\mu\,a)^2}{1+\mu^2},$$

im ganzen also

$$\lambda = \left[\frac{1+\mu\,a}{\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{(\mu+m)(\mu-b)\,\frac{1+a^2}{(1+a\,b)(1-m\,a)}}}\right]^2. \tag{47}$$

Für lotrechte Wand ist $a = 0$:

$$\lambda_{a=0} = \frac{1}{\left[\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{(\mu+m)(\mu-b)}\right]^2}. \tag{47a}$$

Liegt der Rankinesche Sonderfall vor, so ist $b = m$ und

$$\lambda_{\substack{a=0\\b=m}} = \frac{1}{\left[\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2-b^2}\right]^2}, \tag{47b}$$

was mit Gl. (32b) übereinstimmt, wie man leicht nachweisen kann. Für lotrechte Wand und waagerechtes Gelände erhält man:

$$\lambda_{a=b=0} = \frac{1}{\left[\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu(\mu+m)}\right]^2}. \tag{47c}$$

Gl. (47a) bis (47c) sind so einfach, daß es kaum noch nötig ist, für lotrechte Wände Erddrucktabellen zur Hand zu haben.

Für $m = -\mu$ finden wir aus diesen Gleichungen

$$\lambda_{\substack{a=0\\m=-\mu}} = \frac{1}{1+\mu^2} \tag{47d}$$

in Übereinstimmung mit Gl. (42).

Für eine gleichmäßig verteilte, einseitig unbegrenzte Auflast liefert Gl. (45) in Verbindung mit Gl. (43a):

$$E_w = \lambda\left(\gamma + \frac{2p}{h''}\right)\frac{h^2}{2} = \lambda\cdot\gamma\,\frac{h^2}{2} + \lambda\left(\frac{h}{h''}\right)p\,h. \tag{45a}$$

Der erste Teil dieser Formel gibt den Erddruck ohne die Wirkung der Auflast an, der zweite Teil den durch die Auflast hervorgerufenen Mehrdruck. Unter der Voraussetzung dieses Abschnittes (Wandbewegung A) gilt Gl. (45a) auch für Teilabschnitte der Wand, so daß für die waagerechten Teilspannungen des Druckes längs der Wand folgt:

$$\sigma_w = \lambda\,\gamma\,x + \lambda\left(\frac{h}{h''}\right)p, \tag{45b}$$

wenn x für einen von oben her gezählten Teilabschnitt der Wand dieselbe Bedeutung hat wie h für die ganze Wand. Der von der Auflast herrührende Anteil des Erddruckes ist demnach in Form eines Rechtecks verteilt. Für den Rankineschen Sonderfall wurde dieses bekannte Ergebnis schon unter II abgeleitet (Abb. 22)[49].

Wenden wir uns jetzt genaueren Lösungen mit Hilfe kurvenförmiger Gleitflächen zu, so muß zunächst als ausgezeichnetes Hilfsmittel das Köttersche Gesetz für den Spannungsverlauf in der Gleitfläche erwähnt werden. Dieses Gesetz lautet mit unseren Bezeichnungen (σ = Spannung in der Gleitfläche):

$$\frac{d\sigma}{ds} \mp 2\,\mu\,\sigma \cdot \frac{d\vartheta}{ds} = \gamma \cdot \sin(\vartheta \mp \varrho) \tag{48}$$

oder integriert:

$$\sigma = \gamma\,e^{\pm 2\mu\vartheta}\left[\int e^{\mp 2\mu\vartheta} \cdot \sin(\vartheta \mp \varrho)\,ds + C\right], \tag{49}$$

wenn ds das Bogenelement der Gleitfläche angibt und die Bogenlänge s der Gleitfläche von der Oberfläche her gezählt wird. (Der Gleitflächenwinkel ϑ ist hier, etwas abweichend von der Bedeutung unter II, immer auf die Waagerechte zu beziehen.) C ist eine Integrationskonstante, die aus der Bedingung zu ermitteln ist, daß im Anfangspunkt der kurvenförmigen Gleitfläche $\sigma = \sigma_0$ sein muß. Kötter hat die Gl. (48) und (49) nur mit den oberen Vorzeichen, also für den Erddruck, gegeben; man kann sie aber leicht, wie angegeben, für den Erdwiderstand erweitern (unteres Vorzeichen). Gerade für den Erdwiderstand leistet Gl. (49) gute Dienste, da man hier mehr als beim Erddruck darauf angewiesen ist, mit krummen Gleitlinien zu rechnen. Die Köttersche Gleichung wird bekanntlich in der Weise angewendet, daß man für eine angenommene Gleitflächenform nach Gl. (49) die Spannungen σ längs der Gleitfläche berechnet, diese Spannungen zu einer Gleitflächen-Mittelkraft Q zusammensetzt und durch die Zusammensetzung von Q mit dem Gewicht G des Gleitkörpers die Mittelkraft E findet.

Für ebene Gleitflächen ist $\frac{d\vartheta}{ds} = 0$, so daß nach Gl. (48) gilt:

$$\sigma = \gamma\,s \cdot \sin(\vartheta \mp \varrho), \tag{50}$$

wenn s die Länge der Gleitlinie von der (unbelasteten) Oberfläche aus bedeutet. Für lotrechte Gleitflächenrichtung ($\vartheta = 90°$) erhält man aus Gl. (50):

$$\sigma_{\vartheta=90°} = \gamma\,s \cdot \cos\varrho$$

oder

$$\sigma_{\vartheta=90°} = \gamma\,s \cdot \cos^2\varrho = \frac{\gamma\,s}{1+\mu^2}, \tag{50a}$$

was wiederum mit Gl. (42) übereinstimmt.

In Abb. 29a u. 37a sind die Gleitlinien aus einem Kurvenstück und einer Geraden zusammengesetzt gezeichnet. Für diese wichtige Gesetzmäßigkeit sind wir noch den Beweis schuldig. Wer zuerst auf diesen Zusammenhang hingewiesen hat, ist mir nicht bekannt (ich vermute, daß es J. Boussinesq war)[50]. In der deutschen Literatur wird er zuerst von E. Cramer erwähnt[51], der darüber kurz folgendes bemerkt: „Die neuere Theorie beweist, daß die Druckprismen innerhalb einer homogenen Erdmasse, deren Oberfläche eben ist, von ebenen Gleitflächen begrenzt sind, soweit die regelmäßige Ausbildung dieser Druckprismen nicht durch einwirkende äußere Kräfte gehindert oder gestört wird. — Die Gleitfläche ... besteht hiernach aus einem ebenen Teil ..., welcher dem von äußeren Einflüssen ganz unabhängigen Druckprisma ... angehört, und aus einem (kurvenförmigen) Teil ..., welcher der Einwirkung der Stützwand ... unterliegt ...". — Unabhängig von Cramer kam auch Engeßer in seiner „geometrischen Erddrucktheorie" auf diese Tatsache[52]. Er führt u. a. folgendes aus (Bezeichnungen nach unserer Abb. 40a): „Da die Stützwand AB vollständig außerhalb des Druckkeils BCD liegt, so kann sie den Gleichgewichtszustand desselben nicht beeinflussen und wirkt demgemäß auf die Fuge BC der dem unbegrenzten Erdreiche entsprechende Erddruck ... Die wirkliche Gleitfuge ... wird oberhalb C nach der geraden Linie CD verlaufen, unterhalb C jedoch nach einer Kurve AC ...". — Auch Reißner hält es für „wahrscheinlich", daß die Gleitflächen aus einem den Rankineschen Gesetzen unterliegenden ebenen Teil und einem gekrümmten Teil zusammengesetzt sind. Der Beweis dafür scheint also bisher noch nicht geliefert zu sein. Er kann nach den früheren Darlegungen nur für den Fall erbracht werden, daß in jedem Punkte des Gleitkörpers der Grenzzustand des Gleichgewichts vorhanden ist (Wandbewegung A).

Den Beweis für das Auftreten eines ebenen Gleitflächenteiles unmittelbar zu erbringen, ist mir nicht gelungen; man kann jedoch in mehr anschaulicher Art zeigen, daß sich ein Widerspruch ergibt, wenn man annehmen wollte, die ganze Gleitfläche wäre kurvenförmig. Nehmen wir also vorläufig einmal an, die Gleitflächen wären in der Nähe der Oberfläche auch noch gekrümmt, wie es Abb. 39a für den Fall des Erdwiderstandes zeigt. Wegen der unter III schon erwähnten Ähnlichkeit der eigentlichen Gleitflächen muß längs der durch den oberen Wandpunkt gehenden Ebenen DB, EB usw. eine gleichbleibende Spannungsneigung vorhanden sein. Daraus folgt, daß die durch den Punkt B gehende Pseudogleitfläche CB eine Ebene sein muß, und weiter, daß

[49]) Herr Dipl.-Ing. Mund ist zu einem anderen Ergebnis gelangt (vgl. Bautechn. 1935, Heft 20). Nach seinen Ermittlungen soll der durch die Auflast erzeugte Erddruckanteil von der Oberfläche aus mit dem Werte Null beginnen und sich allmählich den Werten nach Gl. (45b) nähern. Die Berechnungen des Herrn Mund sind jedoch in diesem Punkte unrichtig, worauf ich in einer Zuschrift (Bautechn. 1936, Heft 2, S. 36) hingewiesen habe. Da Herr Mund diese Richtigstellung kurzerhand als unzutreffend bezeichnet hat, stelle ich hier folgendes fest:

1. Der von Herrn Mund zum Beweis herangezogene Grenzübergang durch Verkürzung der Böschung seiner Abb. 3 (in Bautechn. 1935, Heft 20) kommt nicht in Frage, da diese Abb. 3 ebenfalls zu den von mir als unrichtig bezeichneten Konstruktionen gehört.

2. Die Einbeziehung des Auflast-Einflusses durch Raumgewichtserhöhung im Verhältnis $\gamma' : \gamma$ des in bekannter Weise unterhalb der Gleitfläche abgegrenzten Erdkörpers ist nicht „willkürlich", sondern (im Rahmen der Coulombschen Annahme ebener Gleitflächen) mathematisch genau bewiesen.

[50]) Die Arbeiten von J. Boussinesq habe ich bislang noch nicht gelesen.

[51]) E. Cramer, Die Gleitfläche des Erddruckprismas und der Erddruck gegen geneigte Stützwände. Zeitschr. f. Bauw. 1879, S. 521.

[52]) Zeitschr. f. Bauw. 1880, S. 204 u. 205.

die oberhalb BC befindlichen Pseudogleitflächen (z. B. FG) die entgegengesetzte Krümmung haben wie die unterhalb BC befindlichen. Die Krümmung der Gleitflächen kann offenbar nur von dem Einfluß der gegenüber den Rankineschen Annahmen veränderten Wirkung des Wanddruckes herrühren. Nun wissen wir aus den Näherungsberechnungen mittels ebener Gleitflächen [Gl. (47)], daß der Erdwiderstand größer (oder kleiner) ist als der Wert für den Rankineschen Sonderfall, wenn der Neigungswinkel δ des Erdwiderstandes größer (oder kleiner) ist als

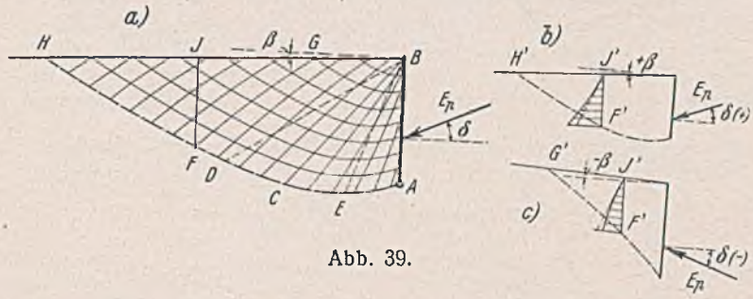

Abb. 39.

der entsprechende Neigungswinkel (δ_R) nach Rankine. (Dieses Gesetz gilt auch für die genauen kurvenförmigen Gleitflächen, da in der Nähe des Rankineschen Gleichgewichtszustandes durch die Abweichung von den genauen Gleitflächenrichtungen nur ein Fehler zweiter Kleinheitsordnung entsteht.) Da dieser Mehr- oder Minderwert des Erddruckes von der Wand ausgehend einsinnig abklingen muß, die Druckverteilung in der Nähe der Oberfläche jedoch nach den Rankineschen Gesetzen beginnt (was übrigens auch aus der Kötterschen Gl. (48) für $\sigma \to 0$ folgt),

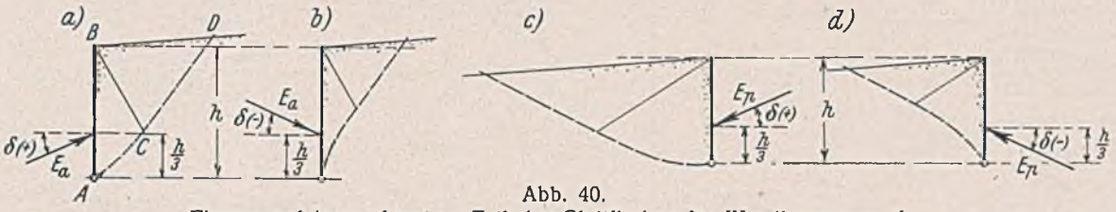

Abb. 40.
Ebener und kurvenförmiger Teil der Gleitflächen für Wandbewegung A.

so kann die Druckverteilung für eine lotrechte Fläche in etwas größerem Abstande von der Wand nicht genau dreieckförmig sein, sondern muß für den Fall $\delta < \delta_R$ langsamer, für den Fall $\delta > \delta_R$ hingegen schneller wachsen als bei der geradlinigen Verteilung (s. Abb. 39b u. c). Wenden wir diesen Zusammenhang auf Abb. 39a an, so entspricht der Gleitkörper HJF dem Teil $H'J'F'$ in Abb. 39b und der Gleitkörper JFG dem Teil $J'F'G'$ in Abb. 39c. Demnach müßte der Erdwiderstand für die lotrechte Fläche JF im Hinblick auf die Krümmung der Gleitfläche HF mit der Tiefe schneller wachsen als nach Rankine, im Hinblick auf die Krümmung der Gleitfläche FG dagegen langsamer, so daß sich hier ein Widerspruch zeigt. Dadurch ist bewiesen, daß die Gleitflächen so lange eben sein müssen, als die Pseudogleitflächen noch in der freien Oberfläche ausmünden können.

Berechnet man für die vier verschiedenen Erddruckmöglichkeiten die Richtung der eigentlichen Gleitfläche in der Nähe der Wand [nach Gl. (27)], so erhält man nach den bisherigen Ausführungen die in Abb. 40 gezeigten Gleitflächenformen.

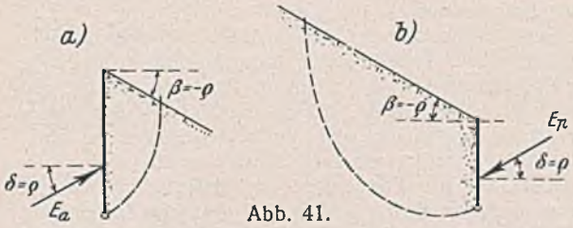

Abb. 41.

Grenzfälle mit gänzlich kurvenförmigen Gleitflächen treten auf, wenn die vom obersten Punkte ausgehende (Rankinesche) Pseudogleitfläche mit der Geländeneigung zusammenfällt (vgl. Abb. 41). Andere bemerkenswerte Fälle ergeben sich nach Abb. 42, wobei vorausgesetzt ist, daß der Neigungswinkel δ den Wert $-\rho$ noch nicht ganz erreicht hat.

Bei der Berechnung des Erddruckes für stark positive Wandneigungen α kann es vorkommen, daß die vom oberen Wandpunkte ausgehende Pseudogleitfläche nicht mehr in den Erdkörper fällt. In diesen Fällen kann die letzte Rankinesche Pseudogleitfläche nur vom unteren Wandpunkte ausgehen, wie es Abb. 43 zeigt. Wollte man auch hier mit dem vollen Wandreibungswinkel ϱ' rechnen, so müßte man für den Erdteil BCD gekrümmte Gleitflächen voraussetzen. Dann wäre jedoch die Forderung ähnlicher Gleitflächen nicht mehr erfüllt. Es bleibt daher nur die Annahme übrig, daß sich der Teil BCD nicht im Gleitzustande befindet. Der Ansatz des vollen Wandreibungswinkels ϱ' verliert damit seine Berechtigung, da das Gleiten nicht längs der Wand, sondern längs der Fläche BD geschieht. Die Rankinesche Theorie findet hier in vollkommener Weise ihre Anwendung, worauf schon Winkler hingewiesen hat[53]) (nicht erst Jenkin, wie ich vor einiger Zeit las). Am einfachsten berechnet man den Erddruck auf die lotrechte Fläche AB, der gleichlaufend zur Oberfläche gerichtet ist.

Müller-Breslau hat die Köttersche Gl. (49) für den Fall angewendet, daß sich die Gleitfläche aus einem Kreiszylinderteil und einer ebenen Gleitfläche zusammensetzt[54]). Er erhält bekanntlich den Angriffspunkt des Erddruckes für lotrechte Wand und waagerechtes Gelände bei vollem Ansatz der Wandreibung nicht in $^1/_3\,h$, sondern in $0{,}347\,h$ von unten, was in Widerspruch zu meinen Folgerungen zu stehen scheint. Dieser Widerspruch läßt sich aber leicht erklären und beseitigen. Das Köttersche Gesetz gilt streng genommen nur für die genaue Form der Gleitfläche. Weicht man aber von dieser genauen Form ab, indem man die Gleitfläche innerhalb gewisser Grenzen willkürlich annimmt, so ist der durch die Köttersche Gleichung gegebene Zusammenhang auch nur näherungsweise erfüllt. Abgesehen von dieser Feststellung kann man aber auch das Köttersche Gesetz leicht so anwenden, daß sich mit der dreieckförmigen Druckverteilung kein Widerspruch ergibt. Um das zu zeigen, sind in Abb. 44 verschiedene Möglichkeiten des Gleitflächenverlaufes miteinander verglichen, und zwar ist der Gleitflächenwinkel ϑ als Abhängige der von der Wand aus gezählten Bogenlänge der Gleitlinie schematisch dargestellt. Linie a möge den genauen Verlauf angeben, Linie b dagegen den von Müller-Breslau mit teilweise kreisförmigen Gleitflächen erhaltenen. Müller-Breslau nahm den Gleitflächen-

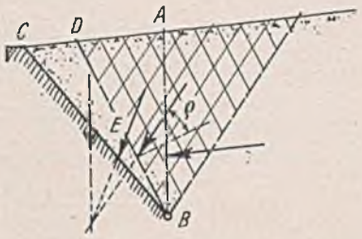

Abb. 43.

winkel in unmittelbarer Nähe der Wand streng richtig an; das hat aber, wie Abb. 44 zeigt, teilweise stärkere Abweichungen von der genauen Form zur Folge. Es dürfte daher richtiger sein, etwa mit einer Linie c zu rechnen, was darauf hinausläuft, den Winkel ϑ_w der Gleitfläche an der Wand veränderlich anzunehmen (ϑ_w'). Dadurch ist zwar die „Wandbedingung" nicht genau erfüllt, die mittlere Abweichung der Näherungsform von der genauen Form ist aber ohne Zweifel geringer geworden. Man braucht also nur an Stelle der von Müller-Breslau als unbekannt vorausgesetzten Erddrucklage den veränderlichen Winkel ϑ_w' einzuführen, um den Widerspruch mit der dreieckförmigen Verteilung zu vermeiden.

Ein einfaches zeichnerisches Näherungsverfahren für teilweise kreisförmige Gleitflächen hat Krey angegeben[55]). Es ist in Abb. 45a u. b für den Erdwiderstand gezeigt. Die auf den kreisförmigen Gleitflächenteil wirkenden Spannungen berühren alle — wie leicht nachzuweisen ist —

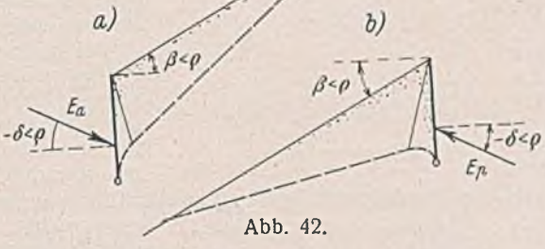

Abb. 42.

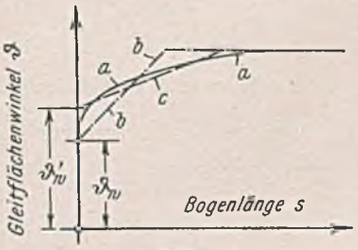

Abb. 44.

einen Kreis mit dem Halbmesser $R \cdot \sin\varrho$. Krey macht nun die näherungsweise zutreffende und auf der sicheren Seite liegende Annahme, daß auch die Mittelkraft Q aller Gleitflächenspannungen diesen $R \cdot \sin\varrho$-Kreis berührt. Dadurch wird es möglich, sämtliche Kräfte eindeutig zusammenzusetzen, da die Richtung von Q durch den Schnittpunkt von R und E_p und als Berührende an den $R \cdot \sin\varrho$-Kreis festliegt.

Auch die logarithmische Spirale eignet sich als Gleitlinienform für die Ermittlung des Erddruckes und des Erdwiderstandes. Zeichnerisch

[53]) E. Winkler, Neue Theorie des Erddruckes, S. 31 bis 35. Wien 1872.
[54]) Müller-Breslau, Erddruck auf Stützmauern, S. 113 bis 118. Stuttgart 1906.
[55]) H. Krey, Erddruck, Abb. 70 u. 84.

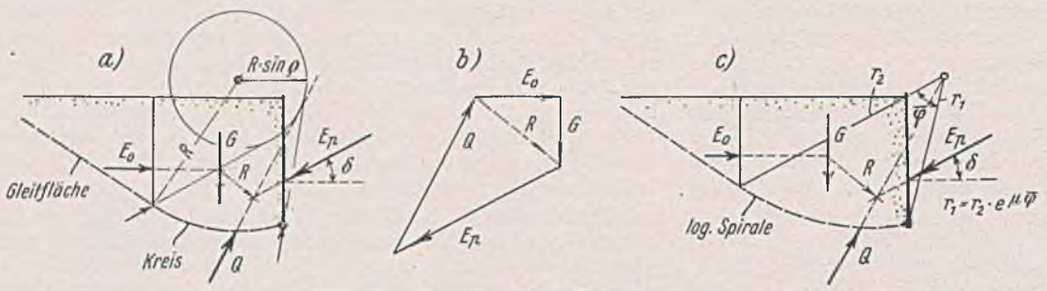

Abb. 45. Ermittlung des Erdwiderstandes.

Abb. 47.

kann man in derselben Weise vorgehen wie beim Kreyschen Verfahren, nur daß die Annahme über die Richtung von Q wegfällt (Abb. 45c). Rechnerisch hat man nach Abb. 46 die Momentengleichung:

$$E_p\, e = \bar{E}_R\left(r_2 - \frac{s_R}{3}\right) + G_{sp}\, g - G'\, g',$$

aus der E_p für eine angenommene Gleitflächenlage zu errechnen ist.

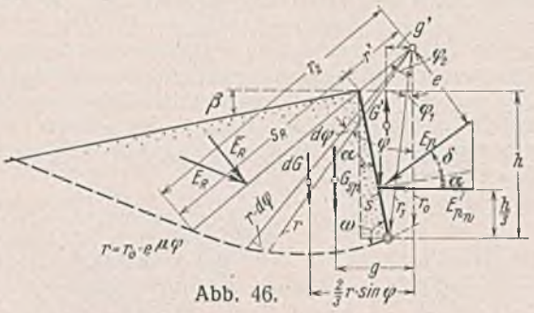

Abb. 46.

Im einzelnen erhält man bei bekanntem φ_1 und φ_2:

$$r_1 = s \cdot \frac{\sin(\alpha + \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)},$$

oder mit $h = s \cdot \cos\alpha$ und $h_1 = r_1 \cdot \cos\varphi_1$:

$$h_1 = h \cdot \frac{\cos\varphi_1}{\cos\alpha} \cdot \frac{\sin(\alpha + \varphi_2)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_1)} = h \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\varphi_2}{\operatorname{tg}\varphi_2 - \operatorname{tg}\varphi_1}$$

$$\frac{h_2}{\cos\varphi_2} = r_2 = r_1\, e^{\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{h}{\cos\varphi_1} \cdot e^{\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

oder

$$h_2 = h_1 \cdot \frac{\cos\varphi_2}{\cos\varphi_1} \cdot e^{\mu(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

$$h' = h_2 - h; \quad h_R = (h_2 - h')(1 - \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}\varphi_2).$$

Für das Moment von $\bar{E}_R$ hat man:

$$M_{E_R} = \frac{\bar{\nu}\, s_R}{2}\left(r_2 - \frac{s_R}{3}\right) = \frac{\bar{\nu}}{2} \cdot \frac{h_2 - h}{\cos\varphi_2}\left(\frac{h_2}{\cos\varphi_2} - \frac{h_2 - h}{3 \cdot \cos\varphi_2}\right)$$
$$= (1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2)\, \frac{\bar{\nu}}{6}\, (h_2 - h)(2\, h_2 + h),$$

für das Moment $G'\, g'$:

$$M' = \frac{1}{2} \cdot h' (\operatorname{tg}\varphi_2 - \operatorname{tg}\varphi_1)\, h_1 \left(\frac{2}{3} \cdot h' \cdot \operatorname{tg}\varphi_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot h \cdot \operatorname{tg}\alpha\right)$$
$$= \frac{1}{3} (\operatorname{tg}\varphi_2 - \operatorname{tg}\varphi_1)\, h_1\, h' \left(h' \cdot \operatorname{tg}\varphi_2 - \frac{h}{2} \cdot \operatorname{tg}\alpha\right),$$

für das Moment des Erdwiderstandes:

$$M_{E_p} = E_{p_w}\left(h_1 - \frac{h}{3}\right) - E_{p_w} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \delta)\left(h_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 + \frac{h}{3} \cdot \operatorname{tg}\alpha\right)$$
$$= E_{p_w}\left[h_1 - \frac{h}{3} - \frac{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\delta}{1 - \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\delta}\left(h_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 + \frac{h}{3} \cdot \operatorname{tg}\alpha\right)\right]$$

und endlich für das Moment der Spiralfläche (durch Integration):

$$M_{sp} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \gamma \cdot \frac{r^2\, d\varphi}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot r \cdot \sin\varphi = \frac{\gamma\, r_0^3}{3} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} e^{3\mu\varphi} \cdot \sin\varphi\, d\varphi$$
$$= \frac{\gamma\, r_0^3}{3} \cdot \frac{1}{1 + 9\,\mu^2}\left[e^{3\mu\varphi}(3\,\mu \cdot \sin\varphi - \cos\varphi)\right]_{\varphi_1}^{\varphi_2}$$

und mit $r_0\, e^{\mu\varphi_2} = r_2$ und $r_0\, e^{\mu\varphi_1} = r_1$:

$$M_{sp} = \frac{\gamma}{3(1 + 9\,\mu^2)}\left[r_2^3(3\,\mu \cdot \sin\varphi_2 - \cos\varphi_2) - r_1^3(3\,\mu \cdot \sin\varphi_1 - \cos\varphi_1)\right]$$
$$= \frac{\gamma}{3(1 + 9\,\mu^2)}\left[(1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2)(3\,\mu \cdot \operatorname{tg}\varphi_2 - 1)\, h_2^3 - (1 + \operatorname{tg}^2\varphi_1)(3\,\mu \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 - 1)\, h_1^3\right].$$

Zusammengefaßt ist also der Rechnungsgang für eine angenommene Gleitfläche wie folgt, wenn noch die Abkürzungen

$$\operatorname{tg}\alpha = a; \quad \operatorname{tg}\beta = b; \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = t_1; \quad \operatorname{tg}\varphi_2 = t_2; \quad \operatorname{tg}\delta = m$$

eingeführt werden:

$$(51)\quad \left\{\begin{aligned}
&\frac{1}{t_2}\,(= \operatorname{cotg}\omega) = +\sqrt{(1 + \mu^2)\,\frac{\mu + b}{\mu - b}} - \mu \\
&h_1 = \frac{a + t_2}{t_2 - t_1} \cdot h \qquad h_2 = h_1 \sqrt{\frac{1 + t_1^2}{1 + t_2^2}} \cdot e^{\mu(\varphi_2 - \varphi_1)} \\
&h' = h_2 - h \qquad h_R = (1 - b\, t_2)(h_2 - h') \\
&\bar{\nu} = \left(1 + \sqrt{\frac{\mu^2 - b^2}{1 + \mu^2}}\right)\frac{\gamma\, h_R}{1 + b^2} \\
&M_{E_R} = (1 + t_2^2)\,\frac{\bar{\nu}}{6}\,(h_2 - h)(2\, h_2 + h) \\
&M_{sp} = \frac{\gamma}{3(1 + 9\,\mu^2)}\,[(1 + t_2^2)(3\,\mu\, t_2 - 1)\, h_2^3 \\
&\qquad\qquad - (1 + t_1^2)(3\,\mu\, t_1 - 1)\, h_1^3] \\
&M' = \frac{1}{3}\,(t_2 - t_1)\left(t_2\, h' - \frac{a}{2} \cdot h\right) h'\, h_1 \\
&\left(\frac{M_{E_p}}{E_{p_w}}\right) = \left[h_1 - \frac{h}{3} - \left(t_1\, h_1 + \frac{a}{3} \cdot h\right)\frac{a + m}{1 - a\, m}\right] \\
&E_{p_w} = \left(\frac{E_{p_w}}{M_{E_p}}\right)(M_{E_R} + M_{sp} - M').
\end{aligned}\right.$$

Den Winkel φ_1 findet man aus dem Wandwinkel ω der Gleitfläche:

$$(51\,\text{a})\quad \varphi_1 = 90^\circ + \varrho - \omega - \alpha; \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = t_1 = \frac{1 + \operatorname{tg}\varrho \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \omega)}{\operatorname{tg}(\alpha + \omega) - \operatorname{tg}\varrho}$$
$$= \frac{(1 + \mu\, a)\operatorname{cotg}\omega + (\mu - a)}{(1 + \mu\, a) - \operatorname{cotg}\omega\,(\mu - a)}.$$

Umgekehrt ist:

$$(51\,\text{b})\quad \operatorname{cotg}\omega = \frac{(1 + \mu\, a)\, t_1 - (\mu - a)}{(1 + \mu\, a) + t_1\,(\mu - a)}.$$

Aus den Darlegungen an Hand der Abb. 44 geht hervor, daß man $\operatorname{cotg}\omega$ nicht genau nach Gl. (27) wählen darf, wenn man die ungünstigste Gleitfläche treffen will. Am besten wird man die Rechnung für drei oder vier t_1-Werte durchführen, um für E_p den kleinsten Wert zu finden. Ähnliches gilt natürlich auch für Abb. 45.

Bisher haben wir uns mit Näherungslösungen befaßt; die vorliegende Aufgabe ist jedoch auch leicht „genau" zu lösen[57]), wie jetzt gezeigt werden soll. Die genaue Berechnung kommt allerdings wegen der umfangreichen Zahlenrechnung für praktische Aufgaben wohl kaum in Betracht, sie ist aber wertvoll, um für einige Fälle den „Fehler" der Näherungsverfahren festzustellen.

Die genaue Lösung ist bereits von Kármán[58]) und von Jaky[59]) versucht worden. Kármán behandelt den Fall des Erddruckes für $\delta = \varrho$, indem er für den Kurvenbereich zwei Reihenentwicklungen ansetzt, und zwar einmal von der Wand ausgehend, das andere Mal von der letzten Rankineschen Gleitfläche ausgehend, und die beiden Reihen zu einer Lösung verbindet. Seine mathematischen Entwicklungen sind reichlich kurz gehalten. Über die Konvergenz der Reihenentwicklungen sagt er nichts; es erscheint fraglich, ob diese bei größerer Abweichung von der ebenen Gleitfläche (z. B. beim Erdwiderstand) noch hinreichend ist. Nach den Zahlenangaben Kármáns soll der genaue Wert des Erddruckes für lotrechte Wand nicht mehr als 1,5 % vom Coulombschen Näherungswert abweichen. — Jaky stellt für den Erddruck die Differentialgleichung der Gleitfläche auf. Er findet (vgl. Abb. 47):

$$A(\vartheta, \varphi)\,\frac{d^2\vartheta}{d\varphi^2} + B(\vartheta, \varphi)\left(\frac{d\vartheta}{d\varphi}\right)^2 + C(\vartheta, \varphi)\,\frac{d\vartheta}{d\varphi} = 0$$

---

[57]) „Genau" natürlich nur unter den bei der Gleitungstheorie gemachten Annahmen.

[58]) Th. v. Kármán, Über elastische Grenzzustände. Verhandlungen des 2. Intern. Kongresses f. techn. Mech., Zürich 1926.

[59]) J. v. Jaky, Die klassische Erddrucktheorie (ungarisch mit deutsch. Zusammenfassung). Vízügyi Közlemények (Wasserbauliche Mitteilungen), Budapest 1935 (Juli—September), S. 353.

mit

$$A(\vartheta,\varphi) = [\sin\varphi + \sin\varrho\cdot\cos(2\vartheta+\varphi-\varrho)]\sin(\vartheta+\varphi)\cos(\vartheta+\varphi-\varrho)$$

$$B(\vartheta,\varphi) = 4\cdot\sin\varrho\cdot\cos(\vartheta+\varphi-\varrho)\sin(\vartheta+\varphi)\sin(2\vartheta+\varphi-\varrho) + \cos(2\vartheta+2\varphi-\varrho)[\sin\varphi+\sin\varrho\cdot\cos(2\vartheta+\varphi-\varrho)]$$

$$C(\vartheta,\varphi) = \sin(2\vartheta+\varphi-\varrho)\cos^2\varrho + \cos(2\vartheta+2\varphi-\varrho)\cdot[\sin\varphi+\sin\varrho\cdot\cos(2\vartheta+\varphi-\varrho)].$$

Das Integral dieser Gleichung ist jedoch nicht in geschlossener Form anzugeben; eine zahlenmäßige Durchrechnung hat Jaky nicht gegeben[60]).

Wir geben nachstehend drei verschiedene „genaue" Verfahren, die der kurzen Kennzeichnung halber mit I, II und III bezeichnet seien. Bei der Ableitung des Verfahrens I gehen wir zunächst ähnlich wie Jaky vor.

Verfahren I.

Mit den Bezeichnungen der Spannungen nach Abb. 48a hat man die bekannnten Gleichgewichtsbedingungen in Polarkoordinaten:

$$\frac{\partial\nu''}{\partial r} \mp \frac{\partial\tau}{r\,\partial\varphi} + \frac{\nu''-\nu}{r} = \gamma\cdot\cos\varphi$$

$$\mp\frac{\partial\tau}{\partial r} + \frac{\partial\nu}{r\,\partial\varphi} \mp \frac{2\tau}{r} = -\gamma\cdot\sin\varphi.$$

Da nun nach unseren früheren Ausführungen der Spannungsverlauf längs der r-Strahlen geradlinig ist, so gilt:

$$\frac{\partial\nu''}{\partial r} = \frac{\nu''}{r} \quad\text{und}\quad \frac{\partial\tau}{\partial r} = \frac{\tau}{r}$$

und weiter mit $\tau = m\,\nu$:

$$(52)\quad \frac{\partial\tau}{\partial\varphi} = m\cdot\frac{\partial\nu}{\partial\varphi} + \nu\cdot\frac{dm}{d\varphi}.$$

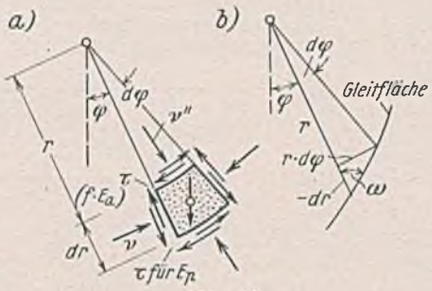

Abb. 48.

Setzt man diese Werte in die Gleichgewichtsbedingungen ein, so erhält man die Gleichungen:

$$(53)\quad \begin{cases} \left(\mp\dfrac{dm}{d\varphi} + 2\cdot\dfrac{\nu''}{\nu} - 1\right)\nu \mp m\cdot\dfrac{\partial\nu}{\partial\varphi} = \gamma r\cdot\cos\varphi \\ \mp 3\,m\,\nu + \dfrac{\partial\nu}{\partial\varphi} = -\gamma r\cdot\sin\varphi, \end{cases}$$

aus denen folgt:

$$\nu = \gamma r\cdot\frac{\cos\varphi \mp m\cdot\sin\varphi}{\mp\dfrac{dm}{d\varphi} + 2\cdot\dfrac{\nu''}{\nu} - 1 - 3m^2}$$

$$\frac{\partial\nu}{\partial\varphi} = \gamma r\left[\frac{3m(\pm\cos\varphi - m\cdot\sin\varphi)}{\mp\dfrac{dm}{d\varphi} + 2\cdot\dfrac{\nu''}{\nu} - 1 - 3m^2} - \sin\varphi\right].$$

Für $\frac{\nu''}{\nu}$ kann man nach Gl. (30) einsetzen:

$$\frac{\nu''}{\nu} = m^2 + [\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2 - m^2}]^2$$

und erhält dadurch:

$$(54)\quad \begin{cases} \nu = \gamma r\cdot\dfrac{\cos\varphi \mp m\cdot\sin\varphi}{\mp\dfrac{dm}{d\varphi} + 2(\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2-m^2})^2 - 1 - m^2} \\ \dfrac{\partial\nu}{\partial\varphi} = \gamma r\left[\dfrac{3m(\pm\cos\varphi - m\cdot\sin\varphi)}{\mp\dfrac{dm}{d\varphi} + 2(\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2-m^2})^2 - 1 - m^2} - \sin\varphi\right]. \end{cases}$$

Nach der ersten dieser Gleichungen ist auch:

$$(55)\quad \mp\frac{dm}{d\varphi} = \frac{\gamma r}{\nu}(\cos\varphi \mp m\cdot\sin\varphi) - 2(\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2-m^2})^2 + 1 + m^2.$$

Um aus Gl. (54) die Unbekannte ν fortzuschaffen, können wir die erste der Gleichungen nach φ partiell differenzieren. Die Gleichsetzung von $\frac{\partial\nu}{\partial\varphi}$ liefert dann nach kurzer Rechnung schließlich folgende Differentialgleichung für m, wenn zur Abkürzung

$$w = \sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2-m^2}$$

gesetzt wird und nach Teilung durch $\cos\varphi$:

$$(56)\quad (\pm 1 - m\cdot\operatorname{tg}\varphi)\frac{d^2m}{d\varphi^2} + 2\cdot\operatorname{tg}\varphi\left(\frac{dm}{d\varphi}\right)^2 + (4m \mp M_1\cdot\operatorname{tg}\varphi)\frac{dm}{d\varphi} + (M_2 + M_3\cdot\operatorname{tg}\varphi) = 0,$$

wobei die M folgende Funktionen von m sind:

$$M_1 = 3(2w^2 - 1)$$

$$M_2 = m\left[6 \pm \sqrt{\frac{1+\mu^2}{\mu^2-m^2}} \mp 4(2w^2 - 1 - m^2)\right]$$

$$M_3 = \mp m^2\left(6 \pm \sqrt{\frac{1+\mu^2}{\mu^2-m^2}}\right) + 2(m^2+w^2)(2w^2-1-m^2),$$

die für einen bestimmten Reibungsbeiwert μ vorweg berechnet werden können.

Zahlenmäßig wird man am einfachsten nach dem Verfahren der fortlaufenden Extrapolation rechnen[61]). Hat man m als Funktion von φ berechnet, so findet man ν aus Gl. (54). Die Gleitflächenrichtungen erhält man aus Gl. (27).

Nach Abb. 48b kann gesetzt werden:

$$\operatorname{cotg}\omega = -\frac{dr}{r\,d\varphi},$$

so daß man die Gleitfläche auch berechnen kann aus:

$$(57)\quad r = r_0\cdot e^{-\int_{\varphi_0}^{\varphi}\operatorname{cotg}\omega\,d\varphi},$$

wenn $r_0 = r$ für $\varphi = \varphi_0$ bedeutet.

Von Interesse ist noch der Verlauf der Spannungswerte in unmittelbarer Nähe einer „rauhen" Wand ($\varrho' = \varrho$). Aus Gl. (55) erhält man für $m = +\mu$:

$$(55a)\quad \mp\left(\frac{dm}{d\varphi}\right)_{m=\mu} = \frac{\gamma r}{\nu}(\cos\varphi \mp \mu\cdot\sin\varphi) - (1+\mu^2),$$

aus Gl. (53):

$$(53a)\quad \left(\frac{\partial\nu}{\partial\varphi}\right)_{m=\mu} = \pm 3\,\mu\,\nu - \gamma r\cdot\sin\varphi$$

und aus Gl. (52) unter Beachtung von Gl. (55a) u. (53a):

$$(52a)\quad \left(\frac{\partial\tau}{\partial\varphi}\right)_{m=\mu} = \mu\cdot\frac{\partial\nu}{\partial\varphi} + \nu\cdot\frac{dm}{d\varphi} = \pm(1+4\mu^2)\nu \mp \gamma r\cdot\cos\varphi.$$

Für ν'' erhält man aus Gl. (30) durch Reihenentwicklung die Näherungsformel:

$$(58)\quad \nu''_{m\approx\mu} \approx \left[(1+2\mu^2) \pm 2\sqrt{2\mu(1+\mu^2)}\sqrt{-\left(\frac{dm}{d\varphi}\right)_{m=\mu}\cdot\varphi}\right]\nu,$$

d. h.

$$\left(\frac{\partial\nu''}{\partial\varphi}\right)_{m=\mu} = \pm\infty.$$

[60]) In einem Punkte muß ich Jaky widersprechen. Ebenso wie Kármán geht Jaky von der Voraussetzung dreieckförmiger Druckverteilung längs der durch den oberen Wandpunkt gehenden Strahlen aus (die angeblich auf Boussinesq zurückgeht). Er erhält im Verlauf der Rechnung nun auch die Köttersche Gleichung und folgert daraus, daß das als ein Beweis für die Richtigkeit der Boussinesqschen Annahme anzusehen wäre, da Kötter ohne diese Annahme zu demselben Ergebnis gekommen ist. Diese Folgerung darf aber nicht gezogen werden, denn es ist selbstverständlich, daß das Köttersche Gesetz mit jeder genauen Rechnung übereinstimmt. Wie ich oben gezeigt habe, trifft die Annahme dreieckförmiger Druckverteilung zwar für eine Wanddrehung um den untersten Wandpunkt zu, sie gilt aber nicht allgemein.

[61]) s. z. B. v. Mises, Zur numerischen Integration von Differentialgleichungen. Z. ang. Math. 1930, S. 81.

(Fortsetzung folgt.)

Alle Rechte vorbehalten.

Neuere U-Bahnstrecken in Paris.

In Gén. Civ. 1938, Bd. 112, Nr. 1 vom 1. Januar, S. 1, sowie in Nr. 2 vom 8. Januar, S. 36 und Nr. 3 vom 15. Januar, S. 57, sind im Anschluß an frühere Berichte der gleichen Fachschrift vom 11. und 18. August 1935 Angaben über die baulichen Erweiterungen, neuen Anschlüsse und geplanten Linien des vielfach verzweigten Untergrundbahnnetzes von Paris zu finden. Diese scheiden sich in solche, bei denen ein unmittelbares Verkehrsbedürfnis vorlag, und in solche von geringerer Wichtigkeit, die nach und nach von der Compagnie du Chemin de fer métropolitain in Angriff genommen wurden.

Abb. 1 zeigt das gegenwärtige Netz mit den im Betrieb bzw. im Bau befindlichen und den geplanten Linien. Man erkennt, daß das gesamte Verkehrsnetz durch 15 Linien im wesentlichen bereits so weit festgelegt ist, daß kaum noch neue Hauptstrecken hinzugefügt werden können. Bei weiter steigendem Verkehr werden daher voraussichtlich Einfügungen von Schnellverkehrstrecken in Frage kommen. Die Verlängerungen der 15 Linien, soweit sie im Dezember 1929 als verkehrswichtig erklärt wurden, sind bereits in Gén. Civ. 1934 vom 11. August, S. 123, besprochen worden[1]).

In Betrieb genommen sind inzwischen folgende Verlängerungen:

1. seit Februar 1934 Linie Nr. 1 von Porte de Saint-Cloud bis Pont de Sèvres;
2. seit März 1934 Linie Nr. 1 von Porte de Vincennes bis Château de Vincennes und die Verlängerung der Linie Nr. 12 über Porte de Versailles hinaus;
3. seit Februar 1937 Linie Nr. 11 von Porte des Lilas bis Fort de Noisy;
4. seit April 1937 Linie Nr. 1 von Porte Maillot bis Pont de Neuilly;
5. seit September 1937 Linie Nr. 3 von Porte Champerret bis Pont de Levallois;
6. seit Oktober 1937 Linie Nr. 9 von Porte de Montreuil bis Mairie de Montreuil;

[1]) Vgl. auch Bautechn. 1935, Heft 4, S. 53.

7. die Verlängerungen von Linie Nr. 8 bis Charenton-Ecoles, der Linie Nr. 5 bis Eglise de Pantin und der Linie Nr. 7 bis Mairie d'Ivry, die jedoch wegen besonderer Schwierigkeiten, die sich aus der Natur der Bodenschichten ergaben, bisher noch nicht vollständig fertiggestellt werden konnten.

Zu den im vergangenen Jahre fertiggestellten Teilen gehört die Linie Nr. 1 von Porte Maillot bis Pont de Neuilly. Dieser Zweig geht unterhalb der alten Linie Nr. 1 und der Chemin de fer de Ceinture hindurch.

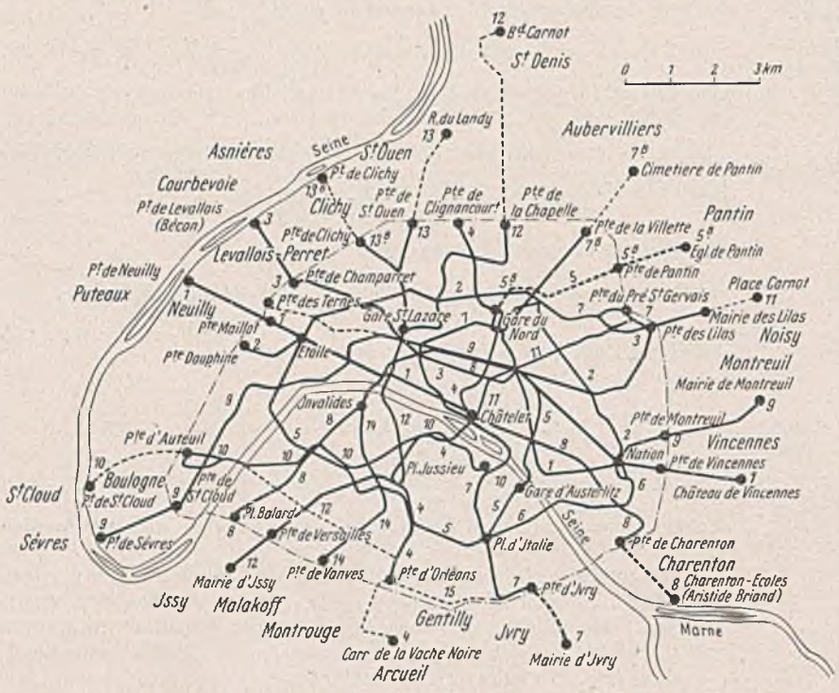

Abb. 1.

Hierbei ergab sich die Notwendigkeit der Umgestaltung des alten Endbahnhofs von Maillot, so daß im Zuge dieses Bauabschnitts drei neue Stationen von 105 m Länge anzulegen waren. Erwähnenswert ist hierbei eine die Station Porte Maillot kreuzende unterirdische Straßenüberführung, die gleichzeitig angelegt wurde.

Die Verlängerung der Linie Nr. 3 von Porte Champerret bis Pont de Levallois umfaßt eine Strecke von 1840 m Länge mit drei Stationen von 105 m Länge. Sie liegt in wasserhaltigen, angeschwemmten Bodenschichten über kalkhaltigen Formationen und hat bis auf die Untertunnelung der Linie 3, wobei ein Gefälle von 40 mm/m erforderlich wurde, nur ganz geringe Höhenunterschiede.

Beim Ausbau der Strecke Nr. 9 bis Mairie de Montreuil von insgesamt 2570 m Länge kamen ebenfalls drei Stationen von 105 m Länge zur Ausführung. Besondere Schwierigkeiten bot der Teil an der Endstation wegen der stark wasserhaltigen Bodenschichten. In Abb. 2 ist der Tunnelquerschnitt für die dreigleisige Endstrecke angegeben.

Die Verlängerung der Linie 8 über La Motte-Picquet hinaus umfaßt sechs Stationen von 105 m Länge. Ihre Vereinigung mit den Linien Nr. 10 u. 5 am Bahnhof La Motte-Picquet-Grenelle mit der ursprünglichen neuen Gleisführung zeigt Abb. 3. Besonders bemerkenswert wegen des Umbaues des alten Tunnels der Linie Nr. 8 zwischen der Station Champ de Mars und La Motte-Picquet-Grenelle, der unter voller Aufrechterhaltung des Betriebes während der ganzen Bauzeit vor sich gehen mußte, ist das hier angewendete und aus dem Querschnitt gemäß Abb. 4 ersichtliche Bauverfahren. Die Notwendigkeit der getroffenen Maßnahmen ergibt sich im Hinblick auf Abb. 3.

Bei der neuen Station La Motte-Picquet-Grenelle ergab sich in Anbetracht der geringen Breite zwischen der Tunnelwand der alten Station und der angrenzenden Häuserfront eine Anordnung der neuen Bahnsteige in zwei verschiedenen Höhenlagen, sowie die Verlegung eines Sammelrohres in die Stützmauer der angrenzenden Häuserfront. Die Bodenschichten und der Grundwasserspiegel sind aus dem in Abb. 5 gegebenen Querschnittsbild ersichtlich.

Im Zuge der Linie Nr. 14 wurden in dem neu eingelegten Teil von insgesamt 3297 m fünf Stationen zwischen Invalides und Porte de Vannes von 75 m Länge angelegt. Hier ist noch die Station Bienvenue bemerkenswert, die unterhalb der Avenue du Maine in der Nähe des Bienvenue-Platzes gelegen ist. Dieser Teil hat einen linsenförmigen Querschnitt von 14 m größter lichter Weite und 3,70 m Höhe über S.-O. erhalten. Die beiden seitlich angeordneten Bahnsteige ruhen auf Gewölbekappen, die sich auf Grundpfeiler stützen. Die Konstruktion war zur Vermeidung einer kostspieligen Umlegung eines Hauptsammlers erforderlich (Abb. 6).

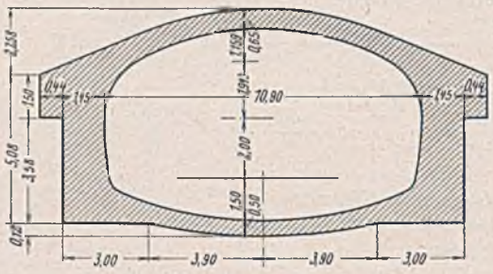

Abb. 2.

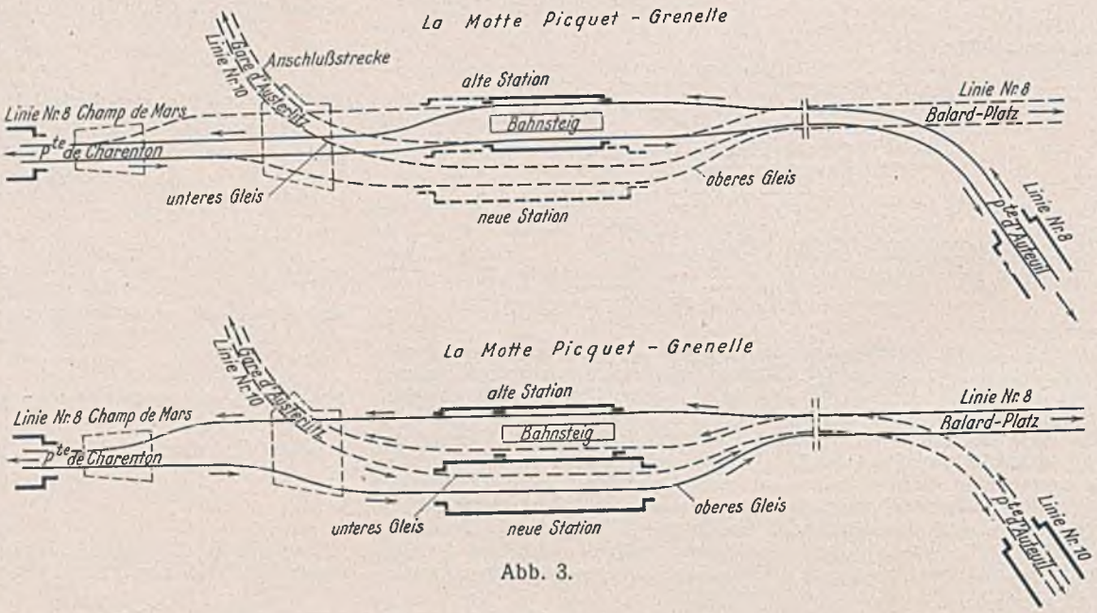

Abb. 3.

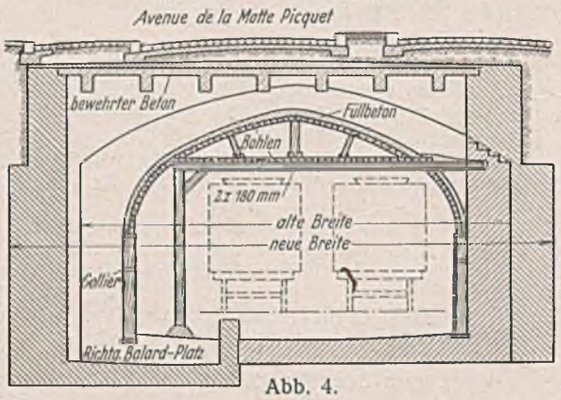

Abb. 4.

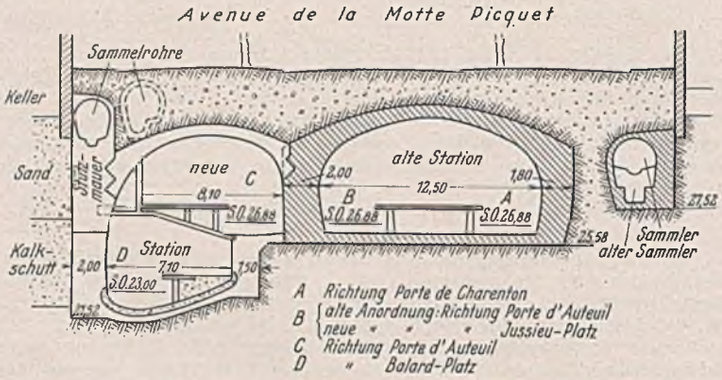

Abb. 5.

Zu den neuerdings fertig gewordenen Baustrecken gehört die Strecke der Linie 11 von Place du Chatelet nach Porte des Lilas und die Verlängerung bis Mairie des Lilas. Diese hat eine Gesamtlänge von 6932 m mit 13 Stationen von 75 m Länge. Sie ist mit der Linie Nr. 3 auf Schienenhöhe vereinigt. Trotz vieler in ihrem Verlauf liegenden Hindernisse hält sie sich am Anfang in geringer Tiefe bei ebenfalls geringen Gefälleunterschieden. Am Platz der Republik unterfährt sie bei ebenfalls geringem Gefälle die hier zusammenstoßenden Linien 3, 5, 8 und 9, um kurz hinter dieser Station unterhalb des Kanals Saint-Martin hindurchzulaufen. Lediglich nach dem Ende hin steigt sie in einer Rampe 40 mm/m, so daß der gesamte Höhenunterschied sich auf etwa 90 m beläuft. Infolge der erheblichen Verschiedenheit der zu durchfahrenden Bodenschichten ist man hier von den sonst üblichen Tunnelquerschnitten abgewichen, unter Anwendung von neuartigen Formen, die in Abb. 7 wiedergegeben sind.

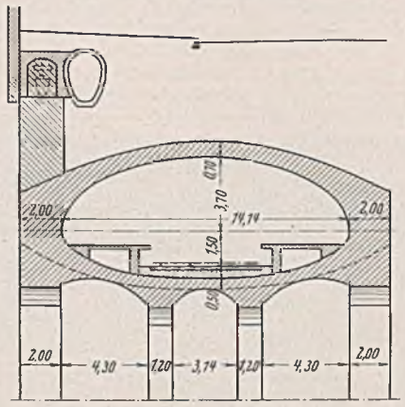

Abb. 6.

Eine besondere Querschnittsform ist bei der Station Porte des Lilas wegen der vorhandenen Bodenschichten (Marnes Vertes) als vorläufige Endstation mit drei Gleisen angewendet worden, wobei in einem Tunnelteil ein Gleis und im anderen zwei seitliche Gleise mit einem Mittelbahnsteig angeordnet sind. Die Querschnittsabmessungen sind aus Abb. 8 zu entnehmen.

Die besonderen Schwierigkeiten in dem höher gelegenen Endteil sind in Gén. Civ. 1938 vom 8. Januar, S. 37 u. 38, im einzelnen geschildert. Auf S. 57 in Gén. Civ. 1938 vom 15. Januar wird Bemerkenswertes über diese Strecke in der Nachbarschaft der Kirche Saint-Jean-Baptiste de Belleville berichtet, die sich unmittelbar neben der Strecke bis zu einer Höhe von 65 m erhebt. Den Seitendruck des Bodens hat man in den hier kalkhaltigen Schichten durch eine 23 m lange, über die seitliche Tunnelwand hinaufreichende Stützmauer von 2,38 m Dicke abgefangen. Die hier liegende Station Rue du Jourdain hat zwei außenliegende Bahnsteige, deren Oberkanten sich 21 m unter Straßenoberfläche befinden (Abb. 9). — Bemerkenswerte Verfahren für den Bau des Tunnels und der Stationen sind in der Nähe und am Place des Fêtes angewendet worden. An dieser Stelle nähert sich die Linie 1 der Linie 7 und verläuft zunächst in gipshaltigen Schichten und hinter dem Platz in lehmigem Boden (glaises vertes), der wenig widerstandsfähig ist. Da die Strecke hier mit dem Scheitel des Tunnels in Tiefen von etwa 18 bis 20 m unter der Straßenoberfläche liegt und vielfach Stadtteile mit alten Bauwerken unterfährt, wurden wegen der Rutschgefahr des Bodens besondere, zum Teil sehr kostspielige Verfahren angewendet. Durch Hinuntertreiben von Brunnen im Abstand von etwa 20 m in der Flucht der Tunnelwände bzw. Mittelpfeiler stieß man durch die schwierigen und wasserhaltigen Schichten hinunter und verband an der Sohle die Brunnen zunächst durch massive Mauerblöcke im Stollenvortrieb, wobei der Bodendruck durch sorgfältige Absteifung und Hinterfüllung des Mauerwerks abgefangen wurde. Die Voutenansätze der Gewölbebogen wurden hierbei, wie dies Abb. 10 zeigt, abgesteift, danach wurde in üblicher Weise der Scheitelteil des Korbbogens eingefügt.

Bei der Herstellung der Station Rue du Télégraphe, bei der Lehmboden ansteht und die zur Hälfte unterhalb von Bauwerken liegt, wurde unterhalb der Mittelpfeiler eine durchgehende Stollengründung verwendet, während die Seitenwände Einzelpfeiler tragen. Die einzelnen Stollen wurden hier absatzweise übereinander ausgeführt, wobei man von in Flucht der Mittelpfeiler abgesenkten Brunnen ausging. Diese Ausführungsform zeigt Abb. 11.

Bei der Endstrecke hinter der Station Mairie des Lilas wurde in bekannter Weise Stollenvortrieb verwendet.

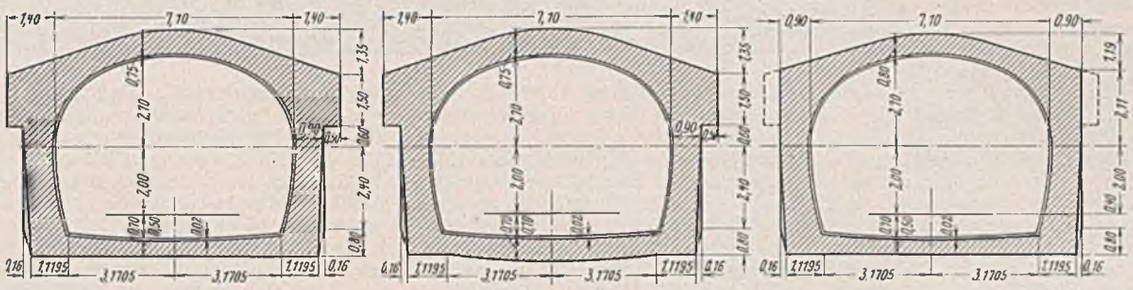

Abb. 7.

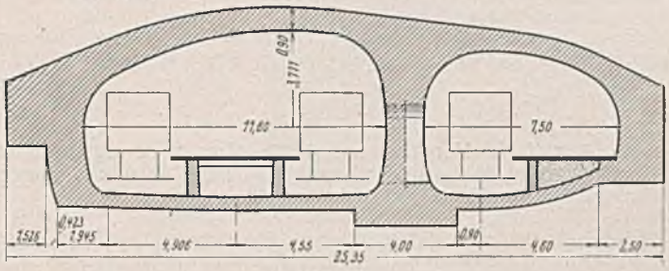

Abb. 8.

Wegen der Gefahr der Betonzersetzung infolge der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer wandte man vielfach mit Erfolg passende Zemente mit Sodazusatz an.

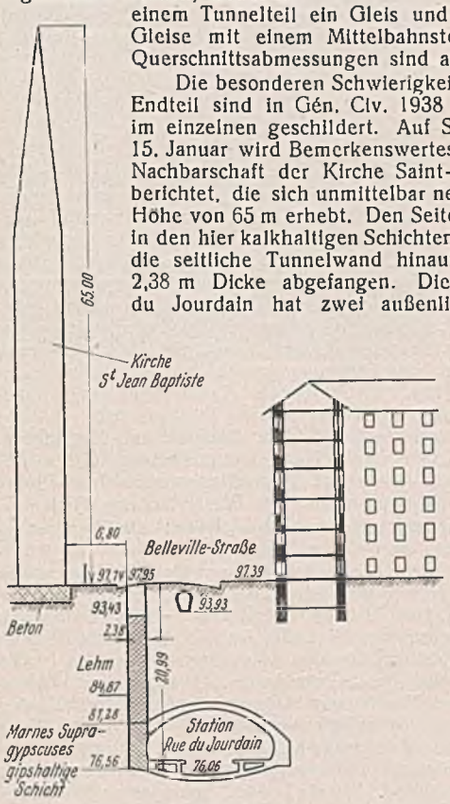

Abb. 9.

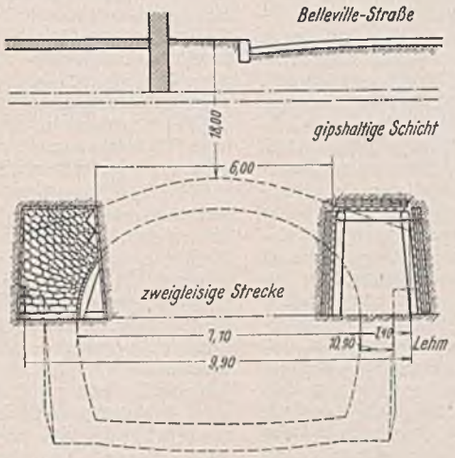

Abb. 10.

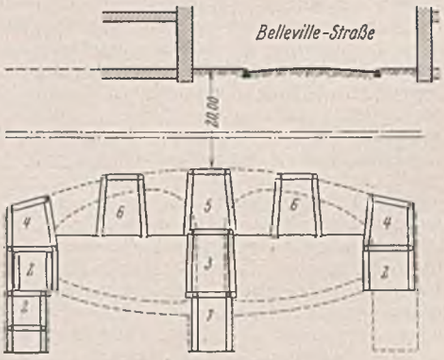

Abb. 11.

Im übrigen ist besondere Sorgfalt auf die Belüftung der z. T. recht tief liegenden Strecken verwendet worden. Der Zu- und Abgang bei den Stationen ist durch Einbau von geräuschlos laufenden und selbsttätig anspringenden Rolltreppen trotz der Höhenunterschiede bequem erreichbar. Zs.

Alle Rechte vorbehalten.

Der Plan der Hamburger Elbehochbrücke.

Nach Mitteilungen des Generalinspektors für das Deutsche Straßenwesen, Dr.-Ing. Fritz Todt, die er dem „Hamburger Tageblatt" zur Verfügung gestellt hat und die in der genannten Zeitung vom 9. Februar 1938 veröffentlicht sind, hat der Führer und Reichskanzler den Plan für eine Hamburger Elbehochbrücke zur Entlastung des 1907 bis 1911 erbauten Elbtunnels angeregt. Im März 1937 wurde für die Vorarbeiten ein eigenes Brückenamt Hamburg errichtet, das zunächst die MAN mit der Ausarbeitung eines Vorentwurfs beauftragte. Das Brückenamt Hamburg ist dem Generalinspektor unmittelbar unterstellt und wurde in erster Linie mit Personal der Brückenbauabteilung der OBR Berlin und mit orts-

kundigen Hilfskräften besetzt. Die Leitung wurde Baudirektor Usinger übertragen. Für die Architektur des Bauwerks gab der Führer selbst richtungweisende Anregungen, besonders in bezug auf die Brückenform und auf die Gestaltung der steinernen Pfeiler.

Das Brückenamt schlug für die Lage der Brücke, abweichend von den drei ersten Vorschlägen (A, B, C) eine neue Linie D („Brückenlinie 1700") vor, die begründet ist in dem Bilde eines zukünftigen Groß-Hamburg mit seinen weiträumigen Planungen der Siedlungen, Häfen, Industrie- und Verkehrsanlagen. Als eindrucksvolles Tor zum neuen Hamburg soll an dieser Stelle die als Hängebrücke geplante Elbehochbrücke in der Schwerlinie einer Stadterweiterung auf der Nordseite und ebenso in der Schwerlinie der geplanten Großhäfen und Großsiedlungen auf der Südseite den Strom überspannen, zugleich als Abschnitt eines zügigen Doppelringes der Reichsautobahnen um Hamburg-Altona und Harburg-Wilhelmsburg. Die Hängebrücke selbst mit ihren Rampenbrücken und Auffahrten, der dazu senkrechte Brückenzug über den Köhlbrand, das Gauhochhaus mit Festplatz und Reisehafen gegenüber dem Köhlbrand, der verlegte Hauptbahnhof Altona mit seinen umfangreichen Bahnanlagen beherrschen im Grundriß und Aufriß weite Räume. Sie bedingen demnach sowohl für ihre technische Entwicklung als auch aus architektonischen Gründen die gewählten großen Abstände. Die „Brückenlinie 1700" hat am 22. Oktober 1937 auch die Zustimmung des Führers gefunden. Der gemeinsam von der MAN und insbesondere hinsichtlich der architektonischen Fragen von Prof. Haerter aufgestellte Entwurf wurde zur Ausführung bestimmt.

Die Untersuchungen des Brückenamtes Hamburg in enger Zusammenarbeit mit den Hamburger Hafenbehörden ergeben zunächst, daß die Stützweite der Hauptöffnung der Brücke, die anfänglich zu 630 m bestimmt war, zweckmäßig auf 700 m erweitert werden mußte. Auf diese Weise wurde eine verbesserte Einfahrt zu dem unmittelbar oberhalb der Brücke abzweigenden Hafenbecken geschaffen. Die gewählte Brückenstelle eröffnet eine Erweiterungsmöglichkeit der gesamten Hamburger Hafenanlagen, wie sie eine weiter stadteinwärts liegende Brückenstelle niemals hätte ergeben können. Schon jetzt setzt die Nachfrage nach den sich damit erschließenden Industrieflächen ein, und die Hamburger Verwaltung beabsichtigt, den Altonaer Fischereihafen, der ursprünglich hinter die Personenkaianlagen weiter stromauf hätte verlegt werden sollen, in das durch die Hamburger Hochbrücke nunmehr neu erschlossene Gelände zu verschieben. Die Brückenfahrbahn liegt mit einer Nutzbreite von 47 m zwischen den Geländern in rund 80 m Höhe über dem Strom. Die beiderseitigen Rampengefälle sind mit 2,5 % gewählt, da eine zweigleisige elektrische Schnellbahn übergeführt werden soll. Die gleichzeitige Überführung einer Vollbahn wird noch untersucht. Hochragende Steinpfeiler, die eine Höhe über dem Wasser bis zu rd. 180 m und eine Breite bis zu 22 m in den Seitenflächen besitzen, tragen hoch über dem Strom das stählerne Hängewerk der Brückenfahrbahn. Das Ganze ist, wie die obenstehende Abbildung eines Modells der Hochbrücke erkennen läßt, von einfachen, großen architektonischen Formen, für die Verkehrsansprüche einer weiten Zukunft bemessen.

Der Stahlüberbau ist als „echte" Hängebrücke mit einer 700 m weiten mittleren Öffnung geplant und in den Endwiderlagern verankert.

Entsprechend dem Wunsche des Führers soll noch in diesem Jahre der Grundstein zu diesem großartigen Baudenkmal gelegt werden. Die Bauzeit ist auf etwa 7 Jahre veranschlagt.

Vermischtes.

Die Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin wird künftig die amtliche Bezeichnung führen: „Preußische Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau".

Eisenbeton für Untergrundbahn-Röhrentunnel. Das Londoner Personen-Verkehrsamt baut jetzt erstmals den Röhrentunnel einer Untergrundbahnstrecke aus Eisenbetonschüssen auf. Es handelt sich dabei, wie Mod. Transp. 1938 vom 2. April berichtet, um eine 4 km lange Verlängerungsstrecke der Central Line, für die 48 000 Eisenbetonsegmente und 8000 kleine Paßstücke erforderlich sind. Die Bestrebungen zur Verwendung von Eisenbeton an Stelle des seit 1869 benutzten Gußeisens für die Wand des viele Meter unter der Erdoberfläche liegenden Röhrentunnels gehen bis in die Zeit unmittelbar nach dem Weltkriege zurück. Jedoch kam es erst jetzt zu praktischen Auswirkungen dieser Bestrebungen, nachdem es seit etwa einem halben Jahr in England schwierig ist, Gußeisen für derartige große Neubauten in ausreichender Menge zu erhalten. Es wurde nunmehr ein Eisenbetonsegment entwickelt, das 51 mm Wanddicke hat, aber nicht schwerer ist als die bisher verwendeten Gußeisensegmente von 22 mm Wanddicke. Diese Eisenbetonsegmente, über deren Verbindung untereinander die Quelle nichts angibt, wurden verschiedenen bemerkenswerten Versuchen unterzogen. So muß das Tunnelrohr dem Druck beim Vortreiben der Schilder standhalten, einem Druck, der bis etwa 570 t ansteigen kann. In einem der im Bau befindlichen Tunnel wurden bei den Versuchen mehrere aus Eisenbetonsegmenten zusammengesetzte vollständige Schüsse eingebaut; hierbei wurde festgestellt, daß die Schüsse dem Vortrieb-Gegendruck standzuhalten vermögen. Weitere Versuche wurden hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegen den Erddruck gemacht. So wurde ein Tunnel von 2,6 m Durchm. halb aus Gußeisen-, halb aus Eisenbetonschüssen errichtet, deren Oberkante 0,76 m unter der Erdoberfläche lag. Durch eine zusätzliche Belastung von etwa 180 t wurden der normalen Tiefenlage entsprechende Verhältnisse hergestellt. Ferner wurde in gleicher Weise ein Tunnel von 3,66 m Durchm. zusätzlich mit etwa 230 t belastet. Auch diese Versuche befriedigten.

Spieß.

Personalnachrichten.

Preußen. Wasserbauverwaltung. Versetzt: die Regierungsbauräte Casper vom Reichs- und Preußischen Verkehrsministerium an das Neubauamt Münden (Hann.), Jung von der Elbstrombauverwaltung in Magdeburg an das Neubauamt Eisenach als Vorstand, Rollmann vom Kanalbauamt Bernburg an die Elbstrombauverwaltung in Magdeburg, Dr.-Ing. Hoffmann, bisher beurlaubt, an das Kanalbauamt Bernburg, F. Poppe vom Wasserbauamt Stralsund-West an das Wasserbauamt Kiel, Jentsch vom Hafenbauamt Kolberg an das Wasserbauamt Stralsund-West, Steffenhagen vom Hafenbauamt Swinemünde an das Hafenbauamt Kolberg, H. Kruse vom Wasserbauamt Fürstenwalde an das Hafenbauamt Swinemünde, Roloff vom Kanalbauamt Magdeburg an das Neubauamt Eschwege als Vorstand, G. Müller vom Wasserbauamt Tapiau an die Wasserbaudirektion in Königsberg (Pr.), Zechlin vom Wasserbauamt Elbing an das Wasserbauamt Tapiau als Vorstand, Germelmann vom Wasserbauamt Duisburg-Rhein an das Schleppamt Duisburg-Ruhrort als Vorstand, Sprotte vom Neubauamt Meppen an das Wasserbauamt Crossen als Vorstand, Eschweiler vom Wasserbauamt Rheine an das Wasserbauamt I Koblenz, R. Hinze vom Wasserbauamt I Koblenz an das Wasserbauamt Celle, Schutte vom Vorarbeitenamt Fürstenwalde nach Berlin zur vorübergehenden Beschäftigung im Reichs- und Preußischen Verkehrsministerium, von Bloh vom Schleppamt Hannover an das Neubauamt Havelberg; — die Regierungsbauassessoren Illiger vom Bauamt für den Masurischen Kanal in Insterburg an das Kanalbauamt Magdeburg, Karth vom Wasserbauamt Tilsit an das Wasserbauamt Elbing, Gerhardt vom Wasserbauamt Wesermünde an das Wasserbauamt Duisburg-Rhein, Flören vom Hafenbauamt Stolpmünde an das Wasserbauamt Tilsit.

Unter Übernahme in den Staatsdienst überwiesen: die Regierungsbauassessoren Kattenbusch dem Wasserbauamt Stralsund-West, Rottmann dem Neubauamt Nienburg, Liese dem Bauamt für den Masurischen Kanal in Insterburg, Prager der Rheinstrombauverwaltung in Koblenz, Rühter dem Maschinenbauamt Minden, Altwasser dem Neubauamt Meppen, Franz dem Wasserbauamt Gleiwitz, Raabe dem Hafenbauamt Stolpmünde, Rumpf dem Bauamt für den Masurischen Kanal in Insterburg, F. Schulz dem Wasserbauamt Eberswalde, Urmes dem Wasserbauamt Dorsten, Junker dem Neubauamt Meppen, Klimpel dem Wasserbauamt I Minden, E. Mügge dem Wasserbauamt II Minden, Köpke dem Wasserbauamt Emden, Mackensen dem Wasserbauamt Rheine, Hinrichsen dem Wasserbauamt Wesermünde, Freudenberg dem Wasserbauamt Landsberg a. d. W., Würfel dem Schleppamt Hannover.

In den Ruhestand getreten: Regierungsbaurat Blitz, Vorstand des Wasserbauamts Crossen.

Ausgeschieden: Regierungsbaurat Bothmann, bisher aushilfsweise im Reichs- und Preußischen Verkehrsministerium, durch Übertritt zur Preußischen landwirtschaftlichen Verwaltung; — Regierungsbauassessor Scherpe, bisher beim Neubauamt Havelberg, durch Übertritt zur Provinzialverwaltung Brandenburg-Grenzmark.

INHALT: Die Umbauarbeiten der Margarethen-Donaubrücke in Budapest. (Schluß.) — Zur Theorie des Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung. (Fortsetzung.) — Neuere U-Bahnstrecken in Paris. — Der Plan der Hamburger Elbehochbrücke. — Vermischtes: Die Preußische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. — Eisenbeton für Untergrundbahn-Röhrentunnel. — Personalnachrichten.

Verantwortlich für den Inhalt: A. Laskus, Geh. Regierungsrat, Berlin-Friedenau.
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
Druck der Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin.