

Das Setzungsverhalten der Straßenbahnbehelfsbrücke neben der eingestürzten Wiener Reichsbrücke über die Donau

von Manfred Fross

Vorbemerkung

Der vorliegende Aufsatz ist in ähnlicher Form in den Proceedings der 5. Donaueuropäischen Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau, 5. bis 7. September 1977 in Preßburg, CSSR, erschienen. Die Ergänzungen, vorwiegend Fotos von der Baudurchführung und Meßergebnisse bis Jänner 1977, wurden als Diskussionsbeitrag bei der Konferenz vorgetragen und in diesen Aufsatz eingearbeitet.

1. Einleitung

Bekanntlich stürzte am 1. August 1976 die Wiener Reichsbrücke wenige Minuten vor 5 Uhr früh ein (Abbildung 1).



Abb. 1

Im Abschlußbereich der Expertenkommission, die zur Klärung der Einsturzursache eingesetzt wurde, kam klar zum Ausdruck, daß der Einsturz keinesfalls

durch ein Versagen der Fundierung der Brücke ausgelöst wurde.

Am 15. Oktober 1976 nahmen die Wiener Verkehrsbetriebe nach nur ca. 2 Monaten Bauzeit den regelmäßigen Straßenbahnverkehr auf einer zweigleisigen Behelfsbrücke auf. Eine ähnlich konstruierte zweispurige Straßenbahnbehelfsbrücke wurde zu Ende des Jahres 1976 dem Verkehr übergeben. Der folgende Beitrag gibt eine kurze Darstellung der Planung, Ausführung, Überprüfung und des Verhaltens der Fundierung der Straßenbahn-Behelfsbrücke.

2. Planung

2.1 Projektbeschreibung

Die Behelfsbrücke überquert die Donau ca. 120 m stromaufwärts der Achse der eingestürzten Reichsbrücke. Der Entwurf für die Fundierung der Joche wurde vom Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Alfred PAUSER, Zivilingenieur für Bauwesen, Wien, ausgearbeitet. Als Tragwerke wurden nach den beiden Fahrtrichtungen getrennte Fachwerke gewählt. Der Achsabstand der beiden parallelen Brücken ist 6 m. Die Feldteilung ist Abbildung 2 zu entnehmen. Sämtliche Tragwerke sind statisch bestimmt gelagert. Für die Randfelder wurden D-Brückengeräte des Österreichischen Bundesheeres, für die drei Stromfelder Fachwerke einer Arbeitsgemeinschaft österreichischer Stahlbauunternehmungen verwendet.

Für die Joche wurde mit Rücksicht auf eine schnelle Herstellbarkeit folgendes System gewählt: Jedes Joch besteht aus zwei Halbjochen, jedes Halbjoch wird von zwei Großbohrpfählen des Durchmessers

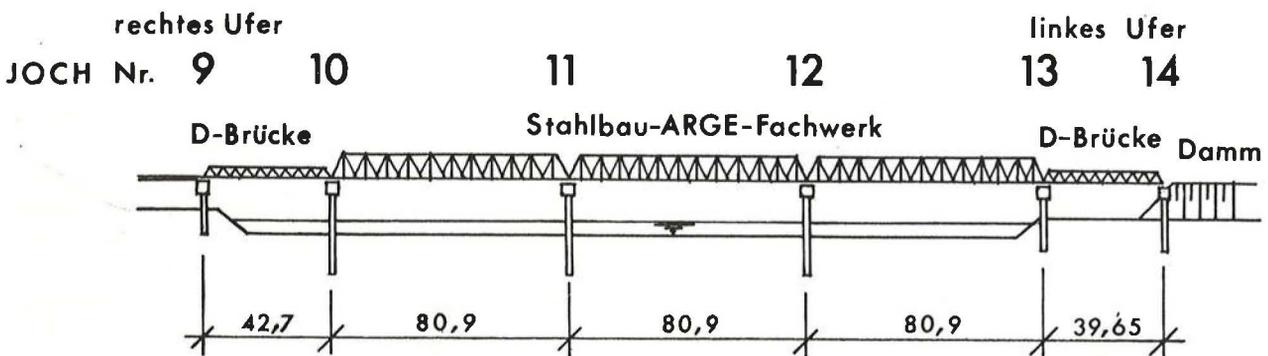


Abb. 2

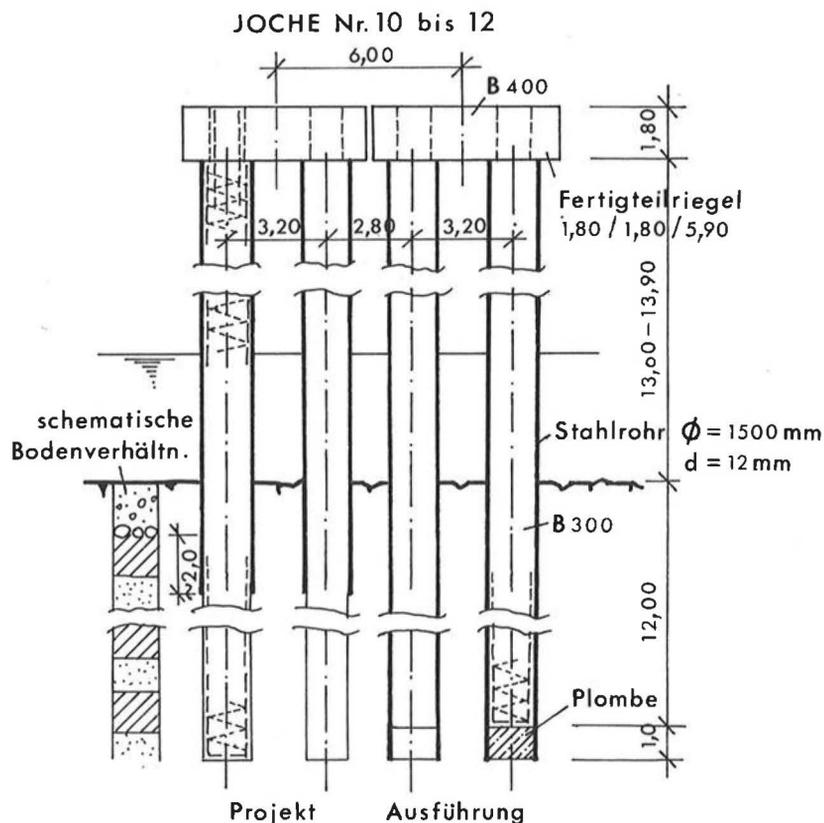


Abb. 3

150 cm gebildet, welche oben durch einen biegesteif angeschlossenen Stahlbeton-Fertigteiltriegel verbunden sind. Die Einbindetiefe der Pfähle ab Flußsohle sollte projektgemäß bei den Flußjochen 12 m betragen. Als verlorenes Bohrrrohr wurde ein Stahlrohr von 12 mm Wandstärke vorgesehen, welches im oberen Teil der Pfähle oberhalb der Flußsohle als verlorene Schalung dienen sollte (Abbildung 3). Es war eine Einbindetiefe dieser Rohre von 2 m in die tertiären Schluffe oder Tone („Wiener Tegel“) geplant.

In der statischen Berechnung wurden folgende lotrechte Lasten Q je Pfahl in Mp (= 10 kN) ermittelt:

Joch Nr.	9	10	11	12	13	14
ständige Last	74	149	173	173	128	145 ¹⁾
Verkehrslast	32	74	97	97	72	45
maximale Gesamlast	106	223	270	270	200	190

Zu diesen Lasten kommen Beanspruchungen aus Wind und möglicher unterschiedlicher Bettung, so daß sich im ungünstigsten Fall Pfahllasten von maximal ca. 350 Mp ergeben können.

Es ist verständlich, daß in der kurzen Zeit der Planung und Bauvorbereitung für genauere Bodenuntersuchungen keine Möglichkeit bestand. Man stützte sich daher bei der Planung auf die Ergebnisse von Probebohrungen, die 1932 entlang der früheren

¹⁾ inklusive geschätzte negative Mantelreibung zufolge umgebender Dammschüttung.

Reichsbrücke abgeteufelt worden waren. Zur Abschätzung der Grenztragfähigkeit der Pfähle wurde vom Projektanten ein rechnerischer Spitzenwiderstand nach DIN 4017, Blatt 1, mit folgenden Kennwerten

Reibungswinkel	$\varphi' = 25^\circ$
Kohäsion	$c' = 2 \text{ Mp/m}^2 (= 20 \text{ kPa})$
Dichte unter Auftrieb	$\rho' = 1,1 \text{ t/m}^3$

und eine rechnerische Mantelreibung auf eine Pfahleinbindetiefe von $h_m = 8 \text{ m}$ mit

$$Q_s = U \cdot h_m (K_0 \cdot \sigma_m \cdot \text{tg } \delta + c')$$

ermittelt. Die zulässige Belastung je Pfahl der Flußjoch 10 bis 12 ergab sich dabei mit zweifacher Sicherheit gegenüber dem Bruchzustand zu 293 Mp (= 2930 kN).

2.2 Begutachtung

Vor Beginn der Fundierungsarbeiten beauftragten die Wiener Stadtwerke-Verkehrsbetriebe das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien, Vorstand o. Univ.-Prof. Dr. Hubert BOROWICKA, das vorliegende Projekt zu überprüfen und die Gründungsarbeiten zu überwachen. Im Zuge der Überprüfung wurden einige Änderungen und Ergänzungen der entworfenen Fundierung vorgeschlagen.

1. Die Bohrlochsohle jedes Pfahles sollte zum Schutz vor Aufweichungen bis zum Einbringen von Bewehrung und Pfahlbeton durch eine unbewehrte Betonplombe geschützt werden.
2. Die Bohrröhre von nur 12 mm Wandstärke und 150 cm Durchmesser der drei Stromjoche sollten nach Erreichen der geplanten Bohrtiefe entgegen dem Entwurf in dieser Tiefe belassen und nicht bis etwa 2 m unter die Oberfläche der tertiären Schluffe und Tone („Wiener Tiegel“) zurückgezogen werden, da mit größeren Schwierigkeiten beim Ziehvorgang zu rechnen war. Schwierigkeiten wurden deshalb erwartet, weil die Bohrröhre sehr dünnwandig, also nicht sehr widerstandsfähig waren und das Ziehen von einer schwimmenden Plattform aus hätte erfolgen müssen. Darüber hinaus wurden ein starker Wechsel von Schluffen und Tonen mit Sandschichten im Schichtpaket des Tertiärs und Sandschichten unmittelbar unter der Kiesüberlagerung erwartet, wodurch von vornherein eine genaue Festlegung, bis zu welcher Kote die Bohrröhre zurückgezogen werden sollten, nicht möglich war. Das Belassen der Röhre in die Bohrendtiefe war somit die einfachste und klarste Lösung und sollte sich auch sehr günstig auf die Herstellungsgeschwindigkeit auswirken.
3. Die vorgeschlagene Konstruktion der Joche wurde im Hinblick auf die Gefährdung, die sich durch ihre Lage in der Mitte des Flußbettes der Donau ergibt, als nicht genügend dauerhaft standsicher erachtet. Es wurde daher verlangt, jedes Stromjoch mit einem mit Wurfsteinen gefüllten Spundwandkasten zu umschließen.

2.3 Überwachungsmaßnahmen

Für die Überwachung der Fundierungsarbeiten, die Beobachtung des Verhaltens der ausgeführten Fundierung bis zur Inbetriebnahme und danach wurde folgendes vorgeschrieben:

1. eine Bohrmethode, die auch bei den zu Schwimmsanderscheinungen neigenden Bodenschichten ausreichende Sicherheit gegen Auflockerungen in der Umgebung der Bohrpfähle, vor allem gegen Sohlauftriebserscheinungen bietet. Es sollte das Bohrröhr der Bohrung ausreichend vorseilen, im Bohrröhr ein permanenter Überdruck gegenüber dem jeweiligen Wasserstand der Donau herrschen und aus Sicherheitsgründen ausreichend Bentonit für den Fall vorrätig sein, daß der Wasserüberdruck im Bohrröhr nicht imstande sein sollte, die Bohrlochsohle zu stabilisieren;
2. eine laufende Überwachung des Bohrvorganges zur Einhaltung dieser Maßnahmen, zur Feststellung der durchbohrten Bodenschichten und zur Entnahme von Bodenproben;
3. eine Höhennullmessung der Pfähle unmittelbar nach der Betonierung und eine tägliche Messung der Setzungen;
4. eine Probelastung der gesamten Brücke nach ihrer Fertigstellung, bei der auf jedes Joch möglichst die gesamte rechnerische Verkehrslast in mehreren Stufen aufzubringen war. Hiefür sollten vollbeladene Straßenbahnzüge verwendet werden. Pro Laststufe waren 12 Stunden veranschlagt. Zum Abschluß dieser Probelastung sollte auch eine dynamische Beanspruchung durch zehnmaliges Befahren der Brücke je Fahrtrichtung ausgeübt werden. Die Setzungsmessungen während der Probelastung sollten die Ermittlung des zeitlichen Setzungsverlaufes aller Joche und der Setzungsdifferenzen der beiden Pfähle jedes Halbjoches ermöglichen;
5. weitere Beobachtungen der Setzungen der Pfähle – eine erfolgreiche Probelastung vorausgesetzt – einmal wöchentlich und Beobachtung der Flußsohle im Bereich um die Spundwandkästen, welche die Joche umschließen, und Auffüllung von festgestellten Kolken mit Wurfsteinen.

3. Untergrundverhältnisse

Wie bereits eingangs erwähnt, stützte man sich beim Entwurf dieser Behelfsbrücke auf die Ergebnisse von Probebohrungen, die im Jahre 1932 neben den Pfeilern der damaligen Reichsbrücke (ehemalige Kronprinz-Rudolf-Brücke) abgeteuft worden waren. Diese Bohrungen bildeten die Grundlage des Gutachtens Prof. Dr. Karl von TERZAGHIs vom Mai 1933, in welchem er die vorhandenen Caissongründungen der Pfeiler auf die Möglichkeit einer höheren Belastung durch einen Umbau der Brücke untersuchte. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung der Untergrundverhältnisse in Form eines geologischen Längsschnittes in Brückenachse und ist eine vereinfachte Wiedergabe von Figur 2 in TERZAGHIs Gutachten. Es ist deutlich zu erkennen, daß auf Grund der damaligen Bohrungen angenommen wurde, daß unter der gesamten Breite des Flußbettes Wechselagen von Feinsanden, Schluffen und Tonen unter der Sand-Kies-Überdeckung anstehen, die aber im Bereich des linken Ufers auskeilen und von einer Schicht steifen bis halbfesten Tons unbekannter Mächtigkeit unterlagert sind. Auf die weiteren Untersuchungen TERZAGHIs für die Gründung und Verankerung des Kettenbrückenprojektes, welches 1934 zur Ausführung bestimmt wurde, wird hier nicht näher eingegangen. Es soll aber daran erinnert werden, daß auf Anraten TERZAGHIs das Kettenbrückenprojekt dahingehend geändert wurde, daß die schrägen Zugkräfte der Ketten nicht in Ankerblöcke, sondern in die als Versteifungsträger aus-

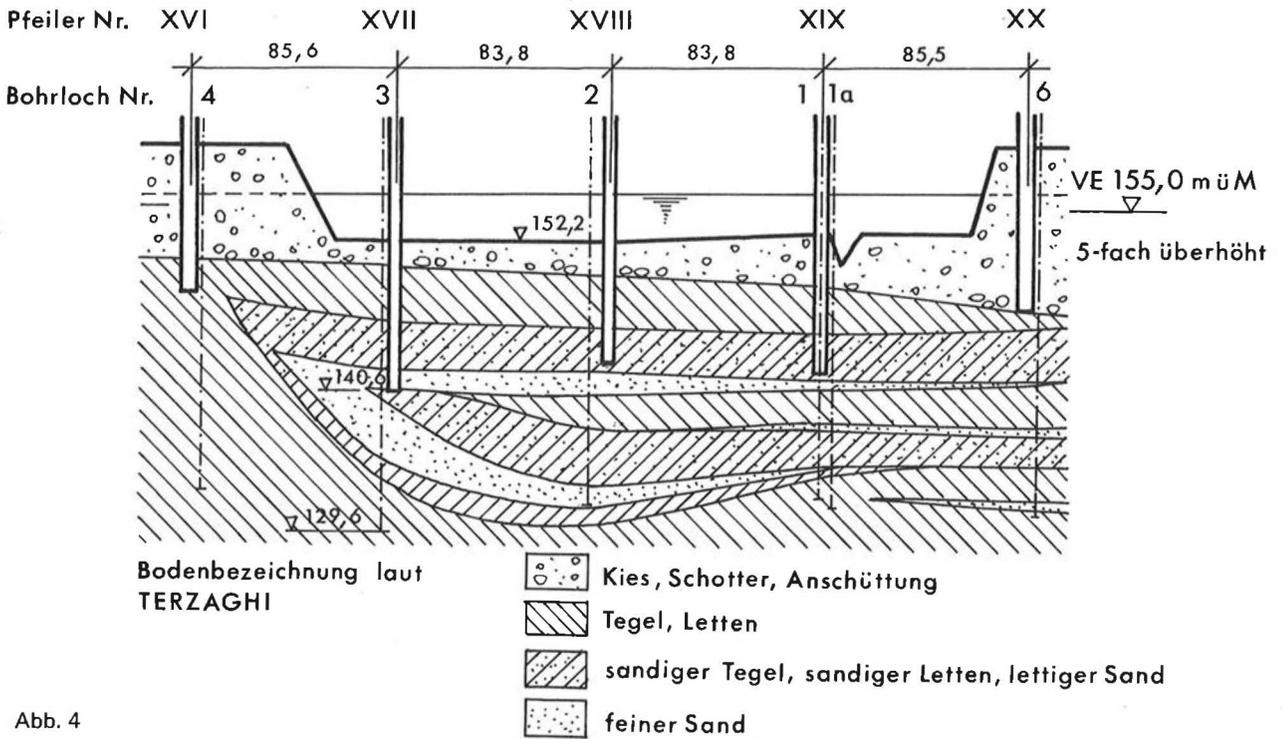


Abb. 4

gebildeten Fahrbahnhauptträger eingeleitet wurden. Der Grund für diese Änderung lag in den ungünstigen Untergrundverhältnissen im Bereich der geplanten Ankerblöcke (TERZAGHI, 1938).

Es mußte auf Grund der früheren Bohrergebnisse ein ähnliches Bild der Untergrundverhältnisse im Bereich der Behelfsbrücke vorausgesetzt werden. Besondere Beachtung galt den sandreichen Schichten, die als wassergesättigt angenommen werden mußten und daher Sicherheitsvorkehrungen beim Abbohren der Pfähle bedingten.

3.1 Angetroffene Untergrundverhältnisse

Zur Veranschaulichung der angetroffenen Untergrundverhältnisse dient Abbildung 5, die je ein charakteristisches Profil der drei Stromjochs enthält, und zwar Joch 10/Pfahl 4, Joch 11/Pfahl 1, Joch 12/Pfahl 3. Zusätzlich zu den aus der Abbildung ersichtlichen Unterschieden ergaben sich auch Unterschiede in den vier Profilen eines Jochs. Zieht man dies in Betracht, so ergibt sich ein sehr kompliziertes räumliches Bild des Schichtverlaufes. Diese Tatsache bestätigt die Richtigkeit der vorgeschriebenen Sicherheitsmaßnahmen beim Abbohren der Pfähle, welche einer Kommunikation des Porenwassers der Sand-schichten mit der Donau Rechnung tragen.

3.2 Laboratoriumsuntersuchungen

Während den Bohrarbeiten wurden nicht nur genaue Profile der durchbohrten Schichten, sondern auch,

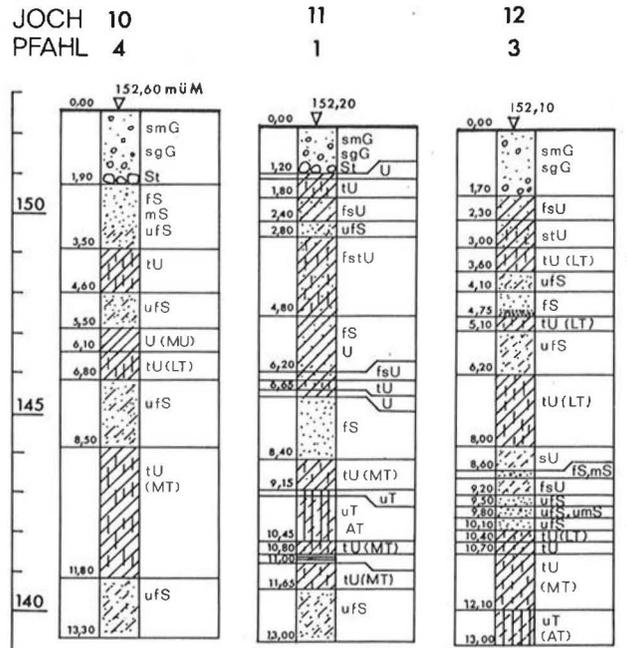


Abb. 5: St ... Steine, G ... Kies, S ... Sand, s ... sandig, U ... Schluff, u ... schluffig, T ... Ton, t ... tonig, f ... fein, m ... mittel, g ... grob, L ... leicht-, M ... mittel-, A ... ausgeprägt plastisch.

soweit dies die Bohrarbeit zuließ, Proben für Laboratoriumsversuche entnommen, die als Nachweis für die beim Entwurf getroffenen Berechnungsannahmen dienen sollten.

Die folgende Tabelle gibt einen ungefähren Überblick über die Ergebnisse von insgesamt dreizehn

Proben, die aus Pfahl 1 des Joches 12, dem ersten fertiggestellten Pfahl, entnommen wurden.

Tabelle I

Korngrößenverteilung	
vereinzelt Kiesanteile	bis 20%
Sandanteile	0 bis 78%
Schluffanteile	21 bis 84%
Tonanteile	0 bis 33%
Zustandsgrenzen	
Fließgrenze	w_L 19 bis 44%
Ausrollgrenze	w_p 15 bis 15,5%
Bildsamkeitszahl	I_p 3,5 bis 28,5%
Dichte feucht	ρ 1,9 bis 2,08 t/m ³
Dichte trocken	ρ_d 1,44 bis 1,75 t/m ³
Wassergehalt	w 18,4 bis 30,5%
Porenanteil	n 0,36 bis 0,48 ^s
Einachsige Druckfestigkeit	q_u 0,4 bis 3 kp/cm ²
Steifemodul	E_s 105 bis 230 kp/cm ²
Scherfestigkeit	φ 25 bis 34°
Restscherfestigkeit	φ_r 8 bis 31°
Durchlässigkeitskoeffizient	k $1,5 \cdot 10^{-7}$ bis $9 \cdot 10^{-11}$ m/s

Die Ergebnisse zeigen einen großen Schwankungsbereich, da es sich um Bodenarten vom schluffigen Sand bis zum mittelplastischen Ton handelt.

4. Baudurchführung

Es soll hier über die Herstellungsart der Pfähle deshalb einiges berichtet werden, weil neben den Untergrundverhältnissen, den Pfahlabmessungen und der Pfahlausteilung auch die Art und Güte der Herstellung auf ihr Tragverhalten einen entscheidenden Einfluß hat.

Das Abbohren der Pfähle der drei Stromjochs erfolgte mittels konventioneller Greiferbohrung von Bohrschiffen aus. Um Zeit zu sparen, wurden zwei Bohrschiffe verschiedener Bauunternehmungen eingesetzt. Abbildung 6 ist eine schematische Dar-

stellung der beiden Bohrschiffe bei der Arbeit an den Jochen Nr. 10 und 11. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen Fotos der beiden Bohrschiffe. Der Vortrieb der Bohrrohre erfolgte firmenabhängig nach zwei Systeme-

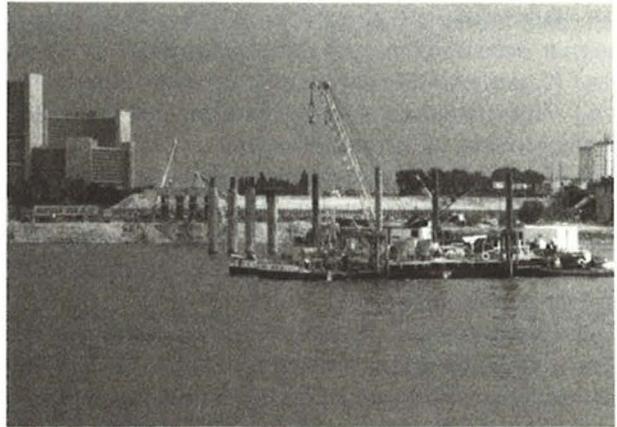


Abb. 7



Abb. 8

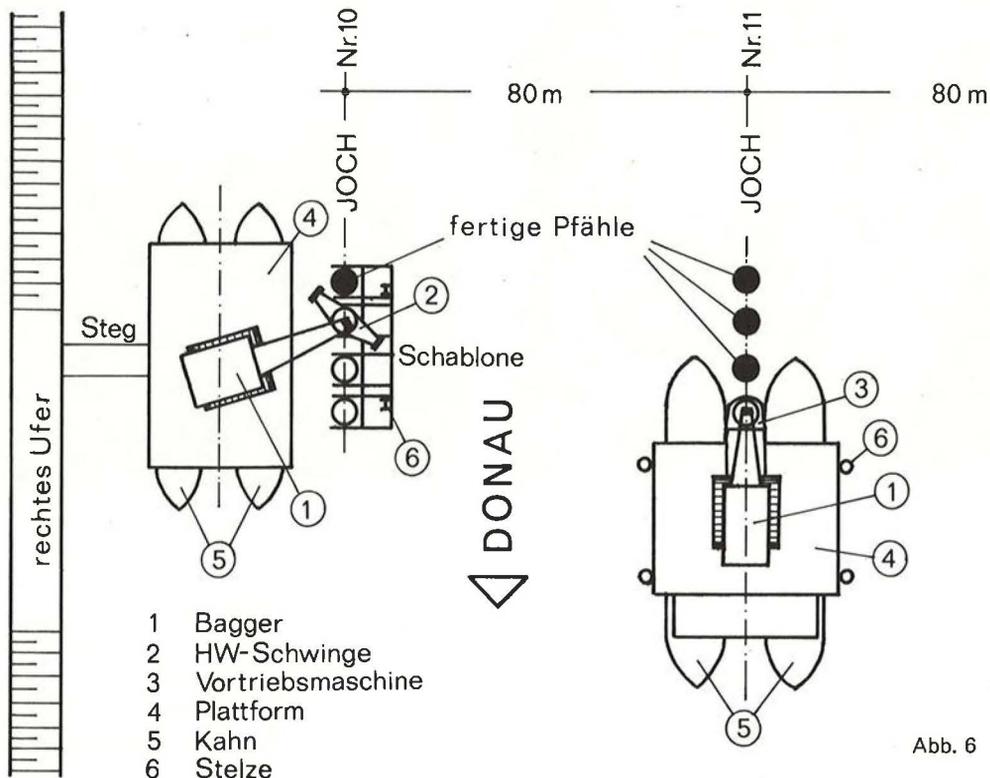


Abb. 6

men. Für die Joche 11 und 12 wurde eine ölhdraulische Verrohrungsmaschine, für die Joche 9, 10, 13 und 14 eine preßluftgesteuerte Schwinge eingesetzt. Die gesamten Arbeiten zur Herstellung der 12 Pfähle der Joche 10 bis 12 dauerten vom 16. August bis 13. September 1976, wobei für die reinen Bohrarbeiten eine durchschnittliche Leistung von knapp zwei Stunden pro Bohrmeter einschließlich Nebenarbeiten (Aufschweißen des nächsten Rohrschusses usw.) erzielt wurde.

Die Montage sämtlicher Brückenteile (Jochriegel und Tragwerke) erfolgte mittels Schwimmkränen. Alle größeren Anteile der ständigen Lasten, ausgenommen die Brückenausstattung (Gleise usw.) wurden somit rasch aufgebracht.

Die Abbildungen 9, 10 und 11 zeigen das Aufsetzen der Jochriegel beim linksufrigen Joch 13 und die Montage von Tragwerken mittels Schwimmkränen.



Abb. 10



Abb. 11

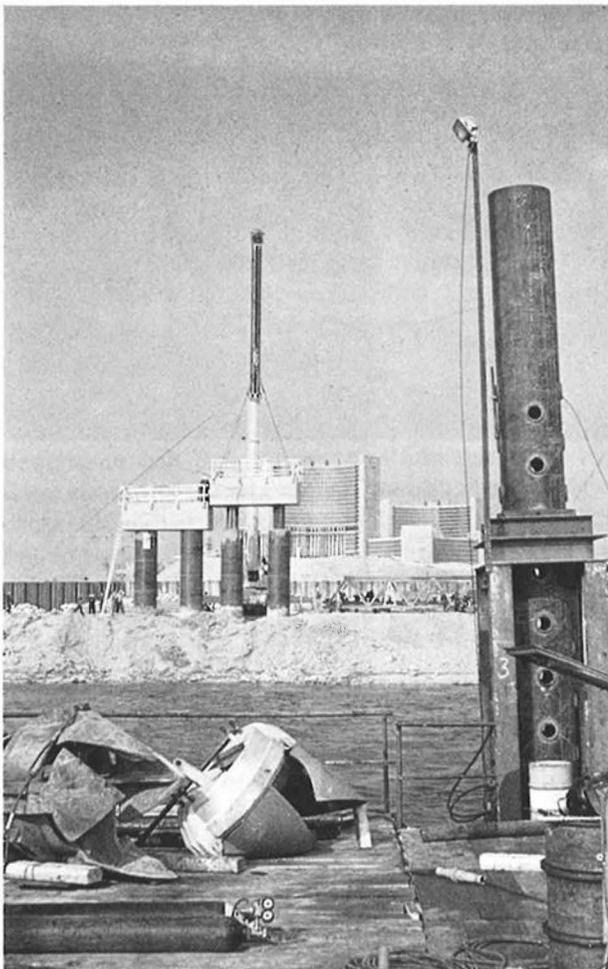


Abb. 9

Das Foto der Abbildung 12 wurde am ersten Tag der Probelastung, also am 4. Oktober 1976, aufgenommen und zeigt das belastete linksufrige Joch 13 und die knapp vorher in Betrieb genommene provisorische Schifffahrtsrinne.



Abb. 12

5. Meßergebnisse

5.1 Setzungsmessungen

Die Setzungsmessungen der Pfähle erfolgten mittels Präzisionsnivelliergeräten von den beiden Ufern aus.

Die geräteabhängige Genauigkeit betrug zwar $\frac{1}{10}$ mm, die Visurweiten bis zu 125 m und die zum Teil sehr ungünstigen Witterungsbedingungen ließen jedoch nur Genauigkeiten zu, die über der Größenordnung von Millimetern lagen. Den bisherigen Setzungsverlauf zweier Halbjoche zeigt Abbildung 13.

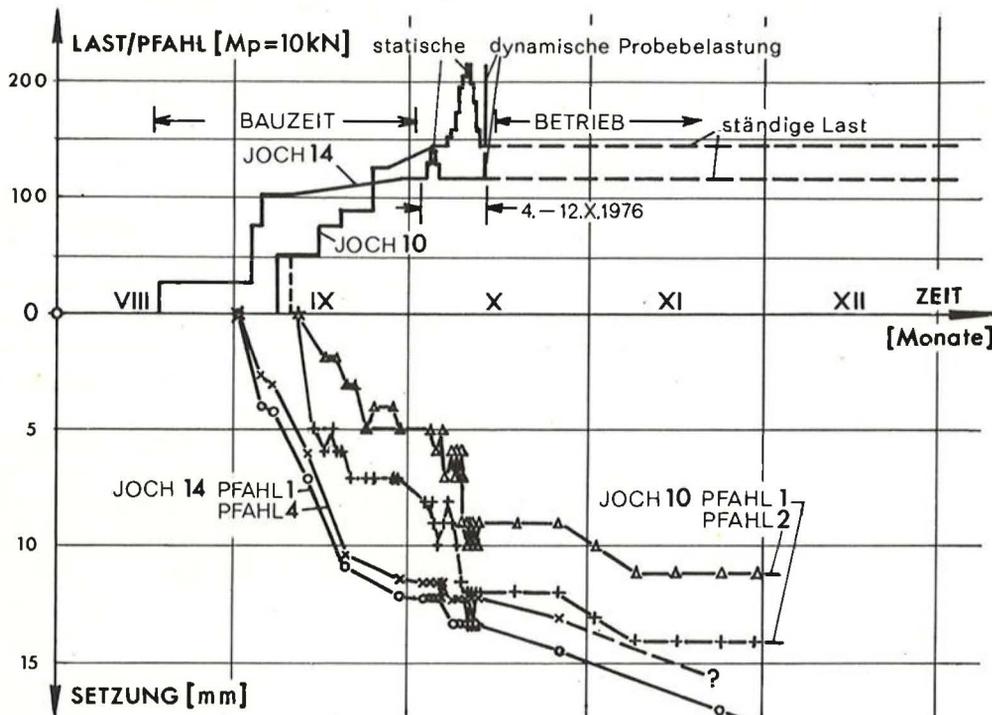


Abb. 13

Zu den bisherigen Setzungsmessungen ist zu bemerken:

1. Der Anteil der Setzung zufolge Eigengewicht der Pfähle über der Flußsohle ist in den Werten nicht voll enthalten, da die Nullmessung naturgemäß erst nach der Betonierung der Pfähle erfolgen konnte.
2. Die elastische Verkürzung der Pfähle unter der bisherigen höchsten Beanspruchung ist kleiner als 1 mm.
3. Aus dem zeitlichen Setzungsverlauf ist der günstige Einfluß der Probelastung zu ersehen. Dadurch wurde eine Vorwegnahme eines großen Teils der zeitlichen Setzungen zufolge voller Verkehrslast bewirkt. Die rechnerische Verkehrslast wird im Betrieb kaum erreicht werden. Beim linksufrigen Joch 14, bei dem der Einfluß der Dammschüttung jenen der Verkehrslast bei weitem übertrifft, ist der günstige Einfluß der Probelastung fast nicht erkennbar. Die Zunahme der Setzungen vom 15. Oktober bis 1. Dezember 1976 war bei den Flußjochen nur mehr gering.

5.2 Kolkmessungen

Die Kolkmessungen bis Ende 1976 ergaben nur geringe Veränderungen in der Sohle nahe den Spundwandkästen, welche die Joche umschließen. Die größten Kolk-tiefen liegen ca. bei 1 m. Allerdings war die Wasserführung der Donau seit der Herstellung der Pfähle jahreszeitlich bedingt niedrig. Bedingt durch den Brückeneinsturz trat knapp unterhalb der Behelfsbrücke eine Teilung des Abflusses der Donau in Richtung zu den beiden Ufern hin ein. Dadurch entstanden im Bereich der eingestürzten Reichsbrücke zwei tiefe Kolk-rinnen. Dieser Umstand deutet darauf hin, daß während und nach der Bergung der im Strom liegenden Brückenteile des Hauptfeldes, welche im Dezember 1976 begonnen wurde und im März 1977 beendet werden soll, und besonders beim Abfluß von Hochwässern des kommenden Jahres mit weiteren starken Veränderungen der Flußsohle im Bereich der Reichsbrücke zu rechnen ist, so daß der weiteren Beobachtung der Sohle in der Umgebung der Joche der Behelfsbrücke besondere Bedeutung zukommen wird.

6. Schlußbemerkungen

Die bisherigen Ergebnisse der Setzungsmessungen zeigen, daß die Fundierung der Behelfsbrücke den gestellten Anforderungen entspricht. Die im GENERELLEN GUTACHTEN noch als zulässig bezeichneten Setzungsbeträge von 30 mm bis zum Ende der Probelastung bezogen auf die Nullmessung wurden maximal etwa bis zur Hälfte erreicht. Der größte Setzungsunterschied zwischen den beiden Pfählen eines Halbjoches betrug bis dahin 3 mm gegenüber einem als zulässig angesehenen Wert von 10 mm, welcher durch die Anordnung einer biegesteifen Verbindung der beiden Pfähle mit einem sehr steifen Jochriegel vom Konstrukteur vorgegeben war.

Wie auf Grund der früheren Bodenaufschlüsse zu erwarten war und durch die bei der Pfahlherstellung angetroffenen Bodenschichten bestätigt wurde, muß die ausgeführte Gründung als schwebende Pfahlgründung bezeichnet werden. Aus der Größe der bisher aufgetretenen Setzungen und den vorliegenden Untergrundverhältnissen kann geschlossen werden, daß die Pfähle überwiegend über den Mantel und nur zu einem geringen Teil an der Pfahlspitze die Lasten in den Untergrund übertragen. Nach BOROWICKA (1976) wäre bei einem Verhältnis Pfahllänge L zu Pfahldurchmesser D von knapp 10:1 ein Anteil des Spitzenwiderstandes an der Gesamt-

last von ca. 12 bis 15% zu erwarten. Daraus ergibt sich eine mittlere vorhandene Mantelreibung von ca. 3,5 Mp/m² (= 35 kPa) bei einer Einbindetiefe von 13 m. Vergleichsweise wurden bei Probelastungen, die im vergangenen Jahr in Wien mit Bohrpfählen des Durchmessers 90 cm von 15 bis 22 m Länge durchgeführt wurden, bei Setzungsbeträgen von ca. 15 mm bei sehr geringem gemessenem Spitzenwiderstand (<10% der Gesamtlast) mittlere Werte der Mantelreibung von über 10 Mp/m² (= 100 kPa) aus der aufgetragenen Pfahlbelastung errechnet. Die geringeren Werte bei der Behelfsbrücke sind wohl zum größten Teil auf die durchgehende Stahlrohrummantelung, zum Teil aber auch auf die gegenseitige Beeinflussung bzw. Gruppenwirkung der Pfähle und auf die ungünstigeren Bodenverhältnisse des Tertiärs im unmittelbaren Donaubereich zurückzuführen.

Die Setzungsmessungen werden bis August 1977 monatlich und danach vierteljährlich durchgeführt. Bei den Flußjochen wurden gegenüber den Werten vom Dezember 1976 keine meßbaren Setzungszunahmen beobachtet.

Die Kolkschutzkästen wurden aus Sicherheitsgründen außen mit Wurfsteinen gesichert. Die Flußsohle und die Steinwürfe um die Kolkschutzkästen werden ebenso wie die Setzungsmeßpunkte periodisch und nach größeren Wasserführungen der Donau vermessen.

Literaturverzeichnis

BOROWICKA, H.: „Über die zulässige Belastung von Großbohrpfählen“, Proc. 6th Europ. Conf. SMFE, Wien, 1976.

GENERELLES GUTACHTEN des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien über die „Gründung einer Behelfsbrücke für die Straßenbahn über die Donau“ (nicht veröffentlicht).

TERZAGHI, K. v.: „Gleitwiderstand von Ankerblöcken für Hängebrücken“, Die Bautechnik, Jahrgang 16, Heft 32 und 33, 1938.

FROSS, M.: „Das Setzungsverhalten einer Behelfsbrücke neben der eingestürzten Wiener Reichsbrücke“. Proc. 5. Donau-Europäische Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau, Preßburg, ČSSR, 1977.