

Zum Einsturz der Tacoma-Hängebrücke

Autor(en): **Stüssi, F. / Ackeret, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **117/118 (1941)**

Heft 13

PDF erstellt am: **19.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-83408>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Zum Einsturz der Tacoma-Hängebrücke. — Erfahrungen beim Betonieren im Kraftwerkbau. — Neuzeitliche elektrische Bühnenbeleuchtung. — Appartement-Haus am Zeltweg in Zürich. — Mitteilungen: Zum Einsturz der Tacoma-Hängebrücke. Der Trolleybus. Eidg.

Technische Hochschule. Technikum Winterthur. Der Strassenbau an der LA. — Nekrologe: Hans Kilchmann. — Wettbewerbe: Genfer Verbindungsbahn-Rhonebrücke. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Vortragskalender.

Band 117

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

Nr. 13

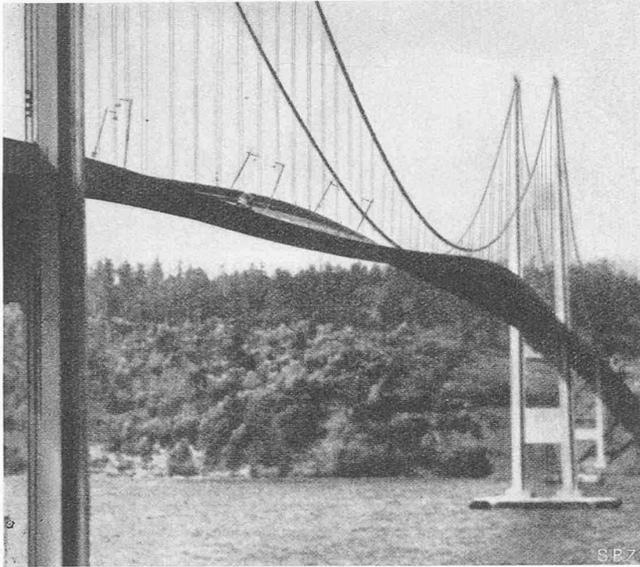


Abb. 1. Die schwingende Brücke etwa 30 min vor dem Einsturz

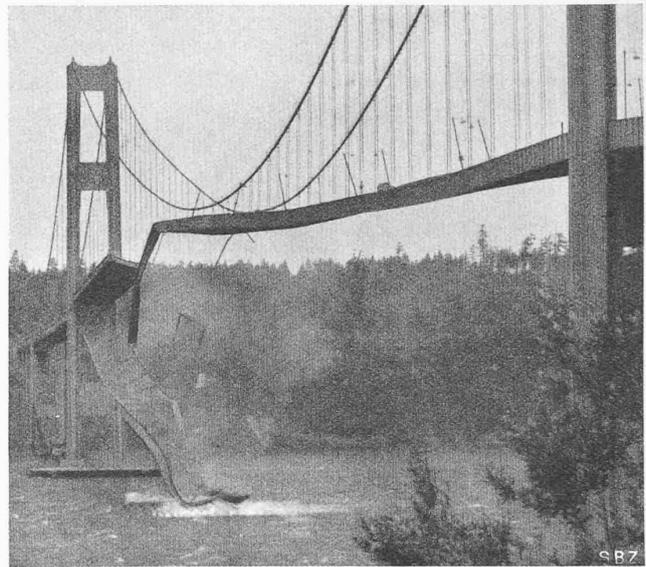


Abb. 3. Beginn des Einsturzes am 7. Nov. 1940, bei Wind von 18 m/s

Zum Einsturz der Tacoma-Hängebrücke

Von Prof. Dr. F. STÜSSI (E. T. H.) und Prof. Dr. J. ACKERET (E. T. H.)

I.

Die Hängebrücke bei Tacoma im Staate Washington (U. S. A.) wurde am 2. Juli 1940 dem Verkehr übergeben. Am 7. Nov. 1940 stürzte sie bei etwa 18 m/s Windgeschwindigkeit ein, nachdem unmittelbar vor dem Einsturz die reinen Vertikalschwingungen in Drehschwingungen mit zwei Halbwellen über die Mittelöffnung bei einer Frequenz von 12 Schwingungen in der Minute und Schiefstellung der Fahrbahn bis 45° übergegangen waren (Abb. 1 bis 4; auf 1, 2 und 3 ist noch je ein Auto erkennbar).

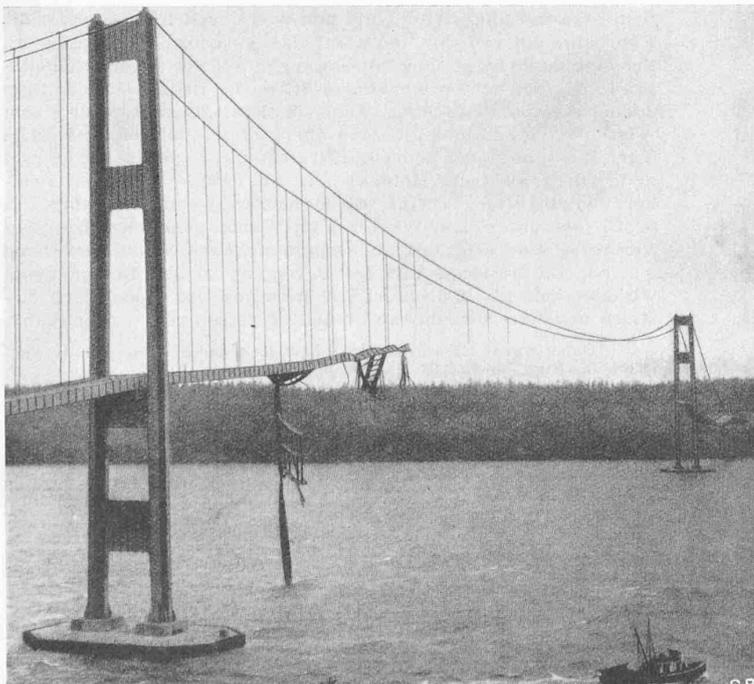


Abb. 4. Die Tacomabrücke nach dem Einsturz des Hauptspans
Die Pfeilerköpfe haben sich rd. 3,7 m landeinwärts gebogen

Die Hauptabmessungen der Brücke, die mit 2800 Fuss = 855 m nach der Golden Gate Bridge in San Francisco mit 4200 Fuss und der George Washington Bridge in New York mit 3500 Fuss die drittgrösste Spannweite der Mittelöffnung besitzt, sind aus Abb. 5 und 6 ersichtlich¹⁾. Besonders auffallend ist die geringe Brückenbreite von 11,9 m; das Verhältnis von Brückenbreite zu Spannweite beträgt nur rd. 1:72, während es bisher auch bei den grössten Hängebrücken den Wert 1:53 (Golden Gate Brücke) bzw. 1:30 («George Washington»-Brücke, «SBZ» Bd. 95, S. 310* und Bronx-Whitstone-Brücke, «SBZ» Bd. 115, S. 3*) nicht unterschritten hatte. Die Höhe des Versteifungsträgers beträgt rd. 2,45 m oder 1/350 der Spannweite. Im Zusammenhang mit diesen extremen Schlankheiten in beiden Richtungen ist die geringe ständige Last von nur 8,4 t/m für beide Kabel (mit Durchhang von $\frac{1}{12}$ der Spannweite) zusammen von wesentlicher Bedeutung; die Kabelform kann in beiden Richtungen durch verhältnismässig geringe zufällige Kräfte empfindlich verändert werden.

Ueber den Einsturz der Tacomabrücke sind wir besonders gut orientiert, weil er durch einen Fachmann, Prof. Farquharson von der University of Washington, im Film aufgenommen werden konnte. Prof. Farquharson war mit Untersuchungen über die schon seit der Inbetriebnahme störend bemerkbaren

¹⁾ Nach «Eng. News Record» vom 21. Nov. 1940.



Abb. 2. Drehschwingungen der Fahrbahn Tafel
etwa 12 Schwingungen pro min, bis 45° Querneigung

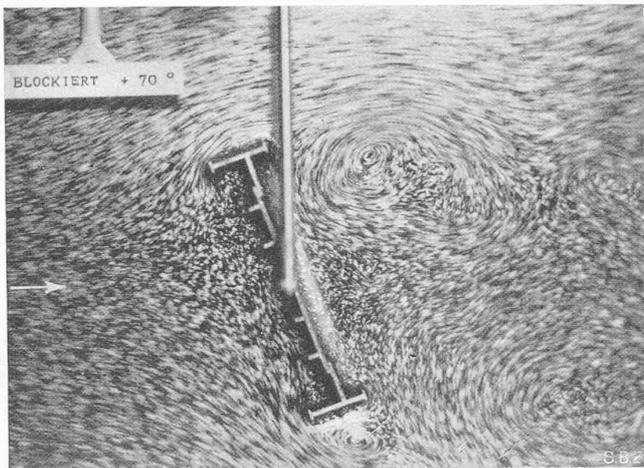


Abb. 9. Strömungsbild bei festgehaltener Fahrbahn: dauernd gehen Wirbel ab; diese rufen die Momente lt. Abb. 7 hervor

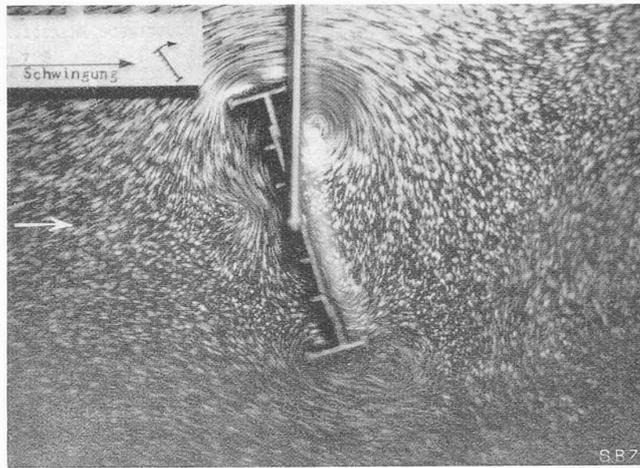


Abb. 10. Schwingendes Modell im Hingang, vor dem oberen Totpunkt. Ein starker Wirbel hat sich oben festgesaugt

Schwingungs-Erscheinungen beschäftigt; Gegenmassnahmen waren im Zeitpunkt des Einsturzes in Vorbereitung.

Die Katastrophe von Tacoma bedeutet weder eine Verurteilung der Hängebrücken an sich, noch der Erbauer der Tacoma-Brücke im besonderen. Wenn auch gewisse empirische Konstruktionsregeln, wie über das Verhältnis von Brückenbreite zur Spannweite, nicht eingehalten wurden, so darf daraus wohl nicht auf Leichtfertigkeit beim Entwurf geschlossen werden. Die Ursachen des Einsturzes sind in anderer Richtung zu suchen, nämlich in noch unangeklärten Besonderheiten der auftretenden Windbelastungen und des dynamischen Verhaltens dieses Tragwerks. Die Abklärung dieser Vorgänge, an der auch bei uns gearbeitet wird, muss und wird uns einen grundsätzlichen Fortschritt in der Erfassung des wirklichen Kräftespiels bei grossen Brückentragwerken bringen.

F. Stüssi

II.

Die Untersuchung der Ursachen des Einsturzes wird in einzigartiger Weise dadurch erleichtert, dass eine gute Filmaufnahme des Vorganges vorliegt. Darnach steht ausser Zweifel, dass durch Wind angefachte Torsionsschwingungen zur Zerstörung führten. Da bei Flugzeugflügeln z. T. ähnliche Vorgänge bekannt sind, lag es nahe zu prüfen, ob die Brückenfahrbahn im Stande ist, reine Torsionsschwingungen im Winde auszuführen, wie sie Studer im aerodynamischen Institut der E. T. H. seinerzeit gefunden hat²⁾. Wir haben orientierende Versuche in klei-

²⁾ H. L. Studer: Experimentelle Untersuchungen über Flügelschwingungen. Mitteilungen aus dem Institut für Aerodynamik E. T. H. Zürich, Nr. 4.

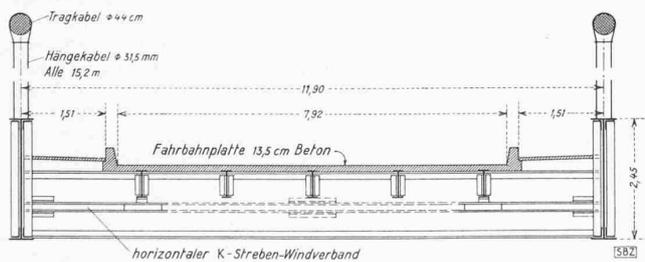


Abb. 6. Querschnitt der Fahrbahnplatte, 1 : 140

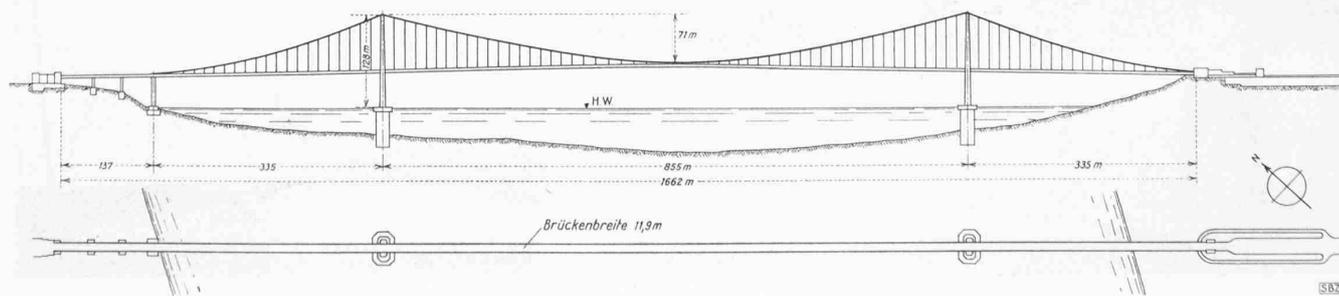


Abb. 5. Ansicht und Grundriss der Tacoma-Brücke über den Puget-Sound im Staate Washington, U. S. A. — 1 : 10 000

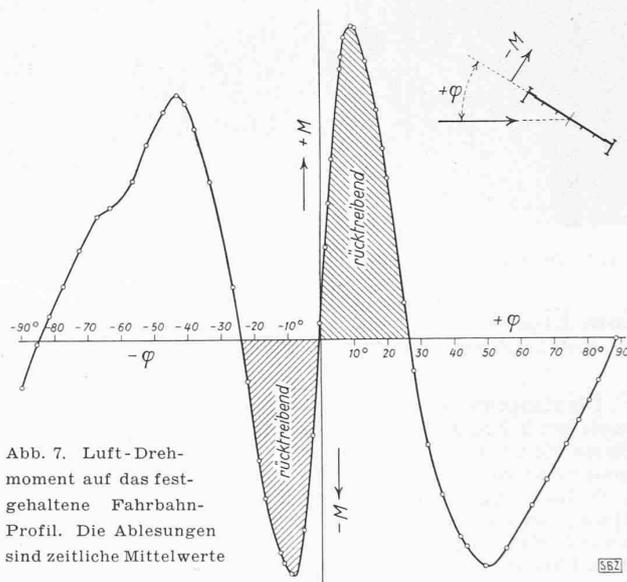


Abb. 7. Luft-Drehmoment auf das festgehaltene Fahrbahnprofil. Die Ablesungen sind zeitliche Mittelwerte

nem Masstab angestellt³⁾, die nun sehr deutlich zeigen, dass die Fahrbahn ein «Profil» darstellt, das geradezu hochgradig zu Schwingungen neigt. Bei Schwingungen mit nur einem Freiheitsgrad (wir betrachten ein kurzes Stück der Brücke) erhält man zunächst keine Anfachung, wenn das Kraftgesetz eindeutig vom Ausschlagwinkel abhängt. Man überlegt nämlich leicht, dass ja beim Rückgang das selbe Luftkraftmoment gegen die Bewegung wirkt als beim Hingang mit ihr. Abb. 7 zeigt den ziemlich komplizierten Verlauf des Momentes, wenn das Fahrbahnprofil fest unter dem Winkel φ im Winde gehalten wird. Der Verlauf ist eindeutig; er kann deshalb nicht schwingungserregend wirken. Es müssen somit bei Bewegung andere Luftmomente wirksam sein als in Ruhe. Lässt man nun das Modell sich elastisch um die Fahrbahnaxe drehen, so setzen sofort sehr sauber

³⁾ Dabei wurde ich von Herrn J. Egli, Konstrukteur des Aerodynamischen Instituts der E. T. H., in sehr wirkungsvoller Weise unterstützt.

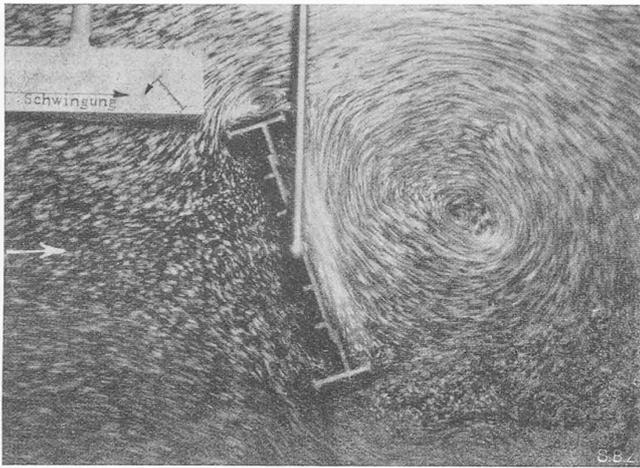


Abb. 11. Wie Abb. 10, jedoch Schwingungsrückgang. Kantenwirbel abgelöst; bei gleicher Winkelstellung Drehmoment verändert

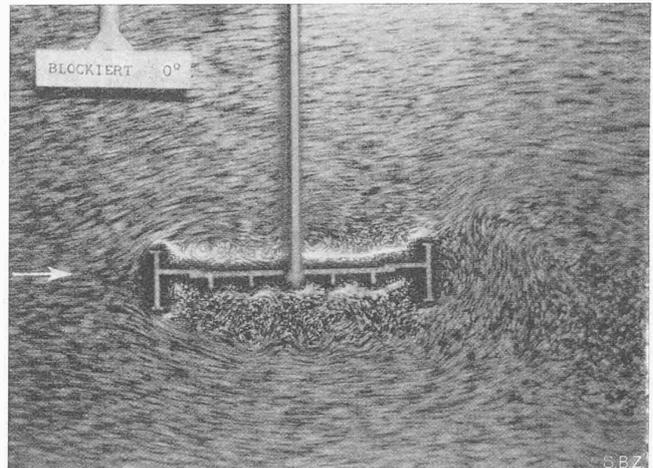


Abb. 12. In Nulllage festgehaltene Fahrbanntafel, dauernd lösen sich kleine Wirbel ab

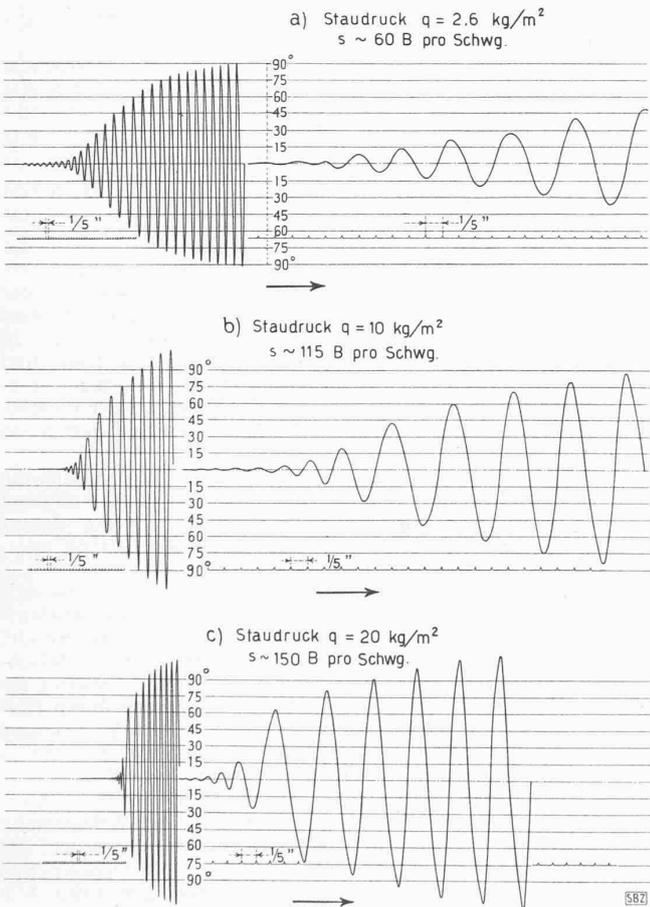


Abb. 8. Angefachte Schwingungen des elastisch gelagerten Fahrbanntafelmodells bei drei stark verschiedenen Staudrücken. Spontaner Schwingungsbeginn aus der Null-Lage. Gleiche Versuchsdurchführung mit verschiedenen Zeitmassstäben

anwachsende Schwingungen ein, wie Abb. 8 a, b, c zeigt. Bei festen Federkonstanten und wachsender Windgeschwindigkeit ändert sich der Charakter der Schwingung nur insofern, als bei grösserer Geschwindigkeit diese spontan einsetzen, während bei sehr kleinen Geschwindigkeiten ein kleiner Anstoss nötig ist. Von Resonanz kann hier nicht gesprochen werden; es handelt sich vielmehr um Schwingungen von der Art der rückgekoppelten, wo jede einzelne Schwingung die Energiezufuhr steuert (Beispiel: Pendeluhr mit Steuerung durch Anker und Steigrad). Die Verschiedenheit des Luftmomentes beim Hin- und Rücklauf aber erklärt sich durch eine Verschiedenheit der Strömungsbilder. Die Abb. 9, 10 und 11 zeigen nach Filmaufnahmen im Wasserkanal dieselben Winkelstellungen bei festgehaltenem Modell und

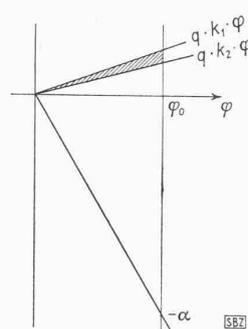


Abb. 13. Schemat. Annahmen des Momentenverlaufs zur Berechnung der Anfachung

beim Hin- bzw. Rückgang. Bei festgehaltenem Modell erfolgen ruckartige Wirbelablösungen; ein stationäres Strömungsbild ist nicht vorhanden. Der scharfe eng anliegende Wirbel bei Winkelvergrößerung (Abb. 10) ist beim Rückgang (Abb. 11) im Abschwimmen begriffen; das aufdrehende Moment wird dadurch kleiner. Bei der Filmaufnahme wurde darauf geachtet, dass der Weg des Wassers während einer Schwingung dasselbe Vielfache S/B der Fahrbanntafelbreite war, wie der Luftweg bei der Tacoma-Brücke; die Bilder sollten also, abgesehen von Reynolds-Einflüssen, für die Wirklichkeit einigermaßen zutreffen. In Abb. 12 ist die Wirbelbildung bei festem Anströmungswinkel Null, die natürlich auch nicht stationär ist, sichtbar. Es ist verständlich, dass damit auf die Brücke ständig schwankende Drehimpulse ausgeübt werden, die die Anfachung einleiten können.

Das genaue (dynamische) Kraftgesetz aufzufinden ist naturgemäß eine ziemlich weitführende experimentelle Aufgabe. Es ist, da solche Untersuchungen zur Zeit noch fehlen, immerhin von Interesse zu bemerken, dass schon ganz einfache Abweichungen vom eindeutigen Momentverlauf Anlass zu angefachten Schwingungen geben können. Wir nehmen, um zu einer einfachen Abschätzung zu gelangen, beispielsweise an, dass beim Hingang $\varphi = 0 \rightarrow \varphi_0$, bzw. $\varphi = 0 \rightarrow -\varphi_0$ das Luftkraftmoment linear mit dem Staudruck $q = \frac{\rho}{2} V^2$ und dem Ausschlagwinkel φ wachse, wobei der zugehörige Faktor k_1 ein anderer (grösserer) ist, als beim Rückgang (k_2) ($\varphi = \varphi_0 \rightarrow 0$ bzw. $\varphi = -\varphi_0 \rightarrow 0$, Abb. 13). Die Bewegungsgleichungen werden damit, und mit Einführung einer Geschwindigkeitsdämpfung:

$$\text{für den Hingang: } \theta \ddot{\varphi} = -\alpha \dot{\varphi} + q k_1 \varphi - g \dot{\varphi}$$

$$\text{für den Rückgang: } \theta \ddot{\varphi} = -\alpha \dot{\varphi} + q k_2 \varphi - g \dot{\varphi}$$

Es macht keine besondere Mühe, den zeitlichen Verlauf von φ genau auszurechnen; es zeigt sich, dass für mässige Dämpfungen und Luftmomente der Verlauf, übrigens im Einklang mit den Modellversuchen, recht gut durch einen einfachen Sinus angenähert werden kann. Dann lässt sich aber die Anfachung bzw. Dämpfung aus einer einfachen energetischen Betrachtung entnehmen.

Die Arbeit, die zwischen $t = 0$ und $t = T/2$ von den Luftkräften geleistet wird, ist:

$$L = q (k_1 - k_2) \frac{\varphi_0^2}{2}$$

Die Dämpfung vernichtet im gleichen Zeitraum:

$$D = 2 \int_0^{\varphi_0} g \dot{\varphi} d\varphi = 2g \int_0^{T/4} \dot{\varphi}^2 dt$$

da: $\varphi = \varphi_0 \sin 2\pi \nu t$
folgt: $D = \pi^2 \nu \varphi_0^2 g$



Abb. 8. Baggerung von gefrorenem und durch Sprengung gelockertem Kiesmaterial mit Raupen-Elektrobagger

Ist der Amplitudenzuwachs pro Schwingung klein, so lässt sich der zeitliche Verlauf des Schwingungsausschlages leicht angeben:

$$\varphi_0 = \varphi_0, e^{\frac{q(k_1 - k_2) - 2\pi^2 \nu \vartheta}{4\pi^2 \nu \Theta} t}$$

Man kann die reziproke Zeit:

$$a = \frac{q(k_1 - k_2)}{4\pi^2 \nu \Theta} - \frac{\vartheta}{2\Theta}$$

als Mass für die Anfachung betrachten. Sie ist negativ, Null oder positiv, jenachdem q kleiner, gleich oder grösser ist als

$$\frac{2\pi^2 \nu \vartheta}{k_1 - k_2}$$

Es ist ersichtlich, dass kleine Verdrehsteifigkeit (kleines ν) und geringe Dämpfung ϑ einer Brücke gefährlich werden können.

J. Ackeret

Anmerkung der Redaktion. Gleichzeitig mit obigen Mitteilungen haben wir einen Bericht erhalten von Dipl. Ing. A. A. Kubly in New York, der den Unfall ähnlich schildert; auf seine Veröffentlichung müssen wir aus Raumgründen leider verzichten. — Einem weiteren Bericht in der «Techn. Rundschau» vom 14. d. M. (der wir die Unterlagen zu unsern Abb. 1 und 2 verdanken) entnehmen wir, dass bei der Bronx-Whitstone-Brücke (Bd. 115, S. 3*) Schwingungen ähnlicher Art aufgetreten seien, indessen mit Amplituden von bloss 20 cm; es sei inzwischen gelungen, sie durch geeignete Dämpfungsvorrichtungen zu beseitigen.

Erfahrungen beim Betonieren im Kraftwerksbau

Von Dipl. Ing. HANS NIPKOW

(Schluss von Seite 129)

VIII. Frostschuttmassnahmen

Der scharfe Frost im Januar und Februar 1940 bot Gelegenheit, die schon im letzten Winter auf der Baustelle angewandten Frostschuttmassnahmen beim Betonieren weiter zu erproben. Bei den heute üblichen kurzen Baufristen kann eine Unternehmung es sich nicht leisten, die Baustelle wegen Frost einige Monate stillzulegen. Zudem fallen die an und für sich primitiven Massnahmen finanziell nicht ins Gewicht im Vergleich zur Bau- und zum Zeitgewinn. Ausser den eigentlichen Frostschuttmassnahmen beim Betonieren sind infolge der langen Frostperiode auch andere Massnahmen notwendig geworden, die zuerst beschrieben werden sollen.

1. *Aushub.* In der Kiesentnahmestelle war das Rohmaterial bis zu 1 m Tiefe gefroren, sodass der Elektrobagger mit Greifeinrichtung nur noch arbeiten konnte, wenn das Material vorgesprenzt war. Es wurde so vorgegangen, dass mit schweren Spitzseisen Löcher in die Frostdecke geschlagen und mit Sprengstoff geladen wurden. Wenn die Frostdecke durchschlagen war, konnte von der Böschung aus im nicht gefrorenen Material unter die Frostsicht Rohre von 1 1/2" Ø vorgetrieben werden. In diese Rohre wurde die Sprengladung gebracht und 5 bis 10 Schüsse gleichzeitig elektrisch gezündet. Diese Schüsse bewirkten ein Zerbrechen der Frostdecke, sodass der Greifer in dem gelockerten Material arbeiten konnte (Abb. 8). Bei dem starken Frost bewährte sich der Elektrobagger besonders gut, da er im Gegensatz zum Dieselmotobagger kein Wasser benötigt und die Anlaufschwierigkeiten der Dieselmotoren in Wegfall kommen. Hingegen ist es beim Elektrobagger von Nachteil, dass die Erdkabel bei Frost wegen Bruchgefahr nicht umgelegt werden können.

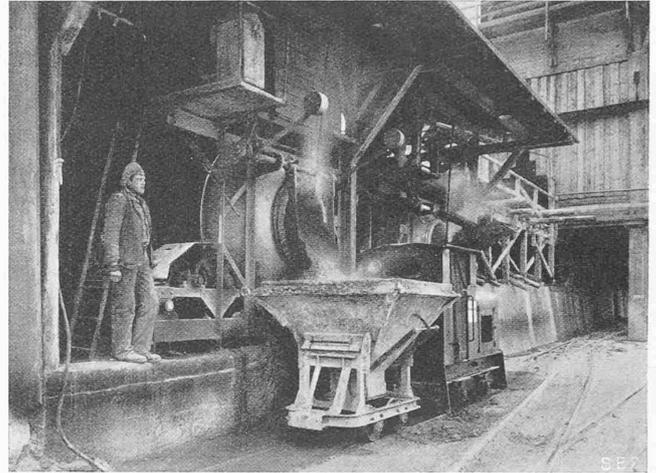


Abb. 9. Betonbereitung bei Frost. Ibag-Mischer, in die zur Erwärmung des Betons Dampf eingeleitet wird

Die Kosten für das Vorsprengen betragen für 2700 m ³ gebaggertes Material an			
Sprengstoff (Gelatine-Donarit)	67 kg	× 1.50	= 100.50 RM
Elektrischen Zündern	174 Stück	× 0.03	= 5.20 RM
Eisernen Rohren	180 m	× 1.50	= 270.— RM
Material:			= 375.70 RM
Löhnen:	80 h	× 0.90	= 72.— RM
			<hr/> 447.70 RM

oder pro m³ gebaggertes Material = —.17 RM

2. *Aufbereitungsanlage.* Unter den Siloschnauzen — der Raum unter der Aufbereitung, in dem die Zuschlagstoffe abgezapft werden, ist vollständig verschalt — brennen während der Frostperioden Tag und Nacht Kokskörbe (Körnung des Kokses = 60/90 mm). Wenn nötig, werden auch Kokskörbe von oben in die Silos gehängt; dies ist erforderlich, wenn das Kies- und Sandmaterial an den Betonwänden festgefroren ist. Da auf 1 m³ Rohmaterial bis zu 2 m³ Waschwasser zugegeben werden müssen, ist alles Material in den Silos reichlich nass und gefriert umso leichter.

Im gleichen Raum unter den Siloschnauzen, in dem sich die brennenden Kokskörbe befinden, steht ein Quersiede-Dampfkessel mit 4 m² Heizfläche und 8 at Betriebsdruck, der den Dampf in eine Hauptleitung von 4" Ø abgibt. Von dieser Leitung zweigen 1 1/2" Leitungen in die Betonmischer ab.

3. *Betonieranlage.* Neben dem Mischer sind Kokskörbe aufgestellt, um die Mischtrommeln zu erwärmen. Bei der Auslauföffnung der Mischer treten die 1 1/2" Dampfzuleitungsrohre ein. Der Dampf, der, solange betoniert wird, ständig in die Mischmaschine einströmt, durchdringt das Mischgut und erwärmt die Mischtrommel auch von innen (Abb. 9). Messungen durch Eintauchen eines gewöhnlichen Badethermometers in die Betonmasse haben ergeben, dass der Beton bei einer Lufttemperatur von — 10° C eine Temperatur von + 6° C hat; diese Temperatur behält er auch nach einem Transport von 60 bis 100 m in eisernen Kübeln (Inhalt = 1 m³) und er kann an der Arbeitsstelle noch mit dieser Temperatur verarbeitet (gerüttelt) werden. Bei starkem Frost werden die Transportkübel mit Deckeln aus Strohmatte und Brettern abgedeckt. Messungen etwa 5 h nach dem Einbringen des Betons haben eine Innen-Temperatur von + 10° C ergeben, bei einer Lufttemperatur von — 12° C. Diese Messungen sind in offenen Rohren, die im Beton stecken, vorgenommen worden. Werden diese Rohre, in denen die Thermometer stecken, mit einem Woll- oder Wattedropfen verstopft, so erhält man Temperaturen von + 15 bis + 18° C, die ziemlich genau der tatsächlichen Innentemperatur des Betons entsprechen dürften. Man ersieht hieraus, dass die Abbindewärme des Zementes (Dosierung 250 kg P. C. pro m³ Fertigbeton) zu wirken beginnt, bevor der Beton sich auf 0° C abkühlen und gefrieren kann. Genauere Angaben folgen unter «Beispiele des Betonierens bei Frost».

Es würde gelingen, den Beton mit einer noch höheren Eigenwärme in das Bauwerk einzubringen, wenn die Dampfleitung in Form einer Schlange durch das Wassergefäss der Mischmaschine geführt werden könnte, damit auch das Anmachwasser angeführt würde. Dies ist aber bei den hier verwendeten Ibag-Mischern nicht möglich, weil sich im Wassergefäss ein beweglicher Kolben zu Messzwecken befindet. Das Anmachwasser, das