Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 96 (1978)

Heft: 32

Artikel: Der Einfluss dynamischer Beanspruchung während des Abbindeprozesses auf die Druckfestigkeit von Beton

Autor: Desserich, Georg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73726

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 21.01.2026

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

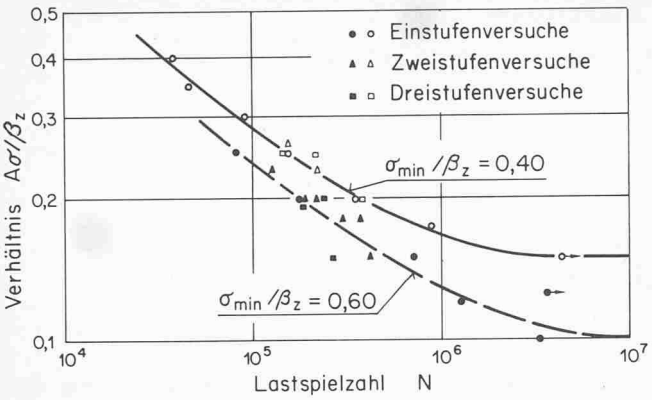

Bild 2. Ermüdungsfestigkeit nackter Spannstahllitzen ø 7/16" im Ein-, Zwei- und Dreistufenversuch

verschiedener Durchmesser (7,9 – 15,3 mm) sind jedoch für die in der Schweiz zum Einbau gelangenden Litzen *keine* grossen Abweichungen zu erwarten.

Schliesslich ist noch zu vermuten, dass sich *einbetonierte Litzenkabel* in Wirklichkeit eher günstiger verhalten als *nackte Einzellitzen*. Wegen der Bedeutung dieses Verhältnisses für praktische Zwecke laufen gegenwärtig Balkenversuche an der EMPA in Dübendorf, über die zu gegebener Zeit berichtet werden soll.

Folgerungen für die Projektierung

Bei oberflächlicher Betrachtung der amerikanischen Versuchsergebnisse kann der Eindruck entstehen, dass die Forderungen der Norm SIA 162 in bezug auf die *Ermüdungsfestigkeit von Litzenkabeln* unrealistisch sind. Dieser Beurteilung ist allerdings entgegenzuhalten, dass die in Wirklichkeit auftretenden Spannungsamplituden und Oberspannungen *wesentlich kleiner* sind als die genormten [10]. Dieser die tatsächliche Ermüdungssicherheit günstig beeinflussende Umstand wird auch durch die in Wirklichkeit *wesentlich grösseren* Lastspielzahlen ($> 2{,}10^6$) *nicht* aufgehoben. Im weitern ist es bei *mehr*litzigen Kabeln sehr unwahrscheinlich, dass alle Litzen im gleichen Kabelquerschnitt versagen. Die *vorhandene Ermüdungssicherheit* von Spannbetonbrücken ist auf Grund neuer Forschungen [11–15] nicht nur grösser als bisher vermutet wurde, sondern auch grösser als nach der im vergangenen Jahr in Kraft gesetzten Ergänzung BLS [16] zur Richtlinie 34 der Norm SIA 162 zu erwarten ist.

Die vorstehenden Ausführungen beziehen sich *nur auf Litzen*, nicht aber auf ihre *Verankerungen*. Ob der in der Norm SIA 162 (1968) Art. 5.05, Abschnitt 1, Absatz b, *geforderte* Wert mit einer bestimmten Verankerung auch wirklich erreicht werden kann, muss bei *jeder* Veränderung der Konstruktion – auch wenn es sich nur um ein *einziges* Detail handelt – stets neu überprüft werden. Die Ermüdungsfestigkeit der üblichen, unvergossenen Litzenverankerungen beträgt im allgemeinen nur etwa 30 bis 50% von derjenigen der Litzen. Trotz dieser eher ungünstigen Sachlage sind jedoch auch in Koppelfugen von Eisenbahnbrücken *Vollstösse* möglich, wenn die Koppelfuge an einen Ort mit *geringen* Beanspruchungen gelegt wird. Eine realistische Sicherheitsbetrachtung sollte nicht von der *vollen normengemässen Verkehrslast*, sondern von der stets kleineren *wirklichen Betriebslast* [11, 12] ausgehen.

Zusammenfassung

In Ermangelung einschlägiger schweizerischer Versuche werden ältere amerikanische Ermüdungsversuche mit nackten, siebendrähtigen Spannstahllitzen so ausgewertet, dass das Ergebnis für die Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit von Litzenkabeln schweizerischer Provenienz *zumindest näherungsweise* benützt werden kann.

Literaturverzeichnis

[1] *Warner R.F.* und *Hulsbos C.L.*: «Fatigue properties of prestressing strand.» PCI Journal 11 (1966) No. 1, S. 32–52.

[2] *Palmgren A.*: «Die Lebensdauer von Kugellagern.» VDI-Zeitschrift 68 (1924) H. 14, S. 339–341.

[3] *Langer B.F.*: «Fatigue failure from stress cycles of variable amplitude.» Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics 4 (1937) No. 4, S. A 160–162.

[4] *Miner M.A.*: «Cumulative damage in fatigue.» Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics 12 (1945) No. 1, S. A 159–164.

[5] *Swanson S.R.*: «Random load fatigue — A state of art survey.» Materials Research and Standards 8 (1968) No. 4, S. 10–44.

[6] *Fisher J.W.*: «Guide to the 1974 AASHO Fatigue Specifications.» ASCI Special Publication. New York: American Institute of Steel Construction, 1974.

[7] *Hirt M.A.*: «Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Ermüdung und deren Anwendung bei der Bemessung von Eisenbahnbrücken.» Bauingenieur 52 (1977) H. 7, S. 255–262.

[8] *Herzog M.*: «Die Betriebsfestigkeit von Baustahl der Güteklassen St 37, St 44 und St E 70 nach Vielstufenversuchen.» Der Stahlbau 45 (1976) H. 8, S. 243–250.

[9] *Herzog M.*: «Betriebsfestigkeit von Stahlbeton, Spannbeton und teilweise vorgespanntem Beton.» Die Bautechnik 54 (1977) H. 3, S. 73–80, und H. 5, S. 166–169.

[10] *Herzog M.*: «Bemessung für wirklichkeitsnahe Grenzzustände.» Schweizerische Bauzeitung 96 (1978) H. 17, S. 350–351.

[11] *Herzog M.*: «Die wahrscheinliche Verkehrslast von Strassenbrücken.» Bauingenieur 51 (1976) H. 12, S. 451–454.

[12] *Herzog M.*: «Die wahrscheinliche Verkehrslast von Eisenbahnbrücken.» Bauingenieur 53 (1978) H. 1, S. 29–32.

[13] *Herzog M.*: «Realistischer Betriebsfestigkeitsnachweis für massive Eisenbahnbrücken.» Die Bautechnik 54 (1977) H. 4, S. 118–123.

[14] *Herzog M.*: «Ermüdung von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter Schub.» Beton- und Stahlbetonbau 72 (1977) H. 12, S. 303–308.

[15] *Herzog M.*: «Zur Definition der Ermüdungssicherheit.» Die Bautechnik 55 (1978) im Druck.

[16] *Grob J.*: «Bemessung von Eisenbahnbrücken aus Stahlbeton und Spannbeton.» Schweizerische Bauzeitung, Heft 45, 1977, S. 809–817.

Adresse des Verfassers: Dr. *M. Herzog*, dipl. Bauing., Rohrerstr. 3, 5000 Aarau.

Der Einfluss dynamischer Beanspruchung während des Abbindeprozesses auf die Druckfestigkeit von Beton

Von **Georg Desserich**, Luzern

In der modernen Bauorganisation, bedingt durch den rationellen Bauablauf, kann der Baustoff Beton bereits im Frühstadium seines Entstehens durch dynamische Beanspruchung beeinflusst werden. Die Erregerquellen dieser dynamischen Einwirkungen sind insbesondere Rammarbeiten mit Spundwänden und Pfählen, Erschütterungen der Schalung und Rüstung durch Beton-Innenrüttler und Beton-Pump-Verfahren sowie die Erzeugung von Erschütterungen durch Verkehrseinflüsse und Naturkräfte (Windstösse, Wasserströmungen) oder Sprengungen.

In einer am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETHZ durchgeführten Semesterarbeit wurde untersucht, ob und inwieweit Beton, der während des Abbinde-

prozesses dynamisch beansprucht wurde, im späteren Alter Festigkeitsbeeinflussungen zeigt.

Die Untersuchungen erstreckten sich im einzelnen auf die Diskussion des Einflusses von:

1. Grösse der Amplitude der aufgebrachten Schwingungen

2. Zeitpunkt der Beanspruchung

Die verwendeten Amplituden liegen, im Blick auf die Anwendung in der Praxis, in der Grössenordnung wie sie auf der Baustelle auftreten können. Die «Erschütterungsmessungen beim Rückzug der Spundbohlen Center Sonnenhof in Rapperswil» [1] bildeten dabei die Berechnungsgrundlagen. Die folgenden Ausführungen geben einen kurzen Einblick in die durchgeführten Arbeiten.

Problemstellung

Nach der Fertigstellung von Erdgeschoss, Zwischengeschoss und 1. Untergeschoss ist beim Center Sonnenhof Rapperswil der Raum zwischen Bauwerk und Spundwand hinterfüllt worden. Anschliessend sah man vor, die *Spundwände mittels einer Vibrationsramme zu ziehen.*

Die Vibrationsrammen erzeugen mittels Unwuchtpaaren *Fliehkräfte,* deren Komponenten sich in horizontaler Richtung teilweise aufheben und in vertikaler Richtung addieren bzw. sinusförmig auf- und abbauen. Die Vibrationsarbeiten hätten 1–2 Monate gedauert. Während dieser Zeit fanden jedoch die Arbeiten für weitere Geschosse ihren Fortgang.

Es stellte sich nun die Frage, wie sich diese Vibrationen und Erschütterungen auf den *Erhärtungsprozess* des jungen Betons der weiteren Bauteile (Stützen, Decken) auswirken könnten. Das geotechnische Ing.-Büro Dr. H. Bendel GmbH, Luzern, wurde beauftragt, Erschütterungsmessungen am Bauwerk durchzuführen. Am 8. Juni 1977 wurde eine Probevibration durchgeführt. Es wurden die in Tabelle 1 aufgeführten maximalen Partikelgeschwindigkeiten der sinusförmigen Schwingungen registriert. Die maximalen Partikelgeschwindigkeiten erreichten sie beim Anlauf der Vibrationsramme.

Theoretische Grundlagen

Verwendete Abkürzungen:

V	Partikelgeschwindigkeit (Schwinggeschwindigkeit)	ν	Frequenz
		ω	Kreisfrequenz
		k	Wellenzahl
u	Fortpflanzungsgeschwindigkeit (Ausbreitungsgeschwindigkeit)	A	Amplitude
		$2A$	Schwingweite
		b	Beschleunigung
		g	Erdbeschleunigung
λ	Wellenlänge	ρ	Dichte
T	Schwingungsdauer		

Es gelten folgende Beziehungen:

(1) $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

(2) $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

(3) $u = \frac{\omega}{k} = \lambda\nu$

Sinus-Welle:

(4) $\xi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$

$$V = \frac{\partial \xi}{\partial t} = A(-\omega)\cos(kx - \omega t)$$

Tabelle 1. Maximale Partikelgeschwindigkeiten, Frequenzbereiche

Erdgeschoss:	8 mm/sec
Zwischengeschoss:	8 mm/sec
1. Untergeschoss:	12 mm/sec
Frequenzbereich Betrieb:	10–14 Hz
Frequenzbereich Anlauf / Auslauf:	17,5 Hz

(5) $V_{max} = A\omega$

(5a) mit (2) $\underline{V_{max} = 2\pi\nu A}$

$$b = \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -A(\omega^2)\sin(kx - \omega t)$$

$$b_{max} = A\omega^2$$

(6) mit (5) $b_{max} = V\omega$

(6a) mit (2) $\underline{b_{max} = 2\pi\nu V}$

Der Schwingvorgang beim Rückzug einer Spundbohle durch eine Vibrationsramme ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Die *dynamischen Zusatzspannungen* in Form von *Zugspannungen* als Folge von Erschütterungen, können wie folgt berechnet werden [2]:

Sinus-Welle:

(4) $\xi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$

Hook:

(7) $\sigma = E\varepsilon = E\frac{\partial \xi}{\partial x}$

(4) in (7) $\sigma = EAk\cos(kx - \omega t)$

(8) $\underline{\sigma_{max} = EAk}$

Wellen haben in einem elastischen Körper die Ausbreitungsgeschwindigkeit:

(9) $u = \sqrt{\frac{1}{\alpha\rho}}$

(10) Für Stäbe gilt: $\frac{1}{\alpha} = E$

(11) (10) in (9) $u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

(3) $u = \frac{\omega}{k}$

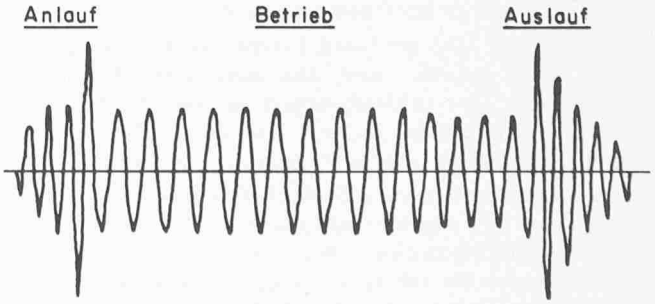

Bild 1. Schwingvorgang beim Rückzug einer Spundbohle durch eine Vibrationsramme

$$(12) \quad (3) \text{ in } (11) \quad k = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}$$

$$(13) \quad (12) \text{ in } (8) \quad \sigma_{max} = A \sqrt{E \rho} \; \omega$$

$$(14) \quad \text{aus} \quad (5a) \; A = \frac{V}{2 \pi \nu}$$

$$(2) \quad \omega = 2 \pi \nu$$

$$(2) \text{ u. } (14) \text{ in } (13) \quad \underline{\underline{\sigma_{max} = \sqrt{E \rho} \; V}}$$

Diese für elastische Stäbe geltende Beziehung kann in erweiterter Form auch für jungen Beton verwendet werden, für den σ_{dyn} wie folgt abgeschätzt werden kann [1]:

$$\sigma_{dyn} = 2{,}5 \sqrt{E \rho} \; V$$

Als Richtwert wird in der Praxis für ein- bis zweitägigen Beton eine Erschütterungsgeschwindigkeit von $V = 5$ mm/s zugelassen [1]:

Beispiel:

Beton (1 ÷ 2tägig): $E = 1\,000\,000 \text{ N/cm}^2$

$\rho = 2{,}4 \; 10^{-5} \frac{\text{N s}^2}{\text{cm}^4}$

$V = 0{,}5$ cm/s

Daraus folgt: $\sigma_{dyn} = 6{,}1 \text{ N/cm}^2$

Stand der Forschung

Die Auswirkungen mechanischer Störungen während des Abbindeprozesses von Beton auf seine spezifischen Eigenschaften im späteren Alter werden in der Fachliteratur sehr unterschiedlich beurteilt. Häufig sind Hinweise anzutreffen, dass verdichteter Beton während des Erhärtens grundsätzlich vor Erschütterungen bewahrt werden müsse.

Die Untersuchungen von *Kindel* [4] haben gezeigt, dass Erschütterungen vor der 4. und etwa nach der 16. Stunde, gerechnet vom Einbringen des frischen Betons, unschädlich sind. Bei den aufgebrachten Erschütterungen handelte es sich um regelmässige, waagrechte, einachsige Schwingungen der Unterlage.

Diederichs liess Betonwürfel innerhalb der ersten 24 Stunden des Abbindeprozesses unregelmässigen, plötzlichen Erschütterungen unterwerfen. Die Resultate der Bruchversuche an den Probewürfeln zeigten eine bedeutende Verringerung (20–30%) der Betonfestigkeit [5].

Die Untersuchungen von *Walz* ergaben, dass die durch Rüttler erzeugten hochfrequenten periodischen Schwingungen nur bedingte Schädigungen des Betons hervorrufen [6]. Bei unzweckmässig zusammengesetztem, feinmörtel- und wasserreichem Beton ist dagegen mit Entmischung und Absondern einer wässerigen, allgemein weniger widerstandsfähigen Schlemmeschicht an der Oberfläche zu rechnen.

In der Din 1045 ist diesen Erkenntnissen Rechnung getragen, indem gefordert wird, dass erhärtender Beton gegen Schwingungen und Erschütterungen zu schützen ist, sofern diese das Betongefüge lockern und die Verbundwirkung zwischen Bewehrung und Beton gefährden können.

Die Untersuchungen von *Hilsdorf* und *Finsterwalder* [7] zeigten, dass eine Nachverdichtung des Betons mittels einer Rüttelmaschine bis zu einem Betonalter von etwa 1,5 Stunden zu einer Reduktion der Druckfestigkeit führte. Eine Nachverdichtung nach etwa zwei Stunden oder mehr bewirkte eine Steigerung der Druckfestigkeit, die bei einem Nachverdichtungszeitpunkt von 3 bis 3,5 Stunden nach dem Betonieren mit 20% der Festigkeit nicht nachverdichteter Proben ihren Maximalwert erreichte. Die Wirkung der Nachverdichtung stieg mit grösser werdender Rüttelenergie.

Die Mehrzahl der zu diesem Problemkreis bisher vorliegenden Untersuchungen trägt das Merkmal *zweckgebundener Eignungsprüfungen.*

Alle Versuche haben gezeigt, dass Art und Grösse des Einflusses einer äusseren mechanischen Einwirkung auf Beton und die damit verbundene Nachverdichtung und resultierender Festigkeitsanstieg oder Abfall, von der Beanspruchungsart, der Betonsorte, dem Zeitpunkt des Beginns und Dauer der Einwirkung abhängen.

Die Untersuchungen ergaben, dass durch eine Nachverdichtung das Gefüge oder die Festigkeitsentwicklung des Zementsteins beeinflusst und dadurch die Betondruckfestigkeit verändert wird.

Systematische Untersuchungen über das Festigkeitsverhalten von Beton, der während des Abbindeprozesses durch genau definierte Schwingungen, mit Amplituden und Frequenzen, wie sie tatsächlich auf der Baustelle auftreten können, beansprucht wurde, fehlen bisher.

Versuchsprogramm

Die Berechnungsgrundlagen zur Festlegung der Parameter bildeten die Erschütterungsmessungen am Bauwerk «Center Sonnenhof» in Rapperswil.

Als Parameter wurden drei verschiedene Erregeramplituden mit sechs verschiedenen Zeitpunkten der dynamischen Beanspruchungen gewählt. Je Amplitude wurden jeweils drei Probekörper nach 1 h, 2 h, 3 h, 5 h, 10 h und 24 Stunden nach Wasserzugabe dynamisch beansprucht. Bei allen Versuchen betrug die Frequenz 15 Hz. Die Begründung dieser Frequenz liegt darin, dass die gemessenen Frequenzen am Bauwerk «Sonnenhof» während des Betriebes der Vibrationsramme 10–14 Hz betrugen. Beim Anlauf bzw. Auslauf der Vibrationsramme betrug die registrierte Frequenz 17,5 Hz. Die Frequenz von 15 Hz schien ein vernünftiger Wert innerhalb der verschiedenen Vibrationsstadien.

Aufgrund von Kontrollmessungen mit einem elektrodynamischen Erschütterungsaufnehmer und einem induktiven Wegaufnehmer wurden die in Tabelle 2 aufgeführten, effektiv an der Versuchsmaschine aufgebrachten Partikelgeschwindigkeiten bzw. Amplituden, und Beschleunigungen, registriert.

Die kleinste Partikelgeschwindigkeit V_I liegt in der Grössenordnung der zulässigen Partikelgeschwindigkeit von $V = 5$ mm/s. Die Partikelgeschwindigkeit V_{II} entspricht etwa der maximalen gemessenen Partikelgeschwindigkeit von $V = 12$ mm/s. Die Partikelgeschwindigkeit V_{III} ermöglichte zusammen mit V_I und V_{II} eine erste approximative Überdeckung des Amplitudenbereiches, wie er am Bauwerk etwa auftreten kann.

Der Festlegung der Belastungszeitpunkte lag der Gedanke zugrunde, den jungen Beton in den Augenblicken der grossen chemischen Umwandlungen zu belasten. Die Beeinflussung des jungen Betons in diesen entscheidenden Phasen seines Entstehens sollte an sich die nachhaltigsten Auswirkungen zeigen.

Zur Bestimmung der Zeitpunkte der grossen chemischen Umwandlungen diente das «Zeit-Temperatur-Diagramm» des bei allen Versuchen verwendeten Zementes PC Jura. Bild 2 zeigt die Temperaturentwicklung des Zementes PC Jura als Bausandmörtel 2,0 lt, isoliert. Dieser Bausandmörtel entspricht einem eigentlichen Mikrobeton mit einer Festigkeit nach 28 Tagen eines PC 300.

Die erste rasche Reaktion wird durch den vorhandenen Gips stark gebremst. Zwischen der zweiten und dritten Stunde erfolgt ein schwacher Temperaturanstieg mit anschliessender starker Temperaturentwicklung bis zum Zeitpunkt von 12,5 Stunden.

Als frühester Zeitpunkt der dynamischen Beanspruchung wurde eine Stunde nach Wasserzugabe gewählt. Dieser Zeitpunkt befindet sich im Bereich der durch den vorhandenen Gips verzögerten Reaktion. Aus ausführungstechnischen Gründen konnte kein früherer Zeitpunkt gewählt werden. Als nächste Zeitpunkte wurden die zweite, die dritte und die fünfte Stunde gewählt. Diese drei Zeitpunkte überdecken die Phase der stürmischen chemischen Umwandlungen. Der nächste Belastungszeitpunkt wurde in der zehnten Stunde festgesetzt, das heisst, im Bereich des Temperaturmaximums bzw. Abbindeendes. Die letzte Beanspruchung fand in der vierundzwanzigsten Stunde nach Wasserzugabe statt. Dieser Zeitpunkt sollte Aussagen über das Verhalten des jungen Betons nach dem eigentlichen Abbinden ermöglichen.

Bei allen durchgeführten Versuchen betrug die Dauer der dynamischen Beanspruchung 30 Minuten. Dieses Zeitintervall entspricht etwa dem Zeitaufwand, der zum Rückzug zweier Spundwände benötigt wird.

Als Probekörperform wurde für alle Versuchsreihen eine Würfelform aus Kunststoff mit einer Seitenlänge von 15 cm gewählt. Die Versuche wurden unter streng gleichbleibenden Herstellungs-, Umgebungs-, Lagerungs-, Nachbehandlungs- und Prüfbedingungen durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde der gleiche Betontyp verwendet:

Betonsorte: BH, Nennwert $\beta_{w28} = 300$ kg/cm²
Bindemittel: Portlandzement, Marke «Jura»

Zuschlagstoffe (Kieswerk Weiach):

	Korngruppe (mm)	*Anteile* (%)
Sand:	0–4	32
	4–8	10
Kies:	8–16	18
	16–32	40

W/Z-Faktor: 0,5
Konsistenz des Frischbetons: Im Zwischenbereich «Plastischer-Steifer» Beton
Probekörper: Würfel 15/15/15 cm
Prüfalter: 28Tage

Als Versuchsmaschine wurde das *«Hydropuls-System»* der Firma Carl Schenk, Maschinenfabrik GmbH, Darmstadt, verwendet. Das «Hydropuls-System» ist ein *servo-hydraulisches Prüfsystem* nach dem Baukastenprinzip für ruhende, zügige und schwingende Beanspruchung mit hydraulischem Antrieb und elektronischer Sollwertvorgabe und analoger oder digitaler Anzeige. Mit den einzelnen Bausteinen des Systems lassen sich sowohl Prüfmaschine wie Prüfanlage für verschiedene Anwendungszwecke zusammenstellen.

Mit Hilfe von *elektrodynamischen Erschütterungsaufnehmer* und einer *Ultraviolett-Galvanometer-Kamera* konnten die Versuchseinrichtung überprüft und die effektiven Verhältnisse ermittelt werden.

Tabelle 2. Effektive Partikelgeschwindigkeiten, Amplituden und Beschleunigungen

$V_I = 4{,}4$ mm/s	$A_I = 0{,}047$ mm	$b_I = \frac{1}{24}$ g
$V_{II} = 10{,}8$ mm/s	$A_{II} = 0{,}115$ mm	$b_{II} = \frac{1}{10}$ g
$V_{III} = 21{,}5$ mm/s	$A_{III} = 0{,}228$ mm	$b_{III} = \frac{1}{5}$ g

Die Überprüfung ergab folgendes:

- Die Versuchsmaschine erzeugt im verwendeten Amplituden- und Frequenzbereich genaue sinusförmige Schwingungen.
- Die horizontalen Schwingungen sind vernachlässigbar klein, d.h. es handelt sich um eine einachsige dynamische Beanspruchung durch einen eindimensionalen Oszillator.
- Die Frequenz von 15 Hz wird exakt eingehalten.
- Messungen an der Oberfläche des Zylinders der Versuchsmaschine und Messungen an der Oberfläche der aufmontierten Befestigungseinrichtung der Probekörper ergaben einen geringen Unterschied. Die Qualität der Befestigungseinrichtung war damit bewiesen, sie erzeugte eine vernachlässigbare Dämpfung der aufgebrachten Schwingungen.

Ergebnisse

Zur Auswertung der Prüfergebnisse aus den Bruchversuchen wurden speziell entwickelte *HP-Computerprogramme* verwendet. Sie ermöglichen, Varianzanalysen (einfache, zweifache, dreifache) mit unabhängig vielen Zeilen und Spalten sowie innerhalb der Zeilen und Spalten unabhängig vielen Beobachtungen durchzuführen. Die Programme berechnen auch Wechselbeziehungen (Interaktion) zwischen den Faktoren.

Die *statistische Auswertung* der Versuche ergab folgende Resultate:

1. Zwischen der Grösse der Amplitude und der Betondruckfestigkeit besteht statistisch kein Zusammenhang, d.h. zwischen der Partikelgeschwindigkeit und der Betondruckfestigkeit lässt sich keine Gesetzmässigkeit erkennen.

2. Zwischen dem Zeitpunkt der dynamischen Beanspruchung und der Betondruckfestigkeit besteht statistisch ein gesicherter Zusammenhang, d.h. der Zeitpunkt beeinflusst die Betondruckfestigkeit gesetzmässig.

3. Zwischen der Amplitude und dem Zeitpunkt besteht unter der Annahme von $F_{0,05}$ (Fehlschlussrisiko 5%) eine Interaktion, d.h. zwischen Amplitude und Zeitpunkt besteht eine gesetzmässige Wechselbeziehung.

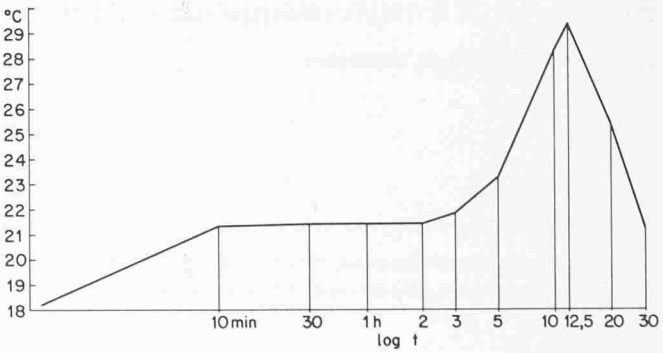

Bild 2. Temperaturentwicklung Zement PC Jura als Bausandmörtel 2,0 lt isoliert

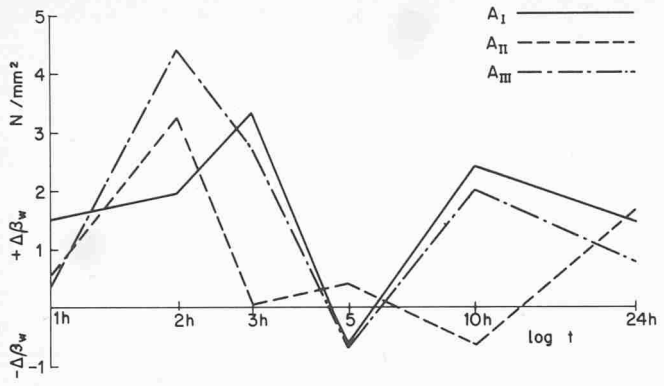

Bild 3. Druckfestigkeitszunahme bzw. Abnahme in Abhängigkeit des Belastungszeitpunktes

Gestützt auf diese Resultate liessen sich die Kurven in Bild 3 zeichnen. Die $\Delta\beta_w$ (N/mm²) bezüglich dem Mittelwert der Referenzproben wurden für die drei Amplituden in Funktion des Zeitpunktes aufgetragen.

Die dynamische Beanspruchung bewirkt mit Ausnahme des Belastungszeitpunktes 5 h durchwegs eine Steigerung der Druckfestigkeit, die bei einem Zeitpunkt von 2 h nach Wasserzugabe mit 11 % der Festigkeit nicht beeinflusster Proben ihren Maximalwert erreicht.

Die grösste Festigkeitszunahme von 11 % ist bei der grössten Amplitude zu verzeichnen. Die maximale Festigkeitsabnahme ist jedoch bei allen drei Amplituden in der gleichen Grössenordnung. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass es sich um sehr geringfügige Festigkeitsminderungen handelt. Im Zeitpunkt von 2 h wächst die Festigkeitszunahme mit steigender Grösse der Amplitude. In allen anderen Zeitpunkten zeigt das Diagramm, dass zwischen der Grösse der Amplitude und der Druckfestigkeitszunahme bzw. Abnahme kein gesetzmässiger Zusammenhang abgeleitet werden kann. Hingegen zeigen die Graphen, dass der Zeitpunkt der Beeinflussung der dynamischen Beanspruchung des Festigkeitsverhaltens wesentlich beeinflusst. Zwischen 3 h und 5 h, 5 h und 10 h und zwischen 10 h und 24 h hat der Graph der Amplitude II einen eindeutig gegensinnigen Verlauf zu den beiden anderen Graphen. Daraus resultiert die aus der statistischen Auswertung ersichtliche leichte Wechselbeziehung zwischen Amplitude und Zeitpunkt.

*

Der Verfasser dankt Prof. Dr. *A. Rösli,* Leiter des Institutes für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich, für seine Hinweise und Ratschläge sowie Herrn *R. Buser,* dipl. Ing. ETH, für die wertvollen Anregungen, Herrn *Helbling,* Ing. HTL, für die Bedienung sämtlicher Versuchsmaschinen, Herrn *Studer,* dipl. Ing. ETH, Vorsteher der Abteilung Beton, EMPA Dübendorf, für die Beratung in der Versuchsplanung und statistischen Auswertung. Besonderen Dank gebührt Dr. *H. Bendel* vom geotechnischen Ingenieurbüro Dr. H. Bendel GmbH, Luzern, für die spezifischen Unterlagen zu dieser Arbeit sowie die vielen Anregungen auf dem Gebiet der Erschütterungsmessungen.

Literaturverzeichnis

[1] *H. Bendel,* GmbH, geotechnisches Ingenieurbüro, Luzern: «Erschütterungsmessungen beim Rückzug der Spundbohlen Center Sonnenhof in Rapperswil.»

[2] Diverse Fachliteratur der Mechanik und Physik.

[3] *Papadakis M.:* «Die Bedeutung der Feinstoffe in der Fliesskunde des Frischbetons.» Betonstein-Zeitung, Heft 11, 19.

[4] *Kindel:* «Einfluss von Erschütterungen auf frischen Beton.» Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Eisenbetons, Heft 36, Berlin 1932.

[5] *Diederichs P.:* «Versuche über Verringerung der Betonfestigkeit infolge Erschütterungen durch Flakschiessen oder Rammarbeiten.» Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 43, Heft 5/6, 1944.

[6] *Walz K.:* «Rüttelbeton.» Verlag Wilh. Ernst und Sohn, Berlin 1960.

[7] *Hilsdorf H., Finsterwalder K.:* «Untersuchungen über den Einfluss einer Nachverdichtung auf Festigkeit, Kriechen und Schwinden von Beton.» Verlag Wilh. Ernst und Sohn, Berlin 1966, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 184.

Adresse des Verfassers: *G. Desserich,* cand. Bauing. ETH, Langensandstrasse 74, 6005 Luzern.

Stand- und Entgleisungssicherheit bei Zahnradbahnen

Von **Gaston Borgeaud,** Winterthur

III. Teil (Fortsetzung)*

3 Die verschiedenen Antriebsarten

Die Zahnrad- oder Adhäsionsantriebe können im Rahmen oder auf den Radsatzachsen gelagert sein. Im letzteren Falle weisen sie eine Drehmomentstütze auf, die gemäss Bild 15 allgemein geneigt sein kann. Die geneigte Drehmomentstütze wird praktisch stets am Gestellrahmen, die horizontale hingegen am Gestellrahmen oder direkt am Kasten angelenkt. Es ergeben sich somit die in Tabelle 4 dargestellten drei Antriebsarten, zu deren Kennzeichnung die dabei aufgeführten Faktoren notwendig sind.

* I. Teil (mit Bezeichnungen): Heft 27/28, S. 535–550, II. Teil: Heft 30/31, S. 583–589.