

Einfluß von Erschütterungen auf frischen und auf jungen Beton

Von Justus Bonzel und Michael Schmidt, Düsseldorf

Übersicht

Frische und junge Betone können in der Praxis ungewollten Erschütterungen ausgesetzt sein, wie sie beispielsweise bei der Herstellung von Verkehrsbauten, beim Betonieren in der Umgebung von Sprengstellen oder von Rammarbeiten sowie im Bereich von Maschinenfundamenten auftreten können. Art und Stärke dieser Erschütterungen können dabei im Einzelfall sehr unterschiedlich sein. Veranlaßt durch verschiedene Anfragen aus der Praxis wurde das zu dieser Frage vorliegende Schrifttum im Forschungsinstitut der Zementindustrie gesichtet und ausgewertet, um Angaben darüber machen zu können, welchen Einfluß die Stärke der Erschütterung sowie der Zeitpunkt und die Dauer ihres Einwirkens auf die Festbetoneigenschaften von Beton unterschiedlicher Zusammensetzung haben.

Die Auswertung ergab, daß verkehrsbedingte und andere, sinusförmige Erschütterungen bis zu einer Schwinggeschwindigkeit von rd. 20 mm/s keinen wesentlichen Einfluß auf die Druckfestigkeit üblichen Betons haben, wenn die Schwingungsamplituden dabei klein sind. Wirken stärkere Erschütterungen auf Beton im Anfangsstadium der Erhärtung ein, so kann eine Beeinträchtigung der Festigkeit nicht ausgeschlossen werden. Die Untersuchungen lassen ferner darauf schließen, daß durch einen ausreichenden Bewehrungsgrad des Betons der Widerstand gegen Erschütterungen insbesondere bei biegebeanspruchten Bauteilen erhöht werden kann.

1. Allgemeines

Frischer Beton wird nach dem Einbringen in die Schalung zumeist mit Rüttelgeräten verschiedener Art einer gewollten Erschütterung ausgesetzt, um eine größtmögliche Dichte des Gefüges zu erreichen. Art, Dauer und Zeitpunkt des Rüttelns des Frischbetons und sein Einfluß auf die Eigenschaften des frischen und erhärteten Betons wurden in zahlreichen Untersuchungen seit vielen Jahren systematisch erforscht [1, 2, 3]. Auf frischen und auf jungen Beton können in der Praxis in bestimmten Fällen jedoch auch ungewollte Schwingungen einwirken, die hinsichtlich ihrer Frequenz, Amplitu-

de, Dauer und des Zeitpunkts ihres Auftretens nicht mit der Wirkung von Rüttelgeräten vergleichbar zu sein brauchen. Dies kann beispielsweise bei der Herstellung und Erneuerung von Brückenabschnitten der Fall sein, wenn gleichzeitig Teile der Brücke befahren werden oder bei Betonfahrbahnen, wenn beim Betonieren der Verkehr auf der benachbarten Fahrspur oder auf der Gegenfahrbahn rollt. Außerdem können solche dynamischen Beanspruchungen beispielsweise bei Betonierarbeiten in der Nähe von Sprengstellen, während der Durchführung von Rammarbeiten oder im Bereich von Industriebauten auftreten, bei denen bestimmte mit Erschütterungen verbundene Produktionsprozesse während des Betonierens und während der Erhärtung des Betons nicht unterbrochen werden können. Unter Umständen können solche ungewollten dynamischen Beanspruchungen zudem in Kombination mit statischen Verformungen im Bauzustand auftreten.

Veranlaßt durch verschiedene Anfragen wurde das im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, und das bei der Dokumentationsstelle für Bautechnik der Fraunhofer-Gesellschaft e.V., Stuttgart, zu diesen Fragen vorliegende Schrifttum gesichtet und ausgewertet. Dabei wurde den Fragen nachgegangen

- ob und ab welcher Stärke sich entsprechende Erschütterungen nachteilig auf die Betoneigenschaften auswirken können,
- welchen Einfluß der Zeitpunkt und die Zeitdauer der Erschütterung haben und
- wie im einzelnen baupraktischen Fall die Einwirkung solcher Erschütterungen zu beurteilen ist.

Der Umfang des zu diesen Fragen vorliegenden Schrifttums ist gering. Es umfaßt sowohl Baustellenuntersuchungen, die Aufschluß über die in konkreten Einzelfällen zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen geben sollten, als auch Laboruntersuchungen verschiedenen Umfangs.

Der eigentlichen Auswertung wurden die zugehörigen physikalischen Grundlagen und eine Übersicht über die Art und Stärke der von unterschiedlichen Erregern verursachten Erschütterungen im Bauwesen vorangestellt.

2. Erschütterungen im Bauwesen

2.1 Grundlagen

Die für die Ermittlung und Beurteilung von Erschütterungen im Bauwesen notwendigen Grundsätze sind sowohl allgemein als auch bezogen auf fertige Bauteile und Bauwerke in DIN 4150 „Erschütterungen im Bauwesen“ [4] festgelegt. Als Schwingungen werden darin zeitliche Veränderungen physikalischer Größen bezeichnet, wenn die zeitliche Veränderung im betrachteten Zeitraum nicht monoton ist. Unter Erschütterungen werden Schwingungsemissionen und Schwingungsimmissionen verstanden. Die im folgenden ausschließlich betrachteten mechanischen Schwingungen führen in Bauwerken oder Bauteilen zu dynamischen Beanspruchungen.

Die im Bauwesen auftretenden mechanischen Schwingungen können in der Regel nach DIN 4150 mit einer für die Beurteilung ihrer

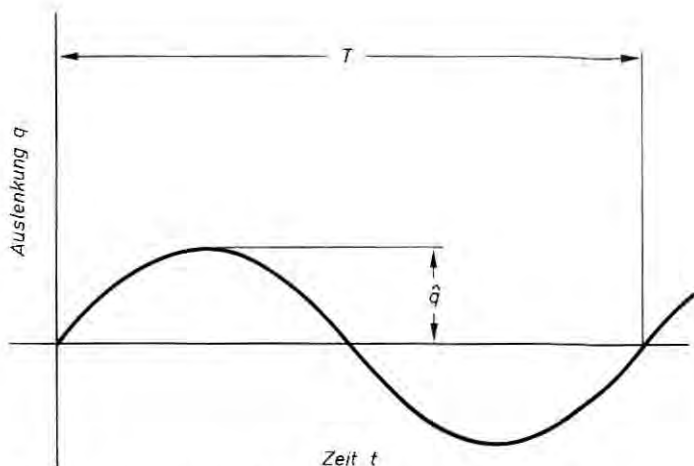


Bild 1 Harmonische Schwingung
 \hat{q} = Amplitude; T = Periodendauer

Wirkung auf bauliche Anlagen ausreichenden Genauigkeit auf die einfachste Schwingungsform, die harmonische Schwingung, zurückgeführt werden. Harmonische Schwingungen lassen sich unter Verwendung der in DIN 4150 verwendeten Zeichen durch eine Sinusfunktion der Form

$$q = \hat{q} \cdot \sin \omega t = \hat{q} \cdot \sin \frac{2 \pi}{T} \cdot t \quad (1)$$

darstellen, siehe Bild 1. Darin ist die Amplitude \hat{q} der größte absolute Betrag, den die Schwingungsgröße erreicht (Scheitelwert). T ist die Periodendauer, ihr Kehrwert $f = 1/T$ ist die Frequenz, gemessen in Hertz (Hz). Der Wert $\omega = 2 \pi/T = 2 \pi \cdot f$ ist die Kreisfrequenz.

Maßgeblich für die Beurteilung von Erschütterungen, die auf bauliche Anlagen einwirken, ist nach DIN 4150 die Schwinggeschwindigkeit, gemessen in mm/s, als zeitliche Ableitung des Schwingweges

$$v = \frac{dq}{dt} = \hat{q} \omega \cdot \cos \omega t \text{ [mm/s]} \quad (2)$$

Wird, wie in DIN 4150 vereinbart, nur die maximale Amplitude einer Schwingung berücksichtigt, so vereinfacht sich die Gleichung (2) auf

$$\dot{v} = \hat{q} \cdot 2 \pi \cdot f \text{ [mm/s]} \quad (3)$$

Gleichung 3 wird im folgenden dazu verwendet, aus den in einzelnen Untersuchungen angegebenen Erschütterungsamplituden und -frequenzen die zugehörigen Schwinggeschwindigkeiten zu errechnen.

2.2 Art und Größe der Erschütterungen

Die von unterschiedlichen Erregern verursachten Erschütterungen können sehr verschiedene Schwingungsverläufe aufweisen. Die Stärke, mit der solche Erschütterungen auf frische oder junge Be-

tone einwirken können, hängt im wesentlichen von der Stärke der Erregerschwingung, von den dämpfenden Eigenschaften und von der Masse des Bauteils, von der Entfernung zwischen dem Erschütterungsreger und dem zu betonierenden Bauteil sowie von der Schwingfähigkeit des die Erschütterung übertragenden Mediums ab.

Verkehrsbedingte Erschütterungen setzen sich zumeist aus zwei Anteilen zusammen: Das einzelne rollende Rad eines Straßen- oder Schienenfahrzeugs wirkt als dynamische Belastung auf seine Unterlage ein und regt sie zu sinusförmigen Schwingungen an, die durch die Masse und durch die Eigenschaften der Straßen- oder Brückenkonstruktion gedämpft werden. Da Fahrbahn- oder Schienenoberflächen in der Praxis nicht ideal eben sind, kommen zu diesen Schwingungen stoßartige Erschütterungen hinzu, die je nach Unebenheit, Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeuggewicht wesentlich stärker als die Sinusschwingungen sein können. In der Praxis überlagern sich die durch das Kollektiv aller in der Umgebung eines bestimmten Punktes fahrenden Fahrzeuge hervorgerufenen Erschütterungen. Dabei kann sowohl eine teilweise Kompensation als auch eine Verstärkung der Schwingungen auftreten. Wegen der stark dämpfenden Wirkung des Fahrbahn- oder Schienenaufbaus und wegen der kleinen Amplituden der erzeugten Erschütterungen bleiben die in der Umgebung von Straßenaufbauten meßbaren Schwinggeschwindigkeiten im allgemeinen unter 2 mm/s. Nur in besonders ungünstigen Fällen wurden bis zu 10 mm/s gemessen [5].

Bei Brückenbauwerken kann die Stärke der am Betonierort auftretenden verkehrsbedingten Erschütterungen, bedingt durch Unterschiede in den Brückenkonstruktionen, unterschiedliche Bauwerksmassen und Baustoffe und die unterschiedliche Schwingungsübertragung vom Erreger zum Betonierort, sehr verschieden sein. Die Erschütterungen können sowohl direkt über Längs- oder Querträger übertragen werden, sie können aber auch indirekt über Teile der Gesamtkonstruktion wie etwa über gemeinsame Widerlager oder Brückenpfeiler fortlaufen, wobei auch eine Weiterleitung über den Untergrund nicht ausgeschlossen werden kann.

Sprengerschütterungen und Erschütterungen, die beispielsweise durch Rammgeräte mit fallenden Gewichten oder durch Schmiedehämmer hervorgerufen werden, haben relativ kurze Einwirkungszeiten zwischen 0,2 bis zu höchstens 1 s. Die dabei auftretenden Schwingungen sind nicht harmonisch. Ihre Diagramme sind unregelmäßige Linien, die in verschiedenen Abständen die Zeitabszisse überqueren oder auch nur berühren. Da solche Schwingungen keine Frequenzen im Sinne der in Abschnitt 2.1 gegebenen Definition haben, wird in diesem Fall die Dauer der größten feststellbaren Halbwelle verdoppelt und der Kehrwert der auf diese Weise gewonnenen Periodendauer als Frequenz bezeichnet [7]. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie hat in der Umgebung von Steinbrüchen, die als Gewinnungsstellen für Zement- und Kalkwerke dienen, zahlreiche Messungen von Sprengerschütterungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden bislang nur in wenigen Fällen veröffentlicht, weil es sich um Aufträge von Dritten, meist von Behörden, handelte. Sie stimmen weitgehend mit den in Bild 2 angegebenen Werten überein.

Maschinen mit rotierenden Teilen können je nach Art und Größe der Maschine und der Art ihrer Auflagerung auf der Unterlage sehr unterschiedliche Erschütterungen verursachen. Haben diese Erschütterungen gleichbleibend hohe Frequenzen, so muß, wie beim Betonieren in der Nähe von Vibrationsrammen oder Vibrationsverdichtungsgeräten, neben der Stärke der Erschütterung die Möglichkeit von Resonanzerscheinungen berücksichtigt werden, die zu einem

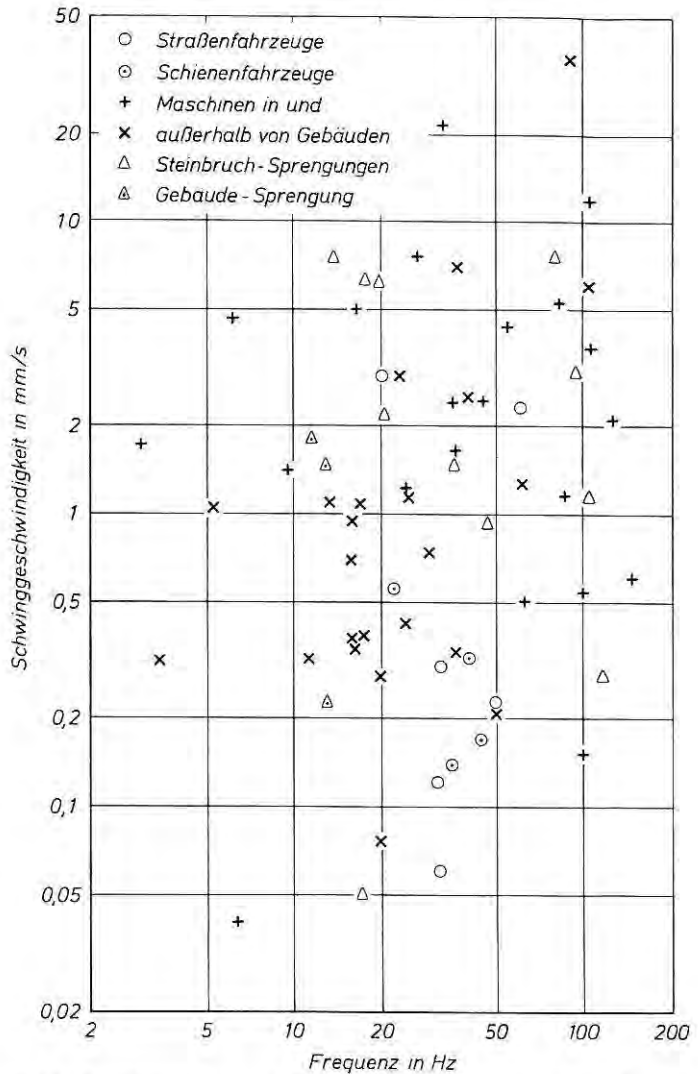


Bild 2 Erschütterungen von Gebäuden durch unterschiedliche Erreger, gemessen an den Gebäudefundamenten und in den oberen Stockwerken [5]

stetigen Ansteigen der Erschütterungen im betonierten Bauteil führen können.

Die in Bild 2 dargestellte Übersicht über die Ergebnisse von Erschütterungsmessungen aus [5] macht zum einen deutlich, wie unterschiedlich die in verschiedenen Entfernungen von Schwingungserregern auftretenden Erschütterungen sein können. Andererseits geht daraus hervor, daß von insgesamt über 60 dargestellten Messungen nur drei Schwinggeschwindigkeiten über 8 mm/s erbrachten.

Sind im Einzelfalle aufgrund der örtlichen Gegebenheiten besonders große Erschütterungen zu erwarten, die nach dem Betonieren nicht für einen ausreichend langen Zeitraum unterbrochen werden können, empfiehlt es sich, die Erschütterungen vor dem Betonieren zu messen und die erforderlichen Maßnahmen darauf abzustimmen.

2.3 Anhaltswerte für zulässige Erschütterungen

Anhaltswerte zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen unterschiedlicher Intensität auf fertige bauliche Anlagen sind in DIN 4150 in Abhängigkeit von der Art des betroffenen Bauteils angegeben. Danach können übliche, nach den allgemeinen Regeln der Baukunst erstellte Wohn- und Geschäftshäuser Schwinggeschwindigkeiten bis 8 mm/s, gut ausgesteifte Bauten aus schweren Bauteilen, wie z. B. Skelettbauten aus Stahlbeton, bis 30 mm/s bei Frequenzen bis 60 Hz ertragen, ohne daß eine Verminderung des Gebrauchswertes zu erwarten ist. Die angegebenen Schwinggeschwindigkeiten gelten jeweils für die Gebäudefundamente. Anhaltswerte für zulässige Erschütterungen von noch nicht erhärtetem Beton sind in DIN 4150 nicht angegeben.

3. Erschütterungseinwirkungen auf frischen und jungen Beton

3.1 Allgemeines

Das Verformungsverhalten von frischem Beton wird im wesentlichen durch die im Feinmörtel vorhandenen Kohäsionskräfte und durch die innere Reibung des Kornhaufwerks bestimmt. Welcher der beiden Einflüsse im Einzelfall bestimmend ist, hängt von der Zusammensetzung des Betons, insbesondere vom Wassergehalt und vom w/z-Wert, ab. Werden diese, den inneren Zusammenhalt des frischen Betons bestimmenden Kräfte durch ausreichend große äußere Krafteinwirkungen, wie etwa durch Erschütterungen, überwunden, so wird die Fließgrenze des frischen Betons überschritten, und er verhält sich weitgehend wie eine Flüssigkeit. Bei sachgemäß zusammengesetzten und verdichteten, aber noch nicht erhärteten Betonen wird dieses Fließen zu einer Nachverdichtung und damit in der Regel zu einer größeren Dichtigkeit und höheren Festigkeit des Festbetons führen. Mit zunehmender Zeit nimmt durch das beginnende Erhärten die Fähigkeit des Betons, durch Erschütterungen ins Fließen zu geraten, mehr und mehr ab. Nach einem bestimmten anfänglichen Erhärten führen äußere Erschütterungen nicht mehr zu einem Fließen, sondern bewirken Zug- und Scherbeanspru-

chungen im Beton. Werden dabei die Dehnfähigkeit und die zunächst sehr geringe Festigkeit des jungen Betons überschritten, so treten Gefügelockerungen und Risse auf, die eine verminderte Festigkeit zur Folge haben können. Die für den Beton kritische Phase ist überwunden, wenn im Verlauf der weiteren Erhärtung die Festigkeit ausreichend groß ist, um die erschütterungsbedingten Beanspruchungen ohne negative Folgen zu ertragen. Beginn und Ende des für die Einwirkung von Erschütterungen kritischen Zeitraums sind insbesondere von der verwendeten Zementart und Festigkeitsklasse, dem w/z-Wert, der Frischbetonkonsistenz und der Betontemperatur beim Betonieren und während der Erhärtung abhängig.

3.2 Baupraktische Untersuchungen

Die im folgenden wiedergegebenen baupraktischen Untersuchungen berücksichtigen zum einen verkehrsbedingte Erschütterungen, zum anderen solche, die durch Rammarbeiten und Flakschießen verursacht wurden.

Tussing und Pahde [8] untersuchten den Beton für die Brückenplatte einer Stahlbrücke. Während und nach den Betonierarbeiten übertrugen sich die durch den auf der Gegenfahrbahn rollenden, mit 20 000 Kraftfahrzeugen pro Tag recht starken Verkehr verursachten Erschütterungen über die Querträger auf den Beton. Erschütterungsmessungen wurden nicht durchgeführt.

Die Betonzusammensetzung ist Tafel 1, Zeile 2, Angaben zur Erschütterung, Lagerung und Druckfestigkeit des Betons sind Tafel 2 zu entnehmen. Es wurden Betonwürfel 20 cm x 20 cm x 20 cm und 3 Betonplatten 100 cm x 200 cm x 19 cm betoniert und durch Rütteln verdichtet. Zwei Platten waren bewehrt, eine unbewehrt. Aus den Betonplatten wurden Bohrkern mit Durchmessern von 10 cm und 15 cm herausgebohrt, deren obere und untere Zone, bezogen auf ihre Lage in den Platten, getrennt auf Spalt- und Biegezugfestigkeit geprüft wurden, um möglicherweise vorhandene Entmischungerscheinungen festzustellen. Bei diesen Prüfungen wurden zwar gewisse Festigkeitsunterschiede zwischen oberer und unterer Plattenzone ermittelt, die nachfolgende Auswertung beschränkt sich jedoch auf die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung, weil Angaben über die Abmessungen und/oder die Lagerung der Prüfkörper für die Spalt- und Biegezugprüfung fehlen und weil diese Prüfungen erfahrungsgemäß wesentlich stärker von den in diesem Falle vorhandenen ungünstigen Lagerungsbedingungen beeinflusst werden können, als dies bei der Druckfestigkeitsprüfung der Fall ist.

Die Druckfestigkeit der im ungeheizten Brückenhäuschen erschütterungsfrei gelagerten Würfel war nach 7 Tagen etwa 10 % kleiner als diejenige der zunächst einen Tag auf der Brücke unter Erschütterung, dann 6 Tage im Labor bei 20 °C gelagerten Körper. Bei der Prüfung nach 29 Tagen war kein signifikanter Druckfestigkeitsunterschied zwischen den zunächst einen Tag auf der Brücke, danach im Labor und den von Anfang an ohne Erschütterungen gelagerten Prüfkörpern mehr festzustellen. Die 14 Tage auf der Brücke und danach im Labor gelagerten Probekörper wiesen dagegen zum gleichen Prüfzeitpunkt eine um gut 10 % niedrigere Druckfestigkeit auf

89 Tafel 1 Zusammensetzung und Eigenschaften der untersuchten Betone

Zeile Nr.	Schriftum	Zuschlag			Zement			Beton							
		Art	Größtkorn	Sieblinien. DIN 1045	Bezeichnung	Erstarren n. DIN 1164 Beginn h:min Ende h:min		Zementgehalt kg/m ³	Zusatzmittel Gew.-%	Wassermenge wert	Konsistenz Ausbreitmaß cm Verdichtungsmaß n. Walz		Trockenrohdichte kg/dm ³	Druckfestigkeit 7 Tage N/mm ² 28 Tage N/mm ²	
1	[1]	Kiessand	7	—	PZ—	—	—	150-550	—	0,5, 0,7, 1,0	—	—	—	—	4-40
2	[8]	Kiessand	—	~ A/B-	PZ375	—	—	350	0,3 F ²⁾	—	„steifplastisch“	—	—	45	63
3	[9]	Kiessand	30	~ A/B32	PZ375	2:35	3:35	350	0,2 F ²⁾	0,50	—	1,33	2,44	39	54
4	[10]	Kiessand	50	~ bis oberhalb C63	PZ—	—	—	400	—	0,49	—	—	—	—	41
5a	[11]	Kiessand	30	~ A/B32	PZ275	2:47	3:45	280	—	0,68	35,5-37	—	2,39	—	41
5b	[11]	Kiessand	30	~ C32	PZ275	2:47	3:45	240	—	0,83	35-36,5	1,01-1,16	2,26-2,31	20	24-31 ¹⁾
6	[12]	Kiessand	32	B/C32	PZ350F	—	—	244	—	0,83	38	1,11	—	—	28-33
7	[13]	Kiessand	32	~ A/B32	PZ—	—	—	—	—	0,50	„plastischsteif“	—	—	—	30 ³⁾
8	[14]	Kiessand	30	~ A/B32	PZ275	—	—	270	—	0,67	50	—	—	26	36

¹⁾ Bereich der Mittelwerte von 7 Mischungen ²⁾ Fließmittel, bezogen auf Zementgehalt ³⁾ Nennwert nach [15]

Tafel 2 Lagerung und Druckfestigkeit von Betonwürfeln 20 cm x 20 cm x 20 cm in [8]

Serie	Lagerung				Druckfestigkeit in N/mm ² Mittelwerte nach	
	Dauer	Ort	Klima	Erschütterung	7 Tagen	29 Tagen
1	7 Tage	unbeheiztes Brückenhaus an Baustelle	unbekannt (Außentemperatur siehe Serie 5)	nein	45	—
2	29 Tage				—	63
3	1 Tag	Fahrbahnplatte	Temperaturen beim Betonieren + 8°C nachts < 0°C	ja	49	—
	6 Tage	Labor	65 % rel. Feuchte/20°C	nein		
4	1 Tag	Fahrbahnplatte	wie Serie 3	ja	—	64
	28 Tage	Labor		nein		
5	14 Tage	Fahrbahnplatte	Temperaturen beim Betonieren + 8°C, bis 10. Tag zwischen + 19 und - 4°C, in den ersten drei Nächten < 0°C	ja	—	56
	15 Tage	Labor	65 % rel. Feuchte/20°C	nein		

als die nicht erschütterten und als die nur einen Tag auf der Brücke und danach im Labor gelagerten Körper. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die erschütterten Prüfkörper zwar je nach der Dauer der Lagerung auf der Brücke teilweise eine im Mittel um 10 % höhere, teilweise eine um im Mittel 10 % kleinere Druckfestigkeit aufwiesen als erschütterungsfrei gelagerte Vergleichskörper, daß dabei jedoch offensichtlich die vorhandenen sehr unterschiedlichen Lagerungsbedingungen einen größeren Einfluß ausgeübt haben als die Erschütterungen.

Back [9] untersuchte ebenfalls den Einfluß von Erschütterungen auf den frischen Beton der Brückenplatte einer Stahlbrücke (Tafel 3). Die Erschütterungen wurden hier durch einen zum Transport des Betons eingesetzten, auf einem Brückenlängsträger fahrenden Lorenzug hervorgerufen. Für die Untersuchungen wurden Betonwürfel (Beton siehe Tafel 1, Zeile 3) auf der Baustelle betoniert und durch Rütteln verdichtet. Ein Teil dieser Würfel wurde, wie aus Tafel 3 ersichtlich ist, unterschiedlich lange auf der Brücke unter Erschütterungseinfluß gelagert, danach in Serien von jeweils 3 Prüfkörpern von der Brücke genommen und bis zum Alter von 7 Tagen neben den von Anfang an erschütterungsfrei aufbewahrten Körpern

Tafel 3 Erschütterung, Rohdichte und Druckfestigkeit von Betonwürfeln 20 cm x 20 cm x 20 cm in [9]

Serie	Erschütterung						Rohdichte kg/ dm ³	Druckfestigkeit Mittelwerte in N/mm ²		Anteil in % bezogen auf Serie 1
	Fre- quenz Hz	Ampli- tude mm	Schwing- geschwin- digkeit ¹⁾ mm/s	Beginn	Ende	Dauer		7 Tage	28 Tage	
				nach Wasserzugabe h	h					
1				—	—	—	2,44	39	—	100
2				1,5	3,5	2	2,46	40	—	103
3				1,5	5,5	4	2,48	44	—	113
4	bis	0,011	3,1	1,5	7,5	6	2,47	40	—	103
5	bis	0,065	6,8	1,5	11,5	10	2,47	37	—	95
6				1,5	17,5	16	2,47	40	—	103
7				—	—	—	2,45	—	54	100
8				1,5	17,5	16	2,46	—	49	91

¹⁾ mit Gleichung (3) aus Abschnitt 2.1 errechnet

auf dem Brückenwiderlager gelagert. Die Lagerungstemperatur betrug zwischen + 14 und + 16 °C, weitere Angaben zu den Lagerungsbedingungen wurden nicht gemacht. Die Prüfkörper wurden nach 7 Tagen entformt und in feuchtem Sägemehl verpackt ins Labor transportiert. Die Serien 1 bis 6 nach Tafel 3 wurden unmittelbar danach auf Druckfestigkeit geprüft, während die Würfel der Serien 7 und 8 bis zur Prüfung nach 28 Tagen bei 65 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C lagerten.

Die Trockenrohichte der erschütterten Körper war stets größer als die der nichterschütterten Vergleichsproben; den höchsten Wert wies der bis 5,5 Stunden nach der Wasserzugabe erschütterte Beton auf. Bei der Druckfestigkeitsprüfung nach 7 Tagen wurden insgesamt nur geringe Unterschiede zwischen den erschütterten und den nichterschütterten Prüfkörpern festgestellt. Die höchste Druckfestigkeit wurde mit im Mittel 44 N/mm² an den bis 5,5 Stunden nach Wasserzugabe erschütterten Betonkörpern festgestellt, die auch die höchste Trockenrohichte aufwiesen. Sie war um 13 % größer als die des nicht beanspruchten Betons von 39 N/mm². Die mit im Mittel 37 N/mm² niedrigste Druckfestigkeit wurde an den bis 11,5 Stunden beanspruchten Körpern ermittelt. In den übrigen Fällen war die Druckfestigkeit des erschütterten Betons bei Prüfung nach 7 Tagen um 1 N/mm² größer. Bei den bis 17,5 Stunden unter Erschütterung gelagerten Körpern zeigte sich in Abhängigkeit vom Prüfzeitpunkt eine gegenläufige Tendenz: Bei der Prüfung nach 28 Tagen wurde eine gegenüber den Vergleichskörpern um 5 N/mm² kleinere Festigkeit festgestellt. Dieser Druckfestigkeitsunterschied liegt jedoch, ebenso wie alle übrigen, innerhalb der bei der Prüfung von 3 Betonwürfeln möglichen Prüfstreuung. Zusammenfassend läßt sich somit feststellen, daß der hier untersuchte Beton mit einer 28 Tage-Würfeldruckfestigkeit von rd. 50 N/mm² durch eine 1,5 Stunden nach der Wasserzugabe beim Mischen beginnende und längstens 16 Stunden dauernde Erschütterung mit Schwinggeschwindigkeiten zwischen 3 und 7 N/mm² nicht wesentlich in seiner Druckfestigkeit beeinflusst wurde. Aus der in Bild 3 aufgetragenen Gegenüberstellung der ermittelten Druckfestigkeiten und der zu-

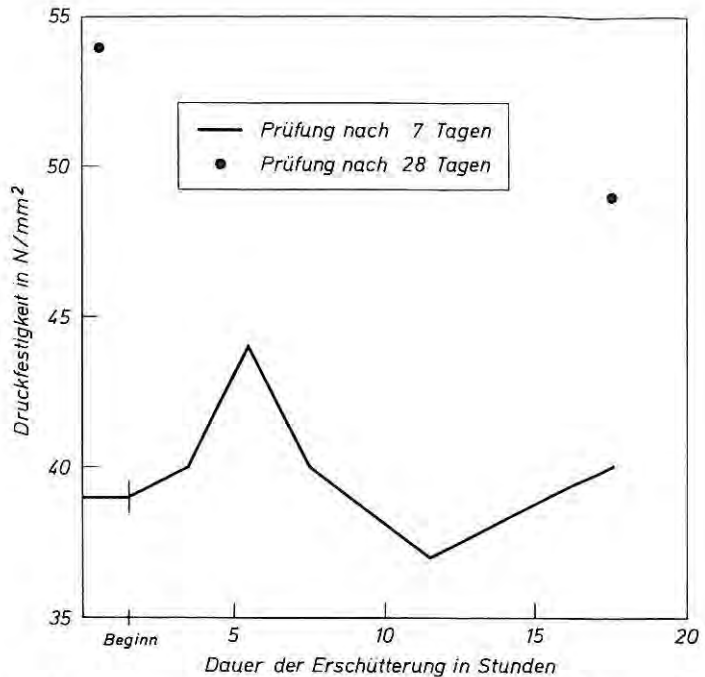


Bild 3 Druckfestigkeiten unterschiedlich lange erschütterter Prüfkörper nach [9]

gehörigen Erschütterungszeiten ergeben sich möglicherweise weitgehende Tendenzen. Hierauf wird in Abschnitt 4 bei der Gesamtauswertung der Untersuchungen näher eingegangen.

Die Folgen stoßartiger Erschütterungen von frischem und jungem Beton für die späteren Festbetoneigenschaften versuchte Diedrichs [10] zu ermitteln. Die Erschütterungen wurden dabei einmal durch Flakschießen, zum anderen durch Rammarbeiten in unmittelbarer Nähe der Betonierstelle hervorgerufen. Die leider nur sparsamen Angaben über den Beton sind in Tafel 1, Zeile 4, enthalten. Ein kleiner Teil der verwendeten Würfel wurde im Labor hergestellt und vor dem Labor im Freien gelagert. Der größte Teil der verwendeten Würfel aus angebegemäß stets gleichem Beton wurde auf der Baustelle betoniert und dort bis zur Prüfung aufbewahrt. Angaben über die Verdichtung des Betons und über die Lagerungsbedingungen liegen nicht vor, jedoch müssen erhebliche Unterschiede vorhanden gewesen sein, denn der im Labor hergestellte Beton wies bei erschütterungsfreier Lagerung eine im Mittel rd. 20 % höhere Festigkeit als der auf der Baustelle hergestellte und ebenfalls erschütterungsfrei gelagerte Beton auf.

Die Erschütterungen durch das Flakschießen traten innerhalb der ersten 24 Stunden nach dem Betonieren auf, und zwar frühestens nach 2 und spätestens nach 22 Stunden (siehe Tafel 4). Die Flakbatterie war 50 m von der Betonierstelle entfernt. Leider wurden Größe

Tafel 4 Herstellung, Zeitpunkt der Erschütterung durch Flakschießen und Druckfestigkeit von Betonwürfeln 20 cm x 20 cm x 20 cm in [10]

Serie	Herstellort	Zeitpunkt der Erschütterung nach Herstellung h	Druckfestigkeit	
			Mittelwert nach 28 Tagen N/mm ²	Anteil in % bezogen auf Serie 2
1	Labor	–	41 ¹⁾	121
2	Baustelle	–	34 ²⁾	100
3	Baustelle	6	19	56
4	Baustelle	7	23	68
5	Baustelle	2 und 7	24	71
6	Baustelle	3 und 8	22	65
7	Baustelle	3 und 14	28	82
8	Baustelle	14	29	85
9	Baustelle	22	21	62

1) Mittel aus 6 Herstellungen zu je 3 Würfeln

2) Mittel aus 3 Herstellungen zu je 3 Würfeln

und Dauer der Erschütterungen nicht gemessen, was die Bewertung der Ergebnisse beeinträchtigt.

Die 28 Tage-Würfeldruckfestigkeit des erschütterten Betons war in allen Fällen kleiner als diejenige des auf der Baustelle ohne Erschütterungseinfluß hergestellten und gelagerten Betons. Die auf die Mittelwerte bezogenen Festigkeitsunterschiede betragen höchstens 15 N/mm² entsprechend 44 % bei Erschütterungen nach 6 Stunden und wenigstens 5 N/mm² oder 15 % bei Erschütterungen 14 Stunden nach der Herstellung des Betons.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurde die ebenfalls nicht gemessene Erschütterung durch das Rammen von Holzpfählen für die Gründung eines Bunkers verursacht. Die Probekörper wurden ebenfalls auf der Baustelle hergestellt und dann in den ersten 24 Stunden ein- oder zweimal unterschiedlich lange erschüttert. Die Zeitpunkte und die Dauer der Erschütterungen sowie die Ergebnisse der zugehörigen Druckfestigkeitsprüfungen enthält Tafel 5.

Die 28 Tage-Druckfestigkeit der durch Rammen erschütterten Prüfkörper war wie im vorherigen Fall stets kleiner als die der erschütterungsfrei gelagerten Körper. Die Größe des Festigkeitsunterschiedes war dabei je nach Zeitpunkt und Zeitdauer der Erschütterung sehr verschieden; Dauerte die Erschütterung bis zu 3 Stunden nach der Herstellung an, so war die Druckfestigkeit im Mittel um höchstens 6 N/mm² oder rd. 20 % kleiner. Trat sie erst rd. 20 Stunden nach der Herstellung auf, betrug der Unterschied nur noch weniger als 10 %. Die mit 14 N/mm² größte Druckfestigkeitsdifferenz wiesen diejenigen Prüfkörper auf, die nach der Herstellung 9 bzw. 10 Stunden erschüttert wurden. Diese Differenz entsprach rd. 40 % der mittleren Druckfestigkeit der nichterschütterten Körper.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Beton, der in den ersten 24 Stunden Erschütterungen unbekannter, jedoch vermutlich recht großer Stärke durch Flakschießen oder Rammarbeiten

Tafel 5 Zeitpunkt und Dauer der Erschütterung durch Rammarbeiten und Druckfestigkeit von Betonwürfeln 20 cm x 20 cm x 20 cm in [10]

Serie	Erschütterung			Druckfestigkeit	
	Beginn nach Herstellung h	Ende nach Herstellung h	Dauer h	Mittelwert nach 28 Tagen N/mm ²	Anteil in % bezogen auf Serie 1
1	–	–	–	34	100
2	0	2	2	29	85
3	0	3	3	28	82
4	0	2	2	29	85
5	17	24	7	26	76
	0	5	5		
6	17	24	7	20	59
	0	9	9		
7	22	24	2	20	59
	0	10	10		
8	22	24	2	31	91
	18	24	6		
9	21	24	3	32	94

ausgesetzt wurde, nach 28 Tagen eine zwischen rd. 15 % und rd. 40 % kleinere Druckfestigkeit aufwies, wobei größere Prüfstreuungen wegen der nicht definierten Lagerungsbedingungen nicht ausgeschlossen werden können. Das Maß des Festigkeitsunterschiedes war dabei offensichtlich vom Zeitpunkt bzw. der Dauer der Erschütterungseinwirkung abhängig. Hierauf wird in Abschnitt 4 näher eingegangen.

3.3 Laboruntersuchungen

Steinert [11] untersuchte, wie sich sinusförmige Schwingungen, denen der frische und junge Beton ausgesetzt wird, auf die Festigkeit des erhärteten Betons und auf den Verbund zwischen Bewehrungsstahl und Beton biegebeanspruchter Balken auswirken. Angaben über die Prüfkörper, die Erschütterungen sowie die Betonfestigkeiten nach den Erschütterungen sind in Tafel 6 zusammengefaßt, die Zusammensetzung des untersuchten Betons ist, soweit sie [11] entnommen werden konnte, in Tafel 1 angegeben.

Die Versuche wurden in zwei Serien durchgeführt. Der Schalungsboden für den untersuchten frischen Beton bestand bei einem Teil der Versuche aus zweiseitig auf Stahlrollen gelenkig gelagerten Stahlträgern (Balken A, B, C und D der Versuchsserie 1), bei allen übrigen Balken der Serien 1 und 2 aus ebenso gelagerten erhärteten Stahlbetonbalken (Unterbeton). In der ersten Versuchsserie (siehe Tafel 6) waren die seitlichen Schalungswangen vom Schalträger (Schalungsboden) unabhängig freistehend errichtet, in der zweiten Serie waren die durch senkrechte Schlitze biegeweichen seitlichen Schalungsplatten am Unterbetonbalken befestigt. Das Gesamtsystem aus dem oberen Stahlbetonbalken und aus dem darunterlie-

Tafel 6 Prüfkörper, Erschütterung und Druckfestigkeiten nach [11]

Versuchs- serie	Bezeich- nung der Balken	Beton nach Tafel 1	Prüfbalken			Erschütterung					Druckfestigkeit in N/mm ²						
			Art und Bewehrung	Abmessungen in cm			Frequenz	Amplitude	Effektive Schwing- geschwin- digkeit ¹⁾	Dauer nach Herstel- lung	Errech- nete Rand- dehnung	Prüf- körper	Alter Tage	Einzel- werte		Mittel über Balken- länge ³⁾	
				Län- ge	Brei- te	Höhe	Hz	mm	mm/s	h	%			min.	max.		
1	A B C D	–	Frischbetonbalken (Oberbeton) auf Stahlträger U200 Stützweite	350	20	20	10, 12, 5 20 ²⁾	0,25 und 0,36 ²⁾	12 bis 23 ²⁾	6 bis 50 ²⁾	–	Würfel 20 cm x 20 cm x 20 cm	siehe Bild 5				
	E	–	Frischbetonbalken (Oberbeton) auf Stahlbetonbalken (Unterbeton) Stützweite Bewehrung der Oberbetonbalken A–E wie Serie 2 Bügelabstand a = 48 cm	350	20	10						350					20
2	1	5a	Frischbetonbalken (Oberbeton) auf Stahlbetonbalken (Unterbeton) Stützweite	350	20	10	– –	– –	– –	–	–	–	28	–	–	41 ⁵⁾	
		300	350	20	10	9,2...15,6 ⁴⁾	0,27...0,53 ⁴⁾	37... 98 ⁴⁾	32,0	0,10	30	49	54	52			
	2 3 4 5 6 7 8	5b	Bewehrung der Oberbetonbalken Längsstäbe BST III Ø 12 mm in den Ecken, Überdeckung 3 cm Bügel: BSt IIIb Ø 8 mm a = 14,4 und 28,8 cm	300			– –	– –	– –	–	–	–	Prismen 20 cm x 10 cm x 10 cm Druck- fläche 10 cm x 10 cm	28	–	–	24...31 ⁵⁾
		8,6...15,8	0,19...0,59	25... 56	46,0	0,11	30	16	24	21							
		–	–	–	17,0	–	–	–	–	–							
		8,4...12,3	0,40...0,64	49... 78	27,5	0,12	28	17	20	18							
		≈ 5,7	0,59...1,83	42...138	23,7	0,34	34	27	35	31							
		8,8...12,2	0,28...0,93	63...148	24,0	0,17	34	26	35	32							
8,6...12,2	0,29...0,56	31... 83	26,3	0,10	41	26	31	28									
8,6...11,6	0,28...0,51	40... 77	25,3	0,10	41	17	21	19									

1) Errechnet aus Messungen der Schwingbeschleunigung

2) Keine Zuordnung zu einzelnen Balken möglich

3) Aus graphischer Darstellung entnommen

4) Versuchsserie 2: mit fortschreitender Erhärtung veränderliche Resonanzschwingung

5) Bereich der Mittelwerte der Güteprüfungen an Würfeln 20 cm x 20 cm x 20 cm

genden Stahlträger bzw. Stahlbetonbalken wurde in der ersten Versuchsserie durch eine servohydraulische Prüfmaschine, die in Balkenmitte auf den Stahlträger bzw. den unteren Stahlbetonbalken einwirkte, erregt. In der zweiten Versuchsserie bewirkte dies eine an gleicher Stelle direkt angekoppelte Unwuchtmaschine. Die Biegelinien wurden während der Versuche gemessen. Die Schwingungsamplituden der Balken und die Schwinggeschwindigkeiten nahmen entsprechend der Biegelinie des Systems von den Auflagern zur Balkenmitte hin zu. Der Veröffentlichung waren nur die in Tafel 6 angegebenen Maximalwerte in Balkenmitte zu entnehmen.

Die Veröffentlichung enthält keine Angaben über den bei Versuchsserie 1 verwendeten Beton. Aufgrund der mitgeteilten Druckfestigkeiten der erschütterten Balken (siehe Bild 4) ist es möglich, daß dabei mindestens 2 Betone unterschiedlicher Festigkeit verwendet wurden. Die Balken waren schwach bewehrt (siehe Tafel 6). Die Erschütterungen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen dauerten zwischen 6 und 50 Stunden ab Betonierende, genauere Angaben, die eine Zuordnung zu einzelnen Balken ermöglichen, wurden nicht gemacht.

Aus den Balken wurden zur Prüfung der Druckfestigkeit Würfel 20 cm x 20 cm x 20 cm, aus Balken E Prismen 20 cm x 10 cm x 20 cm (Prüffläche 20 cm x 20 cm) und zur Prüfung der Biegezugfestigkeit Platten 20 cm x 20 cm x 3 cm in unterschiedlichem Abstand von der Balkenmitte einschließlich der Bewehrung herausgesägt. Angaben zur Lagerung der Prüfkörper bis zur Prüfung wurden nicht gemacht.

Wie aus Bild 4 zu entnehmen ist, war die Druckfestigkeit der aus der Mitte der mit errechneten Schwinggeschwindigkeiten zwischen 12 und 23 mm/s erschütterten Balken herausgesägten Betonkörper bei Balken C um rd. 10 bis 20 % größer als im Auflagerbereich. Diese Druckfestigkeitsunterschiede liegen zwar innerhalb des bei Betonprüfungen üblichen Streubereichs, der Verlauf des Druckfestigkeitsanstiegs von den Auflagern zur Balkenmitte hin war aber bei 4

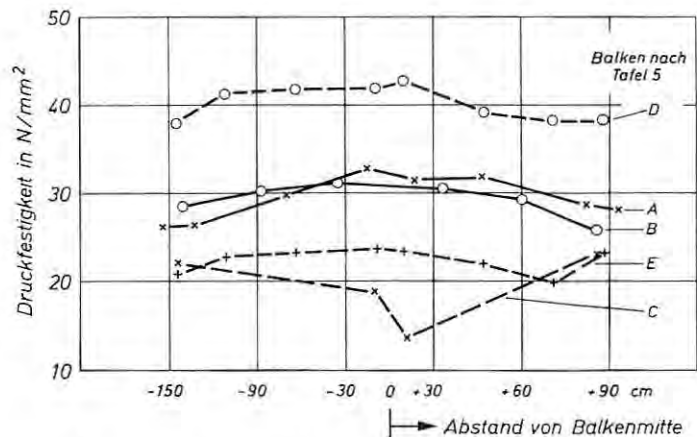


Bild 4 Druckfestigkeit erschütterter Betonbalken der 1. Versuchsserie in [11]

Balken der Versuchsserie 1 festzustellen und entsprach etwa der Biegelinie des Systems und damit der sich ändernden Erschütterungsstärke. Die in der Mitte des Balkens C festgestellte wesentlich geringere Festigkeit wurde in [11] mit einer – aus den Angaben über die Erschütterungsbeanspruchungen allerdings nicht ersichtlichen – zeitweiligen Überbeanspruchung erklärt, die zu sichtbaren Störungen des Betongefüges führte.

Die Biegezugfestigkeiten entsprachen nach Angabe des Autors, abgesehen von Balken B, bei dem unerklärliche Verringerungen der Biegezugfestigkeiten auftraten, in ihrem Verlauf und hinsichtlich der Festigkeitsunterschiede bis zu rd. 23 % zwischen Auflager und Balkenmitte den Druckfestigkeitsergebnissen. Erstaunlich und aus den vorhandenen Angaben nicht erklärbar ist dabei allerdings, daß auch der zum Zeitpunkt der Erschütterung bereits erhärtete Unterbeton des Balkens E einen kontinuierlichen Anstieg der Biegezugfestigkeit von den Auflagern bis zur Mitte hin wie der Unterbeton aufwies. Ein festigkeitssteigernder Einfluß der Erschütterungen dürfte hier jedoch ausgeschlossen sein, eher ist auf herstellbedingte Unterschiede zu schließen.

Wegen der geringen Zahl der untersuchten Balken und wegen der nicht bekanntesten Lagerungs- und Prüfbedingungen lassen sich aus den Versuchen allein keine allgemeinen Schlüsse ziehen. Inwieweit die festgestellten Druckfestigkeitsunterschiede allein eine Folge der Erschütterungen sind, ist auch deswegen nur schlecht beurteilbar, weil die zugrunde liegende Annahme, daß der Beton im Auflagerbereich bei dem gewählten System nicht durch Schwingungen oder Erschütterungen beansprucht wird, nur unter bestimmten idealisierten Voraussetzungen gilt. Im frischen Zustand des Betons sind erschütterungsbedingte Bewegungen und beim jungen Zustand erschütterungsbedingte Beanspruchungen auch im Auflagerbereich nicht auszuschließen.

In der Versuchsserie 2 (siehe Tafel 6) wurden 8 weitere, gegenüber der ersten Versuchsserie stärker bewehrte Betonbalken untersucht. Balken 1 wurde aus einem weniger gut zusammengesetzten Konstruktionsbeton ($w/z = 0,68$) hergestellt (Beton 5 a nach Tafel 1), während der Beton für die übrigen Balken bewußt einen noch größeren Wasserzementwert von 0,83 und einen sehr niedrigen Zementgehalt von nur 240 kg/m^3 aufwies, um eine möglichst hohe Schadenswahrscheinlichkeit zu erreichen (Beton 5 b nach Tafel 1). Nach Angabe des Autors blutete insbesondere dieser erfahrungsgemäß stark zur Entmischung neigende Beton während der Erschütterung erheblich, so daß über dem Balkenquerschnitt unterschiedliche und an der Balkenoberfläche besonders ungünstige Betoneigenschaften vermutet werden können. Die für die 7 Balken im Rahmen der Güteprüfung ermittelte Druckfestigkeit war mit Werten zwischen rd. 24 und 31 N/mm^2 sehr unterschiedlich (siehe Tafeln 1 und 6).

In dieser 2. Versuchsserie wurden die aus Unter- und Oberbeton bestehenden Stahlbetonbalken (siehe Tafel 6) in Resonanz zu harmonischen Schwingungen angeregt, deren Frequenz und Amplitude und damit die Schwinggeschwindigkeit sich mit zunehmender Erhärtung änderten. Für die Festigkeitsprüfung wurde aus den Oberseiten der Balken nach 3 Wochen Lagerung bei 65 % rel. Feuchte

und 20 °C Prüfkörper nach Bild 5 herausgesägt. Im folgenden wird nur auf die in der Veröffentlichung angegebenen Ergebnisse der in Anlehnung an DIN 1048 durchgeführten Druckfestigkeitsversuche näher eingegangen, weil die Prüfkörper für die Spaltzugprüfungen an gesägten, nur 2,4 cm dicken Prüfkörpern bei einem Größtkorn des Zuschlags von 30 mm problematisch sind und weil Angaben über die für die letztgenannten Prüfungen gewählten Prüfverfahren fehlen.

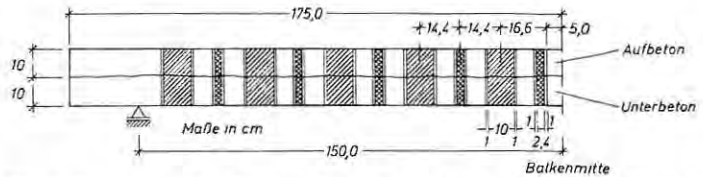


Bild 5 Prüfkörper für die Druckfestigkeitsprüfung (Prismen 20 cm x 10 cm x 10 cm, Druckfläche 10 cm x 10 cm) und die Biegezugfestigkeitsprüfung (Platten 20 cm x 10 cm x 2,4 cm) des Aufbetons der 2. Versuchsserie in [11]

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an den nach Bild 5 herausgesägten Prüfkörpern sind in Bild 6 aufgetragen. Die Druckfestigkeit streute bei beiden Betonen im Unterschied zur ersten Versuchsserie unsystematisch über die Balkenlänge. Die Druckfestigkeit von Balken 1, der aus dem Beton mit $w/z = 0,68$ hergestellt wurde und 32 Stunden mit einer bis auf rd. 100 mm/s ansteigernden Geschwindigkeit der Resonanzschwingung erschüttert wurde, lag zwischen rd. 49 und 54 N/mm², im Mittel bei etwa 52 N/mm². Bei den übrigen Balken (Balken 2 bis 8 aus dem noch ungünstiger zusammengesetzten Beton) war die Druckfestigkeit, wie Bild 6 zeigt, zum Teil relativ gleichmäßig (Balken 2, 4, 7 und 8) und zum Teil sehr un-

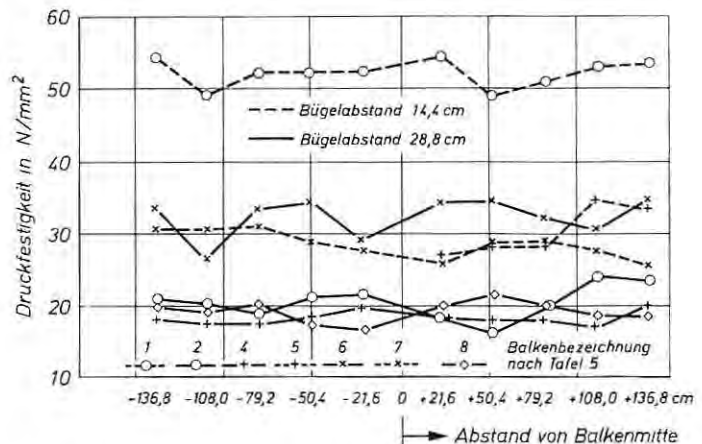


Bild 6 Druckfestigkeit erschütterter Betonbalken der 2. Versuchsserie in [11]

gleichmäßig, wie bei Balken 6, der mit einer Schwinggeschwindigkeit bis zu rd. 150 mm/s am stärksten beansprucht worden war. Bei dem mit konstanter Frequenz von 5,7 Hz, der mit Abstand größten Amplitude (bis zu rd. 1,85 mm) und einer Schwinggeschwindigkeit bis zu rd. 140 mm/s beanspruchten Balken 5 sollen in der einen Balkenhälfte deutlich sichtbare Gefügestörungen im Beton und Störungen des Verbundes zwischen Beton und Bewehrung aufgetreten sein, die der Autor auf die in diesem Falle mit $\epsilon = 0,34\%$ aus dem gemessenen Biegelinienverlauf errechnete größte Randdehnung des oberen Stahlbetonbalkens zurückführte. Für die übrigen Balken wurden Randdehnungen von $\epsilon = 0,10$ bis $0,17\%$ errechnet. Überraschend ist dabei, daß die andere Hälfte von Balken 5 mit Werten zwischen 27 und 35 N/mm² eine recht hohe Druckfestigkeit aufwies. Da nichterschütterte Vergleichsbalken fehlten, wurden die Festigkeiten der erschütterten Prüfkörper mit den im Rahmen der Güteprüfung an Betonwürfeln gewonnenen Festigkeiten verglichen. Dabei waren die Druckfestigkeiten des erschütterten Betons beim Balken 1 rd. 10 N/mm² größer, bei den Balken 2 bis 8 gleich oder kleiner als die Druckfestigkeit des nichterschütterten Betons. Dieser Vergleich ist jedoch mit Vorbehalt zu betrachten, weil die Güteprüfungsergebnisse der Balken 2 bis 8 erheblich streuten und weil Herstellung, Lagerung und Prüfung bei den Güteprüfkörpern und bei den Prüfkörpern aus den erschütterten Stahlbetonbalken ebenso wie eine ggf. vorhandene Bewehrung sich auf die Prüfergebnisse sehr unterschiedlich ausgewirkt haben können. Aus den Ergebnissen der Versuchsserie 2 ist somit nur abzulesen, daß die Druckfestigkeit selbst eines sehr ungünstig zusammengesetzten Betons in einem bewehrten, biegebeanspruchten Betonbalken durch die dynamischen Beanspruchungen mit Schwinggeschwindigkeiten bis zu rd. 150 mm/s teilweise beeinträchtigt und teilweise nicht beeinträchtigt worden ist. Eine weitergehende Zuordnung etwa der Druckfestigkeitswerte zu bestimmten Erschütterungsstärken war nicht möglich. Der allerdings nur eine Versuch mit besserem Beton (Balken 1 in Tafel 6) läßt erwarten, daß die Eigenschaften von Stahlbetonbalken aus Beton mit höherem Zementgehalt und niedrigerem Wasserzementwert durch eine Erschütterung des frischen oder jungen Betons mit Schwinggeschwindigkeiten bis zu 100 mm/s nicht beeinträchtigt werden.

In Fortführung der Versuche von [11] gingen Paulmann und Steinert [12] der Frage nach, welchen Einfluß Erschütterungen des frischen und jungen Betons auf den Beton selbst und auf den Verbund zwischen Beton und Bewehrung haben. Einzelheiten über die an unbewehrten und bewehrten Frischbetonbalken durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse sind Tafel 7 zu entnehmen. Der verwendete Beton (Beton 6 nach Tafel 1) hatte erneut einen sehr hohen Wasserzementwert von 0,83. Als Schalungsboden dienten in diesem Falle Stahlrohre mit quadratischem Querschnitt, an denen die in Abständen von 20 cm geschlitzten und dadurch biegeweichen Schalungswangen befestigt waren. Die Schwingungsanregung erfolgte wiederum durch einen in Balkenmitte am Schalungsboden angreifenden serwohydraulischen Prüfzylinder, die Stahlrohre waren an beiden Seiten auf Rollen gelenkig aufgelagert. Der Beton wurde in die schwingenden Schalungen eingefüllt und mit einem Innenrüttler verdichtet. Wie in [11] trat auch hier ein starkes Bluten

Tafel 7 Prüfbalken, Erschütterung sowie bezogene Druck- und Biegezugfestigkeit der Prüfkörper in [12]

Bezeichnung der Balken	Prüfbalken				Erschütterung					Bezogene ²⁾ Druckfestigkeit		Bezogene ³⁾ Biegezugfestigkeit	
	Art	Abmessungen in cm			Frequenz Hz	Amplitude mm	Effektive ¹⁾ Schwinggeschwindigkeit mm/s	Dauer nach Herstellung h	Errechnete ²⁾ Randdehnung ‰	Mittel über Balkenlänge	Standardabweichung	Mittel über Balkenlänge	Standardabweichung
		Länge	Breite	Höhe									
1	Unbewehrte Frischbetonbalken auf Stahlrohr	350	20	20	8	3,2/1,6	114/56,9	11/13	0,19	0,61	0,11	0,68	0,08
2					8	0,8	28,4	24	0,13	0,96	0,06	0,88	0,04
3					8	0,4	14,2	16,5	0,09	0,73	0,05	0,70	0,05
4					16	1,0	71,1	24	0,11	0,99	0,23	0,71	0,09
5	Stützweite	320			0,3	1,0	1,3	24	0,09	0,85	0,06	0,84	0,06
6					8	0,4	14,2	24	0,07	0,82	0,10	0,74	0,13
7	Frischbetonbalken auf Stahlrohr Stützweite Bewehrung: Längsstäbe: 4 x BSt 420/500 Rk in den Ecken Bügel: BSt 420/500 Rk Ø 8 mm Abstand a = 30 cm	340	15	20	8	2,5	88,9	8	0,34			keine Angaben	
8		350	20	20									

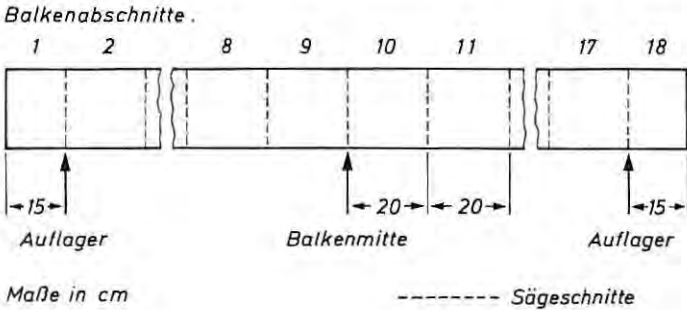
1) Werte errechnet aus Messung der Schwingbeschleunigung

2) Scheitelwert beim Auftreten des auflagnächsten Risses, errechnet aus gemessener Biegelinie

3) Festigkeiten bezogen auf die unbeanspruchter Vergleichskörper. Prüfkörperabmessung siehe Bild 6. Werte aus grafischer Darstellung entnommen. Prüfalter 28 Tage

des Betons ein, das auf Entmischungerscheinungen schließen läßt. Die Schwingbeanspruchung (siehe Tafel 7) dauerte je nach Balken 8 bis 24 Stunden unmittelbar nach der Herstellung. Nichterschütterte Vergleichsbalken wurden nicht untersucht. Nach der Erschütterung wurden die Balken zusammen mit nichterschütterten 20 cm-Würfeln 3 Tage unter feuchten Tüchern, danach bis zur Prüfung bei 65 % rel. Luftfeuchte und 20 °C gelagert. Drei Wochen nach der Herstellung wurden sowohl aus den Balken als auch aus den Vergleichswürfeln Prüfkörper für die nach 28 Tagen durchgeführten Festigkeitsprüfungen (nach Bild 7) naß herausgesägt und bis zur Prüfung weiter in dem gleichen Klima gelagert.

Während der Schwingbeanspruchung traten zwischen etwa 4 und höchstens 10 Stunden nach der Herstellung in einem unterschiedlich breiten Bereich in der Mitte der Stützweite aller Balken nicht näher beschriebene, teilweise von oben nach unten durchgehende Querrisse auf, die zunächst in der Stützweitenmitte und zumeist an den in den seitlichen Schalungswangen vorhandenen Schlitzen auftraten. Der Abstand des zuletzt auftretenden auflager nächsten



Prüfkörper aus Balkenabschnitten und aus Vergleichswürfeln

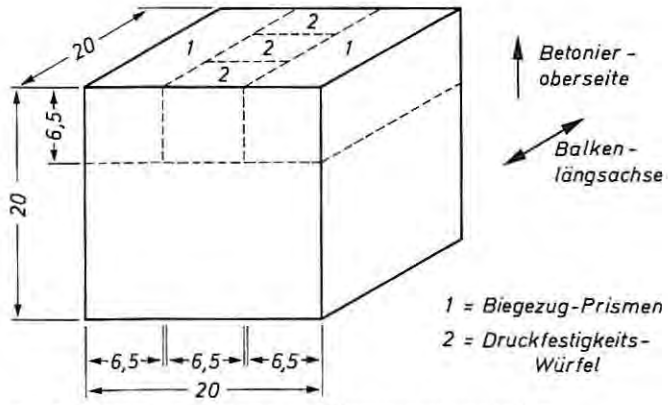


Bild 7 Prüfkörper für die Druck- und Biegezugprüfung in [12]

Risse von der Balkenmitte soll der jeweiligen Schwingungsamplitude annähernd proportional gewesen sein. Dies würde darauf hindeuten, daß die Risse durch die Durchbiegung des Systems verursacht worden sind. Die maximalen Betonranddehnungen beim Auftreten der auflagnächsten Risse wurden aus den mit Schwingbeschleunigungsaufnehmern gemessenen Biegelinien des Gesamtsystems errechnet. Dabei ergab sich eine Dehnung zwischen 0,07 und 0,19‰ für die unbewehrten und von 0,34‰ für den bewehrten Balken 7.

Die Ergebnisse der Druck- und Biegezugprüfung an den aus den erschütterten Balken gesägten Prüfkörpern sind in [12] nur bezogen auf die Festigkeit der aus nichterschütterten Würfeln stammenden Vergleichsprüfkörper graphisch dargestellt, absolute Festigkeitswerte fehlen leider. Die Festigkeit der aus den Balken stammenden Prüfkörper war danach bei dem ungünstigen Beton, abgesehen von einer Ausnahme, in unterschiedlichem Maße kleiner als die der nichterschütterten Körper.

Eine nach Balken getrennte Auswertung (siehe Tafel 7) zeigt, daß der mit der höchsten Schwinggeschwindigkeit (bis zu rd. 115 mm/s) beanspruchte Beton des Balkens 1 eine um rd. 40 % geringere mittlere Druckfestigkeit besaß. Beim Balken 4, dessen Erschütterung ebenfalls eine mit 70 mm/s relativ hohe Schwinggeschwindigkeit, jedoch eine wesentlich kleinere Amplitude bei doppelter Schwingungsfrequenz von 16 Hz aufwies, trat keine Änderung der mittleren Druckfestigkeit, jedoch mit Abstand die größte Streuung der Einzelwerte über die Balkenlängsachse auf. Die mittlere Druckfestigkeit der übrigen unbewehrten Balken, die mit Schwinggeschwindigkeiten von rd. 1, rd. 14 oder 28 mm/s beansprucht wurden, waren zwischen rd. 5 % und rd. 25 % kleiner als beim nichterschütterten Beton. Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Stärke und der Dauer der Beanspruchung und den verminderten Druckfestigkeiten war jedoch nicht zu erkennen. Die Biegezugfestigkeiten der erschütterten Prüfkörper waren bei allen Balken um rd. 10 bis 30 % kleiner als die der Vergleichskörper aus nichterschütterten Würfeln, wobei die Festigkeitsbeeinträchtigung mit Ausnahme des Balkens 1 in der Regel etwas größer war als bei den zugehörigen Druckfestigkeiten. Dies könnte damit zu erklären sein, daß die Biegezugfestigkeit im allgemeinen durch störende Einflüsse und Gefügeveränderungen stärker beeinträchtigt wird als die Druckfestigkeit.

Eine systematische Verteilung der Festigkeitseinzelwerte über die Balkenlängsachse war nur bei Balken 6 festzustellen, der mit einer Schwinggeschwindigkeit von 14,2 mm/s relativ wenig beansprucht wurde. Hier war die bezogene Druck- und Biegezugfestigkeit in den Viertelpunkten der Balkenlänge größer als im Auflagerbereich und in dem durch die vorstehend geschilderten Risse gekennzeichneten Bereich um die Balkenmitte. In diesem Fall kann ein Zusammenhang mit den bei Messungen festgestellten, von der idealisierten Linie abweichenden stärkeren Krümmung der Biegelinie in Balkenmitte vermutet werden. Da in den übrigen Fällen jedoch die Festigkeit über die Balkenlänge im Rahmen der üblichen Streuung gleichmäßig verteilt war, können aus der systematischen Verteilung der Festigkeiten bei Balken 6 keine weiteren Schlüsse gezogen werden.

Inwieweit die in dieser Untersuchung an unbewehrtem, sehr ungünstig zusammengesetztem Beton festgestellten Unterschiede von bis zu 40 % zwischen den Festigkeiten von Prüfkörpern aus Balken, die innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Betonherstellung durch Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten zwischen rd. 1 und rd. 115 mm/s beansprucht wurden, und nichterschütterten Körpern aus Vergleichswürfeln tatsächlich auf Erschütterungseinwirkungen beruhen, kann wiederum nicht mit Sicherheit gesagt werden. Im vorliegenden Fall waren zwar die Prüfkörperabmessungen und die Art ihrer Herstellung durch Sägen aus größeren Betonkörpern sowie die Lagerung der Balken und der nichterschütterten Vergleichskörper gleich, es können sich jedoch erfahrungsgemäß allein aufgrund der bei Balken und Würfeln unterschiedlichen Abmessungen und Herstellverfahren unterschiedliche Dichten und Festigkeiten ergeben. Ebenfalls zweifelhaft ist, ob die in der Veröffentlichung angegebenen Betonranddehnungen, die aus der Biegelinie zum Zeitpunkt der Rißbildung errechnet wurden, tatsächlich das Verhalten des Betons und der Balken charakterisieren. Der niedrigste errechnete Wert von $\varepsilon = 0,07\%$ stimmt zwar mit dem Ergebnis statischer Biegeversuche an Betonplatten von Wierig [14] etwa überein, insgesamt dürften die ermittelten Werte jedoch systemabhängig sein. So konnten z. B. die Schlitze in den Schalungswangen wegen der an diesen Stellen konzentrierten Verformung der Schalung, die sich über Reibung als Dehnung auf den Beton übertrug, die Rißbildung an diesen Stellen begünstigen, während die danebenliegenden Bereiche mit Sicherheit deutlich weniger beansprucht wurden. Bei der Ermittlung der Randdehnung aus der Biegelinie wird dagegen lediglich die für eine bestimmte Meßlänge mittlere Dehnung erfaßt. Die Ergebnisse machen allerdings den günstigen Einfluß der Bewehrung deutlich.

Desserich [13] untersuchte den Einfluß der Stärke und des Zeitpunktes von Erschütterungseinwirkungen auf die Druckfestigkeit des Betons. Aus dem in Tafel 1, Zeile 7, aufgeführten Beton ($w/z = 0,50$) wurden Würfel $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ betoniert, von denen jeweils drei 1, 2, 3, 5, 10 oder 24 Stunden nach dem Mischen für 30 Minuten sinusförmigen Schwingungen ausgesetzt wurden, die durch eine servohydraulische Prüfmaschine erzeugt wurden. Die Erschütterungsfrequenz betrug bei allen Versuchen 15 Hz, in drei Versuchsreihen wurden Amplituden von 0,047, 0,115 oder 0,228 mm erzeugt. Die zugehörigen Schwinggeschwindigkeiten ergaben sich zu 4,4, 10,8 und 21,5 mm/s. Nähere Angaben zu den nach Angabe des Autors für alle Prüfkörper vergleichbaren Herstell-, Lagerungs-, Nachbehandlungs- und Prüfbedingungen sowie der Versuchsanordnung selbst sind der Veröffentlichung nicht zu entnehmen. Darin sind nur die ermittelten Druckfestigkeitsunterschiede zwischen den erschütterten und nichterschütterten Betonwürfeln angegeben. Sie sind in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Erschütterungsbeginns in Bild 8 aufgetragen. Die größte gemessene Druckfestigkeitszunahme ergab sich bei einem Erschütterungsbeginn rd. 2 Stunden nach dem Mischen bei einer Schwinggeschwindigkeit von rd. 22 mm/s. Sie betrug 4 N/mm^2 oder rd. 11 %. Mit späterem Erschütterungsbeginn nahm die Festigkeit zunächst ab. Die ab der fünften Stunde erschütterten Prüfkörper wiesen eine um weniger als 1 N/mm^2 kleinere Druckfestigkeit als die nichterschütterten Proben

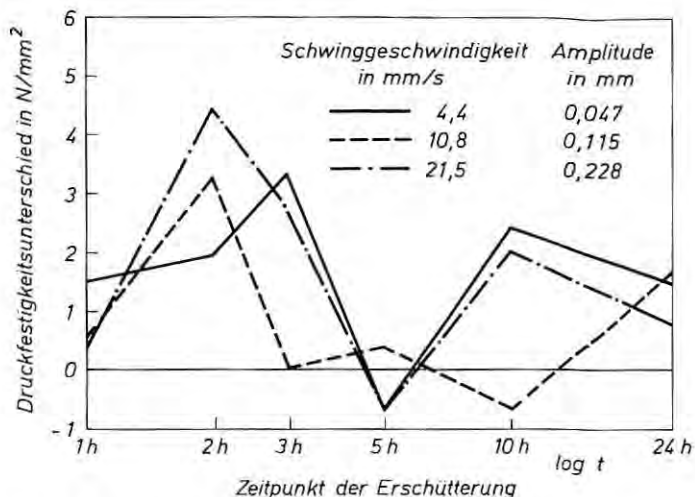


Bild 8 Druckfestigkeitsunterschied zwischen erschütterten und nichterschütterten Betonprüfkörpern in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Erschütterung nach der Herstellung in [13]

auf, während bei einem Erschütterungsbeginn nach 10 Stunden bei Schwinggeschwindigkeiten von rd. 4 und rd. 22 mm/s eine um etwa 2 N/mm² höhere, bei einer Schwinggeschwindigkeit von 11 mm/s dagegen eine um weniger als 1 N/mm² kleinere Druckfestigkeit festgestellt wurde. Bei einem Erschütterungsbeginn im Alter von 24 Stunden wiesen die erschütterten Prüfkörper eine um rd. 1 bis 2 N/mm² größere Druckfestigkeit auf als die nichterschütterten.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß im vorliegenden Fall ein Beton üblicher Zusammensetzung nach der Einwirkung sinusförmiger Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten zwischen 4 und rd. 20 mm/s teilweise eine etwas höhere, teilweise eine geringfügig niedrigere Druckfestigkeit aufwies als nichterschütterte Vergleichskörper. Die meisten Druckfestigkeitsunterschiede lagen innerhalb üblicher Prüfstreuungen. Sie geben jedoch trotzdem und trotz der unzureichenden Angaben über die Versuchsdurchführung Hinweise auf den Zeitraum, in dem Eigenschaften des erhärteten Betons durch Erschütterung des frischen und jungen Betons beeinflußt werden können (siehe Abschnitt 4).

4. Auswertung

4.1 Allgemeines

Die zugrunde liegenden Untersuchungen über den Einfluß von Erschütterungen auf frischen und auf jungen Beton, die der Literatur entnommen wurden, unterscheiden sich in ihrer Zielsetzung und in Umfang, Durchführung und Auswertung der Versuche. Es wurden zum einen Versuche auf Baustellen zur Beurteilung der in konkreten Einzelfällen zu erwartenden Erschütterungseinwirkungen, zum an-

deren Laboruntersuchungen mit mehr oder weniger systematischer Änderung zahlreicher Einflußgrößen durchgeführt. Die folgende Auswertung wurde zusätzlich dadurch erschwert, daß in einigen Untersuchungsberichten nur sehr unzureichende Angaben über die verwendeten Betone, die Erschütterungen und die angewendeten Prüfverfahren enthalten sind und daß nicht alle gewählten Vergleiche und beschriebenen Maßnahmen sowie einbezogenen Betone als sinnvoll im Sinne des Untersuchungszieles anzusehen sind. Aus den einzelnen Untersuchungen lassen sich deshalb allgemeingültige Aussagen über die Folgen von Erschütterungen auf frischen und/oder jungen Beton nicht ableiten, aus allen zusammen ist jedoch eine Trenderaussage möglich.

4.2 Einfluß von Art und Stärke der Erschütterung

Angaben über die aufgetretenen oder gewählten Erschütterungen liegen für die in [9], [11], [12] und [13] durchgeführten Untersuchungen vor. Dabei wurden Schwinggeschwindigkeiten zwischen rd. 1 und rd. 150 mm/s bei Amplituden zwischen rd. 0,01 mm und rd. 1,8 mm gemessen. Eine generelle systematische Zuordnung dieser Erschütterungskennwerte zu bestimmten Festigkeitsveränderungen ist aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht möglich, da sie unter nicht vergleichbaren Umständen ermittelt wurden.

Eine weitgehende tendenzielle Übereinstimmung lassen allerdings die in [8], [9] und [13] dargestellten Versuche sowie ein Teil der Versuche in [11] und [12] hinsichtlich der Folgen von Erschütterungen mit relativ geringen Schwinggeschwindigkeiten erkennen. Dabei war die Druckfestigkeit von Betonprüfkörpern, die im frischen oder jungen Zustand sinusförmigen Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten zwischen 3 und 23 mm/s ausgesetzt worden waren, trotz der genannten Unterschiede in der Versuchsdurchführung nur innerhalb der üblichen Prüfstreuung größer oder kleiner als bei unbeanspruchten Vergleichskörpern. Dies läßt den Schluß zu, daß bei Betonen üblicher Zusammensetzung Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten von weniger als rd. 20 mm/s unabhängig vom Zeitpunkt ihres Auftretens im allgemeinen nicht zu wesentlichen nachteiligen Folgen für die Festbetoneigenschaften führen. Diese Aussage ist allerdings durch die Untersuchungen nur abgedeckt, soweit die Amplitude der Erschütterungen etwa 0,7 mm nicht überschreitet.

Hinsichtlich der Wirkung stärkerer Erschütterungsbeanspruchungen mit Schwinggeschwindigkeiten über 20 mm/s ergeben sich aus den Veröffentlichungen dagegen keine gemeinsamen, systematischen Hinweise. In [11] und [12] wirkten zwar Schwingungen mit deutlich höheren Geschwindigkeiten bis zu rd. 150 mm/s bei Amplituden bis zu rd. 1,8 mm auf den Beton ein, die Untersuchungen wurden jedoch zum einen an einem sehr ungünstig zusammengesetzten, nach DIN 1045 nicht für bewehrte, tragende Bauteile zugelassenen Beton durchgeführt, zum anderen war kein direkter Vergleich der nach Erschütterung des Betons gemessenen Festigkeiten mit vergleichbaren, nichtbeanspruchten Körpern möglich. Die dabei getroffene Feststellung, daß in unbewehrtem Beton aufgrund stär-

kerer Erschütterungen u. U. mit deutlichen Festigkeitsverringere-
ngen zu rechnen ist, kann deshalb nicht auf den allgemeinen Fall
übertragen werden. Aus [11] ergibt sich allenfalls trotz der genann-
ten Einschränkungen ein Hinweis darauf, daß bewehrter Beton übli-
cher Zusammensetzung in biegebeanspruchten Bauteilen mögli-
cherweise stärkere lang anhaltende, sinusförmige Erschütterungen
– im Versuch bis 100 mm/s – eher schadlos ertragen kann als unbe-
wehrter Beton, was auf einer beanspruchungsverteilenden Wirkung
der Bewehrungsstäbe beruhen kann.

Die Frage, ob wiederholte oder einzelne stoßartige Erschütterun-
gen, wie sie etwa beim Rammen oder Sprengen auftreten können,
bei gleicher Erschütterungsstärke in ihrer Wirkung auf den Beton
generell gleich oder anders zu bewerten sind als kurze oder länger
andauernde sinusförmige Schwingungen, kann anhand der in [10]
veröffentlichten Untersuchungen ebenfalls nicht beantwortet wer-
den, da die Stärken der dort aufgetretenen Erschütterungen nicht
bekannt sind.

4.3 Einfluß von Zeitpunkt und Dauer der Erschütterung

Eine systematische Variation der Dauer oder des Zeitpunkts der Er-
schütterung wurde nur in [9] und [13] durchgeführt. In den übrigen
Fällen war der Zeitpunkt der Erschütterung versuchsbedingt zufäl-
lig wie in [10] oder die Dauer der Erschütterung weitgehend kon-
stant und mit 24 Stunden so lang, daß sich keine Hinweise auf eine
mögliche Zeitabhängigkeit der Erschütterungsfolgen in frischem
und jungem Beton ergaben. Aus der gemeinsamen Auswertung der
Untersuchungen ergeben sich jedoch trotz aller Einschränkungen
folgende Tendenzen:

Traten die Erschütterungen innerhalb der ersten 2 bis 3 Stunden [9]
oder rd. 6 Stunden [13] auf, so wies der Beton eine höhere Druckfe-
stigkeit als beanspruchte Vergleichskörper auf. Diese Festigkeitser-
höhungen stimmen mit den von Walz in [3] zusammengestellten
Ergebnissen zahlreicher eigener und fremder Untersuchungen, u. a.
auch der frühen Versuche von Kindel [1], zum Einfluß des Nachrüt-
tels oder eines lange anhaltenden Rüttelns von Beton überein. Hier
wurden in den meisten Fällen ebenfalls die höchsten Festigkeiten
erreicht, wenn die Erschütterung durch Tisch- oder Innenrüttler
zwischen der zweiten und fünften Stunde nach der Herstellung auf
den Beton einwirkten. Die beobachteten Festigkeitssteigerungen
dürften darauf zurückzuführen sein, daß der noch ausreichend be-
wegungsfähige Beton durch die Erschütterung nachverdichtet
wurde.

Die in beiden Untersuchungen mit fortschreitender Erhärtungs-
dauer des Betons trotz unterschiedlicher Erschütterung danach
beobachtete Verringerung der Festigkeitsunterschiede läßt sich
dadurch erklären, daß in [9] die länger andauernde Erschütterung
offenbar eine teilweise Wiederauflockerung des Gefüges bewirkte,
wofür die kleiner werdenden Trockenrohdsichten (siehe Tafel 3)
sprechen, während die in [13] zu diesem Zeitpunkt erstmals auftre-
tenden Erschütterungen nur noch eine geringere Nachverdichtung
hervorriefen.

Die in beiden Fällen festgestellten, geringeren Festigkeiten der im nachfolgenden Zeitraum (etwa zwischen der 9. und 15. Stunde in [9] bzw. der 4. und 10. Stunde nach der Herstellung in [13]) erschütterten Betone beruhen vermutlich darauf, daß der Beton jetzt bereits soweit erhärtet war, daß die Erschütterungen zu Spannungen führten, die die zu diesem Zeitpunkt noch geringe Festigkeit des Betons überschritten. Das Auftreten einer für Erschütterungen kritischen Phase wird, trotz gewisser Bedenken gegen die Versuchsdurchführung, durch die Druckfestigkeitsergebnisse in [10] bestätigt (siehe Tafeln 4 und 5). Bei den dort unterschiedlich lange oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Betonherstellung durch offenbar recht starke, stoßartige Erschütterungen beanspruchten Prüfkörpern konnten zwar keine anfänglichen Festigkeitserhöhungen festgestellt werden, was möglicherweise auf negative Einflüsse der undefinierten Lagerung der Prüfkörper zurückzuführen ist, es trat jedoch in diesem Falle bei Erschütterungen etwa zwischen der 3. und 15. Stunde nach der Herstellung deutlich geringere Druckfestigkeiten auf als bei früheren und mit Ausnahme eines Falles späteren Erschütterungen. Sowohl in [9] als auch in [10] wurden die absolut niedrigsten Festigkeiten an Prüfkörpern ermittelt, die etwa bis zur oder in der zehnten Stunde nach Herstellung des Betons erschüttert wurden. Der in [13] gegenüber [9] frühe Beginn und die gegenüber [10] kürzere Dauer des kritischen Zeitraumes kann zumindest teilweise auf die günstigeren Lagerungsbedingungen des Betons im Laborklima und einen dadurch bewirkten schnelleren Erhärtungsverlauf zurückgeführt werden. Inwieweit zusätzlich Unterschiede in der Betonzusammensetzung und/oder in der Art des Zements vorlagen, kann wegen der unvollständigen Angaben in [13] nicht nachvollzogen werden.

Eine Erklärung für die teilweise höhere Festigkeit der Betone, die nach dem Ende der kritischen Phase weiter oder erstmals beansprucht wurden, kann den Veröffentlichungen nicht entnommen werden. Möglicherweise liegen hier herstellbedingte Unterschiede vor, denn zu diesem Zeitpunkt dürfte eine Nachverdichtung des Betons nicht mehr möglich gewesen sein.

Detaillierte Zeitangaben über Beginn und Dauer der kritischen Phase, in der der Beton durch Erschütterungen beeinträchtigt werden kann und die auf den Einzelfall übertragbar wären, können aufgrund der veröffentlichten Versuchsergebnisse nicht gemacht werden, da die den Erhärtungsverlauf bestimmenden Einflußfaktoren, wie etwa die Betonzusammensetzung, die verwendete Zementart und die Erhärtungsbedingungen, nicht systematisch verändert wurden und Angaben dazu teilweise ganz fehlen. Zudem waren in den Untersuchungen, bei denen eine systematische Variation des Zeiteinflusses vorgenommen wurde, die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Erschütterungszeiten so groß, daß eine ausreichend genaue Eingrenzung nicht möglich war. Als grobe Schätzung ergibt sich aus den Untersuchungen als Beginn des kritischen Zeitraumes die dritte, als Ende die vierzehnte Stunde nach der Betonherstellung. Im Einzelfalle ist jedoch eine wesentlich weitere Eingrenzung durch Untersuchungen möglich, bei denen der Beton innerhalb dieses geschätzten Zeitraumes zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder unterschiedlich lange der Erschütterung ausgesetzt

wird. Ebenfalls nur durch umfangreiche systematische Untersuchungen, die auch der Frage nachgehen, welche Druckfestigkeit ein junger Beton im Verlauf der Erhärtung erreicht haben muß, um Erschütterungen bestimmter Stärke schadlos ertragen zu können, kann geklärt werden, inwieweit auch allgemein eine weitergehende Eingrenzung der kritischen Phase möglich ist.

Die Angaben über die Zusammensetzung der untersuchten Betone und die Erschütterungszeiten ermöglichen zusammen mit den Ergebnissen eigener, orientierender Versuche, bei denen Betone nach rd. 15 Stunden auf Druck geprüft wurden, eine grobe Schätzung der am Ende der kritischen Phase erreichten Betondruckfestigkeit. Es ist danach zu erwarten, daß Betone üblicher Zusammensetzung Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten bis zu rd. 100 mm/s ohne nachteilige Folgen ertragen können, wenn sie eine Druckfestigkeit von etwa 5 bis 6 N/mm² erreicht haben.

4.4 Beurteilung baupraktischer Fälle

Die vorstehende Auswertung hat ergeben, daß Erschütterungen, die mit Schwinggeschwindigkeiten bis zu $v = 20$ mm/s auf frischen und jungen Beton einwirken, im allgemeinen keine schädlichen Folgen für die Festbetoneigenschaften haben, wenn der Beton in seiner Zusammensetzung üblichen Konstruktionsbetonen entspricht und er vor der Erschütterungseinwirkung ausreichend verdichtet wurde. Ein Vergleich mit den in Abschnitt 2.2 aufgeführten Ergebnissen von Erschütterungsmessungen zeigt, daß damit bei allen verkehrsbedingten Erschütterungen üblicher Stärke sowie bei den meisten sonstigen in der Praxis auftretenden Erschütterungsfällen keine zusätzlichen Maßnahmen zum Schutz des Betons erforderlich sind. Sind im Einzelfall aufgrund der örtlichen Gegebenheiten – etwa beim Betonieren in der unmittelbaren Umgebung von Rammarbeiten oder von Sprengungen o. ä. – stärkere Erschütterungen nicht auszuschließen, so sollten zunächst Messungen der Amplitude und der Schwinggeschwindigkeit am Betonierort durchgeführt werden. Schätzungen der Erschütterungsstärke sind auch bei ausreichender Erfahrung aufgrund der Vielzahl der Einflußgrößen zumeist nicht hinreichend.

Werden Schwinggeschwindigkeiten über rd. 20 mm/s festgestellt, so sollte die Auswirkung der Erschütterung auf den Beton durch eine Erhärtungsprüfung ermittelt werden. Die Art und die Abmessungen der dafür verwendeten Prüfkörper müssen die tatsächlichen Gegebenheiten in dem zu betonierenden Bauteil ausreichend genau erfassen. Treten bei einer solchen Erhärtungsprüfung Risse, nachteilige Veränderungen der Betonfestigkeit oder des Gefüges auf, so sollten die Erschütterungen insbesondere in dem bei der Prüfung als kritisch ermittelten Zeitraum der anfänglichen Erhärtung möglichst vermieden werden. Ist dies im Einzelfall nicht möglich, so sollte ihre Einwirkung durch erschütterungsdämpfende Maßnahmen, durch die in erster Linie die Schwingungsamplituden verringert werden, wie etwa eine Schwingisolierung des zu betonierenden Bauteils gegenüber seiner Umgebung oder durch zusätzliche Aussteifung der Schalung, auf ein unkritisches Maß gemildert werden. Außerdem sollte im Einzelfall geprüft werden, ob für ein

schnelleres Erreichen der zur Aufnahme der Erschütterungsbeanspruchung erforderlichen Festigkeit und zur Abkürzung der kritischen Phase des Betons nicht eine darauf besser abgestimmte Betonzusammensetzung und/oder die Verwendung eines schneller erhärtenden Zementes vorgesehen werden kann.

5. Zusammenfassung und Folgerungen

Die Auswertung der zur Frage der Erschütterungseinwirkungen auf frischen und jungen Beton und deren Folgen für den Festbeton in der Literatur vorliegenden Untersuchungen läßt trotz Einschränkungen wegen Mängeln und großer Unterschiede in der Versuchsdurchführung sowie teilweise nur unzureichender Angaben folgende Tendenzen erkennen:

5.1 Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten bis zu etwa $v = 20$ mm/s, die auf frischen und/oder jungen, sachgerecht hergestellten und verdichteten Beton üblicher Zusammensetzung einwirken, haben im allgemeinen keine nachteiligen Folgen für die Festigkeit des Festbetons. Dieser Anhaltswert gilt, solange die Erschütterungsamplituden kleiner als etwa 0,7 mm sind. Wie die Messung von Erschütterungen unterschiedlicher Erreger zeigten, haben die in der Baupraxis auftretenden Erschütterungen in den meisten Fällen kleinere Schwinggeschwindigkeiten, so daß nur in Einzelfällen weitere Maßnahmen erforderlich werden. Die Folgen stärkerer Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten über 20 mm/s können aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse nicht generell beurteilt werden.

5.2 Erschütterungen können unabhängig von ihrer Stärke je nach ihrer Dauer oder dem Zeitpunkt ihres Einwirkens unterschiedliche Folgen haben. Wirken Erschütterungen auf Beton ein, der durch Schwingungen noch gut ins Fließen kommt, so können sie eine Nachverdichtung und als deren Folge eine höhere Festigkeit des Festbetons bewirken. Wird Beton in dem unmittelbar darauf folgenden Zeitraum weiter erschüttert, so ist das Maß der Festigkeitserhöhung geringer, wofür im Falle lang andauernder Erschütterungen möglicherweise eine teilweise Wiederauflockerung des Gefüges und bei erstmalig auftretenden Erschütterungen eine geringere Nachverdichtung des Betons verantwortlich sein kann. Wird der Beton in einem Zeitraum erschüttert, in dem er durch Schwingungen gerade nicht mehr nachverdichtet werden kann, beginnt eine kritische Phase, in der bei stärkeren Erschütterungen die Schwingungsbeanspruchung die Festigkeit des jungen Betons überschreiten kann und dadurch bedingte Festigkeitsverringierungen auftreten können. Diese kritische Phase läßt sich aufgrund der besprochenen Versuche auf einen Zeitraum von etwa 3 bis 14 Stunden nach der Betonherstellung eingrenzen. Für den Einzelfall und allgemein für bessere Betone wird nach entsprechenden Versuchen eine deutlich engere Eingrenzung möglich sein.

Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen kann erwartet werden, daß Beton üblicher Zusammensetzung auch durch Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten bis zu rd. 100 mm/s nicht mehr beein-

trächtigt wird, wenn er eine Druckfestigkeit von 5 bis 6 N/mm² erreicht hat.

5.3 Treten im einzelnen baupraktischen Fall Erschütterungen mit Schwinggeschwindigkeiten über 20 mm/s auf, so kann deren Wirkung durch eine Erhärtungsprüfung mit dem vorgesehenen Beton und entsprechender Schwingbeanspruchung festgestellt werden und können geeignete Maßnahmen, wie z. B. Unterbrechen der Erschütterung, Aussteifen der Schalung oder Schwingisolierung des Bauteils, festgelegt werden. Zur Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf das fertige Bauwerk können die in DIN 4150 (siehe Abschnitt 2.3) enthaltenen Anhaltswerte herangezogen werden.

5.4 In systematischen Untersuchungen sollte dem Problem der Erschütterungseinwirkungen auf frischen und jungen Beton weiter nachgegangen werden. Dabei sollten die wesentlichen Einflußfaktoren, wie Art der Erschütterungen, Dauer und Zeitpunkt der Erschütterungen sowie die Frage der günstigsten Betonzusammensetzung, so variiert werden, daß für verschiedene, aber übliche Betone eine mögliche Beeinträchtigung und die kritische Phase abgeschätzt und entsprechende Maßnahmen getroffen werden können.

SCHRIFTTUM

- [1] Kindel, E.: Einfluß von Erschütterungen auf frischen Beton. Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Eisenbetons, Heft 36, Berlin 1932.
- [2] Walz, K.: Über den Einfluß der Verdichtung von Beton-Probewürfeln auf die Druckfestigkeit. beton 12 (1962) H. 6, S. 265/268; ebenso Beton-technische Berichte 1962, Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 83/91.
- [3] Walz, K.: Rüttelbeton. 3. Aufl., Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1960, S. 4.
- [4] DIN 4150 – Erschütterungen im Bauwesen (Vornorm; Ausgabe September 1975).
- [5] Reiher, H., u. D. von Soden: Einfluß von Erschütterungen auf Gebäude. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 995, Köln 1961.
- [6] Raab, A.: Erschütterungen bei Sprengarbeiten, Schwinggeschwindigkeit. Steinbruch und Sandgrube 1978, H. 10 (Sonderdruck).
- [7] Raab, A.: Erschütterungen bei Sprengarbeiten – Vergleichende Betrachtung von Norm-Vorschriften. Die Naturstein Industrie 15 (1979) H. 3, S. 14/21.
- [8] Tussing, F., u. W. Pahde: Herstellung einer Stahlbeton-Fahrbahnplatte unter dem Einfluß von Erschütterungen und Durchbiegungen. Beton- und Stahlbetonbau 62 (1967) H. 1, S. 15/21.
- [9] Back, G.: Der Einfluß von Erschütterungen und ähnlichen Störungen auf Beton während seines Erstarrens und seiner anfänglichen Erhärtung. Die Bauwirtschaft 15 (1961) H. 11, S. 278/281.
- [10] Diederichs, P.: Versuche über Verringerung der Betonfestigkeit infolge Erderschütterungen durch Flakschießen oder Rammarbeiten. Beton- und Stahlbetonbau 43 (1944) H. 5/6, S. 28/30.

- [11] Steinert, J.: Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf die Festigkeit von Beton und den Verbund von Bewehrungsstahl und Beton biegebeanspruchter Stahlbeton-Bauteile. Tonindustrie-Zeitung 99 (1975) H. 6, S. 133/139.
- [12] Paulmann, K., u. J. Steinert: Untersuchung des Einflusses von Erschütterungen auf die Festigkeit von Kiesbeton und auf den Verbund von Bewehrungsstahl und Beton. Schlußbericht zum Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau Az. B II 5-800175-44. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Universität Braunschweig, Braunschweig 1978.
- [13] Desserich, G.: Der Einfluß dynamischer Beanspruchung während des Abbindeprozesses auf die Druckfestigkeit von Beton. Schweizerische Bauzeitung 96 (1978) H. 32, S. 594/598.
- [14] Wierig, H.-J.: Eigenschaften von „grünem, jungem“ Beton. beton 18 (1968) H. 3, S. 94/101.
- [15] SIA 162 – Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (Ausgabe 1968), Herausg. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.