

Einfluss von Erschütterungen auf jungen Beton – Sprengungen im Tunnelbau, Rammarbeiten und Laborversuche

<https://doi.org/10.14459/2023.1724792.mbs27.09>

Felix Wenker, Dietmar Mähner, Oliver Fischer



Felix Wenker M.Sc.

2013-2016 Studium Bauingenieurwesen, FH Münster, Abschluss: B.Eng.

2016-2019 Studium Bauingenieurwesen, FH Münster, Abschluss: M.Sc.

seit 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für unterirdisches Bauen, FH Münster

seit 2022 Ingenieur in der Baustoffprüfstelle der Roxeler Ingenieurgesellschaft mbH



Prof. Dr.-Ing. Dietmar Mähner

1990-1994 Studium Bauingenieurwesen, FH Münster, Abschluss: Dipl.-Ing. (FH)

1994-1997 Ergänzungsstudiengang Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum (RUB), Abschluss: Dipl.-Ing.

2002 Promotion zum Dr.-Ing. an der RUB

2004 Professur FH Münster

seit 2006 ö. b. u. v. Sachverständiger für Tunnelbau und Stahlbetonhochbau

seit 2010 EBA-Prüfsachverständiger



**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver
Fischer**

Studium Bauing., TUM, Diplom 1988

1989-1995 Wiss. Assistent, Universität der
Bundeswehr München, Promotion 1994

1996-2009 Verschiedene Fach- und Führungs-
positionen in der Bauindustrie im In- und
Ausland

2007 Diplomwirtschaftsling. Univ. Hagen

seit 10.2009 Ordinarius für Massivbau, TUM

seit 2011 Prüfingenieur und EBA-Prüfer

Der vorliegende Beitrag behandelt Untersuchungen zum Einfluss von Erschütterungen auf jungen Beton. Zu diesen zählen Laborversuche, bei denen sinusförmige Schwingungen über einen Shaker simuliert wurden. Des Weiteren wurden auch Feldversuche auf verschiedenen Baustellen durchgeführt, bei denen junger Beton durch Sprengvortrieb, die Herstellung eines Frankipfähles NG® sowie durch das Einvibrieren einer Spundbohle erschüttert und die dabei einwirkenden Schwingungen aufgezeichnet wurden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass der junge Beton im Allgemeinen nicht signifikant durch die Erschütterungen beeinflusst wurde und durch eine frühzeitige Erschütterung sogar Festigkeitssteigerungen generiert werden konnten.

This article deals with investigations on the influence of vibrations on young concrete. These include laboratory tests in which sinusoidal vibrations were simulated using a shaker. In addition, field tests were carried out on various construction sites, in which young concrete was vibrated by blasting, the construction of an Franki pile NG® and the vibration of a sheet pile, whereby the resulting vibrations were recorded. The result of these investigations was that the young concrete was generally not significantly affected by the vibrations and that early vibrations could even generate strength increases.

Einleitung

Im Bauwesen treten in verschiedenen Kontexten Erschütterungen auf: Hierzu zählen im Hochbau Verdichtungs- und Abbrucharbeiten, im Tiefbau Rammarbeiten und Verkehr sowie im Tunnelbau Erschütterungen durch den maschinellen Schildvortrieb und Sprengvortrieb. Dabei wirken diese Erschütterungen oftmals auf bereits eingebauten, aber noch nicht erhärteten – den sogenannten jungen – Beton ein.

Obwohl der Einfluss von Erschütterungen auf den jungen Beton seit über 100 Jahren erforscht wird, ist dieser in Deutschland bislang normativ noch nicht eindeutig geregelt. In DIN 4150-3 [1] gibt es für unterschiedliche Gebäudetypen und deren Bauteile Anhaltswerte für maximale Schwinggeschwindigkeiten, die bei kurzzeitigen Erschütterungen nicht überschritten werden sollten. Es sind jedoch keine expliziten Regelungen für jungen Beton vorhanden. Eine Zusammenstellung von maximalen Schwinggeschwindigkeiten, welche auf jungen Beton in verschiedenen anderen Ländern (z. B. China) einwirken dürfen, ist in [2] enthalten.

Im Allgemeinen wird der junge Beton durch Erschütterungen nicht geschädigt, solange sich dieser noch plastisch verformen kann; hier findet vielmehr eine Nachverdichtung statt. Bei dem weiteren Erhärten des Betons können durch Schwingungen Zug- und Scherbeanspruchungen generiert werden, die Risse und Lockerungen des Betongefüges hervorrufen. Diese Phase wird kritischer Zeitraum genannt [3].

In der Fachliteratur gibt es trotz einer Vielzahl an bisherigen Untersuchungen noch keine allgemeingültigen Aussagen über die Wirkung von Erschütterungen auf jungen Beton. Daher war das Ziel dieser Untersuchungen, durch systematische Untersuchungen den Einfluss von verschiedenen Schwingungsparametern auf den jungen Beton zu bestimmen.

Laborversuche

Die Erschütterungen wurden im Labor durch einen Shaker (V721 M8-CE) von Brüel & Kjær simuliert und die Schwingbeschleunigung währenddessen mit Beschleunigungssensoren (Typ 4507 B002, Fa. Brüel & Kjær) gemessen. Der dabei verwendete Versuchsaufbau ist in Abb. 1 dargestellt.

Einfluss von Erschütterungen auf jungen Beton – Sprengungen im Tunnelbau, Rammarbeiten und Laborversuche

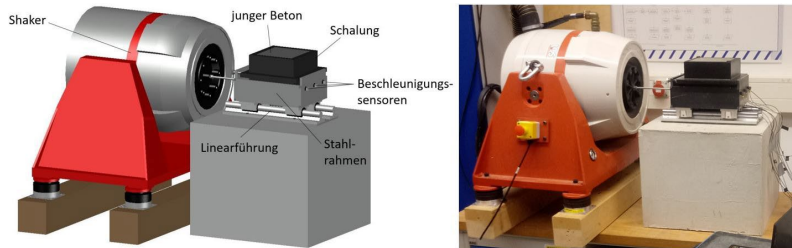


Abb. 1: Versuchsaufbau (schematische Zeichnung und Foto)

Da kein Schwingungsregler verwendet wurde, konnte nur die Frequenz eingestellt werden und die Schwingungsintensität wurde indirekt über die Messung der Beschleunigung und einen Verstärker manuell geregelt. Aufgrund der sinusförmigen Erschütterungseinwirkung konnten die einzelnen Schwingungsparameter dabei wie folgt berechnet werden [4]:

$$v = A \cdot \omega = A \cdot 2\pi f \quad (1)$$

$$a = -A \cdot \omega^2 = -A \cdot 4\pi^2 f^2 \quad (2)$$

mit: A: Amplitude [m]
 ω : Kreisfrequenz [1/s]
 f: Frequenz [Hz]
 v: Schwinggeschwindigkeit [m/s]
 a: Schwingbeschleunigung [m/s²]

Aufgrund der Multikollinearität wurden die Schwingungsparameter so gewählt, dass jeweils ein Faktor pro Versuchsreihe konstant war um diesen als Einflussfaktor auszuschließen. Eine Zusammenfassung der verschiedenen Schwingungsparameter der Versuchsreihen ist in Tab. 1 enthalten:

Tab. 1: Zusammenfassung der aufgebrachten Schwingungsparameter

Versuchsreihen	f [Hz]	A [mm]	v [mm/s]	a [m/s ²]
1.1 – 1.5	20	0,10 - 1,59	12,5 - 200	1,6 - 25,1
2.1 – 2.5	7,07 - 56,57	0,40	17,7 - 141,4	0,8 - 50,3
3.1 – 3.5	5 - 80	0,1 - 1,59	50	1,6 - 25,1
4.1 – 4.5	7,07 - 56,57	0,05 - 3,18	17,7 - 141,4	6,3

Jede Versuchsreihe besteht wiederum aus zwei Probenreihen, bei welchen alle 14 Betonwürfel jeweils aus derselben Betoncharge hergestellt wurden. Bei der Prüfung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3:2009-07 [5] wurden dann bei der jeweils ersten Probenreihe die Betonwürfel in Richtung der Erschütterung und bei der jeweils zweiten Probenreihe die Betonwürfel quer zur Erschütterungsrichtung belastet.

Bei der Betonage wurden die Würfelformen erst zufällig befüllt und dann 30 s auf einem Rütteltisch verdichtet. Anschließend wurden die Betonwürfel in einen klimatisierten Raum mit 20 °C transportiert, in welchem nach 4, 6, 8, 10, 12 und 14 Stunden zwei Betonproben nacheinander jeweils 5 min mit den ausgewählten Schwingungsparametern (Tab. 1) erschüttert wurden. Pro Probenreihe wurden zwei Betonwürfel nicht erschüttert und als Referenz verwendet.

Für diese Versuche wurde ein Portlandzement (CEM I 42,5 N) verwendet, der Beton wies den w/z-Wert 0,50 und annähernd die Sieblinie B16 auf. Hieraus ergab sich ein Beton der Festigkeitsklasse C35/45 mit einer mittleren Druckfestigkeit von etwa 50,9 N/mm². Die Ergebnisse der Laborversuche sind in Abb. 2 dargestellt.

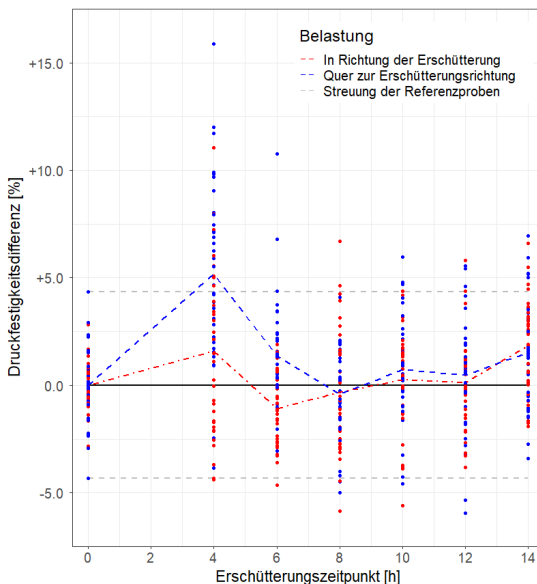


Abb. 2: Ergebnisse der Laborversuche

Hier zeigte sich, dass der Großteil der Messwerte innerhalb der Streuung der Referenzproben liegt. Eine Ausnahme davon bildet der Erschütterungszeitpunkt 4 h, bei dem Festigkeitssteigerungen auftraten, welche abhängig von der Richtung der Erschütterung waren. Nach 6 und 8 h sind im Mittel z. T. etwas verringerte Festigkeiten vorhanden und ab dem Erschütterungszeitpunkt 10 h weisen die Erschütterungen generell keinen Einfluss auf den untersuchten Beton auf.

Die Abhängigkeit zwischen der Festigkeitssteigerung und der Erschütterungsrichtung zeigte sich ebenfalls durch eine optische Veränderung des Betongefüges. Eine statistische Auswertung ergab dabei, dass die Wirkung der Erschütterung nicht auf einen einzelnen Schwingungsparameter reduziert werden kann, sondern mehrere Faktoren einen Einfluss auf die Festigkeitssteigerung aufweisen.

Um die Ursache dieser Festigkeitssteigerungen zu untersuchen, wurden an der TU München an erschütterten Proben sowie Referenzproben thermogravimetrische Analysen (TGA), Röntgendiffraktometrien (XRD) und Kernspinresonanzspektroskopien (^{29}Si MAS NMR) durchgeführt. Diese Untersuchungen deuten darauf hin, dass durch die Erschütterung nach 4 h nicht mehr Zement hydratisiert ist und es sich wahrscheinlich überwiegend um eine physikalische Nachverdichtung handelt. Weitergehende Informationen zur Versuchsdurchführung und den Untersuchungsergebnissen sind in [4] enthalten.

Feldversuche

Bei den Feldversuchen wurde zu verschiedenen Zeitpunkten Beton mit derselben Betonrezeptur wie in den Laborversuchen hergestellt, welcher anschließend verschiedenen baupraktischen Erschütterungsarten ausgesetzt wurde. Hierbei handelt es sich um:

- Erschütterungen durch Sprengvortrieb beim Tunnel Alberberg
- Erschütterungen durch die Herstellung eines Frankipfahls NG®
- Erschütterungen durch das Einvibrieren einer Spundbohle

Der Tunnel Alberberg ist ein Bauabschnitt zur Verlängerung der BAB 44, bei welchem zwei Tunnelröhren mit einem lichten Abstand von ca. 12 m parallel hergestellt werden. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen war der

Vortrieb der Südröhre abgeschlossen und dort wurde bereits die Innenschale betoniert, während der Sprengvortrieb in der Nordröhre voranschritt. Dabei wurde der Emulsionssprengstoff Emulex 1 der Fa. Austin Powder Company verwendet und bei den Sprengungen wurden ca. 65 Zünder und 0,8-0,9 kg Sprengstoff pro Zündzeitstufe verbraucht. Zur Erschütterung des jungen Betons wurden die Betonproben während einer Sprengung in der Südröhre – auf Höhe der Ortsbrust in der Nordröhre – gelagert, um eine möglichst große Erschütterungsbeanspruchung zu generieren.

Zudem fanden Untersuchungen auf einem Testfeld der Helmut-Schmidt-Universität statt, bei dem Frankipfähle NG © mit Kiesvorverdichtung hergestellt wurden. Die Erschütterung des jungen Betons erfolgte hier durch die Ramme RA 348 der Fa. Stump-Franki Spezialtiefbau GmbH mit einem 4,5 t schweren Freifallbären, welcher mit einem Intervall von etwa 7,5 s in einer Höhe von jeweils 6,5 m fallen gelassen wurde. Die Tiefe des hergestellten Frankipfahls NG © betrug 16 m und die Erschütterungsdauer mit Unterbrechungen etwa 2,5 h. Dabei wurde in den ersten 30 min das Vortreibrohr eingerammt und anschließend erfolgte ein zweistündiges Einbringen und Verdichten der Kiesschicht am Sohlpunkt des Frankipfahls NG ©.

Eine weitere untersuchte Schwingungsart war das Einvibrieren von Spundbohlen mittels Müller Vibrator MS-24 HFV der Fa. Thyssen Krupp. Die Erschütterung der Betonproben fand hier durch das Einvibrieren einer 6,0 m langen Spundbohle statt und dauerte etwa 2 min an. In Tab. 2 ist eine Zusammenfassung der Schwingungen, durch welche der junge Beton auf den Baustellen erschüttert wurde:

Tab. 2: Übersicht über die maximal gemessenen Schwingungsgeschwindigkeiten bei der Erschütterung der Betonproben [mm/s]

Erschütterungsquelle	Dauer	Abstand	v_x	v_y	v_z	v_{max}
Sprengvortrieb	< 5 s	~ 15 m	7,8	6,2	13,9	14,2
Schlagramme	2,5 h	~ 6 m	21,9	32,8	18,6	33,4
Vibrationsramme	2 min	~ 8 m	6,5	5,1	10,6	10,8

Analog zu den Laborversuchen wurden zusätzlich zu den zwei erschütterten Proben aus jeder Betoncharge ebenfalls zwei Referenzproben hergestellt, welche unter denselben klimatischen Bedingungen quasi-erschütterungsfrei ($v < 1 \text{ mm/s}$) gelagert wurden. Bei der Erschütterung durch die Schlagramme konnten trotz einer größeren Distanz (ca. 80 m) und der Lagerung auf einer elastischen Schaumstoffmatte bei den Referenzproben Schwinggeschwindigkeiten von bis zu 2 mm/s nicht vermieden werden.

Das Ergebnis der Feldversuche ist in Abb. 3 dargestellt. Aufgrund der längeren Erschütterungsdauer der Rammarbeiten zur Herstellung des Frankipfahls NG © wurden die Druckfestigkeitsdifferenzen hier als Linie dargestellt.

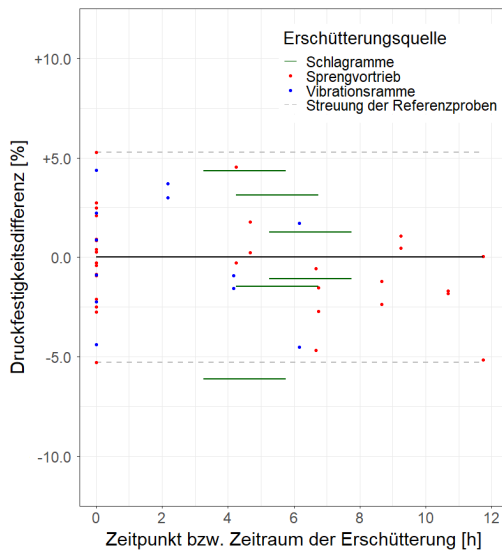


Abb. 3: Ergebnisse der Feldversuche

Hier zeigte sich, dass analog zu den Ergebnissen der Laborversuche die Festigkeit im Allgemeinen nicht signifikant beeinflusst wird und die meisten Messwerte innerhalb der Streuung der Referenzproben liegen. Eine Besonderheit dieser Untersuchungen war, dass eine relativ hohe Streuung vorlag, welche vermutlich auf das schlechtere Anmischen des Betons mittels Handrührwerk zurückzuführen war. Im Mittel sind jedoch ebenfalls Festigkeitssteigerungen bei frühen Erschütterungszeitpunkten (nach ca. 2 h

und z. T. nach ~ 4 h) und Tendenzen für verringerte Festigkeiten nach ca. 6 h vorhanden.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei dem untersuchten Beton keine signifikanten Festigkeitsverringierungen auftraten und die Festigkeit durch eine Nachverdichtung bei frühen Erschütterungszeitpunkten noch gesteigert werden kann. Da sich diese Aussagen auf den hier verwendeten Beton beschränken, sind weitere Untersuchungen notwendig, um allgemeingültige Aussagen zum Einfluss von verschiedenen Schwingungsparametern auf jungen Beton zu ermöglichen.

Folgende Untersuchungen sind hierfür an der FH Münster geplant: Um den Einfluss auf unterschiedlich chemisch reagierenden Zusatzstoffen zu untersuchen, soll die Zementart variiert werden (z. B. CEM III/A). Des Weiteren sollen Untersuchungen an einem Beton mit einer geringeren Druckfestigkeit stattfinden (C16/20) und weitere Betoneigenschaften wie z. B. die Zugfestigkeit und die Wassereindringtiefe geprüft werden, um den Einfluss auf das Betongefüge zu untersuchen.

Literatur

- [1] DIN 4150-3:2016-12: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Beuth Verlag Berlin, 2016.
- [2] Ahmed, L.: Models for analysis of young cast and sprayed concrete subjected to impact type loads. Dissertation, KTH Royal Institute of Technology Stockholm, 2015.
- [3] Bonzel, J, Schmidt, M.: Einfluß von Erschütterungen auf frischen und auf jungen Beton. beton 30 (1980) Nr. 9, S. 333-337.
- [4] Basler, F., Mähner, D., Fischer, O., Hilbig, H.: Influence of early-age vibration on concrete strength. Structural Concrete 24 (2023) Nr. 5, S. 6505-6519.
- [5] DIN EN 12390-3:2007-09: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009. Beuth Verlag Berlin, 2007.