

Schütteln & Betonieren, warum nicht? Praxisfeldtest zur Analyse von Erschütterungen auf das Abbindeverhalten von Frischbeton

D. Favot, M. Rub Terradata AG, Opfikon, CH

Abstract

Es ist bekannt, dass Erschütterungen eine wichtige Rolle während des Abbindens des Betons spielen. Der Zeitpunkt des Eintretens der Vibrationen ist entscheidend: In den ersten Stunden sind Vibrationen gewünscht, um den Frischbeton zu verdichten. Ab einer bestimmten Druckfestigkeit stellen die von den Schwingungen erzeugten Zug- und Scherspannungen kein Problem mehr dar. Die Phase dazwischen ist eher problematisch: Die noch geringen Festigkeiten können durch die Erschütterungsbeanspruchung überschritten werden und die Betoneigenschaften negativ beeinflussen.

In der Praxis kann es vorkommen, dass erschütterungsintensive Arbeiten gleichzeitig mit Betonierarbeiten durchgeführt werden müssen. Oft wird dies aus wirtschaftlichen Gründen gemacht, um Maschinen und Arbeitskräfte effizienter einzusetzen, aber auch, um mögliche Einschränkungen für die Öffentlichkeit zu verringern, z.B. während der Straßensanierung.

Dieser Vortrag behandelt einen Fall aus der Praxis. Für den Ersatzbau „SwissRe Mythenquai“ musste die Bodenplatte des Altbaus abgebrochen werden. Da diese aber als „Spriessung“ für die über 15 m tiefen Schlitzwände diente, durfte sie nicht komplett abgebrochen werden, sondern wurde in einem schachbrettförmigen Verfahren durch die neue Bodenplatte ersetzt. Vor Beginn der offiziellen Abbrucharbeiten wurde der Sicherheitsabstand der Abbrucharbeiten zu den Betonarbeiten empirisch durch vorläufige Erschütterungsversuche auf die alte Betonplatte bestimmt. Die Erschütterungen wurden während der Abbrucharbeiten kontinuierlich überwacht.

In diesem Zusammenhang wurde Sika Schweiz AG beauftragt, Vorversuche an Betonproben mit den projektspezifischen Eigenschaften durchzuführen.

Der Vortrag zeigt den Versuchsaufbau und die Ausbreitungscharakteristika vom Feldversuch. Gezeigt werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Sika Schweiz AG.

Schütteln & Betonieren, warum nicht!

D. Favot, M. Rub, Terradata AG

Kurzfassung

Es ist bekannt, dass Erschütterungen eine wichtige Rolle während des Abbindens des Betons spielen. Der Zeitpunkt des Eintretens der Vibrationen ist entscheidend: In den ersten Stunden sind Vibrationen gewünscht, um den Frischbeton zu verdichten. Ab einer bestimmten Druckfestigkeit stellen die von den Schwingungen erzeugten Zug- und Scherspannungen kein Problem mehr dar. Die Phase dazwischen ist eher problematisch: Die noch geringen Festigkeiten können durch die Erschütterungsbeanspruchung überschritten werden und die Betoneigenschaften negativ beeinflussen.

In der Praxis kann es vorkommen, dass erschütterungsintensive Arbeiten gleichzeitig mit Betonierarbeiten durchgeführt werden müssen. Oft wird dies aus wirtschaftlichen Gründen gemacht, um Maschinen und Arbeitskräfte effizienter einzusetzen, aber auch, um mögliche Einschränkungen für die Öffentlichkeit zu verringern, z.B. während der Strassensanierung.

Dieser Vortrag behandelt einen Fall aus der Praxis. Für den Ersatzbau „SwissRe Mythenquai“ musste die Bodenplatte des Altbaus abgebrochen werden. Da diese aber als „Spriessung“ für die über 15 m tiefen Schlitzwände diente, durfte sie nicht komplett abgebrochen werden, sondern wurde in einem schachbrettförmigen Verfahren durch die neue Bodenplatte ersetzt. Vor Beginn der offiziellen Abbrucharbeiten wurde der Sicherheitsabstand der Abbrucharbeiten zu den Betonarbeiten empirisch durch vorläufige Erschütterungsversuche auf die alte Betonplatte bestimmt. Die Erschütterungen wurden während der Abbrucharbeiten kontinuierlich überwacht.

In diesem Zusammenhang wurde Sika Schweiz AG beauftragt, Vorversuche an Betonproben mit den projektspezifischen Eigenschaften durchzuführen.

Der Bericht zeigt den Versuchsaufbau und die Ausbreitungscharakteristika vom Feldversuch. Gezeigt werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Sika Schweiz AG.

1. Ziel der Vorversuche auf der Bodenplatte

Das Ziel der Vorversuche war es, den terminlichen Ablauf auf die effektiven Bedürfnisse der Ausführungsanforderungen abzustimmen.

Die spezifischen Betoneigenschaften für den jungen Beton lagen zum Zeitpunkt des Versuchs noch nicht vor. Vorgesehen waren zwei verschiedene Betontypen: Der wasserdichte Beton für die massive neue obere Bodenplatte und der darunterliegende Faserbeton für die neue Spriessplatte.

Die vom Bauingenieur angegebenen Richtwerte für die Erschütterungen, die nicht überschritten werden dürfen, liegen bei 20 mm/s bei Schwingamplituden $\leq 0.7\text{mm}$ für Frischbeton und jungen Beton.

Der Versuch soll die Erschütterungsausbreitung in der bestehenden Bodenplatte gemessen werden, welche die eingesetzten Baumaschinen erzeugen. Hierzu wurden an mehreren Standorten auf der Bodenplatte entsprechende Messpunkte platziert. Der Versuch beantwortet folgende Fragen:

1. Was sind die maximalen Erschütterungen?
2. In welcher Distanz können die Vorgaben für Betonarbeiten eingehalten werden?
3. Wie gross ist der Unterschied mit und ohne Frässchnitt?

2. Beschrieb Versuchsmaschinen

Für den Erschütterungsversuch wurde ein Caterpillar 390F (110 Tonnen) der Firma Eberhard Bau AG in Kombination mit dem Abbruchhammer Rammer BR 7013 eingesetzt. Der Hammer kann mit einer Frequenz zwischen 5 und 9 Hz variieren. Für den Versuch wurde die Frequenz vom Maschinisten manuell auf das

Maximum von 9 Hz eingestellt. Die Baumaschine hat während den Versuchen keine zusätzliche Kraft auf den Ausleger gebracht. Dies entspricht der Praxis.

3. Messinstrumente

Zum Einsatz kamen 10 Erschütterungssensoren der Terradata AG vom Typ VMS GSI. Es handelt sich um triaxialen Geophone. Die Sensoren wurden alle mit Schrauben fest mit der Bodenplatte verbunden. Die Sensoren wurden vom Werk aus kalibriert. Die Kalibrierung wird jährlich überprüft.

4. Beschrieb Versuchsanordnungen

Zur Übersicht dient Abbildung 1 mit den relevanten Messachsen (Da und Db). Weiter ist der Frässchnitt (S) und die Erschütterungsmessgeräte zu erkennen.

Bei allen durchgeführten Versuchen wurde ein Abbruchfeld von ca. 1 m² grün markiert. Darin hat der Abbruchhammer 8–15 mal angesetzt. Es konnte jeweils eine Abbruchtiefe bis zur maximalen Hammerlänge von 60 bis 70 cm erreicht werden.

Die Versuchsanordnung wurde so gewählt, dass keine Stützen in der direkten Erschütterungsausbreitung zwischen Quelle und Empfänger standen. Zudem wurde der Versuch auf der freien Bodenplatte gewählt wo weder Auflast durch alte Stützen bzw. Decken noch durch Abbruchmaterial bedeckt waren. Der Einfluss der Spriessstützen kann vernachlässigt werden.

Der Zustand nach dem Abbruch wurde fotografisch dokumentiert. In allen Versuchsfeldern war ein Überzugsbeton von geringer Stärke (ca. 10 cm) vorzufinden. Dieser brach jeweils weg, bevor die eigentliche Betonplatte weggespitzt wurde. Die aufgebrochene Armierung war nicht in allen Feldern gleich stark gebrochen bzw. nicht gleich vorzufinden.

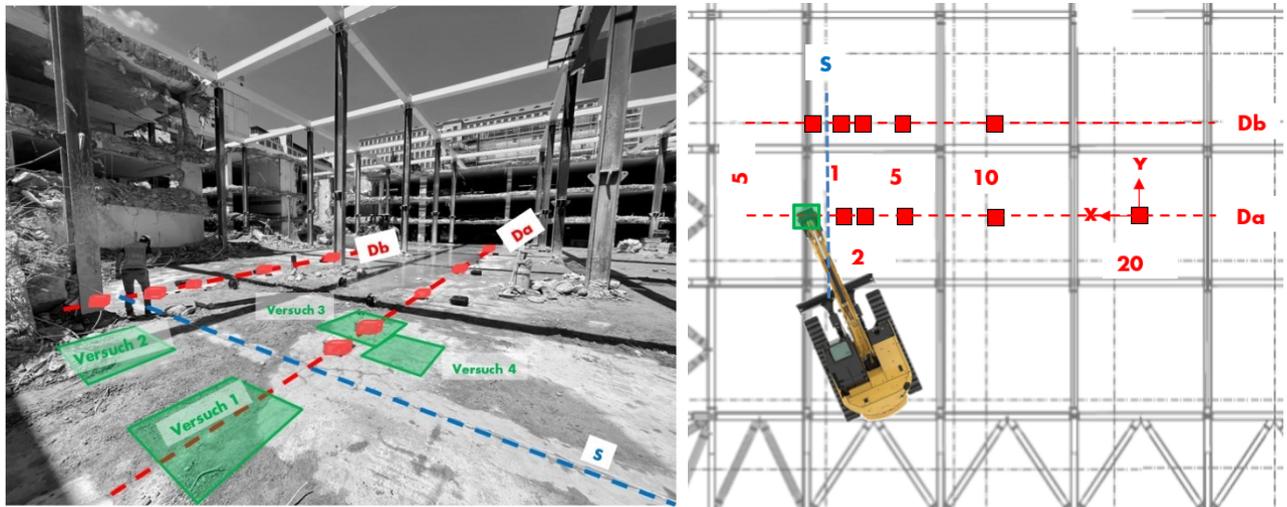


Abbildung 1: Die relevanten Achsen und Versuchsfelder von je ca. 1 m². S = Frässchnitt.
Rechts: Versuchsanordnung 1

5. Frässchnitt

Mit dem Frässchnitt wird die Kontaktfläche zwischen der Erschütterungsquelle und den Sensoren reduziert. Die Bodenplatte hat eine Stärke von ca. 1.20 m auf. Der Frässchnitt wurde auf eine Tiefe von 0.9 m ab Bodenplatte OK erstellt. Die Schnittlänge wurde auf über 12.5 m angesetzt, wobei die volle Tiefe von 0.9 m wahrscheinlich auf einer Länge von 11 m erreicht wurde. Die Fräsbreite beträgt ca. 1cm. Weil in der Realität die Frässchnitte nicht gegen Wasser und Schmutz abgedichtet werden können, wurde auch beim Versuch ein verfüllter Frässchnitt vorgefunden.

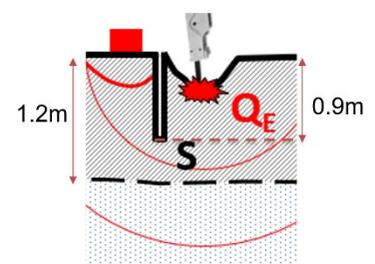




Abbildung 2: Installation der Messgeräte

6. Auswertung

Pro Versuch wurden die Messungen in einer umhüllenden Abminderungskurve dargestellt, wie in Abbildung 3 gezeigt.

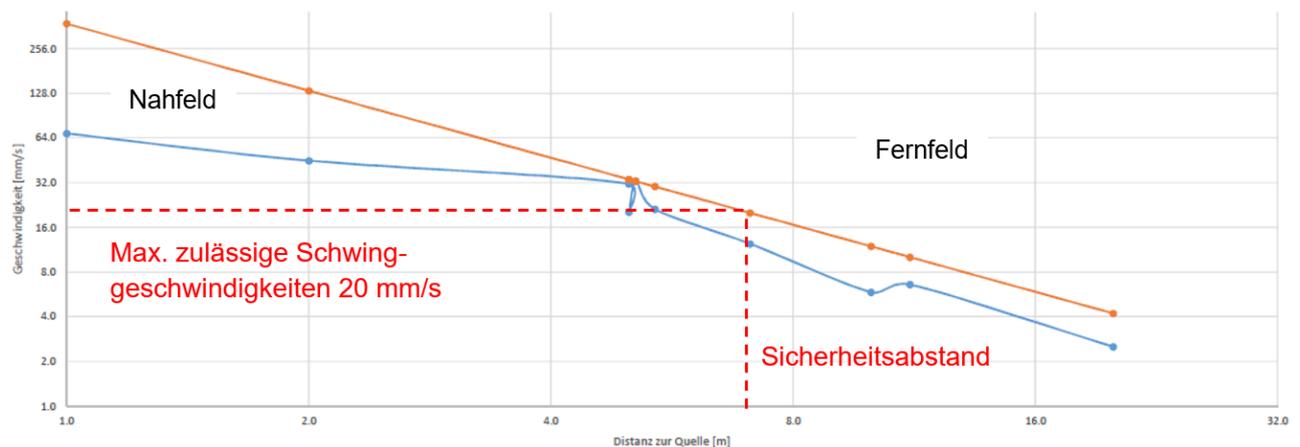


Abbildung 3: Beispiel einer umhüllenden Abminderungskurve

Um die Abminderung der Vibrationen in Abhängigkeit zur Distanz zu bestimmen, gilt:

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^n$$

Wobei v die Schwinggeschwindigkeit in einer bestimmten Distanz r darstellt. v_0 ist die Schwinggeschwindigkeit in einer Distanz r_0 und n steht für den Abminderungsexponent.

Als grobe Orientierungshilfe findet man in der Literatur empirisch bestimmte Abminderungsexponent gleich 1.5 für den Fall «Punktquelle auf Halbraum». Dies entspricht unseren Versuchsanordnungen im Fernfeld (Abstand $> 5\text{m}$). Da die angegebene kritische Schwingungsamplitude im Fernfeld liegt, wurde dieser Exponent zur Berechnung des Sicherheitsabstandes verwendet.

Im Nahfeld nahmen die Erschütterungen langsamer ab, mit einem Abminderungsexponent zwischen 0.5 und 1.

7. Erkenntnisse Versuch

Die drei eingangs gestellten Fragen werden hier beantwortet.

1. *Was sind die maximalen Erschütterungen?*

Der grösste Geschwindigkeitsvektor, gebildet aus den drei maximalen Komponenten, betrug 68 mm/s beim nächsten Geophon zur Erschütterungsquelle

2. *Wie gross ist der Unterschied mit und ohne Frässchnitt?*

Beim Versuch 1 wurden trotz Frässchnitt die höchsten Erschütterungen gemessen. Die Gründe sind sicher mannigfaltig und können nicht genau identifiziert werden. Für diese Versuchsanordnungen kann zumindest festgehalten werden, dass es keine Rolle spielt, ob der Frässchnitt vorhanden ist oder nicht. Insb. in der Praxis ist es nicht möglich, den Frässchnitt als reduzierte Kontaktfläche auszubilden. Der Spalt verfüllt sich zu schnell mit Wasser, Schlamm und anderem Material aus dem Abbruch. Zudem ist die Bodenplatte nach wie vor mit dem Rest der Umgebung in Kontakt über den nicht gefrästen Teil wie auch mit dem Untergrund.

3. *In welcher Distanz können die Vorgaben für Betonarbeiten eingehalten werden?*

Mit den empirisch bestimmten Abminderungskurven können die minimal zulässige Entfernung für gleichzeitiges Betonieren und Abbrechen der Betonplatte wie in Tabelle 1 zusammengefasst werden. Als Ergänzung ist auch die Distanz zur Erschütterungsquelle unter Einhaltung von 2 mm/s ersichtlich.

Der Schwingweg stellt bei allen Versuchsanordnungen kein Problem dar. D.h. die Schwingwege liegen in 5-7 m Distanz zur Erschütterungsquelle (Bedingung aus Tabelle 1) um das 10-fache tiefer als die eingangs gestellt Grenzwerte von 0.7 mm. Der minimale Sicherheitsabstand wurde auf 10 m festgelegt.

Tabelle 1: Die aus den 4 Versuchen gewonnen empirisch ermittelten Distanzen bei denen die Vorgaben der 20 mm/s noch eingehalten werden können.

Versuch	Distanz zur Erschütterungsquelle Q_E unter folgenden Grenzwerten		Bemerkungen
	$v < 20$ mm/s	$v < 2$ mm/s	
1	6.7 m	24.9 m	mit Frässchnitt
2	5.9 m	23.2 m	mit Frässchnitt
3	7.1 m	31.5 m	ohne Frässchnitt
4	5.4 m	31.2 m	ohne Frässchnitt

8. Nachkontrolle

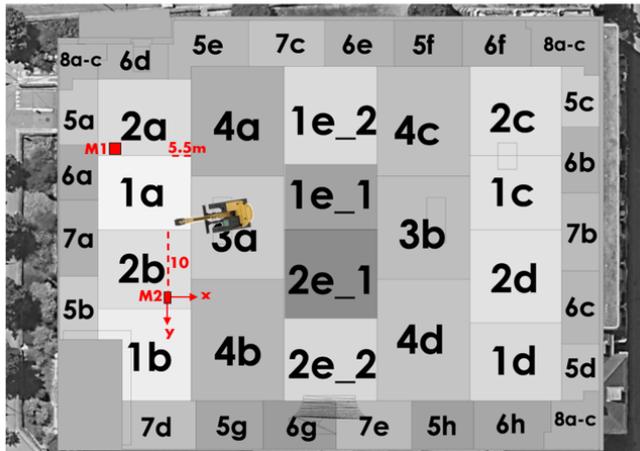
Das Vorgehen für die Abbrucharbeiten wurde von den Ingenieuren Basler & Hofmann AG so gestaltet, dass die Bodenplatte schachtbrettartig in einer geplanten Reihenfolge abgebrochen wird, um die Verminderung der Stützfunktion zu minimieren.

Als die Abbrucharbeiten begonnen haben, wurden die Erschütterungen in drei verschiedenen Versuchen überwacht, um den Erkenntnissen vom Vorversuch zu prüfen. Die Messungen haben bestätigt, dass der definierte Sicherheitsabstand vom 10 m gewährleistet, dass die Schwinggeschwindigkeiten unter 20 mm/s bleiben.

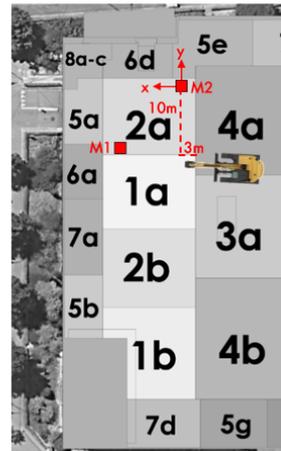
Tabelle 2: Maximale Erschütterungsamplituden gemessen während der Nachkontrolle

Versuch	Maximale gemessene Schwinggeschwindigkeit [mm/s]	
	\ddot{u}_E M1	M2 ($d > 10m$)
1	45.6	9.6
2	25.6	15.9
3	4.7	10.4

Versuch 1



Versuch 2



Versuch 3

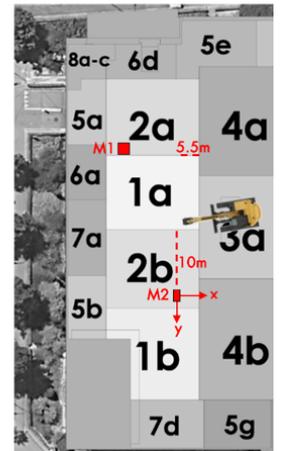


Abbildung 4: Reihenfolge der Abbruchfelder und Versuchsanordnungen bei der Nachkontrolle

9. Untersuchung Sika Schweiz AG

a. Ziel

Ziel dieser Labor-Vorversuche ist es, den Zeitpunkt der kritischen Phase der Festigkeitsentwicklung des jungen Betons zu bestimmen in der der Beton nicht mehr so fließfähig ist, dass er durch Schwingungen nachverdichtet werden kann und gleichzeitig so fest ist, dass er den Erschütterungen ohne Mikrorissbildung widersteht.

b. Prüfkörper

Für die Versuchsdurchführung wurden drei Prüferien hergestellt. Es wurde die Beton-Rezeptur C30/37 XC4 XF1 Dmax32 WD angewendet. Die Merkmale der Prüferie sind:

- Prüferie A: ohne Erschütterung ohne Schwindreduktionsmittel
- Prüferie B: ohne Erschütterung mit Schwindreduktionsmittel (2% SikaControl-600SRA)
- Prüferie C: ohne Erschütterung mit Schwindreduktionsmittel (2% SikaControl-600SRA)

Eine Serie besteht aus 8 Würfeln mit Dimensionen 150x150x150mm.

Hinweise zu den Ausgangsstoffen:

- Die Gesteinskörnung ist ein Rafterfeld-typisches Rundkies. Das Verformungsverhalten von frischem Beton wird im Wesentlichen durch die im Feinmörtel vorhandenen Kohäsionskräfte und durch die innere Reibung des Kornaufwerks bestimmt. Ein Rundkies stellt dabei den ungünstigeren Fall dar.
- Für die Labor-Vorversuche wird ein Zement mit reaktiv puzzolanischen Eigenschaften der Flugasche verwendet, um den ungünstigeren Fall darzustellen.

c. Durchführung

Die Probekörper der Serie C wurden gemäss Tabelle 3: Vorgehen und Erkenntnisse Druckfestigkeit Erschütterungen ausgesetzt. Die Würfeln wurden nach dem definierten Zeitintervall jeweils 30 Sekunden auf den Rütteltisch gestellt und mit Schwinggeschwindigkeiten grösser als 100 mm/s und Frequenz gleich 50 Hz erschüttert.

Der Vergleich der Druckfestigkeiten der Serie A und B liefert die Ergebnisse, ob die Erschütterungen einen Einfluss auf die Endfestigkeit haben. Erfahrungen zeigen, dass die 7 Tage Druckfestigkeit rund 80% der 28d-Festigkeit beträgt.

Für die Betonmischung wurden die Anweisungen gemäss SN EN 480-1 berücksichtigt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte gemäss SN EN 12390-2:2019.

d. Ergebnisse

Tabelle 3: Vorgehen und Erkenntnisse Druckfestigkeit

Serie A = Erschütterungsfrei ohne SRA / Serie B = Erschütterungsfrei mit SRA / Serie C = definierte Erschütterung												
Erschütterung:	Serie A_	SA	Serie B_	SA	Serie C_ 4h (2x)	SA	Serie C_ 14h (2x)	SA	Serie C_ 18h (2x)	SA	Serie C_ 24h (2x)	SA
nach 4h 30 sek.	✗		✗		✓							
nach 14h 30 sek.	✗		✗		✓		✓					
nach 18h 30 sek.	✗		✗		✓		✓		✓			
nach 24h 30 sek.	✗		✗		✓		✓		✓		✓	
Früh-Festigkeiten												
fcw 4h N/mm ²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohdichte kg/m ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
fcw 14h N/mm ²	5,9	0,0	2,5	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohdichte kg/m ³	2387	10	2397	1	-	-	-	-	-	-	-	-
fcw 18h N/mm ²	11,8	0,2	6,0	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohdichte kg/m ³	2376	3	2398	15	-	-	-	-	-	-	-	-
fcw 24h N/mm ²	16,6	0,5	12,6	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Rohdichte kg/m ³	2378	18	2399	5	-	-	-	-	-	-	-	-
7d Festigkeiten												
fcw 7d N/mm ²	38,4	1,3	33,5	1,2	32,5	0,8	32,1	0,2	33,8	0,5	35,4	1,0
Rohdichte kg/m ³	2404	0	2391	20	2408	1	2390	14	2398	4	2399	4
Abweichung Referenz	100%		87%		97%		96%		101%		106%	
Hochrechnung fcw												
fcw 28d N/mm ²	45,2		40,5		39,3		38,8		40,8		42,8	
fcw 56d N/mm ²	50,5		44,1		42,8		42,2		44,5		46,6	
Anmerkungen:	ohne SRA		mit SRA		mit SRA + ES		mit SRA + ES		mit SRA + ES		mit SRA + ES	

SRA... Schwindreduktionsmittel
SA... Standardabweichung
fcw... Würfeldruckfestigkeit N/mm²
ES... Erschütterung

Bei den frühen Festigkeiten der Serien A und B wird der Einfluss des Schwindreduktionsmittel auf das Abbindeverhalten des Betons deutlich. Der Unterschied in der Festigkeitsentwicklung wird mit zunehmendem Alter der Probekörper geringer. Nach 14 h ist die gemessene Frühfestigkeit der Serie B um ca. -58 % geringer als die des Referenzbetons ohne Schwindreduktionsmittel der Serie A. Nach 24 h verringert sich die Differenz auf -24 % und nach 7 d auf -13 %.

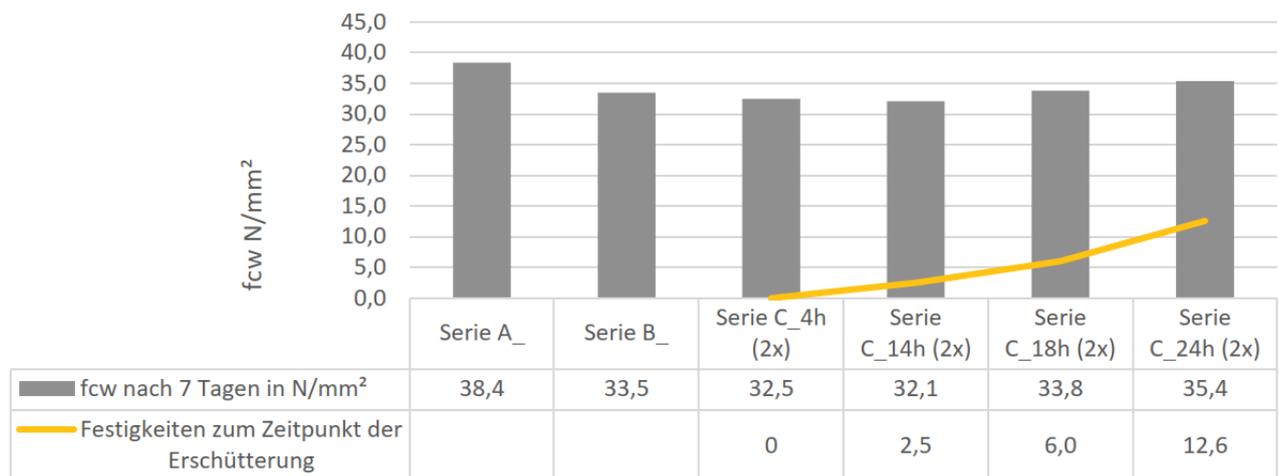


Abbildung 5: Zusammenfassung Druckfestigkeiten

Beim Rütteln der Probekörper der Serie C nach 4 Stunden konnte optisch eine Nachverdichtung des Betons auf der Rüttelplatte festgestellt werden. Der Probekörper wies zum Zeitpunkt der Erschütterung noch ein hydrationsinstabiles Gefüge auf. Die Grünstandfestigkeit war zum Zeitpunkt der Erschütterung nach 4 h noch nicht gegeben, so dass auch keine Würfeldruckfestigkeit ermittelt werden konnte. Die 7-Tage-Festigkeiten der im jungen Betonalter mehrfach gerüttelten Serie C_4h liegen bei ca. 97 % der Referenzserie B mit

Schwindreduktionsmittel. Betrachtet man die Standardabweichung der Serie B nach 7 Tagen, so beträgt diese ca. 1,2 N/mm². Unter Berücksichtigung dieses Aspektes ist das Prüfergebnis nach 7d der Serie B und der Serie C_4h nahezu identisch.

Die anstehende Festigkeit nach 14h betrug 2,5 N/mm² und liegt somit unter den 5,0 N/mm² welche in der Literatur definiert wurden. Die Serie C_4h und C_14h zeigte jedoch innerhalb der Messgenauigkeit keinen Festigkeitsverlust nach 7d.

Die erschütterte Serie C_18h und Serie C_24h zeigen tendenziell leicht höhere Festigkeiten.

e. Zusammenfassung

Die Vorversuche im Labor zeigten eine Tendenz, dass die Schwingungen nach 4 h und nach 14 h zu einer mittleren Abnahme der 7-Tage-Druckfestigkeiten der Serie C von 3 - 4 % gegenüber den Festigkeiten der Referenzkörper der Serie B führen. Betrachtet man jedoch die Standardabweichungen der Einzelergebnisse, so liegt diese Abweichung innerhalb der tolerierbaren Messgenauigkeit. Die Probekörper der Serie C mit einem Alter von 18 und 24 Stunden zeigten tendenziell eine Festigkeitszunahme von ca. 1-6 %. Auch bei den Probekörpern der Serien C_4h und C_14h, die zum Zeitpunkt der ersten Erschütterung eine Festigkeit von <5,0 N/mm² aufwiesen, konnte kein größerer Festigkeitsverlust festgestellt werden. Risse oder Gefügestörungen konnten an den schwingend beanspruchten Probekörpern offensichtlich nicht festgestellt werden.

10. Literatur

- [1] Hunkeler F.; Jacobs F.: Erschütterungen von jungem Beton bei und Instandsetzungen – Empfehlungen für Beurteilung, Vermeidung und Maßnahmen. Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, 25.01.2016.
- [2] Kapferer M, Haug M.: Labor-Vorversuche Erschütterungen Ersatzneubau Mythenquai 20/28, Sika Schweiz AG, 13.07.2021
- [3] Alten K, Gasser Ch., Lechner A., Auswirkung verschiedener Vibrationsanregungen auf aushärtenden Beton, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, 03.2023
- [4] Bonzel, J.; Schmidt, M.: Einfluß von Erschütterungen auf frischen und auf jungen Beton, 1980
- [5] Ziegler A., Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, 2017
- [6] Hintzen und Grube, Verminderung der Rissbildung in Tunnelinnenschalen aus Ortbeton, „Bauingenieur“ 3/2000
- [7] Astra, Technisches Merkblatt 22 001-14130, V2.01 vom 01.01.2022