

Fabian Malm, Christian Große

## Moderne Ultraschallmesstechnik für die Qualitätssicherung zementgebundener Werkstoffe

Die Überwachung von zementgebundenen Baustoffen (z. B. von Beton oder Mörtel) während der Bauphase ist im Hinblick auf die Qualitätssicherung und Dauerhaftigkeit notwendig. Bei der Untersuchung der Frischbeton-Eigenschaften während der Erstarrung und dem Erhärten sind konventionelle Methoden, wie der Vicat-Versuch, die Bestimmung des Ausbreitmaßes oder die Untersuchung von Druckwürfeln Stand der Technik. Eine Untersuchung der Eigenschaften mittels Ultraschallverfahren bietet, im Vergleich zu diesen konventionellen Methoden, die Möglichkeit, Messungen objektiver und präziser zu gestalten.

Die Bestimmung betontechnologischer Eigenschaften von Frischbeton verbessert die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Betonbauwerken. Aktuelle Regelwerke stellen die DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 dar. Die darin beschriebenen konventionellen Prüfverfahren (Ausbreitversuch, Vicat-Nadel, Verdichtungsversuch etc.) besitzen für die Qualitätssicherung allerdings nur einen eingeschränkten Informationsgehalt und geben kaum Aufschluss über relevante betontechnologische Parameter zur Gewährleistung der Sicherheit moderner Bautechnik. Belastbare Aussagen über den Verlauf der Erhärtung und der Hydratation von zementgebundenen Materialien können so beispielsweise nicht gewonnen werden, da die konventionellen Techniken nur eine Momentaufnahme der Betoneigenschaften wiedergeben und ungeeignet für ein modernes Qualitätsmanagement sind. Mit der Verbesserung messtechnischer Methoden und den gestiegenen Ansprüchen an die Qualitätsprüfung gewinnt die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) gegenwärtig zunehmend an Bedeutung. Erste Ansätze, hier Abhilfe zu schaffen, sind Vorschläge zur Standardisierung der Qualitätssicherung von Frischbeton der Organisation Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux [13] oder die bereits verbindlich eingeführte ZTV-ING, Teil 5 „Tunnelbau“ zur Überwachung der Dicken von Tunnelinnenschalen [2007]. Bereits zahlreiche Veröffentlichungen zeigen [2, 5, 8, 9, 12], dass mit Hilfe der Ultraschalltechnik eine zerstörungsfreie, objektive und reproduzierbare Analyse des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens in-situ durchgeführt werden kann. Die hier dargestellten Untersuchungen sollen die Sensitivität dieser zerstörungsfreien Prüfmethode hinsichtlich unterschiedlicher Frischmörtel- und Frischbetonzusammensetzungen aufzeigen. Sie funktionieren dabei ähnlich wie ein Fingerabdruck und können eine Betonmischung detailliert charakterisieren. Mit den aufgezeichneten Ultraschallsignalen und den am Lehrstuhl entwickelten mathematischen Approximationen ist es beispielsweise möglich, die individuelle Entwicklung elastischer Materialparameter wie Elastizitätsmodul, Schubmodul und Poissonzahl über das Probenalter darzustellen, um auf deren Eigenschaften im erhärteten Zustand zu schließen.

### Ultraschalllaufzeit-Verfahren mit FreshCon-Gerät

Mithilfe des FreshCon-Systems der Fa. Smartmote (TTI GmbH – TGU Smartmote) ist es möglich, vollautomatisiert Ultraschallmessungen durchzuführen, um den zeitlichen Verlauf des Erstarrungs- und Erhärtungsverfahrens von Frischbeton bzw. Frischmörtel zu charakterisieren. Zur Analyse des Ultraschallsignals werden die Auswerteparameter Wellenform, P- und S-Wellenlaufzeit (Geschwindigkeit), Amplitude (Energie) und Amplitudenspektrum (Frequenz) verwendet.

Der Messaufbau besteht aus einem Messcomputer mit Data Acquisition Card (DAQ), Signalverstärker, Impulsgenerator, digitalem Oszilloskop und einem Messbehälter mit Kompressionswellen- und Scherwellensensorpaar. Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau in einer Klimakammer während einer Messung (links) bzw. die einzelnen Komponenten des Messbehälters (rechts) mit bereits erhärteter Mörtelprobe.

### Theoretische Grundlagen der Ultraschallausbreitungsgeschwindigkeit während der Erstarrungs- und Erhärtungsphase

Die Hydratation von Zement und zementhaltigen Materialien kann als Übergang von einer visko-elastischen Suspension hin zu einem elastischen porösen Festkörper angesehen werden. Nach [18] können innerhalb dieses Übergangs drei markante Phasen unterschieden werden, in denen sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Primärwelle ändert: (1) Ruhephase (dormant phase), (2) Beschleunigungsphase (acceleration phase) und (3) Entschleunigungs- bzw. Verzögerungsphase (deceleration phase). Eine schematische Darstellung zeigt Bild 2.

Während der Ruhephase wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit größtenteils durch den hohen Luftporengehalt kurz nach dem Mischvorgang und dem Luftgehalt des Anmachwassers bestimmt. Die Hydratation hat noch nicht begonnen, wodurch die Zementpartikel isoliert und vom Wasser umschlossen vorliegen. Eine Primärwellengeschwindigkeit kann bereits gemessen werden, ist aber stark beeinflusst durch den Impedanzunterschied zwischen den Medien Luft und Beton bzw. Mörtel. Dadurch verliert die sich ausbreitende Welle über 80 % ihrer Energie an den Grenzflächen durch Reflektion [4]. Die experimentelle Messung der S-Wellengeschwindigkeit ist zu diesem Zeitpunkt schwierig, da nahezu keine Scherkräfte von der Suspension aufgenommen werden.

In der Beschleunigungsphase verzeichnet die P-Wellengeschwindigkeit einen starken Anstieg. Hierfür sind zwei Gründe maßgebend: das Bluten des Betons bzw. des Mörtels und die beginnende Bildung von Hydratphasen sowie die Ettringitbildung [7]. Als Folge dessen nimmt die Porosität bzw. der Gehalt an Luftporen ab und die Aus-

breitungsgeschwindigkeit erhöht sich. Mit der Bildung von Hydratphasen geht der Baustoff von einem Fluid zu einem Festkörper über, mit der Folge eines verstärkten Anstiegs der P- und S-Wellengeschwindigkeit.

Während der Entschleunigungsphase steigen die Primär- und Sekundärwellengeschwindigkeit geringfügig weiter an, bis die Erhärtung des Zementsteins komplett abgeschlossen ist. Die vollständige Ausbildung der Hydratphasen (Portlandit und C-S-H) schreitet fort. Dabei lässt sich der Anstieg der Geschwindigkeit mit der einhergehenden Festigkeitsentwicklung begründen.

## Laborversuche

Um die individuellen Erhärtungs- und Erstarrungseigenschaften der zementgebundenen Baustoffe in Abhängigkeit ihrer einzelnen Materialzusammensetzungen zu analysieren, wurden für die folgende Darstellung aus einem umfangreichen Versuchsprogramm, durchgeführt am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung der TU München, exemplarisch einige Beispiele (Bild 3) ausgewählt. Interessante Zeitpunkte sind dabei die Übergangsmomente von Phase (1) und (2) sowie (2) und (3), die mathematisch als Wendepunkte beschrieben werden können. Bedingt durch das Messsystem und die Auswerteanalyse der P-Wellengeschwindigkeit ergeben sich teilweise streuende Messwerte, welche zu einem „zackigen“ Kurvenverlauf führen (Bilder 2 und 3).

Der verzögernde Einfluss auf den Verlauf der Zementhydratation (Bild 4, oben) durch die Zugabe von Steinkohleflugasche [6, 15] kann an Geschwindigkeitsmessungen von Mörtel gezeigt werden. Im Vergleich zur Referenzprobe der Normmischung (Norm), entwickelt sich die P- und die S-Wellengeschwindigkeit mit Flugascheanteil (50C50FA\_4) langsamer. Nach 25 Stunden liegen die Werte wieder im Bereich der Referenzmischung. Als charakteristischer Beginn von Phase (2) kann der P-Welle (S-Welle) ein Zeitpunkt von ca. 2 Stunden (ca. 3,5 Stunden) zugeordnet werden. Nach Ende der „Ruhephase“ beginnt die Ausbildung der festigkeitsbestimmenden Hydratphasen bzw. CSH-Phasen. Der später einsetzende Anstieg der S-Welle ist mit dem verzögernden Einsetzen des Verklittens der Partikel zu erklären. Erst ab diesem Zeitpunkt können vom Medium Scherkräfte übertragen werden. Während der „Beschleunigungsphase“, nach zwei Stunden (bzw. dreieinhalb Stunden), ist ein signifikanter Anstieg der Wellengeschwindigkeiten bis nach ca. 22 Stunden (bzw. 14 Stunden), bedingt durch die gegenseitige Verzahnung der Hydratationsprodukte, zu beobachten. Die Porosität des Gefüges und der Gehalt an Luftporen sinken, mit der Folge einer Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Nach diesem Anstieg pendeln sich die Wellengeschwindigkeiten auf einen nahezu konstanten Wert ein. Mit dem Einsatz des Mahlhilfsmittels Thriethanolamin (50C50FA\_TEA) wird in der Zementindustrie die puzzolanische Reaktion der beigetzten Steinkohleflugaschen beschleunigt. Das bedeutet, dass die festigkeitsbildende chemische Reaktion, die vergleichbar mit der Zementhydratation ist, schneller beginnen und vorschreiten kann. Dieses Verhalten lässt sich deutlich in der Anfangsphase erkennen. Nach ca. 13 Stunden Hydratation gleichen sich die P- und S-Wellengeschwindigkeiten von 50C50FA\_4 und 50C50FA\_TEA nahezu wieder an. Ein

ähnliches Verhalten lässt sich für die Mischung 50C50QM mit Quarzmehl erkennen. Die Füllerwirkung und auch die Begünstigung der Keimbildung der Hydratationsprodukte [10] sind für die erhöhte Ausbreitungsgeschwindigkeit maßgeblich verantwortlich.

Der Einfluss des Luftgehalts im Frischmörtel aus Bild 2 lässt sich experimentell an den Mischungen Norm und Norm\_UD zeigen. Die Herstellung von Norm\_UD erfolgte bei Unterdruck (80 mBar), sodass eine optimierte Verdichtung des Frischbetons mit kleinstmöglichem Luftgehalt entstand. In der Ruhephase startet somit die P-Wellengeschwindigkeit aufgrund der höheren Dichte bereits mit Werten um ca. 1700 m/s und liegt knapp über der Wellengeschwindigkeit in Wasser, wogegen die S-Welle, simultan zu den übrigen Proben, kaum detektierbar ist.

In Bild 4 (unten) sind die Ergebnisse der Experimente 50C50FA\_4 und 50C50FA\_TEA mit den jeweils bestimmten Erstarrungszeiten nach Vicat (vertikale Linien) dargestellt. Der beschleunigende Einfluss des Additivs TEA auf die puzzolanische Reaktion kann in diesem Diagramm anhand der verkürzten Erstarrungszeit gezeigt werden. Die Erstarrungszeit beschreibt in diesem Zusammenhang den Zeitunterschied zwischen Erstarrungsende (EE) und Erstarrungsbeginn (EB). Durch den Einfluss von TEA wird diese von 3:40 auf 1:30 Stunden reduziert. Unter Berücksichtigung des systematischen Auswertefehlers nach Vicat von  $\pm 10$  min lässt sich eine gute Korrelation der Wendepunkte der S-Wellengeschwindigkeit für beide Mischungen mit dem Erstarrungsbeginn finden.

Abschließend sind in Bild 5 die Ergebnisse der elastischen Moduli und der statisch bestimmten Druckfestigkeiten (z. B. für Beton in DIN EN 12390-3 und für Mörtel in DIN EN 196-1) über eine Versuchszeit von 100 Tagen und der Wellengeschwindigkeit von 150 Stunden ( $\text{Zeit}_{\text{Druckfestigkeit}}$  in d und  $\text{Zeit}_{\text{Geschwindigkeit}}$  in h) gegenübergestellt. Vergleichende Ansätze wurden bereits von Haach et al. 2015 [2], Han et al. 2004 [3], Shariq et al. 2013 [16] und Trtnik et al. 2009 [17] untersucht. Die Berechnung sowie die Zusammenhänge der elastischen Materialparameter sind z. B. in [5] ausführlich beschrieben. Bei Betrachtung der Kurvenverläufe des dynamischen E-Moduls und Schubmoduls mit den Druckfestigkeiten ist eine Korrelation zu vermuten. Somit könnte aus dem Verlauf der Wellengeschwindigkeiten und der anschließenden E-Moduln-Bestimmung auf die langfristige Druckfestigkeit von individuellen Materialzusammensetzungen geschlossen werden (Bild 5).

## Fazit

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass mithilfe der zerstörungsfreien Prüfung die kontinuierlichen Entwicklungen unterschiedlicher Frischmörtelmischungen nachverfolgt und verschiedene Mischungen unterschieden werden können. Die Einflüsse von bekannten Zusatzstoffen (Flugasche, Quarzmehl) und Zusatzmitteln (Mahlhilfsmittel TEA) auf die Zementhydratation konnten mittels Ultraschallausbreitungsgeschwindigkeit grafisch abgebildet werden. Unter Verwendung einer mathematischen Ausgleichsfunktion wurden charakteristische Punkte zur Beschreibung der Funktionsverläufe gefunden und diese miteinander verglichen. Ein Vergleich mit konventionellen Verfahren zur Be-

stimmung der Erstarrungszeiten nach Vicat ist generell fragwürdig, da diese Methode nur eine begrenzte Aussagekraft hinsichtlich mechanischer und struktureller Eigenschaften des Hydratisierungsverlaufs von Zementstein liefert. Erste Ansätze zur Prognostizierung der langfristigen Entwicklung der statischen Druckfestigkeit aus dem Verlauf des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens sind gegeben und müssen weiter untersucht werden.

#### Literatur

- [1] ZTV-ING – Teil 5 „Tunnelbau“ (2007): Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise – Anhang A: „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen“ (RI-ZFP-TU) für den Geschäftsbereich der Bundesfernstraßen.
- [2] Haach; Juliani; Roz (2015): Ultrasonic evaluation of mechanical properties of concretes produced with high early strength cement. *Construction and Building Materials*, Vol. 96, p. 1–10, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.139>
- [3] Han; Kim (2004): Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, p. 1219–1227.
- [4] Harker; Temple (1988): Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 21, p. 1576.
- [5] Heiduck (2009): Untersuchung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von Mörtel mit Kompressions- und Scherwellen. Diplomarbeit (Thesis), Zerstörungsfreie Prüfung und Überwachungstechnik, MPA Universität Stuttgart, Stuttgart 2009.
- [6] Hüttl (2000): Der Wirkungsmechanismus von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff. Dissertation (Thesis), Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, TU Berlin 200.
- [7] Kamada; Uchida; Rokugo (2005): Nondestructive Evaluation of Setting and Hardening of Cement Paste Based on Ultrasonic Propagation Characteristics. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 3, p. 343–353, doi: [10.3151/jact.3.343](https://doi.org/10.3151/jact.3.343)
- [8] Krüger; Grosse; Lehmann (2013): Automated Shear-Wave Techniques to Investigate the Setting and Hardening of Concrete in Through-Transmission. *Nondestructive Testing of Materials and Structures* (Güneş, O., Akkaya, Y. eds.), Springer Netherlands, Dordrecht. p. 431–436.
- [9] Krüger, et al. (2011): Zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall – das FreshCon-System. *Ernst & Sohn Special „Messtechnik im Bauwesen“*, p. 88–92.
- [10] Locher (2000): Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf, ISBN 3764004002 9783764004002.
- [11] Müller (2012): Dynamische E-Modul Bestimmung mittels FreshCon im Vergleich zu Schwingungsanalyse und der statischen Bestimmung. Bachelor (Thesis), Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München 2012.
- [12] Reinhardt; Grosse (2004): Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 18, p. 145–154, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.10.002>
- [13] RILEM Technical Committee (2011): Recommendation of RILEM TC 218-SFC: Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials. *Materials and Structures*, Vol. 44, p. 1047–1062, doi: [10.1617/s11527-011-9734-9](https://doi.org/10.1617/s11527-011-9734-9)
- [14] Robeyst (2010): Monitoring setting and microstructure development in fresh concrete with the ultrasonic through-transmission method. PhD (Thesis), Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Ghent University 2010.
- [15] Schießl (1990): Wirkung von Steinkohleflugaschen in Beton. *Beton* 40, Vol. 12, p. 519–523.
- [16] Shariq; Prasad; Masood (2013): Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, Vol. 40, p. 944–950, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070)
- [17] Trtnik; Kavčič; Turk (2009): Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, Vol. 49, p. 53–60, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2008.05.001>
- [18] Ye (2003): Experimental Study and Numerical Simulation of the Development of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials. PhD (Thesis), Applied Sciences, TU Delft 2003.

#### Weitere Informationen:

Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm  
 Fabian Malm, Baumbachstraße 7, 81245 München  
 Tel. (089) 289-270 74, (089) 289-272 22  
[fabian.malm@tum.de](mailto:fabian.malm@tum.de), [zfp@cbm.bgu.tum.de](mailto:zfp@cbm.bgu.tum.de)  
[www.zfp.tum.de](http://www.zfp.tum.de)



**Bild 1.** links: Aufbau des FreshCon-Geräts in einer Klimakammer ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi = 60\text{ }\%$ ), rechts: Aufbau des Messbehälters (Fotos: Müller 2012 [11])

	Bezeichnung in Abbildungen	Zementart (DIN 197-1)	Hersteller/ Werk	w/b [-]	Zusammensetzung [kg/m <sup>3</sup> ]										
					Zement	Zusatzstoff FA <sup>(a)</sup> od. QM <sup>(b)</sup>	CEN-Sand	Sand 0/4	Sand 0/2	Kies 2/8	Kies 4/8	Kies 8/16	LP <sup>(c)</sup>	FM <sup>(d)</sup>	Add <sup>(e)</sup>
Mörtel	Norm	I 42,5 R	Dyck/ Deu <sup>(f)</sup>	0,50	450	-	1350	-	-	-	-	-	-	-	-
	Norm_UD	I 42,5 R	Dyck/ Deu <sup>(f)</sup>	0,50	450	-	1350	-	-	-	-	-	-	-	-
	50C50FA_4	I 42,5 R	Dyck/ Deu <sup>(f)</sup>	0,50	225	225	-	1350	-	-	-	-	-	-	-
	50C50QM	I 42,5 R	Dyck/ Deu <sup>(f)</sup>	0,50	225	225	-	1350	-	-	-	-	-	-	-
	50C50FA_TEA	I 42,5 R	Dyck/ Deu <sup>(f)</sup>	0,50	225	225	-	1350	-	-	-	-	-	-	0,09

<sup>(a)</sup> Flugasche, SAFAMENT RDK

<sup>(b)</sup> Quarzmehl, mehr als 98 M.-% kristallines SiO<sub>2</sub>

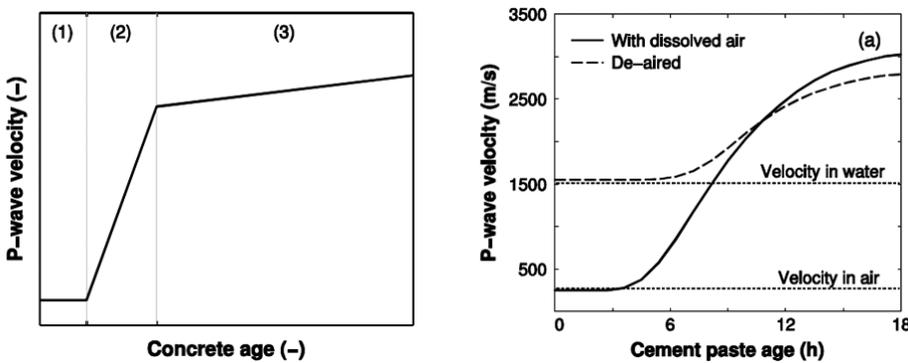
<sup>(c)</sup> Luftporenbildner, Sika LPS A

<sup>(d)</sup> Fließmittel, BASF MasterGlenium51

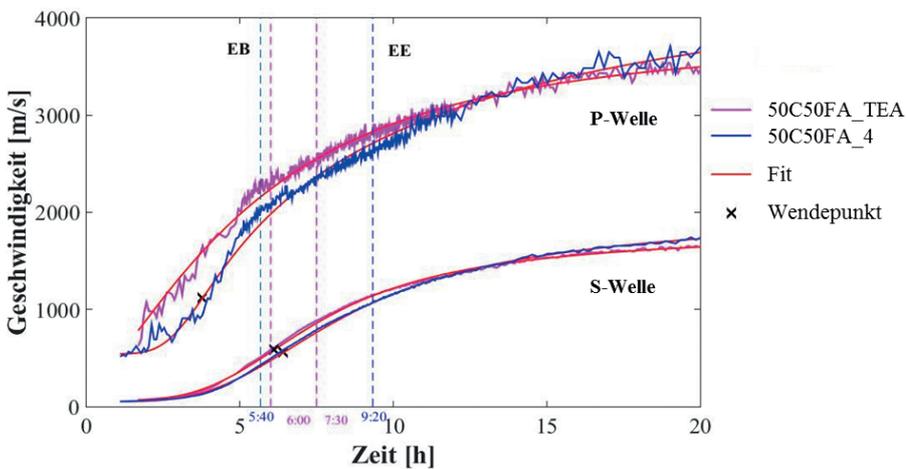
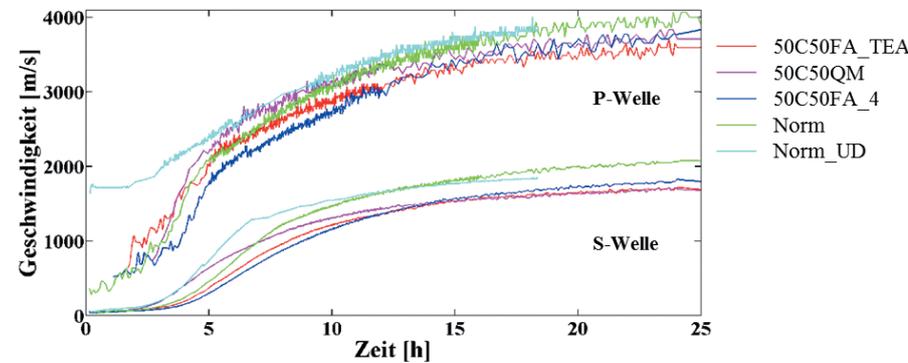
<sup>(e)</sup> Organisches Additiv, Triethanolamin (TEA)

<sup>(f)</sup> Dyckerhoff/ Deuna

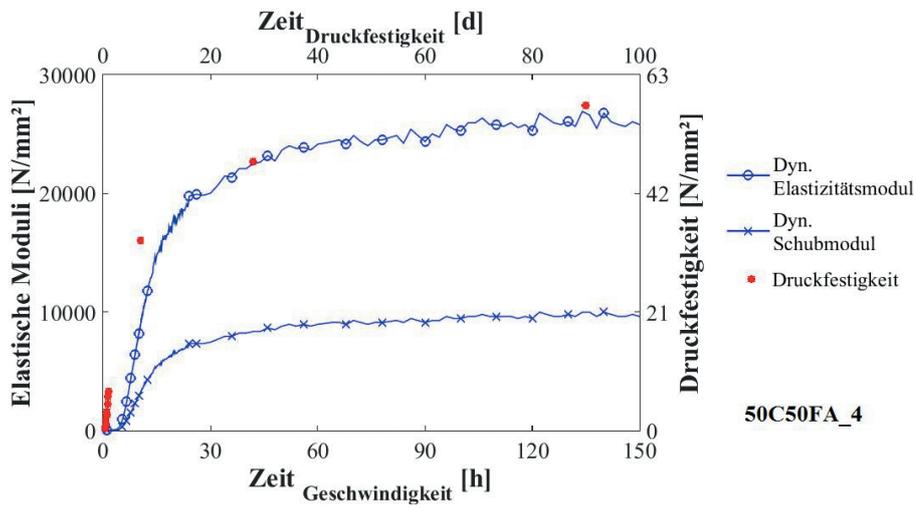
**Bild 2.** links: Vereinfachte Darstellung der Primärwellengeschwindigkeit während der drei charakteristischer Phasen Ruhephase(1), Beschleunigungsphase (2) und Entschleunigungsphase (3) [18]. rechts: Veränderung der Primärwellengeschwindigkeit: in Zementpaste (Portlandzement, w/z = 0,5) mittels des Modells von Harker et al. 1988 [4] (Grafiken: Robeyst 2010 [14])



**Bild 3.** Zusammensetzungen [kg/m<sup>3</sup>] der untersuchten Mörtelmischungen



**Bild 4.** oben: Wellengeschwindigkeiten der in Bild 4 aufgelisteten Mischungen, unten: Wellengeschwindigkeiten der Mischungen 50C50FA\_4 und 50C50FA\_TEA, deren Fitfunktionen mit Wendepunkten, sowie den jeweiligen Zeitpunkten Erstarrungsbeginn (EB) und -Ende (EE)



**Bild 5.** Elastische Module (linke Ordinate) und Würfeldruckfestigkeiten (rechte Ordinate) über einen Versuchszeitraum von 150 Stunden bzw. 100 Tagen – E-Modul fokussiert (Grafiken 3, 4 und 5: Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm)

**Alle Bilder zu kleine Auflösung!**